

Stufenlose Strangspannungsregelung in der Niederspannung

Von der
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von

Mara Holt, M. Sc.

Dortmund, 2022

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Jenau

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 2022

Kurzfassung

Aufgrund der zunehmenden Einspeisung durch dezentrale Energieerzeugungsanlagen und den Anstieg an Verbrauchern mit hoher Gleichzeitigkeit, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, kommt es insbesondere in weitflächigen Niederspannungsnetzen zu Problemen bei der Einhaltung des Spannungsbandes. Für den daher erforderlichen Netzausbau bietet gerade bei langen Netzausläufern in der Niederspannung der Einsatz von Strangspannungsreglern eine kosteneffiziente Alternative zu konventionellen Maßnahmen. Die aktuell bekannten Umsetzungen bewirken jedoch eine Einprägung von Netzzrückwirkungen oder einen erhöhten Aufwand für den Netzbetreiber hinsichtlich der Instandhaltung. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren entwickelt und erforscht, das eine netzzrückwirkungsarme und robuste Strangspannungsregelung ermöglicht. Das Verfahren beruht auf einem stufenlosen Strangspannungsregler, der auf Basis von variablen Induktivitäten arbeitet. Neben der allgemeinen Wirkungsweise und Aufbaumöglichkeiten eines solchen Strangspannungsreglers werden Ansteuerungs- und Regelungsverfahren untersucht, welche das statische und dynamische Verhalten der stufenlosen Spannungsregelung netzverträglich gestalten. Dabei wird die Netzverträglichkeit des entwickelten Verfahrens über eine Analyse der Netzauswirkungen sowie eine Erprobung im Labor und im Feld bewertet.

Abstract

Due to the increasing power feed-in of distributed energy resources and the rise in consumers with high simultaneity, such as electric vehicles and heat pumps, voltage violations occur especially in wide-area low voltage grids. These phenomena force grid expansions. For long low voltage lines, the use of line-voltage-regulators offers a cost-efficient alternative to conventional grid expansion. However, the currently known implementations cause various side effects or an increased effort for the grid operator regarding maintenance. For this reason, this thesis develops and analyzes a method of a line-voltage-regulator with less side effects but a robust design. The method is based on a stepless line-voltage-regulator that operates with variable inductors. In addition to the general operation and designs of such voltage regulation, control approaches are considered to enable a grid-compatible static and dynamic regulation behavior. The grid-compatibility of the developed method is evaluated by analyzing the grid effects and by conducting tests in the laboratory and in the field.

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³) an der TU Dortmund entstanden. Hier erlebte ich eine überaus angenehme und offene Zusammenarbeit mit meinen Kolleginnen und Kollegen sowie einer Vielzahl an Studierenden, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz für die Betreuung dieser Doktorarbeit. Dabei möchte ich mich insbesondere für sein großes Vertrauen und die daraus resultierenden Forschungsfreiheiten bedanken, aber auch für die Vielzahl an gebotenen Möglichkeiten zur fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung. Herrn Prof. Dr.-Ing Frank Jenau danke ich für die intensive Auseinandersetzung mit meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Ein weiterer Dank geht an meinen langjährigen Projektpartner Herrn Gerhard Große-Holz von der EBG in Lünen. Die lehrreiche und gleichzeitig sehr fruchtbare Zusammenarbeit mit ihm legte den Grundstein dieser Arbeit. Darüber hinaus gilt mein Dank den Stadtwerken Lünen, die uns die Umsetzung eines umfangreichen Feldtests in ihrem Netz ermöglichten.

Bei allen kritischen Lesern dieser Arbeit bedanke ich mich für ihre Korrekturvorschläge und konstruktiven Anregungen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben und stets meine Interessen gefördert haben. Meiner Schwester Lisa, meinen Freunden und vor allem meinem Freund Tobbe danke ich von Herzen für den permanenten Zuspruch und den persönlichen Rückhalt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Struktur der Arbeit	3
2	Grundlagen zur Spannungshaltung und Strangspannungsregelung	5
2.1	Statische Spannungshaltung in der Niederspannung	5
2.1.1	Beeinflussung der Versorgungsspannung	5
2.1.2	Maßnahmen zur Spannungshaltung	7
2.2	Strangspannungsregelung in der Niederspannung	13
2.2.1	Aufbau und Wirkungsweise	13
2.2.2	Strangspannungsreglerarten	15
2.2.3	Regelungskonzepte	22
2.2.4	Auswirkung auf die Spannungsqualität	23
2.3	Variable Induktivität als Stellglied eines Strangspannungsreglers	28
2.3.1	Grundlagen zum Verhalten einer variablen Induktivität	28
2.3.2	Aufbau und Wirkungsweise einer variablen Induktivität	32
2.3.3	Verlauf der Induktivität	35
2.3.4	Anwendungen in der Energietechnik	36
3	Strangspannungsregler mit variabler Induktivität	39
3.1	Konzept	39
3.1.1	Aufbau	39
3.1.2	Ersatzschaltbild	40
3.1.3	Systemgleichungen	42
3.2	Betriebsverhalten	44
3.2.1	Labora Aufbau	44
3.2.2	Verhalten im unbelasteten Betrieb	46
3.2.3	Verhalten im belasteten Betrieb	51
3.2.4	Verhalten der DC-Ansteuerung	56
3.3	Netzauswirkungen	58
3.3.1	Elektrische Kenndaten	58
3.3.2	Auswirkung auf die Spannungsqualität	63
3.4	Zusammenfassung	65

4	Weiterentwicklung zum netzrückwirkungsarmen Strangspannungsregler	67
4.1	Konzept	67
4.1.1	Aufbau	67
4.1.2	Ersatzschaltbild	68
4.1.3	Systemgleichungen	70
4.2	Umsetzung und Betriebsverhalten	74
4.2.1	Labora Aufbau	74
4.2.2	Kombinierte Ansteuerung	79
4.2.3	Verhalten bei unterschiedlichen Netzsituationen	83
4.2.4	Vergleich der verschiedenen Prototypen	84
4.3	Netzauswirkungen	88
4.3.1	Kenndaten	88
4.3.2	Auswirkung auf die Spannungsqualität	94
4.4	Zusammenfassung	96
5	Regelung des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers	97
5.1	Regelungsentwurf	97
5.1.1	Modellierung der nichtlinearen Regelstrecke	97
5.1.2	Design einer kaskadierten Regelung mit adaptiven Reglern	103
5.1.3	Validierung	109
5.2	Steuerungs- und Regelungskonzept	111
5.2.1	Ein- und Ausschaltvorgang	111
5.2.2	Dynamische Sollwertvorgabe	112
5.2.3	Phasenunabhängige und phasengleiche Spannungsregelung	113
5.2.4	Festlegung der Regelparameter	114
5.3	Zusammenfassung	117
6	Erprobung des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers	119
6.1	Erprobung im Labor	119
6.1.1	Aufbau und Konfiguration	119
6.1.2	Auswirkung auf den Netzausläufer im Labor	121
6.2	Feldtest	125
6.2.1	Standortanalyse	125
6.2.2	Felderprobung	129
6.3	Zusammenfassung	139

7 Fazit	141
7.1 Zusammenfassung	141
7.2 Wesentliche Ergebnisse und Beitrag der Arbeit	145
7.3 Ausblick	145
Literatur	147
Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	159
Abkürzungsverzeichnis	161
Symbolverzeichnis	162
Abbildungsverzeichnis	165
Tabellenverzeichnis	169
A Anhang	171
A.1 Elektrische Kenndaten	171
A.2 Kenndatenberechnung für die Strangspannungsregler	175

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Energiewende in Deutschland verfolgt das gesellschaftliche und politische Ziel, die bestehende Nutzung von nuklearen und fossilen Energieträgern durch eine nachhaltige Energieversorgung mit erneuerbaren Energien abzulösen. In diesem Zusammenhang wird der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung massiv ausgebaut. Der Anteil konnte bereits von 7% im Jahr 2000 auf 46% im Jahr 2020 gesteigert werden [1]. Die aktuelle Politik strebt eine Weiterführung dieser Entwicklung an mit dem Ziel, dass noch vor dem Jahr 2050 der gesamte in Deutschland erzeugte oder verbrauchte Strom treibhausgasneutral produziert wird [2]. Dabei erfolgt die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien im Gegensatz zur konventionellen Stromerzeugung überwiegend dezentral und unterliegt zum großen Teil meteorologischen Einflüssen. Dies resultiert in neuen Herausforderungen an das elektrische Energieversorgungsnetz, das ursprünglich für konventionelle Großkraftwerke ausgelegt wurde.

Eine Herausforderung stellt die massive Integration von dezentralen Energieerzeugungsanlagen im Verteilnetz dar, die in einem veränderten Lastfluss und einer verstärkten Netzauslastung resultiert. Neben Betriebsmittelüberlastungen treten in diesem Zusammenhang Probleme bei der Einhaltung des nach EN 50160 geforderten Spannungsbandes auf. Diesbezüglich kamen unterschiedliche Verteilnetzstudien der letzten Jahre zu dem Ergebnis, dass in ländlichen Niederspannungs (NS)-Netzen Spannungsbandprobleme den entscheidenden Faktor für die Begrenzung der Aufnahmefähigkeit von dezentralen Energieerzeugungsanlagen darstellen [3]–[7]. Um den weiteren Ausbau von dezentralen Energieerzeugungsanlagen zu gewährleisten, ist daher ein Netzausbau zwingend erforderlich. Darüber hinaus führt die zusätzliche Zunahme der Last durch neue Verbraucher mit hoher Gleichzeitigkeit, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, zu einem weiteren Netzausbaubedarf [8], [9]. Dabei sind erneut bei langen NS-Leitungen Spannungsbandprobleme mit die Ursache für den Ausbaubedarf.

Um Spannungsbandproblemen zu begegnen, werden beim konventionellen Netzausbau beispielsweise unterdimensionierte Leitungen ausgetauscht, parallele Leitungen hinzugefügt oder neue Mittelspannungs (MS)-Anschlüsse installiert, um die Länge der NS-Leitungen zu verkürzen. Derartiger konventioneller Netzausbau verbessert neben der Spannungshaltung im Allgemeinen zusätzlich die maximale Stromtragfähigkeit, verringert die Netzimpedanz und steigert damit die Störfestigkeit, ist jedoch

häufig mit hohen Kosten und großem Aufwand verbunden. Daher ist es attraktiv, innovative Maßnahmen in Betracht zu ziehen, welche die Kosten für den erforderlichen Netzausbau senken können. Gerade bei Spannungsbandproblemen in einzelnen langen Netzausläufern der NS erweist sich ein Strangspannungsregler (SR) oftmals als eine kosteneffiziente Alternative zum konventionellen Netzausbau. Ein SR wird dazu direkt in den Netzstrang eingebaut, der Probleme bei der Spannungshaltung aufweist. Durch das Einprägen einer Zusatzspannung wird die Spannung des nachgeschalteten Netzbereichs angehoben oder abgesenkt. Damit ermöglicht ein SR eine direkte Spannungsregelung im Netz und verhindert Spannungsbandverletzungen.

Um eine sinnvolle Alternative zum konventionellen Netzausbau darzustellen, sollte ein SR robust sein und einen geringen Wartungsbedarf besitzen, so dass der Mehraufwand für den Netzbetreiber durch das zusätzliche Einbringen dieser Komponente in das Netz so niedrig wie möglich gehalten wird. Zudem sollten die Netzzrückwirkungen eines SR kleinstmöglich ausfallen. Dies gilt insbesondere, da das Einsatzgebiet eines SR in der Regel ein langer Netzausläufer ist, der sich über eine hohe Netzimpedanz und folglich eine geringe Störfestigkeit auszeichnet, und damit besonders anfällig auf Störgrößen reagiert. Bestehende Störaussendungen durch andere Netzteilnehmer können in diesen Netzen bereits zu starken Auswirkungen auf die Spannungsqualität führen, wodurch eine Gefährdung der Spannungsqualität durch ein ungünstiges Zusammenwirken von Störaussendungen insgesamt wahrscheinlicher wird. Im selben Zusammenhang sollte eine Anhebung der Netzimpedanz durch das zusätzliche Einbringen eines SR in das Netz so gering wie möglich gehalten werden, so dass eine Vergrößerung des bestehenden Störpegels im Netz vermieden wird und darüber hinaus die Kurzschlussleistung des Netzes weiterhin groß genug für die bestehenden Schutzverfahren der Leitung ist.

Aktuell regeln die meisten SRs die Netzspannung allerdings in Stufen aus, wodurch Spannungssprünge in das Netz eingepreßt werden, die Flicker verursachen. Damit ermöglicht ein gestufter SR zwar eine statische Spannungshaltung und bewirkt somit eine Verbesserung der Spannungsqualität, gleichzeitig wird durch die Flickeremission jedoch eine neue Störaussendung in das Netz eingebracht, weshalb ein Einsatz von gestuften SR gegebenenfalls unerwünscht ist. Einen naheliegenden Ansatz zur Vermeidung von Flickeremission stellt eine auf Leistungselektronik basierende stufenlose Strangspannungsregelung dar. Leistungselektronische Schaltungen besitzen jedoch eine relativ hohe Ausfallrate, wodurch die Zuverlässigkeit des SR gesenkt wird und der Mehraufwand für den Netzbetreiber durch den erhöhten Wartungs- und Reparaturaufwand gesteigert wird.

Eine andere Möglichkeit zur stufenlosen Strangspannungsregelung basiert auf der Anwendung einer variablen Induktivität (VI), die als Stellglied im SR zum Einsatz kommt. Eine VI kann kontinuierlich verändert werden, weswegen ein darauf basierender SR prinzipiell eine stufenlose Spannungsregelung ermöglicht. Darüber hinaus gilt eine VI aufgrund von fehlenden beweglichen Teilen als robust, wartungsarm und langlebig, wodurch für den SR eine stufenlose Spannungsregelung mit einem robusten Betrieb vereint wird. Aufbaubedingt können allerdings Netzzrückwirkungen wie die Aussendung von Oberschwingungen erwartet werden. Das konkrete Ausmaß der Netzzrückwirkungen ist jedoch aktuell nicht bekannt. Demnach fehlt es an SR-Umsetzungen, die sowohl einen netzzrückwirkungsarmen als auch einen robusten Betrieb ermöglichen.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Erforschung eines Konzeptes für eine netzzrückwirkungsarme und robuste Strangspannungsregelung. Dazu wird auf das Konzept eines SR auf Basis von VIs zurückgegriffen, das in seiner einfachsten Umsetzung bereits eine stufenlose und robuste Spannungsregelung ermöglicht. Anhand dieser Umsetzung sollen die allgemeine Wirkungsweise von SRs mit VIs offengelegt, deren Netzauswirkungen klassifiziert und Ursachen für Netzzrückwirkungen identifiziert werden. Um die dabei identifizierten Schwachstellen zu beheben, sind Optimierungsansätze zu entwickeln und zu analysieren. Als Ergebnis soll ein Konzept zur netzzrückwirkungsarmen und robusten Strangspannungsregelung auf Basis von VIs entstehen. In dem Zusammenhang sind außerdem Steuerungs- und Regelungsverfahren zu untersuchen und zu bestimmen, die das dynamische Verhalten der Strangspannungsregelung netzverträglich gestalten.

1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich neben der Einleitung in Kapitel 1 in sechs weitere Kapitel.

Kapitel 2 liefert den aktuellen Stand der Technik und die wesentlichen Grundlagen zur Spannungshaltung sowie zur Strangspannungsregelung in der Niederspannung. Des Weiteren wird das Prinzip einer VI vorgestellt, die in dieser Arbeit als Stellglied für die stufenlose Strangspannungsregelung dient.

Kapitel 3 beschreibt das Konzept einer einfachen Umsetzung des SR mit VI und analysiert dessen Wirkungsweise und Betriebsverhalten. Dazu wird das Ersatzschaltbild und die Systemgleichungen des SR aufgestellt. Zudem erfolgt eine umfangreiche messtechnische Analyse eines Prototyps im Labor. Aufbauend auf den analytischen Betrachtungen und den prototypischen Untersuchungen im Labor werden die Netzauswirkungen des Konzeptes offengelegt und die Ursachen für Netzzrückwirkungen identifiziert.

Kapitel 4 stellt eine Weiterentwicklung hin zu einem netzzrückwirkungsarmen SR vor. In der Weiterentwicklung werden die identifizierten Schwachstellen der einfachen Umsetzung durch verschiedene Optimierungsansätze behoben. Dabei umfassen die Ansätze bauliche und ansteuerungstechnische Maßnahmen. Neben der Herleitung des Ersatzschaltbildes und der Systemgleichung erfolgt auch hier eine umfangreiche messtechnische Analyse der verschiedenen Optimierungsvarianten im Labor. Über die analytischen und messtechnischen Betrachtungen werden die Netzauswirkungen des weiterentwickelten Konzeptes klassifiziert und mit denen der einfachen Umsetzung verglichen.

Kapitel 5 betrachtet Steuerungs- und Regelungsverfahren für das Konzept des netzzrückwirkungsarmen SR. Im Rahmen eines Regelungsentwurfs wird zunächst die Regelstrecke des SR modelliert. Aufbauend auf der Regelstrecke wird eine Regelung entworfen, die das nichtlineare Verhalten des SR berücksichtigt. Anhand einer prototypischen Untersuchung im Labor wird das entworfene Regelsystem validiert. Darüber hinaus werden Steuerungs- und Regelungskonzepte für eine stufenlose Spannungsregelung erläutert, die für einen netzzrückwirkungsarmen Einsatz zu berücksichtigen sind.

Kapitel 6 erläutert die Erprobung des netzzrückwirkungsarmen SR. Dafür wird eine prototypische Untersuchung im Labor sowie in einem realen Netzstrang in der NS betrachtet. Anhand der Erprobung werden die Praxistauglichkeit und die Netzauswirkungen der Weiterentwicklung validiert.

Kapitel 7 beinhaltet eine abschließende und kritische Bewertung der Gesamtergebnisse dieser Arbeit und liefert zudem einen Ausblick für den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

2 Grundlagen zur Spannungshaltung und Strangspannungsregelung

2.1 Statische Spannungshaltung in der Niederspannung

2.1.1 Beeinflussung der Versorgungsspannung

In der NS-Ebene, die sich durch ein resistiv geprägtes Betriebsverhalten auszeichnet, beeinflussen maßgeblich die Wirkleistungsflüsse die Spannung. Daher werden dort andauernde Spannungsänderungen großenteils durch lokale Laständerungen erzeugt. Die Spannungsänderungen entstehen dabei in Abhängigkeit vom Leistungsfluss, der einen Spannungsabfall an der überwiegend resistiven Netzimpedanz verursacht. Aufgrund der Wirkleistungsflussrichtung führt eine Lastsituation zu einer Spannungsabsenkung im Netz. Im Falle einer Rückspeisung übersteigt die Einspeisesituation den Leistungsbedarf im NS-Netz und der Wirkleistungsfluss kehrt sich um; dies bewirkt eine Spannungsanhebung im Netz.

Darüber hinaus entstehen auch im übergeordneten MS-Netz aufgrund von Lastschwankungen andauernde Spannungsänderungen. Die Spannungsänderungen werden direkt in die nachgelagerten NS-Netze weitergereicht, da konventionell bei den MS/NS-Transformatoren sowie im NS-Netz selbst keine Spannungsregelung im Betrieb ermöglicht wird [10].

Um in diesem Zusammenhang die Spannungsqualität im öffentlichen Versorgungsnetz sicherzustellen, wird in der EN 50160 [11] ein zulässiger Toleranzband für die Versorgungsspannung festgelegt. Demnach müssen in der NS-Ebene sowie in der MS-Ebene unter normalen Betriebsbedingungen die 10-Minuten-Mittelwerte des Effektivwerts der Versorgungsspannung innerhalb von $\pm 10\%$ der Nennspannung liegen [11]. Bei einer konventionellen Netzstruktur muss sich dieses nutzbare Spannungsband für den Starklast- und Rückspeisefall auf beide Ebenen aufteilen. Die quantitative Aufteilung des Spannungsbandes wird von jedem Verteilnetzbetreiber individuell gestaltet. Lediglich die Spannungsanhebung durch Rückspeisungen wird in der VDE-AR 4110 [12] für die MS-Ebene auf 2% und in der VDE-AR 4105 [13] für die NS-Ebene auf 3% limitiert. Nach Maßgabe des Verteilnetzbetreibers kann jedoch von den Grenzwerten der Anwenderregeln [12] und [13] abgewichen werden – beispielsweise bei Anwendung spannungshaltender Maßnahmen.

Exemplarisch zeigt Abbildung 2.1 in Anlehnung an [10] eine typische Aufteilung des $\pm 10\%$ Spannungsbandes innerhalb der MS-Ebene und der NS-Ebene, welche für

den Last- und Rückspeisefall ausgelegt sind. Die Kuppelung zwischen Hochspannungs (HS)-Netz und MS-Netz erfolgt standardmäßig über einen HS/MS-Transformator, der mit einem Laststufenschalter ausgestattet ist. Durch den Laststufenschalter wird die Spannung an der MS-Sammelschiene auf den vorgegebenen Sollwert von 1,025 p.u. geregelt und dadurch von der Spannung in der HS-Ebene entkoppelt. Für die Reglerhysterese der HS/MS-Transformatorstufung werden $\pm 1,5\%$ reserviert. Für den Spannungsabfall über den Ortsnetztransformator werden jeweils 1% berücksichtigt. Der MS-Ebene stehen damit +2% und der NS-Ebene +3% für den Rückspeisefall zur Verfügung. Für den Verbrauchsfall werden jeweils -5% für die MS-Ebene und die NS-Ebene eingeplant.

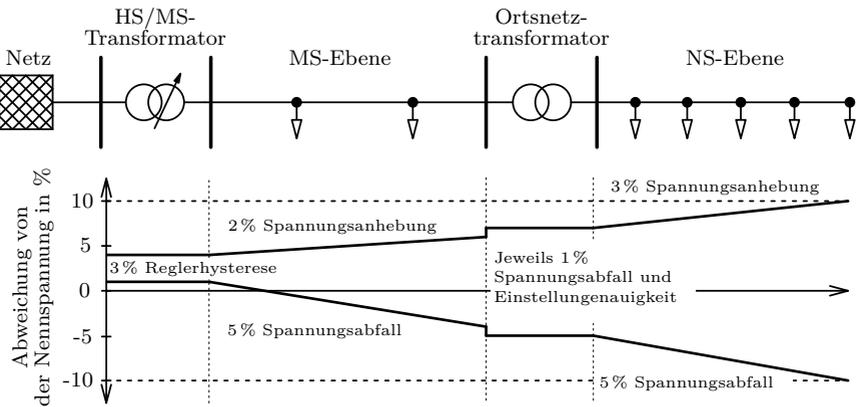


Abbildung 2.1 Typische Spannungsbandaufteilung für ein last- und einspeisegeprägtes MS- und NS-Netz nach [10]

Die Störfestigkeit eines Netzes hinsichtlich Spannungsänderungen hängt von dessen Netzimpedanz ab: Je größer die Netzimpedanz ausfällt, desto stärker ist die Auswirkung des Leistungsflusses auf die Spannung. Die Netzimpedanz eines NS-Stranges ergibt sich zu einem großen Teil aus der Leitungsimpedanz, die von den Leitungsbelägen abhängt. Dabei vergrößert sich der resistive Anteil mit sinkendem Leitungsquerschnitt. Darüber hinaus steigt die Leitungsimpedanz mit wachsender Leitungslänge, was dazu führt, dass mit zunehmender Leitungslänge die Übertragungskapazität nicht mehr durch die maximale Betriebsmittelbelastung eingeschränkt wird, sondern durch die Spannungsbandbegrenzung [14].

Im Rahmen der Energiewende kommt es zu einer massiven Integration von dezentralen Energieerzeugungsanlagen in die NS-Netze, die in einer verstärkten Netz-

auslastung resultiert. Diesbezüglich führen die verschiedenen Verteilnetzstudien [3]–[7] auf, dass insbesondere in ländlichen NS-Netzen, die durch hohe Leitungslängen geprägt sind, eine vermehrte Rückspeisung durch dezentrale Energieerzeugungsanlagen zu Spannungsbandproblemen führt. Dabei weisen die als kritisch identifizierten Netze häufig eine geringe Lastdichte auf, weswegen dort eine hohe Integration von dezentraler Energieerzeugung verstärkt zu hohen Rückspeisungen führt. Den Studien zufolge stellen Spannungsbandprobleme den entscheidenden Faktor für die Begrenzung der Aufnahmefähigkeit für dezentrale Energieerzeugung in ländlichen NS-Netzen dar und es wird aufgeführt, dass ein Netzausbau zwingend erforderlich ist, um den weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien zu ermöglichen.

Darüber hinaus führt die zusätzliche Zunahme der Last durch neue Verbraucher mit hoher Gleichzeitigkeit, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, zu einem weiteren Netzausbaubedarf [8], [9]. Dabei sind erneut bei langen NS-Leitungen Spannungsbandprobleme mit die Ursache für den Ausbaubedarf.

2.1.2 Maßnahmen zur Spannungshaltung

Konventioneller Netzausbau

Die klassische Lösung, Spannungsbandprobleme im NS-Netz zu beheben, ist der konventionelle Netzausbau. Diese Maßnahme beinhaltet den Austausch der bestehenden Netzbetriebsmittel mit leistungsfähigeren Typen oder den Zubau von weiteren Betriebsmitteln, die durch einen parallelen Betrieb oder eine veränderte Netztopologie zu einer Netzverstärkung führen. Durch solche Netzausbaumaßnahmen wird die Netzimpedanz gesenkt, wodurch die Störfestigkeit des Netzes hinsichtlich Spannungsänderungen gesteigert wird. Ferner wird das Netz durch die Netzverstärkungsmaßnahmen für größere Leistungsflüsse ertüchtigt.

Im Rahmen der Energiewende müssen die historisch über Jahrzehnte gewachsenen elektrischen Energieversorgungsnetze in einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne umgerüstet werden. Dabei kommt der konventionelle Netzausbau aufgrund des tendenziell großen baulichen sowie investiven Aufwands häufig an seine Grenzen. Ist abzusehen, dass zukünftig keine Betriebsmittelüberlastungen im auszubauenden Netz zu erwarten sind und lediglich Spannungsbandprobleme berücksichtigt werden müssen, sind innovative Maßnahmen – wie ein Blindleistungsmanagement, ein Wirkleistungsmanagement oder eine direkte Spannungsregelung – häufig eine effizientere Lösung. Demgemäß zeigen die bereits erwähnten Studien [3]–[7] allgemein auf, dass

durch den Einsatz von innovativen Maßnahmen die Kosten für den erforderlichen Netzausbau gesenkt werden können.

Blindleistungsmanagement

Die Wirkleistungseinspeisung dezentraler Energieerzeugungsanlagen führt zu einer Anhebung der Knotenspannung, wodurch Spannungsbandverletzungen hervorgerufen werden können. Durch eine Blindleistungsaufnahme können sich die Anlagen jedoch an der statischen Spannungshaltung beteiligen. Die Blindleistungsflüsse verursachen dabei über die Netzreaktanz einen Spannungsabfall, welcher der Spannungsanhebung entgegenwirkt. Aus diesem Grund ermöglichen viele dezentrale Energieerzeugungsanlagen und Energiespeicher nach aktuellem Stand der Technik bereits verschiedene Verfahren des Blindleistungsmanagements [13].

Das einfachste Verfahren beinhaltet eine Leistungseinspeisung mit festem Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ [13]. Das bedeutet, dass die Erzeugungsanlage eine Leistung mit konstantem Verhältnis aus Wirk- und Scheinleistung einspeist. Bei einem weiteren Verfahren wird das Blindleistungsmanagement einer Erzeugungsanlage nach einer Verschiebungsfaktor-/Wirkleistungskennlinie $\cos \varphi(P)$ gesteuert [13]. Nach dieser Kennlinie wird in Abhängigkeit der Wirkleistungseinspeisung der Verschiebungsfaktor eingestellt und dadurch Blindleistung aufgenommen. Aufgrund eines Totbandes wird bei einer geringen Wirkleistungseinspeisung keine Blindleistung aufgenommen. Ein anderes Verfahren verwendet eine spannungsabhängige Blindleistungsregelung auf Basis einer Blindleistungs-Spannungskennlinie $Q(U)$ [13]. Bei dieser Regelung wird nur im Falle von Spannungsänderungen eine Blindleistungsaufnahme oder -abgabe bereitgestellt. Dadurch wird die Blindleistungsbelastung des Netzes im Vergleich zu den anderen Verfahren deutlich reduziert [15].

Darüber hinaus existiert auch das Konzept, den Umrichter einer Erzeugungseinheit als *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) zu nutzen [16]–[18]. Dabei kann über den Zwischenkreis des Umrichters unabhängig von der Wirkleistungseinspeisung dem Netz eine Blindleistung zur Spannungsstabilisierung bereitgestellt werden.

Im NS-Netz haben Wirkleistungsflüsse jedoch einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Spannung als Blindleistungsflüsse, da NS-Netze eine resistive Charakteristik besitzen. Ein Blindleistungsmanagement ist daher nicht in der Lage, Spannungsänderungen aufgrund von Wirkströmen vollständig zu kompensieren [14]. Jedoch kann ein Blindleistungsmanagement das Ausmaß der Spannungsänderungen reduzieren. Treten lediglich Spannungsbandverletzungen und keine Betriebsmittelüberlastungen

auf, empfiehlt es sich, das Blindleistungsmanagement bestehender Erzeugungsanlagen zu optimieren, bevor Investitionen für einen Netzausbau getätigt werden [10]. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Blindleistungsbereitstellung in einer Erhöhung der Leitungsauslastung resultiert.

Wirkleistungsmanagement

Durch ein Wirkleistungsmanagement werden Stromspitzen reduziert, wodurch Netzengpässe sowie Spannungsbandprobleme im Netz vermieden werden.

Eine Möglichkeit stellt dabei die Einspeisebegrenzung von Erzeugungsanlagen dar, die nach aktuellem Stand der Technik bereits zur Vermeidung von Netzüberlastungen angewandt wird. Dafür wird die Anlagenleistung dynamisch per Fernsteuerung in Abhängigkeit vom Netzzustand abgeregelt. Alternativ kann für Photovoltaik (PV)-Anlagen mit einer installierten Modulleistung bis einschließlich 30 kW auch eine statische Einspeisebegrenzung gewählt werden, wodurch die Kosten der Fernsteuerung entfallen. Bei der statischen Einspeisebegrenzung darf die Leistung auf bis zu 70 % der installierten Modulleistung abgeregelt werden. [13]

Ein weiteres Mittel ist der Einsatz eines netzdienlichen Energiespeichers, der in der Lage ist, Stromspitzen zu kompensieren und dadurch die Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenzwerten ermöglicht. Dahingehend werden in [19]–[21] Konzepte zur Spannungsregelung vorgestellt, die über einen Energiespeicher die zeitliche Verschiebung der Wirkleistungsflüsse erzielen und dadurch die Spannung stützen.

Darüber hinaus können auch Flexibilitätsoptionen von Netzteilnehmern genutzt werden. Durch diese Optionen können Verbrauch und Einspeisung flexibel und bedarfsgerecht gesteuert werden und dadurch über eine zeitliche Lastverschiebung Stromspitzen vermieden werden [22].

Aktuell entsprechen die dezentralen Erzeugungsanlagen im NS-Netz überwiegend PV-Anlagen. Aufgrund der hohen Gleichzeitigkeit der PV-Einspeisungen in einem Ortsnetz zeigt eine statische Einspeisebegrenzung von PV-Anlagen eine hohe selektive Wirkung und erweist sich dadurch als eine effektive Maßnahme zur Vermeidung einspeisebedingter Grenzwertverletzungen [10]. Idealerweise wird dabei die Einspeisebegrenzung durch eine Eigenbedarfsoptimierung mit Zwischenspeicher beim Kunden umgesetzt [23].

Eine dynamische Einspeisebegrenzung erweist sich in den meisten Fällen als weniger kosteneffizient im Vergleich zu anderen spannungshaltenden Maßnahmen, da

zurzeit NS-Netze in der Regel mit keiner geeigneten Kommunikations- und Automatisierungstechnik zur Fernsteuerung ausgerüstet sind [10], [24].

Ein netzdienlicher Energiespeicher sowie Flexibilitätsoptionen zeigen sich erst durch einen kombinierten Einsatz mehrerer Anwendungen als kosteneffizient [10]. Dabei kann insbesondere das Zusammenspiel in einem Flexibilitätsmarkt zukünftig von Interesse sein [25]. Der reine Einsatz zur Spannungsregelung gestaltet sich jedoch zurzeit als nicht lukrativ im Vergleich zu den anderen Maßnahmen; dabei spielt neben den fehlenden Regularien erneut die mangelnde Kommunikations- und Automatisierungstechnik eine Rolle [10], [24].

Direkte Spannungsregelung

Wird die Übertragungskapazität eines NS-Netzes deutlich durch die Spannungsgrenzen eingeschränkt, genügen die Maßnahmen zur indirekten Spannungsregelung, wie das Blind- und Wirkleistungsmanagement, nicht aus [10]. Für diesen Fall erweist sich häufig eine direkte Spannungsregelung als kosteneffizienteste Maßnahme [10]. Die Spannungsregelung erfolgt dabei unabhängig vom Leistungsfluss und der Netzimpedanz durch eine Veränderung der Spannungshöhe. Da lediglich die Spannungshöhe variiert wird, der Spannungsphasenwinkel jedoch unverändert bleibt, wird auch von einer Längsregelung der Spannung gesprochen [26]. Durch die direkte Spannungsregelung wird das in der NS zur Verfügung stehende Spannungsband erweitert, womit die spannungsabhängige Einschränkung der Übertragungskapazität reduziert wird und damit die Aufnahmefähigkeit hinsichtlich dezentraler Erzeugungsanlagen und Lasten gesteigert wird.

Eine Maßnahme, dies zu erzielen, ist die Anwendung eines regelbaren Ortsnetztransformators (RONT). Die Regelbarkeit des Transformators wird mit einem Laststufenschalter realisiert, wodurch im laufenden Betrieb das Übersetzungsverhältnis des Transformators verändert werden kann [26]. Indem der RONT seine Unterspannungsseite auf einen festen Sollwert regelt, entkoppelt er das Spannungsband des Ortsnetzes von dem vorgeschalteten Verteilnetz. Dadurch steht dem gesamten Ortsnetz ein größeres Spannungsband zur Verfügung.

Eine weitere Maßnahme stellt die Einzelstrangregelung dar. Dabei wird anstelle der Spannung im gesamten Ortsnetz die Spannung im einzelnen NS-Strang geregelt. Das Betriebsmittel, das dazu eingesetzt wird, ist ein SR. Dieser fügt eine in- oder gegenphasige Zusatzspannung zur Netzspannung hinzu und ermöglicht damit eine Absenkung oder Anhebung der Spannung für den unterlagerten NS-Strang. Neben der festen Sollwertvorgabe kann bei einer Einzelstrangregelung auch eine dynami-

sche Sollwertvorgabe angewandt werden, beispielsweise in Abhängigkeit vom Leitungsstrom oder auf Grundlage einer abgesetzten Messung am Ende des Stranges [27]. Dadurch kommt es nicht nur zu einer Entkopplung vom vorgeschalteten Netz, sondern die Breite des zur Verfügung stehenden Spannungsbandes wird insgesamt erweitert.

Eine dynamische Sollwertvorgabe kann prinzipiell auch bei einem RONT zum Einsatz kommen [27]. Allerdings wird die Sollwertvorgabe am RONT durch unterschiedliche Last- und Einspeiseverteilungen in den verschiedenen Strängen des Ortsnetzes eingeschränkt. Unabhängig davon zeigt [10] auf, dass bereits durch die entkoppelnde Wirkung eines RONT ein Großteil der zu erwartenden Spannungsbandprobleme im NS-Netz kosteneffizient behoben werden. Konzentrieren sich die Spannungsbandprobleme jedoch auf einen einzelnen Strang, besitzt ein SR die günstigeren Einsatzbedingungen, da ein SR nur den gefährdeten Netzausläufer ausregeln muss und dadurch für kleinere Leistungsbereiche ausgelegt werden kann als ein RONT, der das ganze Ortsnetz anbinden muss [10]. Darüber hinaus bietet ein SR durch die einfache Umsetzung einer dynamischen Sollwertvorgabe die maximal mögliche Spannungsregelung in einem NS-Strang und stellt damit häufig eine passende Lösung für Extremfälle dar.

Wirkungsbereich der spannungshaltenden Maßnahmen

Die Veranschaulichung des Wirkungsbereichs der spannungshaltenden Maßnahmen erfolgt exemplarisch für ihre Auswirkungen im Rückspeisefall. Dazu wird die Einschränkung der Übertragungskapazität eines Netzabschnittes aufgrund einer Spannungsbandbegrenzung für die verschiedenen Maßnahmen herangezogen. Damit werden an dieser Stelle jedoch keine Planungsgrundsätze geliefert, da der sinnvolle Einsatz einer Maßnahme nicht alleine von deren Wirkungsbereich abhängt, sondern zusätzlich von der Last- und Einspeisesituation, den bestehenden Netzkomponenten und anderen Rahmenbedingungen.

Für die Betrachtung wird die Netzform eines Strahlennetzes berücksichtigt, welche die am häufigsten anzutreffende Netzform im NS-Netz ist [28]. Die Übertragungskapazität eines NS-Strahls wird für kurze Leitungslängen über die Stromtragfähigkeit definiert; ab einer bestimmten Leitungslänge kommt es jedoch zu einer Einschränkung durch das Spannungsband.

Anhand von Grenzkurvenanalysen nach [14] werden für verschiedene Leitungsquerschnitte die Leitungslängen ermittelt, ab denen es zu einer Einschränkung der Übertragungskapazität aufgrund von Spannungsbandproblemen kommt. Dabei wird eine

homogene Einspeise- und Lastverteilung auf dem NS-Strahl angenommen. Als Leitungstyp wird ein Polyvinylchlorid-isoliertes Kabel herangezogen, dessen Parameter durch das Datenblatt [29] geliefert werden. Es wird der Fall ohne spannungsstützende Maßnahmen betrachtet sowie die Fälle mit Blindleistungsmanagement, Wirkleistungsmanagement und direkter Spannungsregelung.

Für das Blindleistungsmanagement wird angenommen, dass bei maximal möglicher Rückspeisung alle Anlagen mit einem Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ von 0,9 einspeisen. Beim Wirkleistungsmanagement wird die Rückspeisung auf 70 % der maximal möglichen Rückspeisung reduziert. Für die direkte Spannungsregelung wird eine Erweiterung des erlaubten Spannungsbandes berücksichtigt, wobei eine Spannungsbandreserve für eine Reglerhysterese vernachlässigt wird. Daher erweitert sich dort das erlaubte Spannungsband bei einer festen Sollwertvorgabe auf $\pm 10\%$ und bei einer dynamischen Sollwertvorgabe auf $\pm 20\%$.

Abbildung 2.2 zeigt für die verschiedenen Maßnahmen Kennlinien, welche in Abhängigkeit vom Leitungsquerschnitt die Leitungslängen markieren, ab denen es zu Einschränkungen durch das Spannungsband kommt. Zusätzlich ist in der Abbildung ein Streudiagramm von realen NS-Strängen mit eingetragen. Für die Netzangaben wird auf einen internen Datenbestand zurückgegriffen, der einen Querschnitt über deutsche NS-Netze beinhaltet.

Für alle Fälle ist zu erkennen, dass mit sinkendem Leitungsquerschnitt die Einschränkungen durch das Spannungsband früher einsetzen. Dies liegt daran, dass bei kleinen Leitungsquerschnitten die Leitungsresistenz größer ausfällt. Das Blindleistungsmanagement besitzt bei kleinen Querschnitten nahezu keinen Wirkungsbereich, da dort die Leitungsreaktanz kaum Auswirkungen auf die Leitungsimpedanz hat. Mit steigendem Querschnitt sinkt jedoch die Leitungsresistenz und die Wirkung des Blindleistungsmanagements nimmt zu. Im Gegensatz dazu hat das Wirkleistungsmanagement auch für kleine Leitungsquerschnitte Auswirkungen auf die Einschränkungen. Für größere Leitungsquerschnitte, die sich aufgrund der reduzierten Leitungsresistenz durch ein induktives Betriebsverhalten auszeichnen, ist die Beeinflussung jedoch geringer als beim Blindleistungsmanagement. Die direkte Spannungsregelung besitzt durch die Vergrößerung des Spannungsbandes den höchsten Wirkungsbereich, wobei die dynamische Sollwertvorgabe die Einschränkungen durch eine Spannungsbandbegrenzung am stärksten reduziert.

Unter Berücksichtigung des verwendeten Datenbestandes kann die Aussage getroffen werden, dass es bei 35 % der Stränge zu Einschränkungen durch das Spannungsband kommt. Bei 12 % der Stränge können Einschränkungen über ein Wirkleistungs-

und Blindleistungsmanagement verhindert werden. Die restlichen 23% können zum Großteil über eine direkte Spannungsregelung behoben werden, wobei eine dynamische Sollwertvorgabe nur für 2% der Stränge nötig ist.

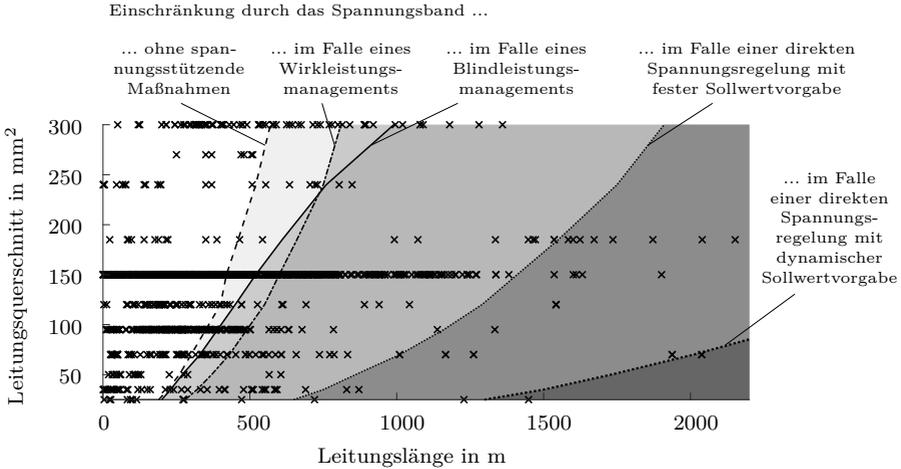


Abbildung 2.2 Streudiagramm realer Niederspannungsstränge und Markierung der Leitungslängen, ab denen es aufgrund von Spannungsbandproblemen zu einer Einschränkung der Übertragungskapazität einer Leitung kommt unter Berücksichtigung der verschiedenen spannungshaltenden Maßnahmen

2.2 Strangspannungsregelung in der Niederspannung

2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Ein SR wird direkt in den Netzstrang eingebaut, der Probleme mit der Spannungshaltung aufweist. Durch das Einprägen einer in- oder gegenphasigen Zusatzspannung wird die Spannung im unterlagerten NS-Strang angehoben oder abgesenkt. Damit ermöglicht ein SR eine direkte Spannungsregelung unabhängig von den Blindleistungsflüssen. Der Installationsstandort im Strang liegt idealerweise kurz vor dem ersten Knoten, bei dem es ohne Spannungsregelung zu einer Einschränkung der Wirkleistungsübertragung durch eine Spannungsbandbegrenzung kommen kann [30].

In Abbildung 2.3 wird an einem Beispiel der Einfluss eines SR auf den Spannungsverlauf entlang eines Netzausläufers gezeigt. Aufgrund von dezentraler Einspeisung

würde es zu einer Spannungsbandverletzung im hinteren Abschnitt des Ausläufers kommen. Der SR prägt in dem Beispiel eine gegenphasige Zusatzspannung ein und erzielt damit an seinem Ausgang eine Absenkung der Netzspannung, wodurch eine Verletzung des oberen Spannungsbandes verhindert wird.

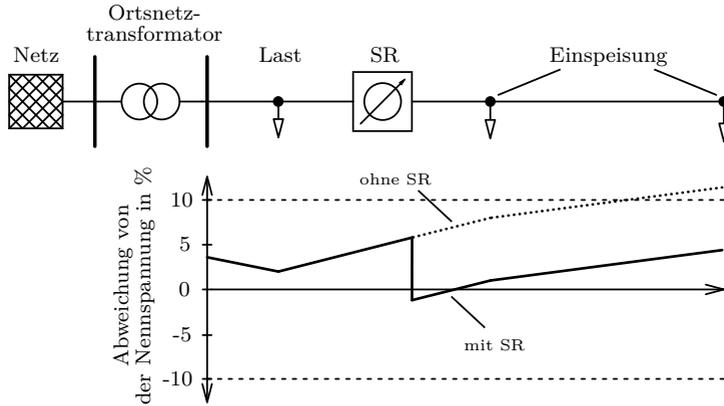


Abbildung 2.3 Spannungsverlauf entlang eines beispielhaften Netzausläufers mit Strangspannungsregler

Für den Aufbau eines SR existieren verschiedene Methoden. Gemeinsam ist ihnen, dass die Zusatzspannung über eine längs in die Leitung eingebrachte Transformatorwicklung eingespeist wird. Der verwendete Transformator wird im Folgenden Längstransformator genannt. Abbildung 2.4 zeigt allgemein den einphasigen Aufbau eines SR und dessen Wirkungsweise mithilfe eines Zeigerdiagramms. In der Abbildung markiert L den Außenleiter und N den Neutralleiter. Da die primärseitige Speisung des Längstransformators T_L unterschiedlich erfolgen kann, wird sie vereinfacht als Spannungsquelle dargestellt. Entsprechend der an der Primärwicklung des Längstransformators anliegenden Spannung U_P und dessen Übersetzungsverhältnisses wird eine Spannung U_S in die Sekundärwicklung induziert. Da die Eingangsspannung U_A durch das übergeordnete Netz grundsätzlich starr gehalten wird, ändert sich die Ausgangsspannung U_B entsprechend der Addition von U_A und U_S . U_A und U_B entsprechen dabei jeweils der Spannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter.

Der Einfluss des SR auf die Netzspannung wird überbrückt, indem die Spannungseinspeisung ausgeschaltet wird und gleichzeitig der Längstransformator primärseitig, beispielsweise über ein Schaltelement S_0 , kurzgeschlossen wird. Durch den primärsei-

tigen Kurzschluss hebt sich der magnetische Koppelfluss im Transformator Kern auf und die Leistungsaufnahme des Längstransformators reduziert sich auf die Streu- und Wicklungsverluste der Sekundär- und Primärwicklung. Dieser Abschaltvorgang garantiert einen unterbrechungsfreien Netzbetrieb ohne Schalthandlungen auf der Leitung.

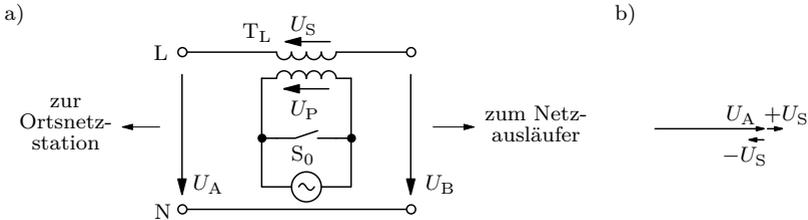


Abbildung 2.4 Wirkungsweise eines Strangspannungsreglers

- a) Einphasiger Aufbau
- b) Spannungszeiger

Um die Betriebskosten eines SR im NS-Netz niedrig zu halten, gilt es den SR robust, wartungsarm und langlebig zu gestalten. In diesem Sinne wird der Längstransformator in der Regel als Trockentransformator ausgeführt. Dies ist möglich, da nur die Sekundärwicklung in der Lage sein muss den hohen Leitungsstrom zu führen, der Längstransformator selbst jedoch eine verhältnismäßig geringe Leistung überträgt. Dabei haben Trockentransformatoren im Gegensatz zu flüssigkeitsgefüllten Transformatoren den Vorteil, dass sie wartungsfrei sind [26]. Überdies zeichnen sich Transformatoren allgemein durch ihre Zuverlässigkeit und lange Lebensdauer aus; innerhalb der ersten 30–40 Lebensjahre liegt ihre Ausfallrate bei nahezu 0% [31]. Der Wartungsbedarf und die Robustheit eines SR wird daher maßgeblich durch die Komponenten im Einspeisekreis bestimmt.

Auf die verschiedenen Einspeisemethoden und die sich daraus ergebenden SR-Arten wird im folgenden Abschnitt genauer eingegangen.

2.2.2 Strangspannungsreglerarten

Strangspannungsregelung mit Transformator-kaskade

Bei dieser Strangspannungsregelung werden mehrere Längstransformatoren in die Leitung eingebracht. Die Primärwicklungen der Längstransformatoren werden direkt

über einen Leitungsanschluss gespeist und können unabhängig voneinander mit einer gleichphasigen oder – durch Umpolung der Wicklung – gegenphasigen Spannung versorgt werden. Die Spannungsregelung erfolgt in Stufen durch das bedarfsabhängige Zu- und Abschalten der Längstransformatoren. Ein einphasiger Aufbau dieser SR-Art unter Verwendung von zwei Längstransformatoren ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Längstransformatoren werden unabhängig voneinander angesteuert. Um beispielsweise mithilfe des Längstransformators T_{1L} eine Spannungsabsenkung am Ausgang des SR zu erzielen, müssen die Schalter S_{11} und S_{14} geschlossen werden und für eine Spannungsanhebung Schalter S_{12} und S_{13} . Um den Einfluss des SR auf die Netzspannung zu überbrücken, gilt es den Querzweig durch das Öffnen von S_{11} und S_{12} vom Netz zu trennen und den Längstransformator T_{1L} primärseitig über S_{10} kurzzuschließen. Nach demselben Schaltprinzip wird auch der Längstransformator T_{2L} angesteuert.

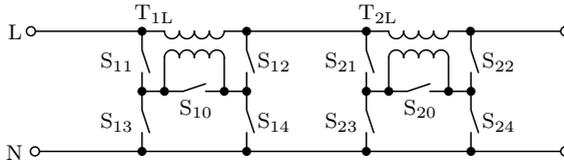


Abbildung 2.5 Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einer Transformator-kaskade

Diese SR-Art existiert in unterschiedlichen Varianten und wird von verschiedenen Herstellern als Produkt für das Verteilnetz angeboten. Dabei umfasst die einfachste Variante lediglich einen Längstransformator, der über eine Stufe entweder eine Spannungsabsenkung oder -anhebung bewirkt [32]. Andere Varianten können mit bis zu 6 Längstransformatoren und damit 6 Stufen die Spannung anheben oder absenken [33], [34]. Weitere Varianten verwenden zwei Längstransformatoren mit unterschiedlichen Übersetzungsverhältnissen [33], [35]. Dabei ermöglichen unterschiedliche Zu- und Abschaltkombinationen der Längstransformatoren eine Anhebung oder Absenkung der Netzspannung in 4 Stufen. Für ein Beispiel dieser dritten Variante wird angenommen, dass in Abbildung 2.5 einer der beiden Längstransformatoren ein Übersetzungsverhältnis von 4V und der andere ein Übersetzungsverhältnis von 12V besitzt. Um die Absenkungs- oder Anhebungsstufe von 4V und 12V zu erzielen, werden die Längstransformatoren einzeln entsprechend zugeschaltet; für die Stufe 16V werden sie zusammen und für die Stufe 8V gegeneinander geschaltet.

Basierend auf den verwendeten Komponenten im Einspeisekreis wird diese SR-Art als sehr robust eingeschätzt. So können für die Schaltelemente wartungsfreie Schaltschütze oder Halbleiterrelais verwendet werden. Die Lebensdauer von Schaltschützen wird durch ein maximales mechanisches und elektrisches Schaltspiel limitiert, das laut Datenblatt für das Schalten des Bemessungsstroms beispielsweise bei 150.000 Schaltzyklen liegt [36], [37]. Umgerechnet auf 20 Jahre würde dies ein durchschnittliches Schaltspiel von 20 Zyklen pro Tag erlauben. Die Lebenserwartung von Halbleiterrelais hängt nicht von den Schaltspielen ab, sondern von der Betriebsdauer und den erlebten Betriebszuständen [38]. Im Allgemeinen ist es empfindlicher gegenüber Überlast und Störimpulsen als ein Schaltschütz [38]. Wird es jedoch innerhalb seiner Betriebsgrenzen verwendet, besitzt es laut Hersteller eine deutlich höhere Zuverlässigkeit und Langlebigkeit als Schaltschütze [39].

Eine Strangspannungsregelung mit Transformator-kaskade wird somit als robust, wartungsfrei und langlebig eingeschätzt. Allerdings kann die Spannung nur in Stufen geregelt werden. Daher werden Spannungssprünge in die Netzspannung emittiert, welche zu Flicker führen und andere Störeinflüsse auf Netzteilnehmer ausüben können.

Strangspannungsregelung mit Stelltransformator

Anstelle mehrerer Längstransformatoren kann auch ein Längstransformator als Stelltransformator ausgeführt werden. Mithilfe von Anzapfungen an der Primärwicklung kann durch Umschaltung das Wicklungszahlen-Übersetzungsverhältnis stufenförmig variiert werden. Dies resultiert in einer Änderung der Zusatzspannung. Abbildung 2.6 zeigt eine einphasige Variante dieser SR-Art mit drei Abgriffen, wodurch die Spannung in zwei Stufen angehoben oder abgesenkt werden kann. Um eine Spannungsabsenkung zu erzielen, muss Schalter S_1 sowie S_4 oder S_5 geschlossen werden.

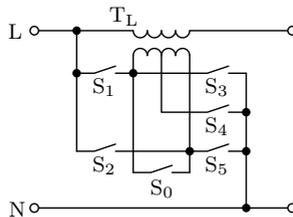


Abbildung 2.6 Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einem Stelltransformator

Für eine Spannungsanhebung erfolgt das Schließen von Schalter S_2 sowie S_4 oder S_3 . Um den Einfluss des SR zu überbrücken, muss der Querzweig durch das Öffnen von S_1 und S_2 vom Netz getrennt werden und gleichzeitig der Längstransformator T_L primärseitig über S_0 kurzgeschlossen werden.

In [40]–[42] werden Varianten dieser SR-Art für kleine einphasige Leistungsbereiche unter 18 kVA vorgestellt. Diese Varianten sind klein und kompakt und bieten daher die Möglichkeit einer Mastanbringung. Zusätzlich bieten sie eine einfache Portabilität, falls ein SR nur als temporäre Lösung verwendet werden soll. Im Gegensatz dazu wird in [43] eine Variante für die 20 kV-Ebene vorgestellt, welche in der Lage ist eine Leistung bis zu 8 MVA zu führen. Dabei wird eine Spannungsanhebung oder -absenkung in 5 Stufen ermöglicht.

Die Theorie einer anderen Variante wird in [44] vorgestellt. Entsprechend Abbildung 2.7 wird dort ein Stelltransformator T_{St} parallel zu dem Längstransformator T_L geschaltet. Die Primärseite des Längstransformators wird über die Sekundärseite des Stelltransformators gespeist. Die Spannungshöhe wird über die Wahl des Wicklungszahlenverhältnisses von T_{St} durch die Schaltelemente in drei Stufen variiert. Dabei ist ein spannungsanhebender sowie spannungsabsenkender Betrieb möglich. Bei dieser Variante werden in Abhängigkeit von dem Übersetzungsverhältnis des Stelltransformators Strom und Spannung im Einspeisekreis des Längstransformators reduziert, womit eine Verringerung der Schaltleistung für die Schaltelemente ermöglicht wird.

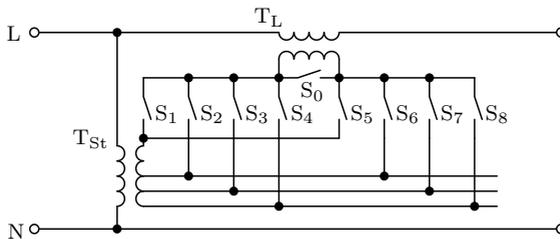


Abbildung 2.7 Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einem Stelltransformator parallel zum Längstransformator entsprechend [44]

Für die beschriebenen Varianten dieser SR-Art kommen ähnliche Komponenten zum Einsatz wie für die SR-Art mit Transformator-kaskade, weswegen mit einer vergleichbar robusten, wartungsarmen und langlebigen Betriebsweise gerechnet wird. Allerdings regeln die genannten Varianten die Spannung ebenso in Stufen und es werden Spannungssprünge in die Netzspannung eingepreßt.

