Transientes Verhalten des rotierenden Erregersystems von Kraftwerksgeneratoren bei elektrischen Störfällen

Von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

von
Dipl.-Ing. Nader Ataei
Dortmund
2006

Hauptreferent: Prof.-Dr.-Ing. Dr.-Ing. S. Kulig
Korreferent: Prof.-Dr.-Ing. B. Kulicke
Tag der Einreichung:18.01.2006
Tag der mündlichen Prüfung: 09.05.2006

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Mechatronik der Universität Dortmund.

Mein ganz besonderer Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr. Dr. S. Kulig, für die Förderung und Unterstützung meiner Arbeit. Auch ermöglichte er mir die Mitarbeit an zahlreichen Industrieprojekten.

Herrn Prof. Dr. B. Kulicke gilt mein Dank für die freundliche Übernahme des Korreferats. Bei Herrn Prof. Dr. techn. K. Oberretl, Herrn Dr. Soter, Herrn Dr. Klocke, Herrn Dr. Drubel und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanke ich mich für ihre interessanten Anregungen und Diskussionen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Dr. H. Harders von der Siemens AG (KWU) danke ich für die Bereitstellung von Berechnungsdaten.

Frau Rojo bin ich für die Unterstützung bei der Anfertigung von Zeichnungen zu Dank verpflichtet. Zu weiterem Dank verpflichtet bin ich Herrn Dipl.-Ing. C. Pankauke und Herrn B. Huesmann für die Hilfe bei Textkorrekturarbeiten. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Finanzierung dieser Arbeit.

Meine Familie danke ich für die wertvolle Unterstützung während dieser Jahre.

Zusammenfassung

Zur Spannungsversorgung der Synchrongeneratoren in Kraftwerken werden je nach Leistungsanforderung und Baukonzept unterschiedliche Erregereinrichtungen verwendet. Das Erregersystem des Generators, das in der Regel aus Erregersynchronmaschinen und Gleichrichtern besteht, wurde bis jetzt in konventionellen Modellen durch regelungstechnische Blöcke mit nichtlinearen Kennlinien nachgebildet, die das Klemmenverhalten des Generators gut, aber die dynamischen Vorgänge innerhalb der Erregermaschinen nur zum Teil und mit groben Näherungen nachbilden können. Deshalb war es bisher nicht möglich, die Belastung der einzelnen Komponenten der Erregereinrichtungen und physikalische Kenngrößen innerhalb des Erregersystems zu bestimmen.

In dieser Arbeit wurde eine bürstenlose Erregerausführung für den Synchrongenerator am Netz untersucht, bei der die Erregereinrichtung aus zwei Synchronmaschinen als Haupt- und Hilfserreger und zwei Gleichrichterbrücken besteht.

Zur Durchführung dieser Untersuchung wurde ein dynamisches Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Wechselwirkungen zwischen Netz, Generator und Erregereinrichtung unter Berücksichtigung elektromagnetischer und galvanischer Kopplung berechnet werden können. Hierzu werden die oben genannten regelungstechnischen Blöcke durch physikalische Komponenten des Erregersystems, wie elektrische Erregermaschinen und Gleichrichter, ersetzt.

Die Studie wurde mithilfe des Siemens-Programms NETOMAC durchgeführt, in dem tief gehende Erweiterungen vorgenommen wurden, um Maschinen und Netz mit unterschiedlichen Frequenzen miteinander zu verbinden.

Mit diesem Simulationsmodell konnten Erkenntnisse über die Beanspruchung einzelner Bauelemente der Erregereinrichtung bei inneren und äußeren Fehlern gewonnen werden. Insbesondere wurden die Beanspruchungen in Wicklungen und Gleichrichtern bestimmt, wobei es sich hier vorwiegend um messtechnisch unzugängliche Ströme und Spannungen handelte.