Für eine stufenlose Spannungsregelung existiert eine ähnliche Variante zu Abbildung 2.7, bei welcher das Übersetzungsverhältnis des parallelen Stelltransformators jedoch über einen Schleifkontakt und einen Motor kontinuierlich verstellt werden kann [45]. Diese Variante ist allerdings deutlich wartungsintensiver. So legt der Hersteller eine regelmäßige Prüfung und Reinigung der beweglichen Teile und der Kontaktstellen nahe [46]. Aufgrund des hohen Instandhaltungsaufwandes ist diese Variante jedoch uninteressant für die Nutzung als SR in einem NS-Netzausläufer. Daher reduziert sich der Fokus dieser Variante auf die Anwendung als Vorschaltgerät für Verbraucher, die empfindlich auf Spannungsschwankungen reagieren und bei denen der gewonnene Anlagenschutz die erhöhten Instandhaltungskosten ausgleicht.

Strangspannungsregelung mit Umrichter

Diese Art der Strangspannungsregelung ermöglicht eine stufenlose Spannungsregelung durch die Verwendung einer leistungselektronischen Umrichterschaltung. Dafür generiert ein Umrichter aus der Netzspannung eine in der Amplitude veränderbare Wechselspannung, die über den Längstransformator zur Netzspannung addiert wird. Ein einphasiger Aufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

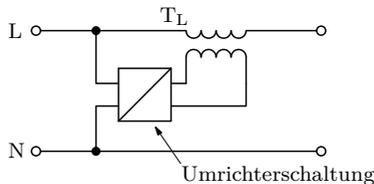


Abbildung 2.8 Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers basierend auf einer Umrichterschaltung

Aufgrund der schnellen Reaktionszeit eines Umrichters, die im Bereich von Mikrosekunden liegt, ermöglicht diese SR-Art neben der statischen Spannungshaltung auch die Kompensation von schnellen Spannungsänderungen. Durch diese Eigenschaft ist ein gängiger Einsatzbereich der Anlagenschutz bei empfindlichen Verbrauchern und Produktionsanlagen. Im Allgemeinen kommt dabei ein indirekter Umrichter zum Einsatz [47]–[51], der einer Kombination aus Gleichrichter und Wechselrichter entspricht und mit einem Gleichspannungszwischenkreis arbeitet.

Ein Aufbau mit indirektem Umrichter eignet sich grundsätzlich auch als Anwendung zur Spannungshaltung im NS-Netz, wie simulationstechnisch in [52] gezeigt wird.

Jedoch besitzen leistungselektronische Umrichter aktuell eine verhältnismäßig hohe Ausfallrate und Störanfälligkeit. So ist entsprechend verschiedener Feldanalysen ein Fehler in der Umrichterschaltung mit der häufigste Grund für den Ausfall einer PV-Anlage oder einer Windenergieanlage [53]. Durch die höhere Ausfallrate sind mehr Wartungs- und Reparaturarbeiten nötig.

Eine zum Teil robustere Variante wird durch die Verwendung eines direkten Umrichters, auch Matrix-Konverter genannt, ermöglicht. Da beim Matrix-Konverter kein Gleichspannungszwischenkreis nötig ist, kann auf einen Elektrolytkondensator zur Spannungskonstanthaltung verzichtet werden [54]. Dies reduziert die Ausfallrate, da Fehler im Kondensator neben Fehlern an den Leistungshalbleiterbauelementen die häufigsten Ursache für einen Ausfall von Umrichterschaltungen sind [53], [55].

In [54] und [56] werden Strangspannungsregelungen basierend auf Matrix-Konvertern für einen NS-Strang simulationstechnisch analysiert und in [57] erfolgt eine Untersuchung eines Aufbaus im Labor. Die genannten Forschungsarbeiten zeigen, dass sich eine Variante mit Matrix-Konverter im Wesentlichen als tauglich erweist um eine Strangspannungsregelung in NS-Netzausläufern zu ermöglichen. Allerdings kommt es zu Verzerrungen der Spannungen und Ströme, die den Einsatz von Filterschaltungen erfordern [54]. Darüber hinaus darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Ausfallrate eines Umrichters auch ohne Zwischenkreiskondensator aufgrund von anderen Fehlern verhältnismäßig hoch ist [53], [55], [58].

Aus diesem Grund beschäftigen sich aktuelle Forschungen und Entwicklungen verstärkt mit der Zuverlässigkeit von leistungselektronischen Systemen. Beispielsweise befassen sich Arbeiten, wie [59]–[61], mit der Analyse von Fehlerursachen, um zu verstehen warum und wie leistungselektronische Systeme versagen. Aufbauend auf solchen Analysen betrachten andere Arbeiten, wie [62], [63], Designmethoden, um die leistungselektronischen Systeme zuverlässiger zu gestalten. Wiederum andere Arbeiten, wie [64]–[66], entwickeln Beobachtungs- und Überprüfungsverfahren, um einen zuverlässigen Betrieb im Feld sicherzustellen.

Strangspannungsregelung mit variabler Induktivität

Bei dieser SR-Art kann die Zusatzspannung des SR durch die Verwendung einer variablen Induktivität (VI) kontinuierlich verändert werden. Dazu bildet für eine einfache Variante die Primärwicklung des Längstransformators mit einer VI im Einspeisekreis einen induktiven Spannungsteiler. In Anlehnung an die Patentanmeldung [67] zeigt Abbildung 2.9 den einphasigen Aufbau dieser Variante. Darin ist zu erkennen, dass die VI im Querzweig des SR in Reihe zur Primärwicklung des

Längstransformators geschaltet ist. Die Induktivität der VI kann reduziert werden, wodurch die Spannung an der Primärwicklung des Längstransformators angehoben wird und damit eine vergrößerte Spannung in die Sekundärwicklung transformiert wird. Durch die größere Sekundärspannung kommt es zu einer Spannungsanhebung am Ausgang des SR. Zur Überbrückung des SR gilt es, S_{02} zu öffnen, um den Querverzweig vom Netz zu trennen und den Längstransformator T_L primärseitig über S_{01} kurzzuschließen.

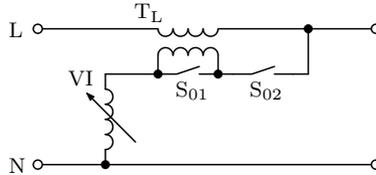


Abbildung 2.9 Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität, entsprechend [67]

Die in dieser SR-Art verwendete VI entspricht einer Untergruppe der sättigbaren Drosselspule (engl.: saturable reactor). Bei diesem Bauteil wird die AC-Spuleninduktivität durch eine Veränderung der Permeabilität des Spulenkerns kontinuierlich variiert. Die Permeabilitätsänderung erfolgt mithilfe einer zusätzlichen DC-Wicklung auf dem Spulenkern, der den Kern in Sättigung treibt [68]. Eine detaillierte Erklärung der Funktionsweise und des Aufbaus einer VI erfolgt im späteren Verlauf dieses Kapitels in Abschnitt 2.3.

Der Herausgeber der Patentanmeldung [67] bietet diese SR-Art bereits als Produkt für das Verteilnetz an [69]. Bei dieser Variante wird jedoch lediglich der spannungsanhebende Betrieb realisiert, um den Spannungsabfall durch Verbraucher zu kompensieren. Prinzipiell kann über eine Schaltmimik, welche die Primärwicklung des Längstransformators umpolt, jedoch auch mit dieser SR-Art eine Spannungsabsenkung realisiert werden.

Aufgrund der kontinuierlich veränderbaren VI ergibt sich für diese SR-Art eine stufenlose Spannungsregelung. Darüber hinaus gilt die VI aufgrund der fehlenden beweglichen Teile als robust, wartungsarm und langlebig [70]. Somit vereint die Strangspannungsregelung mit VI eine stufenlose Spannungsregelung mit einem robusten Betrieb. Bedingt durch den Aufbau können jedoch andere Netzzrückwirkungen entstehen. In diesem Zusammenhang zeigen vorausgegangene Arbeiten, die sich mit einem Simulations- und Messkonzept für diese SR-Art beschäftigen, bereits auf,

dass es beispielsweise zu einer Aussendung von Oberschwingungen aufgrund der Sättigungseffekte in der VI kommt und beim Ein- und Ausschaltvorgang Sprünge im Spannungsphasenwinkel auftreten können [M1], [P9]. Eine detaillierte Analyse der Netzurückwirkungen und eine konkrete Ursachenidentifikation erfolgen jedoch in diesen Arbeiten nicht.

2.2.3 Regelungskonzepte

Das gängigste Regelungskonzept für einen SR ist die lokale Spannungsregelung mit fester Sollwertvorgabe [27]. Dabei entspricht die Ausgangsspannung des SR der Regelgröße. Um diese zu ermitteln, wird eine Spannungsmessung am Ausgang des SR benötigt. Der auszuregelnde Sollwert ist bei dieser Strategie fest eingestellt. Für die Regelung eines gestuften SR wird typischerweise um den Sollwert ein Toleranzband gelegt. Wird das Toleranzband von der Regelgröße über- oder unterschritten erfolgt eine Stufenänderung. Bei einer stufenlosen Spannungsregelung wird die Regelgröße stetig auf den Sollwert ausgeregelt. Jedoch kann beispielsweise eine Ein- und Ausschaltswelle definiert werden, so dass der stufenlose SR nur bei kritischen Spannungen aktiv ist. Die lokale Spannungsregelung mit fester Sollwertvorgabe ermöglicht eine Entkopplung der Spannung des unterlagerten Netzausläufers von der Spannung des vorgeschalteten Netzes.

Ein weiteres Regelungskonzept stellt die lokale Spannungsregelung mit stromabhängiger bzw. wirkleistungsabhängiger Sollwertvorgabe dar. Bei dieser Maßnahme muss zusätzlich zur Ausgangsspannung auch der Leitungsstrom am SR gemessen werden. Durch die Strommessung kann ein Rückschluss auf die Last- und Einspeisesituation im Netzausläufer getroffen werden und in Abhängigkeit der Leitungsimpedanz und der Netzteilnehmer die Spannung am kritischen Knoten abgeschätzt werden. Anhand dieser Abschätzung wird die Sollwertvorgabe sowie ein Toleranzband bzw. Ein- und Ausschaltsschwellen angepasst. Damit ermöglicht dieses Regelungskonzept eine Leitungskompensation. In [71] erfolgt die Parameteranpassung beispielsweise über eine lineare Kennlinie, welche den Spannungssollwert in Abhängigkeit von der Wirkleistung ermittelt. Demgegenüber verwenden [72], [73] Klassifizierungsverfahren um im laufenden Betrieb die optimalen Parameter für die Leitungskompensationsmethode zu ermitteln. Mithilfe dieser Regelstrategie wird nicht nur eine Entkopplung vom vorgeschalteten Netz ermöglicht, sondern, indem auf die Last- und Einspeisesituation im Netzausläufer reagiert wird, kann insgesamt der Bereich der erlaubten Spannungsänderung vergrößert werden.

Eine andere Möglichkeit um die Einspeisesituation in einem Netz zu erfassen, dessen Einspeisung maßgeblich durch PV-Analgen bestimmt wird, stellt die lokale Messung der solaren Einstrahlung dar. In Abhängigkeit der solaren Einstrahlung wird auf die Spannung am kritischen Knoten geschlossen und die Sollwertvorgabe angepasst. Dieses Vorgehen kann jedoch nur angewandt werden, wenn der Netzausläufer durch die PV-Einspeisung dominiert wird und eine geringe Lastsituation vorherrscht. Die Spannung am kritischen Knoten kann beispielsweise erneut durch einen linearen Zusammenhang geschätzt werden [30].

Anstelle einer Schätzung der Spannung am kritischen Knoten, kann auch mittels einer abgesetzten Messung direkt am kritischen Knoten die Spannung ermittelt werden und über einen Kommunikationsweg an den SR gesendet werden. Mit diesem Verfahren wird über eine feste Sollwertvorgabe direkt die Spannung am kritischen Knoten geregelt. Zukünftig kann auch die Nutzung von Smart-Meter-Daten für diese Regelstrategie einbezogen werden [30].

Neben den lokalen Regelstrategien existieren auch übergeordnete Regelstrategien, in denen der SR zum Einsatz kommen kann. Übergeordnete Regelstrategien verwenden mehrere spannungsregelnde Teilnehmer und ermöglichen damit das Ausregeln von größeren Netzabschnitten, beispielsweise eines gesamten Verteilnetzes. Dabei wird der Sollwert des SR durch eine übergeordnete Regelung bestimmt oder durch Absprache mit den benachbarten Teilnehmern. In diesem Zusammenhang gibt [74] einen allgemeinen Überblick über verschiedene Strategien einer übergeordneten Regelung.

2.2.4 Auswirkung auf die Spannungsqualität

Netzimpedanz und Kurzschlussleistung

Die Kurzschlussleistung eines Netzes dient als Maß für dessen Störfestigkeit. Eine geringe Kurzschlussleistung bedeutet, dass die Netzimpedanz hoch ist und sich dadurch Störgrößen stärker ausbreiten und in höheren Störpegeln resultieren als bei einer niedrigen Netzimpedanz [75]. Netzausläufer, die einen Spannungsregelungsbedarf besitzen, zeichnen sich im Allgemeinen über eine hohe Netzimpedanz aus und verfügen somit über eine niedrige Kurzschlussleistung sowie eine geringe Störfestigkeit. Störgrößen führen in solchen Netzen zu einer höheren Belastung und schneller zu Grenzwertverletzungen als in Netzen mit hoher Kurzschlussleistung.

Durch das Einbringen eines SR in einen Netzausläufer kommt es zu einer zusätzlichen Vergrößerung der Netzimpedanz und dadurch zu einer Senkung der Kurzschlusslei-

tung für die unterlagerten Verknüpfungspunkte. Aus diesem Grund sollte die Längsimpedanz eines SR so gering wie möglich gehalten werden, so dass eine Vergrößerung des bestehenden Störpegels im Netz zu keiner Gefährdung der Spannungsqualität führt und darüber hinaus die Kurzschlussleistung weiterhin groß genug ist für die bestehenden Schutzverfahren der Leitung.

Änderungen der Versorgungsspannung

Der 10-Minuten-Mittelwert der Versorgungsspannung soll regulär zwischen $\pm 10\%$ der Nennversorgungsspannung liegen [11]. In Abhängigkeit von der Leistungsübertragung und dem dadurch bedingten Spannungsabfall an der Netzimpedanz, sowie durch Spannungsschwankungen im übergeordneten Netz, entstehen Spannungsänderungen im Netzausläufer. Dabei sind insbesondere Netze mit geringer Kurzschlussleistung anfällig für Spannungsbandverletzungen. Ein SR dient der statischen Spannungshaltung, er kann somit Spannungsbandverletzungen verhindern und führt in diesem Zusammenhang zu einer Verbesserung der Versorgungsspannung.

Spannungsschwankungen und Flicker

Insbesondere bei einer stufenförmigen Strangspannungsregelung kommt es zu einer Einprägung von Spannungssprüngen. Diese Spannungssprünge, die der Längstransformator in das Netz einbringt, werden an das unterlagerte Netz durchgereicht. Darüber hinaus kommt es durch das stufenförmige Zu- und Abschalten zu einer sprunghaften Strombedarfsänderung des SR, wodurch netzaufwärts über die Netzimpedanz eine weitere Spannungsänderung erzeugt wird. Diese Spannungsänderung reduziert sich jedoch in Aufwärtsrichtung, da die Kurzschlussleistung in Richtung Ortsnetzstation zunimmt, bzw. die wirksame Netzimpedanz abnimmt. Während der Spannungssprung der Spannungsregelung durch die Regelstufen des SR festgelegt wird, ist die Spannungsänderung, die durch den Strombedarf des SR entsteht, abhängig von der Änderung des Strombedarfs und der wirksamen Netzimpedanz am Einbaustandort des SR.

Die beschriebenen Spannungsschwankungen fallen nach der EN 50160 [11] in die Kategorie der schnellen Spannungsänderung und rufen Flicker im Netz hervor [76]. Flicker ist eine visuell wahrnehmbare und als störend empfundene Helligkeitsschwankung von Lichtanlagen. Die Flickeremission ist nach der EN 61000-2-2 [77] die maßgebliche Auswirkung, allerdings treten auch andere negative Auswirkungen durch schnelle Spannungsänderungen auf, wie beispielsweise das Beschleunigen oder Ab-

bremsen von Motoren und Fehlfunktionen von Regeleinrichtungen, die auf den Spannungswinkel reagieren [78].

Der hervorgerufene Flicker hängt von der Höhe, der Form und der Häufigkeit der Spannungsänderung ab. Die Bewertung des Flickers erfolgt über die Kurzzeitflickerstärke P_{st} , die über ein 10-Minutenintervall ermittelt wird, und die Langzeitflickerstärke P_{1t} , die ein 2-Stundenintervall berücksichtigt. In [79] sind die Methoden zur Ermittlung der Flickerstärken detailliert beschrieben.

Die Verträglichkeitspegel, die für die Auslegung von Kundenanlagen herangezogen werden, sind in der EN 61000-2-2 [77] festgelegt. Demnach gilt für die Verknüpfungspunkte zum Niederspannungsnetz, dass der Kurzzeitflicker ein Verträglichkeitspegel von 1 und der Langzeitflicker ein Verträglichkeitspegel von 0,8 nicht überschreiten darf. Um eine grobe Vorstellung von der Größenordnung der Verträglichkeitspegel in Bezug zu einer stufenförmigen Spannungsregelung zu erhalten, wird auf die ($P_{st} = 1$)-Kurve aus [80] zurückgegriffen. Die Kurve wird für die Bewertung von äquidistanten Spannungssprüngen herangezogen. Aus ihr wird abgeleitet, dass bereits ein zweimaliger Spannungssprung von 5 % der Nennversorgungsspannung innerhalb eines 10-Minutenintervalls zu einer Überschreitung des Verträglichkeitspegel von P_{st} führt.

Ferner kann es durch ein ungünstiges Zusammenwirken von Störpegeln im Netz zu einer Gefährdung der Spannungsqualität kommen, selbst wenn die alleinige Nutzung des SR zu keiner Überschreitung des Grenzwertes führt. Dahingehend gilt für das öffentliche Niederspannungsnetz die Vorgabe der EN 50160 [11], wonach innerhalb eines Wochenintervalls 95 % der Langzeitflickerstärke den Wert von 1 nicht überschreiten darf.

Um einer Gefährdung der Spannungsqualität entgegen zu wirken, ist es sinnvoll einen gestuften SR entweder so zu parametrieren, dass es selten zu Regeleingriffen kommt, oder ihn mit einer niedrigen Spannungsstufenhöhe auszulegen. Um jedoch mit einer niedrigen Spannungsstufenhöhe einen hohen Regelbereich zu erzielen, wird eine höhere Anzahl an Komponenten zum Aufbau des SR benötigt. Eine alternative Möglichkeit stellt die Nutzung eines stufenlosen SR dar. Durch eine kontinuierliche Strangspannungsregelung sollten im Idealfall keine Spannungssprünge und somit keine Flicker in das Netz ausgesendet werden.

Oberschwingungen

Genau wie bei der Aussendung von schnellen Spannungsänderungen, kann ein SR sowohl über die zusätzlich in das Netz eingeprägte Spannung als auch über seinen Strombedarf Oberschwingungen in das Netz emittieren. Die Oberschwingungen entstehen beispielsweise bei umrichterbasierten SRs durch die Umrichtungsvorgänge oder werden durch Hysterese und Sättigungserscheinungen in Transformatoren und Spulenelementen erzeugt, wobei insbesondere eine VI über ihre erzwungene Sättigung eine hohe Emissionsquelle darstellt.

Die Oberschwingungsströme wandern netzaufwärts und erzeugen über die wirksame Netzimpedanz Oberschwingungsspannungen. Da die Netzimpedanz netzaufwärts abnimmt, reduziert sich jedoch die Aussendung in Aufwärtsrichtung. Netzbwärts werden die über die wirksame Netzimpedanz erzeugten Oberschwingungsspannungen zusammen mit den Oberschwingungsspannungen, die über den Längstransformator in das Netz eingepreßt werden, durchgereicht.

Hohe Oberschwingungsspannungen können zum einen durch die thermische Zusatzlast die Lebensdauer von Kondensatoren und Motoren verringern, zum anderen können sie akustische Störungen in Betriebsmitteln verursachen und Störungen in nachrichten- und informationstechnischen Einrichtungen einkoppeln. Darüber hinaus können sie die Funktion von elektronischen Geräten stören, Fehlfunktionen von Rundsteuerempfängern und Schutzeinrichtungen bewirken sowie die Erdschlusskompensation von Netzen erschweren. [81]

Die Verträglichkeitspegel für Oberschwingungsspannungen in öffentlichen Niederspannungsnetzen sind in der EN 50160 [11] festgelegt. Darin werden die Verträglichkeitspegel für die einzelnen Oberschwingungsanteile und den Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U (engl.: total Harmonic Distortion) angegeben. Der THD_U wird berechnet aus allen Oberschwingungen bis zur Ordnungszahl 40; sein 10-Minuten-Mittelwert darf innerhalb eines beliebigen Wochenintervalls 95 % der Zeit den Wert von 8 % nicht überschreiten.

Selbst wenn die Oberschwingungsstöraussendung des SR innerhalb der geforderten Bereiche liegt, kann es durch eine ungünstige Summenwirkung mit den Störaussendungen der anderen Netzteilnehmer zu Grenzwertverstößen kommen. Daher gilt es grundsätzlich die Oberschwingungsstöraussendung eines SR so gering wie möglich zu halten.

Spannungsunsymmetrien

Wenn in einem Drehstromsystem die Effektivwerte der Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen oder die Winkel zwischen aufeinanderfolgenden Außenleiterspannungen nicht gleich sind, entspricht dies einer Spannungsunsymmetrie. Zur Bewertung von Unsymmetrien existieren verschiedenen Verfahren. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung des Unsymmetriefaktors k_u , der sich durch den Effektivwert der Gegensystemkomponente geteilt durch den Effektivwert der Mitsystemkomponente berechnet. Für die Versorgungsspannung im öffentlichen Niederspannungsnetz gilt, dass der 10-Minuten-Mittelwert des Unsymmetriefaktors innerhalb eines beliebigen Wochenintervalls 95 % der Zeit zwischen 0 % und 2 % liegen soll [11].

Durch eine phasenspezifische Regelung kann ein SR die Höhe der Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen angleichen und dadurch Spannungsunsymmetrien mindern. Dabei bieten stufenlose SRs, aber auch gestufte SRs mit geringen Stufenhöhen, die besten Ausgleichsmöglichkeiten.

Regelt der SR die Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen phasengleich aus, sollten durch sein Betriebsverhalten keine Auswirkungen auf die Spannungsunsymmetrien festzustellen sein.

Spannungseinbrüche und Spannungsüberhöhungen

Kurzzeitige Verletzungen des Spannungsbandes, die jedoch nicht zwangsläufig zu einer Spannungsbandverletzung im 10-Minuten-Mittelwert führen, gelten als Spannungseinbruch oder Spannungsüberhöhung. In der EN 50160 [11] werden für diese Spannungsereignisse verschiedene Einstufungen vorgenommen, die sich auf die Abweichung vom Spannungsband sowie die Dauer des Ereignisses beziehen.

Ein SR dient der statischen Spannungshaltung und der Kompensation von Spannungsänderungen. Die Regelzeit eines SR soll dabei, wie auch bei einem RONT, im Sekundenbereich liegen, so dass beispielsweise bei einem gestuften SR nicht jede kurzzeitige Spannungsschwankung zu einer Stufung führt.

Für eine gestufte Strangspannungsregelung bedeutet dies jedoch, dass Spannungsbandverletzungen solange Spannungseinbrüche oder Spannungsüberhöhungen erzeugen, bis der SR entsprechend seiner Regelzeit eingreift. Dasselbe Verhalten kann auftreten, wenn eine andauernde Spannungsänderung von einem gestuften SR kompensiert wird und dann abrupt endet. In diesem Fall kann die bestehende Stufung des SR zu einer gegensätzlichen Spannungsbandverletzung führen, bis die Regelung des SR reagiert. Dieses Verhalten sollte insbesondere bei einer dynamischen Soll-

wertvorgabe berücksichtigt werden, und der Sollwert sollte insgesamt nicht zu nah an die Spannungsgrenzen gelegt werden.

Auch bei einer stufenlosen Strangspannungsregelung kann zusätzlich zu einer Ein- und Ausschaltchwelle eine Einschaltverzögerung konfiguriert werden, weswegen es beim Einschalten zu demselben Verhalten kommen kann wie bei der gestuften Strangspannungsregelung. Im eingeschalteten Betrieb folgt der SR dem Sollwert. Allerdings können in Abhängigkeit von der Reglergeschwindigkeit des SR sprunghafte Spannungsänderungen eventuell nur zeitverzögert ausgeregelt werden. Die Auswirkungen einer abrupten Spannungsänderung, die im Zusammenhang mit der SR-Regelung eine Spannungsbandverletzung erzeugen, sind durch die Sollwertfolge jedoch stark gemindert.

2.3 Variable Induktivität als Stellglied eines Strangspannungsreglers

2.3.1 Grundlagen zum Verhalten einer variablen Induktivität

Elektromagnetisches Verhalten

Eine VI besteht aus verschiedenen Spulenwicklungen, die um denselben Kern gewunden sind. Das elektromagnetische Verhalten einer VI wird daher über das allgemeine Verhalten von Spulen beschrieben, wobei zu berücksichtigen ist, dass sich die Auswirkungen der verschiedenen Spulenwicklungen im Kern der VI überlagern und es zu Kopplungen kommt.

Wenn ein elektrischer Strom durch eine Spule fließt, erzeugt dieser ein Magnetfeld um die Spulenwicklungen. Den mathematischen Zusammenhang dazu gibt Formel 2.1 an und entspricht dem Durchflutungsgesetz. Demnach ist das Umlaufintegral von \vec{H} über einen geschlossenen Weg der Länge \vec{l} äquivalent mit dem Strom I , welcher durch eine Spule mit der Windungszahl N fließt.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \cdot N \quad (2.1)$$

In Abhängigkeit von der magnetischen Leitfähigkeit des Materials μ , genannt Permeabilität, erzeugt die magnetische Feldstärke \vec{H} eine magnetische Flussdichte \vec{B} entsprechend Formel 2.2.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.2)$$

Anhand des Flächenintegrals der magnetischen Flussdichte \vec{B} über die Querschnittsfläche des Spulenkerns \vec{A} wird der magnetische Fluss Φ im Spulenkern nach Formel 2.3 bestimmt.

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.3)$$

Neben dem magnetischen Fluss im Spulenkern ist der verkettete Fluss Ψ eine relevante Größe für die Beschreibung einer Spule. Ψ entspricht dem magnetischen Fluss durch alle Spulenwindungen und wird ebenso über Formel 2.3 berechnet, wenn für A die Fläche eingesetzt wird, die durch alle einzelnen Spulenwicklungen aufgespannt wird. Alternativ kann bei einem homogenen Magnetfeld Ψ näherungsweise über Formel 2.4 beschrieben werden.

$$\Psi \approx N \cdot \Phi \quad (2.4)$$

Das Induktionsgesetz besagt nun, dass ein sich zeitlich ändernder verketteter Fluss $\Psi(t)$ in den Spulenwicklungen eine Induktionsspannung $U_i(t)$ erzeugt. Formel 2.5 gibt den mathematischen Zusammenhang zwischen magnetischem Fluss und der induzierten Spannung an.

$$U_i(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Diese Induktionsspannung ist nach der Lenzschen Regel so gerichtet, dass sie ihrer Ursache entgegenwirkt. Für den hier betrachteten Fall bedeutet dies, dass die Induktionsspannung dem sich zeitlich ändernden Strom in der Spule entgegenwirkt. Der proportionale Zusammenhang zwischen der Änderungsrate des Stroms $\frac{di(t)}{dt}$ und der dabei entstehenden Induktionsspannung wird durch die Induktivität L ausgedrückt und ist in Formel 2.6 angegeben. Durch Integration von Zähler und Nenner und mit Formel 2.5 ergibt sich außerdem der Zusammenhang zwischen Ψ und I .

$$L = \frac{U_i(t)}{\frac{di(t)}{dt}} = \frac{\Psi}{I} \quad (2.6)$$

Die Induktivität einer Zylinderspule und Ringkernspule lässt sich näherungsweise über deren Windungszahl N , deren durchschnittliche Länge l , deren Querschnittsfläche A und deren Permeabilität des Kerns μ nach Formel 2.7 bestimmen.

$$L \approx N^2 \frac{\mu \cdot A}{l} \quad (2.7)$$

Detaillierte Herleitungen und Erklärungen zum Durchflutungs- und Induktionsgesetz sowie zur Induktivität sind in [82] und [83] zu finden.

Sättigungs- und Hystereseverhalten

Wie schon Formel 2.2 ausdrückt, hängen die magnetische Feldstärke und die magnetische Flussdichte über die Permeabilität des Materials voneinander ab. Die Permeabilität unterteilt sich in zwei Größen: Zum einen in die magnetische Feldkonstante μ_0 , welche die Permeabilität des Vakuums angibt ($\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$), und zum anderen in die Permeabilitätszahl μ_r , die dem dimensionslosen Verhältnis $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ entspricht. Für Luft und elektrische Leiter entspricht μ_r annähernd dem konstanten Wert 1 [84]. Ferro- und ferrimagnetische Materialien, die für den Kern einer VI zum Einsatz kommen, weisen hingegen ein deutlich größeres μ_r auf [84]. Allerdings ist bei diesen Materialien die Beziehung zwischen der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte aufgrund von Sättigungs- und Hystereseffekten nichtlinear, weswegen dort μ_r keiner Konstante entspricht und sich in Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke ändert [85]. In diesem Zusammenhang werden je nach Anwendung und Materialeigenschaften in der DIN 1324-2 [86] verschiedene Berechnungsmethoden für die Permeabilität definiert. Zur Beschreibung einer nichtlinearen Magnetisierungskurve wird die differentielle Permeabilität μ_{dif} aus Formel 2.8 herangezogen.

$$\mu_{\text{dif}} = \frac{dB}{dH} \quad (2.8)$$

Abbildung 2.10 zeigt die Magnetisierungskurven für ein ferro- oder ferrimagnetisches Material. Die Steigung der Kurven entspricht der differentiellen Permeabilität. Abbildung 2.10 a) zeigt die Magnetisierungskurve bei erstmaliger Magnetisierung, welche auch Neukurve genannt wird [85]. Die Kurve wird in Abhängigkeit von der differentiellen Permeabilität in drei Bereiche unterteilt: Im ungesättigten Bereich A ändert sich die differentielle Permeabilität zu Beginn relativ langsam, erreicht dann jedoch ihr Maximum; im Übergangsbereich B nimmt die differentielle Permeabilität in Richtung μ_0 ab und entspricht im gesättigten Bereich C schließlich nahezu konstant μ_0 [85].

Dieser Kurvenverlauf entsteht durch eine Änderung in der magnetischen Domänenstruktur des Materials. Der langsame Anstieg der Flussdichte bei sehr niedrigen Werten der Feldstärke im Bereich A ist auf anfängliche Wandverschiebungen der Domänenstrukturen zurückzuführen. Nach dieser Anfangsphase steigt die Flussdichte mit zunehmender Feldstärke deutlich schneller an und die Kurve zeigt ein nahezu lineares Verhalten – die Domänen richten sich entsprechend dem Magnetfeld aus. Diese Drehungen sind irreversibel. Im Bereich B nimmt die Anstiegsrate der Flussdichte ab, bis schließlich der Sättigungsbereich erreicht ist. In diesem Sätti-

gungsbereich sind alle magnetischen Domänen in die gleiche Richtung orientiert und die Magnetisierung ist maximal. Der leichte Anstieg, den die Magnetisierungskurve im Bereich C zeigt, ist nur noch auf μ_0 zurückzuführen. [87]

Wird nun die Feldstärke wieder langsam reduziert, folgt das Material nicht erneut der Neukurve, sondern zeigt ein Hystereseverhalten, wie in Abbildung 2.10 b) dargestellt, und erreicht bei einer Feldstärke von null nicht den Ursprung, sondern besitzt eine Restflussdichte B_r , welche Remanenz genannt wird. Dies ist die Auswirkung der irreversiblen Drehungen der Domänenstrukturen. Die Magnetisierung des Materials hängt somit von seiner Verlaufsgeschichte ab. Um die Magnetisierung des Materials wieder auf Null zu bringen, muss eine entgegengesetzte Feldstärke aufgebaut werden. Die Feldstärke, die nötig ist um die Flussdichte auf Null zu bringen, wird Koerzitivfeldstärke H_k genannt. Wird die entgegengesetzte Feldstärke weiter vergrößert, wird der untere Ast der Hysteresekurve durchlaufen. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich in entgegengesetzter Richtung bei einer Reduktion der Feldstärke. [87]

In Abhängigkeit der Materialeigenschaften und der Verarbeitung fallen Hysteresekurven völlig unterschiedlich aus und zeigen beispielsweise einen rechteckigen, runden oder flachen Verlauf [88].

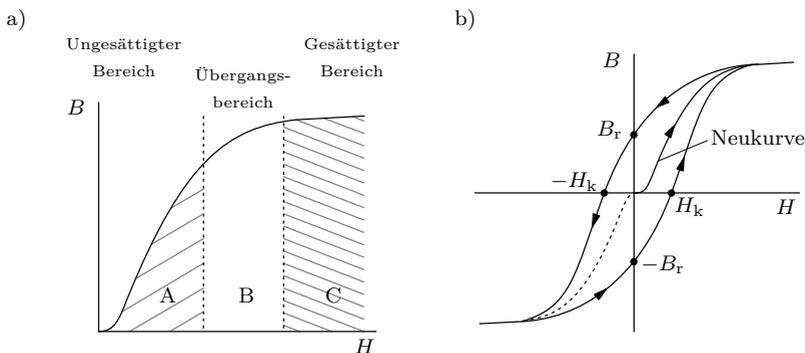


Abbildung 2.10 Magnetisierungskurven für ein ferro- oder ferrimagnetisches Material

a) Neukurve

b) Hystereseschleife

2.3.2 Aufbau und Wirkungsweise einer variablen Induktivität

Eine VI ist eine Untergruppe der sättigbaren Drosselspule (engl.: saturable reactor), welche eine gewollte magnetische Sättigung im Spulenkern verwendet, um ihre Induktivität zu verändern. Die Sättigung wird durch eine zusätzliche DC-Steuerwicklung erzeugt [68]. Der Sättigungseffekt reduziert die effektive Permeabilität des Spulenkerns und proportional dazu die effektive Induktivität der Spule (siehe Formel 2.6).

Die sättigbare Drosselspule wurde bereits im späten 19. Jahrhundert erfunden und wurde im zweiten Weltkrieg für militärische und nautische Zwecke weiterentwickelt. Sie zeichnet sich als zuverlässiges, robustes und langlebiges Bauteil mit geringen Instandhaltungskosten aus. [70]

Je nachdem welche magnetischen Eigenschaften der Spulenkern aufweist, können unterschiedliche Anwendungen mit einer sättigbaren Drosselspule abgedeckt werden. Besteht der Kern beispielsweise aus einem Material mit einer nahezu rechtwinkligen Hysteresekurve, besitzt die sättigbare Drosselspule einen bistabilen Betrieb und ermöglicht eine Anwendung als induktiver Schalter [89], [90]. Diese Anwendungsform ist jedoch heutzutage im Allgemeinen von Halbleitertechnologien abgelöst worden [70].

Für die Anwendung als variable Induktivität ist ein weichmagnetisches Kernmaterial mit abgerundeter Hysteresekurve nötig. Ein zusätzlicher Luftspalt im Kern führt zu einer niedrigen effektiven Permeabilität und vermeidet eine zu schnelle Sättigung. Durch den Betrieb im gesamten Bereich der Hysteresekurve wird eine kontinuierliche Induktivitätsänderung ermöglicht. [91]

In seiner einfachsten Form besteht eine VI, wie in Abbildung 2.11 dargestellt, aus einem ferromagnetischen Kern mit einer Arbeitswicklung, die an einem AC-Stromkreis angeschlossen ist, und einer Steuerwicklung, welche über einen DC-Stromkreis versorgt wird [91]. Ein DC-Strom in der Steuerwicklung erzeugt einen magnetischen DC-Fluss, der eine Vormagnetisierung des Kerns bewirkt, und somit die Kernsättigung steuert. Die beiden Wicklungen sind über die magnetischen Flüsse im Kern miteinander gekoppelt. Bei einem ungesättigten Kern ist die effektive Induktivität der Arbeitswicklung maximal und sinkt mit der Sättigung des Kerns.

Bei dieser einfachsten Konstruktionsform erzeugt der magnetische DC-Fluss jedoch nur in einer der beiden AC-Halbwellen einen Sättigungseffekt. Dies führt zu Asymmetrien in den AC-Signalen. Darüber hinaus kommt es durch die Kopplung der Wicklungen zu einer unerwünschten Spannungsübertragung von der AC- in die

DC-Wicklung. Um diese Effekte zu vermeiden, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Konstruktions- und Optimierungsmöglichkeiten [92]–[97].

Der Fokus der vorliegenden Arbeit richtet sich auf die Konstruktionsvarianten mit Dreischenkeln und Toroidkern, die im Folgenden genauer erklärt werden.

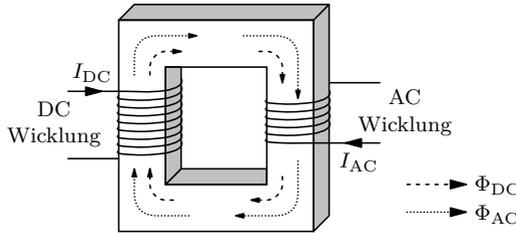


Abbildung 2.11 Einfache Aufbauform einer sättigbaren Drosselspule

Variable Induktivität mit Dreischenkeln

Die erste Konstruktionsvariante entspricht der Struktur aus [92] und basiert auf einem Dreischenkeln. Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, befindet sich die DC-Steuerwicklung auf dem inneren Schenkel des Kerns und die AC-Wicklung teilt sich auf die beiden äußeren Schenkel auf. Die beiden AC-Wicklungen mit selber Windungszahl sind antiparallel verschaltet, so dass die Ströme in den Spulen jeweils in die entgegengesetzte Richtung fließen. Auf Grund dieser Verschaltung erzeugen die beiden Spulen zwei magnetische Flüsse, die sich im äußeren Kreis addieren und im inneren Schenkel auslöschen. Daher kommt es zu keiner Kopplung von der AC- auf die DC- Wicklung.

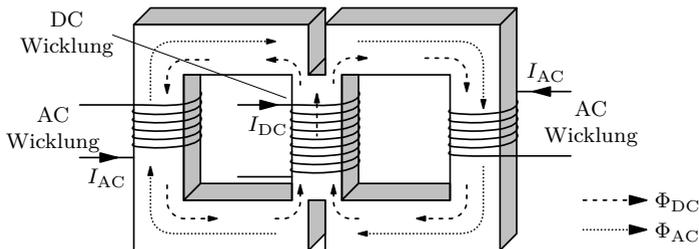


Abbildung 2.12 Aufbau einer variablen Induktivität mit Dreischenkeln

Über die DC-Steuerwicklung kann der gesamte Kern in Sättigung getrieben werden. Dabei erzeugt der DC-Fluss in der rechten Spule einen zur linken Spule entgegengesetzten Sättigungseffekt. Somit wird die eine AC-Halbwelle über die linke Spule und die andere AC-Halbwelle über die rechte Spule beeinflusst, was in Summe eine symmetrische Beeinflussung des AC-Signals ermöglicht.

Zwei Luftspalte oberhalb und unterhalb des inneren Schenkels trennen den äußeren Rahmen, so dass der Eisenkern nur über den inneren Schenkel geschlossen wird. Dies bewirkt in erster Linie für die magnetischen AC-Felder eine Anhebung der effektiven Permeabilität und eine Vermeidung einer schnellen Sättigung durch den AC-Fluss. Auf das magnetische DC-Feld haben die Luftspalte geringere Auswirkungen. Zusätzlich hat die DC-Wicklung im Vergleich zur AC-Wicklung eine deutlich höhere Windungszahl. Diese beiden Maßnahmen bewirken, dass der DC-Strom den Kern schneller in Sättigung treibt als der AC-Strom.

Variable Induktivität mit Toroidkern

Die zweite Variante entspricht der Konstruktion aus [97]. Abbildung 2.13 zeigt den Aufbau und die Richtung der magnetischen Flüsse im Inneren des Kerns. Diese Variante basiert auf zwei unterschiedlich großen Toroidkernen, die ineinander gestülpt sind. Zwischen den beiden Kernen ist die DC-Wicklung zylindrisch gewunden. Die AC-Wicklung ist zu einer Toroidspule um beide Kerne gewunden. Somit stehen die beiden Wicklungen und die jeweiligen magnetischen Felder senkrecht zueinander (siehe Abbildung 2.13 b)), weswegen eine Kopplung der Wicklungen weitestgehend verhindert wird.

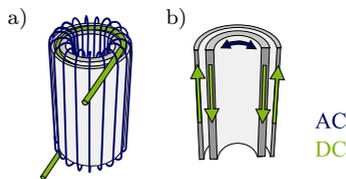


Abbildung 2.13 Variable Induktivität mit Toroidkern

- a) Aufbau
- b) magnetischer Flussverlauf

Vom Prinzip ist die Auswirkung eines DC-Steuerstroms auf die AC-Induktivität dieselbe wie bei den vorherig aufgeführten Varianten, nur dass es anstelle von einer gleich- oder gegengerichteten Vormagnetisierung zu einer Quermagnetisierung

kommt. Die Quermagnetisierung durch die DC-Steuerwicklung vermindert die Beweglichkeit der magnetischen Domänen in Richtung des AC-Feldes, wodurch die Permeabilität verringert wird. Bei einer vollständigen Sättigung des Kerns durch das magnetische DC-Feld hat das magnetische AC-Feld kaum noch Auswirkungen auf die Drehrichtung der Domänen, und die Permeabilität des Kerns liegt bei nahezu μ_0 . Durch die Quermagnetisierung kommt es zu einer symmetrischen Beeinflussung des AC-Signals.

Wie schon bei der vorherigen Variante, ist die Windungszahl der DC-Wicklung deutlich höher als die der AC-Wicklung. Darüber hinaus hat der Luftspalt zwischen den beiden Toroidkernen einen starken Einfluss auf die effektive Permeabilität des magnetischen AC-Feldes, aber er hat kaum Auswirkungen auf die effektive Permeabilität des DC-Feldes. Auf Grund dieser beiden Punkte kann der DC-Steuerstrom den Kern schneller in Sättigung treiben als der AC-Steuerstrom.

2.3.3 Verlauf der Induktivität

Im Betrieb der VI wird innerhalb einer AC-Schwingung ein Hystereseyklus durchlaufen. Bei keiner DC-Ansteuerung der VI, das heißt bei keiner Vormagnetisierung des Kerns durch den DC-Strom, ist die Steigung der Hysteresekurve nahezu konstant, da sie sich innerhalb des ungesättigten Bereichs bewegt. Dasselbe gilt bei maximaler DC-Ansteuerung: In diesem Betriebspunkt befindet sich der Kern in vollständiger Sättigung und die Permeabilität beträgt näherungsweise μ_0 . Diese beiden Betriebspunkte zeichnen sich daher durch ein lineares Verhalten und eine konstante Induktivität aus. Für die Betriebspunkte bei mittlerer DC-Ansteuerung gilt dies jedoch nicht. Dort wird innerhalb eines Hystereseyklus sowohl der ungesättigte als auch der gesättigte Bereich durchlaufen, wodurch Verzerrungen im AC-Stromsignal und AC-Spannungssignal verursacht werden.

Das beschriebene Verhalten wird qualitativ in Abbildung 2.14 anhand von $\Psi(I)$ -Hysteresekurven dargestellt. Bekanntlich verhält sich die $\Psi(I)$ -Hysteresekurve proportional zur $B(H)$ -Hysteresekurve (vgl. Formel 2.1, 2.3 und 2.4), wobei ihre Steigung der Induktivität entspricht (vgl. Formel 2.6) und innerhalb der Hysteresekurve über die differentielle Induktivität L_{dif} berechnet wird ($L_{\text{dif}} = \frac{d\Psi}{dI}$). Da jedoch innerhalb einer AC-Schwingung der gesamte Hystereseyklus durchlaufen wird, ist es sinnvoll, einen Betriebspunkt nicht über die differentielle Induktivität, sondern über dessen statische Induktivität zu beschreiben. Die statische Induktivität entspricht der Steigung der Geraden zwischen dem Ursprung und dem Punkt maximaler Aussteuerung [98]. Bei einer punktsymmetrischen Hysteresekurve ist die statische Induktivität für

beide Stromhalbwellen identisch. In der Abbildung ist für den Betriebspunkt mittlerer DC-Ansteuerung die statische Induktivität eingezeichnet.

Für die Betriebspunkte bei keiner und maximaler DC-Ansteuerung ist die statische Induktivität unabhängig von der AC-Belastung. Liegt dort eine höhere AC-Spannung an der VI an, die in einem stärkeren AC-Strom resultiert, dehnen sich die Hysteresekurven zwar aus, aufgrund des linearen Verhaltens bleibt die statische Induktivität jedoch die gleiche. Anders verhält es sich bei den Betriebspunkten bei mittlerer DC-Ansteuerung. Dort führt eine Vergrößerung der AC-Spannung und des AC-Stroms zu einem ausgeprägteren Sättigungsverhalten, und damit zu einer Reduzierung der statische Induktivität. Die statische Induktivität ist folglich bei mittlerer DC-Ansteuerung abhängig von der Belastung der VI.

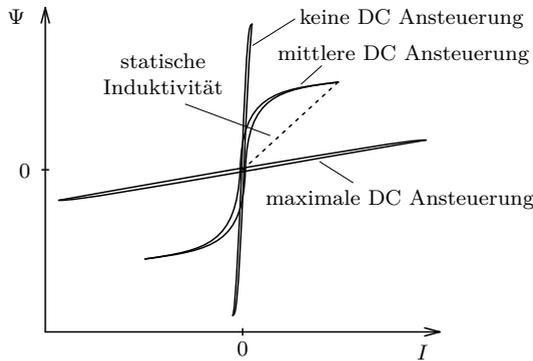


Abbildung 2.14 $\Psi(I)$ -Hysteresekurven für verschiedene Betriebspunkte einer variablen Induktivität

2.3.4 Anwendungen in der Energietechnik

Der Einsatz von sättigbaren Drosselpulen und VIs wurde weitestgehend durch Halbleitertechnologien abgelöst. Dennoch sind in den letzten Jahren neue und innovative Anwendungen auf Basis dieser Technologie für die Energietechnik entstanden, zu denen auch der SR aus [67] gehört. Dies liegt in erster Linie daran, dass sättigbare Drosselpulen und VIs sehr robust und langlebig sind und eine kontinuierliche Induktivitätsänderung ermöglichen.

Neben der Anwendung zur Strangspannungsregelung stellt der Einsatz als Fehlerstrombegrenzer im Übertragungsnetz eine weitere innovative Anwendungsform

dar. Fehlerstrombegrenzer auf Basis von sättigbaren Drosselpulen arbeiten während des üblichen Netzbetriebes in einem konstanten Sättigungszustand, indem der DC-Steuerstrom ausreichend hoch eingestellt wird. Der Fehlerstrom erzeugt einen Fluss, der der Vormagnetisierung durch den DC-Steuerstrom entgegenwirkt und den Kern während der Fehlerstromspitzen in den ungesättigten Bereich zwingt, wodurch der Fehlerstrom effektiv begrenzt wird. Bei Beendigung des Fehlers kehrt der Kern in den Sättigungsbereich zurück und der Fehlerstrombegrenzer weist wieder eine geringe Netzimpedanz auf. In [99] und [100] werden Felderprobungen dieser Anwendung vorgestellt.

Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Leistungsflussregelung. Die AC-Wicklung einer VI wird dabei längs in die Leitung eines Übertragungsnetzes geschaltet. Ein DC-Steuerstrom in der DC-Wicklung beeinflusst die Induktivität der VI und ist damit in der Lage, den Leistungsfluss über die Leitung kontinuierlich zu regeln. In [101] erfolgen Untersuchungen hinsichtlich der Modellierung und der Auswirkungen auf das Netz durch eine solche Anwendung und in [91] wird ein kleiner skaliertes Prototyp im Labor erprobt.

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einsatz einer VI zur Blindleistungskompensation in elektrischen Energiesystemen [102]–[104] und in [105] wird ein neuer Ansatz zur Regelung des maximalen Leistungspunktes (engl.: Maximum Power Point) für PV-Anlagen auf Basis einer VI entwickelt.

3 Strangspannungsregler mit variabler Induktivität

3.1 Konzept

3.1.1 Aufbau

In diesem Kapitel wird das bestehende Konzept des SR mit VI nach [67] betrachtet und dessen Wirkungsweise sowie dessen Netzauswirkungen offengelegt. Im folgenden Verlauf der Arbeit wird dieses Konzept auch als einfacher SR mit VI betitelt. Wie schon in Kapitel 2.2.2 erläutert, funktioniert dieses Konzept über einen induktiven Spannungsteiler. Der Spannungsteiler setzt sich aus der Primärwicklung des Längstransformators und der VI zusammen. Über die Reduktion der VI steigt der Spannungsabfall an der Primärseite des Längstransformators, welcher auf die Sekundärseite transformiert wird und dadurch längs in den Netzstrang eingepreßt wird. Da die VI kontinuierlich verändert wird, fällt die Spannungsänderung am Ausgang des SR stufenlos aus. Zudem ermöglichen die verwendeten Komponenten entsprechend Kapitel 2.2.2 einen robusten Betrieb. Durch eine Erweiterung des Konzepts von [67] mit einer Schaltmimik, die eine Umpolung der Primärwicklung des Längstransformators ermöglicht, wird der SR sowohl zur Spannungsanhebung als auch zur Spannungsabsenkung verwendet.

Abbildung 3.1 zeigt dazu den einphasigen Aufbau des SR mit Schaltmimik. Durch Schließen von Schalter S_{02} , S_1 und S_4 wird der spannungsabsenkende Betrieb ermöglicht. Hingegen realisiert das Schließen von Schalter S_{02} , S_2 und S_3 den spannungsanhebenden Betrieb. Um den Einfluss des SR auf die Netzspannung zu überbrücken, wird Schalter S_{02} geöffnet und Schalter S_{01} geschlossen, wodurch der Querzweig vom Netz getrennt und der Längstransformator kurzgeschlossen wird.

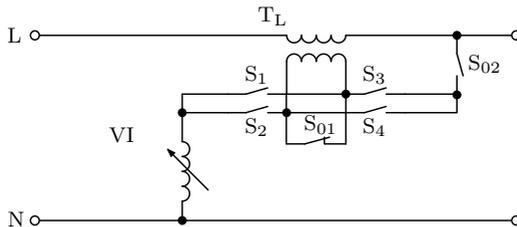


Abbildung 3.1 Einphasige Darstellung des einfachen Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität

Aus Sicherheitsgründen sind die Schalter S_1 bis S_4 sowie S_{02} als Schließer zu realisieren; das bedeutet, dass sie im Ausgangszustand geöffnet sind. S_{01} ist hingegen als Öffner zu realisieren; sein Ausgangszustand sollte geschlossen sein. Dies bewirkt, dass sich der SR im Falle eines Fehlers oder einer Unterbrechung im Stromkreis der Schalteransteuerung automatisch in den ausgeschalteten Betrieb begibt.

3.1.2 Ersatzschaltbild

Die Ersatzschaltbilder des einfachen SR mit VI werden in Abbildung 3.2 a) für den spannungsanhebenden und in in Abbildung 3.2 b) für den spannungsabsenkenden Betrieb dargestellt. Der Längstransformator wird darin in Anlehnung an das T-Ersatzschaltbild eines Transformators dargestellt. Eine Herleitung des T-Ersatzschaltbildes ist [26] zu entnehmen. Die Verluste und die Streuung einer Wicklung werden für die Sekundärseite über R_S und $X_{S,\sigma}$ und für die Primärseite über R_P und $X_{P,\sigma}$ dargestellt. Die Übersetzung des Längstransformators wird über einen idealen Übertrager nachgebildet. Das Magnetisierungsverhalten und die Eisenverluste sind bezogen auf die Primärseite über $X_{P,h}$ und $R_{P,h}$ modelliert. Die VI setzt sich zusammen aus dem Wicklungswiderstand $R_{VI,w}$, dem Eisenverlustwiderstand $R_{VI,fe}$ und der variablen Reaktanz X_{VI} . Der Wert der Reaktanz wird durch einen DC-Steuerstrom in der zusätzlichen DC-Steuerwicklung variiert. Die DC-Steuerwicklung wird im Ersatzschaltbild nicht dargestellt. Stattdessen wird dieser Zusammenhang über die Funktion $X_{VI}(I_{DC,VI})$ ausgedrückt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass in Abhängigkeit von der DC-Ansteuerung X_{VI} nicht als linear angenommen werden darf, sondern ein Sättigungsverhalten aufweist. Linearität existiert nur für einen ungesättigten Kern bei keiner DC-Ansteuerung und für einen vollständig gesättigten Kern bei maximaler DC-Ansteuerung.

Der spannungsanhebende Betrieb kommt in der Regel im Verbrauchsfall zum Einsatz, um dort Spannungsabsenkungen auszugleichen. Daher wird im entsprechenden Ersatzschaltbild in Abbildung 3.2 a) für die Leitungsströme eine Flussrichtung von der Eingangs- zur Ausgangsseite angenommen. Dabei erzeugt der komplexe Leitungsstrom \underline{I}_A über die Streureaktanz $X_{S,\sigma}$ und den Wicklungswiderstand R_S einen Spannungsabfall an der Sekundärwicklung, der gegen die Spannung wirkt, die durch die Primärwicklung eingepreßt wird. Dies findet bei der Spannungspfeilrichtung an der Sekundärwicklung Berücksichtigung.

Im Ersatzschaltbild für den spannungsabsenkenden Betrieb in Abbildung 3.2 b) wird die Umpolung der Primärwicklung über einen getauschten Windungssinn an der Primärwicklung realisiert. Zusätzlich wird eine umgekehrte Flussrichtung des Lei-

tungsstroms angenommen, da diese Betriebsweise in der Regel genutzt wird, um Spannungsanhebungen durch eine Rückspeisung zu kompensieren. Aufgrund dieser beiden Änderungen drehen sich zusätzlich die Spannungspfeile an der Sekundärseite des Längstransformators.

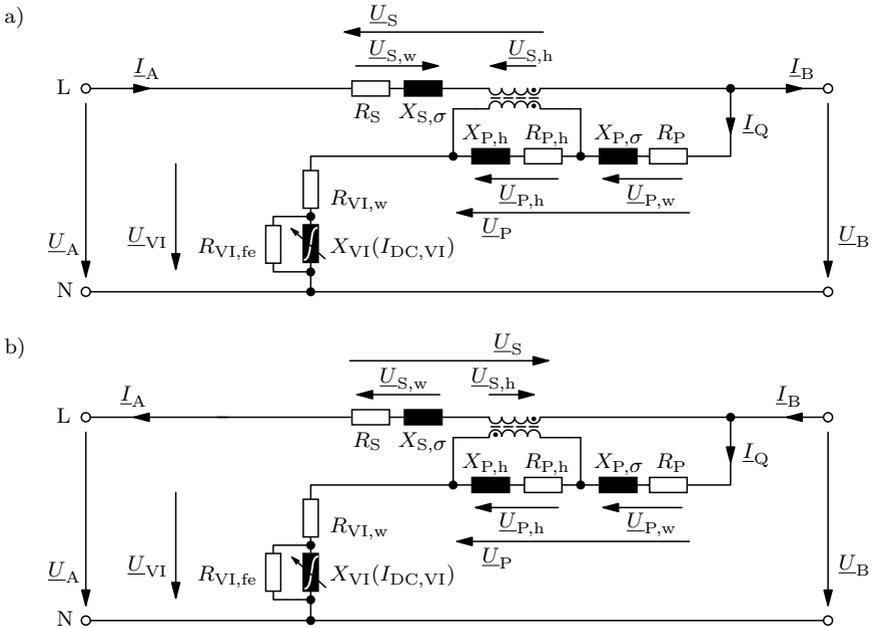


Abbildung 3.2 Einphasige Ersatzschaltbilder des einfachen Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität

- a) Spannungsanhebender Betrieb
b) Spannungsabsenkender Betrieb

Die einzelnen Widerstände und Reaktanzen im Ersatzschaltbild werden zu den folgenden komplexen Impedanzen zusammengefasst:

$$\underline{Z}_{P,h} = R_{P,h} + j \cdot X_{P,h}$$

$$\underline{Z}_{S,w} = R_S + j \cdot X_{S,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{P,w} = R_P + j \cdot X_{P,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI}) = R_{VI,w} + \frac{R_{VI,fe} \cdot j \cdot X_{VI}(I_{DC,VI})}{R_{VI,fe} + j \cdot X_{VI}(I_{DC,VI})}$$

3.1.3 Systemgleichungen

Basierend auf den Ersatzschaltbildern werden die Systemgleichungen für den SR aufgestellt. Nachstehend erfolgt eine detaillierte Herleitung für den spannungsanhebenden Betrieb. Dazu wird zunächst die komplexe Eingangsspannung \underline{U}_A , die zwischen Außenleiter und Neutralleiter anliegt, über die Maschengleichung in Formel 3.1 ausgedrückt.