Dank dieses erreichten Resultats kann die Erregereinrichtung im Hinblick auf ihre Ausfallsicherheit wesentlich genauer dimensioniert, und die eingesetzten Schutzeinrichtungen können besser eingestellt werden.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Dissertation ist die Erfassung sämtlicher dynamischer Vorgänge zwischen Erregermaschinen, Gleichrichtern, Generator und Netz, die sowohl durch äußere als auch innere Störfälle angeregt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 7
1.1 Spannungsversorgung von Turbogeneratoren 7
1.2 Stand der Technik 10
1.3 Vorgehen 14

2 Theoretische Grundlagen und Ausgangspunkte der Untersuchung 17
2.1 Maschinenarten der bürstenlosen Erregung 17
2.1.1 Generator 18
2.1.2 Haupterregermaschine 23
2.1.3 Hilfserregermaschine 25
2.2 Mathematische Beschreibung 28
2.2.1 Direkte Differenzialgleichungen 29
2.2.2 Park'sches Modell der Synchronmaschine 34
2.2.3 Kettenleitermodell 40
2.3 Erregersysteme der Synchronmaschine 42
2.3.1 Statische Erregersysteme (ST) 44
2.3.2 Erregersysteme mit Gleichstrommaschinen (DC) 45
2.3.3 Drehstromerregersysteme (AC) 46
2.4 Gleichrichterschaltungen bei bürstenloser Erregung 50
2.4.1 Ungesteuerte Diodenbrückenschaltung der untersuchten Erregereinrichtung 57
2.4.2 Gesteuerte Thyristorenbrückenschaltung der untersuchten Erregereinrichtung 62

3 Drei-Maschinen-System 68
3.1 Aufbau des Drei-Maschinen-Systems 68
3.2 Erweiterung des Simulationsprogramms 69
3.2.1 Wichtige Eigenschaften des Simulationsprogramms 70
3.2.2 Verfahren zur Lösung der Differenzialgleichungen im Programm 72
3.2.3 Ablaufschema des Simulationsprogramms 74
3.2.4 Anwendung auf das Drei-Maschinen-System 77
3.3 Schaltungstechnischer Entwurf des Gesamtmodells 80
3.4 Kopplung des Generators mit der Haupt- und Hilfserregermaschine 83

4 Dynamisches Verhalten des Drei-Maschinen-Systems 85
4.1 Untersuchungsumfang 85
4.2 Wichtige repräsentative Berechnungsgrößen 86
4.3 Abgleich des Erregerkreises im stationären Zustand 87
4.4 Nennlastbetrieb 89
4.5 Stoßerregung 92
4.6 Störfälle außerhalb des Generators 95
4.6.1 Dreipoliger Kurzschluss an den Generatorklemmen 95
4.6.2 Fehlsynchronisierung 97
4.6.3 Dreipolige Netzkurzschlüsse 101
4.7 Störfälle innerhalb der Erregereinrichtung 104
4.7.1 Unterbrechung des Stroms in der Generatorerregerwicklung 105
4.7.2 Ausfall einer großen Anzahl von Dioden im rotierenden Gleichrichter 108
4.7.3 Zweipoliger Kurzschluss im Anker der Haupterregermaschine 111

5 Auswirkungen der untersuchten Störfälle 114
5.1 Vorgehensweise bei der Auswertung 114
5.2 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse 115

6 Schutz des Drei-Maschinen-Systems 119
6.1 Eigenschaften der Schutzeinrichtungen 119
6.2 Wichtige Schutzarten 119

7 Ausblick 126

8 Anhang 128

9 Literaturverzeichnis 131

Formelzeichen, Indizes und Schreibweisen 137

Lebenslauf 143

1 Einleitung

1.1 Spannungsversorgung von Turbogeneratoren

In Kraftwerken mit einer Leistung von einigen 100 MVA und mehr werden Generator, Haupt- und Hilfserregersynchronmaschine in der Regel auf einer gemeinsamen Welle montiert. Die drei Synchronmaschinen haben unterschiedliche Spannungen, Frequenzen und Leistungen. Um den Wartungsaufwand möglichst gering zu halten, wird das Drei-Maschinen-System (DMS) bürstenlos konzipiert. Das Bild 1.1 zeigt das Zusammenwirken der komplexen Teilsysteme bei der Energieumwandlung.

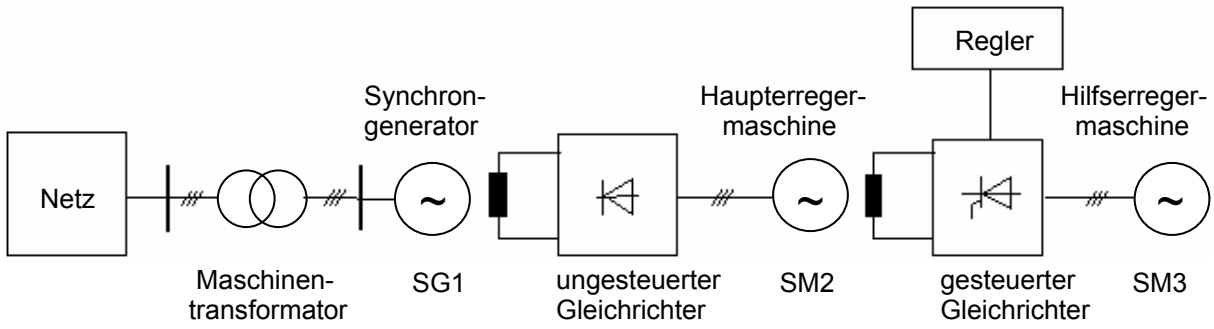


Bild 1.1: Zusammenwirken der Teilsysteme der Energieumwandlung

Die Dimensionierung der Erregereinrichtung ist von großer Bedeutung, deshalb ist das Interesse an der Ermittlung der dynamischen Abläufe innerhalb der Erregereinrichtung beträchtlich. Dieses Interesse ist umso größer bei bürstenloser Erregung großer Kraftwerksblöcke, da hier die Erregerspannung und der Erregerstrom auf dem rotierenden, ungesteuerten Gleichrichterrad sehr schwer messtechnisch erfasst werden können. Deshalb wird in dieser Arbeit aufgrund der genannten Problemstellungen das dynamische Verhalten des bürstenlosen Drei-Maschinen-Systems untersucht. Die Ausführung der bürstenlosen Erregung für die leistungsstarken Generatoren in großen Kraftwerken mit hohem Erregerstrom hat sich derzeit durchgesetzt. Dieser hohe Erregerstrom beträgt z.B. bei einem 400MVA-Generator im Nennbetrieb ca. 4 kA. Bei einem 2000MVA-Generator, der zurzeit gebaut wird, hat er einen Wert von über 10 kA.