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B - \underline{U}_S \quad (3.1)$$

Darin ist \underline{U}_S die komplexe Spannung an der Sekundärseite des Längstransformators, welche sich entsprechend Formel 3.2 auf $\underline{U}_{S,h}$ und $\underline{U}_{S,w}$ aufteilt. $\underline{U}_{S,h}$ ist die komplexe Hauptspannung der Sekundärseite und $\underline{U}_{S,w}$ die komplexe Spannung an der Streureaktanz und dem Wicklungswiderstand. $\underline{U}_{S,h}$ lässt sich auch mithilfe des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} über die komplexe Hauptspannung der Primärseite $\underline{U}_{P,h}$ ausdrücken.

$$\underline{U}_S = \underline{U}_{S,h} - \underline{U}_{S,w} = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} - \underline{U}_{S,w} \quad (3.2)$$

\underline{U}_B ist die komplexe Außenleiter-Neutralleiter-Spannung am Ausgang des SR, die sich nach der Maschengleichung in Formel 3.3 aus \underline{U}_{VI} , die komplexe Spannung an der VI, und \underline{U}_P , die komplexe Spannung an der Primärseite des Längstransformators, zusammensetzt. Dabei besteht \underline{U}_P aus $\underline{U}_{P,h}$, die komplexen Hauptspannung der Primärwicklung, und $\underline{U}_{P,w}$, die komplexe Spannung an der Streureaktanz und dem Wicklungswiderstand.

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{VI} + \underline{U}_P = \underline{U}_{VI} + \underline{U}_{P,w} + \underline{U}_{P,h} \quad (3.3)$$

Durch Einsetzen von Formeln 3.2 und 3.3 in Formel 3.1 ergibt sich folgender Zusammenhang für \underline{U}_A :

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{VI} + \underline{U}_{P,w} + \underline{U}_{P,h} - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} + \underline{U}_{S,w} \\ &= \underline{U}_{VI} + \underline{U}_{P,w} + \frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} + \underline{U}_{S,w} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Die komplexen Spannungen \underline{U}_{VI} , $\underline{U}_{P,w}$ und $\underline{U}_{S,w}$ werden nach dem ohmschen Gesetz über den komplexen Querstrom \underline{I}_Q , bzw. den komplexen Eingangsstrom \underline{I}_A , und die entsprechende Impedanz wie folgt ausgedrückt:

$$\underline{U}_{VI} = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI}) \quad (3.5)$$

$$\underline{U}_{P,w} = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_{P,w} \quad (3.6)$$

$$\underline{U}_{S,w} = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{S,w} \quad (3.7)$$

$\underline{U}_{P,h}$ bildet sich aus der Selbstinduktionsspannung der Primärwicklung sowie der Gegeninduktionsspannung, die durch die Sekundärwicklung erzeugt wird. Die Selbstinduktionsspannung ergibt sich aus dem Spannungsabfall von \underline{I}_Q an der Hauptimpedanz $\underline{Z}_{P,h}$. Die Gegeninduktionsspannung resultiert aus dem Spannungsabfall von \underline{I}_A an $\underline{Z}_{P,h}$; jedoch muss in diesem Zusammenhang \underline{I}_A auf die Primärwicklung bezogen werden. Aufgrund der Stromrichtung von \underline{I}_A wirkt die Gegeninduktionsspannung der Selbstinduktionsspannung entgegen. Eine Überlagerung der beiden Spannungen entsprechend Formel 3.8 resultiert in $\underline{U}_{P,h}$.

$$\underline{U}_{P,h} = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_{P,h} - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,h} \quad (3.8)$$

Werden nun jeweils in Formel 3.3 und 3.4 die Formeln 3.5–3.8 eingesetzt und die Gleichungen nach \underline{I}_Q und \underline{I}_A freigestellt, ergeben sich für \underline{U}_A und \underline{U}_B die folgenden Gleichungen:

$$\underline{U}_B = \underline{I}_Q \cdot (\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})) - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,h} \quad (3.9)$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} - \underline{Z}_{S,w} \right) \quad (3.10)$$

Zuletzt wird nun Formel 3.10 nach \underline{I}_Q umgestellt

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} - \underline{Z}_{S,w} \right)}{\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})} \quad (3.11)$$

und die resultierende Formel 3.11 in Formel 3.9 eingesetzt. Dies führt zur Systemgleichung für den spannungsanhebenden Betrieb:

$$\underline{U}_B = -\frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,h} + \left(\underline{U}_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} - \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \cdot \frac{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})}{\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})} \quad (3.12)$$

Aus der Systemgleichung wird abgeleitet, dass die komplexe Ausgangsspannung \underline{U}_B über die Impedanz der VI verändert wird. Je mehr die Impedanz der VI reduziert wird, desto stärker fällt die Spannungsänderung aus. Dieser Zusammenhang ist jedoch aufgrund des Bruchs nichtlinear. Darüber hinaus besitzen Eingangsspannung \underline{U}_A und Eingangsstrom \underline{I}_A Einfluss auf \underline{U}_B und haben damit eine Auswirkung auf die spannungsändernde Wirkung des SR.

Die Systemgleichung für den spannungsabsenkenden Betrieb wird analog hergeleitet und resultiert in der Formel 3.13.

$$\underline{U}_B = -\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,h} + \left(\underline{U}_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \cdot \frac{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})}{\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})} \quad (3.13)$$

3.2 Betriebsverhalten

3.2.1 Laboraufbau

Das vorgestellte Konzept des einfachen SR mit VI nach der Patentanmeldung [67] wird im Folgenden an einem Prototypen im Labor untersucht. Dazu wird auf eine Umsetzung des Herausgebers der Patentanmeldung zurückgegriffen. Ziel der Untersuchung ist es neben der Analyse des Betriebsverhaltens, die Netzauswirkungen des SR offenzulegen und die Ursachen möglicher Netzurückwirkungen zu identifizieren.

Der dreiphasige Aufbau des SR ist phasenunabhängig. Pro Phase kommt ein Längstransformator zum Einsatz, der jeweils als einphasiger Toroidkerntransformator ausgeführt ist. Die pro Quersweig verwendete VI entspricht der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten VI mit Toroidkern. Die elektrischen Kenndaten der beiden Komponenten sind in Anhang A.1 aufgeführt. Die dort angegebenen Werte basieren auf Herstellerangaben und eigenen Messungen. Die Schaltmimik wird bei diesem Laborprototyp noch nicht umgesetzt. Um einen Wechsel der Betriebsweise durchzuführen, muss daher die Schaltung manuell durch eine Umpolung des Längstransformators umkonfiguriert werden.

Um Untersuchungen bei verschiedenen Netzsituation zu ermöglichen, wird der Prototyp entsprechend Abbildung 3.3 in die Laborumgebung integriert. Eingangsseitig erfolgt ein Netzanschluss über einen 104-kVA-Stelltransformator, der eine dreiphasige Versorgungsspannung zwischen 0 V und 500 V bereitstellt. Ausgangsseitig ist der Prototyp an eine 100-kVA-Leistungsverstärkergruppe angeschlossen. Das Netz ist als 4 Leitersystem mit kombiniertem Schutz- und Neutralleiter (TN-C Topologie) aufgebaut. Neben den Außenleitern L1, L2 und L3 existiert folglich ein gemeinsamer Schutz- und Neutralleiter (PEN-Leiter). Der Prototyp wird ein- und ausgangsseitig über zwei Leistungsschalter zu- und abgeschaltet. Die Leistungsschalter dienen zusätzlich als Überstromschutzeinrichtung, die einen Schutz sowohl bei Überlast als auch bei Kurzschluss sicherstellen.

Die Amplitude der Versorgungsspannung wird über den Stelltransformator eingestellt. Über die Leistungsverstärker, welche dem Spannungssignal der Versorgungsspannung folgen, kann ein 50-Hz-Stromsignal auf die Leitungen gegeben werden. Die Stromrichtung ist frei wählbar, so dass über die Leistungsverstärker sowohl eine Last- als auch eine Einspeisesituation nachbildet werden kann. Für den unbelasteten Betrieb des SR sind die Leistungsverstärker ausgeschaltet, was bedeutet, dass die Ausgangsseite des SR im Leerlauf ist und neben der Stromversorgung des SR kein zusätzlicher Leitungsstrom über die Sekundärseite des Längstransformators fließt.

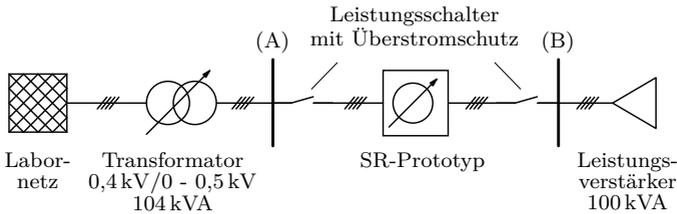


Abbildung 3.3 Laboraufbau zur Untersuchung verschiedener Netzsituationen

Neben den Messungen im regulären Betrieb wird für weitere Untersuchungen eine Kurzschlussmessung am Prototyp benötigt. Dazu wird der SR ausgangsseitig kurzgeschlossen, was beinhaltet, dass die drei Außenleiter direkt mit dem PEN-Leiter verbunden werden. Abbildung 3.4 zeigt dazu die einphasige Schaltskizze des Versuchsaufbaus. Für eine dreiphasige Kurzschlussmessung wird dieser Aufbau für jede Phase umgesetzt. Über die Justierung der Spannung am Stelltransformator wird der Leitungsstrom, der über den SR fließt, eingestellt.

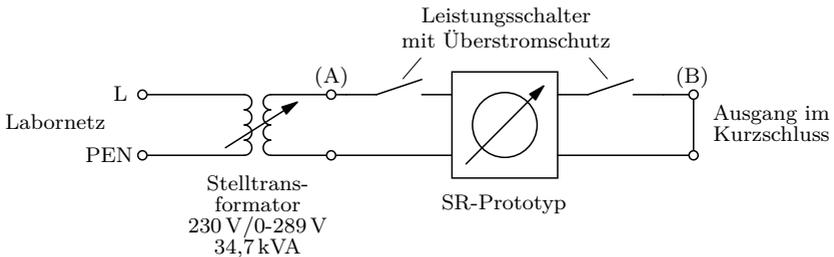


Abbildung 3.4 Einphasiger Laboraufbau der Kurzschlussmessung

Für die Untersuchungen des Betriebsverhaltens wird der Laborprototyp mit Messpunkten zur Strom- und Spannungsmessung versehen, wie in der einphasigen Schaltskizze in Abbildung 3.5 aufgeführt. Es werden Messungen für verschiedene Ansteuerungszustände der VI im eingeschwungenen Zustand durchgeführt. Die Ansteuerung der VI erfolgt dabei manuell über ein einstellbares DC-Netzgerät, welches im dreiphasigen Aufbau alle VIs symmetrisch ansteuert.

Allerdings kommt es im regulären Betrieb in der VI zu Rückkopplungen von der AC-Wicklung auf die DC-Wicklungen, weswegen der DC-Steuerstrom $I_{DC,VI}$ mit Schwingungen behaftet ist. Für die Angabe des DC-Steuerstroms im eingeschwungenen Zustand wird daher der Mittelwert $\bar{I}_{DC,VI}$ über jeweils 0,02s gebildet.

Die Laborversuche werden dreiphasig durchgeführt. Da jedoch der Aufbau und die Wirkungsweise des Laborprototyps phasenunabhängig sind, erfolgt die Analyse der Ergebnisse einphasig.

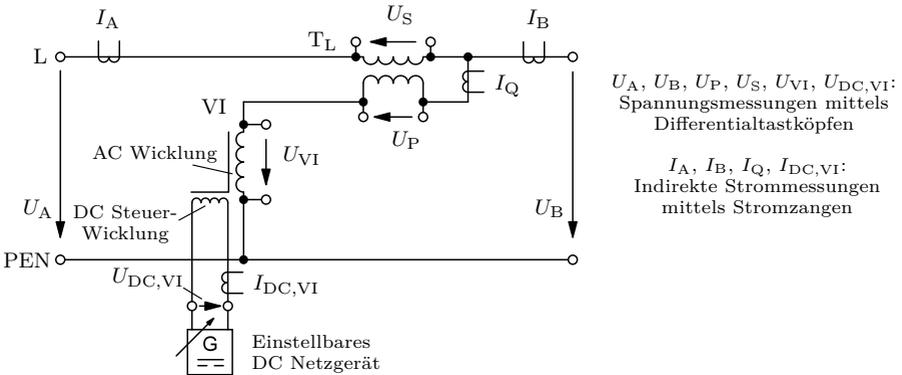


Abbildung 3.5 Schaltskizze für den Laboraufbau des einfachen Spannungslängsreglers mit variabler Induktivität

3.2.2 Verhalten im unbelasteten Betrieb

Spannungssignale

Im Folgenden werden die Auswirkungen eines veränderten DC-Steuerstroms am unbelasteten SR-Prototypen im Labor untersucht. Dahingehend werden in Abbildung 3.6 zunächst die Messergebnisse der Spannungssignale U_A , U_B und U_S für verschiedene DC-Steuerströme im spannungsanhebenden Betrieb dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Eingangsspannung U_A durch das übergeordnete Netz konstant gehalten wird.

Die Spannungsverläufe von U_S zeigen, dass abhängig vom DC-Steuerstrom unterschiedliche Spannungen in das Netz längs eingepreßt werden. Bei einem DC-Steuerstrom von 0 A kommt es zu keiner Spannungseinprägung. Mit steigendem DC-Steuerstrom wächst U_S , wobei starke Verzerrungen im Signal sichtbar werden. Bei einem Steuerstrom von 1 A kommt es schließlich zu einer maximalen Einprägung bei nahezu unverzerrtem Spannungssignal mit einem Spannungseffektivwert $U_{S,\text{eff}}$ von knapp 21 V.

Entsprechend der Maschenregel (vgl. Formel 3.1) addiert sich U_S auf U_A und ergibt die Ausgangsspannung U_B . Da U_S phasengleich zu U_A ist, kommt es zu einer kontinuierlichen Anhebung von U_B mit steigendem DC-Steuerstrom. Die starken Verzerrungen in U_S bewirken nur geringe Verzerrungen in U_B , da die Amplitude von U_B deutlich größer ist als die von U_S .

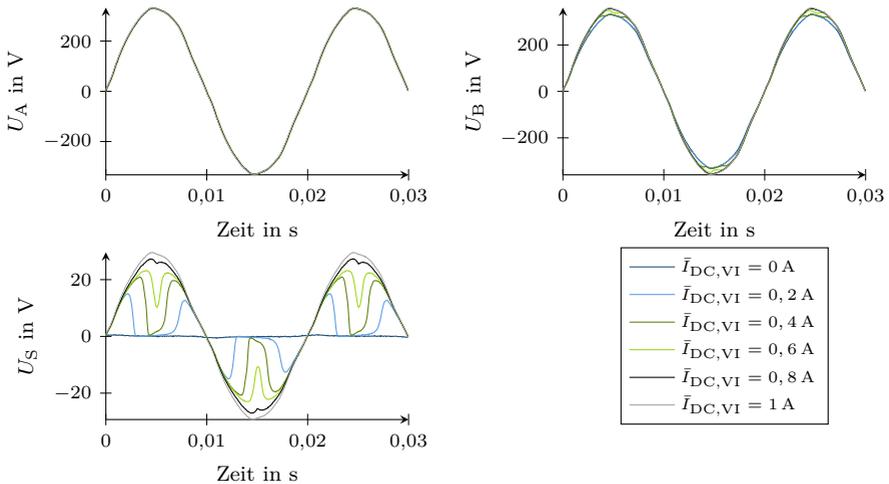


Abbildung 3.6 Signale der Eingangsspannung U_A , Ausgangsspannung U_B und Sekundärspannung am Längstransformator U_S für verschiedene DC-Steuerströme $\bar{I}_{\text{DC,VI}}$ im spannungsanhebenden Betrieb

Verhalten der variablen Induktivität

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, kommt die Spannungsänderung von U_S durch eine veränderte Induktivität der VI, welche mit steigendem DC-Steuerstrom sinkt. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 3.7 a) die $\Psi(I)$ -Kurven für den VI Kern aus Sicht der AC-Wicklung bei unterschiedlichen DC-Steuerströmen. Ψ wird aus dem Integral der anliegenden Spannung berechnet (vgl. Formel 2.5). Die Steigung der Kurve stellt die Induktivität dar. Bei einem DC-Steuerstrom von 0 A befindet sich die Kurve vollständig im ungesättigten Bereich, weswegen die Induktivität nahezu konstant ist. Mit steigendem DC-Steuerstrom kommt es zu einer steigenden Vormagnetisierung des Kerns, weswegen es zu einer früheren Sättigung und einer reduzierten statischen Induktivität kommt. Die $\Psi(I)$ -Kurven durchlaufen für die DC-Steuerströme zwischen 0,2 A und 0,6 A sowohl den ungesättigten als auch den gesättigten Bereich, weswegen die Induktivität der VI innerhalb einer AC-Halbwelle nicht konstant ist. Ab 0,8 A existiert kein ungesättigter Bereich mehr und die Induktivität zeigt erneut ein annähernd konstantes Verhalten.

Um den Induktivitätsabfall zu quantifizieren, werden für die $\Psi(I)$ -Kurven die statischen Induktivitäten L_{VI} berechnet und in Abbildung 3.7 b) über den DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$ aufgetragen. Zur besseren Darstellung ist die Initialinduktivität, die bei mehr als 11 H liegt, in der Abbildung nicht mit eingezeichnet. Anhand des Verlaufs wird deutlich, dass die Induktivität nicht linear abfällt, sondern sich zu Beginn stark verringert und mit steigendem DC-Steuerstrom stagniert. Insgesamt sinkt mit steigender Ansteuerung die statische Induktivität auf etwa 0,01 H.

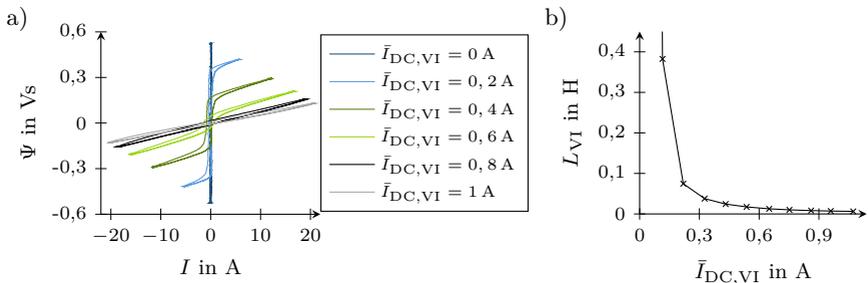


Abbildung 3.7 Verhalten der variablen Induktivität

a) $\Psi(I)$ -Kurven für den Kern der variablen Induktivität aus Sicht der AC-Wicklung für unterschiedliche DC-Steuerströme

b) statische AC-Induktivität L_{VI} in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$

Oberschwingungen

Das Sättigungsverhalten in der VI führt zu einem verzerrten U_{VI} und I_Q und dementsprechend auch zu einem verzerrten U_P . Die Verzerrungen in U_P werden auf die Sekundärseite transformiert und führen zu dem Signalverlauf von U_S , der in Abbildung 3.6 sichtbar wird. Dadurch kommt es durch den SR zu einer Oberschwingungsemission in die Ausgangsspannung U_B , die über den Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} quantifiziert wird.

Im Rahmen der Labormessungen weißt jedoch auch die Eingangsspannung U_A durch das vorgelagerte Netz geringe Verzerrungen auf. Der Gesamtüberschwingungsgehalt der Eingangsspannung liegt für die Messungen stetig bei 1,9%. Um die Verzerrungen durch den SR für eine sinusförmige Eingangsspannung zu ermitteln, wird das Oberschwingungsspektrum der Eingangsspannung von dem Oberschwingungsspektrum der Ausgangsspannung abgezogen. Diese Methode ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit mit den folgenden Labormessungen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine solche Bereinigung nur für lineare Systeme erlaubt ist. Die geringen Verzerrungen der Eingangsspannung haben jedoch keine nennenswerten Auswirkungen auf das nichtlineare Verhalten der VI im SR, weswegen die nichtlinearen Effekte in diesem Fall vernachlässigt werden können.

In Abbildung 3.8 ist der bereinigte THD_{U_B} in Abhängigkeit von der Ansteuerung des SR dargestellt. Zwischen einem $\bar{I}_{DC,VI}$ von 0,1 A und 0,6 A wird ein vergrößerter THD_{U_B} sichtbar. Dies entspricht dem Ansteuerungsbereich, in dem die VI keine konstante Induktivität besitzt. Die maximale Oberschwingungsemission mit einem THD_{U_B} von 3% liegt bei einem $\bar{I}_{DC,VI}$ von 0,3 A.

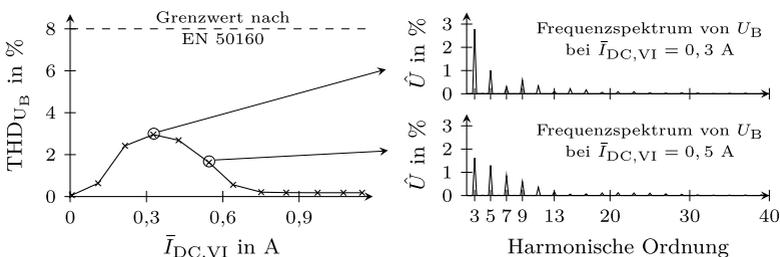


Abbildung 3.8 Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$ und zwei ausgewählte Frequenzspektren der Ausgangsspannung U_B ; (\hat{U} : Scheitelwert der Oberschwingungsspannung bezogen auf den Scheitelwert der Grundschwingung)

Zusätzlich zeigt die Abbildung 3.8 die Frequenzspektren für eine Ansteuerung mit 0,3 A und 0,5 A. Die beiden ausgewählten Frequenzspektren führen stellvertretend für die verschiedenen Ansteuerungsbereiche auf, dass in erster Linie die dritte, fünfte und siebte Harmonische erzeugt werden, wobei in Abhängigkeit von der Ansteuerung die Oberschwingungsanteile unterschiedlich ausfallen.

Darüber hinaus resultieren die Verzerrungen in I_Q in einem überschwingungsbehafteten Strombedarf, der in Abhängigkeit von der Netzimpedanz am Anschlusspunkt zu Oberschwingungsspannungen führt. Bezogen auf den Nennstrom liegt der Gesamtüberschwingungsgehalt des Stroms THD_I bei maximal 0,8 %. Der Verlauf des THD_I korreliert dabei mit dem Verlauf des THD_{U_B} .

Spannungsänderung

Die Reichweite der kontinuierlichen Spannungsreglung wird über die Spannungsänderung ΔU in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom veranschaulicht. Die Spannungsänderung berechnet sich aus der Differenz der Effektivwerte von Ausgangs- und Eingangsspannung ($\Delta U = U_{B,\text{eff}} - U_{A,\text{eff}}$). Abbildung 3.9 zeigt den ΔU -Verlauf des SR für den spannungsanhebenden Betrieb im unbelasteten Zustand. Wie schon bei dem Verlauf der statischen Induktivität, zeigt der ΔU -Verlauf kein lineares Verhalten. Dies entsteht jedoch nicht durch die Nichtlinearität des L_{VI} -Verlaufs, sondern durch den Aufbau des SR als induktiver Spannungsteiler (vgl. Formel 3.12 und Formel 3.13). Tatsächlich mildert sogar das nichtlineare Verhalten von L_{VI} die aufbaubedingte Nichtlinearität, wie Analysen mit den Systemgleichungen zeigen.

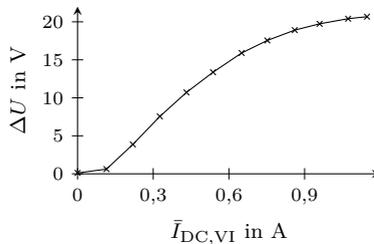


Abbildung 3.9 Spannungsänderung ΔU in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$ für den spannungsanhebenden Betrieb im unbelasteten Zustand

Unterschiede bei der Betriebsweise

Der spannungsabsenkende Betrieb verhält sich im unbelasteten Zustand prinzipiell ebenso wie der spannungsanhebende Betrieb. Durch die Umpolung der Sekundärwicklung kommt es allerdings, der Betriebsweise entsprechend, zu einer Absenkung der Ausgangsspannung U_B . ΔU fällt demnach negativ aus. Der Verlauf von ΔU verhält sich dabei nahezu X-Achsensymmetrisch zum Verlauf des spannungsanhebenden Betriebs. Allerdings reduziert sich die Spannungsänderung geringfügig, da die Ausgangsspannung abgesenkt wird und dadurch am Spannungsteiler im Querzweig des SR eine geringere Gesamtspannung anliegt.

3.2.3 Verhalten im belasteten Betrieb

Erläuterung zum Einfluss des Leitungsstroms

Im belasteten Betrieb kommt es zu einem Leitungsstrom über den SR, der an der Sekundärwicklung des Längstransformators einen Spannungsabfall verursacht. Der Spannungsabfall wird durch den Wicklungswiderstand und die Streuinduktivität der Sekundärwicklung sowie durch die Hauptimpedanz, die sich aus der Hauptinduktivität und dem Eisenverlustwiderstand zusammensetzt, hervorgerufen. Während der Wicklungswiderstand und die Streuinduktivität konstant sind und aufgrund ihrer niedrigen Impedanz nur geringe Netzauswirkungen besitzen, hängt der Einfluss der Hauptimpedanz, die das Magnetisierungsverhalten im Transformator Kern darstellt, von der Belastung des Längstransformators ab und kann mitunter durch eine hohe Impedanzeinprägung sehr starke Netzauswirkungen besitzen.

Die Belastung des Längstransformators hängt wiederum mit der Ansteuerung des SR zusammen. Bei keiner Ansteuerung, also einem $\bar{I}_{DC,VI}$ von 0 A, fließt aufgrund der hochohmigen VI kein Strom im Querzweig des SR und die Primärwicklung befindet sich folglich im Leerlauf. Über einen Leitungsstrom in der Sekundärwicklung wird jedoch ein Magnetfeld im Längstransformator aufgebaut. Durch die fehlende Kopplung verhält sich die Sekundärwicklung wie eine Drosselspule, weswegen in diesem Zustand die Hauptimpedanz des Längstransformators vollständig in der Sekundärwicklung bemerkbar wird. Mit steigender Ansteuerung sinkt der Induktivitätswert der VI und es fließt ein Strom im Querzweig des SR. Im Längstransformator kommt es zu einer Überlagerung der magnetischen Felder, welche durch den Leitungsstrom in der Sekundärwicklung und den Querstrom in der Primärwicklung erzeugt werden. Gleichzeitig wächst die Spannung an der Primärwicklung und es erfolgt eine Leistungsübertragung von der Primär- in die Sekundärwicklung, die

mit steigender Ansteuerung zunimmt. Bedingt durch das magnetische Gleichgewicht im Transformator Kern sinkt mit wachsender Leistungsübertragung der Einfluss der Hauptimpedanz auf die Wicklungen.

Die durch die Sekundärwicklung eingeprägte Impedanz entspricht der Längsimpedanz des SR, die eine Steigerung der Netzimpedanz verursacht. Entsprechend der oben stehenden Erläuterung ist grundsätzlich die Längsimpedanz von diesem SR im Initialzustand maximal und sinkt mit wachsender Ansteuerung. Über den Spannungsabfall an der Längsimpedanz wird die spannungsändernde Wirkung des SR beeinflusst. So kommt es in Abhängigkeit von der Stromrichtung und Phasenlage von I_A zu einer Verstärkung, Verringerung oder Verschiebung der ΔU -Kennlinie.

Neben dem Spannungsabfall an der Längsimpedanz beeinflusst der Leitungsstrom I_A auch das Magnetisierungsverhalten des Längstransformators. Über die Sekundärwicklung variiert I_A die Gegenkopplung des Längstransformators und es wird ein zusätzlicher Strom in den Querzweig eingepägt. Dies bewirkt in Abhängigkeit von der Höhe und Phasenlage des Leitungsstroms, neben der Variation der Querstromhöhe, eine Phasendrehung des Querstroms. Im selben Zuge kommt es zu einer Veränderung des Spannungsabfalls an der Primärwicklung und dementsprechend auch an der VI. Die Variationen des Stroms und der Spannungen im Querzweig resultieren zum einen in einem veränderten Leistungsbezug und zum anderen in einer abweichenden Oberschwingungsemission.

Kurzschlussimpedanz

Im Kurzschlussfall ist der Strom im Querzweig des SR im Vergleich zum Kurzschlussstrom auf der Leitung marginal, weswegen das Impedanzverhalten des SR maßgeblich über seine Längsimpedanz definiert wird. Somit ermöglicht die Kurzschlussimpedanz $Z_{SR,KS}$ eine allgemeine Abschätzung der Längsimpedanz des SR und damit eine Bemessung der Impedanzeinprägung in das Netz. $Z_{SR,KS}$ liefert damit den Wert um den die Netzimpedanz durch den Einsatz des SR gesteigert wird. Um $Z_{SR,KS}$ für die verschiedenen DC-Steuerströme zu ermitteln, werden Kurzschlussmessungen am SR durchgeführt. Der zugehörige Laboraufbau ist in Abschnitt 3.2.1 erläutert. Anhand der Messung des Eingangstroms I_A und der Eingangsspannung U_A lässt sich $Z_{SR,KS}$ berechnen.

Abbildung 3.10 zeigt $Z_{SR,KS}$ in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass $Z_{SR,KS}$ im Initialzustand mit etwa $0,16\Omega$ am höchsten ist. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, wird dies durch den hochohmigen Querzweig verursacht, der einen primärseitigen Leerlauf am Längstransfor-

mator bewirkt. Mit steigender Ansteuerung sinkt die VI und damit die Impedanz im Querzweig. Die resultierende Leistungsübertragung im Längstransformator bewirkt eine Absenkung von $Z_{\text{SR,KS}}$. Bei der kleinstmöglichen Querzweigimpedanz kommt es zur maximalen Leistungsübertragung im Längstransformator und $Z_{\text{SR,KS}}$ sinkt auf den Minimalwert von $0,029 \Omega$. Dieser Minimalwert liefert die Größenordnung, in der im Allgemeinen die kleinstmögliche Impedanzeinbringung durch einen SR mit entsprechendem Spannungsregelbereich und Strombedarf liegt.

Da sich die Längsimpedanz des SR aus dem Wicklungswiderstand, der Streuinduktivität und der Hauptimpedanz zusammensetzt, zeigt $Z_{\text{SR,KS}}$ eine resistiv-induktive Charakteristik. Der ohmsche Anteil ist jedoch deutlich kleiner als der induktive und liegt nach der Messung im Initialzustand bei etwa $0,006 \Omega$ und sinkt mit steigender Ansteuerung auf $0,003 \Omega$.

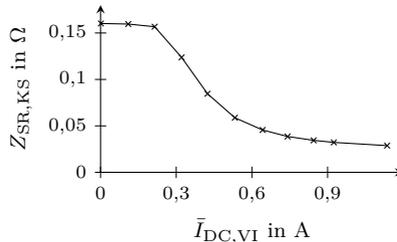


Abbildung 3.10 Kurzschlussimpedanz $Z_{\text{SR,KS}}$ des Strangspannungsreglers in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{\text{DC,VI}}$

Verhalten bei unterschiedlichen Netzsituationen

Über die Längsimpedanz und die Gegenkopplung des Leitungsstroms in den Querzweig ist die Auswirkung des SR abhängig von der Netzsituation. In diesem Zusammenhang werden im Folgenden die Auswirkungen von unterschiedlichen Netzsituationen im Labor betrachtet.

In Abbildung 3.11 werden die aus den Messungen ermittelten Verläufe für die Spannungsänderung ΔU , den Querstromeffektivwert $I_{\text{Q,eff}}$ und den Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{UB} exemplarisch für den spannungsanhebenden Betrieb dargestellt. Da eine Spannungsanhebung in der Regel nur im Verbrauchsfall und nicht im Rückspeisefall zum Einsatz kommt, fokussiert sich die Betrachtung des spannungsanhebenden Betriebs auf verschiedene Lastsituationen im

Netz. Zur Referenz ist jeweils der Verlauf für den unbelasteten Betrieb mit eingezeichneten ($U_A = 230 \text{ V}$, $I_B = 0 \text{ A}$).

Eine gleichartige Analyse erfolgt für den spannungsabsenkenden Betrieb bei verschiedenen Rückspeisesituationen, die hier jedoch im Einzelnen nicht aufgeführt wird, da die Ergebnisse prinzipiell gleich ausfallen.

Wie in Abbildung 3.11 dargestellt, kommt es bei einer resistiven Belastung mit einem Leitungsstrom von 100 A nur zu einer geringen Beeinflussung der spannungsändernden Wirkung. Dies liegt darin begründet, dass die Längsimpedanz hauptsächlich induktiv ist und daher der Spannungsabfall durch den Leitungsstrom fast um 90° phasenverschoben ist. Der geringe ohmsche Anteil in der Längsimpedanz bewirkt lediglich eine durchschnittliche Absenkung von ΔU um knapp 1 V im Vergleich zum unbelasteten Betrieb. Durch die Längsinduktivität kommt es jedoch zu einer hier nicht dargestellten merklichen Phasendrehung von U_B zu U_A , die im Initialzustand mit -4° ihr Maximum besitzt. Darüber hinaus prägt die Gegenkopplung von I_A in den Querstrom, der im Leerlauf fall vornehmlich induktiv ist, einen resistiven Anteil ein und es kommt zu einer Steigerung von I_Q auf einen Effektivwert von knapp 23 A bei maximaler Ansteuerung. Im Vergleich zum unbelasteten Betrieb bedeutet dies eine Anhebung von 8 A . Durch die geänderten Zustände im Querzweig des SR fällt die Spannung an der VI größer aus und es kommt es zu einem Anstieg des THD_{U_B} von maximal 3% auf $4,2\%$.

Eine induktive Belastung führt mit einem Leitungsstrom von 100 A und einem Winkel von -26° über den Spannungsabfall an der Längsimpedanz zu einer merklichen Reduktion von ΔU . Da die Längsimpedanz im Initialzustand am größten ausfällt, kommt es dort zur stärksten Reduktion. Die Abweichung liegt bei 8 V im Vergleich zum unbelasteten Betrieb. Bei maximaler Ansteuerung verringert sich die Abweichung auf 3 V . Gleichzeitig kommt es durch die Gegenkopplung zu einer Phasendrehung und Anhebung von $I_{Q,\text{eff}}$. Bei maximaler Ansteuerung fließt ein Strom von 25 A durch den Querzweig. Die geänderten Zustände im Querzweig führen aufgrund eines gesteigerten Spannungsabfalls an der VI zu einer Vergrößerung des THD_{U_B} auf maximal $5,1\%$.

Umgekehrt verhält es sich bei einer kapazitiven Belastung mit einem Leitungsstrom von 100 A und einem Winkel von 26° . Durch den Spannungsabfall an der Längsimpedanz kommt es im Initialzustand zu einer Anhebung von ΔU um 7 V im Vergleich zum unbelasteten Betrieb. Bei maximaler Ansteuerung reduziert sich die Abweichung auf 1 V . Weiterhin kommt es neben einer Phasendrehung zu einem Anstieg von $I_{Q,\text{eff}}$ auf 17 A bei maximaler Ansteuerung. Da der Spannungsabfall an der VI

jedoch geringfügig sinkt, bleibt der THD_{U_B} -Verlauf annähernd gleich zum Verlauf im unbelasteten Betrieb.

Aufgrund der Wirkungsweise des SR über einen induktiven Spannungsteiler existiert eine zusätzliche Abhängigkeit zur Höhe der Netzspannung (vgl. Formel 3.12 und Formel 3.13). Schwankungen im Bereich von $\pm 10\%$ der Nennspannung, zeigen jedoch nur geringe Auswirkungen auf ΔU und THD_{U_B} . Um dies zu veranschaulichen werden in Abbildung 3.11 zusätzlich die Verläufe für eine auf 210 V reduzierte Netzspannung betrachtet. Die Belastung ist dabei resistiv und es fließt ein Leitungsstrom von 100 A. Im Vergleich zum Verhalten bei einer Eingangsspannung von 230 V und der gleichen resistiven Belastung kommt es zu einem um 3 A reduzierten Querstrom. Der Spannungsabfall an der VI verringert sich jedoch kaum, so dass es zu keiner merklichen Auswirkung auf den THD_{U_B} kommt und auch der ΔU -Verlauf sinkt lediglich um knapp 1 V bei maximaler Ansteuerung.

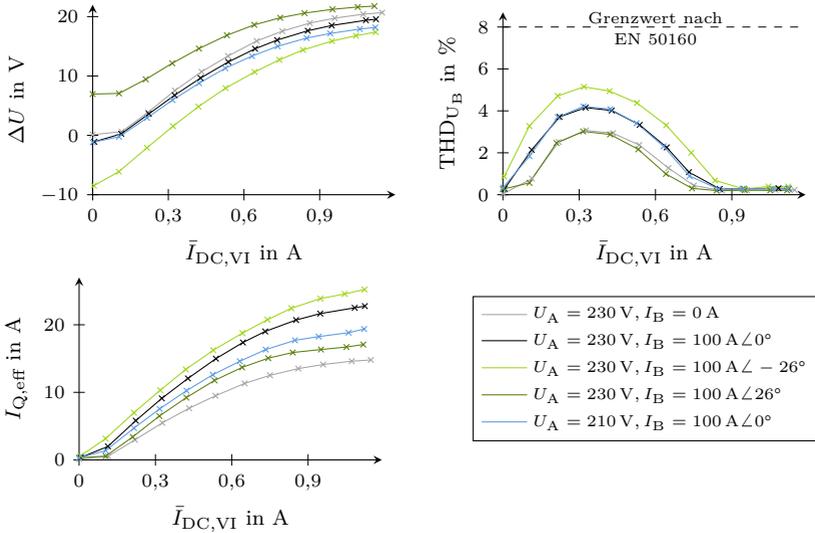


Abbildung 3.11 Verläufe für die Spannungsänderung ΔU , den Gesamt Oberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} und den Effektivwert des Querstroms $I_{Q,\text{eff}}$ im spannungsanhebenden Betrieb bei unterschiedlichen Lastsituationen

Der THD_I des Strombedarfs wird nicht im Einzelnen betrachtet. Im Vergleich zum unbelasteten Betrieb kommt es jedoch mit steigendem I_Q und THD_{U_B} zu einem

Zuwachs des THD_I . Der maximale Zuwachs ist bei einer induktiven Belastung zu finden, dort steigt der THD_I auf bis zu 1,7%.

Unterschiede bei der Betriebsweise

Der spannungsabsenkende Betrieb verhält sich im belasteten Zustand prinzipiell wie der spannungsanhebende Betrieb unter Berücksichtigung, dass der Leitungsstrom um 180° gedreht fließt. Dabei verhält sich der Verlauf von ΔU , wie beim unbelasteten Betrieb, nahezu X-Achsensymmetrisch zum Verlauf des spannungsanhebenden Betriebs. Durch die Absenkung der Ausgangsspannung reduziert sich ΔU jedoch geringfügig und auch I_Q fällt deswegen im Schnitt etwas geringer aus. Für den Verlauf des THD_{U_B} treten hingegen keine nennenswerten Unterschiede auf.

3.2.4 Verhalten der DC-Ansteuerung

DC-Steuerwicklung der variablen Induktivität

Die Spannungsänderung am SR wird durch die Impedanzverringering der AC-Wicklung der VI erzielt. Die dabei zum Einsatz kommende VI entspricht der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten VI mit Toroidkern. Die Reduktion der AC-Impedanz der VI wird erzielt, indem ein DC-Steuerstrom über die DC-Steuerwicklung den Kern der VI in Sättigung treibt. Um den Kern vollständig zu sättigen wird ein DC-Steuerstrom von 1 A benötigt. Der Widerstand der DC-Wicklung wird anhand von DC-Messungen bestimmt und liegt bei 70Ω .

Rückkopplung

Bei der VI mit Toroidkern verlaufen die AC- und DC-Wicklung senkrecht zueinander, weswegen eine ausgeprägte Rückkopplung weitestgehend vermieden wird. Die magnetischen Flüsse, die durch die AC- und DC-Signale in den jeweiligen Wicklungen erzeugt werden, addieren sich im Kern jedoch vektoriell auf. Dies bewirkt, dass der magnetische Fluss, der senkrecht zur DC-Wicklung und damit in Wechselwirkung mit ihr steht, mit einer 100-Hz-Schwingung behaftet wird. Die 100-Hz-Schwingung wird in die DC-Wicklung induziert und macht sich dort bei einer konstanten DC-Steuer Spannung im DC-Steuerstrom bemerkbar. Die maximale Schwingungsbreite von 0,4 A ist bei einer mittleren Ansteuerung zu finden. Für die statische Auswertung des DC-Steuerstroms wird daher, wie schon in Abschnitt 3.2.1 erläutert, die Mittelwertbildung über 0,02 s herangezogen.

Zeitverhalten

Das Zeitverhalten des SR wird maßgeblich durch die Verzögerungen beim Auf- und Entladen der DC-Steuerwicklung bestimmt. Aufgrund der sehr hohen Windungszahl weist die DC-Steuerwicklung eine große Induktivität auf, weswegen Auf- und Entladevorgänge mehrere Sekunden benötigen. Darüber hinaus ist das Zeitverhalten der Auf- und Entladevorgänge nicht konstant, da das Sättigungsverhalten, welches durch den DC-Steuerstrom hervorgerufen wird, auch die Permeabilität und proportional dazu die Induktivität der DC-Wicklung reduziert.

Abbildung 3.12 veranschaulicht die Magnetisierungsvorgänge in der DC-Steuerwicklung für verschiedene DC-Spannungssprünge. Die AC-Wicklung der VI ist dabei unbelastet, damit in der Messung der Signalverlauf nicht durch Kopplungseffekte verunreinigt wird. Es wird sichtbar, dass die Antwortzeit bei niedrigen DC-Steuerspannungen $U_{DC,VI}$ sehr hoch ist und mit steigender Sprunghöhe sinkt. Zusätzlich verliert die DC-Stromantwort mit steigender Sprunghöhe den für eine Spule typischen Verlauf eines PT_1 -Gliedes und zeigt einen Knick während des Anstiegs. Dies liegt daran, dass mit steigendem DC-Steuerstrom die Permeabilität durch die Sättigung im Kern sinkt und somit die Induktivität während eines Sprungs nicht konstant ist. Insgesamt sinkt die Antwortzeit für die verschiedenen Sprungantworten mit steigendem Spannungssprung von mehr als 10 s auf knapp 2 s.

Das Auf- und Entmagnetisierung der DC-Steuerwicklung bestimmt das Zeitverhalten der Induktivitätsänderung der VI und damit einhergehend das Zeitverhalten der Spannungsänderung durch den SR.

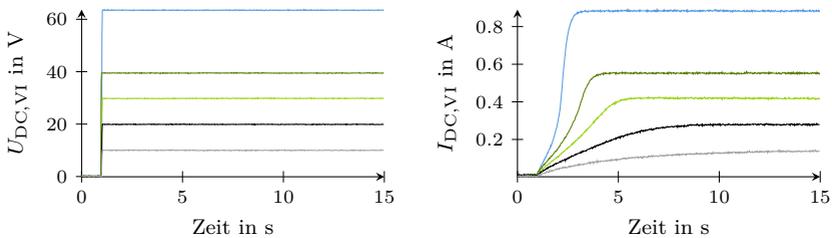


Abbildung 3.12 DC-Spannungssprünge und die resultierenden Sprungantworten des DC-Steuerstroms $I_{DC,VI}$ in der DC-Steuerwicklung der variablen Induktivität

3.3 Netzauswirkungen

3.3.1 Elektrische Kenndaten

Netzanschlussbedingungen

Der dreiphasige SR-Prototyp ist für einen Anschluss an die NS im europäischen Verbundnetz konzipiert. Das bedeutet, dass er für eine Netzfrequenz von 50 Hz, für eine Spannung von 230 V zwischen Außenleiter und Neutralleiter sowie für eine Spannung von 400 V zwischen den Außenleitern ausgelegt ist. Der Nennstrom, aus dem sich die dreiphasige Nennleistung ergibt, wird durch die Stromtragfähigkeit der Sekundärwicklung des Längstransformators festgelegt. In Tabelle 3.1 sind die Kenndaten für den Netzanschluss zusammengetragen.

Netzanschluss		
Netzfrequenz		50 Hz
Nennspannung	zwischen Außenleiter und Neutralleiter	230 V
	zwischen den Außenleitern	400 V
Nennstrom		190 A
Nennleistung		130 kVA

Tabelle 3.1: Kenndaten zum Netzanschluss

Kurzschlussimpedanz

Die Kurzschlussimpedanz spiegelt die Längsimpedanz des SR wieder und entspricht damit der Impedanz, die durch die Sekundärwicklung zusätzlich in das Netz eingepreist wird. Über sie wird der durch einen Leitungsstrom zusätzlich verursachte Spannungsabfall definiert. Zudem kommt es in Abhängigkeit von ihr zu einem Einfluss auf die Kurzschlussleistung sowie auf die Störfestigkeit des Netzausläufers.

Befindet sich der SR im ausgeschalteten Zustand, ist der Querschnitt geöffnet und der Längstransformator ist primärseitig kurzgeschlossen. In diesem Ansteuerungszustand setzt sich die Kurzschlussimpedanz aus der Summe der Wicklungswiderstände und der Streuinduktivitäten zusammen, welche auf die Sekundärseite bezogen sind. Die Kenndaten der Wicklungen sind in Anhang A.1 zu finden. Im eingeschalteten Betrieb wird die Kurzschlussimpedanz über die in Abschnitt 3.2.3 gemessenen Werte abgeschätzt. Dabei entspricht $Z_{SR,KS}$ im Initialzustand der maximalen Kurzschluss-

impedanz, wohingegen $Z_{\text{SR,KS}}$ bei maximaler Ansteuerung den Minimalwert für den eingeschalteten Betrieb liefert. In Tabelle 3.2 werden die unterschiedlichen Angaben zur Kurzschlussimpedanz gelistet.

Kurzschlussimpedanz $Z_{\text{SR,KS}}$			
Ansteuerungszustand	$Z_{\text{SR,KS}}$	$R_{\text{SR,KS}}$	$X_{\text{SR,KS}}$
Ausgeschalteter Zustand	0,002 Ω	0,002 Ω	<0,0007 Ω
Initialzustand	0,160 Ω	0,006 Ω	0,160 Ω
maximaler Ansteuerungszustand	0,029 Ω	0,003 Ω	0,029 Ω

Tabelle 3.2: Kenndaten zur Kurzschlussimpedanz

Spannungsregelbereich

Der Spannungsregelbereich wird durch die initiale Spannungsänderung $\Delta U_{\text{initial}}$ und die maximale Spannungsänderung ΔU_{max} aufgespannt, wobei die Spannungsänderung allgemein aus der Differenz zwischen den Effektivwerten der Ausgangs- und Eingangsspannung berechnet wird. Der Spannungsregelbereich besitzt, wie bereits erläutert, eine Abhängigkeit zum Leitungsstrom sowie zur Versorgungsspannung. Durch die Leistungsbegrenzung der Laborumgebung ist es jedoch nicht möglich, den SR für seine angegebene Nennleistung zu vermessen. Aus diesem Grund wird für die Ermittlung von $\Delta U_{\text{initial}}$ und ΔU_{max} auf die Systemgleichungen aus Abschnitt 3.1.3 zurückgegriffen. Dabei erfolgt die Berechnung auf Grundlage von linearen Bauelementen, da im Initialzustand und im Zustand maximaler Ansteuerung die VI keine Sättigung aufweist.

Um unterschiedliche Einspeise- und Lastsituationen auf der Erzeuger- bzw. Verbraucherseite, also auf der Ausgangsseite des SR, abzudecken, werden für die Berechnungen die Ausgangsgrößen vorgegeben. Für die Ausgangsspannung U_{B} wird ein Sollwert von 230 V festgelegt. Der Ausgangsstrom I_{B} wird zwischen 0 A und 190 A variiert, um sowohl den unbelasteten Betrieb als auch den Nennbetrieb zu betrachten. Für den Nennbetrieb werden neben einem phasengleichen Nennstrom zusätzlich die Phasenverschiebungen von 26° und -26° berücksichtigt. Diese Phasenverschiebungen entsprechen einem Verschiebungsfaktor von 0,9 induktiv bzw. kapazitiv und damit den regulären Randwerten der Netzanschlussnutzung nach [106]. Über die Betrachtung der Randwerte werden die maximalen Auswirkungen des Leitungsstroms auf die Spannungsänderung für den regulären Netzbetrieb dargestellt.

Demnach werden als Vorgaben für die Berechnung jedoch die Ausgangsgrößen des SR gegeben und nicht, wie bei den Systemgleichungen aus Abschnitt 3.1.3, die Eingangsgrößen. Die entsprechend notwendige Umstellung der Systemgleichungen sowie der vollständige Rechenweg zur Ermittlung des Spannungsregelbereichs ist Anhang A.2 zu entnehmen. In die Systemgleichungen werden die Impedanzwerte der jeweiligen Komponenten eingesetzt, welche in Anhang A.1 angegeben sind. Dabei ist für den Initialzustand die maximale Reaktanz der VI zu wählen und für den Zustand maximaler Ansteuerung die minimale Reaktanz. Ein Abgleich mit den bestehenden Messungen führt auf, dass die Systemgleichungen eine hohe Genauigkeit besitzen. Zwischen Messung und Berechnung liegen die durchschnittlichen Abweichungen für die Spannungen bei 0,2% der Nennversorgungsspannung und für die Ströme bei 0,4% des Nennstroms.

Die Berechnung des Spannungsregelbereichs erfolgt sowohl für den spannungsanhebenden als auch für den spannungsabsenkenden Betrieb. Die resultierenden Kenn-
daten sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Für die Angaben der Ströme gilt dort wie bei den Ersatzschaltbildern in Abbildung 3.2, dass die Stromflussrichtungen für die beiden Betriebsarten gegensätzlich ausfallen: Beim spannungsanhebenden Betrieb fließt der Leitungsstrom von der Eingangs- zur Ausgangsseite des SR und beim spannungsabsenkenden Betrieb von der Ausgangs- zur Eingangsseite.

Spannungsregelbereich				
Netzzustand	Spannungsanhebender Betrieb		Spannungsabsenkender Betrieb	
	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 0 \text{ A}$	0,1 V	19,0 V	-0,1 V	-19,7 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A}$	-3,2 V	18,1 V	-0,7 V	-19,1 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle -26^\circ$	-15,8 V	15,7 V	12,8 V	-17,0 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle 26^\circ$	10,4 V	20,8 V	-13,7 V	-21,3 V

Tabelle 3.3: Kenn-
daten des Spannungsregelbereichs

Die Kenn-
daten bestätigen, dass ein Leitungsstrom im Initialzustand zu starken Ab-
weichungen von den angestrebten 0 V führt. Dies wird durch den leitungsstrombe-
dingten Spannungsabfall an der Längsimpedanz verursacht. Da die Längsimpedanz
vornehmlich induktiv ist, bewirkt insbesondere ein phasenverschobener Leitungs-
strom eine hohe Abweichung. Mit steigender Ansteuerung reduziert sich die Längs-
impedanz des SR, weswegen sich der Einfluss reduziert.

Aus den Angaben der maximalen Spannungsänderung wird ersichtlich, dass in Abhängigkeit vom Leitungsstrom der SR Änderungen in der Netzspannung von etwa $\pm 7\%$ bis $\pm 9\%$ der Nennversorgungsspannung ausgleichen kann.

Leistungsbedarf und Wirkungsgrad

Der AC-Leistungsbedarf des SR setzt sich zusammen aus dem Leistungsbezug der Längsimpedanz und des Querzweigs. Er lässt sich über die in den SR hineinfließende Leistung abzüglich der aus dem SR herausfließenden Leistung bestimmen. Aufgrund der Leistungsbegrenzung der Laborumgebung erfolgt die Bestimmung des AC-Leistungsbedarfs, wie für den Spannungsregelbereich, über die Systemgleichungen. Dabei wird ebenfalls auf dieselben Netzzustände zurückgegriffen, wodurch eine Bestimmung des minimalen und maximalen Leistungsbedarfs ermöglicht wird.

Für die Wirkleistungsverluste müssen zusätzlich die DC-Verluste in der DC-Steuerwicklung der VI berücksichtigt werden. Die DC-Verlustleistung berechnet sich aus dem Widerstand der Steuerwicklung, der bei $70\ \Omega$ liegt, und dem Steuerstrom, der im Initialzustand bei $0\ \text{A}$ und im Zustand maximaler Ansteuerung bei $1\ \text{A}$ liegt. Ohne Ansteuerung liegt demnach die DC-Verlustleistung der VI bei $0\ \text{W}$. Bei maximaler Ansteuerung hingegen bei $70\ \text{W}$.

Wird die Summe des AC- und DC-Leistungsbedarfs mit drei multipliziert, wird der gesamte Leistungsbedarf des dreiphasigen Aufbaus im symmetrischen Betrieb erhalten. Der gesamte Rechenweg ist in Anhang A.2 aufgeführt.

Aus den Berechnungen resultiert, dass der dreiphasige Blindleistungsbedarf im unbelasteten Betrieb mit wachsender Ansteuerung von nahezu $0\ \text{kvar}$ auf $9\ \text{kvar}$ ansteigt. Im Nennbetrieb liegt der Blindleistungsbedarf im Initialzustand hingegen bereits bei $17\ \text{kvar}$ und sinkt mit wachsender Ansteuerung auf etwa $12\ \text{kvar}$. Dies ist auf die Längsreaktanz des SR zurück zu führen, welche im Initialzustand am größten ausfällt und in Abhängigkeit vom Leitungsstrom einen gesteigerten Leistungsbedarf erzeugt.

Die dreiphasige Verlustleistung, welche der Summe aus den DC-Verlusten und den AC-Verlusten entspricht, fällt generell im Zustand maximaler Ansteuerung am höchsten aus. Während sie im unbelasteten Zustand maximal bei $0,6\ \text{kW}$ liegt, steigt sie im Nennbetrieb mit wachsender Ansteuerung von etwa $0,8\ \text{kW}$ auf bis zu $1,3\ \text{kW}$.

Nach den Berechnungen tritt der maximale Leistungsbedarf folglich im Nennbetrieb auf. Tabelle 3.4 listet die Maximalwerte auf und gibt zudem den Nennwirkungsgrad an, der sich aus der Verlustleistung und der Leistungsübertragung im Nennbetrieb

ergibt. Es wird deutlich, dass der SR vornehmlich einen induktiven Verbrauch besitzt.

Leistungsbedarf und Wirkungsgrad	
max. Blindleistungsbedarf	17 kvar
max. Verlustleistung	1,3 kW
Wirkungsgrad im Nennbetrieb	99 %

Tabelle 3.4: Kenndaten zum dreiphasigen Leistungsbedarf und Wirkungsgrad

Oberschwingungsemission

Des Weiteren kommt es durch den SR zu einer Oberschwingungsemission aufgrund der Sättigungseffekte in der VI. Die Oberschwingungsemission zeigt, wie bereits in Abschnitt 3.2.3 erläutert, eine Abhängigkeit zum Leitungsstrom. Da aufgrund der Leistungsbegrenzung der Laborumgebung der Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{UB} nicht messtechnisch für den Nennstrom bestimmt werden kann, können keine Kenndaten für den Nennbetrieb angegeben werden. Um dennoch Vergleichswerte anzuzeigen, wird in Tabelle 3.5, neben den Kenndaten zum unbelasteten Zustand, der aus Messungen ermittelte THD_{UB} für einen Leitungsstrom von etwa 100 A angegeben. Der dargestellte THD_{UB} ist dabei von den Verzerrungen der Eingangsspannung entsprechend Kapitel 3.2.2 bereinigt.

Oberschwingungsemission	
Netzzustand	Maximaler THD_{UB}
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 0$	3 %
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 100 \text{ A} \angle 0^\circ$	4 %
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 100 \text{ A} \angle -26^\circ$	5 %
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 100 \text{ A} \angle 26^\circ$	3 %

Tabelle 3.5: Kenndaten zur Oberschwingungsemission

Wird ein linearer Zusammenhang zwischen dem Leitungsstrom und dem maximalen THD_{UB} angenommen, lässt sich für den Nennbetrieb im schlechtesten Fall ein maximaler THD_{UB} von 7 % abschätzen.

Zudem kommt es zu Aussendungen von Oberschwingungsströmen, die in Abhängigkeit von der Netzimpedanz am Anschlusspunkt zu Oberschwingungsspannungen

führen. Der Gesamtüberschwingungsgehalt des Strombedarfs THD_I , welcher auf den Nennstrom des SR bezogen ist, liegt für die messtechnisch betrachteten Netzzustände zwischen 0 % und 1,7 %.

3.3.2 Auswirkung auf die Spannungsqualität

Längsimpedanz

Die Längsimpedanz des SR wird über dessen Kurzschlussimpedanz abgeschätzt. Sie ändert sich in Abhängigkeit vom Ansteuerungszustand. Dies hat insbesondere beim Zu- und Abschalten des SR Auswirkungen auf die Spannungsqualität. Dort kommt es zu einer sprunghaften Änderung zwischen $0,002 \Omega \angle 19^\circ$ und $0,16 \Omega \angle 88^\circ$. In Abhängigkeit vom Leitungsstrom bewirkt dieser Impedanzsprung eine sprunghafte Änderung der Phasenlage und der Höhe der Ausgangsspannung, wobei die Änderungen für den Nennbetrieb maximal ausfallen.

Bei einem resistiven Nennstrom bewirkt die sprunghafte Änderung lediglich einen Spannungssprung von 1,2 % der Nennversorgungsspannung, dafür kommt es jedoch zu einer sprunghaften Drehung des Spannungsphasenwinkels von $7,5^\circ$. Bei einem phasenverschobenen Nennstrom sinkt die Drehung geringfügig, dafür steigt jedoch die Höhe des Spannungssprungs. Dort liegt der Spannungssprung bei der Übertragung der Nennleistung mit einem Leistungsfaktor von 0,9 bei bis zu 6,7 %.

Trotz der stufenlosen Spannungsregelung kann der SR damit in Abhängigkeit vom Leitungsstrom zu einer nennenswerten Störquelle von schnellen Spannungsänderungen und Flicker werden, die zu Grenzwertverstößen führen können. Phasenwinkelsprünge in der Spannung werden zwar nicht in der EN 50160 reglementiert, stellen jedoch ebenfalls eine Belastung für die Netzteilnehmer dar. Insbesondere Synchronmaschinen sind empfindlich gegenüber Phasenwinkelsprüngen. In Abhängigkeit von den Netzüberwachungsmethoden genügt daher zum Teil schon ein Sprung von wenigen Grad und eine Synchronmaschine trennt sich vom Netz [107], [108]. Folglich führt die sprunghafte Änderung der Längsimpedanz zu einer Reduzierung der Spannungsqualität und zu Störungen von Netzteilnehmern. Darüber hinaus wird die Netzimpedanz durch den SR insbesondere in dessen unteren Regelbereich vergrößert, wodurch die Kurzschlussleistung und die Störfestigkeit des Netzausläufers verringert wird.

Spannungsregelung

Die Spannungsregelung des SR erfolgt kontinuierlich zwischen initialer und maximaler Ansteuerung. Dabei können im Schnitt durch den SR Änderungen der Netzspannung von $\pm 8,3\%$ der Nennversorgungsspannung ausgeregelt werden. Über die Längsimpedanz beeinflusst jedoch der Leitungsstrom den Spannungsregelbereich. Für die maximale Spannungsänderung ist der Einfluss des Leitungsstroms tolerabel, da die spannungsändernde Wirkung lediglich um wenige Volt gesteigert oder gemindert wird. Anders verhält es sich bei der initialen Spannungsänderung. Diese soll im Idealfall bei 0 V liegen. Bei einem phasenverschobenen Strom kommt es jedoch zu hohen Abweichungen vom Idealfall, die für die betrachteten Netzzustände bis zu 6,9 % der Nennversorgungsspannung betragen. Die Abweichungen können sich gegen den Regelbereich richten, so dass über die Initialspannung die auszuregelnde Höhe der Ausgangsspannung zunächst verschlechtert wird. Dadurch können Spannungsbandverletzungen im Netzausläufer zeitweise verstärkt oder gar erst hervorgerufen werden, weswegen Spannungseinbrüche und Spannungsüberhöhungen häufiger und verstärkt auftreten können. Mögliche Abhilfe kann dahingehend eine geeignete leitungsstromabhängige Steuerung schaffen, die für den Fall, dass sich die Initialspannung gegen den Regelbereich richten würde, vor dem Zu- und Abschalten die VI entsprechend ansteuert, so dass die Initialspannung bei etwa 0 V gehalten wird.

Oberschwingungsemission

Die Oberschwingungsemission wird vornehmlich durch die in das Netz eingeprägte Zusatzspannung erzeugt. Der verzerrte Strombedarf hat im Vergleich nur geringe Auswirkungen auf die Oberschwingungsemission.

Unter Berücksichtigung der EN 50160, nach der die Netzspannung insgesamt mit einem THD_U von 8 % behaftet sein darf [11], wird anhand der Kenndaten aus Tabelle 3.5 geschlussfolgert, dass zwar durch die alleinige Nutzung des SR keine Grenzwertverstöße zu erwarten sind, allerdings insbesondere im Nennbetrieb bereits ein Großteil des erlaubten Oberschwingungsanteils durch den SR eingenommen wird. Im Zusammenspiel mit anderen Oberschwingungsquellen ergibt sich daher eine hohe Gefährdung der Spannungsqualität, weswegen sich die Anwendung mit anderen Netzteilnehmern mit nennenswerter Oberschwingungsemission verbietet.

Spannungsunsymmetrie

Wird der SR symmetrisch angesteuert, sind durch sein Betriebsverhalten keine Auswirkungen auf die Spannungssymmetrie im Netz festzustellen. Treten im Netz Spannungsunsymmetrien auf, kann der SR prinzipiell über eine phasenunabhängige Regelung die Höhe der Außenleiter-Neutralleiter-Spannung angleichen und dadurch die Spannungsunsymmetrien für den unterlagerten Netzabschnitt mindern.

3.4 Zusammenfassung

Der einfache SR mit VI ermöglicht neben einem robusten Betrieb eine stufenlose und phasenunabhängige Spannungsregelung. Durch die hohe Längsimpedanz im unteren Regelbereich und die Sättigungseffekte in der VI treten jedoch eine Vielzahl an Netzurückwirkungen auf. Die hohe Längsimpedanz im unteren Regelbereich bewirkt zum einen, dass sich die Kurzschlussleistung und die Störfestigkeit des Netzausläufers verringert, und zum anderen, dass der Leitungsstrom über Höhe und Phasenlage merkliche Auswirkungen auf das Verhalten des SR besitzt. Dahingehend kommt es beim Zu- und Abschalten insbesondere bei hoher Leitungsauslastung zu sprunghaften Änderungen im Spannungsphasenwinkel sowie zu schnellen Spannungsänderungen, die Flicker hervorrufen. Zusätzlich erzeugt eine hohe Leitungsauslastung in Abhängigkeit vom Phasenwinkel des Leitungsstroms einen Spannungsabfall am SR, der ohne weitere Maßnahmen Spannungseinbrüche und Spannungsüberhöhungen bewirken und verstärken kann. Infolge des Sättigungsverhaltens in der VI werden darüber hinaus Oberschwingungen in die Netzspannung emittiert, die im Nennbetrieb einen Großteil der erlaubten Oberschwingungsemission einnehmen. Damit wird deutlich, dass der einfache SR mit VI nach [67] zwar in der Lage ist, die Spannung kontinuierlich zu regeln, und somit Spannungssprünge innerhalb des Regelbereichs vermeidet, dieser aber bei weitem nicht als netzurückwirkungsarm bewertet werden kann.

4 Weiterentwicklung zum netzrückwirkungsarmen Strangspannungsregler

4.1 Konzept

4.1.1 Aufbau

Der im vorherigen Kapitel untersuchte einfache SR mit VI wird durch die Verwendung von zwei VIs im Querzweig entsprechend [P7] zu einem netzrückwirkungsarmen SR weiterentwickelt. Dabei wird weiterhin ein robuster Betrieb ermöglicht. Ziel dieser Weiterentwicklung ist zunächst die Reduktion der Längsimpedanz, die maßgeblich für die hohen Netzurückwirkungen des einfachen SR verantwortlich ist. Die Verschaltung der Weiterentwicklung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Darin ist zu sehen, dass die zweite VI parallel zur Primärwicklung des Längstransformators geschlossen wird. Durch die Verringerung ihrer Induktivität wird der Längstransformator primärseitig nahezu kurzgeschlossen und dadurch der Einfluss der Hauptinduktivität des Längstransformators auf die Längsimpedanz des SR reduziert. Aufgrund dieser Bypassfunktion wird sie variable Bypassinduktivität (VI_{By}) genannt. Die erste VI, die zum Längstransformator und zur VI_{By} in Reihe geschaltet ist, wird zur Abgrenzung als variable Drosselinduktivität (VI_{Dr}) bezeichnet.

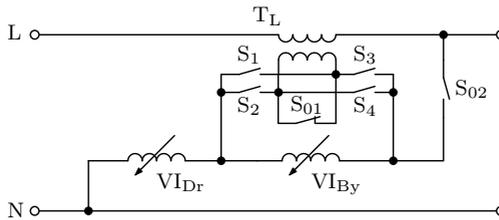


Abbildung 4.1 Einphasige Darstellung des Strangspannungsreglers mit zwei variablen Induktivitäten im Querzweig in Anlehnung an [P7]

Für eine kontinuierliche Spannungsregelung mit geringer Längsimpedanz ist eine kombinierte Ansteuerung der VI_{By} und der VI_{Dr} erforderlich. Dabei besteht die Ansteuerungsaufgabe darin, sicherzustellen, dass sich der Längstransformator nicht im Leerlauf befindet, um die Längsimpedanz des SR zu reduzieren; gleichzeitig muss die Impedanz des Querzweigs jedoch ausreichend hoch sein, um den Strom im Querzweig zu begrenzen, wodurch kompakte Komponenten und geringere Verluste im Querzweig ermöglicht werden.

Um den SR sowohl für den spannungsabsenkenden als auch für den spannungsanhebenden Betrieb zu nutzen, wird die gleiche Schaltmimik wie bei der vorherigen Entwicklung verwendet. Für die Erläuterung der Schaltmimik wird daher auf Kapitel 3.1.1 verwiesen. Für den Zu- und Abschaltvorgang ist jedoch neben den Schaltern S_{01} und S_{02} auch die Ansteuerung der VI_{By} zu berücksichtigen, um einen netzrückwirkungsarmen Schaltvorgang zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang wird im Folgenden das Vorgehen einer netzrückwirkungsarmen Einschaltung erläutert. Ist der Schalter S_{02} geöffnet und der Schalter S_{01} geschlossen, ist der Einfluss des SR auf die Netzspannung überbrückt. Für einen netzrückwirkungsarmen Zuschaltvorgang gilt es, zunächst die Induktivität der VI_{By} vollständig zu reduzieren und im nächsten Schritt Schalter S_1 und S_4 für den spannungsabsenkenden Betrieb oder Schalter S_2 und S_3 für den spannungsanhebenden Betrieb zu schließen. Darauf folgend kann nun bei hochohmiger VI_{Dr} der Schalter S_{02} geschlossen und der Schalter S_{01} geöffnet werden. Da der Längstransformator über die VI_{By} annähernd kurzgeschlossen wird, sollte der Einfluss des SR auf die Netzspannung weiterhin minimal sein. Durch eine kombinierte Ansteuerung der VIs kann nun die kontinuierliche Spannungsregelung erfolgen. Dieselbe Handlungsweise in umgekehrter Reihenfolge ermöglicht einen netzrückwirkungsarmen Abschaltvorgang. Für einen netzrückwirkungsarmen Umschaltvorgang muss der SR immer zunächst in den ausgeschalteten Zustand gefahren werden.

4.1.2 Ersatzschaltbild

Die Ersatzschaltbilder für den spannungsanhebenden und spannungsabsenkenden Betrieb des SR sind in Abbildung 4.2 a) und Abbildung 4.2 b) dargestellt. Die Ersatzschaltbilder entsprechen einer Erweiterung der Ersatzschaltbilder für den einfachen SR mit VI, welche in Kapitel 3.1.2 aufgestellt worden sind. In der Erweiterung werden neben der Modellierung des Längstransformators über ein T-Ersatzschaltbild die VI_{By} und die VI_{Dr} über ihre Wicklungswiderstände $R_{By,w}$, $R_{Dr,w}$, ihre Eisenverlustwiderstände $R_{By,fe}$, $R_{Dr,fe}$ und ihre variablen Reaktanzen $X_{By}(I_{DC,By})$, $X_{Dr}(I_{DC,Dr})$ dargestellt. Wie bei der VI des einfachen SR sind X_{By} und X_{Dr} nur linear bei keiner sowie maximaler DC-Ansteuerung. Für die Ansteuerungszustände dazwischen besitzen die Induktivitäten ein Hystereseverhalten.

Analog zu dem Ersatzschaltbild aus Kapitel 3.1.2 ist beim spannungsabsenkenden Betrieb der Windungssinn der Primärwicklung getauscht, wodurch sich die Spannungspfeilrichtung von \underline{U}_S umdreht. Die Flussrichtung der Leitungsströme ist in Anlehnung an den typischen Einsatzbereich der jeweiligen Betriebsart gewählt.

4.1.3 Systemgleichungen

Aus den Ersatzschaltbildern werden die Systemgleichungen für den SR abgeleitet. Das Vorgehen orientiert sich an der Herleitung aus Kapitel 3.1.3. Die resultierenden Systemgleichungen werden für die Auslegung und Berechnung des Bauteils genutzt und stellen die Basis für den Regelungsentwurf dar.

Aufstellen der Maschengleichungen

Für den spannungsanhebenden Betrieb beschreibt die Maschengleichung in Formel 4.1 den Zusammenhang zwischen der komplexen Eingangsspannung \underline{U}_A und der komplexen Ausgangsspannung \underline{U}_B , die jeweils der Spannung zwischen Außenleiter und Neutraleiter entsprechen.

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B - \underline{U}_S \quad (4.1)$$

Darin stellt \underline{U}_S die komplexe Spannung an der Sekundärseite des Längstransformators dar. Wie in Formel 4.2 dargestellt, setzt sie sich aus $\underline{U}_{S,h}$, der komplexen Hauptspannung der Sekundärwicklung, und aus $\underline{U}_{S,w}$, der komplexen Spannung an der Streureaktanz und dem Wicklungswiderstand, zusammen. $\underline{U}_{S,h}$ kann auch mithilfe des Übersetzungsverhältnisses \ddot{u} über die komplexe Hauptspannung an der Primärseite $\underline{U}_{P,h}$ ausgedrückt werden.

$$\underline{U}_S = \underline{U}_{S,h} - \underline{U}_{S,w} = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} - \underline{U}_{S,w} \quad (4.2)$$

Die komplexe Ausgangsspannung \underline{U}_B kann nach der Maschengleichung in Formel 4.3 auch über \underline{U}_{Dr} , die komplexe Spannung an der VI_{Dr} , und \underline{U}_P , die komplexe Spannung an der Parallelschaltung des Längstransformators mit der VI_{By} , ausgedrückt werden. Dabei lässt sich \underline{U}_P auch über $\underline{U}_{P,h}$, die komplexe Hauptspannung der Primärwicklung, und über $\underline{U}_{P,w}$, die komplexe Spannung an der Streureaktanz und dem Wicklungswiderstand, beschreiben.

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{Dr} + \underline{U}_P = \underline{U}_{Dr} + \underline{U}_{P,w} + \underline{U}_{P,h} \quad (4.3)$$

Durch Einsetzen von Formeln 4.2 und 4.3 in Formel 4.1 ergibt sich folgender Zusammenhang für \underline{U}_A :

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_{Dr} + \underline{U}_{P,w} + \underline{U}_{P,h} - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} + \underline{U}_{S,w} \\ &= \underline{U}_{Dr} + \underline{U}_{P,w} + \frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{U}_{P,h} + \underline{U}_{S,w} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Anwendung des Überlagerungsprinzips

Aufgrund der Parallelschaltung des Längstransformators mit der VI_{By} sind sowohl $\underline{U}_{P,h}$ als auch $\underline{U}_{P,w}$ abhängig von \underline{I}_Q und \underline{I}_A . Da aus Sicht des Längstransformators und auch aus Sicht des Querzweigs derselbe Strom in die Schaltung hineinfließt und wieder herausfließt, kann für die Ermittlung der Spannungen das Überlagerungsprinzip angewandt werden. Abbildung 4.3 a) zeigt den dafür relevanten Ausschnitt des Ersatzschaltbildes. Für die Anwendung des Überlagerungsprinzips werden die Teilströme in der Parallelschaltung, die durch die Einspeisung über den Querzweig und durch die Einspeisung über den Längstransformator entstehen, separat berechnet. Für die separate Berechnung werden die Ersatzschaltbilder in Abbildung 4.3 b) und Abbildung 4.3 c) herangezogen. Anschließend werden die Teilströme überlagert, um die eigentlichen Ströme in der Parallelschaltung zu bestimmen.

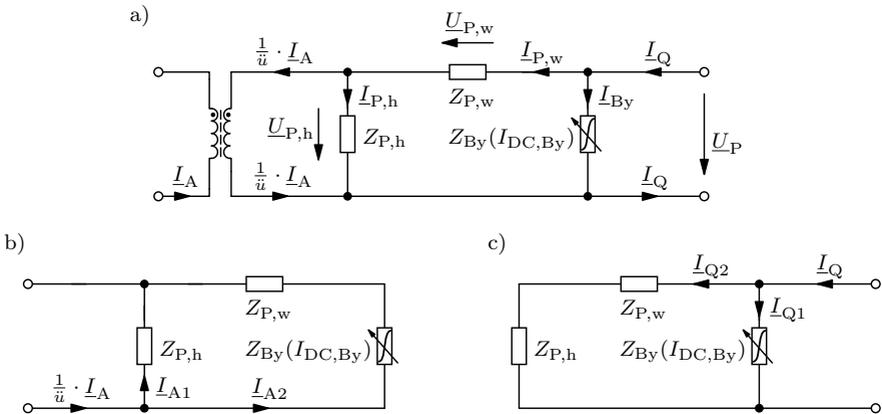


Abbildung 4.3 Ersatzschaltbilder für die Anwendung des Überlagerungsprinzips

a) Relevanter Ausschnitt des einphasigen Ersatzschaltbildes

b) Ersatzschaltbild für den Fall $\underline{I}_Q = 0$

c) Ersatzschaltbild für den Fall $\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{I}_A = 0$

Auf Basis des Ersatzschaltbildes in Abbildung 4.3 b) werden zunächst die Teilströme unter Vernachlässigung von \underline{I}_Q berechnet. Ziel ist es, die Ströme über $\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{I}_A$ und die Impedanzen zu beschreiben. Dazu wird die Stromteilerregel entsprechend Formel 4.5 angewandt:

$$\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) = \underline{I}_{A1} \cdot \underline{Z}_{P,h} = \underline{I}_{A2} \cdot (\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}) \quad (4.5)$$

Dabei entspricht \underline{Z}_{P,I_A} der Gesamtimpedanz aus Sicht des Längstransformators:

$$\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) = \frac{(\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})) \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} \quad (4.6)$$

So ergeben sich für die Teilströme \underline{I}_{A1} und \underline{I}_{A2} folgende Zusammenhänge:

$$\underline{I}_{A1} = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h}} \quad (4.7)$$

$$\underline{I}_{A2} = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}} \quad (4.8)$$

Aufbauend auf dem Ersatzschaltbild in Abbildung 4.3 c) werden im nächsten Schritt die Teilströme unter Vernachlässigung von \underline{I}_A ermittelt. Die Herleitung der Teilströme erfolgt erneut entsprechend der Stromteilerregel:

$$\underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) = \underline{I}_{Q1} \cdot \underline{Z}_{By} = \underline{I}_{Q2} \cdot (\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}) \quad (4.9)$$

\underline{Z}_{P,I_Q} entspricht der Gesamtimpedanz aus Sicht des Querzweigs und berechnet sich nach Formel 4.10.

$$\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) = \frac{(\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}) \cdot \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} \quad (4.10)$$

Die Teilströme \underline{I}_{Q1} und \underline{I}_{Q2} werden demnach wie folgt bestimmt:

$$\underline{I}_{Q1} = \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{By}} \quad (4.11)$$

$$\underline{I}_{Q2} = \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}} \quad (4.12)$$

Um die Ströme $\underline{I}_{P,w}$ und $\underline{I}_{P,h}$ zu erhalten, werden nun die jeweiligen Teilströme überlagert:

$$\underline{I}_{P,h} = \underline{I}_{Q2} - \underline{I}_{A1} = \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}} - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h}} \quad (4.13)$$

$$\underline{I}_{P,w} = \underline{I}_{Q2} + \underline{I}_{A2} = \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}} + \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}} \quad (4.14)$$

Anhand dieser Formeln und dem ohmschen Gesetz werden nun $\underline{U}_{p,w}$ und $\underline{U}_{p,h}$ wie folgt berechnet:

$$\underline{U}_{P,h} = \underline{I}_{P,h} \cdot \underline{Z}_{P,h} = \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}} - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{P,w} &= \underline{I}_{P,w} \cdot \underline{Z}_{P,w} \\ &= \underline{I}_Q \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}} + \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{B_y}(I_{DC,By})} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Zusammenführen zu den Systemgleichungen

Die Spannungen \underline{U}_{Dr} und $\underline{U}_{S,w}$ werden nach dem ohmschen Gesetz über den Querstrom \underline{I}_Q , bzw. den Eingangsstrom \underline{I}_A , und die entsprechende Impedanz wie folgt ausgedrückt:

$$\underline{U}_{Dr} = \underline{I}_Q \cdot \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) \quad (4.17)$$

$$\underline{U}_{S,w} = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_{S,w} \quad (4.18)$$

Werden nun jeweils in Formel 4.4 und 4.3 die Formeln 4.15 - 4.18 eingesetzt und die Gleichungen nach \underline{I}_Q und \underline{I}_A freigestellt, ergeben sich für \underline{U}_A und \underline{U}_B die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) \right) \\ &\quad - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\ddot{u}-1}{\ddot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{B_y}(I_{DC,By})} - \underline{Z}_{S,w} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_B &= \underline{I}_Q \cdot \left(\underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) \right) \\ &\quad - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{B_y}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) \right) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Zuletzt wird nun Formel 4.19 nach \underline{I}_Q umgestellt

$$\underline{I}_Q = \frac{U_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) - \frac{\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} - \underline{Z}_{S,w} \right)}{\frac{\left(\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})} \quad (4.21)$$

und die resultierende Formel 4.21 in Formel 4.20 eingesetzt. Dies führt zur Systemgleichung für den spannungsanhebenden Betrieb:

$$\begin{aligned} \underline{U}_B = & -\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \right) \\ & + \left(U_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) - \frac{\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} - \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \\ & \cdot \frac{\underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})}{\frac{\left(\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Die Systemgleichung für den spannungsabsenkenden Betrieb wird analog hergeleitet und resultiert in der Formel 4.23.

$$\begin{aligned} \underline{U}_B = & -\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \right) \\ & + \left(U_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\dot{u}+1}{\dot{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) - \frac{\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \\ & \cdot \frac{\underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})}{\frac{\left(\frac{\dot{u}+1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})} \end{aligned} \quad (4.23)$$

4.2 Umsetzung und Betriebsverhalten

4.2.1 Laboraufbau

Das Primärziel der Weiterentwicklung ist es, einen netzrückwirkungsarmen Betrieb zu ermöglichen. Des Weiteren gilt es bei der Prototypenentwicklung den Platzbedarf und die Herstellungskosten mit einzubeziehen. Für die Umsetzung des Konzepts des SR mit zwei VIs im Querzweig werden drei verschiedene Prototyp-Varianten

herangezogen. Dabei werden in Variante 2 und 3 weitere Maßnahmen zur Reduktion der Oberschwingungsemission angewandt. Darüber hinaus kommen in Variante 3 alternative Bauformen für die Komponenten zum Einsatz, die eine Kostensenkung und Platzeinsparung ermöglichen.

Variante 1

Variante 1 orientiert sich an den Komponenten des einfachen SR mit VI aus dem vorherigen Kapitel. Es wird der gleiche Toroidkerntransformator als Längstransformator verwendet und auch die VI_{By} und die VI_{Dr} entsprechen VIs mit Toroidkern.

Durch die Verwendung der zusätzlichen VI_{By} steigt jedoch der Platzbedarf des Aufbaus. Um den Platzbedarf zu reduzieren, werden die VIs mit kleineren Kernen ausgeführt. Dadurch wird jedoch in Kauf genommen, dass sich die Regelreichweite des SR verringert. Die Verringerung liegt darin begründet, dass der kleinere Kern schneller in Sättigung geht. Um die volle Regelreichweite der VIs nutzen zu können, sind sie so zu dimensionieren, dass bei keiner Ansteuerung ($I_{DC} = 0 \text{ A}$) ihre Kerne sättigungsfrei sind. Die Anwendung im SR legt fest, dass bei keiner Ansteuerung die VI_{Dr} eine Spannung von bis zu 250 V und die VI_{By} eine Spannung von bis zu 200 V führen müssen. Um dies sättigungsfrei zu ermöglichen, muss die Windungszahl der VIs entsprechend erhöht werden. Dies hat jedoch zur Folge, dass die Induktivität der VI_{Dr} bei maximaler Ansteuerung größer ausfällt als bei dem Laborprototyp des einfachen SR mit VI und sich dadurch das Spannungsteilerverhältnis im SR und damit einhergehend dessen maximale Spannungsänderung ΔU reduziert. Die elektrischen Kenndaten der verwendeten Komponenten sind in Anhang A.1 zu finden.

Für den dreiphasigen Laborprototyp wird pro Phase ein Aufbau nach Abbildung 4.1 errichtet. Demnach kann bei dieser Variante die Spannungsregelung phasenunabhängig erfolgen. Der Laborprototyp berücksichtigt jedoch keine Schaltmimik, stattdessen erfolgt der Wechsel der Betriebsweise durch manuelles Umkonfigurieren der Schaltung.

Variante 2

Variante 2 entspricht dem gleichen Aufbau wie Variante 1 mit der Abweichung, dass der Längstransformator zusätzlich mit einer Tertiärwicklung versehen wird. Im dreiphasigen Aufbau werden die Tertiärwicklungen der drei Längstransformatoren im Dreieck zusammengeschaltet, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist. Durch die Kopplung der drei Phasen über diese Dreieckswicklung werden die vom SR erzeugten

Oberschwingungsspannungen der dritten Harmonischen und ihre Vielfachen unterdrückt. Dies liegt darin begründet, dass im symmetrischen Drehstromsystem die Harmonischen mit durch drei teilbarer Ordnung gleichphasig ausfallen. Die in den drei Querzweigen des SR erzeugten Oberschwingungsspannungen mit durch drei teilbarer Ordnung löschen sich folglich in der Dreieckswicklung aus und werden somit nicht in die Sekundärwicklungen übertragen. Dies bewirkt eine Reduktion der Oberschwingungsaussendung des SR.

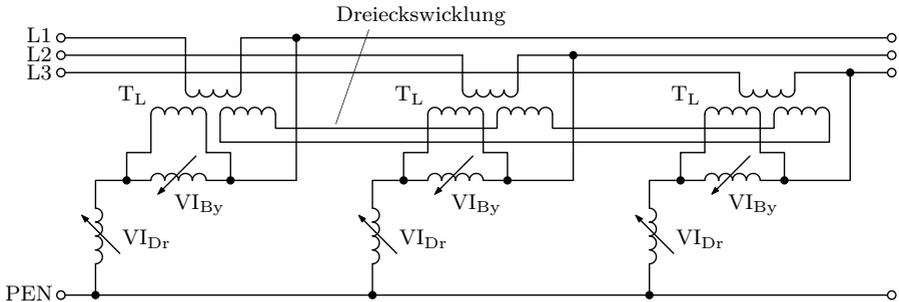


Abbildung 4.4 Dreiphasige Darstellung der Variante 2

Für die Auslegung der Dreieckswicklung ist jedoch zu beachten, dass sich dort die gleichphasigen Oberschwingungsströme aufaddieren und damit eine höhere Strombelastung eingeplant werden muss. Die elektrischen Kenndaten zur Tertiärwicklung sind ebenfalls in Anhang A.1 zu finden.

Für diese Variante ist ferner zu berücksichtigen, dass die Dreieckswicklung eine Kopplung der drei Phasen bewirkt und sich damit die Wirkungsweise des SR nicht mehr als phasenunabhängig gestaltet. Darüber hinaus besitzt auch der Laborprototyp dieser Variante keine Schaltmimik und der Wechsel der Betriebsweisen muss durch manuelles Umkonfigurieren erfolgen.

Variante 3

In Variante 3 werden weitere Platzsparmaßnahmen sowie die Reduktion der Herstellungskosten berücksichtigt. In diesem Zusammenhang kommt in dieser Variante anstelle von drei einzelnen Längstransformatoren ein Dreiphasentransformator mit Dreischenkeln zum Einsatz. Dies bewirkt für den dreiphasigen Aufbau eine reduzierte Komponentenanzahl und verringert dadurch Kosten und Platzbedarf. Darüber hinaus werden durch die Kopplung der drei Phasen über den Dreischenkeln die

Übertragung von gleichphasigen Oberschwingungsspannungen aus den Querzweigen in die Sekundärwicklung verringert.

Die Verringerung wird erreicht, da die Sekundärseiten des Dreiphasentransformators durch die Verschaltung als Längstransformator keinen geerdeten Sternpunkt besitzen. Jedoch handelt es sich auch nicht um einen isolierten Sternpunkt, da über den Querzweig des SR eine Erdung erfolgt. Die fehlende direkte Erdung bewirkt, dass sich die gleichphasigen Oberschwingungen im Magnetisierungsstrom des Dreischenkelkerns nur reduziert ausbilden, weswegen gleichphasige Oberschwingungsspannungen nur gemindert in die Sekundärwicklungen eingepreßt werden [26], [109]. Stattdessen kommt es jedoch zu einem nicht kompensierten magnetischen Fluss im Dreischenkelkern, der sich über einen erzwungenen magnetischen Rückschluss außerhalb des Kerns schließen muss, wodurch gesteigerte Eisenverluste auftreten [26], [109].

Prinzipiell empfiehlt es sich daher, anstelle des erzwungenen Rückschlusses auch den Dreiphasentransformator über Tertiärwicklungen mit einer Dreieckswicklung zu versehen. Die Dreieckswicklung nimmt die gleichphasigen Oberschwingungen im Dreischenkeltransformator auf, wodurch die Oberschwingungsaussendung des SR reduziert wird und gleichzeitig der Rückschluss und die resultierenden Eisenverluste eliminiert werden. Zudem werden dadurch unsymmetrische Flüsse kompensiert, wodurch die Sternpunktbelastbarkeit des Dreischenkeltransformators verbessert wird [26]. Innerhalb der vorliegenden Arbeit kommt es jedoch zu keiner Realisierung dieser Maßnahme.

Die VIs der Variante 3 werden entsprechend der vorgestellten Konstruktion in Kapitel 2.3.2 als VIs mit Dreischenkelkern ausgeführt. Diese VI-Ausführung hat den preislichen Vorteil, dass sie unter keinem Patentschutz steht. Ferner wird die VI_{By} identisch zur VI_{Dr} ausgeführt, da durch die Produktion einer höheren Stückzahl der gleichen Komponente die Herstellungskosten weiter gesenkt werden können.

Durch die Verwendung des Dreischenkelkerns können die Komponenten schmaler realisiert werden als die Komponenten mit Toroidkern, wodurch der Aufbau und die Anbringung in einem Schaltschrank vereinfacht wird.

Ferner wird für weitere Untersuchungen im dynamischen Betrieb der Laborprototyp dieser Variante als einziger mit einer Schaltmimik ausgestattet.

Versuchsaufbau

Um für die drei Varianten des netzrückwirkungsarmen SR eine kombinierte Ansteuerung zu entwickeln und anschließend das Betriebsverhalten zu analysieren, werden Messungen im unbelasteten und belasteten Betrieb sowie im Kurzschlussfall durchgeführt. Die dazu herangezogenen Versuchsaufbauten entsprechen denselben Aufbauten, die für die Untersuchungen des einfachen SR mit VI verwendet werden. Für die Erläuterung der Versuchsaufbauten wird daher auf Kapitel 3.2.1 verwiesen.

Für die Strom- und Spannungsmessungen werden die drei Prototypen mit Messpunkten versehen. In diesem Zusammenhang zeigt Abbildung 4.5 eine einphasige Schaltskizze des generellen Aufbaus mit den installierten Messabgriffen. Die Dreieckswicklung der Variante 2 sowie die Schaltmimik, die lediglich für Variante 3 zu berücksichtigen ist, werden darin nicht dargestellt. Es werden im Folgenden Messungen für verschiedene Ansteuerungszustände der VIs im eingeschwungenen Zustand durchgeführt. Die DC-Ansteuerung der VIs erfolgt dabei wie beim Laborprototyp im vorherigen Kapitel über einstellbare DC-Netzgeräte.

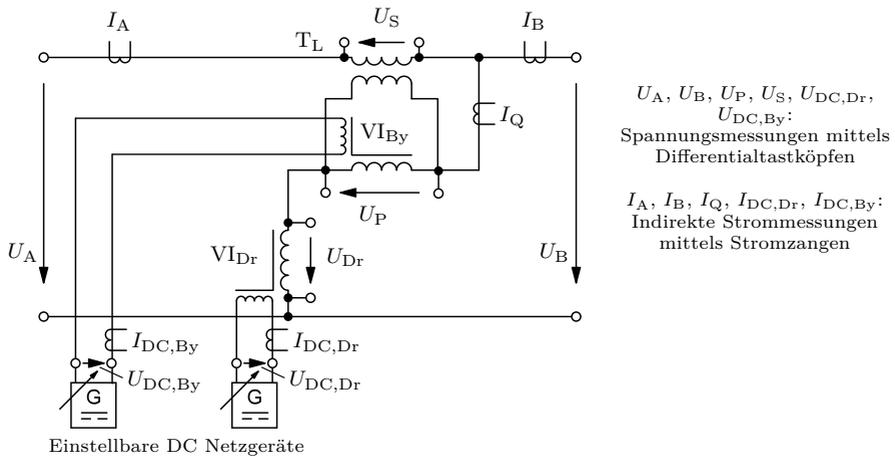


Abbildung 4.5 Einphasige Schaltskizze des generellen Laboraufbaus der drei Varianten

Wie schon beim einfachen SR mit VI kommt es bei der DC-Ansteuerung sowohl bei den VIs mit Toroidkern als auch bei den VIs mit Dreischenkelkern zu einer Rückkopplung von der AC-Wicklung auf die DC-Steuerwicklungen. Daher werden

für die Messungen im eingeschwungenen Zustand bei allen Varianten die Mittelwerte $\bar{I}_{DC,By}$ und $\bar{I}_{DC,Dr}$ für die DC-Steuerströme herangezogen.

Die Laborversuche werden dreiphasig durchgeführt. Die Versorgungsspannung, die Last- bzw. Einspeisesituationen sowie die Ansteuerung des SR-Prototyps werden dabei jedoch symmetrisch gewählt, weswegen die Analyse der Ergebnisse einphasig erfolgt.

4.2.2 Kombinierte Ansteuerung

Um eine geeignete kombinierte Ansteuerung für die VIs zu entwickeln, werden Kennfelder herangezogen, die für die drei Varianten messtechnisch ermittelt werden. Die Kennfelder berücksichtigen jeweils eine charakteristische Größe des SR in Abhängigkeit der Ansteuerungszustände der beiden VIs.

Die erste charakteristische Größe entspricht der Spannungsänderung ΔU , welche den Regelbereich des SR angibt. ΔU berechnet sich aus der Differenz zwischen den Effektivwerten der Ausgangs- und Eingangsspannung ($\Delta U = U_{B,eff} - U_{A,eff}$). Im Initialzustand des SR soll möglichst keine Spannungsänderung auftreten, um einen Einschaltsprung zu vermeiden. Im Zustand maximaler Ansteuerung soll ΔU hingegen größtmöglich ausfallen. Zusätzlich soll zwischen diesen beiden Zuständen eine stufenlose Änderung erzielt werden.

Die nächste charakteristische Größe ist die Kurzschlussimpedanz des SR $Z_{SR,KS}$, die eine allgemeine Abschätzung der Längsimpedanz des SR ermöglicht. $Z_{SR,KS}$ soll in allen Betriebszuständen des SR möglichst gering ausfallen, um einerseits die Anhebung der Netzimpedanz zu mindern und andererseits Impedanzsprünge beim Zu- und Abschalten zu vermeiden.

Eine weitere charakteristische Größe ist der Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} . Der THD_{U_B} quantifiziert die Oberschwingungsemission des SR und soll ebenfalls so gering wie möglich gehalten werden.

Ferner stellt der Strom im Querzweig des SR eine charakteristische Größe dar, welche über den Effektivwert $I_{Q,eff}$ betrachtet wird. $I_{Q,eff}$ soll ebenfalls möglichst gering ausfallen, um die Verluste des SR minimal zu halten und um die Verwendung von kompakten Komponenten zu ermöglichen.

Für die drei Varianten werden die Kennfelder von ΔU , $I_{Q,eff}$ und THD_{U_B} sowohl für den spannungsanhebenden als auch für den spannungsabsenkenden Betrieb bei verschiedenen Netzsituation ermittelt. Die Netzsituationen beinhalten den unbelasteten Zustand des SR und den belasteten Zustand. Belasteter Zustand bedeutet in diesem

Zusammenhang, dass ein Leitungsstrom über den SR fließt; dabei wird für den spannungsanhebenden Betrieb eine Lastsituation nachgebildet und für den spannungsabsenkenden Betrieb eine Einspeisesituation. Es wird jeweils ein Verschiebungsfaktor von 1 sowie von 0,9 induktiv und kapazitiv betrachtet. Die Kennfelder von $Z_{SR,KS}$ werden für die drei Varianten anhand von Kurzschlussmessungen gewonnen. In den Kennfeldern werden die Ansteuerungszustände der VIs über die DC-Steuerströme, $\bar{I}_{DC,By}$ und $\bar{I}_{DC,Dr}$, angegeben und über den maximalen DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,max}$, der einheitlich für beide VIs gilt, normiert. Für die Variante 1 und 2 liegt $\bar{I}_{DC,max}$ bei 1 A und für Variante 3 bei 2 A (vgl. Anhang A.1).

In Abbildung 4.6 ist exemplarisch eine Kennfeldgruppe der Variante 1 dargestellt. Im Bereich ohne Ansteuerung der VI_{By} ($\bar{I}_{DC,By} = 0 \text{ A}$ & $0 \text{ A} \leq \bar{I}_{DC,Dr} \leq \bar{I}_{DC,max}$) verhalten sich die charakteristischen Größen prinzipiell vergleichbar zu den Größen des einfachen SR mit VI. Daher werden über die Kennfeldgruppe auch die positiven Auswirkungen der VI_{By} verdeutlicht. Die in der Abbildung dargestellten Kennfelder von ΔU , $I_{Q,eff}$ und THD_{U_B} entsprechen den Messergebnissen im spannungsanhebenden Betrieb bei einer induktiven Belastung mit einem Phasenstrom von 100 A und einem Phasenwinkel von -26° .

Über die Kennfelder von ΔU wird der Start- und Endpunkt der Ansteuerungskennlinie definiert. Entsprechend dem Wirkprinzip des SR erfolgt die Spannungsänderung durch die Variation des Spannungsteilerverhältnisses zwischen der VI_{Dr} und der Gesamtinduktivität von Längstransformator und VI_{By} . Ein hoher DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,Dr}$ reduziert die Induktivität der VI_{Dr} und führt zu einer erhöhten Spannungsänderung ΔU . Hingegen wird über die VI_{By} der Einfluss des Längstransformators auf das Netz gemindert. Infolgedessen reduziert ein hoher DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,By}$ in der VI_{By} die Auswirkungen des SR auf die Leitung. Dieses Verhalten wird in Abbildung 4.6 a) verdeutlicht, wobei die ΔU -Kennfelder der anderen beiden Varianten vergleichbar ausfallen. Bei keiner Ansteuerung der VIs ($\bar{I}_{DC,By} = 0 \text{ A}$ & $\bar{I}_{DC,Dr} = 0 \text{ A}$) kommt es durch den Leitungsstrom zu einem Spannungsabfall an der Längsimpedanz des SR, der sich für das ΔU -Kennfeld in Abbildung 4.6 a) mit knapp 5 V gegen den Regelbereich richtet. Dieser Spannungsabfall kann verhindert werden, indem die VI_{By} maximal angesteuert wird. Die geringste Spannungsänderung ist daher an dem Ansteuerungspunkt $\bar{I}_{DC,By} = \bar{I}_{DC,max}$ & $\bar{I}_{DC,Dr} = 0 \text{ A}$ zu finden. An diesem Punkt schließt die VI_{By} den Längstransformator näherungsweise kurz, womit dessen Einfluss auf das Netz überbrückt wird; gleichzeitig ist die Induktivität der VI_{Dr} maximal, wodurch die Spannung im Querschnitt maßgeblich an der VI_{Dr} abfällt. Durch dieses Wirkprinzip kann dort die Spannungsänderung ΔU unabhängig vom Leitungsstrom bei annähernd 0 V gehalten werden. Dieser

Ansteuerungspunkt entspricht daher dem Startpunkt der Ansteuerungskennlinie. Die maximale Auswirkung des SR ist bei dem Ansteuerungspunkt $\bar{I}_{DC,By} = 0 \text{ A}$ & $\bar{I}_{DC,Dr} = \bar{I}_{DC,max}$ zu finden. An diesem Punkt ist die Induktivität der VI_{By} maximal und der VI_{Dr} minimal. Daher ist der Spannungsabfall im Querzweig vornehmlich an der Gesamtinduktivität von Längstransformator und VI_{By} zu finden und die spannungsändernde Wirkung des SR ist am größten. Dieser Ansteuerungspunkt legt den Endpunkt der Ansteuerungskennlinie fest.

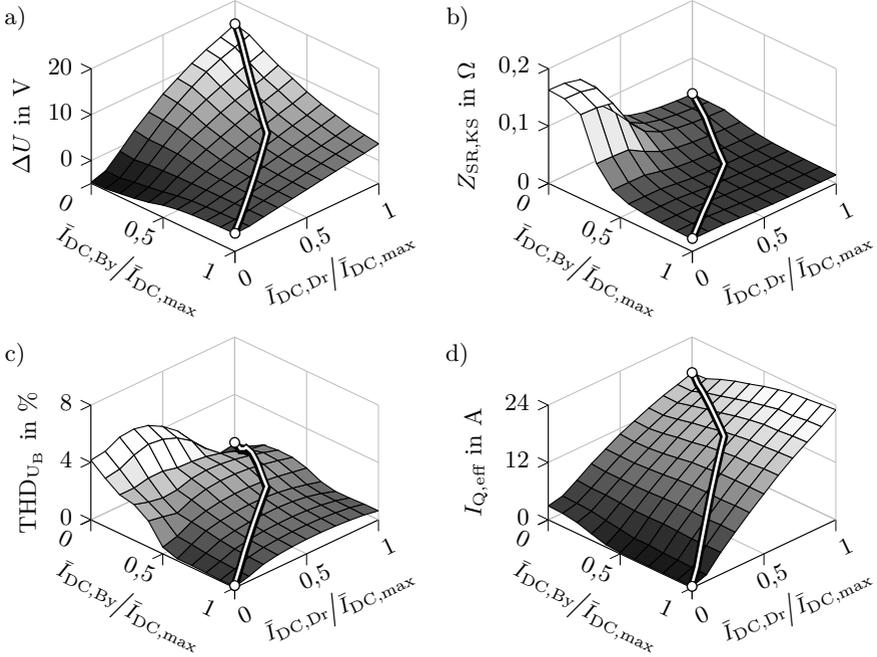


Abbildung 4.6 Kennfeldgruppe der Variante 1 inklusive Ansteuerungskennlinie

- Spannungsänderung ΔU ($\Delta U = U_{B,eff} - U_{A,eff}$)
- Kurzschlussimpedanz $Z_{SR,KS}$
- Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B}
- Effektivwert des Querstroms $I_{Q,eff}$

Die Kennfelder von $Z_{SR,KS}$ fallen für die drei Varianten vergleichbar aus. Die Kennfelder bestätigen, wie anhand von Abbildung 4.6 b) verdeutlicht wird, dass sich $Z_{SR,KS}$ in dem Ansteuerungsbereich, in dem sich beide VIs hochohmig verhalten ($\bar{I}_{DC,By} < 0,4 \cdot \bar{I}_{DC,max}$ & $\bar{I}_{DC,Dr} < 0,4 \cdot \bar{I}_{DC,max}$), am größten ausfällt – dabei

verhält sich $Z_{\text{SR,KS}}$ hauptsächlich induktiv. Wird dieser Ansteuerungsbereich vermieden, reduziert sich die Längsimpedanz um 77 %.

Bei den Kennfeldern von THD_{UB} kommt es zu Abweichungen zwischen den drei Varianten, da Variante 2 und 3 aufbaubedingt bereits eine reduzierte Oberschwingungsemission erreichen. Um mittels der Ansteuerungskennlinie eine Oberschwingungsreduktion umzusetzen, genügt die Betrachtung des Kennfelds von Variante 1. Anhand der Kennfeldmessung für verschiedene Netzzustände zeigt sich zusätzlich, dass der THD_{UB} , wie beim einfachen SR mit VI, eine Abhängigkeit zum Leitungsstrom besitzt. Jedoch wird dadurch der qualitative Verlauf der Kennfelder nicht verändert. An dem exemplarischen Kennfeld von THD_{UB} in Abbildung 4.6 c) wird deutlich, dass durch einen Verzicht des Ansteuerungsbereichs $\bar{I}_{\text{DC,By}} < 0,55 \cdot \bar{I}_{\text{DC,max}}$ & $\bar{I}_{\text{DC,Dr}} < 0,65 \cdot \bar{I}_{\text{DC,max}}$ sich der THD_{UB} für Variante 1 deutlich reduziert. Die Reduktion liegt für die verschiedenen Netzzustände bei knapp 50 %.

Aus den vorherigen Betrachtungen geht hervor, dass eine geringe Ansteuerung beider VIs zum selben Zeitpunkt zu vermeiden ist. Die Betrachtung des Kennfelds in Abbildung 4.6 d) zeigt zudem auf, dass um $I_{\text{Q,eff}}$ zu beschränken beide VIs nicht gleichzeitig hoch angesteuert werden sollten. Diese liegt darin begründet, dass in diesem Ansteuerungsbereich die Induktivitäten beider VIs minimal sind und damit einhergehend auch die Querimpedanz des SR. Diese Aussage ist auf alle Varianten übertragbar.

Anhand dieser Rahmenbedingungen wird eine geeignete Ansteuerungskennlinie basierend auf allen Kennfeldmessungen händisch abgeleitet und zur Veranschaulichung in die Kennfelder in Abbildung 4.6 eingezeichnet. Sie gilt sowohl für den spannungsanhebenden als auch für den spannungsabsenkenden Betrieb und berücksichtigt die festgelegten Start- und Endpunkte, vermeidet die für $Z_{\text{SR,KS}}$ und THD_{UB} ausgeklammerten Ansteuerungsbereiche und verhindert gleichzeitig einen gesteigerten Strombedarf. Definiert wird die Ansteuerungskennlinie über die Formel 4.24, in welcher die Ansteuerung der VI_{By} in Abhängigkeit zum Steuerzustand der VI_{Dr} gesetzt wird.

$$\bar{I}_{\text{DC,By}} = \begin{cases} -\frac{2}{3}\bar{I}_{\text{DC,Dr}} + \bar{I}_{\text{DC,max}} & \text{für } 0 \leq \bar{I}_{\text{DC,Dr}} \leq \frac{2}{3}\bar{I}_{\text{DC,max}} \\ -\frac{5}{3}\bar{I}_{\text{DC,Dr}} + \frac{5}{3}\bar{I}_{\text{DC,max}} & \text{für } \frac{2}{3}\bar{I}_{\text{DC,max}} < \bar{I}_{\text{DC,Dr}} \leq \bar{I}_{\text{DC,max}} \end{cases} \quad (4.24)$$

4.2.3 Verhalten bei unterschiedlichen Netzsituationen

Im Folgenden werden die Auswirkungen verschiedener Netzsituationen auf das Betriebsverhalten des netzrückwirkungsarmen SR beleuchtet. Die Ansteuerung des SR erfolgt dabei unter Anwendung der Ansteuerungskennlinie aus Formel 4.24. Das Verhalten der drei Varianten zeigt sich in diesem Zusammenhang bis auf die Oberschwingungsemission vergleichbar. Stellvertretend für alle Varianten werden die Verläufe der Variante 1 für den spannungsanhebenden Betrieb in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Verläufe sind über $\bar{I}_{DC,Dr}$ aufgetragen und über $\bar{I}_{DC,max}$ normiert; dabei definiert $\bar{I}_{DC,Dr}$ den Ansteuerungszustand des SR, wobei entsprechend der Ansteuerungskennlinie VI_{By} mit angesteuert wird.

Es wird ersichtlich, dass im Vergleich zum Prototyp des einfachen SR mit VI die Verläufe von ΔU , THD_{U_B} und $I_{Q,eff}$ eine reduzierte Abhängigkeit zum Leitungsstrom besitzen (vgl. Abbildung 3.11). Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die Anwendung der Ansteuerungskennlinie die Längsimpedanz vermindert wird.

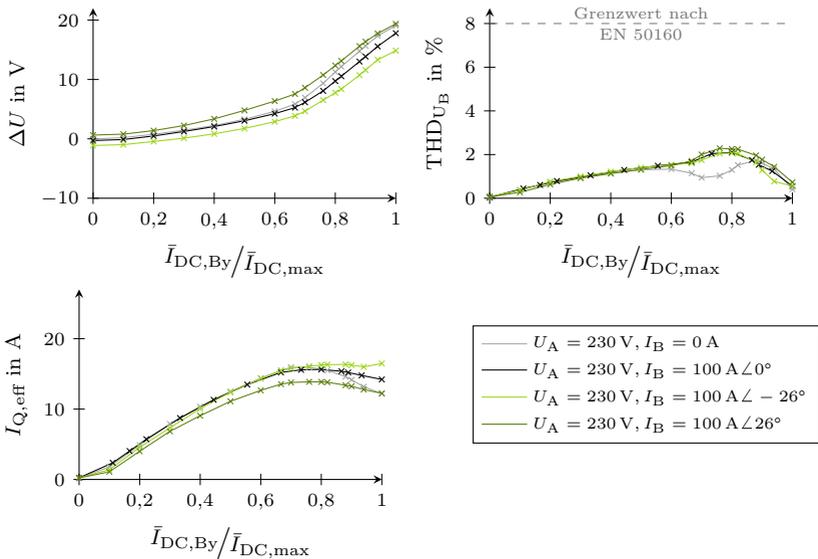


Abbildung 4.7 Verläufe der Spannungsänderung ΔU , des Gesamtüberschwingungsgehalts der Ausgangsspannung THD_{U_B} und des Querstromeffektivwertes $I_{Q,eff}$ unter Verwendung der Ansteuerungskennlinie für Variante 1

Für den ΔU -Verlauf gilt, dass zwischen resistiver und induktiver bzw. kapazitiver Belastung die durchschnittliche Abweichung für alle Varianten bei nur noch 2 V liegt. Auch die $I_{Q,\text{eff}}$ -Verläufe zeigen eine geringere Abhängigkeit zum Leitungsstrom und $I_{Q,\text{eff}}$ wird bei allen Varianten unter 20 A gehalten. Beim THD_{U_B} -Verlauf kommt es zu Unterschieden zwischen den Varianten. Wie aus dem Verlauf in der Abbildung 4.7 ersichtlich wird, begrenzt die kombinierte Ansteuerung den THD_{U_B} bei Variante 1 auf 2,3%. Für den Ansteuerungsbereich zwischen 70% und 80% herrscht jedoch weiterhin eine Abhängigkeit zur Höhe des Leitungsstroms: Der THD_{U_B} im unbelasteten Zustand liegt dort deutlich unter dem THD_{U_B} im belasteten Zustand. Die Differenz der Maximalwerte liegt jedoch bei nur 0,6 Prozentpunkten. Variante 2 und 3 besitzen bauförmbedingt eine stärkere Reduktion der Oberschwingungsemission. Der THD_{U_B} liegt dort maximal bei 0,7% und 1,3% und zeigt zudem keine Abhängigkeit vom Leitungsstrom. Insgesamt ist für den spannungsabsenkenden Betrieb dieselbe reduzierte Abhängigkeit zum Leitungsstrom zu beobachten.

4.2.4 Vergleich der verschiedenen Prototypen

Nachstehend erfolgt ein konkreter Vergleich der Betriebsverhalten der drei Varianten des netzrückwirkungsarmen SR und des einfachen SR mit VI. Dazu werden die Verläufe von ΔU , $Z_{\text{SR,KS}}$ und THD_{U_B} gegenübergestellt. Der Vergleich erfolgt für einen spannungsanhebenden Betrieb bei einer resistiven Belastung mit einem Leitungsstrom von 100 A.

Abbildung 4.8 zeigt die Verläufe von ΔU in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom. Für die Gegenüberstellung werden Variante 1 und 2 des netzrückwirkungsarmen SR zusammen aufgeführt, da sie sich im symmetrischen Netzbetrieb bis auf die Oberschwingungsemission identisch verhalten. ΔU ist über den Ansteuerungszustand des jeweiligen Prototyps aufgetragen. Da beim einfachen SR der induktive Spannungsteiler über den Einsatz einer einzelnen VI variiert wird, gibt der auf der X-Achse aufgetragene DC-Steuerstrom den Ansteuerungszustand der einzelnen VI an. Bei den drei netzrückwirkungsarmen Varianten werden hingegen beide Induktivitäten des Spannungsteilers über die kombinierte Ansteuerung verändert; der auf der X-Achse aufgetragene DC-Steuerstrom gibt dabei den Ansteuerungszustand der VI_{D_r} an, wobei entsprechend der Ansteuerungskennlinie die VI_{B_y} mit angesteuert wird. Die DC-Steuerströme der VIs werden jeweils über ihren maximalen DC-Steuerstrom $I_{\text{DC,max}}$ normiert.

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die netzrückwirkungsarmen Varianten ähnliche ΔU -Verläufe zeigen. Der Verlauf des einfachen SR weicht hingegen grundsätz-

lich davon ab aufgrund der anderen Ansteuerungsart. Entsprechend des Wirkprinzips fällt die maximale Spannungsänderung jedoch für alle Prototypen vergleichbar aus, obgleich der Spannungsregelbereich des netzrückwirkungsarmen SR knapp 2 V geringer ist als beim einfachen SR. Dies liegt darin begründet, dass die VI_{Dr} in den netzrückwirkungsarmen Varianten eine geringere Induktivitätsabsenkung ermöglicht als die VI des einfachen SR. Dies ist allerdings bewusst in Kauf genommen worden, um die Komponenten kleiner ausführen zu können. Die initiale Spannungsänderung weist ebenfalls für alle Prototypen ähnliche Werte auf. Die geringen Abweichungen von 0 V sind auf den Spannungsabfall an der Längsresistenz des jeweiligen Prototyps zurückzuführen. Anders verhält es sich bei einem phasenverschobenen Leitungsstrom, was hier jedoch nicht abgebildet wird. Dort zeigt der einfache SR im Vergleich zu den netzrückwirkungsarmen Varianten starke Abweichungen von 0 V (vgl. Kapitel 3.2.3), die aus seiner hohen Längsreaktanz im Initialzustand resultieren.

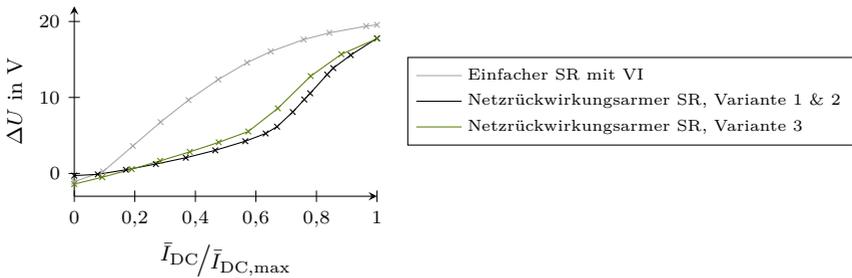


Abbildung 4.8 ΔU -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Ansteuerung

In Abbildung 4.9 werden die Verläufe von $Z_{SR,KS}$ für die verschiedenen Prototypen aufgeführt. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Verläufe jedoch nicht erneut über den DC-Steuerstrom aufgetragen, sondern in Abhängigkeit von der prozentualen Spannungsänderung des jeweiligen Prototyps angegeben. Die initiale Spannungsänderung gilt dabei als 0 %.