Während transienter Vorgänge können diese Werte derart steigen, dass die Spannungsfestigkeiten und die hohe Strombelastbarkeit der Läuferwicklungen und der vorgeschalteten Gleichrichterbrücke überschritten werden können.
Die Leistung eines Synchrongenerators ist dem Produkt aus aktivem Läufervolumen, Strombelag und Luftspaltinduktion proportional. Je mehr Leistung ein Synchrongenerator bereitstellt, umso mehr benötigt er einen gleichgerichteten Erregerstrom. Obwohl der Bedarf an Erregerleistung für die Gleichspannungsversorgung des Synchrongenerators in der Regel nur ein bis drei Prozent der gesamten Generatorleistung ausmacht, kann ein Fehler in der Erregung des Generators zum Ausfall des Kraftwerks oder im Fall des Versagens des Maschinenschutzes zur Instabilität im benachbarten elektrischen Netz führen. Die Folgen sind Schäden und beträchtliche wirtschaftliche Verluste für die Kraftwerksbetreiber.
Für die korrekte Auslegung der Anlagen ist es zwingend notwendig, die wichtigsten Teilsysteme (Generator, Erregereinrichtung, Turbine und Netz), die das Betriebsverhalten der Synchronmaschinen maßgeblich beeinflussen, in einem gekoppelten Modell zu betrachten.
Dynamische Ausgleichsvorgänge, die in einem der Teilsysteme bedingt durch elektrische Störungen ausgelöst werden, können in den anderen Teilsystemen folgenschwere Wechselwirkungen hervorrufen.
Um spezielle Problemstellungen bei der Dimensionierung z.B. Spannungshaltung, thermische Belastbarkeit der einzelnen Maschinenbaugruppen und Stabilität zu lösen, sind Kenntnisse der genauen Stromverläufe innerhalb der einzelnen Maschinen unerlässlich. Die Ermittlung dieser Ströme ist besonders deswegen schwierig, weil es sich hier um unterschiedliche Maschinenarten und Gleichrichterbrücken handelt. Eine Abhilfe bei der Berechnung und Simulation schaffen bisher die Reglerblöcke, mit denen sich die beteiligten Systemkomponenten der Erregereinrichtung teilweise grob darstellen lassen. Eine solche Betrachtungsweise lässt jedoch die direkte Ermittlung der realen Belastung der einzelnen Bauelemente nicht zu.
Am Eingang des Spannungsreglers wird die Generatorklemmenspannung mit einem festen Soll-Wert verglichen, und am Ausgang des Reglers erhält man den Erregerspannungsverlauf. Im Simulationsprogramm wird diese Erregerspannung als eine zeitveränderliche Funktion des mathematischen Modells der Synchronmaschine zur Verfügung gestellt.

Obwohl das Klemmenverhalten des Generators durch diesen regelungstechnischen Lösungsansatz sehr gut ermittelt werden kann, sind die inneren Vorgänge in der Erregereinrichtung aber nicht bestimmbar. Es bleiben daher folgende Fragestellungen:

- Wie spielen sich die dynamischen Abläufe innerhalb der Erregermaschinen ab?
- Welche Spitzenströme fließen innerhalb der Systemkomponenten der Erregereinrichtung, und welche Einflüsse haben die verwendeten Gleichrichter auf den Generator und die Erregermaschinen?
- Wie hoch sind die Belastungen in den Systemkomponenten der Erregereinrichtungen?
- Welche Ausgleichsvorgänge entstehen auf der Netzseite bei inneren Fehlern in der Erregereinrichtung?

Diese Fragestellungen sind bisher nur unzureichend durch den Einsatz von konventionellen Reglermodellen beantwortet worden.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine möglichst realitätsnahe Simulation solcher Ausgleichsvorgänge durchzuführen. Dazu müssen die Erregereinrichtung in einem gekoppelten System mit Generator und Netz gemeinsam untersucht und die gegenseitigen Wechselwirkungen innerhalb der Teilsysteme erfasst werden. Diese Analyse soll einen tief gehenden Einblick in die Prozesse innerhalb des Erregersystems von Synchronmaschinen ermöglichen, um eine bessere Dimensionierung der Erregerkomponenten zu erreichen.

Der Wunsch nach dem Bau großer Generatoren mit stetig wachsender Bemessungsleistung und hoher Erregerleistung wird in Zukunft größer werden. Dies beruht allein auf der Tatsache, dass fast zwei Drittel der Erdbevölkerung kaum Zugang zu einer regulären Stromversorgung haben.
Lösen die Wissenschaftler die weltweiten Energieprobleme, indem sie Technologien entwickeln, die eine umweltfreundliche Erzeugung, einen höheren Wirkungsgrad sowie eine günstige und sichere Bereitstellung bewirken, wird ein wesentlicher Schritt zur Lösung der Armutsfrage vollzogen sein.