Die Abbildung zeigt, dass die $Z_{SR,KS}$ -Verläufe der drei netzrückwirkungsarmen Varianten durch den Einsatz der zweiten VI und der kombinierten Ansteuerung für den unteren Spannungsänderungsbereich deutlich gemindert wird. Im Vergleich zum einfachen SR mit VI kommt es im Initialzustand für die Varianten 1 und 2 zu einer Minderung von 86 % und für Variante 3 von 76 %. Insgesamt bewegt sich $Z_{SR,KS}$ für die netzrückwirkungsarmen Varianten zwischen $0,02 \Omega$ und $0,04 \Omega$ und besitzt damit für alle Spannungsänderungsbereiche etwa dieselbe Größenordnung. Diese

Größenordnung stellt die kleinstmögliche Impedanzeinprägung dar, die durch den SR mit entsprechendem Spannungsregelbereich und Strombedarf verursacht wird. Vorgegeben wird sie durch $Z_{SR,KS}$ bei maximaler Spannungsänderung. Eine weitere Minderung ist nur möglich, wenn ein reduzierter Spannungsregelbereich oder ein gesteigerter Strombedarf in Kauf genommen wird. Demnach ermöglicht der Einsatz der zweiten VI eine Reduktion der Kurzschlussimpedanz auf die kleinstmögliche Größenordnung unter Berücksichtigung des Spannungsregelbereiches und des Strombedarfs.

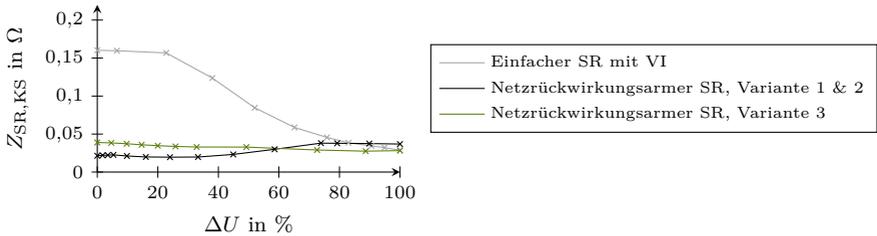


Abbildung 4.9 $Z_{SR,KS}$ -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Spannungsänderung ΔU

Die Abweichungen von $Z_{SR,KS}$ zwischen den netzrückwirkungsarmen Varianten ist zu einem gewissen Teil auf die unterschiedlichen Komponenten zurückzuführen, die in den Varianten zum Einsatz kommen und sich durch geringfügig andere Eigenschaften auszeichnen. Die Kurzschlussmessungen zeigen jedoch auf, dass im Initialzustand $Z_{SR,KS}$ von Variante 3 den höchsten ohmschen Anteil besitzt. $R_{SR,KS}$ liegt dort bei $0,01 \Omega$ und ist damit um Faktor 3 größer als bei den anderen beiden Varianten. Dies liegt an der verwendeten Schaltmimik, mit der nur Variante 3 ausgestattet ist. Durch die Schaltmimik befinden sich im Initialzustand drei geschlossene Schalter im Querzweig; allerdings fließt aufgrund der hochohmigen VI_{Dr} näherungsweise kein Strom und die Schalter werden mit sehr geringer Schaltlast betrieben, was bei den verwendeten Schaltern zu hohen Kontaktwiderständen führt. Die Kontaktwiderstände erhöhen den ohmschen Widerstand des Querzweigs – insbesondere in der Parallelschaltung von VI_{By} und Längstransformator. Über den Längstransformator wird der zusätzliche Widerstand in die Längsimpedanz eingepreßt. Dabei liegt der Kontaktwiderstand eines Schalters im Initialzustand bei näherungsweise $0,55 \Omega$. Mit steigendem Strom im Querzweig sinken die Kontaktwiderstände auf wenige m Ω und die Auswirkungen auf die Längsimpedanz werden vernachlässigbar klein. Grundsätzlich sollte die Verwendung derselben Schaltmimik bei Variante 1 und 2 ein ähnliches

Verhalten zur Folge haben. Um die Auswirkung der Schaltmimik im Initialzustand zu reduzieren, sollten zukünftig auf Schalter zurückgegriffen werden, die auch für kleinere Schaltlasten ausgelegt sind.

Abbildung 4.10 zeigt die Verläufe des THD_{UB} in Abhängigkeit von der Spannungsänderung ΔU . Darin ist zu erkennen, dass die Varianten des netzrückwirkungsarmen SR eine reduzierte Oberschwingungsemission besitzen. Durch die Ansteuerungskennlinie wird der THD_{UB} bereits auf 2,3% begrenzt, wie an dem Verlauf der Variante 1 deutlich wird. Die zusätzliche Maßnahme der Dreieckswicklung in Variante 2 bewirkt, dass der THD_{UB} unterhalb von 0,7% gehalten wird. Durch die Verwendung des Dreiphasentransformators mit Dreischenkeln in Variante 3 bleibt der THD_{UB} unterhalb von 1,3%. Der THD_{UB} des einfachen SR liegt hingegen mit maximal 4,2% deutlich höher. Zudem kann der THD_{UB} des einfachen SR in Abhängigkeit vom Leitungsstrom um weitere Prozentpunkte ansteigen. Wie Messungen zeigen, erweisen sich hingegen die THD_{UB} -Verläufe von Variante 2 und 3 als nahezu unabhängig vom Leitungsstrom. Bei Variante 1 wird weiterhin eine Abhängigkeit beobachtet, wobei sie aufgrund der reduzierten Längsimpedanz geringer ausfällt als beim einfachen SR.

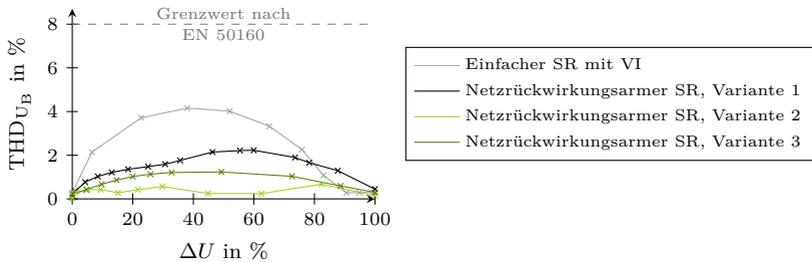


Abbildung 4.10 THD_{UB} -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Spannungsänderung ΔU

Die Maßnahmen zur Reduktion der Oberschwingungsspannungen mindern jedoch nicht die Aussendung der Oberschwingungsströme. So bleibt der Gesamtüberschwingungsgehalt des Strombedarfs THD_I unverändert und liegt für die messtechnisch betrachteten Messzustände zwischen 0% und 1,9%.

4.3 Netzauswirkungen

4.3.1 Kenndaten

Netzanschlussbedingungen

Die drei Prototyp-Varianten des netzrückwirkungsarmen SR besitzen die gleichen Netzanschlussbedingungen wie der Prototyp des einfachen SR mit VI. Die Tabelle 4.1 gibt die entsprechenden Kenndaten der drei Varianten an.

Netzanschluss		
Variante 1, 2 & 3		
Netzfrequenz		50 Hz
Nennspannung	zwischen Außenleiter und Neutralleiter zwischen den Außenleitern	230 V 400 V
Nennstrom		190 A
Nennleistung		130 kVA

Tabelle 4.1: Kenndaten zum Netzanschluss für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten

Kurzschlussimpedanz

Über die Kurzschlussimpedanz wird die Längsimpedanz des SR abgeschätzt. Sie definiert den Einfluss des SR auf die Kurzschlussleistung sowie auf die Störfestigkeit des Netzes. Darüber hinaus wird über sie der in Abhängigkeit vom Leitungsstrom zusätzlich verursachte Spannungsabfall am SR ermittelt.

Im ausgeschalteten Zustand befindet sich der Längstransformator primärseitig im Kurzschluss und die Kurzschlussimpedanz setzt sich aus der Summe der Wicklungswiderstände und der Streuinduktivitäten zusammen, welche auf die Sekundärseite bezogen sind. Für die drei Varianten sind die Kenndaten der Wicklungen in Anhang A.1 gelistet. Ist der SR im eingeschalteten Betrieb, wird die Kurzschlussimpedanz über die in der Kurzschlussmessung ermittelten Werte abgeschätzt. Dabei liefern die Werte im Initialzustand und im Zustand maximaler Ansteuerung für den eingeschalteten Betrieb erneut die Extremwerte. Die Angaben zur Kurzschlussimpedanz sind in Tabelle 4.2 zusammengetragen.

Kurzschlussimpedanz $Z_{SR,KS}$			
Variante 1 & 2			
Ansteuerungszustand	$Z_{SR,KS}$	$R_{SR,KS}$	$X_{SR,KS}$
Ausgeschalteter Zustand	0,002 Ω	0,002 Ω	<0,0007 Ω
Initialzustand	0,021 Ω	0,002 Ω	0,021 Ω
maximaler Ansteuerungszustand	0,037 Ω	0,003 Ω	0,037 Ω
Variante 3			
Ansteuerungszustand	$Z_{SR,KS}$	$R_{SR,KS}$	$X_{SR,KS}$
Ausgeschalteter Zustand	0,002 Ω	0,002 Ω	<0,0009 Ω
Initialzustand	0,040 Ω	0,010 Ω	0,039 Ω
maximaler Ansteuerungszustand	0,028 Ω	0,003 Ω	0,028 Ω

Tabelle 4.2: Kenndaten zur Kurzschlussimpedanz für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten

Im Vergleich mit dem Prototyp des einfachen SR besitzen die netzrückwirkungsarmen Varianten im Initialzustand eine deutlich geminderte Kurzschlussimpedanz. Die Extremwerte verdeutlichen zudem, dass sich die Kurzschlussimpedanz im eingeschalteten Betrieb kaum ändert und von der Größenordnung her gleichbleibt. Allerdings weist die Kurzschlussimpedanz der Variante 3 im Initialzustand aufgrund der Schaltmimik eine gesteigerte Resistanz auf. Wird die gleiche Schaltmimik auch in den anderen Prototypvarianten eingesetzt, wird davon ausgegangen, dass es auch dort zu einer gesteigerten Resistanz kommt. Die Anhebung der Resistanz kann jedoch vermieden werden durch die Verwendung von Schaltern, die auch für kleinere Schaltlasten ausgelegt sind.

Spannungsregelbereich

Der Spannungsregelbereich des netzrückwirkungsarmen SR entspricht der Spannungsänderung zwischen der initialen und maximalen Ansteuerung. Die Spannungsänderung berechnet sich aus der Differenz zwischen den Effektivwerten der Ausgangs- und Eingangsspannung. Da durch die Leistungsbegrenzung der Laborumgebung eine Vermessung der drei Varianten im Nennbetrieb nicht möglich ist, erfolgt die Ermittlung der initialen Spannungsänderung $\Delta U_{\text{initial}}$ und der maximalen Spannungsänderung ΔU_{max} ebenfalls über ihre Systemgleichungen. Da im Initialzustand und im Zustand maximaler Ansteuerung die VIs kein Hystereseverhalten besitzen, erfolgt die Berechnung erneut über lineare Bauelemente.

Die Berechnung des Spannungsregelbereichs wird für verschiedene Netzsituationen umgesetzt. Die Netzsituationen sind dabei analog zu Kapitel 3.3.1 gewählt und legen die maximalen Auswirkungen des Leitungsstroms für den regulären Betrieb offen. Demnach werden jedoch erneut wie beim einfachen SR die Ausgangsgrößen für den SR vorgegeben, weswegen die Systemgleichungen aus Abschnitt 4.1.3 entsprechend umgestellt werden müssen. In die resultierenden Gleichungen werden die Impedanzwerte der jeweiligen Komponenten eingesetzt, welche aus Anhang A.1 entnommen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass entsprechend der Ansteuerungskennlinie bei initialer Ansteuerung die VI_{Bv} maximal angesteuert wird und demnach ihre Reaktanz minimal ist, die VI_{Dr} jedoch keine Ansteuerung erfährt und daher eine maximale Reaktanz aufweist; bei maximaler Ansteuerung verhält es sich genau umgekehrt. Da in Variante 1 und 2 die gleichen Komponenten zum Einsatz kommen, fallen ihre Systemgleichungen identisch aus. Variante 3 besitzt hingegen andere Impedanzwerte. Zusätzlich sind für Variante 3 die Kontaktwiderstände der Schaltmimik im Initialzustand mit einzubeziehen. Das konkrete Vorgehen für die Berechnungen ist Anhang A.2 zu entnehmen.

Ein Abgleich mit bestehenden Messungen zeigt, dass die Systemgleichungen eine gute Genauigkeit aufweisen. Für Variante 1 und 2 liegt die durchschnittliche Abweichung zwischen Messung und Berechnung für die Spannungen bei 0,1 % der Nennversorgungsspannung und für die Ströme bei 0,2 % des Nennstroms; Variante 3 besitzt eine durchschnittliche Abweichung von 0,1 % für die Spannungen bzw. von 0,4 % für die Ströme.

Tabelle 4.3 zeigt die Kenndaten für den spannungsanhebenden und spannungsabsenkenden Betrieb für die verschiedenen Netzsituationen. Für die Angaben der Ströme ist zu berücksichtigen, dass die Stromflussrichtungen entsprechend den Ersatzschaltbildern in Abbildung 4.2 für den spannungsanhebenden und den spannungsabsenkenden Betrieb gegensätzlich sind.

Aufgrund der reduzierten Längsreaktanz bewirkt im Initialzustand ein phasenverschobener Leitungsstrom nur noch geringe Spannungsabweichungen, die im Vergleich zum einfachen SR um bis zu 90 % reduziert ausfallen. Die Beeinflussung der maximalen Spannungsänderungen durch den Leitungsstrom verhält sich für alle Prototypen ähnlich, wobei die maximale Spannungsänderung bei den netzrückwirkungsarmen Varianten aufbaubedingt etwas reduziert ausfällt. In Abhängigkeit vom Leitungsstrom können die netzrückwirkungsarmen Varianten Änderungen in der Netzspannung von etwa $\pm 6\%$ bis $\pm 9\%$ der Nennversorgungsspannung ausgleichen.

Spannungsregelbereich				
Variante 1 & 2				
Netzzustand	Spannungsanhebender Betrieb		Spannungsabsenkender Betrieb	
	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 0 \text{ A}$	0,0 V	17,3 V	0,0 V	-18,2 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A}$	-0,6 V	16,5 V	0,6 V	-17,7 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle -26^\circ$	-2,5 V	13,1 V	2,4 V	-14,7 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle 26^\circ$	1,3 V	20,0 V	-1,4 V	-20,7 V
Variante 3				
Netzzustand	Spannungsanhebender Betrieb		Spannungsabsenkender Betrieb	
	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}	$\Delta U_{\text{initial}}$	ΔU_{max}
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 0 \text{ A}$	0,0 V	17,5 V	0,0 V	-18,3 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A}$	-2,1 V	16,6 V	1,8 V	-17,7 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle -26^\circ$	-4,8 V	13,4 V	4,7 V	-14,9 V
$U_B = 230 \text{ V}, I_B = 190 \text{ A} \angle 26^\circ$	1,2 V	19,9 V	-1,4 V	-20,5 V

Tabelle 4.3: Kenndaten des Spannungsregelbereichs für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten

Leistungsbedarf und Wirkungsgrad

Der Leistungsbedarf der drei Varianten wird über dasselbe Vorgehen ermittelt wie beim einfachen SR mit VI in Kapitel 3.3.1. Für den AC-Leistungsbedarf wird dahingehend ebenfalls auf die Systemgleichungen zurückgegriffen, die bereits für die Bestimmung des Spannungsregelbereichs im vorherigen Abschnitt Anwendung gefunden haben. Zudem werden dieselben Netzzustände betrachtet, um den minimalen und maximalen Leistungsbedarf zu ermitteln.

Die Verlustleistung setzt sich erneut sowohl aus den AC-Verlusten als auch aus den DC-Verlusten zusammen. Die DC-Verluste ergeben sich im Initialzustand entsprechend der Ansteuerungskennlinie aus der DC-Ansteuerung der VI_{By} und im Zustand maximaler Spannungsänderung aus der DC-Ansteuerung der VI_{Dr} . Sie lassen sich aus dem Widerstand der jeweiligen Steuerwicklung und dem entsprechenden DC-Strom berechnen, die für die drei Varianten unterschiedlich ausfallen. Die Angaben dazu sind in Anhang A.1 zu finden. Der gesamte Rechenweg ist in Anhang A.2 aufgeführt.

Es ergibt sich, dass der dreiphasige Blindleistungsbedarf der drei Varianten im unbelasteten Betrieb nahezu gleich ist und von 0,1 kvar im Initialzustand auf annähernd 8 kvar bei maximaler Spannungsänderung ansteigt. Im Nennbetrieb steigt der Blindleistungsbedarf für Variante 1 und 2 von 2,5 kvar auf bis zu 14 kvar und für Variante 3 von 4 kvar auf bis zu 12 kvar.

Die dreiphasige Verlustleistung fällt weiterhin im Zustand maximaler Spannungsänderung am größten aus. Während sie im unbelasteten Zustand für alle drei Varianten maximal 0,7 kW erreicht, steigt sie im Nennbetrieb bei Variante 1 und 2 von 0,7 kW auf bis zu 1,2 kW und fällt bei Variante 3 von 1,5 kW auf bis zu 1,3 kW.

Im Vergleich zum einfachen SR mit VI kommt es demnach aufgrund der verringerten Längsreaktanz im Initialzustand zu einem reduzierten Blindleistungsbedarf. Demgegenüber steigt die maximale Verlustleistung geringfügig an. Dies hat jedoch kaum Auswirkungen auf den Wirkungsgrad im Nennbetrieb, der mit knapp 99 % gleich bleibt. Ferner besitzen auch die netzrückwirkungsarmen Varianten vornehmlich einen induktiven Verbrauch.

Nach den Berechnungen tritt der maximale Leistungsbedarf weiterhin im Nennbetrieb auf. In Tabelle 4.4 werden für die drei Varianten die Kenndaten für den maximalen Leistungsbedarf sowie den Wirkungsgrad im Nennbetrieb zusammengefasst.

Leistungsbedarf und Wirkungsgrad	
Variante 1 & 2	
max. Blindleistungsbedarf	13 kvar
max. Verlustleistung	1,4 kW
Wirkungsgrad im Nennbetrieb	99 %
Variante 3	
max. Blindleistungsbedarf	12 kvar
max. Verlustleistung	1,5 kW
Wirkungsgrad im Nennbetrieb	99 %

Tabelle 4.4: Kenndaten zum dreiphasigen Leistungsbedarf und Wirkungsgrad für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten

Oberschwingungsemission

Aufgrund der Sättigungseffekte in den VIs werden auch durch die netzrückwirkungsarmen Varianten Oberschwingungen ausgesandt. Tabelle 4.5 zeigt in diesem Zusammenhang die Maximalwerte des Gesamtoberschwingungsgehalts der Ausgangsspannung THD_{U_B} . Der THD_{U_B} wird dabei von den Verzerrungen der Eingangsspannung entsprechend Kapitel 3.2.2 bereinigt.

Im Vergleich zum einfachen SR ist die Aussendung deutlich reduziert. Für Variante 1 ist jedoch weiterhin eine Abhängigkeit zum Leitungsstrom vorhanden. So liegt bei einem Leitungsstrom von 100 A der maximale THD_{U_B} bei knapp 2,3 %; im unbelasteten Betrieb beträgt er lediglich 1,7 %. Wird für Variante 1 ein linearer Zusammenhang zwischen dem Leitungsstrom und dem maximalen THD_{U_B} angenommen, lässt sich für den Nennbetrieb eine maximale Anhebung auf 2,8 % abschätzen.

Die zusätzlichen Maßnahmen zur Oberschwingungsreduktion in Variante 2 und 3 ermöglichen eine weitere Absenkung des THD_{U_B} . Zudem entfällt dort die Abhängigkeit zum Leitungsstrom, weswegen in der Tabelle 4.5 keine Differenzierung hinsichtlich des Netzzustandes erfolgt.

Der Gesamtoberschwingungsgehalt des Strombedarfs THD_I , welcher auf den Nennstrom bezogen ist, liegt für die messtechnisch betrachteten Netzzustände zwischen 0 % und 1,9 % und zeigt damit keine Verbesserung im Vergleich zum einfachen SR.

Oberschwingungsemission	
Variante 1	
Netzzustand	Maximaler THD_{U_B}
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 0 \text{ A}$	<2 %
$U_{\text{A}} = 230 \text{ V}, I_{\text{B}} = 100 \text{ A}$	2 %
Variante 2	
Maximaler THD_{U_B}	<1 %
Variante 3	
Maximaler THD_{U_B}	1 %

Tabelle 4.5: Kenndaten zur Oberschwingungsemission für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten

4.3.2 Auswirkung auf die Spannungsqualität

Längsimpedanz

Die Längsimpedanz einer netzrückwirkungsarmen SR-Variante wird über ihre Kurzschlussimpedanz wieder gespiegelt. Im Vergleich zum einfachen SR mit VI besitzen die netzrückwirkungsarmen SR-Varianten eine deutlich reduzierte Längsimpedanz, insbesondere im Initialzustand. Insgesamt wird die Längsimpedanz für den gegebenen Spannungsregelbereich und Strombedarf auf das Mindestmaß reduziert. Durch die reduzierte Längsimpedanz im Initialzustand wird der Impedanzsprung, der in Abhängigkeit vom Leitungsstrom eine sprunghafte Änderung der Höhe und der Phasenlage der Ausgangsspannung bewirkt, beim Zu- und Abschalten signifikant gemindert.

Für die Variante 1 und 2 springt die Impedanz von $0,002\ \Omega \angle 19^\circ$ auf nur noch $0,021\ \Omega \angle 85^\circ$. Durch die Reduzierung fällt bei den meisten Last- und Einspeisesituationen der Spannungssprung beim Zu- und Abschalten vernachlässigbar klein aus. Im schlimmsten Fall kommt es bei einem phasenverschobenen Nennstrom zu einem Spannungssprung von unter 0,75 % der Nennversorgungsspannung und auch der maximale Phasenwinkelsprung fällt unter 1° .

Bei Variante 3 kommt es zu einem Impedanzsprung von $0,002\ \Omega \angle 24^\circ$ auf $0,040\ \Omega \angle 76^\circ$. Die geringe Steigerung im Vergleich zu Variante 1 und 2 liegt teilweise daran, dass in dem Prototyp andere Komponenten zum Einsatz kommen, die sich durch leicht geänderte Eigenschaften auszeichnen. Zu einem großen Teil liegt dies jedoch an der Schaltmimik, die im Initialzustand einen gesteigerten ohmschen Widerstand im Querzweig hervorruft, der über den Längstransformator in die Längsimpedanz eingepreßt wird. Dahingehend wird davon ausgegangen, dass die Anwendung der gleichen Schaltmimik in Variante 1 und 2 dieselbe Steigerung insbesondere im resistiven Anteil der Längsimpedanz hervorruft. Dennoch zeigt sich auch bei Variante 3 die sprunghafte Änderung von Höhe und Phasenlage der Ausgangsspannung stark reduziert im Vergleich zum einfachen SR. Im schlimmsten Fall kommt es zu einem Spannungssprung von lediglich 2 % der Nennversorgungsspannung und auch der Phasenwinkel springt nur noch maximal um $1,8^\circ$.

Durch die reduzierte Längsimpedanz werden die Netzurückwirkungen deutlich gesenkt. Die beim Zu- und Abschalten auftretenden Spannungssprünge haben im Zusammenhang mit ihrer erwarteten Auftrittsfrequenz keine nennenswerten Auswirkungen auf die Flickerstärke im Netz und auch die Phasenwinkelsprünge sind als unkritisch zu bewerten. Zudem wird die Anhebung der Netzimpedanz gemindert,

wodurch der Einfluss auf die Kurzschlussleistung und die Störfestigkeit des Netzausläufers geringer ausfällt und für die meisten Netzanwendungen als unkritisch zu bewerten ist.

Spannungsregelung

Die Spannungsregelung der netzrückwirkungsarmen SR-Varianten erfolgt wie beim einfachen SR mit VI kontinuierlich und es können im Schnitt Änderungen der Versorgungsspannung von $\pm 7,5\%$ der Nennversorgungsspannung ausgeregelt werden. Damit fällt der Spannungsregelbereich um etwa 0,8 Prozentpunkte geringer aus als beim einfachen SR. Dafür besitzt der Leitungsstrom durch die reduzierten Längsimpedanz jedoch einen geringeren Einfluss auf die Spannungsänderung. Leitungsstrombedingte Abweichungen im Initialzustand liegen maximal bei 2,1 % der Nennversorgungsspannung. Diese Abweichungen können sich nach wie vor gegen den Regelbereich richten, so dass im schlimmsten Fall über die Initialspannung die auszuregelnde Höhe der Ausgangsspannung zunächst verschlechtert wird. Wird jedoch die Einschaltsschwelle des SR mit ausreichend Distanz zum 10 % Spannungsband gewählt, sollte der SR zu keiner Erzeugung von Spannungseinbrüchen oder Spannungsüberhöhungen beitragen.

Oberschwingungsemission

Die Oberschwingungsemission durch die zusätzlich in das Netz eingeprägte Zusatzspannung wird bei den netzrückwirkungsarmen Varianten deutlich reduziert. Eine besonders starke Reduktion wird durch die zusätzlichen Maßnahmen in Variante 2 und 3 ermöglicht. Jedoch bleibt bei allen Varianten die Aussendung von Oberschwingungsströmen gegeben, die in Abhängigkeit von der Netzimpedanz Oberschwingungsspannungen im Netz erzeugen. Damit kommt es durch die netzrückwirkungsarmen SR-Varianten weiterhin zu einer Oberschwingungsemission. Allerdings liegt diese insgesamt deutlich unter der des einfachen SR.

Spannungsunsymmetrie

Variante 1 des netzrückwirkungsarmen SR zeichnet sich wie der Prototyp des einfachen SR über eine phasenunabhängige Wirkungsweise aus. Demnach können mit dieser Variante über eine phasenunabhängige Regelung Unsymmetrien in der Spannungshöhe ausgeglichen werden. Auf Unsymmetrien im Spannungswinkel kann jedoch kein Einfluss genommen werden.

Im Gegensatz dazu weisen Variante 2 und 3 durch die zusätzlichen Maßnahmen zur Oberschwingungsreduktion eine Phasenkopplung auf. Zwar kann auch hier die Spannungshöhe phasenunabhängig geregelt werden, jedoch verschiebt sich durch die Kopplung dabei der Phasenwinkel der Spannung und der Unsymmetriefaktor k_u bleibt ansatzweise gleich. Dementsprechend können über Variante 2 und 3 keine Verbesserungen für die Spannungsunsymmetrie erzielt werden.

4.4 Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung hin zu einem netzrückwirkungsarmen SR erzielt gute Ergebnisse. Die drei Varianten, die aus dem Konzept des netzrückwirkungsarmen SR resultieren, ermöglichen neben einem robusten Betrieb eine stufenlose Spannungsregelung, ohne dass zusätzlich eine ausgeprägte Längsimpedanz eingebracht wird. Dabei wird die Längsimpedanz durch die Nutzung der zweiten VI auf das Mindestmaß reduziert. Insbesondere im Initialzustand wird dadurch die Abhängigkeit zum Leitungsstrom deutlich vermindert. In diesem Zuge wird eine Flickerausendung sowie die Gefahr einer kurzzeitigen Einprägung von Spannungseinbrüchen und Spannungsüberhöhungen verhindert. Zudem wird die Beeinträchtigung der Kurzschlussleistung und der Störfestigkeit des Netzes verringert. Die verwendete Schaltmimik aus Variante 3 bewirkt jedoch eine unnötige Anhebung der Längsresistanz aufgrund von hohen Schaltkontakten bei niedriger Schaltlast. Durch die Verwendung von Schaltern, die auch für kleinere Schaltlasten ausgelegt sind, kann diese Anhebung verhindert werden. Ferner ermöglicht die kombinierte Ansteuerung der beiden VIs eine Minderung der Oberschwingungsemission. Bauliche Maßnahmen in Variante 2 und 3 führen zu einer zusätzlichen Reduktion der Oberschwingungsspannungen. Die Aussendung von Oberschwingungsströmen bleibt allerdings für alle Varianten weiterhin bestehen. Die baulichen Maßnahmen in Variante 2 und 3 führen zu einer Phasenkopplung, weswegen eine phasenunabhängige Regelung und damit einhergehend die Verbesserung von Spannungsunsymmetrien behindert wird. Durch die Anwendung einer phasengleichen Spannungsregelung ist der Einfluss der beiden Varianten auf die Spannungssymmetrie jedoch neutral. Wird allerdings ein Ausgleich von Spannungsunsymmetrien im Netz benötigt und kann auf die zusätzliche Oberschwingungsreduktion verzichtet werden, erweist sich der Einsatz der Variante 1 als sinnvoll. Insgesamt zeichnet sich damit die Weiterentwicklung durch geringe Netzurückwirkungen aus und besitzt folglich eine hohe Netzverträglichkeit.

5 Regelung des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers

5.1 Regelungsentwurf

5.1.1 Modellierung der nichtlinearen Regelstrecke

Vereinfachte Systemgleichungen

Die Modellierung des netzrückwirkungsarmen SR erfolgt über die Ersatzschaltbilder und die daraus resultierenden Systemgleichungen aus Kapitel 4.1.3. Zur Vereinfachung wird jedoch angenommen, dass \underline{Z}_{P,I_A} identisch zu \underline{Z}_{P,I_Q} ausfällt:

$$\underline{Z}_P(I_{DC,By}) = \underline{Z}_{P,I_A}(I_{DC,By}) = \underline{Z}_{P,I_Q}(I_{DC,By}) = \frac{(\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w})\underline{Z}_{By}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} \quad (5.1)$$

Dadurch lässt sich \underline{U}_P , die komplexe Spannung an der Parallelschaltung des Längstransformators und der VI_{By} , vereinfacht über Formel 5.2 berechnen.

$$\underline{U}_P = I_Q \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) - \frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) \quad (5.2)$$

Mit dieser Annahme wird der Einfluss der primärseitigen Wicklungsimpedanz auf die Sekundärwicklung grobenteils vernachlässigt. Diese Vereinfachung hat auf die Beschreibung des SR-Verhaltens jedoch kaum Auswirkungen.

Demnach kann die Ausgangsspannung \underline{U}_B für den spannungsabsenkenden Betrieb vereinfacht über Formel 5.3 berechnet werden

$$\underline{U}_B = -\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \left(\underline{U}_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}^2} \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) - \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \cdot \frac{\underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})}{\frac{\dot{u}-1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})} \quad (5.3)$$

und für den spannungsanhebenden Betrieb über Formel 5.4.

$$\underline{U}_B = -\frac{1}{\dot{u}} \cdot \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \left(\underline{U}_A + \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\dot{u}+1}{\dot{u}^2} \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{S,w} \right) \right) \cdot \frac{\underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})}{\frac{\dot{u}+1}{\dot{u}} \cdot \underline{Z}_P(I_{DC,By}) + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr})} \quad (5.4)$$

AC-Impedanzen

Die AC-Impedanzen \underline{Z}_P und \underline{Z}_{Dr} in den Systemgleichungen besitzen je nach Ansteuerungszustand ein Hystereseverhalten und eine sich ändernde statische Induktivität. Im Folgenden werden Kennlinien aufgestellt, die das statische Verhalten der Impedanzen abhängig von den DC-Steuerströmen beschreiben. Die Kennlinien werden exemplarisch anhand von Messungen am Prototyp der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Variante 1 ermittelt.

Die Messungen finden im unbelasteten Betrieb statt. Der zugehörige Versuchsaufbau ist bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert. Zur Bestimmung der Impedanzkennlinien werden die Strom- und Spannungseffektivwerte im Querzweig für unterschiedliche Ansteuerungspunkte entsprechend der Ansteuerungskennlinie aus Kapitel 4.2.2 gemessen. Durch die Ermittlung der Impedanzen über die Effektivwerte von Strom und Spannung wird allerdings nur die Änderung der statischen Induktivität in den Kennlinien berücksichtigt. Das Hystereseverhalten, welches sich über Verzerrungen im Strom- und Spannungssignal bemerkbar macht, ist für den Entwurf des Regelsystems irrelevant und wird daher vernachlässigt.

Basierend auf diesen Messungen werden die in Abbildung 5.1 dargestellten Impedanzkennlinien für Z_{Dr} und Z_P ermittelt. Die dargestellten Kurven ergeben sich aus der Interpolation und Mittelung von drei verschiedenen Messreihen, die bei Eingangsspannungen von 210 V, 230 V und 250 V aufgenommen wurden. Für die resultierenden Impedanzkennlinien ist dabei zu berücksichtigen, dass sie nur unter Verwendung der Ansteuerungskennlinie gelten.

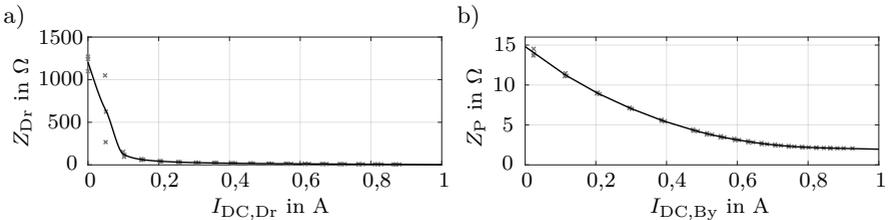


Abbildung 5.1 Kennlinien der AC-Impedanzen

- a) AC-Impedanz der Drosselinduktivität $Z_{Dr}(I_{DC,Dr})$
 b) AC-Impedanz Parallelschaltung $Z_P(I_{DC,By})$

Gemäß Abbildung 5.1 a) zeigt Z_{Dr} eine hohe Impedanzänderung bei kleinen DC-Steuerströmen. Im Bereich niedriger Ansteuerung tritt jedoch eine merkbliche Streuung bei den Messpunkten auf, da es dort in Abhängigkeit von der Eingangsspannung

zu unterschiedlich starken Sättigungsausprägungen in der VI_{Dr} kommt, die sich in der statischen Induktivität bemerkbar machen. Mit zunehmendem DC-Steuerstrom stagniert die Impedanzänderung. Z_{Dr} sinkt dabei von näherungsweise $1200\ \Omega$ auf etwa $5\ \Omega$. Die Impedanz Z_P , welche aus der Parallelschaltung von der VI_{By} und dem Längstransformator hervorgeht, sinkt entsprechend Abbildung 5.1 b) mit steigendem DC-Steuerstrom von näherungsweise $15\ \Omega$ auf $2\ \Omega$. Die geringere Impedanzänderung liegt am Einfluss des Längstransformators, dessen Impedanz für die Primärseite in Summe bei $15,4\ \Omega$ liegt. Die maximale Absenkung wird bei beiden Impedanzen ab einem Steuerstrom von etwa $1\ \text{A}$ erreicht.

Allerdings geben die Impedanzkennlinien lediglich die Scheinwiderstände an, da die Messungen aufgrund der Verzerrungen im Strom- und Spannungssignal keine sichere Ermittlung der komplexen Impedanzen erlauben. Unter Vernachlässigung der Eisenverluste werden jedoch über eine separate DC-Vermessung die Leitungs- und Wicklungsverluste im Querzweig bestimmt und dadurch die jeweiligen ohmschen Anteile von Z_{Dr} und Z_P . Nach den Messungen liegt der ohmsche Anteil von Z_{Dr} bei $0,16\ \Omega$ und für Z_P bei $0,11\ \Omega$. Mit der zusätzlichen Information des ohmschen Anteils R werden die Scheinwiderstände Z nach Formel 5.5 in die komplexe Impedanz \underline{Z} umgerechnet.

$$\underline{Z} = R + j \cdot \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (5.5)$$

DC-Steuerwicklung der variablen Induktivität

Der SR besitzt in Abhängigkeit vom Zeitverhalten der DC-Steuerwicklungen der VIs eine sich ändernde Verzögerungszeit. Dies liegt daran, dass auf Grund einer hohen Windungszahl die DC-Steuerwicklung eine große Induktivität besitzt, welche jedoch in Abhängigkeit des DC-Steuerstroms und der resultierenden Kernsättigung vermindert wird. Damit beeinflusst der DC-Steuerstrom direkt die Verzögerungszeit der VI. Im Folgenden wird die Verzögerungszeit bei den Auf- und Entmagnetisierungsvorgängen in der Steuerwicklung über die Beschreibung der DC-Steuerströme I_{DC} modelliert. Es wird ein einheitliches Modell für beide VIs entworfen, da die Kerne und die DC-Wicklungen von VI_{By} und VI_{Dr} identisch sind. Die Modellierung erfolgt erneut beispielhaft für Variante 1.

Die Steuerwicklung wird, wie im Ersatzschaltbild in Abbildung 5.2 dargestellt, über den Wicklungswiderstand R_{DC} und die Induktivität L_{DC} nachgebildet, wobei die Induktivität eine Abhängigkeit zum DC-Steuerstrom besitzt ($L_{DC}(I_{DC})$). Der DC-Steuerstrom I_{DC} resultiert aus dem Anlegen einer DC-Spannung I_{DC} .

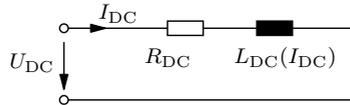


Abbildung 5.2 Ersatzschaltbild der DC-Steuerwicklung

Die Zusammenhänge in dem Ersatzschaltbild werden nach Formel 5.6 über eine Differentialgleichung erster Ordnung beschrieben.

$$U_{DC} = I_{DC} \cdot R_{DC} + \dot{I}_{DC} \cdot L_{DC}(I_{DC}) \quad (5.6)$$

Durch eine Überführung in den Spektralbereich mittels Laplace-Transformation und entsprechender Umstellung wird die Übertragungsfunktion F_{DC} der DC-Steuerwicklung entsprechend Formel 5.7 erhalten. Die Übertragungsfunktion ähnelt der Funktion eines PT_1 -Gliedes, besitzt jedoch eine variable Verzögerung.

$$F_{DC}(s, I_{DC}) = \frac{I_{DC}}{U_{DC}} = \frac{1}{L_{DC}(I_{DC}) \cdot s + R_{DC}} \quad (5.7)$$

Der Wicklungswiderstand R_{DC} liegt nach Anhang A.1 bei 90Ω . Die Induktivität L_{DC} wird erneut über eine Kennlinie nachgebildet, die L_{DC} in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom beschreibt. Zur Ermittlung der Kennlinie werden Spannungssprünge auf die DC-Steuerwicklung gegeben und die Sprungantworten von I_{DC} gemessen. Die Sprünge liegen in unterschiedlichen Spannungsbereichen und haben eine so niedrige Sprunghöhe, dass I_{DC} dort annähernd das Verhalten eines PT_1 -Gliedes mit konstanter Verzögerung besitzt. Aus den Sprungantworten werden die Zeitkonstanten τ für die jeweiligen Spannungsbereiche ermittelt, wobei τ der Zeit entspricht, welche die Sprungantwort benötigt um 63% ihres Endwertes zu erreichen [110]. Über τ kann nach Formel 5.8 die Induktivität für die jeweiligen Spannungsbereiche berechnet werden.

$$L_{DC} = R_{DC} \cdot \tau \quad (5.8)$$

Insgesamt werden drei Messreihen mit 5 V- und 10 V-Spannungssprüngen aufgenommen. Abbildung 5.3 a) zeigt exemplarisch die Sprungantworten von I_{DC} einer Messreihe. Für jede Antwort ist der Zeitpunkt $5 \cdot \tau$ markiert, welcher 99% des Endwertes kennzeichnet. Zu jeder Sprungantwort wird die zugehörige Induktivität berechnet und dem mittleren DC-Steuerstrom eines Bereichs zugeordnet. Beispielsweise besitzt die Sprungantwort von 0,9 A auf 1 A ein τ von 0,11 s. Entsprechend der Berechnung über Formel 5.8 wird damit dem mittleren Steuerstrom von 0,95 A

eine Induktivität von 10 H zugeordnet. Die resultierenden Zusammenhänge werden mittels Splinefunktionen interpoliert sowie auf 0 A und 1 A erweitert. Zuletzt werden über eine Mittelwertbildung die Ergebnisse der drei Messreihen zu der Kennlinie in Abbildung 5.3 b) zusammengefasst. Die Abbildung zeigt, wie die DC-Induktivität mit steigendem DC-Steuerstrom abnimmt. Die Auf- und Entmagnetisierungszeit verkürzt sich von etwa 8 s auf 0,5 s mit einer abnehmenden Induktivität von 140 H auf 10 H.

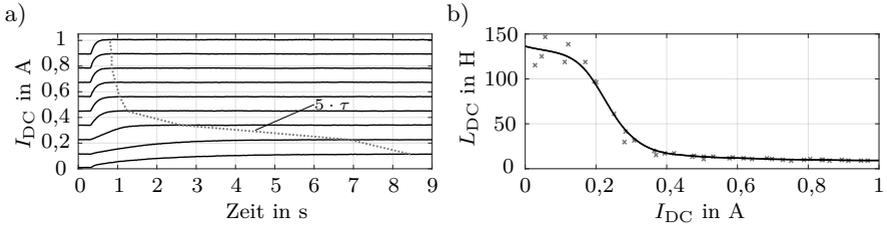


Abbildung 5.3 Induktives Verhalten der DC-Steuerwicklung

a) Sprungantwort des DC-Steuerstroms I_{DC}

b) Kennlinie der DC-Steuerwicklungsinduktivität L_{DC}

Regelstreckenmodell

Eine Kombination der Systemgleichungen mit den Modellen der AC-Impedanzen und der DC-Steuerwicklungen resultiert in dem Regelstreckenmodell des netzrückwirkungsarmen SR. Abbildung 5.4 zeigt den zugehörigen Signalfussplan. Darin wird das Regelstreckenmodell unterteilt in die Regelstrecken der beiden DC-Steuerwicklungen, $F_{DC,Dr}$ und $F_{DC,By}$, und in die Regelstrecke der AC-Schaltung F_{AC} .

Der Signalfussplan verdeutlicht, dass die DC-Steuerspannungen der VIs, $U_{DC,Dr}$ und $U_{DC,By}$, den Stellgrößen der gesamten Regelstrecke entsprechen. Gleichzeitig bilden sie die Eingangsgrößen für $F_{DC,Dr}$ und $F_{DC,By}$. Dort werden jeweils über Formel 5.7 die DC-Steuerströme, $I_{DC,Dr}$ und $I_{DC,By}$, nachgebildet. Die variable Verzögerung wird jeweils über die L_{DC} -Kennlinie und eine Rückführung des DC-Steuerstroms erhalten.

Die beiden DC-Steuerströme sind die Eingangsgrößen für F_{AC} . In F_{AC} werden über die AC-Impedanzkennlinien und die DC-Steuerströme die Impedanzwerte für \underline{Z}_{Dr} und \underline{Z}_p modelliert. Durch das Einsetzen der Impedanzwerte in Formel 5.3 oder 5.4 wird die komplexe Ausgangsspannung \underline{U}_B ermittelt. Welche Formel zum Einsatz kommt, hängt davon ab, ob die Regelstrecke den spannungsabsenkenden oder span-

nungsanhebenden Betrieb beschreiben soll. Des Weiteren werden für die Bestimmung von \underline{U}_B über die Formeln die Eingangsspannung \underline{U}_A und der Eingangsstrom \underline{I}_A benötigt. Diese beiden Größen entsprechen in der Regelstrecke den Störgrößen. Demgegenüber entspricht der Absolutwert der Ausgangsspannung U_B der Regelgröße des Systems.

Das Modell liefert eine Nachbildung der Regelstrecke über numerische zeitdiskrete Verfahren und ermöglicht dadurch eine simulationstechnische Betrachtung des netzrückwirkungsarmen SR, die für den Entwurf und die Validierung der nachfolgenden Reglerauslegung herangezogen wird.

Die zuvor ermittelten Kennlinien ermöglichen die Modellierung der Variante 1. Für eine dreiphasige Nachbildung wird pro Phase ein Regelstreckenmodell verwendet. Über dasselbe Modell kann für den symmetrischen Betrieb auch Variante 2 dargestellt werden, da dort die gleichen Komponenten zum Einsatz kommen. Für die Nachbildung der Variante 3 müssen hingegen bedingt durch die verwendeten Komponenten andere Kennlinien hinterlegt werden. Das Regelstreckenmodell berücksichtigt jedoch keine Phasenkopplung, weswegen das Verhalten von Variante 2 und 3 im unsymmetrischen Betrieb nicht abgebildet wird.

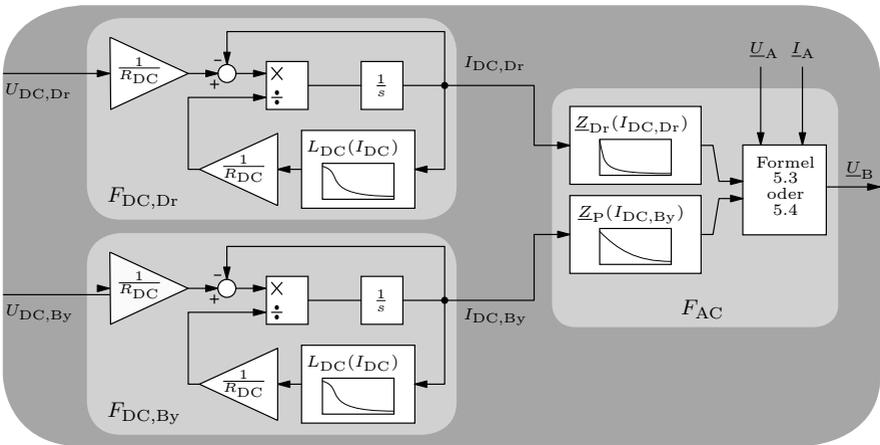


Abbildung 5.4 Regelstreckenmodell des SR

5.1.2 Design einer kaskadierten Regelung mit adaptiven Reglern

Anforderungen und Struktur

Ein SR soll der statischen Spannungshaltung dienen und Änderungen der Versorgungsspannungen ausgleichen. Die Bewertung der Spannungsänderung erfolgt entsprechend der EN 50160 [11] über den 10-Minuten-Mittelwert der Versorgungsspannung. Für einen SR genügt demnach eine verhältnismäßig langsame Regelung im Sekundenbereich. In Anlehnung an die Vorgaben der VDE-AR 4105 [13] für die statische Spannungshaltung durch Erzeugungsanlagen wird für den SR eine Ausregelzeit zwischen 6 s und 60 s vorgeben. Innerhalb dieser Zeit sollen 95 % des Sollwerts erreicht werden.

Ziel der Regelung ist es, die Regelgröße U_B über die Stellgrößen $U_{DC,Dr}$ und $U_{DC,By}$ auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln. Gleichzeitig soll über den Regler das nichtlineare Verhalten in der Regelstrecke kompensiert werden, um ein gleichmäßiges Regelverhalten zu erzielen. Dadurch wird garantiert, dass es im dynamischen Betrieb zu keinen schnellen Spannungsänderungen durch die Regelung kommt, die eventuell zu einer Flickeremission führt.

Das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke beinhaltet einerseits eine variable Verstärkung, welche durch die Regelstrecke der AC-Schaltung F_{AC} bedingt wird, und andererseits eine sich ändernde Verzögerung, die in den Regelstrecken der DC-Steuerelemente, $F_{DC,Dr}$ und $F_{DC,By}$, hervorgerufen wird. Aufgrund der klaren Trennung bietet sich die Anwendung einer Kaskadenregelung an, um die Kompensation des nichtlinearen Verhaltens zu ermöglichen. Der zugehörige Signalflussplan ist in Abbildung 5.5 zu sehen.

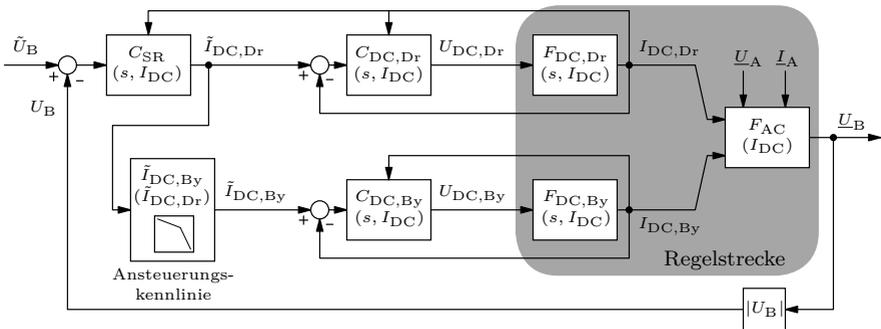


Abbildung 5.5 Signalflussplan des vollständigen Regelsystems

Über zwei innere Regelkreise, die parallel zueinander liegen, werden jeweils die DC-Steuerströme in den VIs geregelt. Die beiden dazu verwendeten DC-Steuerstromregler, $C_{DC,Dr}$ und $C_{DC,By}$, werden identisch ausgeführt und sind als adaptive Regler aufgebaut. Durch eine Anpassung ihrer Kenngrößen in Abhängigkeit vom jeweiligen DC-Steuerstrom kompensieren sie das nichtlineare Zeitverhalten der Regelstrecken $F_{DC,Dr}$ und $F_{DC,By}$.

Der Regler des äußeren Kreises C_{SR} gibt die Führungsgröße $\tilde{I}_{DC,Dr}$ für $C_{DC,Dr}$ vor, wobei $\tilde{I}_{DC,By}$ über die Ansteuerungskennlinie entsprechend Kapitel 4.2.2 mit vorgegeben wird. C_{SR} wird ebenfalls als adaptiver Regler ausgeführt, um durch eine Anpassung seiner Kenngrößen in Abhängigkeit von $I_{DC,Dr}$ die Kompensation der nichtlinearen Verstärkung von F_{AC} zu ermöglichen. Bei dem Entwurf von C_{SR} ist zu berücksichtigen, dass der äußere Regelkreis langsamer als die inneren Regelkreise sein muss, um eine stabile Kaskadenregelung zu erzielen [111].

Innerer Regelkreis

Um einen geeigneten DC-Steuerstromregler C_{DC} für die beiden inneren Regelkreise zu entwerfen, wird ein gewünschtes lineares Regelverhalten definiert, welches sich durch ein konstantes Zeitverhalten und eine Ausregelung ohne Überschwingen auszeichnet. Anhand des gewünschten Regelverhaltens und der Regelstrecke des DC-Steuerkreises F_{DC} wird ein adaptiver Regler entwickelt, welcher das nichtlineare Zeitverhalten von F_{DC} durch eine Anpassung des proportionalen Anteils kompensiert.

Für das gewünschte Regelverhalten wird eine Übertragungsfunktion \tilde{G}_{DC} erster Ordnung nach Formel 5.9 definiert. Die Verzögerungszeit von \tilde{G}_{DC} wird mit einer Zeitkonstante τ_{DC} von $\frac{5}{3}$ s etwas größer gewählt als die maximale Verzögerungszeit von F_{DC} . Damit wird ermöglicht, dass ohne Stellgrößenüberhöhung das nichtlineare Verzögerungsverhalten von F_{DC} kompensiert werden kann. Auf eine Stellgrößenüberhöhung wird verzichtet, da sie höhere Anforderungen an das Stellglied erfordert und die Regelgeschwindigkeit für die Anwendung im SR bereits ausreichend schnell ist.

$$\tilde{G}_{DC}(s) = \frac{1}{\frac{5}{3} \cdot s + 1} \stackrel{!}{=} \frac{C_{DC} \cdot F_{DC}}{1 + C_{DC} \cdot F_{DC}} \quad (5.9)$$

\tilde{G}_{DC} soll der Übertragungsfunktion des geschlossenen inneren Regelkreises entsprechen, welche auch über den noch unbekanntem Regler C_{DC} und die Regelstrecke der DC-Steuerwicklung F_{DC} beschrieben werden kann. Durch das Einsetzen von F_{DC}

entsprechend Formel 5.7 und Umformung nach C_{DC} wird die Übertragungsfunktion des benötigten Reglers in Formel 5.10 erhalten.

$$C_{DC}(s, I_{DC}) = \frac{L_{DC}(I_{DC}) \cdot s + R_{DC}}{\frac{5}{3} \cdot s} \quad (5.10)$$

Gemäß dieser Formel entspricht C_{DC} einem PI-Regler, der den proportional wirkenden Parameter L_{DC} analog zur Regelstrecke F_{DC} in Abhängigkeit zum DC-Steuerstrom ändert. Durch diesen adaptiven proportionalen Anteil wird das nichtlineare Zeitverhalten der DC-Steuerwicklung kompensiert.

Äußerer Regelkreis

Der Entwurf des äußeren Regelkreises erfolgt ähnlich wie die Auslegung des inneren Regelkreises, nur dass eine gewünschte Übertragungsfunktion für das gesamte Regelsystem \tilde{G}_{SR} definiert wird. Um Instabilitäten zu vermeiden, sollte \tilde{G}_{SR} langsamer als der innere Regelkreis sein [111]. In diesem Zusammenhang wird für \tilde{G}_{SR} eine Übertragungsfunktion erster Ordnung mit der Zeitkonstante τ von 5 s festgelegt, wie in Formel 5.11 dargestellt. Mit der Zeitkonstante von 5 s ist das gesamte Regelsystem dreimal langsamer als die Auslegung des inneren Regelkreises und die Sprungantwort erreicht zudem innerhalb von 15 s ($3 \cdot \tau$) 95 % des Sollwerts. Dementsprechend erfüllt das Zeitverhalten der Regelung die vorgegebenen Anforderungen.

$$\tilde{G}_{SR}(s) = \frac{1}{5 \cdot s + 1} \stackrel{!}{=} \frac{C_{SR} \cdot F_{AR}}{1 + C_{SR} \cdot F_{AR}} \quad (5.11)$$

\tilde{G}_{SR} soll der Übertragungsfunktion des gesamten Regelsystems entsprechen und kann auch über den auszulegenden Regler C_{SR} und die offene Regelstrecke des äußeren Regelkreises F_{AR} ausgedrückt werden. Dabei setzt sich F_{AR} aus den inneren Regelkreisen, die jeweils über \tilde{G}_{DC} beschrieben werden, und der Regelstrecke der AC-Schaltung F_{AC} zusammen.

F_{AC} stellt die Verstärkung der gesamten Regelstrecke dar und lässt sich in Abhängigkeit von den Störgrößen und den Impedanzwerten in der AC-Schaltung über die Formeln 5.3 bzw. 5.4 berechnen. Die Impedanzwerte hängen von den Ansteuerungszuständen der VIs ab, welche jedoch über die Ansteuerungskennlinie miteinander verbunden sind. Unter Vernachlässigung des Einflusses der Störgrößen kann demnach F_{AC} auch nur in Abhängigkeit von $I_{DC,Dr}$ über einen variablen Verstärkungsfaktor K_{SR} beschrieben werden. Dazu wird $K_{SR}(I_{DC,Dr})$ für den spannungsanhebenden und spannungsabsenkenden Betrieb jeweils über eine Kennlinie ausgedrückt, die den Zusammenhang von U_B zu $I_{DC,Dr}$ angibt. Die Kennlinie ergibt sich aus der

Addition der Eingangsspannung U_A mit dem Verlauf der Spannungsänderung ΔU entsprechend Formel 5.12.

$$F_{AC} \approx K_{SR}(I_{DC,Dr}) = U_A + \Delta U(I_{DC,Dr}) \quad (5.12)$$

In diesem Zusammenhang wird für U_A eine Spannung von 230 V festgelegt. Für die ΔU -Verläufe des spannungsanhebenden und spannungsabsenkenden Betriebs werden auf Messergebnisse im unbelasteten Betrieb zurückgegriffen, wie sie exemplarisch für die Varianten 1 des netzrückwirkungsarmen SR in Abbildung 4.7 zu sehen sind. Durch die Vernachlässigung der Störeinflüsse von U_A und I_A sollte die Regengenauigkeit nicht beeinträchtigt werden. Jedoch kann es dadurch zu geringen Abweichungen von der gewünschten Übertragungsfunktion \tilde{G}_{SR} kommen.