1.2 Stand der Technik

Die Modellierung der Synchronmaschinen ist im Hinblick auf die Berechnung des stationären und dynamischen Verhaltens weit fortgeschritten. In elektrischen Maschinen wird der Spannungsregler primär zur Steuerung der Lastflussverteilung eingesetzt und hat großen Einfluss auf die Stabilität der Generatoren. Deswegen findet sich eine große Anzahl von Publikationen, die sich mit dieser Problematik befassen. Nachfolgend werden ausgewählte Beiträge, die für die Ergebnisse dieser Arbeit von besonderer Bedeutung sind, kurz zusammengefasst und kritisch beleuchtet.

Einer der wichtigsten Bestandteile bei der Analyse der Reglereinflüsse ist die Nachbildung der Synchronmaschinen und der Erregersysteme in dynamischen Netzmodellen. Die Synchronmaschinen werden üblicherweise nach der Zweiachsentheorie von Park [1] modelliert. Die dreisträngigen Spannungs- und Stromgleichungen der Synchronmaschine werden durch die Parktransformation auf d-q-Koordinaten überführt. Der Grundgedanke dieser Transformation ist der Ersatz eines gekoppelten dreiphasigen Systems durch ein entkoppeltes Zweiachsenkoordinatensystem.

Das ursprüngliche Park'sche Gleichungssystem lässt sich durch ein Ersatzschaltbild mit jeweils einem Dämpferkreis auf der d- und q-Achse und einem Feldkreis auf der d-Achse darstellen. Das Modell nach Canay [2,3,4] erweitert die ursprüngliche Park'sche Darstellung auf die 2×4-Mode-Darstellung mit vier äquivalenten Rotorzweigen sowohl auf der d-Achse als auch auf der q-Achse, dadurch wurde die Modellierung des Rotors verbessert. Diese erweiterten Zweige ermöglichen die Berücksichtigung des Eindringverhaltens des magnetischen Feldes und der induzierten Wirbelströme [5]. Durch diese Erweiterungen stimmen die vorausberechneten transienten Verläufe von Strömen und Spannungen besser mit dem Gemessenen überein. Zur Erfassung von Ausgleichsvorgängen mit niederfrequenten Pendelungen müssten das Rotormodell und insbesondere das Dämpfermodell um zusätzliche Stromzweige erweitert werden [6,7,8].

In [6,9] wurde die Synchronmaschine durch ein Netzwerk aus konzentrierten Elementen modelliert, wobei der Rotor durch eine hohe Anzahl von Stromkreisen nachgebildet ist. Sie sind in Form eines elektrischen Kettenleitermodells miteinander verbunden, deshalb wurde die Feldwicklung nicht direkt an die Hauptreaktanz, sondern an einen Zwischenkreis angehängt.

Die Parameter des Ersatzschemas der Synchronmaschine nach dem Park'schen Modell können durch analytische Verfahren, numerische Feldberechnungen und Messungen wie z.B. durch Stoßkurzschlussversuche bestimmt werden.
Ein weiterer Forschungsschwerpunkt, der seit vielen Jahren stets neu behandelt wird, ist das transiente Verhalten der gesamten Energieeinrichtung bei unterschiedlichen elektrischen Störfällen. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Reglermodelle entwickelt und in Simulationsprogrammen erprobt.
Bereits 1980 wurden von Nelles [10,11,12] stark vereinfachte Modelle für den Spannungs- und Turbinenregler konzipiert, die sich bei der Untersuchung der dynamischen Vorgänge in Turbogeneratoren sehr gut bewährt haben. Der Spannungsregler wurde einfach als PI-Regler mit einem P-Glied in der Rückkopplung beschrieben.
Der Übergangszustand des Spannungsreglers wurde bei großem Sollwertsprung und großem Lastsprung mit einem reellen und idealen Verstärkerverhalten untersucht, woraus die dynamische Charakteristik des Spannungsreglers abgeleitet werden konnte. Hier wurden prinzipielle Aussagen zum Einfluss der Spannungsregelung auf statische und langzeitige Stabilität erarbeitet. Daher stellt die Arbeit von Nelles einen wichtigen Schritt auf dem Weg zur Erforschung der Maschinendynamik dar.
Leider benutzen unterschiedliche Hersteller verschiedene Simulationsprogramme, bei denen firmenbezogene Reglerstrukturen verwendet werden [46,50,54]. Dies führt dazu, dass die Regler selbst und das dynamische Verhalten von Turbogeneratoren nur schwer untereinander verglichen werden können. Der Austausch von Daten oder eine nachträgliche Parametrisierung sind deshalb nicht ohne weiteres möglich. Um diesem Zustand ein Ende zu setzen, wurden vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Standardmodelle entwickelt [14,15]. Sie enthalten vereinfachte Strukturen der reellen Regler und sind in der Lage, das charakteristische Verhalten der Reglereinrichtungen wiederzugeben. Nach der Klassifizierung werden drei Typen, die sich durch ihre Versorgungsquellen unterscheiden, differenziert:

- Gleichstromerregermaschinen
- Drehstromerregermaschinen
- Statische Erregersysteme.

In der IEEE-Studie [14,15] wurden insgesamt drei Modelle für Gleichstromerregermaschinen, sechs Modelle für Drehstromerregermaschinen und drei Modelle für statische Erregersysteme definiert, die je nach der gewünschten Simulationsgenauigkeit verwendet werden können.
Die IEEE-Regler sind sehr weit verbreitet und werden in unterschiedlichen Simulationsprogrammen als Standardmodelle eingesetzt. Ein Nachteil dieser Darstellungen ist jedoch, dass auch bei aufwändigen Modellen die physikalischen Vorgänge innerhalb der Erregereinrichtungen nicht wiedergegeben werden können.
In der VDI/VDE 3680-Richtlinie [13] wurde eine einheitliche Grundlage für die Bewertung von Erreger- und Regeleinrichtungen geschaffen, mit der unterschiedliche Erregersysteme analysiert und miteinander verglichen werden können, wobei insbesondere:

- der Aufbau
- die Wirkungsweise
- das Regelverhalten im statischen und dynamischen Betrieb

betrachtet wurden. Darauf aufbauend wurde zur Verbesserung der Stabilität die Aufschaltung der Zusatzsignale, wie Polradwinkel, Drehzahl, Wirkleistung und Netzfrequenz, sowie die Erweiterung der Reglerstruktur empfohlen. Diese Maßnahmen brachten zwei wichtige Erkenntnisse:

- Die Spannungsregler lassen sich weiter verbessern.
- Die Gewinne sind allerdings nur sehr gering, sodass sich die Frage stellt, ob sich der Aufwand noch lohnt. Dieses Ergebnis ist gleichzeitig die Bestätigung, dass bisher verwendete Spannungsregler sehr gut optimiert sind.

In den letzten Jahren haben Fuzzy-Regler und Computation-Intelligence verstärkt Einzug in die Regelungstechnik gehalten. Viele Autoren haben den Einsatz dieser Methode zur Spannungsregelung bei Turbogeneratoren untersucht; zu den wichtigsten zählen die Arbeiten von [52, 58,59]. Hier wurden solche Spannungsregler konkret entworfen und anhand realer Beispiele beurteilt.
Das Ergebnis der Literaturstudie verdeutlicht, dass bisher die physikalischen Vorgänge innerhalb des Generatorerregersystems nicht betrachtet wurden.

Diese Beschränkung lässt sich auf die Komplexität der Aufgaben zurückführen. Für die genaue Betrachtung ist Folgendes erforderlich:

1) Das gesamte System, bestehend aus Generator, Haupt-/Hilfserregermaschine, Transformator, Gleichrichterbrücken und dem elektrischen Netz, ist im Zeitbereich zu simulieren.