Die beiden inneren Regelkreise definieren das Verzögerungsverhalten von F_{AR} . Da sie nach ihrer Auslegung immer identisch ausfallen und parallel zueinander liegen, kann ihr Einfluss durch eine einzelne Übertragungsfunktion von \tilde{G}_{DC} angegeben werden. Die resultierende vereinfachte Regelstrecke des äußeren Regelkreises F_{AR} wird in Formel 5.13 zusammengefasst.

$$F_{AR}(s, I_{DC,Dr}) = K_{SR}(I_{DC,Dr}) \cdot \tilde{G}_{DC}(s) = \frac{K_{SR}(I_{DC,Dr})}{\frac{5}{3} \cdot s + 1} \quad (5.13)$$

Über die Vereinfachungen wird der Entwurf eines einfachen und übersichtlichen Reglers ermöglicht. Dazu wird F_{AR} in Formel 5.11 eingesetzt und, wie in Formel 5.14 zu sehen, nach C_{SR} freigestellt.

$$C_{SR}(s, I_{DC,Dr}) = \frac{\frac{5}{3} \cdot s + 1}{5 \cdot K_{SR}(I_{DC,Dr}) \cdot s} \quad (5.14)$$

Demgemäß entspricht auch C_{SR} einem PI-Regler, dessen Verhalten über den Parameter K_{SR} in Abhängigkeit von $I_{DC,Dr}$ angepasst wird. Dadurch kann das nichtlineare Verstärkungsverhalten des SR für den regulären Betrieb weitestgehend kompensiert werden.

Regelung mit Anti-Windup

Für die Stellglieder im Regelsystem, welche $U_{DC,Dr}$ und $U_{DC,By}$ vorgeben, wird der DC-Nennspannungsbereich der VIs als Stellbereich festgelegt. Für Variante 1 liegt dieser folglich zwischen 0 V und 90 V (vgl. Anhang A.1). Eine numerische Simulation des Regelsystems zeigt auf, dass die entworfene Regelung teilweise zu Überschrei-

tungen des Stellbereichs führt, wodurch die Stellgrößen in Sättigung gehen. Dies verursacht Windup Effekte in den PI-Reglern des Regelsystems [112].

Der Windup Effekt ist dadurch gekennzeichnet, dass im Falle einer Stellgrößenbeschränkung ein Integrierer in der Regelung die Regelabweichung solange weiter aufintegriert, bis es zu einem Vorzeichenwechsel bei der Regelabweichung kommt. Nach dem Vorzeichenwechsel muss der Integralanteil zunächst wieder abgebaut werden, wodurch es zu einer ungewollten Verzögerung der Stellgrößenvorgabe kommt. Dies kann erhöhte Überschwingungen und Instabilität zur Folge haben. [112]

Windup Effekte werden insbesondere durch den Regler des äußeren Regelkreises verursacht, da bei der Auslegung der inneren Regelkreise explizit auf eine Stellgrößenüberhöhung verzichtet wird. Durch eine Begrenzung der Führungsgröße $\tilde{I}_{DC,Dr}$ auf den Nennstrombereich der VIs wird der Effekt nicht auf die inneren Regelkreise übertragen. Eine gesonderte Betrachtung des inneren Regelkreises zeigt jedoch auf, dass auch dort geringe Windup Effekte auftreten.

Um dem Windup Effekt entgegen zu wirken, können unterschiedliche Anti-Windup Maßnahmen angewandt werden. In diesem Zusammenhang liefert [113] einen Überblick zu verschiedenen Maßnahmen und zeigt den resultierenden Einfluss auf ein Energiesystem. Für die hier entworfenen Regler wird eine Anti-Windup Maßnahme mit Rückkopplung und Verstärkungsglied entsprechend Abbildung 5.6 entworfen.

Bei dieser Maßnahme wird einer Stellgrößenverletzung von u proportional über m entgegengewirkt, wodurch die Integration der Regelabweichung e bei einer Stellgrößenbeschränkung stark reduziert wird.

Die Verstärkung m der Anti-Windup Maßnahmen für die Regler C_{DC} und C_{SR} werden empirisch innerhalb der Simulationsumgebung ermittelt und liegen bei 0,1 bzw. 100.

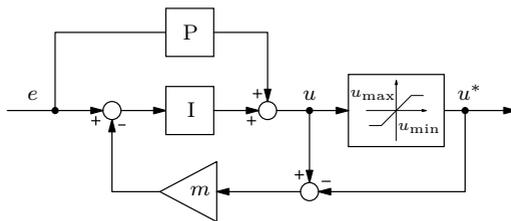


Abbildung 5.6 Anti-Windup Maßnahme am PI-Regler mit Rückkopplung und Verstärkungsglied

Umsetzung im Labor

Die Erprobung der Regelung erfolgt exemplarisch an der Variante 1 des netzrückwirkungsarmen SR. Für die Laborumsetzung werden die drei Regler C_{SR} , $C_{DC,Dr}$ und $C_{DC,By}$ sowie die Ansteuerungskennlinie auf einem echtzeitfähigen Entwicklungssystem implementiert. Die Kennlinien der Regler, $L_{DC}(I_{DC})$ und $K_{SR}(I_{DC,Dr})$, werden als Lookup Tabellen hinterlegt. Zwischen den Datenpunkten einer Lookup Tabelle wird interpoliert, sodass keine Sprünge in der Regelung auftreten. Die Ansteuerungskennlinie wird als funktionaler Zusammenhang nach Formel 4.24 angegeben. Als Rechenzeit wird für das Entwicklungssystem eine feste Schrittweite von 0,0002 s festgelegt.

Als Eingangsgröße muss angegeben werden, ob der SR im spannungsanhebenden oder spannungsabsenkenden Betrieb arbeitet. Zudem muss der Sollwert \tilde{U}_B für die Ausgangsspannung vorgegeben werden. Beides kann für die prototypische Betrachtung über eine grafische Bedienoberfläche eingestellt werden. Darüber hinaus werden über analoge Eingänge Messwerte für die DC-Steuerströme und die Ausgangsspannung übermittelt. Die DC-Strommessungen erfolgen über Stromzangen und die Spannungsmessung wird über einen Differentialastkopf umgesetzt. Die Messdaten werden mithilfe der Sliding-Window Methode gemittelt, bzw. ihr Effektivwert gebildet. Die Fensterbreite beträgt dabei 0,02 s.

Die analogen Ausgänge des Entwicklungssystems liefern die Steuerspannungen für die Stellglieder. Ein Stellglied setzt sich aus einem Impedanzwandler und einem regelbaren Netzteil zusammen. Der Impedanzwandler entspricht einer Operationsverstärkerschaltung mit einer Spannungsverstärkung von 1 [114]. Damit folgt die Ausgangsspannung der vorgegebenen Eingangsspannung, gleichzeitig wird jedoch ausgangsseitig eine höhere Belastung ermöglicht. Dies ist nötig, da die Ansteuerung des regelbaren Netzteils eine höhere Leistung benötigt, als das Entwicklungssystem über seine analogen Ausgänge bereitstellen kann.

Über das regelbare Netzteil wird die Steuerspannung in die Stellspannung $U_{DC,Dr}$ bzw. $U_{DC,By}$ umgeformt, welche zur Ansteuerung der jeweilige DC-Steuerwicklung dient. Zwischen Netzteil und DC-Steuerwicklung wird zusätzlich eine Schutzbeschaltung mit Freilaufdiode eingebaut. Die Diode wird in Sperrrichtung parallel zur Steuerwicklung angeschlossen, wodurch Entmagnetisierungsvorgänge in der Steuerwicklung über die Diode abgeleitet werden und somit nicht das Netzteil überlasten können.

Abbildung 5.7 gibt den Aufbau der Laborumsetzung schematisch an. Für die dreiphasige Umsetzung kann der Aufbau dreimal errichtet werden, wobei im Entwick-

lungssystem drei unabhängige Implementierungen ermöglicht werden. Für eine symmetrische Ansteuerung genügt jedoch die einmalige Ausführung, wie dargestellt, da in diesem Fall über jeweils ein Stellglied $U_{DC,Dr}$ bzw. $U_{DC,By}$ für die drei Phasen symmetrisch vorgegeben wird.

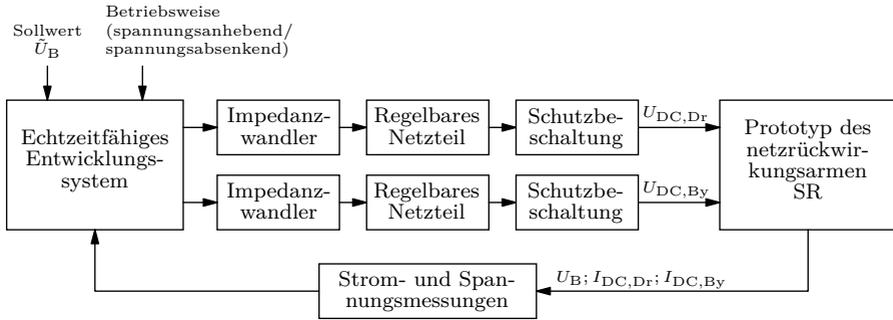


Abbildung 5.7 Schematischer Aufbau der Laborumsetzung

5.1.3 Validierung

Die entworfene Regelung wird an der Variante 1 des netzrückwirkungsarmen SR validiert. Dazu werden auf die Störgröße U_A Sprünge gegeben und das Übertragungsverhalten des Regelungssystems über die Sprungantwort von U_B analysiert. Für \tilde{U}_B wird dabei ein fester Sollwert von 230 V vorgegeben.

Abbildung 5.8 a) stellt Sprungantworten für Spannungssprünge mit unterschiedlicher Höhe dar. Theoretisch sollten die Sprungantworten nach der Auslegung einer abfallenden Exponentialfunktion entsprechen. Es wird jedoch sichtbar, dass insbesondere bei Spannungssprüngen größer als 10 V die Sprungantwort von dem Verlauf einer Exponentialfunktion abweicht. In Abbildung 5.8 b) werden 4,5 V Sprünge betrachtet, die bei unterschiedlichen Startspannungen beginnen. Für diese Sprunghöhe wird das nichtlineare Verhalten besser kompensiert; alle Sprungantworten besitzen ansatzweise den Verlauf einer abfallenden Exponentialfunktion mit einer ähnlichen Verzögerungszeit. Allerdings fällt die Verzögerungszeit geringer aus als für die Auslegung vorgegeben.

Die Abweichungen von der ausgelegten Übertragungsfunktion sind größtenteils auf die DC-Steuerstromregler zurückzuführen, die auf Basis der L_{DC} Kennlinie ihr proportionales Verhalten anpassen. Da die L_{DC} Kennlinie für das Kleinsignalverhalten

ermittelt worden ist, kommt es für höhere Sprünge zu Ungenauigkeiten bei der Kompensation des nichtlinearen Verhaltens der Regelstrecke. Im selben Zuge fallen auch die Werte der L_{DC} -Kennlinie für die hier gewählten Sprunghöhen etwas zu groß aus, so dass sich eine reduzierte Verzögerungszeit ergibt.

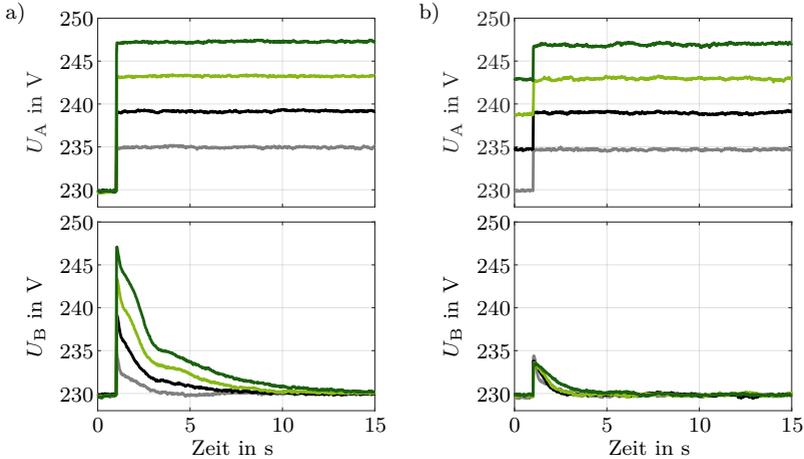


Abbildung 5.8 Spannungssprünge von U_A und Sprungantwort von U_B
 a) Sprungantworten für Sprünge mit unterschiedlicher Höhe
 b) Sprungantworten für Sprünge mit unterschiedlicher Startspannung

Generell liefert das entworfene Regelsystem jedoch zufriedenstellende Ergebnisse. Das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke wird zu einem großen Teil – insbesondere für das Kleinsignalverhalten – kompensiert und es wird eine Ausregelung innerhalb von 10 s ermöglicht, ohne dass sprunghafte Änderungen im Spannungssignal auftreten. Bei Bedarf ist eine Vergrößerung der Ausregelzeit problemlos über eine Anpassung der Zeitkonstante in \tilde{G}_{SR} möglich. Dies ist sinnvoll, wenn beispielsweise die $Q(U)$ -Regelung von Wechselrichtern im Netzabschnitt eine ähnliche Regelzeit besitzen. Um mögliche Interoperabilitätsprobleme zu vermeiden, sollten die Regelzeiten unterschiedlich ausfallen. Die hier dargestellte Ausregelungszeit entspricht der minimalen Ausregelungszeit, die der SR ermöglicht. Darüber hinaus wird über weitere numerische Simulationen und Labortests, in denen beliebige Änderungen der Systemparameter vorgenommen werden, dem Regelsystem ein robustes und stabiles Verhalten nachgewiesen.

5.2 Steuerungs- und Regelungskonzept

5.2.1 Ein- und Ausschaltvorgang

Der Ein- und Ausschaltvorgang des SR besitzt jeweils eine vorgegebene Routine. Darin werden über eine Ansteuerung die VIs in ihren Initialzustand gefahren und die entsprechenden Schalter der Schaltmimik betätigt, um den spannungsanhebenden oder spannungsabsenkenden Betrieb zu- oder abzuschalten. Das genaue Vorgehen dazu ist bereits in Kapitel 4.1.1 erläutert.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass der netzrückwirkungsarme SR im eingeschalteten Betrieb einen Leistungsbedarf von mehreren kVA besitzt. Zudem wird die Netzimpedanz geringfügig erhöht und es können je nach Ansteuerungszustand Oberschwingungen emittiert werden. Daher empfiehlt es sich, den SR nur einzuschalten, wenn seine spannungsregelnde Wirkung benötigt wird. Dies kann durch die Anwendung von Ein- und Ausschaltsschwellen realisiert werden.

Die Schaltschwellen werden über die Eingangsspannung U_A definiert und müssen eine Schalthysterese beinhalten, um aufgrund von Schwankungen um den Schwellwert unerwünschte Schaltwiederholungen zu vermeiden. Für den spannungsabsenkenden Betrieb liegen die Schwellen über dem Sollwert. Dabei muss die Einschaltsschwelle größer sein als die Ausschaltsschwelle. Kommt es zu einem Übertreten der Einschaltsschwelle durch U_A , wird der SR zunächst über die Einschalt routine in den spannungsabsenkenden Betrieb zugeschaltet. Nach erfolgreichem Zuschalten wird über die Regelung die Ausgangsspannung auf den Sollwert herunter geregelt. Verringert sich die auszuregelnde Spannungsabweichung, so dass U_A die Ausschaltsschwelle unterschreitet, wird der SR über die Ausschalt routine wieder abgeschaltet. Umgekehrt verhält es sich für den spannungsanhebenden Betrieb. Dort liegen die Schwellen unterhalb des Sollwerts und die Einschaltsschwelle ist kleiner als die Ausschaltsschwelle. Entsprechend ändert sich der Vorgang beim Zu- und Abschalten.

Für die Anwendung der Ein- und Ausschaltsschwellen wird U_A entweder durch eine zusätzliche Messung ermittelt oder über die bestehende Messung von U_B und den Ansteuerungszustand des SR abgeschätzt. Für die Abschätzung wird auf die Kennlinie des Verstärkungsfaktors $K_{SR}(I_{DC,Dr})$ zurückgegriffen, welche bereits in der Regelung zum Einsatz kommt (vgl. Formel 5.12). Der Schätzwert der Eingangsspannung $U_{A,est}$ berechnet sich demnach entsprechend Formel 5.15:

$$U_{A,est} = U_B - K_{SR}(I_{DC,Dr}) - 230 \text{ V} \quad (5.15)$$

Des Weiteren wird eine Ein- und Ausschaltverzögerung im Sekundenbereich implementiert. Die Verzögerung ermöglicht, dass kurzzeitige Spannungseinbrüche oder Spannungsüberhöhungen keine unnötigen Ein- und Ausschaltvorgänge verursachen.

5.2.2 Dynamische Sollwertvorgabe

Wird dem SR ein fester Sollwert vorgegeben, wird die Spannung des unterlagerten Netzausläufers von der des vorgeschalteten Netzes entkoppelt. Hingegen wird durch eine dynamische Sollwertvorgabe der Bereich der erlaubten Spannungsänderung insgesamt vergrößert; unter idealen Bedingungen kann damit das Spannungsband für den Netzausläufer auf bis zu $\pm 20\%$ der Nennspannung erweitert werden. Dazu kann eine dynamische Sollwertvorgabe, wie bereits im Grundlagenkapitel 2.2.3 erläutert, über verschiedene Konzepte erfolgen. Beispielweise kann der Sollwert durch übergeordnete Regelstrategien vorgegeben werden oder auf Basis von lokalen Zusatzmessungen angepasst werden.

In diesem Zusammenhang wird allgemein für die Regelung eines SR eine stromabhängige Sollwertvorgabe entwickelt. Dazu ist eine zusätzliche Messung des Leitungsstroms am Ausgang des SR nötig. Die Strommessung ermöglicht einen Rückschluss auf die Last- und Einspeisesituation im unterlagerten Netzausläufer und in Abhängigkeit von der Netzimpedanz eine Abschätzung der Spannung am Ende des Ausläufers.

Die Spannung am Ende des Ausläufers U_{End} berechnet sich über die Ausgangsspannung am SR U_{B} und den Spannungsabfall über die Leitung U_{L} nach Formel 5.16.

$$U_{\text{End}} = U_{\text{B}} - U_{\text{L}} \quad (5.16)$$

U_{L} ergibt sich aus dem Leitungsstrom und der Leitungsimpedanz Z_{L} . Dabei berechnet sich Z_{L} über den Leitungsbelag Z'_{L} und die Leitungslänge l . Sind mehrere Lasten und Einspeisungen entlang des unterlagerten Stranges angeschlossen, können auf den einzelnen Leitungen unterschiedliche Ströme fließen. In Anlehnung an Abbildung 5.9 berechnet sich U_{L} dann aus der Summe der Einzelwirkungen, die sich aus den einzelnen Strombezügen bzw. Stromeinspeisungen und den jeweiligen Leitungsimpedanzen ergeben. Die Berechnung dazu ist in Formel 5.17 dargestellt.

$$\begin{aligned} U_{\text{L}} &= k_1 \cdot I_{\text{B}} \cdot l_1 \cdot Z'_{\text{L}} + k_2 \cdot I_{\text{B}} \cdot l_2 \cdot Z'_{\text{L}} + \dots + k_n \cdot I_{\text{B}} \cdot l_n \cdot Z'_{\text{L}} \\ &= I_{\text{B}} \cdot Z'_{\text{L}} \cdot \sum_{i=0}^n k_i \cdot l_i \end{aligned} \quad (5.17)$$

Darin liefert k_i den Anteil der Stromentnahme bzw. -einspeisung vom Gesamtstrom I_B am jeweiligen Anschlusspunkt.

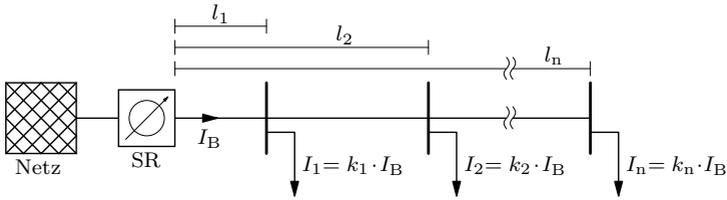


Abbildung 5.9 Unterlagertes Netzausläufer mit mehreren Lasten und/oder Einspeisungen

Last- und Einspeisesituation weisen in der Regel Schwankungen auf. Existieren mehrere Anschlüsse im unterlagerten Netzausläufer, kann die Aufteilung von I_B daher nur geschätzt werden. Liegt der Strombezug bzw. die Stromeinspeisung vornehmlich am Ende des unterlagerten Netzausläufers, wird U_L über Formel 5.18 abgeschätzt. Wird hingegen eine homogene Last- bzw. Einspeiseverteilung erwartet, ergibt sich, wie in [14] hergeleitet, U_L über Formel 5.18. Dabei entspricht l_{ges} der Leitungslänge vom SR bis zum Leitungsende. Wird eine inhomogene Verteilung angenommen, muss diese in Formel 5.17 hinterlegt werden, um U_L zu bestimmen. Um die Vorhersagegenauigkeit bei unterschiedlichen Verteilungen zu verbessern, kann zusätzlich eine Differenzierung zwischen Last- und Einspeisesituation hinterlegt werden.

$$\text{Last bzw. Einspeisung am Leitungsende: } U_L = I_B \cdot Z'_L \cdot l_{\text{ges}} \quad (5.18)$$

$$\text{Homogene Last- bzw. Einspeiseverteilung: } U_L = 0,5 \cdot I_B \cdot Z'_L \cdot l_{\text{ges}} \quad (5.19)$$

Die Sollwertvorgabe für die Ausgangsspannung \tilde{U}_B berechnet sich schlussendlich über U_L und die gewünschte Spannung für das Leitungsende \tilde{U}_{End} nach der folgenden Formel 5.20.

$$\tilde{U}_B = \tilde{U}_{\text{End}} + U_L \quad (5.20)$$

5.2.3 Phasenunabhängige und phasengleiche Spannungsregelung

Bei der phasenunabhängigen Spannungsregelung wird für jede Phase ein separater Regelkreis aufgebaut. Damit können über den SR die Spannungseffektivwerte der drei Phasen unabhängig voneinander geregelt werden. Wie in [A7] und [P3] gezeigt wird, können dadurch Spannungsunsymmetrien im Netz ausgeglichen werden.

Variante 2 und 3 des netzrückwirkungsarmen SR besitzen allerdings aufbaubedingt eine Phasenkopplung. Werden diese Varianten unterschiedlich angesteuert, können zwar die Spannungseffektivwerte der drei Phasen unterschiedlich angehoben oder abgesenkt werden, gleichermaßen kommt es dabei jedoch zu einer Verschiebung der Spannungswinkel zueinander. Labormessungen im unsymmetrischen Netzbetrieb zeigen, dass die Varianten die Spannungseffektivwerte zwar auf einen einheitlichen Wert regeln können, durch die resultierende Verschiebung der Spannungswinkel jedoch der Unsymmetriefaktor k_u in etwa gleichbleibt.

Daher empfiehlt es sich insbesondere für diese beiden Varianten eine phasengleiche Spannungsregelung zu implementieren. Die Struktur dieser Regelung hat den Vorteil, dass Regler und Stellglieder nur einmal ausgeführt werden müssen, wodurch Rechenaufwand und Komponenten eingespart werden. Für die Regelgröße ist, entsprechend der Empfehlung aus [15], der Mittelwert der drei Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen am Ausgang des SR oder alternativ die Mitsystemspannung heranzuziehen. Demnach müssen weiterhin drei Spannungsmessungen im SR vorgesehen werden.

Eine phasengleiche Spannungsregelung erweist sich auch für Variante 1 als sinnvoll, wenn im installierten Netzausläufer keine Spannungsunsymmetrien zu erwarten sind.

5.2.4 Festlegung der Regelparameter

Im Folgenden werden für den netzrückwirkungsarmen SR Empfehlungen für die Festlegung der Regelparameter erstellt, die in Tabelle 5.1 aufgeführt werden. Die Empfehlungen gelten jedoch nicht nur für den entwickelten netzrückwirkungsarmen SR, sondern können allgemein auf einen SR mit kontinuierlicher Spannungsregelung übertragen werden.

Über die Ein- und Ausschaltsschwellen wird koordiniert, dass sich der SR nur im eingeschalteten Betrieb befindet, wenn der unterlagerte Netzabschnitt eine Spannungsregelung benötigt. Dadurch wird verhindert, dass der SR unnötig im Betrieb ist. Die Wahl der Schwellwerte wird durch die Netzimpedanz sowie die erwarteten Last- und Einspeisesituationen bedingt. Die untere Einschaltsschwelle wird bestimmt, indem die maximale Spannungsänderung, die durch den unterlagerten Netzabschnitt im Starklastfall erzeugt wird, auf die untere 10%-Spannungsbandgrenze aufaddiert wird. Umgekehrt wird die obere Einschaltsschwelle ermittelt, indem die maximale Spannungsänderung, die durch den unterlagerten Netzabschnitt bei größtmöglicher Rückspeisung erzeugt wird, von der oberen 10%-Spannungsbandgrenze abgezogen

wird. Die maximalen Spannungsänderungen werden dabei über den jeweiligen Spannungsabfall an der Leitung des unterlagerten Netzabschnitts definiert ($U_{L,Last\ max}$, $U_{L,Speisung\ max}$). Zudem wird noch ein Sicherheitsabstand von 2 V empfohlen, um beispielsweise Messungenauigkeiten am SR auszugleichen. Für die Ausschaltsschwellen muss eine Schalthysterese berücksichtigt werden. Diese hängt von den Spannungsschwankungen im Netz ab. Grundsätzlich wird eine Schalthysterese von mindestens 2 V empfohlen, um Schaltwiederholungen zu vermeiden.

Durch die Ein- und Ausschaltverzögerung wird verhindert, dass kurzzeitige Spannungssprünge unnötige Ein- und Ausschaltvorgänge verursachen. In diesem Zusammenhang sollte die Schaltverzögerung bei mindestens 1 s liegen. Existieren noch weitere spannungsregelnde Maßnahmen im Netz, kann über die Schaltverzögerung koordiniert werden, ob beispielsweise zunächst auf den Regeleingriff einer anderen Maßnahme gewartet werden soll. Insgesamt sollte die Einschaltverzögerung jedoch nicht über 50 s liegen, da eine maximale Ausregelzeit von 60 s vorgegeben wird (vgl. Kapitel 5.1.2) und die bestehende Regelung eine Ausregelungszeit von bis zu 10 s benötigt. Wird die Ausregelungszeit verändert, muss dies auch bei der Schaltverzögerung berücksichtigt werden.

	Spannungsanhebender Betrieb	Spannungsabsenkender Betrieb
Einschaltsschwelle \tilde{U}_{ein}	$\geq 219\text{ V} + U_{L,Last\ max}$	$\leq 251\text{ V} - U_{L,LSpeisung\ max}$
Schalthysterese \tilde{U}_{hyst}	$\geq 2\text{ V}$	$\geq 2\text{ V}$
Ausschaltsschwelle \tilde{U}_{aus}	$\tilde{U}_{ein} + \tilde{U}_{hyst}$	$\tilde{U}_{ein} - \tilde{U}_{hyst}$
Ein- und Ausschaltverzögerung t_{tot}	1 s – 50 s	1 s – 50 s
Ausregelzeit t_{3T}	10 s – 59 s	10 s – 59 s
Feste Sollwertvorgabe $\tilde{U}_{B, fest}$	230 V	230 V
Dynamische Sollwertvorgabe $\tilde{U}_{B, dyn}$	230 V – 251 V	219 V – 230 V
Phasenunabhängige Spannungsregelung	Nur für SR mit phasenunabhängigen Aufbau geeignet	
Phasengleiche Spannungsregelung	Für SR mit Phasenkopplung und für SR mit phasenunabhängigem Aufbau geeignet	

Tabelle 5.1: Empfehlungen für die Festlegung der Regelparameter

Die entworfene Regelung für den SR liefert die minimale Ausregelungszeit des SR. Wie bereits im vorherigen Absatz aufgegriffen, benötigt die Ausregelung entsprechend der Validierung aus Abschnitt 5.1.3 bis zu 10 s. Durch eine Anpassung der Regelparameter kann die Ausregelzeit vergrößert werden. In Bezug zur Schaltverzögerung, die bei mindestens 1 s liegt, wird die maximale Ausregelungszeit auf 59 s begrenzt.

Für die feste Sollwertvorgabe kann grundsätzlich eine Spannung von 230 V vorgegeben werden. Durch diese Vorgabe kommt es zu einer Entkopplung von der Spannung im übergeordneten Netz, weswegen dem unterlagerten Netzabschnitt das volle Spannungsband von $\pm 10\%$ der Nennspannung zur Verfügung steht. Eine vollständige Entkopplung erfolgt dabei jedoch nur innerhalb des Spannungsregelbereichs des SR. Kommt es bereits im übergeordneten Netz zu Spannungsänderungen, die den Regelbereich des SR überschreiten, reduziert sich für den unterlagerten Netzabschnitt das Spannungsband entsprechend.

Kann es zu Spannungsänderungen kommen, die innerhalb des unterlagerten Netzabschnittes größer als 10 % der Nennspannung ausfallen, kann dies durch eine verschobene Sollwertvorgabe berücksichtigt werden. Für die feste Sollwertvorgabe muss dabei jedoch garantiert werden, dass starke Spannungsänderungen nur in eine Richtung auftreten; es also beispielsweise nur zu starken Spannungsanhebungen kommt und starke Spannungsabsenkungen grundsätzlich ausgeschlossen werden können. Kann dies nicht garantiert werden, sollte eine dynamische Spannungsregelung zum Einsatz kommen, die in Abhängigkeit von der Last- und Einspeisesituation den Sollwert vorgibt. Kommt es sowohl zu einem Verbrauch als auch zu einer Einspeisung im unterlagerten Netzabschnitt, sollte die Sollwertvorgabe jedoch ausreichend Abstand zum $\pm 10\%$ -Spannungsband besitzen, um die Einhaltung des Spannungsbandes an jedem Anschlusspunkt zu garantieren. Grundsätzlich wird ein Sicherheitsabstand von mindestens 2 V zur oberen und unteren Spannungsbandgrenze empfohlen, um beispielsweise Messungenauigkeiten im SR auszugleichen. Die Spannungsregelung auf ein erweitertes Spannungsband kann jedoch selbstredend erneut nur innerhalb des Spannungsregelbereichs des SR erfolgen.

Besitzt der Aufbau des SR eine Phasenkopplung, sollte eine phasengleiche Spannungsregelung implementiert werden, die den Mittelwert der drei Außenleiter-Neutralleiter-Spannungen oder alternativ die Mitsystemspannung auf den entsprechenden Sollwert regelt. Dabei gilt es bei einer dynamischen Spannungsregelung die Sollwertvorgabe entsprechend zu begrenzen, so dass es in den einzelnen Phasen zu keinen Spannungsbandverletzungen kommt. Liegen starke Spannungsunsymmetrien im Netzabschnitt vor, wird für die phasengleiche Spannungsregelung von dem

Einsatz einer dynamischen Sollwertvorgabe abgeraten. Ist der Aufbau des SR phasenunabhängig, kann bei Bedarf auf eine phasenunabhängige Spannungsregelung zurückgegriffen werden, die in der Lage ist Spannungsunsymmetrien im Netz auszugleichen [A7], [P3].

5.3 Zusammenfassung

Die entworfene Regelung ermöglicht es, das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke zu kompensieren. Dabei werden insbesondere für das Kleinsignalverhalten gute Ergebnisse erzielt. Durch das annähernd lineare Regelverhalten wird eine kontinuierliche Spannungsregelung ohne sprunghafte Änderungen im Spannungssignal bei einer ausreichend schnellen Ausregelzeit realisiert. Eine Vergrößerung der Ausregelzeit kann bei Bedarf durch eine Anpassung der Zeitkonstante erfolgen. Durch die Anwendung eines übergeordneten Steuerungskonzeptes, das auf Ein- und Ausschaltsschwellen sowie Schaltverzögerungen zurückgreift, kann koordiniert werden, dass sich der SR nur bei einem Spannungsregelungsbedarf im eingeschalteten Betrieb befindet. Geeignete Konzepte zur Sollwertvorgabe ermöglichen neben einer Entkopplung des Spannungsbandes eine Erweiterung des Spannungsbandes für den unterlagerten Netzabschnitt. Zusätzlich können Spannungsunsymmetrien durch eine phasenunabhängige Spannungsregelung ausgeregelt werden. Herrscht jedoch aufbaubedingt eine Phasenkopplung im SR, wird der Einsatz der phasengleichen Spannungsregelung empfohlen. Über die Empfehlungen für die Regelparameter werden zudem Entscheidungshilfen für die Parameterfestlegung geliefert, die allgemein für einen SR mit stufenloser Spannungsregelung gelten.

6 Erprobung des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers

6.1 Erprobung im Labor

6.1.1 Aufbau und Konfiguration

Die Erprobung im Labor fokussiert die Auswirkung des netzrückwirkungsarmen SR auf die Spannungsqualität im regulären Netzbetrieb. Dazu wird eine exemplarische Netztopologie und Belastungssituation herangezogen, die starke Spannungsänderungen in der Versorgungsspannung hervorruft. Für diese Netzzustände soll der Einsatz des netzrückwirkungsarmen SR betrachtet und dessen Auswirkung auf die Spannungsqualität analysiert werden. Neben einer Messung ohne SR, die als Referenzmessung dient, soll zudem beispielhaft eine Gegenüberstellung mit einem gestuften SR erfolgen. In diesem Zusammenhang werden im Folgenden die eingesetzten SR-Prototypen, die verwendete Topologie des Labornetzes und die vorgegebenen Spannungs- und Belastungssituationen beschrieben.

Spannungslängsregler-Prototypen

Für die Erprobung wird auf die in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Variante 1 des netzrückwirkungsarmen SR zurückgegriffen. Diese besitzt im Vergleich zu den anderen beiden Varianten die höchste Oberschwingungsemission. Ansonsten besitzen die drei Varianten im symmetrischen Betrieb ein ähnliches Verhalten, weswegen die resultierenden Ergebnisse bis auf die Oberschwingungsemission auf alle Varianten übertragbar sind. Der Variante 1 ist die in Kapitel 5 entworfene Regelung hinterlegt. Für den Sollwert der Ausgangsspannung werden 230 V fest vorgegeben.

Für den exemplarischen Vergleich mit einem gestuften SR wird ein SR eingesetzt, der sich lediglich aus einem Längstransformator zusammensetzt und demnach einer einstufigen Transformator-kaskade entspricht (vgl.: Kapitel 2.2.2). Durch das Zuschalten des Längstransformators wird die Ausgangsspannung des SR in einer Stufe um etwa 10 V gesenkt oder angehoben. Ob es zur Absenkung oder Anhebung kommt, hängt von der Polung der Sekundärwicklung des Längstransformators ab. Der gestufte SR schaltet ab einer Ausgangsspannung von über 236 V ein und von unter 225 V wieder ab. Die Ein- und Ausschaltverzögerung beträgt dabei 10 s.

Laboraufbau

Für die Erprobung und den Vergleich des netzrückwirkungsarmen SR wird ein Testnetz entsprechend der Abbildung 6.1 im Labor errichtet. Der dreiphasige Netzanschluss des jeweiligen SR-Prototyps wird dabei über einen 630-kVA-Transformator und eine 300 m lange Kabelstrecke realisiert. Der Transformator ist mit einem Laststufenschalter versehen, der unterspannungsseitig über 8 Schaltstufen die Spannung um insgesamt $\pm 10\%$ der Nennspannung variieren kann. Die Leitungen im Kabel sind aus Aluminium gefertigt und weisen einen Querschnitt von 25 mm^2 auf. Ein solcher Leitungsquerschnitt wird typischerweise für nur sehr schwach belastete Netze in der Niederspannung verwendet. Für den Laboraufbau ist dieser Querschnitt interessant, da bereits kurze Kabelstrecken eine hohe Netzimpedanz und damit eine niedrige Störfestigkeit zur Folge haben. Damit es zu keiner Überbelastung des Kabels kommt, erfolgt eine Absicherung auf 100 A durch zusätzliche Schmelzsicherungen, die in der Abbildung jedoch nicht gesondert aufgeführt werden. Ausgangsseitig ist der SR-Prototyp an eine 100-kVA-Leistungsverstärkergruppe angeschlossen. Die Leistungsverstärker können eine Leistung aufnehmen oder abgeben und dadurch sowohl Last- als auch Einspeisesituationen nachbilden. Das Netz ist wie bei den vorherigen Laboraufbauten als 4-Leitersystem mit TN-C Topologie aufgebaut.

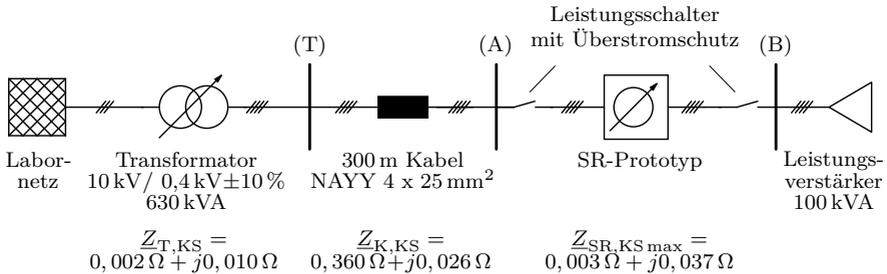


Abbildung 6.1 Testnetzes zur Erprobung der Strangspannungsregler

Abbildung 6.1 gibt zudem Angaben zu den Kurzschlussimpedanzen der einzelnen Komponenten, die in Summe die Netzimpedanz des Testnetzes darstellen. Die Kurzschlussimpedanzen des Transformators $Z_{T,KS}$ und der Kabelstrecke $Z_{K,KS}$ sind aus dem Datenblatt der jeweiligen Komponente entnommen. Die maximale Kurzschlussimpedanz des SR $Z_{SR,KS \max}$ wird durch die Variante 1 des netzrückwirkungsarmen SR festgelegt und wird in Kapitel 4.3.1 bestimmt. Da der gestufte SR einen kleiner dimensionierten Längstransformator besitzt, fällt dort die Längsimpedanz etwas ge-

ringer aus; sie liegt prinzipiell aber mit etwa $0,03\ \Omega$ in derselben Größenordnung. Die Angaben verdeutlichen, dass der Einsatz des SR insbesondere den induktiven Anteil der Netzimpedanz steigert. Die wirksame Netzimpedanz wird jedoch weiterhin maßgeblich durch den ohmschen Anteil der Kabelstrecke vorgegeben, der durch den SR kaum beeinflusst wird. Insgesamt steigt die Netzimpedanz des Testnetzes von $0,364\ \Omega$ auf maximal $0,372\ \Omega$. Für die Kurzschlussleistung bedeutet dies eine maximale Abnahme von 2%.

Vorgabe der Spannungs- und Belastungssituation

Die Laborerprobung und der Vergleich erfolgen an einer exemplarischen Einspeisesituation. Dazu generieren die Leistungsverstärker eine fluktuierende Wirkleistungseinspeisung. Der Verlauf der Wirkleistungseinspeisung soll das Potential und die Grenzen der Regelung des netzrückwirkungsarmen SR veranschaulichen und beinhaltet daher sowohl Sprünge mit unterschiedlichen Höhen als auch verschiedene Steigungen mit positiven und negativen Gradienten (vgl. Abbildung 6.2). Die Einspeisung erfolgt phasensymmetrisch. Die drei Strangspannungen werden am Transformator symmetrisch auf etwa 230 V eingestellt. Während der Erprobung erfolgen keine Transformatorstufungen.

Durch den aus der Wirkleistungseinspeisung resultierenden Leitungsstrom wird ein Spannungsabfall an der Netzimpedanz des Testnetzes verursacht. Da das externe Netz die Spannung an Knoten (T) nahezu konstant hält, wird die maximale Spannungsänderung an Knoten (B) hervorgerufen.

Über drei Netzanalysegeräte werden an den Netzknoten (T), (A) und (B) kontinuierliche Effektivwertmessungen für die Leitungsströme, den Neutralleiterstrom und die Strangspannungen realisiert, um die Auswirkungen des netzrückwirkungsarmen SR auf die Spannungsqualität zu analysieren.

6.1.2 Auswirkung auf den Netzausläufer im Labor

Verlauf der Versorgungsspannung

Die Konfiguration des Labornetzes realisiert einen symmetrischen Netzbetrieb, wodurch sich der Untersuchungsbereich auf eine einphasige Systembetrachtung reduzieren lässt. Abbildung 6.2 zeigt dahingehend den Verlauf der einphasigen Wirkleistungseinspeisung und die resultierenden Verläufe der Spannungseffektivwerte an

Knoten (B) für die verschiedenen SR-Prototypen sowie den Referenzfall ohne SR. Der Messzeitraum beträgt 10 min und besitzt eine Auflösung von 2 s.

Für den Referenzfall ohne SR ist zu erkennen, dass die Wirkleistungseinspeisung eine Spannungsanhebung an Knoten (B) bewirkt. Dabei folgt die Spannung dem Verlauf der Wirkleistungseinspeisung.

Durch den Einsatz eines SR sollen Schwankungen im 10-Minuten-Mittelwert der Versorgungsspannung kompensiert werden. Daher müssen über einen SR nicht die dynamischen Spannungsschwankungen ausgegletet werden, sondern es muss lediglich die Spannung im Mittel reguliert werden.

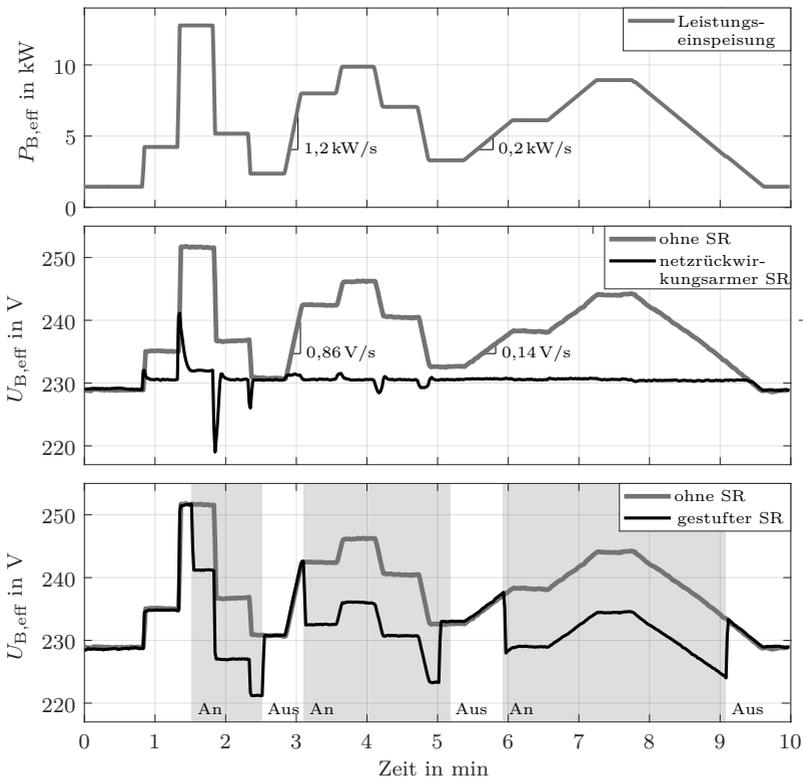


Abbildung 6.2 Einphasige Wirkleistungseinspeisung $P_{B,eff}$ und die resultierenden Spannungseffektivwerte $U_{B,eff}$ an Knoten (B) für die verschiedenen Aufbauten

Um die Spannungsänderungen an Knoten (B) zu kompensieren regelt der netzrückwirkungsarme SR die Spannung stufenlos auf einen Sollwert von 230 V. Dabei werden Verzögerungen durch einen Ein- und Ausschaltvorgang sowie Schaltschwellen in der Laborerprobung nicht berücksichtigt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass schnelle Spannungsschwankungen zunächst zu Regelabweichungen führen, die durch die Regelung erst nach und nach kompensiert werden. Ab einer Steigung von 0,14 V/s werden die Änderungen durch die Regelung jedoch direkt ohne nennenswerte Regelabweichung ausgeglichen. Ferner kommt es zwischen Minute 1 und 2 zu einer Überschreitung des Regelbereichs, die der netzrückwirkungsarme SR jedoch weiterhin durch eine maximale Spannungsabsenkung kompensiert, auch wenn eine Regelabweichung verbleibt. Insgesamt wird das dynamische Verhalten der Spannung durch die stufenlose Regelung geglättet.

Entsprechend seiner Parametrierung schaltet der gestufte SR mit einer Schaltverzögerung von 10 s bei einem Überschreiten von 236 V ein und bei einem Unterschreiten von 225 V wieder ab. Dazu ist in der Abbildung der Ein- und Ausschaltzustand des SR markiert. Es wird sichtbar, dass durch die stufenförmige Spannungsregelung die Spannung im Mittel gesenkt wird, jedoch im Gegensatz zur stufenlosen Spannungsregelung zusätzliche Spannungssprünge in das Netz emittiert werden.

Auswirkung auf die Spannungsqualität

Um den Einfluss auf die Spannungsqualität zu bewerten, werden für die Spannungsverläufe der drei verschiedenen Aufbauten der 10-Minuten-Mittelwert, der maximale Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U und die Kurzzeitflickerstärke P_{st} für Knoten (T) und (B) ermittelt und in Tabelle 6.1 gelistet. Andere Merkmale der Spannungsqualität bleiben bei der Laborerprobung durch die SR-Prototypen unbeeinflusst und stehen daher nicht im Fokus.

Die betrachteten Merkmale der Spannungsqualität an Knoten (T) sind für alle Fälle gleich und zeigen zudem ein nahezu konstantes Verhalten innerhalb des Messzeitraums. Dies verdeutlicht, dass die SRs über ihren Strombezug keine messbaren Auswirkungen auf die Spannungsqualität des übergeordneten Netzes besitzen und sich ihr Einfluss vornehmlich auf den unterlagerten Netzbereich erstreckt.

Die fluktuierende Wirkleistungseinspeisung bewirkt im Referenzfall ohne SR an Knoten (B) eine Anhebung des 10-Minuten-Mittelwerts der Spannung um etwa 9 V im Vergleich zu Knoten (T). Zudem kommt es zu einem deutlichen Anstieg des Kurzzeitflickers auf 0,9. Der THD_U verschlechtert sich hingegen kaum.

Durch den Einsatz des netzrückwirkungsarmen SR wird die Spannung am Knoten (B) im Mittel um 8 V gesenkt und damit ansatzweise auf die Ausgangsspannung an Knoten (T) zurückgeführt. Durch die Maßnahmen zur Oberschwingungsreduktion steigt der THD_U dabei nur geringfügig auf maximal 2,6 %. In Bezug zum Grenzwert von 8 % bewirkt dieser Anstieg jedoch keine nennenswerte Verschlechterung der Spannungsqualität. Der Kurzzeitflicker bleibt unverändert, was bestätigt, dass durch die Spannungsregelung des netzrückwirkungsarmen SR keine schnellen Spannungsänderungen in das Netz einprägt werden.

Der gestufte SR weist aufgrund des reduzierten Regelbereichs und der Schaltverzögerung eine geringere Spannungsabsenkung auf. Die mittlere Spannung an Knoten (B) liegt um knapp 3 V höher als beim netzrückwirkungsarmen SR. Prinzipiell wird die statische Spannungshaltung im Rahmen des Regelbereichs jedoch erfolgreich umgesetzt. Der THD_U bleibt dabei unverändert. Dem gegenüber steigt der Kurzzeitflicker jedoch stark an auf 1,6. Damit bewirkt der gestufte SR zwar eine gute Spannungsausregelung des 10-Minuten-Mittelwerts, er führt aber gleichzeitig zu einer starken Emission von Flicker.

Ferner bewirken beide SRs durch die Anhebung der Netzimpedanz keine messbare Verschlechterung der Störfestigkeit des Testnetzes. Dies lässt sich aus dem unveränderten Kurzzeitflicker an Knoten (B) bei der Anwendung des netzrückwirkungsarmen SR bzw. dem unveränderten THD_U beim Einsatz des gestuften SR ableiten.

Zusammenfassend stellt damit ein gestufter SR eine einfache Lösung zur statischen Spannungshaltung in der Niederspannung dar, verursacht dabei jedoch Spannungsschwankungen und zusätzlichen Flicker. Der netzrückwirkungsarme SR ermöglicht hingegen eine statische Spannungshaltung ohne die anderen Merkmale der Spannungsqualität nennenswert zu verschlechtern.

	Alle Fälle an (T)	Referenzfall ohne SR an (B)	Netzzrückwirkungs- armer SR an (B)	Gestufte SR an (B)
Spannungsmittelwert	229,5 V	238,9 V	230,5 V	233,2 V
Maximaler THD_U	2,0 %	2,1 %	2,6 %	2,1 %
Kurzzeitflicker P_{st}	0,1	0,9	0,9	1,6

Tabelle 6.1: Spannungsqualität im Testnetz für die verschiedenen Aufbauten

6.2 Feldtest

6.2.1 Standortanalyse

Netzausläufer

Der für die Felderprobung ausgewählte NS-Netzausläufer befindet sich in einem ländlichen Gebiet und ist durch eine hohe Durchdringung von PV-Anlagen gekennzeichnet. Abbildung 6.3 zeigt einen Übersichtsplan für den Netzausläufer und gibt Angaben zur Topologie, zum Kabeltyp und zur Kabellänge sowie zur maximalen Erzeugungsleistung P_{peak} der verschiedenen PV-Anlagen. Zum aktuellen Zeitpunkt liegt die kumulierte maximale Erzeugungsleistung der PV-Anlagen bei 131,3 kW. Darüber hinaus ist ein Zubau von 30 kW am Ende des Netzausläufers geplant, wodurch eine kumulierte maximale Erzeugungsleistung von 161,3 kW entstehen würde. Das vorgelagerte Netz ist ein vermaschtes NS-Netz, das über fünf verschiedene Ortsnetzstationen mit der 10 kV-Ebene verbunden werden kann und vornehmlich Wohnhäuser versorgt.

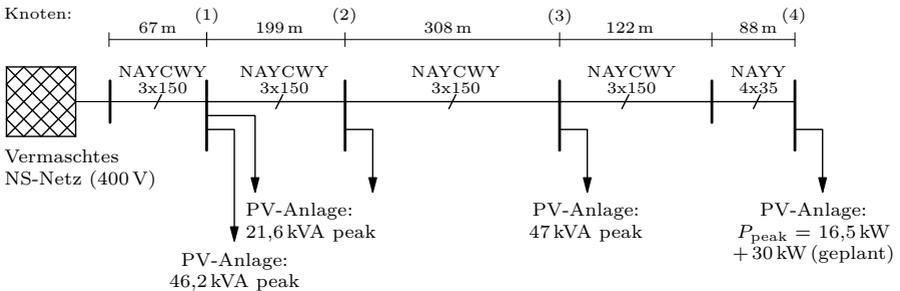


Abbildung 6.3 Übersichtsplan des für den Feldtest ausgewählten Netzausläufers

Der Netzausläufer ist als TN-C-Netz aufgebaut, wobei der PEN-Leiter größtenteils als gesondertes Kupferkabel verlegt ist. Die Leitungsimpedanz des Netzausläufers lässt sich nach Datenblatt [29] zu $Z = 0,219 \Omega + j0,063 \Omega$ berechnen.

Analyse des Netzausbaubedarfs

Anhand der Angaben zum Netzausläufer werden die Strom- und Spannungsverläufe entlang der Leitung für den Fall betrachtet, dass die PV-Anlagen ihre maximale Erzeugungsleistung einspeisen, es gleichzeitig aber zu keiner Leistungsentnahme durch

die angeschlossenen Verbraucher kommt (Worst-Case-Betrachtung). Die Spannung am Anfang des Netzausläufers wird dabei mit 230 V angenommen. Abbildung 6.4 stellt die Strom- und Spannungsverläufe für die Ausgangslage sowie für zwei Maßnahmen zur Spannungshaltung dar. Laut Netzbetreiber besteht für den Starklastfall keine Gefahr von Grenzwertverstößen, weswegen dieser Fall für die Analyse des Netzausbaubedarfs nicht betrachtet wird.

Abbildung 6.4a) stellt die Stromverläufe für eine kumulierte Erzeugungsleistung von 131,3 kW und 161,3 kW dar. Zusätzlich sind darin die Belastungsgrenzen der Kabeltypen markiert. Daraus wird ersichtlich, dass eine maximale Rückspeisung zu keiner Betriebsmittelüberlastung führt.

In Abbildung 6.4b) sind zu den Spannungsverläufen auch die Spannungsgrenzen von 3 % und 10 % mit eingetragen. Die Einhaltung der 10 % Spannungsgrenze wird von der EN 50160 [11] für den Netzbetrieb festgelegt. Jedoch muss sich das dort geforderte nutzbare Spannungsband von $\pm 10\%$ der Nennversorgungsspannung für den Starklast- und Rückspeisefall auf das gesamte Verteilnetz aufteilen, weswegen die VDE-AR 4105 [13] die erlaubte Spannungsanhebung durch Rückspeisung auf 3 % der Nennversorgungsspannung begrenzt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die 3 %-Grenze bei beiden Leistungsfällen an mehreren Knoten verletzt wird.

Die PV-Anlagen können sich durch eine Blindleistungsaufnahme entsprechend den Verfahren aus VDE-AR-N 4105 [13] an der Spannungshaltung beteiligen. Daher wird im Folgenden betrachtet, ob weiterhin Spannungsprobleme auftreten, wenn alle PV-Anlagen mit einem Verschiebungsfaktor PF von 0,9 im untererregten Betrieb einspeisen. Der Vorteil dieser Maßnahme besteht darin, dass keine Baumaßnahmen am Netzausläufer durchgeführt werden müssen. Inwieweit die PV-Anlagen im Netzausläufer bereits entsprechend konfiguriert sind, ist jedoch nicht bekannt. Aus Abbildung 6.4c) wird allerdings ersichtlich, dass auch bei einer Beteiligung der PV-Anlagen an der Spannungshaltung die 3 %-Grenze für beide Leistungsfälle nicht eingehalten werden kann.

Folglich besteht ein Netzausbaubedarf, um im Rückspeisefall die Spannung des Netzausläufers innerhalb der erlaubten Grenzen zu halten. Dies gilt bereits für die bestehende Anlagenleistung, insbesondere aber für den geplanten Zubau. Da es insgesamt zu keiner Betriebsmittelüberlastung kommt, können anstelle von konventionellem Netzausbau Komponenten zur Spannungsregelung, wie der SR, zum Einsatz kommen. Der Installation eines RONT ist bei der bestehenden Netztopologie, die eine Speisung durch mehrere Ortsnetzstationen beinhaltet, nicht sinnvoll.

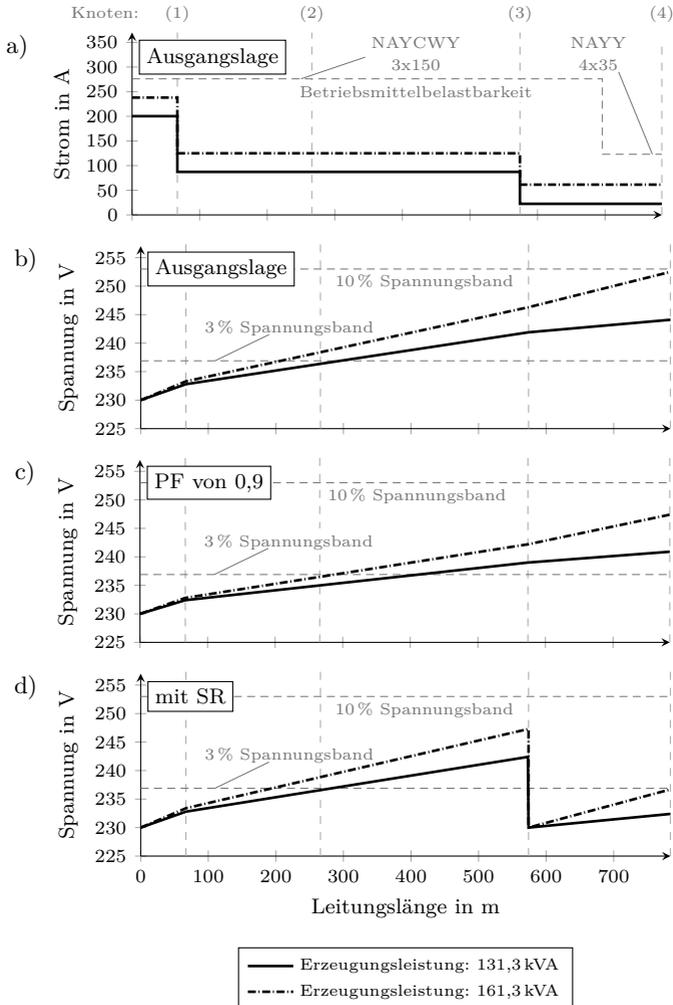


Abbildung 6.4 Strom- und Spannungsverläufe entlang des Netzausläufers

a) Stromverlauf für die Ausgangslage

b) Spannungsverlauf für die Ausgangslage

c) Spannungsverlauf bei einer Blindleistungsaufnahme durch die PV-Anlagen mit einem Verschiebungsfaktor PF von 0,9

d) Spannungsverlauf für den Einsatz des Strangspannungsreglers

Der Vorteil des SR zum konventionellen Netzausbau liegt darin, dass die Baumaßnahmen für die Installation im Netzausläufer deutlich geringer sind und dadurch Kosten eingespart werden können. Der konventionelle Netzausbau würde hier den Austausch bzw. das Verlegen eines parallelen Kabels mit 800 m Länge beinhalten. Unter der Annahme, dass die Installation eines Niederspannungskabels im ländlichen Raum typischerweise Kosten von 80 000 € pro km verursacht [6], werden hier für den konventionellen Netzausbau Kosten von 64 000 € veranschlagt. Die Kosten für den Erwerb und die Installation des netzrückwirkungsarmen SR liegen hingegen bei 24 000 €. Damit stellt der SR die kosteneffizientere Lösung dar.