2) Die Modellbeschreibung muss detailliert sein, um auch hochfrequente Schaltvorgänge in den Gleichrichterbrücken zu erfassen.

3) Es ist ein Modell zu entwerfen, bei dem unterschiedliche Maschinen mit verschiedenen Frequenzen galvanisch miteinander verknüpft werden.

Da zu Beginn dieser Arbeit keines der großen Programme in der Lage war, solche Systeme zu simulieren, war es im Rahmen dieses Forschungsvorhabens notwendig, entsprechende Module zu entwickeln. Das anzuwendende Programm muss allerdings aus heutiger Sicht folgende Anforderungen erfüllen:

- Es muss passive und aktive Module der Energieversorgungskomponenten bereitstellen.

- Simultane Behandlung des gekoppelten elektromechanischen und -magnetischen Systems muss dabei ermöglicht werden.

- Turbinen und Spannungsregler müssen durch beliebige schaltbare Blockstrukturen modelliert werden können.

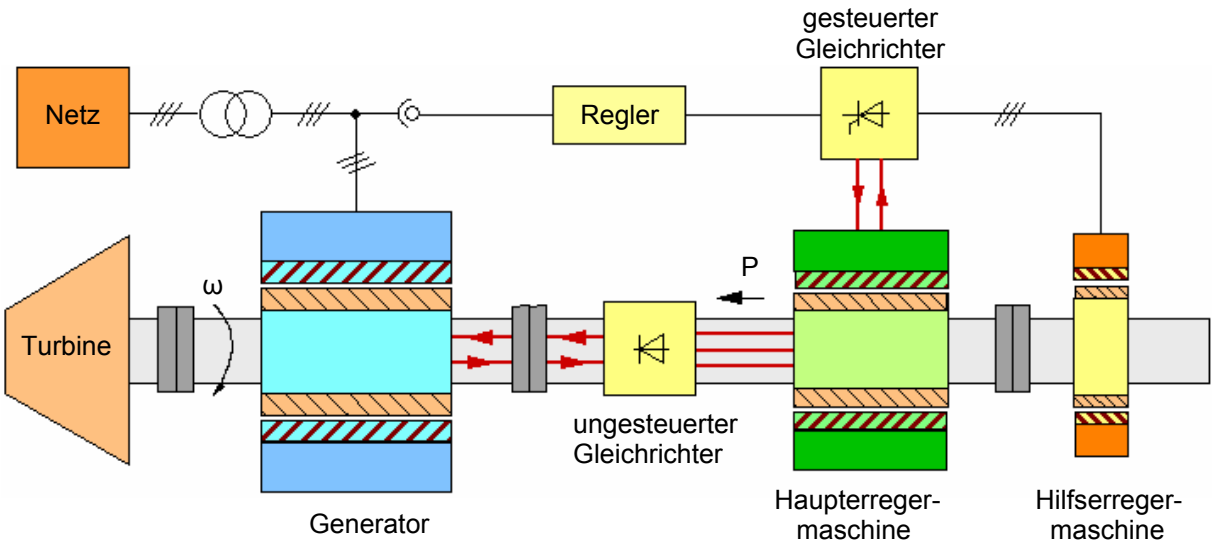
- Zusätzliche Teilsysteme, wie z.B. Haupt- und Hilfserregermaschine im Netzwerkmodell, müssen sich auf einfache Weise im vorhandenen Programm erweitern lassen.

- Nach der Erweiterung muss die Rechenzeit bei der Behandlung der Zeitabschnitte von z.B. mehreren 100 Sekunden noch im vertretbaren Rahmen bleiben.

1.3 Vorgehen

Ein besonderes Merkmal der Untersuchung ist die direkte galvanische Kopplung des Generators mit der Erregereinrichtung zu einem gemeinsamen Netz. Hier müssen die Synchronmaschinen einschließlich der Gleichrichterbrücken und der Regler selbst so modelliert werden, dass sie zu einem Drei-Maschinen-System miteinander verbunden werden können.