Im Folgenden wird der Einfluss eines SR für den ausgewählten Standort bei maximaler Rückspeisung betrachtet. Der SR regelt die Spannung direkt im Netzausläufer. Technisch ist dessen Platzierung an einer beliebigen Stelle im Netzstrang möglich. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Betrachtung sollte für den Fall des geplanten Zubaus (Erzeugungsleistung: 161,3 kW) – entsprechend des Spannungsverlaufs in Abbildung 6.4 b) – der SR vor Knoten (2) installiert werden. Beteiligen sich die PV-Anlagen an der Spannungshaltung durch eine Blindleistungsbereitstellung, genügt laut Abbildung 6.4 c) eine Installation vor Knoten (3), um Grenzwertverletzungen zu verhindern. Aufgrund der spezifischen Umgebungsbedingungen, welche die Anschluss- und Aufstellmöglichkeiten im Feld berücksichtigen, erweist sich der Installationsstandort vor Knoten (2) als ungeeignet und der Installationsstandort vor Knoten (3) wird gewählt.

Abbildung 6.4 d) zeigt den Spannungsverlauf für den Einsatz des SR mit einer Sollwertvorgabe von 230 V ohne zusätzliche Blindleistungsaufnahme durch die PV-Anlagen. Der SR entkoppelt den unterlagerten Netzausläufer vom vorgeschalteten Netz, weswegen nun für den unterlagerten Abschnitt die 10%-Spannungsgrenze gilt. Entsprechend der Abbildung werden die Spannungsbandprobleme im hinteren Netzausläufer durch den SR vollständig behoben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für den Netzausläufer Handlungsbedarf besteht, um einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb zu gewährleisten. Da es jedoch zu keiner Betriebsmittelüberlastung kommt, kann der konventionelle Netzausbau durch den Einsatz eines SR kosteneffizient substituiert werden. Zusätzlich wird gezeigt, dass der Einsatz des SR für den gewählten Installationsstandort die Spannungsbandprobleme im Zusammenwirken mit einer Blindleistungsaufnahme durch die PV-Anlagen vollständig beheben kann und sich der Standort folglich als tauglich für die Felderprobung des SR erweist.

Vorabmessung im Feld

Es werden Strom- und Spannungsmessungen am anvisierten Einbaustandort vor Knoten (3) vorgenommen, um die Verbrauchs- und Rückspeisebedingungen sowie die Spannungsqualität des Netzausläufers ohne SR zu analysieren und damit die Eignung des Einbaustandorts zu prüfen. Dazu werden die Strangspannungen der drei Phasen, die drei Leiterströme und der Neutralleiterstrom mittels eines Netzanalysegeräts gemessen. Die Datenaufzeichnung erfolgt kontinuierlich für einen Messzeitraum von 3 Wochen von Ende Januar bis Anfang Februar.

Die Vorabmessung zeigt, dass es durch die hohe Durchdringung von PV-Anlagen zu Rückspeisungen im Netzausläufer kommt und damit einhergehend zu Spannungsanhebungen. Während des Messzeitraums kommt es zu keiner Spannungsbandverletzung, jedoch werden für Tage mit einer stärkeren Sonneneinstrahlung als im Januar und Februar Spannungsbandverletzungen erwartet. Damit bestätigt die Feldmessung die Aussage der vorangegangenen Analyse des Netzausbaubedarfs und zeigt auf, dass sich der Einbaustandort als geeignet erweist, um die Praxistauglichkeit des netzrückwirkungsarmen SR zu testen.

Zudem zeigt die Analyse der Spannungsqualität, dass der bestehende Flickergehalt im Netzausläufer mit einer Langzeitflickerstärke von bis zu 0,5 bereits verhältnismäßig hoch ist und daher durch den Einsatz einer gestuften Spannungsregelung eine Gefährdung der Spannungsqualität nicht auszuschließen ist. Dies bestärkt die sinnvolle Anwendung des netzrückwirkungsarmen SR im ausgewählten Netzausläufer.

6.2.2 Felderprobung

Installation im Netzausläufer

Die Felderprobung des netzrückwirkungsarmen SR erfolgt an der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Variante 3. Die Installation des netzrückwirkungsarmen SR wird vor Knoten (3) im vorab analysierten Netzausläufer realisiert. Dazu wird der SR neben dem vorhandenen Kabelverteilerschrank von Knoten (3) errichtet und vor dem Knoten in den Strang integriert. Zu diesem Zweck wird die Zuleitung vom Kabelverteilerschrank an den Eingang des SR umgelegt und der Ausgang des SR wird mit dem freigewordenen Anschluss des Kabelverteilerschranks verbunden. Die Eingangsseite des SR wird im Folgenden als Knoten (A) und die Ausgangsseite als Knoten (B) definiert. Abbildung 6.5 gibt einen Überblick über den neuen Netzaufbau.

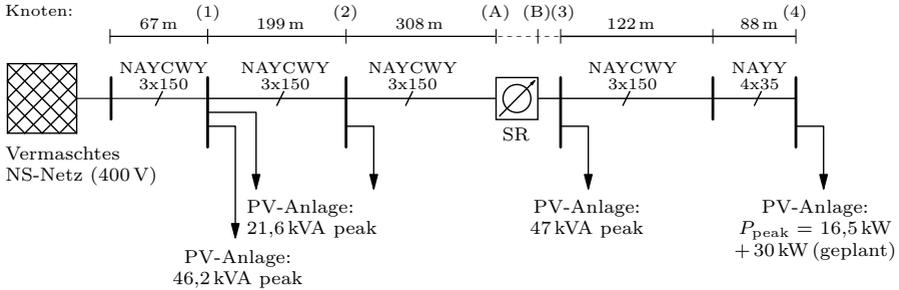


Abbildung 6.5 Übersichtsplan des Netzausläufers mit Strangspannungsregler

Der Einsatz des netzrückwirkungsarmen SR bewirkt entsprechend seiner Kurzschlussimpedanz (vgl. Kapitel 4.3.1) eine Vergrößerung der Netzimpedanz. Die Impedanz des Netzausläufers steigt durch den SR von $0,228 \Omega$ auf maximal $0,251 \Omega$. Damit sinkt die Kurzschlussleistung um maximal 9%.

Der netzrückwirkungsarme SR regelt den Spannungseffektivwert an Knoten (B) aus. Da für den Einsatzort eine Entkopplung von der Spannung des übergeordneten Netzes ausreicht, wird eine feste Sollwertvorgabe mit einer Sollspannung von 230 V parametrisiert. Entsprechend der Analyse des Netzausbaubedarfs, nach der es für den geplanten Zubau im nachgeschalteten Netzabschnitt zu einer maximalen Spannungsanhebung von 9 V kommen kann, und den Empfehlungen zur Festlegung der Regelparameter aus Kapitel 5.2.4 sollte für den spannungsabsenkenden Betrieb eine Einschaltsschwelle von 244 V und eine Ausschaltsschwelle von 242 V gewählt werden. Ein spannungsanhebender Betrieb wird hingegen gar nicht benötigt. Durch eine solche Parametrierung wird ein unnötiger Regeleinsatz des SR vermieden. Da jedoch für den Feldtest ein häufiger Regeleinsatz des SR für die Erprobung der Praxis-tauglichkeit und die Analyse der Netzauswirkungen gewünscht ist, werden die Einschaltsschwellen auf $230 \text{ V} \pm 5 \text{ V}$ und die Ausschaltsschwellen auf $230 \text{ V} \pm 3 \text{ V}$ gelegt. Unter Berücksichtigung des Spannungsprofils bei der Vorabmessung sollte dadurch ein regelmäßiger – wenn auch teilweise unnötiger – Regeleinsatz des SR gewährt werden.

Grundsätzlich empfiehlt sich für die verwendete SR-Variante aufgrund der aufbaubedingten Phasenkopplung der Einsatz einer phasengleichen Spannungsregelung. Bis zum Beginn des Feldtests ist jedoch lediglich die Praxis-tauglichkeit der phasen-unabhängigen Spannungsregelung ausreichend nachgewiesen worden, weswegen diese in der SR-Variante zum Einsatz kommt. Das heißt, dass die Strangspannungen der

drei Außenleiter an Knoten (B) über den netzrückwirkungsarmen SR phasenunabhängig ausgeregelt werden. Gestützt auf Laborbetrachtungen wird erwartet, dass die Spannungseffektivwerte durch die Regelung zwar angeglichen werden, durch eine Verschiebung der Spannungswinkel zueinander der Spannungsunsymmetriefaktor insgesamt jedoch gleichbleibt.

Mithilfe von zwei zeitlich synchronisierten Netzanalysegeräten werden Strom- und Spannungsmessungen an Knoten (A) und (B) durchgeführt. Wie bei der Vorabmessung ohne SR werden die Strangspannungen der drei Phasen, sowie die drei Leiterströme und die Neutralleiterströme gemessen. Die Datenaufzeichnungen erfolgen kontinuierlich für einen Messzeitraum von 3 Wochen im März.

Leistungs- und Spannungsverläufe während eines Tages

Abbildung 6.6 zeigt die Leistungs- und Spannungsverläufe für einen sonnigen Tag im März und verdeutlicht den positiven Einfluss des SR auf den Spannungsverlauf an Knoten (B). Die dargestellten Daten entsprechen den 2-Minuten-Mittelwerten der Effektivwerte. Dabei sind die Leistungen im Erzeugerzählpeilsystem angegeben.

Anhand der Wirkleistung an Knoten (A), $P_{A,\text{eff}}$, ist zu erkennen, dass es zwischen 7 Uhr und 17 Uhr zu einer Rückspeisung in das vorgeschaltete Netz kommt, wobei die dreiphasige maximale Rückspeiseleistung mit 32,4 kW bei 51 % der maximalen Erzeugungsleistung der PV-Anlagen von Knoten (3) und (4) liegt. Zudem wird deutlich, dass die Rückspeisung nicht symmetrisch erfolgt. Über den gesamten Messzeitraum wird an der Phase L1 etwa 36 % und an Phase L2 9 % weniger Leistung rückgespeist als an Phase L3. Im Gegensatz dazu verhält sich der Leistungsbedarf im Verbrauchsfall vergleichsweise symmetrisch, was auf eine unsymmetrische Einspeisung durch die PV-Anlagen schließen lässt.

Der Tagesverlauf der Blindleistung an Knoten (A), $Q_{A,\text{eff}}$, zeigt, dass es in Korrelation zur Rückspeiseleistung zu einer Blindleistungsaufnahme des nachgelagerten Netzabschnittes kommt. Aufbauend auf einer gesonderten Betrachtung des Verschiebungsfaktors an Knoten (B) wird geschlussfolgert, dass sich mindestens eine der zwei nachgelagerten PV-Anlagen an der Spannungshaltung mithilfe einer Verschiebungsfaktor-/Wirkleistungskennlinie $\cos\varphi(P)$ beteiligt. Zusätzlich ist im Blindleistungsverlauf deutlich der ein- und ausgeschaltete Betrieb des SR zu erkennen, da der SR im eingeschalteten Zustand einem induktiven Verbraucher entspricht. Die dreiphasige Blindleistungsänderung liegt dabei im Durchschnitt bei 3,4 kvar.

6 Erprobung des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers

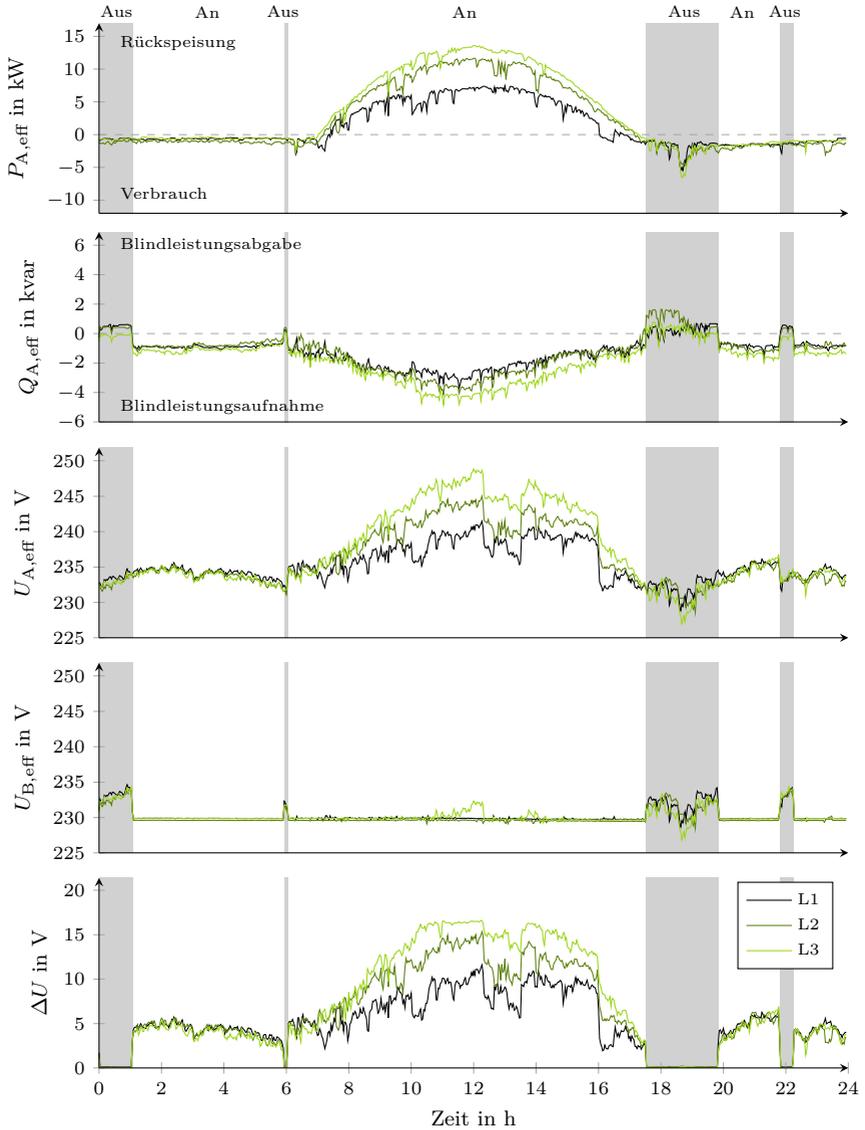


Abbildung 6.6 Leistungs- und Spannungseffektivwerte für einen sonnigen Märztag; Wirkleistung $P_{A,eff}$, Blindleistung $Q_{A,eff}$ und Sternspannung $U_{A,eff}$ an Knoten (A); Sternspannung $U_{B,eff}$ an Knoten (B); Spannungsänderung ΔU ($\Delta U = U_{B,eff} - U_{A,eff}$)

Der Spannungsverlauf an Knoten (A), $U_{A,\text{eff}}$, entsteht durch den Leistungsfluss im Netzausläufer, aber auch durch Leistungsflüsse und Spannungsänderungen im vorgeschalteten Netz. Insgesamt bewirkt die Rückspeisung eine maximale Spannungsanhebung auf etwa 249 V. Durch die unsymmetrische Rückspeisung werden die Spannungseffektivwerte jedoch unterschiedlich stark angehoben. In Schwachlastzeiten liegt die Spannung bei 234 V, woraus sich ableiten lässt, dass der Netzabschnitt für den Verbrauchsfall ausgelegt ist und die Ortsnetztransformatorspannungen höher eingestellt sind, um einer lastbedingten Spannungsabsenkung entgegen zu wirken. Darüber hinaus sind im Tagesverlauf von $U_{A,\text{eff}}$ vermehrt 3 V Spannungssprünge aus dem vorgeschalteten Netz zu erkennen, welche auf Transformatorstufungen aus der MS schließen lassen.

Kommt es zu einer stärkeren Rückspeisung, mit der im Sommer bei höherer Sonneneinstrahlung sowie durch den geplanten Zubau zu rechnen ist, muss anhand der bestehenden Spannungs- und Leistungsprofile an Knoten (A) ohne weitere spannungshaltende Maßnahmen mit Überschreitungen der 10%-Spannungsgrenze am Ende des Netzausläufers gerechnet werden.

Wie jedoch die Spannung an Knoten (B), $U_{B,\text{eff}}$, zeigt, schafft der netzrückwirkungsarme SR dahingehend Abhilfe. Es wird deutlich, dass der SR die Spannungsamplituden der drei Phasen unabhängig voneinander gleichmäßig auf den Sollwert von 230 V ausregelt und damit den unterlagerten Netzabschnitt vom vorgeschalteten Netz entkoppelt. Abweichungen von den 230 V treten lediglich auf, wenn die Einschaltsschwelle noch nicht überschritten wird und sich der SR daher im ausgeschalteten Betrieb befindet. Zudem werden Abweichungen um 12 Uhr herum sichtbar. Zu diesem Zeitpunkt kommt es zu einer Überschreitung des Regelbereichs des SR. Die Überschreitungen sind jedoch unkritisch, da die Spannungsabsenkung des SR ausreicht, um die Spannung des nachgelagerten Netzabschnittes weiterhin innerhalb des geforderten Spannungsbandes zu halten.

Die Spannungsänderung ΔU , die der netzrückwirkungsarme SR erzielt, wird über die Differenz der Spannungseffektivwerte von Knoten (B) und (A) ermittelt ($\Delta U = U_{B,\text{eff}} - U_{A,\text{eff}}$). Anhand des Verlaufs der Spannungsänderung ΔU wird abgeleitet, in welchen Zeitbereichen der SR aktiv ist ($\Delta U > 0$). Die durchschnittliche Spannungsabsenkung des aktiven SR liegt bei 7 V. Die höchste Spannungsabsenkung erfolgt mittags bei maximaler Rückspeisung an Phase L3 mit 17 V. Der Verlauf macht zudem deutlich, dass aufgrund der niedrigen Ein- und Ausschaltsschwellen der SR auch bei Schwachlastzeiten aktiv ist und vielfach einen unnötigen Regeleinsatz erbringt. Im Rahmen des Feldtest ist dies erwünscht, um ein großes Spektrum an Regeleinsätzen betrachten zu können. Für einen weiterführenden Einsatz sollten die Ein- und

Ausschaltsschwellen jedoch entsprechend den Empfehlungen aus Kapitel 5.2.4 angepasst werden.

Leistungs- und Spannungsverhalten während des gesamten Messzeitraums

Das Leistungs- und Spannungsverhalten des gesamten Messzeitraums wird in Abbildung 6.7 über Violinen-Diagramme veranschaulicht. Die Violinen-Diagramme stellen die Verteilungsdichten der Wirkleistungs-, der Blindleistungs- und der Spannungsmessung an den beiden Knoten dar. Zudem werden zur Gegenüberstellung auch die Daten der Vorabmessung aufgeführt. Die dargestellten Daten entsprechen jeweils den 10-Minuten-Mittelwerten der Effektivwerte. Zusätzlich zur Verteilungsdichte sind in den Violinen-Diagrammen der Median sowie das 0,025-Quantil und das 0,975-Quantil eingetragen. Über das 0,025-Quantil und das 0,975-Quantil wird der Bereich aufgespannt, in dem sich die Leistungen und Spannungen zu 95 % der Zeit befinden.

Die Violinen-Diagramme der Wirkleistungen führen auf, dass der Leistungsfluss mehrheitlich einen Verbrauchsfall abdeckt, dass jedoch auch starke Rückspeisungen auftreten. Bedingt durch die Jahreszeit kommt es bei der Feldmessung mit SR zu einer stärkeren Sonneneinstrahlung, weswegen dort in Summe eine häufigere und stärkere Rückspeisung auftritt als bei der Vorabmessung ohne SR an Knoten (3). Durch die stärkere Rückspeisung verringert sich zudem der Leistungsbedarf im Verbrauchsfall, da er zum Teil über die Einspeisung der PV-Anlagen abgedeckt wird. Es wird erwartet, dass bedingt durch die höhere Sonneneinstrahlung die Rückspeisung im Sommer noch einmal deutlich stärker ausfällt als innerhalb des hier betrachteten Messzeitraums.

Die Wirkleistungsabweichung zwischen Knoten (A) und (B) entsteht durch den Wirkleistungsbedarf des netzrückwirkungsarmen SR, welcher im Verbrauchsfall seine Wirkleistung über Knoten (A) und im Rückspeisefall über Knoten (B) bezieht. Anhand einer gesonderten Betrachtung der Messdaten wird ermittelt, dass der netzrückwirkungsarme SR im eingeschalteten Zustand einen durchschnittlichen dreiphasigen Wirkleistungsbedarf von 0,5 kW besitzt.

Die Violinen-Diagramme der Blindleistung zeigen für Knoten (A) und (B) starke Abweichungen. Dies wird durch die Blindleistungsaufnahme des SR verursacht, der seinen Blindleistungsbedarf unabhängig vom Verbrauchs- oder Rückspeisefall über Knoten (A) bezieht. Die durchschnittliche dreiphasige Blindleistungsaufnahme des

netzrückwirkungsarmen SR im eingeschalteten Betrieb liegt entsprechend einer gesonderten Betrachtung bei 3,9 kvar.

Das Blindleistungsverhalten des nachgeschalteten Netzabschnittes, welches aus den Angaben an Knoten (B) ersichtlich wird, zeigt im Vergleich zur Vorabmessung ohne SR an Knoten (3) eine stärkere Blindleistungsaufnahme. Dies ist auf das Blindleistungsmanagement der PV-Anlagen zurückzuführen, welches aufgrund der höheren Einspeisung eine stärkere Blindleistungsaufnahme verursacht.

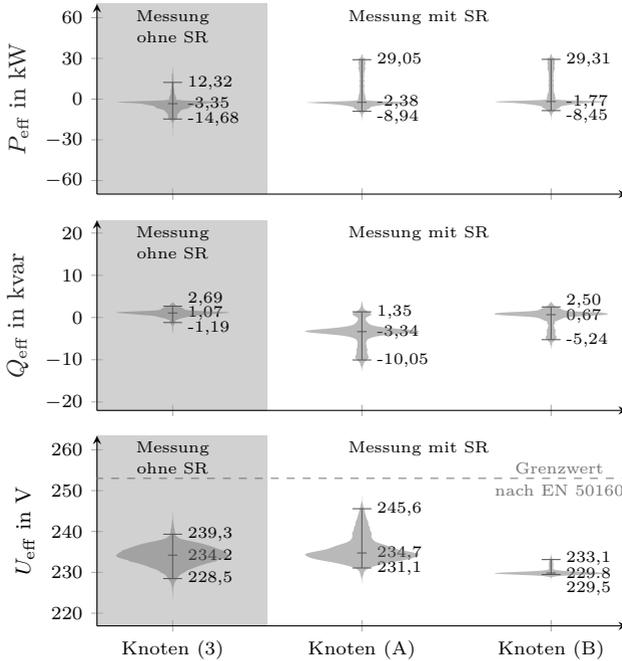


Abbildung 6.7 Violinen-Diagramme für die Feldmessung ohne und mit Strangspannungsregler: Wirkleistung P_{eff} , Blindleistung Q_{eff} , Sternspannung U_{eff}

Anhand der Violinen-Diagramme der Spannungen ist zu erkennen, dass die Spannungsanhebung an Knoten (A) aufgrund der stärkeren Rückspeisung bei der Feldmessung mit SR häufiger und höher ausfällt als bei der Vorabmessung an Knoten (3). Zudem wird insbesondere über die Spannungsverteilungsdichte bei der Vorabmessung an Knoten (3) die Aussage des Netzbetreibers bestätigt, dass für den Verbrauchsfall mit keinen Spannungsbandverletzungen zu rechnen ist. Durch die hö-

her eingestellten Ortsnetztransformatorspannungen fällt die Absenkung nicht unter 228 V. Insgesamt kommt es in beiden Messzeiträumen zu keinen Grenzwertverstößen, auch nicht für die obere Spannungsgrenze.

Allerdings kann im Falle einer stärkeren Rückspeisung die Einhaltung der 10%-Spannungsgrenze ohne die Zuhilfenahme von spannungshaltenden Maßnahmen für den unterlagerten Netzabschnitt nicht sichergestellt werden. Durch den Einsatz des netzrückwirkungsarmen SR wird eine Gefährdung des Spannungsbandes im Netzausläufer verhindert. An der Spannung an Knoten (B) ist zu erkennen, dass der netzrückwirkungsarme SR die Spannung zuverlässig auf annähernd 230 V ausregelt. Geringe Abweichungen von dem Sollwert treten aufgrund der Ein- und Ausschalt-schwellen oder einer Überschreitung des Regelbereichs auf.

Wie bereits aus dem Tagesverlauf in Abbildung 6.6 sichtbar wird, führen die zu niedrigen Ein- und Ausschalt-schwellen dazu, dass der netzrückwirkungsarme SR vielfach einen unnötigen Regeleinsatz erbringt und beispielsweise auch bei Schwachlastzeiten aktiv ist. So ist der SR während des Messzeitraums 87 % der Zeit im eingeschalteten Zustand. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Tagesenergiebedarf von 10,4 kWh. Durch eine Anhebung der Ein- und Ausschalt-schwellen für den spannungsabsenkenden Betrieb kann die Verlustenergie signifikant verringert werden und auch die Blindleistungsentnahme zeitlich reduziert werden, ohne dass das Spannungsband am Ende der Leitung gefährdet wird. Eine Anhebung auf die empfohlenen Werte von 244 V und 242 V hätte für den betrachteten Messzeitraum die Zeit, in welcher der netzrückwirkungsarme SR aktiv ist, auf etwa 10 % gesenkt. Dadurch hätte der durchschnittlichen Tagesenergiebedarf nur noch bei 1,2 kWh gelegen.

Netzrückwirkungen während des gesamten Messzeitraums

Um die weiteren Netzrückwirkungen des SR zu analysieren, werden in Abbildung 6.8 die Spannungsmerkmale Langzeitflickerstärke P_{1t} , Gesamtoberschwingungsgehalt der Spannung THD_U und Unsymmetriefaktor der Spannung k_u als Violinen-Diagramm dargestellt. Andere Spannungsmerkmale werden durch den SR bei der Felderprobung nicht beeinflusst und werden daher bei der Analyse nicht berücksichtigt. Die Darstellung erfolgt für die Messdaten von Knoten (A) und (B). Zudem dienen die Spannungsmerkmale der Vorabmessung an Knoten (3) als Vergleich, um die Netzrückwirkungen des SR hervorzuheben. Dabei wird entsprechend den Normvorgaben die Langzeitflickerstärke aus dem kubischen Mittelwert des Kurzzeitflickers über zwei Stunden ermittelt [77] und für den Gesamtoberschwingungsgehalt sowie den Unsymmetriefaktor werden ihre 10-Minuten-Mittelwerte herangezogen [11]. Für die

Bewertung der Spannungsmerkmale gilt, dass die Störpegel innerhalb eines Wochenintervalls zu 95 % der Zeit unterhalb der geforderten Grenzwerte liegen müssen [11]. Dahingehend ist in den Violinen-Diagrammen neben dem Median auch das 0,95-Quantil mit eingetragen.

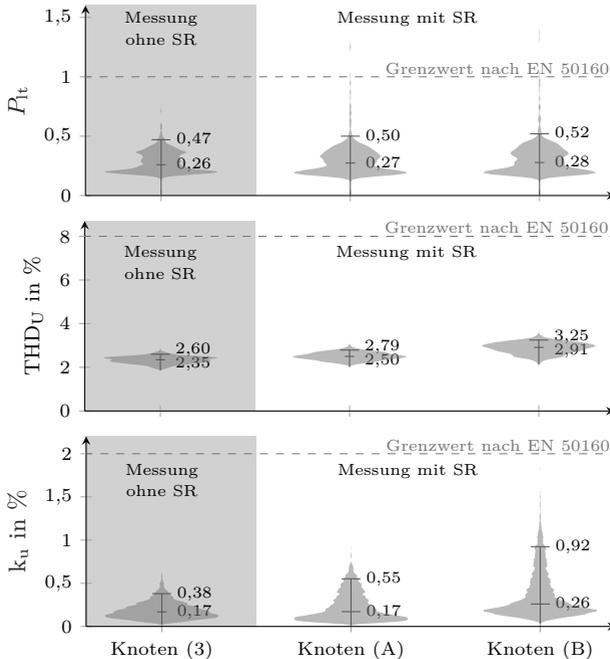


Abbildung 6.8 Violinen-Diagramme für die Feldmessung ohne und mit Strangspannungsregler: Langzeit-Flickerstärke P_{It} , Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung THD_U, Unsymmetriefaktor der Spannung k_u

Anhand der Violinen-Diagramme für die Langzeitflickerstärke P_{It} wird ersichtlich, dass bei der Feldmessung mit SR die Langzeitflickerstärke an Knoten (A) eine ähnliche Verteilungsdichte besitzt wie bei der Vorabmessung ohne SR an Knoten (3). Allerdings kommt es vermehrt zu einzelnen Ausreißern und damit einhergehend zu einer Überschreitung des Grenzwerts von 1. Mithilfe der Zeitreihen des Langzeitflickers werden drei Grenzüberschreitungen für den gesamten Messzeitraum gezählt. Aufgrund der geringen Anzahl kommt es jedoch zu keiner Normverletzung. Eine Analyse der drei Grenzüberschreitungen identifiziert jeweils als Ursache für die ho-

hen Flickerstärken das schnelle Zu- und Abschalten eines Verbrauchers. Schnelle Spannungsänderung oder ein schwankender Strombezug durch den SR werden zu den Zeitpunkten nicht identifiziert und werden als Ursache ausgeschlossen. Es kommt somit zu keiner merklichen Flickeremission durch den SR. Allerdings bewirkt die Längsimpedanz des SR eine geringe Verstärkung des Flickers an Knoten (B). Dies wird aus dem Vergleich der Messungen von Knoten (A) und (B) ersichtlich. So ist beispielsweise das 0,95-Quantil der Langzeitflickerstärke an Knoten (B) um 0,02 höher als an Knoten (A). Die durch den SR verursachte Verstärkung wird in Bezug zum Grenzwert von 1 jedoch als unkritisch bewertet.

Aus den Violinen-Diagrammen des Gesamtoberschwingungsgehalts der Spannung THD_U wird deutlich, dass bei der Feldmessung mit SR der THD_U an Knoten (A) eine ähnliche Verteilungsdichte besitzt wie bei der Vorabmessung ohne SR an Knoten (3). Die unwesentliche Anhebung von unter 0,2 Prozentpunkten kann unterschiedliche Ursachen haben. So kann dies beispielsweise durch die stärkere Rückspeisung, durch eine veränderte Lastsituation oder auch durch den Einsatz des SR verursacht werden. Da die Anhebung jedoch unwesentlich ist, wird dadurch prinzipiell bestätigt, dass der oberwellenbehaftete Strombedarf des SR, dessen Auswirkungen netzaufwärts wandern und daher an Knoten (A) sichtbar werden müssten, durch seine geringe Höhe kaum Einfluss auf die Oberwellenaussendung des SR besitzt. Im Gegensatz dazu ist die Anhebung des THD_U an Knoten (B) maßgeblich mit dem Einsatz des SR zu begründen, der über seine Regelung eine verzerrte Spannung in das nachgeschaltete Netz einprägt. Dabei liegt das 0,95-Quantil an Knoten (B) knapp 0,5 Prozentpunkte höher als an Knoten (A). In Bezug zum Grenzwert von 8% wird jedoch auch dieser Anstieg als unkritisch bewertet.

Die Violinen-Diagramme für den Unsymmetriefaktor der Spannung k_u führen auf, dass die Spannung bei der Vorabmessung weniger Unsymmetrien aufweist als bei der Feldmessung mit SR. Der Unterschied zu Knoten (A) ist über die unsymmetrische Rückspeisung zu begründen, die im Zeitraum der Vorabmessung geringer ausfällt. Knoten (B) weist jedoch eine weitere Anhebung des Unsymmetriefaktors auf, die durch den SR eingepägt wird. Der im Feldtest zum Einsatz kommende netzrückwirkungsarme SR entspricht der Variante 3 aus Kapitel 4.2.1 und setzt sich unter anderem aus einem Dreiphasentransformator zusammen, der über seinen Dreischenkeln eine Phasenkopplung bewirkt. Zwar werden die Spannungseffektivwerte der drei Außenleiterspannungen auf einen einheitlichen Sollwert geregelt, dabei kommt es bei einem unsymmetrischen Betrieb allerdings zu einer unsymmetrischen Verschiebung der Spannungswinkel am Ausgang des SR. Gesonderte Betrachtungen der Zeitreihe des Unsymmetriefaktors führen auf, dass im ausgeregelten Zustand

der Unsymmetriefaktor an Knoten (B) etwa dem Unsymmetriefaktor an Knoten (A) entspricht. Bei Ausregelvorgängen aufgrund von Spannungsänderungen kommt es jedoch zu einem deutlichen Anstieg des Unsymmetriefaktors an Knoten (B). Dies liegt an magnetischen Ausgleichflüssen im Dreischenkelkern des Dreiphasentransformators. Insgesamt liegt der Unsymmetriefaktor jedoch weiterhin im zulässigen Bereich. Dennoch wird für die Anwendung dieser SR-Variante empfohlen, eine phasengleiche Spannungsregelung zu nutzen und dadurch die entstehenden Netzrückwirkungen zu eliminieren. Alternativ kann der netzrückwirkungsarme SR auch ohne Phasenkopplung ausgeführt werden, wie in Variante 1 aus Kapitel 4.2.1. Durch diesen Aufbau können Spannungsunsymmetrien über eine phasenunabhängige Spannungsregelung sogar verbessert werden [A7], [P3].

Grundsätzlich gilt, dass sich die Spannungsqualität netzabwärtsgerichtet weiter verschlechtern kann. Unter Berücksichtigung der Leitungsimpedanz zwischen Knoten (3) und (4), der maximalen Leitungsauslastung sowie der bestehenden Spannungsqualität an Knoten (B), ist jedoch mit keiner Gefährdung am Ende des Netzausläufers zu rechnen.

6.3 Zusammenfassung

Über die Erprobung des netzrückwirkungsarmen SR im Labor und im Feld wird dessen Praxistauglichkeit und Netzverträglichkeit nachgewiesen. Es wird gezeigt, dass die stufenlose Spannungsregelung des SR eine zuverlässige Kompensation von Spannungsschwankungen im installierten Netzabschnitt ermöglicht und damit Spannungsbandprobleme verhindern kann. Im Vergleich zu einem gestuften SR, der Spannungssprünge und Flicker erzeugt, kommt es durch den netzrückwirkungsarmen SR zu keiner Verschlechterung des dynamischen Spannungsverhaltens und des Flickergehalts im Netz. Die Emission von Oberschwingungsspannungen liegt zudem in einem so niedrigen Bereich, dass sie auf die Spannungsqualität der betrachteten Netze keinen wesentlichen Einfluss besitzt und als unkritisch zu bewerten ist. Im Feldtest kommt es allerdings zu einer deutlichen Verschlechterung der Spannungsunsymmetrie. Dies wird durch das Zusammenspiel zwischen der phasenunabhängigen Spannungsregelung und der Phasenkopplung in der verwendeten SR-Variante verursacht. Zwar besteht für den Netzausläufer keine Gefahr einer Normverletzung, um jedoch allgemein eine hohe Netzverträglichkeit zu gewährleisten, gilt es entsprechend den Empfehlungen aus Kapitel 5.2.4 eine phasenunabhängige Spannungsregelung nur dann anzuwenden, wenn im SR keine Phasenkopplung vorliegt. Für die im Feldtest verwendete Variante sollte daher zukünftig nur noch eine phasengleiche Spannungs-

regelung Anwendung finden, wodurch die Rückwirkungen auf die Spannungsunsymmetrie eliminiert werden. Insgesamt erstrecken sich die erläuterten Auswirkungen des SR auf den nachgeschalteten Netzbereich und es kommt zu keiner merklichen Beeinflussung der Spannungsqualität im übergeordneten Netz. Ferner gilt, dass es grundsätzlich durch den Einsatz eines SR zu einer Anhebung der Netzimpedanz kommt, wobei maßgeblich der induktive Anteil vergrößert wird. Da die Weiterentwicklung des netzrückwirkungsarmen SR eine Impedanzeinprägung in das Netz jedoch auf ein Mindestmaß reduziert, fällt die Beeinträchtigung der Kurzschlussleistung und der Störfestigkeit für die betrachteten Netzausläufer unwesentlich gering aus und gilt als unkritisch. Die Verlustenergie des SR hängt davon ab, wie häufig er im Betrieb ist und kann durch eine passende Parameterfestlegung optimiert werden. Hauptsächlich entspricht der SR jedoch einem induktiven Verbraucher; das heißt, dass er im eingeschalteten Betrieb insbesondere eine erhöhte Blindleistungsaufnahme durch den Netzabschnitt bewirkt. Zusammengefasst ermöglicht die Weiterentwicklung des netzrückwirkungsarmen SR unter Berücksichtigung der Empfehlungen für die Festlegung der Regelparameter aus Kapitel 5.2.4 eine geeignete Praxistauglichkeit bei zugleich hoher Netzverträglichkeit.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Durch die zunehmende Einspeisung dezentraler Energieerzeugungsanlagen in das Verteilnetz kommt es insbesondere in ländlichen NS-Netzen mit wenigen Lasten vermehrt zu Problemen bei der Einhaltung des nach EN 50160 geforderten Spannungsbandes. Um die Spannung innerhalb der festgelegten Grenzen zu halten, den weiteren Ausbau von dezentralen Energieerzeugungsanlagen aber nicht zu bremsen, ist zwingend ein Netzausbau erforderlich. Darüber hinaus bewirkt auch der Anstieg an Verbrauchern mit hoher Gleichzeitigkeit, wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen, einen Netzausbaubedarf, der erneut bei langen NS-Leitungen insbesondere durch Spannungsbandprobleme verursacht wird. Dabei stellt gerade bei langen Netzausläufern in der NS der Einsatz von SRs eine kosteneffiziente Alternative zum konventionellen Netzausbau dar. Die aktuell bekannten SR-Umsetzungen bewirken jedoch eine Einprägung von Netzzrückwirkungen oder einen erhöhten Aufwand für den Netzbetreiber hinsichtlich der Instandhaltung. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit ein Konzept entwickelt und erforscht, das eine netzzrückwirkungsarme und robuste Strangspannungsregelung ermöglicht. Das Konzept basiert auf einem SR, der über die Anwendung von VIs die Spannung regeln kann.

Im Rahmen der Erforschung des SR mit VI konnte am Beispiel einer einfachen Umsetzung die allgemeine Wirkungsweise von dieser SR-Art aufgeführt werden. Die einfache Umsetzung besteht aus einem Längstransformator, der sekundärseitig eine Zusatzspannung in das Netz einprägen kann, sowie einer VI, die mit der Primärseite des Längstransformators einen induktiven Spannungsteiler bildet. Durch eine Änderung der VI wird über den Spannungsteiler die Höhe der Zusatzspannung variiert. Aus der Erforschung wurde sichtbar, dass bereits über diesen einfachen Aufbau eine stufenlose Spannungsregelung ermöglicht wird. Da eine VI als robust, wartungsarm und langlebig gilt, vereint die einfache Umsetzung zudem die stufenlose Spannungsregelung mit einem robusten Betrieb. Ferner kann aufgrund des phasenunabhängigen Aufbaus das Ausregeln von Spannungsunsymmetrien realisiert werden. Die Erforschung, die sowohl analytisch als auch messtechnisch anhand eines Prototyps im Labor erfolgte, zeigt jedoch auch auf, dass die einfache Umsetzung eine Vielzahl von Netzzrückwirkungen besitzt. Ein Großteil der Netzzrückwirkungen wird dadurch verursacht, dass die einfache Umsetzung im unteren Spannungsregelbereich eine hohe Impedanz über die Sekundärwicklung des Längstransformators in das Netz einprägt. Dies bewirkt eine nennenswerte Anhebung der Netzimpedanz, wodurch die

Kurzschlussleistung und die Störfestigkeit des Netzausläufers verringert werden. In Abhängigkeit vom Leitungsstrom entstehen dadurch zudem sprunghafte Änderungen im Spannungsphasenwinkel sowie schnelle Spannungsänderungen beim Zu- und Abschalten des SR, die unter anderem Flicker hervorrufen. Des Weiteren verursacht die Impedanz des SR einen leitungsstrombedingten Spannungsabfall, der durch ein ungünstiges Zusammenwirken Spannungseinbrüche oder Spannungsüberhöhungen erzeugen und verstärken kann. Als weiterer Grund für Netzurückwirkungen wurde das Betriebsverhalten der VI identifiziert, das aufgrund eines gewollten Sättigungsverhaltens Verzerrungen im Strom- und Spannungssignal erzeugt. Die Verzerrungen führen zu einer Aussendung von Oberschwingungsspannungen durch den SR, die im Nennbetrieb bereits einen Großteil der erlaubten Oberschwingungsemission einnehmen.

Um die Netzurückwirkungen der einfachen Umsetzung zu beheben, wurden Optimierungsansätze entwickelt und analysiert. In diesem Zusammenhang wurde ein erweitertes Konzept vorgestellt, das neben der VI, die als Stellglied zur Spannungsregelung dient, eine zweite VI verwendet, über welche die hohe Impedanzeinprägung durch den SR verhindert werden kann. Dazu ist die zweite VI parallel zur Primärseite des Längstransformators zu schalten. Indem der Wert der zweiten VI abgesenkt wird, wird der Einfluss des Längstransformators überbrückt und dadurch eine hohe Impedanzeinprägung vermieden. Dabei wird durch die Erweiterung mit einer zweiten VI weiterhin ein robuster Betrieb ermöglicht. Messtechnisch wurden Kennfelder für einen derartigen SR aufgestellt, die den Einfluss der beiden VIs auf das Verhalten des SR verdeutlichen. Anhand der Kennfelder wurde sichtbar, dass über eine geschickte kombinierte Ansteuerung die Netzurückwirkungen des SR gemindert werden. Aus diesem Grund wurde eine geeignete Ansteuerungskennlinie abgeleitet, durch die es zu einer minimalen Impedanzeinprägung und einer geminderten Oberschwingungsemission kommt. Die Erweiterung über die zweite VI liefert im Zusammenspiel mit der Ansteuerungskennlinie das grundlegende Konzept des netzurückwirkungsarmen SR. Darauf aufbauend wurden weitere Maßnahmen zur Minderung der Oberschwingungsemission betrachtet. Die Maßnahmen fokussieren sich auf die Unterdrückung von gleichphasigen Oberschwingungsspannungen, die der dritten Harmonischen und ihren Vielfachen entsprechen. Die beste Maßnahme stellt dabei eine Dreieckswicklung am Längstransformator dar. Die Dreieckswicklung nimmt die gleichphasigen Oberschwingungsspannungen auf, wodurch sie über den Längstransformator nicht mehr in das Netz eingepreßt werden. Eine ähnliche Maßnahme basiert auf der Anwendung eines Dreiphasentransformators mit Dreischenkelnkern anstelle von drei einzelnen Längstransformatoren. Durch die Phasenkopplung im Transformator

matorkern und die fehlende direkte Sternpunktterdung wird die Übertragung von gleichphasigen Oberschwingungsspannungen unterdrückt. Stattdessen kommt es jedoch zu einem nicht kompensierten magnetischen Fluss im Transformatorkern, der einen magnetischen Rückschluss außerhalb des Kerns erzwingt und gesteigerte Eisenverluste erzeugt. Durch die zusätzliche Anwendung einer Dreieckswicklung könnte dieser Effekt verhindert werden. Der maßgebliche Vorteil des Dreiphasentransformators liegt jedoch darin, dass die Komponentenanzahl im SR reduziert wird und der Aufbau sich somit als platz- und kostensparender ergibt. Gleichzeitig bewirken allerdings beide Maßnahmen zur Oberschwingungsreduktion eine Phasenkopplung, wodurch die Möglichkeit zum Ausregeln von Spannungsunsymmetrien verhindert wird.

Für das Konzept des netzrückwirkungsarmen SR wurde ein Regelungsverfahren entworfen, welches das dynamische Verhalten des SR netzverträglich gestaltet. In diesem Zusammenhang wurde zunächst die Regelstrecke des netzrückwirkungsarmen SR modelliert. Anhand der Regelstrecke wurde deutlich, dass die Herausforderung eines Regelungsentwurfs insbesondere in der Berücksichtigung des nichtlinearen Verhaltens des SR besteht, welches sich sowohl aus dem Verhalten der VIs als auch aus den Spannungsbeziehungen im SR ergibt. Um das nichtlineare Verhalten auszugleichen und dadurch im dynamischen Betrieb unbeabsichtigte schnelle Spannungsänderungen zu vermeiden, wurde eine kaskadierte Regelungsstruktur entworfen, die über adaptive Regelparameter das nichtlineare Verhalten der Regelstrecke ausgleicht. Dabei kompensiert jeweils ein innerer Regelkreis das nichtlineare Zeitverhalten einer VI und ein äußerer Regelkreis das nichtlineare Verstärkungsverhalten des SR. Anhand einer prototypischen Untersuchung im Labor wurde das entworfene Regelsystem validiert. Dabei wurde sichtbar, dass insbesondere für das Kleinsignalverhalten gute Ergebnisse erzielt werden. Durch das annähernd lineare Regelverhalten wird eine kontinuierliche Spannungsreglung ohne sprunghafte Änderungen im Spannungssignal bei einer ausreichend schnellen Ausregelzeit realisiert. Eine Vergrößerung der Ausregelzeit kann bei Bedarf durch eine Anpassung der Regelparameter erfolgen.

Darüber hinaus wurden übergeordnete Steuerungs- und Regelungskonzepte für einen stufenlosen Spannungsregelung betrachtet, die für einen netzrückwirkungsarmen Einsatz zu berücksichtigen sind. Die Steuerungskonzepte beinhalten die Anwendung von Ein- und Ausschaltsschwellen sowie von Schaltverzögerungen, wodurch koordiniert wird, dass sich ein stufenloser SR nur bei einem Spannungsregelungsbedarf im eingeschalteten Betrieb befindet. Ferner wurden geeignete Regelungskonzepte zur Sollwertvorgabe vorgestellt, über welche neben einer Entkopplung des Spannungsbandes auch eine Erweiterung des Spannungsbandes für den unterlagerten

Netzabschnitt ermöglicht wird. Darüber hinaus wurden die Verfahren einer phasenunabhängigen und einer phasengleichen Spannungsregelung diskutiert. So bietet eine phasenunabhängige Regelung die Möglichkeit Spannungsunsymmetrien auszu-regeln. Dies kann jedoch nur umgesetzt werden, wenn im SR keine Phasenkopplung vorherrscht. Über Empfehlungen für die Regelparameter wurden zudem Entscheidungshilfen für die Parameterfestlegung geliefert, die allgemein für einen SR mit stufenloser Spannungsregelung gelten.

Über die Analyse der Netzauswirkungen sowie die Auswertungen einer Erprobung im Labor und in einem realen Netzstrang in der NS wurden die Netzverträglichkeit und die Praxistauglichkeit des netzrückwirkungsarmen SR nachgewiesen. Es wurde gezeigt, dass die stufenlose Spannungsregelung des netzrückwirkungsarmen SR eine zuverlässige Kompensation von Spannungsschwankungen ermöglicht und damit Spannungsbandprobleme verhindern kann. Gleichzeitig kommt es zu keiner wesentlichen Beeinflussung von anderen Spannungsmerkmalen im Netz. In diesem Zusammenhang bewirkt der netzrückwirkungsarme SR im Gegensatz zu einem gestuften SR keine Verschlechterung des dynamischen Spannungsverhaltens und des Flickergehalts im Netz. Die Emission von Oberschwingungsspannungen liegt zudem in einem so niedrigen Bereich, dass sie auf die Spannungsqualität der betrachteten Netze keinen wesentlichen Einfluss besaß und als unkritisch bewertet wurde. Allerdings bewirkt ein SR grundsätzlich eine Anhebung der Netzimpedanz über dessen Längstransformator. Für die Weiterentwicklung des netzrückwirkungsarmen SR wurde jedoch gezeigt, dass die Impedanzeinprägung in das Netz auf ein Mindestmaß reduziert wird, weswegen die Beeinträchtigung der Kurzschlussleistung und der Störfestigkeit für die betrachteten Netzausläufer unwesentlich gering ausfiel. Die Erprobung zeigte allerdings auch auf, dass die Nutzung einer Einzelphasenregelung bei einer SR-Umsetzung mit Phasenkopplung zu einer Verschlechterung der Spannungssymmetrie führt. Dies bestätigte, dass nur unter Berücksichtigung der passenden Steuerungs- und Regelungskonzepte die gewünschte Netzverträglichkeit erzielt wird.

Für die prototypischen Umsetzungen des netzrückwirkungsarmen SR wurden zwei verschiedene VI-Varianten betrachtet, die beide zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Die angewandte Schaltmimik weist hingegen die Beeinträchtigung auf, dass sie bei niedriger Schaltlast hohe Schaltkontakte besitzt, wodurch für die unteren Ansteuerungszustände des SR eine zusätzliche Impedanzeinprägung in das Netz entsteht. Durch die Verwendung von Schaltern, die auch für kleinere Schaltlasten ausgelegt sind, sollte diese Einprägung verhindert werden.

7.2 Wesentliche Ergebnisse und Beitrag der Arbeit

Die vorliegende Arbeit liefert für die einfache Umsetzung eines SR mit VI die konkreten Netzauswirkungen. Damit wird für die Planung eines Netzausbaus die Möglichkeit gegeben, vorab zu bewerten, ob eine derartige SR-Umsetzung eine ausreichende Netzverträglichkeit für den auszubauenden Netzabschnitt besitzt. Grundsätzlich wird jedoch deutlich, dass die einfache Umsetzung des SR mit VI keine netzverträglichere Alternative zu einem gestuften SR darstellt. Zwar wird die Spannung kontinuierlich geregelt, weswegen Spannungssprünge innerhalb des Regelbereichs vermieden werden, jedoch kommt es weiterhin zu nennenswerten Netzzrückwirkungen.

Über die Anwendung von verschiedenen Optimierungsansätzen wurde eine Weiterentwicklung hin zu einem netzzrückwirkungsarmen und robusten SR erzielt, dessen Konzept und Aufbau in dieser Arbeit dargestellt wurden. Darüber hinaus wurden Ansteuerungs- und Regelungsverfahren erarbeitet, welche gemeinsam das statische und dynamische Verhalten des SR netzverträglich gestalten. Der Nachweis einer hohen Netzverträglichkeit wurde über eine Analyse der Netzauswirkungen und eine Erprobung im Labor und im Feld erbracht. Für Netzausläufer mit geringer Störfestigkeit und niedriger Spannungsqualität liefert diese Arbeit somit eine effiziente Lösung zur Strangspannungsregelung.

Da die entwickelten Konzepte grundsätzlich übertragbar sind, leistet die Arbeit ferner einen Beitrag zur zukünftigen Entwicklung von weiteren VI-Anwendungen sowie von anderen SRs mit stufenloser Spannungsregelung.

7.3 Ausblick

Das Konzept des netzzrückwirkungsarmen SR wurde in dieser Arbeit anhand von mehreren prototypischen Aufbauten validiert. Im Gegensatz zur ursprünglichen einfachen Umsetzung erzielten diese allesamt eine hohe Netzverträglichkeit und konnten ihre Praxistauglichkeit unter Beweis stellen. Bei der Detailanalyse wurden jedoch verschiedene Aspekte offenbar, die weiteres Optimierungspotenzial aufweisen. Für die platz- und kostensparende Variante mit Dreiphasentransformator, die über den Dreischenkelnern eine Oberschwingungsreduktion realisiert, sollte zusätzlich eine Dreieckswicklung umgesetzt werden. Über die Dreieckswicklung wird der nichtkompensierte magnetische Fluss im Dreischenkelnern ausgeglichen, wodurch ein erzwungener magnetischer Rückschluss verhindert wird. Des Weiteren sollte die verwendete Schaltmimik im SR überarbeitet werden. Dabei sollten andere Schalter zum Einsatz

kommen, die auch für kleinere Schaltlasten ausgelegt sind. Dadurch kann eine zusätzliche Impedanzeinprägung durch hohe Schaltkontakte bei geringer Ansteuerung des SR vermieden werden.

Die Verminderung von Spannungsunsymmetrien durch das Konzept des netzrückwirkungsarmen SR ohne Phasenkopplung wurde aktuell nur simulationstechnisch über begleitende Arbeiten nachgewiesen. Um das konkrete Kompensationspotential von Spannungsunsymmetrien zu quantifizieren, sollten daher weitere Untersuchungen erfolgen, die sowohl analytische und simulationstechnische Ansätze berücksichtigen, aber auch die Analyse der SR-Umsetzungen im Labor beinhalten sollten.

Ferner sind die in der Arbeit entwickelten Konzepte grundsätzlich übertragbar auf weitere Anwendungen. Beispielsweise könnte untersucht werden, inwieweit andere stufenlose Spannungsregler mit Längstransformator davon profitieren, dass der Einfluss des Längstransformators im unteren Spannungsregelbereich teilweise überbrückt wird. Dadurch lässt sich die unerwünschte Impedanzeinprägung in diesem Betriebszustand senken, während gleichzeitig weiterhin ein stufenloser Betrieb erreicht wird. Dies müsste nicht notwendigerweise wie in dieser Arbeit mithilfe einer zusätzlichen, parallel geschalteten VI erfolgen, sondern könnte beispielsweise auch über eine leistungselektronische Schaltung erreicht werden.

Da leistungselektronische Ansätze für stufenlose SRs nach aktueller Einschätzung jedoch mit erhöhten Instandhaltungskosten verbunden sind, werden entsprechende SR-Umsetzungen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Gegenwärtige Forschungen und Entwicklungen beschäftigen sich allerdings vermehrt mit leistungselektronischen Systemen, um deren Zuverlässigkeit zu verbessern. Damit können leistungselektronische Ansätze zukünftig auch für eine Strangspannungsregelung in der NS durchaus relevant werden.

Des Weiteren kann der gleichzeitige Einsatz verschiedener Spannungsregler in einem Netzabschnitt grundsätzlich zu Interoperabilitätsproblemen führen, durch die Wahl passender Regelzeiten sollte Interoperabilität jedoch gewährleistet werden. Für den Einsatz von stufenlosen SRs in Netzabschnitten mit anderen Spannungsreglern sollten daher Empfehlungen für die einzustellenden Regelungszeiten erarbeitet werden. Dabei ist insbesondere das Zusammenspiel der stufenlosen Strangspannungsregelung mit einer $Q(U)$ -Regelung von dezentralen Erzeugungsanlagen sowie mit einer gestuften Regelung eines RONT sicherzustellen. Insgesamt werden somit die technischen Voraussetzungen geschaffen, um innovative Strangspannungsregelung in Zukunft vermehrt beim Netzausbau einzusetzen.

Literatur

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *Entwicklung der Bruttostromerzeugung seit 2000*, 2021.
- [2] *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066)*. Zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026).
- [3] Deutsche Energie-Agentur, TU Dortmund/ef.Ruhr und G. Brunekreeft, *dena-Verteilnetzstudie: Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030*, Deutsche Energie-Agentur, Hrsg., Berlin, 2012.
- [4] E-Bridge Consulting, RWTH Aachen und OFFIS, *Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie)*, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2014.
- [5] Energynautics, Öko-Institut e.V. und Bird & Bird, *Verteilnetzstudie Rheinland-Pfalz*, Studie im Auftrag des Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz, 2014.
- [6] ef.Ruhr und TU Dortmund, *Verteilnetzstudie für das Land Baden-Württemberg*, Studie im Auftrag des Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2017.
- [7] BearingPoint und Fraunhofer IEE, *Verteilnetzstudie Hessen 2024 – 2034*, Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung Hessen, 2018.
- [8] Deutsche Energie-Agentur, ewi Energy Research & Scenarios, ef.Ruhr, FIW München, ITG Dresden und Universität Stuttgart, *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*, Deutsche Energie-Agentur, Hrsg., Berlin, 2018.
- [9] Navigant, Kompetenzzentrum Elektromobilität und RE-xpertise, *Verteilnetzausbau für die Energiewende: Elektromobilität im Fokus*, Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project, 2019.
- [10] S. Harnisch, P. Steffens, H. H. Thies, J. Monscheidt, L. Münch, C. Böse und B. Gernsberger, *Planungs- und Betriebsgrundsätze für ländliche Verteilernetze: Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen*, M. Zdrallek, Hrsg., Wuppertal, Erlangen, 2016.
- [11] DIN EN 50160:2020-11, *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*.

- [12] VDE-AR-N 4110:2018-11, *Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)*.
- [13] VDE-AR-N 4105:2018-11, *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*.
- [14] B. Gwisdorf, “Methodik und Anwendung der Grenzkurvenanalyse zur Bewertung von elektrischen Energieverteilnetzen,” Dissertation, TU Dortmund, Dortmund, 2015.
- [15] TU Braunschweig, RWTH Aachen, TU München und FGH e.V., *Schlussbericht: Vergleich von technischer Wirksamkeit sowie Wirtschaftlichkeit zeitnah verfügbarer Verfahren zur Sicherung der statischen Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen mit starker dezentraler Einspeisung*, Studie im Auftrag des Forums Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), 2014.
- [16] O. Marggraf und B. Engel, “Experimental and Field Tests of Autonomous Voltage Control in German Distribution Grids,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Sarajevo, Bosnien und Herzegowina, 2018.
- [17] O. Marggraf, S. Laudahn, B. Engel, M. Lindner, C. Aigner, R. Witzmann, C. Michael, M. Marian, G. Philipp, A. Schnettler, M. Schoeneberger, S. Patzack und H. Vennegeerts, *Abschlussbericht zum Verbundvorhaben U-Control*, Verbundprojekt TU Braunschweig, TU München, RWTH Aachen, FGH e.V., gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018.
- [18] R. K. Varma und E. M. Siavashi, “PV-STATCOM: A New Smart Inverter for Voltage Control in Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 9, Nr. 4, S. 1681–1691, 2018.
- [19] J. von Appen, T. Stetz, M. Braun und A. Schmiegel, “Local Voltage Control Strategies for PV Storage Systems in Distribution Grids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Jg. 5, Nr. 2, S. 1002–1009, 2014.
- [20] M. Zeraati, M. E. Hamedani Golshan und J. M. Guerrero, “Distributed Control of Battery Energy Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks With High PV Penetration,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Jg. 9, Nr. 4, S. 3582–3593, 2018.

-
- [21] B. Berezki und B. Hartmann, "LV Grid Voltage Control with Battery Energy Storage Systems," in *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Madrid, Spanien, 2020.
- [22] S. Kippelt, "Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien," Dissertation, TU Dortmund, Dortmund, 2017.
- [23] Westnetz, EFZN, ABB, EnBW Energie Baden-Württemberg, RWTH Aachen, TU Braunschweig, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), TU München, TU Dortmund, Stromnetz Hamburg, E.ON Gas Storage, Consultant Vattenfall Europe Innovation, OTH Regensburg, HS-Hannover, Younicos und Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, *Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannung – Anwendung und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze*, Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), 2015.
- [24] P. Hauffe, S. Lang, K. Zimmer, H. Geiß, D. Sartowski, M. Conrad, D. Schweitzer, S. Sender, S. Hoppert, T. Schwarz, G. Brammer, F. Schmidt, M. Wiesenstein und W. Wellssow, *Schlussbericht zum Verbundvorhaben Leitfaden zur Integration spannungsstabilisierender Applikationen (Lisa)*, Verbundprojekt Pfalzwerke, Pfalzwerke Netz, IDS, Power Plus Communications, A. Eberle, Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft, TU Kaiserslautern, Projektlaufzeit: September 2014 - Juli 2017, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- [25] Bundesnetzagentur, *Flexibilität im Stromversorgungssystem – Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität*, Diskussionspapier, 2017.
- [26] A. Schwab, *Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende*, 6. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2020, Kap. 9, S. 289–333.
- [27] P. Hauffe, S. Lang, K. Zimmer, H. Geiß, D. Sartowski, M. Conrad, D. Schweitzer, S. Sender, S. Hoppert, T. Schwarz, G. Brammer, F. Schmidt, M. Wiesenstein und W. Wellssow, *Leitfaden zur Integration spannungsstabilisierender Applikationen in Niederspannungsnetze*, Pfalzwerke, Pfalzwerke Netz, IDS, Power Plus Communications, A. Eberle, Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft und TU Kaiserslautern, Hrsg., 2018.

- [28] A. Schwab, *Elektroenergiesysteme: Smarte Stromversorgung im Zeitalter der Energiewende*, 6. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2020, Kap. 11, S. 393–428.
- [29] Klaus Faber AG, *Starkstromkabel NAYY-J/-O*, Datenblatt, Saarbrücken, 2021. Adresse: www.shop.faberkabel.de/out/downloads/uploads/DE/dbl_nayy.pdf (besucht am 15. 12. 2021).
- [30] H. Rui, S. Lang, H. Kreten, W. Wellssow, P. Hauße, K. Zimmer, C. Wendel und H. Geiss, “Guidelines for the Integration of Voltage Control Applications,” in *International ETG Congress*, Bonn, Deutschland, 2015.
- [31] CIGRE Working Group A2.37, *Transformer Reliability Survey*, Paris, Frankreich, 2015.
- [32] Electro-Bauelemente GmbH, *Strangspannungsregler: Zur Spannungsbandkorrektur gemäss EN 50160*, Lünen, 2018. Adresse: https://www.ebg-electro.de/fileadmin/content/electro/downloads/Spannungsregler_DE_2018_Final_Web.pdf (besucht am 11.03.2020).
- [33] Walcher GmbH & Co. KG, *Netzspannungsregler: bei PV-Anlagen, langen Ausläuferleitungen oder steigendem Energiebedarf*, Eichenzell, 2017. Adresse: http://www.walcher.com/files/prospekt_netzregler.pdf (besucht am 15. 12. 2021).
- [34] Ruhstrat Power Technology GmbH, *NESSY - Netz-Spannungs-Stabilisierungssystem: Dauerhafter Schutz gegen Spannungsschwankungen im Niederspannungsnetz*, Bovenden, 2019. Adresse: https://ruhstrat.com/wp-content/uploads/2019/10/Broschuere_Nessy_DE_Web.pdf (besucht am 15. 12. 2021).
- [35] A. Eberle GmbH & Co. KG, *LVRSys: Auf die richtige Spannung kommt es an*, Nürnberg, 2019. Adresse: www.a-eberle.de/sites/default/files/media/p_LVRSys_2017_de_web.pdf (besucht am 19.03.2020).
- [36] ABB Ltd, *Technical Catalogue: Installation Contactors Type ESB*, 2020. Adresse: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SAC101101D0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=A> (besucht am 19.03.2020).
- [37] Finder GmbH, *Serie 22 - Installationsschütze 25 - 40 - 63 A*, 2021. Adresse: <https://gfinder.findernet.com/public/attachments/22/DE/S22DE.pdf> (besucht am 15. 12. 2021).

-
- [38] X. Zhang und H. Zhang, “The accelerated Life Experiment Study of Solid State Relay,” in *International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, Xi’an, China, 2011.
- [39] IXYS Integrated Circuits Division, *Advantages of Solid-State Relays Over Electro-Mechanical Relays*, USA, 2014. Adresse: [http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/AN-145.pdf/\\$file/AN-145.pdf](http://www.ixysic.com/home/pdfs.nsf/www/AN-145.pdf/$file/AN-145.pdf) (besucht am 15.12.2021).
- [40] P. Frias, C. A. Platero, D. Soler und F. Blazquez, “High-Efficiency Voltage Regulator for Rural Networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 25, Nr. 3, S. 1666–1672, 2010.
- [41] M. A. Pelegrini, R. Tufaniuk, J. C. Cebrian, J. C. Guaraldo, D. V. Kondo, M. R. Gouvea, F. C. S. Filho, S. X. Duarte, T. P. Souza, H. P. Schmidt, K. N. Teixeira und D. R. Fagundes, “A Portable Voltage Regulator as an Innovative Smart Grid Solution,” in *IEEE PES Transmission & Distribution Conference*, Chicago, USA, 2014.
- [42] F. d. C. Saraiva Filho, S. X. Duarte, N. Kagan, J. C. Cebrian, M. A. Pelegrini, J. C. Guaraldo, H. P. Schmidt, D. V. Kondo und R. Tufaniuk, “A solution for Voltage Regulation at LV Networks: Portable Regulator and Software,” in *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Hong Kong, China, 2012.
- [43] M. Carlen, F. Cornelius, I. Buschmann, J. Tepper, M. Schneider, R. Jakobs, H. Wiesler und A. Slupinski, “Line Voltage Regulator for Voltage Adjustment in MV-grids,” in *CIREN – International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, Frankreich, 2015.
- [44] A. Eberle GmbH & Co. KG, “Schaltung zur Regelung und/oder Einstellung einer Wechselspannung,” Offenlegungsschrift DE102012010115A1, 2012.
- [45] Ruhstrat GmbH, *Technische Informationen: Spannungskonstanthalter*, 2013. Adresse: https://www.ruhstrat.com/files/pdf1/TI_Spannungskonstanthalter_deutsch_09_20131.pdf (besucht am 12.01.2016).
- [46] Ruhstrat Power Technology GmbH, *Säulenstelltransformatoren: Technische Informationen*, 2019. Adresse: https://ruhstrat.com/wp-content/uploads/2019/10/Broschuere_Saueletrafos_DE_Web.pdf (besucht am 15.12.2021).

- [47] J. G. Nielsen und F. Blaabjerg, “A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jg. 41, Nr. 5, S. 1272–1280, 2005.
- [48] ABB Ltd, *PCS100 AVC-4: Aktiver Spannungsregler zur Korrektur von Spannungseinbrüchen 150 kVA - 3600 kVA*, 2015. Adresse: <https://new.abb.com/ups/de-ch/strom-und-spannungsaufbereiter-von-abb/aktiver-netzspannungsregler/pcs100-avc/> (besucht am 10.02.2020).
- [49] Novtium Electric Co. Ltd, *Novtium Dynamic Voltage Regulator (NVR)*, 2018. Adresse: <http://www.novtium.com/English/Product/2691381721.html> (besucht am 10.02.2020).
- [50] Ruhstrat Power Technology GmbH, *Oliver - Online Voltage Regulation: Neuartiger Schutz vor Spannungseinbrüchen*, 2019. Adresse: <https://ruhstrat.com/spannungsoptimierung/oliver> (besucht am 10.02.2020).
- [51] Zigor Corporación S.A., *AVC SET DVR: Voltage sag compensation systems to assure the continuity of industrial processes*, 2020. Adresse: <https://www.zigor.com/products/power-quality-back-up/zgr-avc-dvr/> (besucht am 19.03.2020).
- [52] F. V. Lima, S. F. Pinto und J. F. Silva, “Power Electronics Voltage Regulators for Distribution Transformers,” in *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey, 2013.
- [53] H. Wang, M. Liserre und F. Blaabjerg, “Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Jg. 7, Nr. 2, S. 17–26, 2013.
- [54] A. Garces und A. Trejos, “A Voltage Regulator based on Matrix Converter for Smart Grid Applications,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Medellin, Kolumbien, 2011.
- [55] S. Yang, A. Bryant, P. Mawby, D. Xiang, L. Ran und P. Tavner, “An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jg. 47, Nr. 3, S. 1441–1451, 2011.
- [56] P. Alcaria, S. F. Pinto und J. F. Silva, “Active Voltage Regulators for Low Voltage Distribution Grids: The Matrix Converter Solution,” in *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey, 2013.

-
- [57] G. Alain, R. Dominique und H.-P. Biner, “AC Line Voltage Controller for Grid Integration of Renewable Energy Sources,” in *European Conference on Power Electronics and Applications*, Genf, Schweiz, 2015.
- [58] A. Bartschat, C. Broer, D. Coronado, K. Fischer, J. Kučka, A. Mertens, R. Meyer, M. Morisse, K. Pelka, B. Tegtmeier, S. Weber und J. Wenske, *Zuverlässige Leistungselektronik für Windenergieanlagen*, Abschlussbericht zum Fraunhofer-Innovationscluster Leistungselektronik für regenerative Energieversorgung, Stuttgart, 2018.
- [59] C. Waniek, “Entwicklung und Bewertung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich gesamtwirtschaftlich geeigneter Verträglichkeitspegel im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz,” Dissertation, TU Dortmund, Dortmund, 2020.
- [60] C. Zorn, “Alterung von Leistungshalbleitermodulen im Temperatur-Feuchte-Spannungs-Test,” Dissertation, Universität Bremen, Bremen, 2019.
- [61] Y. Shen, A. Chub, H. Wang, D. Vinnikov, E. Liivik und F. Blaabjerg, “Wear-Out Failure Analysis of an Impedance-Source PV Microinverter Based on System-Level Electrothermal Modeling,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Jg. 66, Nr. 5, S. 3914–3927, 2019.
- [62] X. Shi und A. M. Bazzi, “Solar Photovoltaic Power Electronic Systems: Design for Reliability Approach,” in *European Conference on Power Electronics and Applications*, Genf, Schweiz, 2015.
- [63] Y. Yang, V.-S. Sularea, K. Ma und F. Blaabjerg, “Advanced Design Tools for the Reliability of Power Electronics – Case Studies on a Photovoltaic (PV) System,” in *IEEE Industrial Electronics Conference*, Yokohama, Japan, 2015.
- [64] U.-M. Choi, F. Blaabjerg und S. Jorgensen, “Power Cycling Test Methods for Reliability Assessment of Power Device Modules in Respect to Temperature Stress,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 33, Nr. 3, S. 2531–2551, 2018.
- [65] F. Gonzalez-Hernando, J. San-Sebastian, A. Garcia-Bediaga, M. Arias, F. Iannuzzo und F. Blaabjerg, “Wear-Out Condition Monitoring of IGBT and Mosfet Power Modules in Inverter Operation,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jg. 55, Nr. 6, S. 6184–6192, 2019.
- [66] M. V. Kjaer, H. Wang, Y. Yang und F. Blaabjerg, “Reliability Analysis of Power Electronic-based Power Systems,” in *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Porto, Portugal, 2019.

- [67] R. Tjeldhorn, E. Haugs und F. Strand, “System for Voltage Stabilization of Power Supply Lines,” Offenlegungsschrift WO2004053615A1, 2004.
- [68] P. F. van Eldik und P. Cornelius, *Transformatoren, Drosseln, Transduktoren und Streufeldtransformatoren: Anleitung zum Entwurf von Transformatoren und anderen Wechselstromspulen mit Eisenkern*, 3. Aufl., Ser. Philips Fachbücher. Hamburg: Philips, 1971, Bd. 13.
- [69] Magtech AS, *Magtech Voltage Booster: Stabilising medium voltage lines*, 2011.
- [70] M. S. Perdigao, M. F. Menke, A. R. Seidel, R. A. Pinto und J. M. Alonso, “A Review on Variable Inductors and Variable Transformers: Applications to Lighting Drivers,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Jg. 52, Nr. 1, S. 531–547, 2016.
- [71] H. Rui, W. Wellssow und P. Hauffe, “Assessment of Voltage Control Applications in LV Networks with Smart Grid Metrics,” in *IEEE PES General Meeting*, Boston, USA, 2016.
- [72] H. Kikusato, N. Takahashi, J. Yoshinaga, Y. Fujimoto, Y. Hayashi, S. Kusagawa und N. Motegi, “Method for Determining Line Drop Compensator Parameters of Low Voltage Regulator Using Support Vector Machine,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Washington, USA, 2014.
- [73] H. Kikusato, N. Takahashi, J. Yoshinaga, Y. Fujimoto, Y. Hayashi, S. Kusagawa und N. Motegi, “Method for Instantly Determining Line Drop Compensator Parameters of Low-Voltage Regulator Using Multiple Classifiers,” in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Istanbul, Türkei, 2014.
- [74] K. E. Antoniadou-Plytaria, I. N. Kouveliotis-Lysikatos, P. S. Georgilakis und N. D. Hatziargyriou, “Distributed and Decentralized Voltage Control of Smart Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Jg. 8, Nr. 6, S. 2999–3008, 2017.
- [75] J. Schlabbach und W. Mombauer, *Power Quality: Entstehung und Bewertung von Netzrückwirkungen; Netzanschluss erneuerbarer Energiequellen*, Ser. VDE-Schriftenreihe Normen verständlich. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2008, Bd. 127, Kap. 2, S. 107–108.

-
- [76] J. Barros, J. J. Gutierrez, M. de Apraiz, P. Saiz, R. I. Diego und A. Lazkano, “Rapid Voltage Changes in Power System Networks and Their Effect on Flicker,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 31, Nr. 1, S. 262–270, 2016.
- [77] DIN EN 61000-2-2:2020-05, *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 2-2: Umgebungsbedingungen - Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen*.
- [78] J. Schlabbach, E. Blum und T. Stephanblome, *Voltage Quality in Electrical Power Systems*, Ser. IEE power and energy series. London: Institution of Electrical Engineers, 2001, Bd. 36, S. 115–116.
- [79] W. Mombauer, *Flicker in Stromversorgungsnetzen – Messung, Berechnung, Kompensation*, Ser. VDE-Schriftenreihe Normen verständlich. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2005, Bd. 110.
- [80] DIN EN 61000-3-3:2014-03, *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-3: Grenzwerte – Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom ≤ 16 A je Leiter, die keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen*.
- [81] VDN (D-A-CH-CZ), *Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen*, 2007.
- [82] M. Albach, *Grundlagen der Elektrotechnik*, 3., aktualisierte Aufl. München: Pearson Studium, 2011.
- [83] A. J. Schwab, *Begriffswelt der Feldtheorie: Elektromagnetische Felder, Maxwell-Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [84] H. Kuchling, *Physik: Formeln und Gesetze*. Augsburg: Bechtermünz, 1997, S. 386.
- [85] E. Ivers-Tiffée und W. von Münch, *Werkstoffe der Elektrotechnik*. Wiesbaden: Teubner, 2007, Kap. 6, S. 189–199.
- [86] DIN 1324-2:1988-05, *Elektromagnetisches Feld – Materialgrößen*.
- [87] E. Döring, “Magnetische Leitfähigkeit,” in *Handbuch Elektrotechnik*, W. Pläßmann und D. Schulz, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 279–284.

- [88] E. Döring, “Magnetika,” in *Handbuch Elektrotechnik*, W. Pläßmann und D. Schulz, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 285–292.
- [89] W. Hartel und H. Dietz, *Transduktorschaltungen: Grundlagen und Wirkungsweise*. Berlin: Springer, 1966.
- [90] W. Schilling, *Transduktortechnik: Theorie und Anwendung steuerbarer Drosseln*. München: R. Oldenbourg, 1960.
- [91] A. Dimitrovski, Z. Li und B. Ozpineci, “Magnetic Amplifier-Based Power-Flow Controller,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 30, Nr. 4, S. 1708–1714, 2015.
- [92] E. Hirota, Y. Neichi und M. Sugimura, “Variable Inductance Device,” Patentschrift US3631534A, 1971.
- [93] A. S. Kislovski, “Quasi-Linear Controllable Inductor,” in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, San Diego, USA, 1987.
- [94] D. Medini und S. Ben-Yaakov, “A Current-Controlled Variable-Inductor for High Frequency Resonant Power Circuits,” in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Orlando, USA, 1994.
- [95] L. J. Johnson, “Current Controlled Variable Inductor,” Patentschrift US5426409A, 1995.
- [96] F. Guihong, W. Fengxiang und W. Jin, “Design Principles of Magnetically Controlled Reactor,” in *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Shenyang, China, 2001.
- [97] E. Haugs und F. Strand, “Magnetically Controlled Inductive Device,” Patentschrift US7026905B2, 2006.
- [98] R. Lerch, *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*, 7., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016, S. 88.
- [99] Y. Xin, H. Hui, W. Z. Gong, F. Ye, J. Z. Wang, B. Tian, A. L. Ren und M. R. Zi, “Superconducting Cable and Superconducting Fault Current Limiter at Puji Substation,” in *International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Chengdu, China, 2009.

-
- [100] F. Moriconi, F. de La Rosa, F. Darmann, A. Nelson und L. Masur, “Development and Deployment of Saturated-Core Fault Current Limiters in Distribution and Transmission Substations,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Jg. 21, Nr. 3, S. 1288–1293, 2011.
- [101] M. A. Young II, “Saturable Reactor for Power Flow Control in Electric Transmission Systems: Modeling and System Impact Study,” Dissertation, University of Tennessee, 2015.
- [102] R. N. Jenipher und K. V. Chandrakala, “Magnetically Controlled Reactor Based Harmonic and Voltage Profile Improvement in Long Transmission Lines,” in *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies*, Vellore, Indien, 2017.
- [103] A. Huzayyin, “Utilizing the Nonlinearity of a Magnetic Core Inductor as a Source of Variable Reactive Power Compensation in Electric Power Systems,” in *IEEE Student Paper Conference*, Aalaborg, Denmark, 2008.
- [104] M. Xianmin, Z. Suli, W. Jianze und J. Yanchao, “Novel Static Var Compensator Based on Ferrite Orthogonal Core Controlled Reactor,” in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai, India, 2006.
- [105] L. Zhang, W. G. Hurley und W. H. Wölflé, “A New Approach to Achieve Maximum Power Point Tracking for PV System With a Variable Inductor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Jg. 26, Nr. 4, S. 1031–1037, 2011.
- [106] *Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung (Niederspannungsanschlussverordnung - NAV) vom 01. November 2006 (BGBl. I S. 2477). Zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 30. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2269), in Kraft getreten am 6. November 2020.*
- [107] M. Dietmannsberger und D. Schulz, *Wirksame Verfahren zur Inselnetzerkennung in 0,4-kV-Netzen*, Studie im Auftrag des Forums Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), 2015.
- [108] W. Freitas, Z. Huang und W. Xu, “A Practical Method for Assessing the Effectiveness of Vector Surge Relays for Distributed Generation Applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Jg. 20, Nr. 1, S. 57–63, 2005.
- [109] B. Oswald, *Vorlesung Elektrische Energieversorgung I – Skript Transformatoren*, Universität Hannover, Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Hannover, 2005.

- [110] J. Lunze, *Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*, 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016, Kap. 5, S. 219.
- [111] J. Lunze, *Regelungstechnik 1 – Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*, 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016, Kap. 13, S. 588.
- [112] J. Adamy, *Nichtlineare Systeme und Regelungen*, 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018, Kap. 4, S. 245–258.
- [113] M. A. A. Murad, A. Ortega und F. Milano, “Impact on Power System Dynamics of PI Control Limiters of VSC-Based Devices,” in *Power Systems Computation Conference*, Dublin, Irland, 2018.
- [114] J. Federau, *Operationsverstärker – Lehr- und Arbeitsbuch zu angewandten Grundsaltungen*, 7. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, Kap. 2, S. 65–70.
- [115] W. G. Hurley und W. H. Wölfle, *Transformers and Inductors for Power Electronics - Theory, Design and Applications*. Chichester, Vereinigtes Königreich: Wiley-Blackwell, 2013, Kap. 8, S. 228–230.

Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis

Wissenschaftliche Publikationen

- [P1] M. Holt, J. Massmann und C. Rehtanz, “Survey results on High Power Charging in Low Voltage Grids,” in CIRED Workshop, Porto, Portugal, 2022 (in Bearbeitung)
- [P2] T. Schwarz, M. Holt, J. von Haebler und C. Rehtanz, “High Power Charging: Integration strategy in low-voltage grids using batteries storage sytems,” in CIRED Workshop, Porto, Portugal, 2022 (in Bearbeitung)
- [P3] R. Jahn, M. Holt und C. Rehtanz, “Mitigation of Voltage Unbalances Using a Line Voltage Regulator,” in IEEE PES PowerTech, Madrid, Spanien, 2021
- [P4] M. Holt und C. Rehtanz, “Optimizing Line-Voltage-Regulators with regard to Power Quality,” in Power Systems Computation Conference, Porto, Portugal, 2020
- [P5] G. Grosse-Holz, M. Holt und M. Richter, “Stufenlos ausgeregelt – Spannungshaltung im Netz von morgen,” Netzpraxis, Heft 7-8, Juli 2020
- [P6] M. Holt, J. Claus, M. Kosch, G. Schulz, M. Greve, C. Wagner, D. Hilbrich, J. Massmann und C. Rehtanz, “A General Load Management System for the Low Voltage Grid – Motivation, Concept, Basics,” in CIRED Workshop, Berlin, Deutschland, 2020
- [P7] M. Holt, G. Grosse-Holz und C. Rehtanz, “Line Voltage Regulation in Low Voltage Grids,” in CIRED Workshop, Ljubljana, Slowenien, 2018
- [P8] A. Spina, K. Rauma, C. Aldejohann, M. Holt, J. Maasmann, P. Berg, F. Rettberg und C. Rehtanz, “Smart Grid Technology Lab - A Full-Scale Low Voltage Research Facility at TU Dortmund University,” in AEIT International Annual Conference, Bari, Italien, 2018
- [P9] M. Holt, J. Maasmann und C. Rehtanz, “Line Voltage Regulator based on Magnetic-Controlles Inductors for Low Voltage Grids” in CIRED – International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, United Kingdom, 2017

Betreute wissenschaftliche Arbeiten

- [A1] S. Joseph, Entwicklung eines markt- und netzorientierten Lademanagement-Algorithmus für öffentliche Ladeinfrastrukturen, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2022 (Co-Betreuung)

- [A3] T. Schwarz, High-Power-Charging: Integrationsstrategien für Niederspannungsnetze, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2021
- [A2] L. Kückelhaus, Implementierung netzdienlicher Steuerungs- und Energiemanagement-Funktionen des Verteilnetzbetreibers über die Smart Meter Gateway Architektur nach BSI TR 03109, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2021 (Co-Betreuung)
- [A4] R. Jahn, Einsatz eines Niederspannungslängsreglers zur Behebung von Spannungsunsymmetrien hervorgerufen durch Elektromobilität und dezentrale Energieerzeugung, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2020
- [A5] A. Abdi, Stabilitätsuntersuchung eines Spannungslängsreglers mit nichtlinearem Verhalten in MATLAB Simulink, Bachelorarbeit, ie³, TU Dortmund, 2019
- [A6] J. Spinneken, Modellierung eines Photovoltaikmoduls auf einem Echtzeitsimulator für netztechnische Untersuchungen von PV-Anlagen mittels PHIL Verfahren, Bachelorarbeit, ie³, TU Dortmund, 2018 (Co-Betreuung)
- [A7] R. Jahn, Modellierung und Optimierung einer Transduktorschaltung, Bachelorarbeit, ie³, TU Dortmund, 2018
- [A8] H. Hartmann, Optimierung des Oberwellenverhaltens eines dreiphasigen Spannungslängsreglers, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2018
- [A9] S. Gossmann, Entwicklung einer Einzelphasenregelung für Niederspannungslängsregler, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2017

Beitrag zu Forschungsprojekten

- [FP1] ULN: Universelles Leistungsmanagement in der Niederspannung
- [FP2] HPC – UKF: Umweltfreundliches, Kundenfreundliches und Flächendeckendes High Power Charging
- [FP3] NOX-Block: NOX-Reduzierung durch den Aufbau einer leistungsfähigen Low-Cost-Ladeinfrastruktur in Dortmund, Schwerte, Iserlohn
- [FP5] SGTL: Smart Grid Technology Lab – Entwicklungs- und Prüfumgebung für Smart Grid Technologien
- [FP6] InLiNe: Innovative Spannungsregelung in der Niederspannung

Vorausgegangene wissenschaftliche Arbeit

- [M1] M. Holt, Erforschung eines Simulations- und Messkonzeptes für Niederspannungslängsregler, Masterarbeit, ie³, TU Dortmund, 2016

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (engl.: Alternating Current)
DC	Gleichstrom (engl.: Direct Current)
HS	Hochspannung
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PEN-Leiter	Schutz- und Neutralleiter (engl.: Protective Earth Neutral)
PV	Photovoltaik
RONT	regelbarer Ortsnetztransformator
SR	Strangspannungsregler
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TN-C	Netztopologie mit kombiniertem Schutz- und Neutralleiter (frz.: Terre Neutre Combiné)
VI	variable Induktivität
VI_{By}	variable Bypassinduktivität
VI_{Dr}	variable Drosselinduktivität

Symbolverzeichnis

Symbole

A	m^2	Querschnittsfläche
\vec{A}	m^2	Vektor der Querschnittsfläche
B	T	magnetische Flussdichte
\vec{B}	T	Vektor der magnetischen Flussdichte
B_r	T	Remanenzflussdichte
C		Übertragungsfunktion des Reglers
F		Übertragungsfunktion der offenen Regelstrecke
\tilde{G}		geforderte Übertragungsfunktion der geschlossenen Regelstrecke
H	A/m	magnetische Feldstärke
\vec{H}	A/m	Vektor der magnetischen Feldstärke
H_k	A/m	Koerzitivfeldstärke
I	A	Strom
\underline{I}	A	komplexer Strom
\bar{I}	V	Sollwert des Stroms
\bar{I}	A	Strommittelwert
\dot{I}	A	Ableitung des Stroms über die Zeit
K	1	Verstärkungsfaktor
k	1	Anteil vom Gesamtwert
k_u	%	Unsymmetriefaktor der Spannung
L	H	Induktivität
l	m	Länge
\vec{l}	m	Längenvektor
N	1	Windungszahl
P	W	Wirkleistung
P_{lt}	1	Langzeitflickerstärke
P_{st}	1	Kurzzeitflickerstärke
Q	VAr	Blindleistung
R	Ω	Widerstand
S	W	Scheinleistung
s	1/s	Laplace-Faktor
t	s	Zeit
THD	%	Gesamtoberschwingungsgehalt
U	V	Spannung
\underline{U}	V	komplexe Spannung
\bar{U}	V	Sollwert der Spannung
\hat{U}	V	Spannungsscheitelwert

U_i	V	Induktionsspannung
\ddot{u}	1	Übersetzungsverhältnis
X	Ω	Reaktanz
Z	Ω	Impedanz
\underline{Z}	Ω	komplexe Impedanz
ΔU	V	Spannungsänderung
μ	N/A ²	Permeabilität
μ_0	N/A ²	magnetische Feldkonstante
μ_r	1	Permeabilitätszahl
τ	s	Zeitkonstante
Φ	Wb	magnetischer Fluss
φ	°	Leistungswinkel
Ψ	Wb	verketteter Fluss

Indizes

A	Eingangsseite
AC	Wechselstrom
aus	Ausschaltswelle
B	Ausgangsseite
By	variable Bypassinduktivität
DC	Gleichstrom
dif	differentiell
Dr	variable Drosselinduktivität
dyn	dynamische Sollwertvorgabe
eff	Effektivwert
ein	Einschaltswelle
End	Leitungsende
est	Schätzwert
fe	Eisenverluste
fest	feste Sollwertvorgabe
ges	Gesamtwert
h	Hauptwert
hyst	Schalthysterese
I	Strom
i	Laufvariable
initial	Initialwert
K	Kabel
KS	Kurzschluss
L	Leitung
Last	Lastfall

max	Maximalwert
min	Minimalwert
N	Nennwert
n	Endwert
P	Primärseite
peak	Spitzenwert
Q	Querweig
S	Sekundärseite
Speisung	Einspeisefall
SR	Strangspannungsregler
T	Transformator
tot	Verzögerung
U	Spannung
VI	variable Induktivität
w	Wicklung
σ	Streuung
τ	Zeitkonstante

Abbildungsverzeichnis

2.1	Typische Spannungsbandaufteilung für ein last- und einspeisegeprägtes MS- und NS-Netz nach [10]	6
2.2	Streudiagramm realer Niederspannungsstränge und Markierung der Leitungslängen, ab denen es aufgrund von Spannungsbandproblemen zu einer Einschränkung der Übertragungskapazität einer Leitung kommt unter Berücksichtigung der verschiedenen spannungshaltenden Maßnahmen	13
2.3	Spannungsverlauf entlang eines beispielhaften Netzausläufers mit Strangspannungsregler	14
2.4	Wirkungsweise eines Strangspannungsreglers	
	a) Einphasiger Aufbau	
	b) Spannungszeiger	15
2.5	Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einer Transformator-kaskade	16
2.6	Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einem Stelltransformator	17
2.7	Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers bestehend aus einem Stelltransformator parallel zum Längstransformator entsprechend [44]	18
2.8	Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers basierend auf einer Umrichterschaltung	19
2.9	Einphasige Darstellung eines Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität, entsprechend [67]	21
2.10	Magnetisierungskurven für ein ferro- oder ferrimagnetisches Material	
	a) Neukurve	
	b) Hystereseschleife	31
2.11	Einfache Aufbauform einer sättigbaren Drosselspule	33
2.12	Aufbau einer variablen Induktivität mit Dreischenkelkern	33
2.13	Variable Induktivität mit Toroidkern	
	a) Aufbau	
	b) magnetischer Flussverlauf	34
2.14	$\Psi(I)$ -Hysteresekurven für verschiedene Betriebspunkte einer variablen Induktivität	36

3.1	Einphasige Darstellung des einfachen Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität	39
3.2	Einphasige Ersatzschaltbilder des einfachen Strangspannungsreglers mit variabler Induktivität	
	a) Spannungsanhebender Betrieb	
	b) Spannungsabsenkender Betrieb	41
3.3	Laboraufbau zur Untersuchung verschiedener Netzsituationen	45
3.4	Einphasiger Laboraufbau der Kurzschlussmessung	45
3.5	Schaltskizze für den Laboraufbau des einfachen Spannungslängsreglers mit variabler Induktivität	46
3.6	Signale der Eingangsspannung U_A , Ausgangsspannung U_B und Sekundärspannung am Längstransformator U_S für verschiedene DC-Steuerströme $\bar{I}_{DC,VI}$ im spannungsanhebenden Betrieb	47
3.7	Verhalten der variablen Induktivität	
	a) $\Psi(I)$ -Kurven für den Kern der variablen Induktivität aus Sicht der AC-Wicklung für unterschiedliche DC-Steuerströme	
	b) statische AC-Induktivität L_{VI} in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$	48
3.8	Gesamtoberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$ und zwei ausgewählte Frequenzspektren der Ausgangsspannung U_B ; (\hat{U} : Scheitelwert der Oberschwingungsspannung bezogen auf den Scheitelwert der Grundschwingung)	49
3.9	Spannungsänderung ΔU in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$ für den spannungsanhebenden Betrieb im unbelasteten Zustand . .	50
3.10	Kurzschlussimpedanz $Z_{SR,KS}$ des Strangspannungsreglers in Abhängigkeit vom DC-Steuerstrom $\bar{I}_{DC,VI}$	53
3.11	Verläufe für die Spannungsänderung ΔU , den Gesamtoberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B} und den Effektivwert des Querstroms $I_{Q,eff}$ im spannungsanhebenden Betrieb bei unterschiedlichen Lastsituationen	55
3.12	DC-Spannungssprünge und die resultierenden Sprungantworten des DC-Steuerstroms $I_{DC,VI}$ in der DC-Steuerwicklung der variablen Induktivität	57
4.1	Einphasige Darstellung des Strangspannungsreglers mit zwei variablen Induktivitäten im Querzweig in Anlehnung an [P7]	67

4.2	Einphasige Ersatzschaltbilder des netzrückwirkungsarmen Strangspannungsreglers	
	a) Spannungsanhebender Betrieb	
	b) Spannungsabsenkender Betrieb	69
4.3	Ersatzschaltbilder für die Anwendung des Überlagerungsprinzips	
	a) Relevanter Ausschnitt des einphasigen Ersatzschaltbildes	
	b) Ersatzschaltbild für den Fall $I_Q = 0$	
	c) Ersatzschaltbild für den Fall $\frac{1}{u} \cdot I_A = 0$	71
4.4	Dreiphasige Darstellung der Variante 2	76
4.5	Einphasige Schaltskizze des generellen Laboraufbaus der Varianten .	78
4.6	Kennfeldgruppe der Variante 1 inklusive Ansteuerungskennlinie	
	a) Spannungsänderung ΔU ($\Delta U = U_{B,\text{eff}} - U_{A,\text{eff}}$)	
	b) Kurzschlussimpedanz $Z_{SR,KS}$	
	c) Gesamtüberschwingungsgehalt der Ausgangsspannung THD_{U_B}	
	d) Effektivwert des Querstroms $I_{Q,\text{eff}}$	81
4.7	Verläufe der Spannungsänderung ΔU , des Gesamtüberschwingungsgehalts der Ausgangsspannung THD_{U_B} und des Querstromeffektivwertes $I_{Q,\text{eff}}$ unter Verwendung der Ansteuerungskennlinie für Variante 1	83
4.8	ΔU -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Ansteuerung	85
4.9	$Z_{SR,KS}$ -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Spannungsänderung ΔU	86
4.10	THD_{U_B} -Verläufe der Prototypen in Abhängigkeit von ihrer Spannungsänderung ΔU	87
5.1	Kennlinien der AC-Impedanzen	
	a) AC-Impedanz der Drosselinduktivität $Z_{Dr}(I_{DC,Dr})$	
	b) AC-Impedanz Parallelschaltung $Z_P(I_{DC,By})$	98
5.2	Ersatzschaltbild der DC-Steuerwicklung	100
5.3	Induktives Verhalten der DC-Steuerwicklung	
	a) Sprungantwort des DC-Steuerstroms I_{DC}	
	b) Kennlinie der DC-Steuerwicklungsinduktivität L_{DC}	101
5.4	Regelstreckenmodell des SR	102
5.5	Signalflussplan des vollständigen Regelsystems	103
5.6	Anti-Windup Maßnahme am PI-Regler mit Rückkopplung und Verstärkungsglied	107
5.7	Schematischer Aufbau der Laborumsetzung	109

5.8	Spannungssprünge von U_A und Sprungantwort von U_B	
	a) Sprungantworten für Sprünge mit unterschiedlicher Höhe	
	b) Sprungantworten für Sprünge mit unterschiedlicher Startspannung	110
5.9	Unterlagerter Netzausläufer mit mehreren Lasten und/oder Einspeisungen	113
6.1	Testnetzes zur Erprobung der Strangspannungsregler	120
6.2	Einphasige Wirkleistungseinspeisung $P_{B,eff}$ und die resultierenden Spannungseffektivwerte $U_{B,eff}$ an Knoten (B) für die verschiedenen Aufbauten	122
6.3	Übersichtsplan des für den Feldtest ausgewählten Netzausläufers . .	125
6.4	Strom- und Spannungsverläufe entlang des Netzausläufers	
	a) Stromverlauf für die Ausgangslage	
	b) Spannungsverlauf für die Ausgangslage	
	c) Spannungsverlauf bei einer Blindleistungsaufnahme durch die PV-Anlagen mit einem Verschiebungsfaktor PF von 0,9	
	d) Spannungsverlauf für den Einsatz des Strangspannungsreglers . .	127
6.5	Übersichtsplan des Netzausläufers mit Strangspannungsregler	130
6.6	Leistungs- und Spannungseffektivwerte für einen sonnigen Märztag: Wirkleistung $P_{A,eff}$, Blindleistung $Q_{A,eff}$ und Sternspannung $U_{A,eff}$ an Knoten (A); Sternspannung $U_{B,eff}$ an Knoten (B); Spannungsänderung ΔU ($\Delta U = U_{B,eff} - U_{A,eff}$)	132
6.7	Violinen-Diagramme für die Feldmessung ohne und mit Strangspannungsregler: Wirkleistung P_{eff} , Blindleistung Q_{eff} , Sternspannung U_{eff}	135
6.8	Violinen-Diagramme für die Feldmessung ohne und mit Strangspannungsregler: Langzeit-Flickerstärke P_{lt} , Gesamtoberschwingungsgehalt der Spannung THD_U , Unsymmetriefaktor der Spannung k_u	137

Tabellenverzeichnis

3.1	Kenndaten zum Netzanschluss	58
3.2	Kenndaten zur Kurzschlussimpedanz	59
3.3	Kenndaten des Spannungsregelbereichs	60
3.4	Kenndaten zum dreiphasigen Leistungsbedarf und Wirkungsgrad . .	62
3.5	Kenndaten zur Oberschwingungsemission	62
4.1	Kenndaten zum Netzanschluss für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten	88
4.2	Kenndaten zur Kurzschlussimpedanz für die drei netzrückwirkungs- armen Varianten	89
4.3	Kenndaten des Spannungsregelbereichs für die drei netzrückwirkungs- armen Varianten	91
4.4	Kenndaten zum dreiphasigen Leistungsbedarf und Wirkungsgrad für die drei netzrückwirkungsarmen Varianten	92
4.5	Kenndaten zur Oberschwingungsemission für die drei netzrückwir- kungsarmen Varianten	93
5.1	Empfehlungen für die Festlegung der Regelparameter	115
6.1	Spannungsqualität im Testnetz für die verschiedenen Aufbauten . . .	124

A Anhang

A.1 Elektrische Kenndaten

Kenndaten der Längstransformatoren

Die Kenndaten basieren auf Herstellerangaben und eigenen Messungen. Die Vermessung erfolgt über Leerlauf- und Kurzschlussmessungen entsprechend [115]. Zudem werden die Wicklungswiderstände über DC-Messungen bei einem Strom von knapp 5 A ermittelt.

Transformator mit Toroidkern	
Längstransformator vom Prototypen des einfachen SR mit VI und von den Variante 1 und 2 des netzrückwirkungsarmen SR	
Frequenz	50 Hz
Übersetzungsverhältnis N_P/N_S	9, 8/1
Übersetzungsverhältnis $N_P/N_S/N_T^*$	9, 8/1/9, 8
Primärseite	
Nennspannung $U_{P,N}$	200 V
Nennstrom $I_{P,N}$	19,9 A
Wicklungswiderstand R_P	0,137 Ω
Streureaktanz $X_{P,\sigma}$	0,036 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{P,h}$	0,480 Ω
Hauptreaktanz $X_{P,h}$	15,367 Ω
Sekundärseite	
Nennstrom $I_{S,N}$	1 A
Wicklungswiderstand R_S	0,001 Ω
Streureaktanz $X_{S,\sigma}$	<0,0003 Ω
Tertiärseite*	
Nennspannung $U_{T,N}^*$	200 V
Nennstrom $I_{T,N}^*$	19,9 A
Wicklungswiderstand R_T^*	0,165 Ω
Streureaktanz $X_{T,\sigma}^*$	0,036 Ω

* Angaben gelten nur für den Transformator mit Tertiärwicklung in Variante 2

Tabelle A.1 Kenndaten des Toroidkerntransformators

Dreiphasentransformator mit Dreischenkelkern	
Längstransformator von der Variante 3 des netzrückwirkungsarmen SR	
Frequenz	50 Hz
Übersetzungsverhältnis N_P/N_S	10/1
Primärseiten	
Nennspannung $U_{P,N}$	230 V
Nennstrom $I_{P,N}$	19,9 A
Wicklungswiderstand $R_{P,w}$	0,136 Ω
Streureaktanz $X_{P,\sigma}$	0,045 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{P,h}$	0,450 Ω
Hauptreaktanz $X_{P,h}$	16,00 Ω
Sekundärseiten	
Nennstrom $I_{S,N}$	197 A
Wicklungswiderstand $R_{S,w}$	0,001 Ω
Streureaktanz $X_{S,\sigma}$	<0,0004 Ω

Tabelle A.2 Kenndaten des Dreiphasentransformators mit Dreischenkelkern

Kenndaten der variablen Induktivitäten

Die Kenndaten basieren auf Herstellerangaben und eigenen Messungen. Die Vermessung der VIs erfolgt im Betrieb für den Zustand bei keiner und bei maximaler DC-Ansteuerung. Die Vermessung bei keiner Ansteuerung erfolgt unter AC-Nennspannung; für die Vermessung bei maximaler Ansteuerung wird der AC-Nennstrom eingestellt. Zusätzlich werden die Wicklungswiderstände über DC-Messungen ermittelt. Die AC-Wicklungswiderstände werden dabei über einem DC-Strom von knapp 5 A bestimmt und die DC-Wicklungswiderstände über den jeweiligen DC-Nennstrom.

Variable Induktivitäten mit Toroidkern		
VI vom Prototypen des einfachen SR mit VI		
	AC-Wicklung	DC-Wicklung
Frequenz	50 Hz	0 Hz
Nennspannung $U_N U_{DC,max}$	230 V	70 V
Nennstrom $I_N I_{DC,max}$	19,9 A	1 A
Wicklungswiderstand $R_{VI,w} R_{DC}$	0,19 Ω	70 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{VI,fe}$	$\approx 2080 \Omega$	
Max. Reaktanz $X_{VI}(I_{DC} = 0 \text{ A})$	$\approx 3600 \Omega$	
Min. Reaktanz $X_{VI}(I_{DC} = I_{DC,max})$	3,2 Ω	
VI_{Dr} von den Variante 1 und 2 des netzrückwirkungsarmen SR		
	AC-Wicklung	DC-Wicklung
Frequenz	50 Hz	0 Hz
Nennspannung $U_N U_{DC,max}$	230 V	90 V
Nennstrom $I_N I_{DC,max}$	19,9 A	1 A
Wicklungswiderstand $R_{Dr,w} R_{DC}$	0,16 Ω	90 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{By,fe}$	$\approx 1500 \Omega$	
Max. Reaktanz $X_{Dr}(I_{DC} = 0 \text{ A})$	$\approx 1800 \Omega$	
Min. Reaktanz $X_{Dr}(I_{DC} = I_{DC,max})$	4,8 Ω	
VI_{By} von den Variante 1 und 2 des netzrückwirkungsarmen SR		
	AC-Wicklung	DC-Wicklung
Frequenz	50 Hz	0 Hz
Nennspannung $U_N U_{DC,max}$	190 V	90 V
Nennstrom $I_N I_{DC,max}$	19,9 A	1 A
Wicklungswiderstand $R_{By,w} R_{DC}$	0,11 Ω	90 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{By,fe}$	$\approx 1400 \Omega$	
Max. Reaktanz $X_{By}(I_{DC} = 0 \text{ A})$	$\approx 1600 \Omega$	
Min. Reaktanz $X_{By}(I_{DC} = I_{DC,max})$	2,5 Ω	

Tabelle A.3 Kenndaten der variablen Induktivitäten mit Toroidkern

Variable Induktivität mit Dreischenkeln		
VI_{Dr} und VI_{By} von der Variante 3 des netzrückwirkungsarmen SR		
	AC-Wicklung	DC-Wicklung
Frequenz	50 Hz	0 Hz
Nennspannung $U_N \mid U_{DC,max}$	230 V	27 V
Nennstrom $I_N \mid I_{DC,max}$	19,9 A	2 A
Wicklungswiderstand $R_{By,Dr,w} \mid R_{DC}$	0,25 Ω	13,3 Ω
Eisenverlustwiderstand $R_{By,Dr,fe}$	$\approx 1970 \Omega$	
Max. Reaktanz $X_{By,Dr}(I_{DC} = 0 \text{ A})$	$\approx 1800 \Omega$	
Min. Reaktanz $X_{By,Dr}(I_{DC} = I_{DC,max})$	4,5 Ω	

Tabelle A.4 Kenndaten der variablen Induktivität mit Dreischenkeln

A.2 Kenndatenberechnung für die Strangspannungsregler

Systemgleichungen in Abhängigkeit von den Ausgangsgrößen

Die Berechnung der Kenndaten von den Prototypen des einfachen SR mit VI und des netzrückwirkungsarmen SR erfolgt über die Vorgabe der Ausgangsspannung \underline{U}_B und des Ausgangsstroms \underline{I}_B sowie über die Impedanzangaben der jeweiligen Komponenten, die aus Anhang A.1 entnommen werden können. Die in der Arbeit hergeleiteten Systemgleichungen der SRs berechnen sich jedoch über die Vorgaben der Eingangsspannung \underline{U}_A und des Eingangsstroms \underline{I}_A , weswegen die Gleichungen entsprechend umgestellt werden müssen. Nachstehend erfolgt die Umstellung am Beispiel des einfachen SR mit VI für den spannungsanhebenden Betrieb.

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist der Zusammenhang der Ströme wie folgt:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_Q \quad (\text{A.1})$$

Das Einsetzen von Formel A.1 in Formel 3.9 und Umstellen nach \underline{I}_Q liefert den Zusammenhang zwischen \underline{I}_Q und den Ausgangsgrößen:

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_B \cdot \frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})} \quad (\text{A.2})$$

Mit \underline{I}_Q lässt sich der Eingangsstrom \underline{I}_A über Formel A.1 berechnen. Ferner kann mit \underline{I}_Q und \underline{I}_A die Eingangsspannung \underline{U}_A über die folgende Formel berechnet werden, deren Herleitung in Kapitel 3.1.3 zu finden ist.

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} - \underline{Z}_{S,w} \right) \quad (\text{A.3})$$

Über dasselbe Vorgehen lassen sich die Gleichungen für den spannungsabsenkenden Betrieb sowie für die beiden Betriebsarten des netzrückwirkungsarmen SR bestimmen. Auf den folgenden Seiten werden die Gleichungen für die beiden Bauformen gelistet.

Einfacher SR mit VI

Spannungsanhebender Betrieb:

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_B \cdot \frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_Q$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} - \underline{Z}_{S,w} \right)$$

Spannungsabsenkender Betrieb:

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_B \cdot \frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI})}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B - \underline{I}_Q$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{VI}(I_{DC}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{S,w} \right)$$

Die Impedanzen in den Gleichungen setzen sich zusammen aus den folgenden Resistenzen und Reaktanzen, deren Werte für den einfachen SR mit VI in Tabelle A.1 und Tabelle A.3 gelistet sind.

Impedanzen:

$$\underline{Z}_{P,h} = R_{P,h} + j \cdot X_{P,h}$$

$$\underline{Z}_{S,w} = R_S + j \cdot X_{S,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{P,w} = R_P + j \cdot X_{P,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{VI}(I_{DC,VI}) = R_{VI,w} + \frac{R_{VI,fe} \cdot j \cdot X_{VI}(I_{DC,VI})}{R_{VI,fe} + j \cdot X_{VI}(I_{DC,VI})}$$

Zur Berechnung der Eingangsgrößen im initialen Ansteuerungszustand ist für die VI die maximale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,VI} = 0 \text{ A})$) zu wählen und für die Berechnung im maximalen Ansteuerungszustand die minimale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,VI} = I_{DC,max})$).

Netzurückwirkungsarmer SR

 Spannungsanhebender Betrieb:

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_B \cdot \frac{1}{\underline{u}} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{P,w} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \right)}{\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{vI}(I_{DC,vI})}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_Q$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) - \frac{\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} - \underline{Z}_{S,w} \right)$$

 Spannungsabsenkender Betrieb:

$$\underline{I}_Q = \frac{\underline{U}_B + \underline{I}_B \cdot \frac{1}{\underline{u}} \cdot \left(\frac{\underline{Z}_{P,w} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \right)}{\frac{\underline{u}-1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{vI}(I_{DC,vI})}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B - \underline{I}_Q$$

$$\underline{U}_A = \underline{I}_Q \cdot \left(\frac{\left(\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} \right) \cdot \underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{P,h}} + \underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) \right) - \underline{I}_A \cdot \left(\frac{\underline{u}+1}{\underline{u}^2} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) - \frac{\frac{1}{\underline{u}} \cdot \underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) \cdot \underline{Z}_{P,w}}{\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} + \underline{Z}_{S,w} \right)$$

 Impedanzen:

$$\underline{Z}_{P,IA}(I_{DC,By}) = \frac{(\underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})) \cdot \underline{Z}_{P,h}}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} \quad \underline{Z}_{P,h} = R_{P,h} + j \cdot X_{P,h}$$

$$\underline{Z}_{P,IQ}(I_{DC,By}) = \frac{(\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w}) \cdot \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})}{\underline{Z}_{P,h} + \underline{Z}_{P,w} + \underline{Z}_{By}(I_{DC,By})} \quad \underline{Z}_{P,w} = R_P + j \cdot X_{P,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{Dr}(I_{DC,Dr}) = R_{Dr,w} + \frac{R_{Dr,fe} \cdot j \cdot X_{Dr}(I_{DC,Dr})}{R_{Dr,fe} + j \cdot X_{Dr}(I_{DC,Dr})} \quad \underline{Z}_{S,w} = R_S + j \cdot X_{S,\sigma}$$

$$\underline{Z}_{By}(I_{DC,By}) = R_{By,w} + \frac{R_{By,fe} \cdot j \cdot X_{By}(I_{DC,By})}{R_{By,fe} + j \cdot X_{By}(I_{By,Dr})}$$

Für die Variante 1 und 2 des netzrückwirkungsarmen SR sind die Werte der Resistenzen und Reaktanzen in Tabelle A.1 sowie in Tabelle A.3 und für die Variante 3 des netzrückwirkungsarmen SR in Tabelle A.2 sowie Tabelle A.4 gelistet. Zur Berechnung der Eingangsgrößen im initialen Ansteuerungszustand ist für die VI_{Dr} die maximale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,Dr} = 0 A)$) und für die VI_{By} die minimale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,By} = I_{DC,max})$) zu wählen. Für die Berechnung im maximalen Ansteuerungszustand gilt es hingegen für die VI_{Dr} die minimale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,Dr} = I_{DC,max})$) und für die VI_{By} die maximale Reaktanz ($X_{VI}(I_{DC,By} = 0 A)$) zu verwenden.

Berechnung des Spannungsregelbereichs

Der Spannungsregelbereich wird durch die initiale Spannungsänderung $\Delta U_{initial}$ und die maximale Spannungsänderung ΔU_{max} aufgespannt, wobei die Spannungsänderung ΔU allgemein aus der Differenz zwischen den Effektivwerten der Ausgangs- und Eingangsspannung berechnet wird. Bei der Berechnung mit komplexen Größen gilt es daher die Absolutwerte von \underline{U}_A und \underline{U}_B zu verwenden.

$$\Delta U = |\underline{U}_B| - |\underline{U}_A| \quad (A.4)$$

Berechnung des dreiphasigen Leistungsbedarfs

Der AC-Leistungsbedarf lässt sich über die in den SR hineinfließende Leistung abzüglich der aus dem SR herausfließenden Leistung bestimmen. Die komplexe Leistung am Eingang \underline{S}_A und am Ausgang \underline{S}_B berechnen sich wie folgt:

$$\underline{S}_A = \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* \quad (A.5)$$

$$\underline{S}_B = \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* \quad (A.6)$$

In der Regel ist die Leistungsflussrichtung für den spannungsanhebenden Betrieb von der Eingangs- zur Ausgangsseite gerichtet und für den spannungsabsenkenden Betrieb von der Ausgangs- zur Eingangsseite. Daher berechnet sich der komplexe AC-Leistungsbedarf \underline{S}_{AC} typischerweise für die beiden Betriebsweisen wie folgt:

$$\text{Spannungsanhebender Betrieb: } \underline{S}_{AC} = \underline{S}_A - \underline{S}_B \quad (A.7)$$

$$\text{Spannungsabsenkender Betrieb: } \underline{S}_{AC} = -\underline{S}_A + \underline{S}_B \quad (A.8)$$

Zudem treten Verluste in den DC-Wicklungen der VIs auf, die im Zustand maximaler Ansteuerung am größten sind. Die Verlustleistung einer DC-Wicklung berechnet sich über den DC-Steuerstrom I_{DC} und dem Wicklungswiderstand R_{DC} entsprechend der nachstehenden Formel.

$$P_{DC} = I_{DC}^2 \cdot R_{DC} \quad (\text{A.9})$$

Im Falle von keiner Ansteuerung liegt demzufolge die DC-Verlustleistung einer VI bei 0 W. Bei maximaler Ansteuerung berechnet sich die DC-Verlustleistung einer VI über den maximalen Steuerstrom $I_{DC,\max}$. Die Angaben für die jeweilige VI können aus Anhang A.1 entnommen werden.

Der dreiphasige Leistungsbedarf des Initialzustands und des Zustands maximaler Ansteuerung berechnet sich für den einfachen SR demnach wie folgt:

$$\text{Initiale Ansteuerung: } \underline{S}_{SR,\text{initial}} = 3 \cdot \underline{S}_{AC,\text{initial}} \quad (\text{A.10})$$

$$\text{Maximale Ansteuerung: } \underline{S}_{SR,\max} = 3 \cdot (\underline{S}_{AC,\max} + P_{DC,VI,\max}) \quad (\text{A.11})$$

Bei der Berechnung des dreiphasigen Leistungsbedarfs des netzrückwirkungsarmen SR ist zu beachten, dass bei initialer Ansteuerung die VI_{By} maximal angesteuert wird. Folglich berechnet er sich wie nachstehend dargestellt.

$$\text{Initiale Ansteuerung: } \underline{S}_{SR,\text{initial}} = 3 \cdot (\underline{S}_{AC,\text{initial}} + P_{DC,VI_{By},\max}) \quad (\text{A.12})$$

$$\text{Maximale Ansteuerung: } \underline{S}_{SR,\max} = 3 \cdot (\underline{S}_{AC,\max} + P_{DC,VI_{Dr},\max}) \quad (\text{A.13})$$