Die vorliegende Untersuchung wird am Beispiel eines 410MVA-Turbogenerators mit einer 2.7MVA-Haupterregersynchronmaschine und einer 61kVA-Hilfserregermaschine durchgeführt. Die verwendeten Maschinen unterscheiden sich durch ihre Ständer- und Rotorauslegung stark voneinander. Der Aufbau des Drei-Maschinen-Systems ist im Bild 1.2 schematisch dargestellt.



1.2: Drei-Maschinen-System mit dem Netz

Vorbereitend für den Aufbau eines Gesamtnetzwerks werden zuerst die verschiedenen Maschinenarten und Gleichrichter sowie unterschiedliche Erregersysteme behandelt.

Eine der wichtigsten und schwierigsten Aufgaben, die im Rahmen dieser Arbeit gelöst werden soll, ist der Entwurf eines Netzwerks, das unterschiedliche Frequenzen und Spannungen der einzelnen Maschinen berücksichtigt. Daraufhin sollen diese Kenngrößen durch ein Berechnungsprogramm ermittelt und schließlich grafisch dargestellt werden.

Der Vergleich der unterschiedlichen Softwarepakete ergibt, dass das oben beschriebene Netzwerk sehr gut mithilfe des Simulationsprogramms NETOMAC (Network-Torsion-Machine-Control) von Siemens [16,17] behandelt werden kann. Dieses Programm ist in der Lage, elektromagnetische und -mechanische Ausgleichsvorgänge basierend auf den Differenzialgleichungen im Mehrmaschinensystem zu berechnen. Allerdings konnten ursprünglich nur Maschinensätze mit gleicher Frequenz behandelt werden, daher müssen wesentliche Erweiterungen im Simulationsprogramm vorgenommen werden.
Nach der Aufstellung eines entsprechenden Netzwerkmodells und dessen Implementierung in das lauffähige Programm werden die Ausgleichsvorgänge bei Störfällen analysiert. Durch das entworfene Modell sollen sowohl äußere als auch innere Fehler simuliert werden. Anschließend werden die Zeitverläufe für die elektrischen Ströme und Spannungen in allen drei Maschinen und Gleichrichterbrücken ermittelt. Sie bilden die Basis für die Bestimmung weiterer abgeleiteter Größen, die für die Dimensionierung der einzelnen Maschinen und Erregerkomponenten benötigt werden.

Bei den simulierten Störszenarien handelt es sich um:

a) Standardstörfälle außerhalb des Generators

- Fehlsynchronisierung bei großem und kleinem Fehlwinkel
- Generatorklemmenkurzschlüsse
- Ein-, zwei- und dreipolige Netzkurzschlussabschaltungen

b) Innere Störfälle

- Stromunterbrechung in der Generatorfeldwicklung
- Ausfall von Gleichrichterbauelementen in der Erregereinrichtung
- Zwei- und dreipolige Kurzschlüsse im Anker der Haupterregermaschine.

Bei den vorstehenden Störfällen spielt das Klemmenverhalten des Generators am Netz eine wichtige Rolle, um herauszufinden, inwieweit eine präzise Nachbildung des Erregerkreises die Simulationsergebnisse beeinflusst.

Die Resultate aus der Berechnung der Störfälle werden mit den konventionellen Lösungen verglichen. Mithilfe der gewonnenen Ergebnisse werden die Wechselwirkungen zwischen dem Drei-Maschinen-System und dem elektrischen Netz bei dynamischen Vorgängen analysiert.

Da die transienten Störfälle den Generator und die Erregereinrichtung gefährden können, werden abschließend in diesem Zusammenhang wichtige Schutzarten behandelt. Hierbei wird der Frage nachgegangen, wie effizient der Schutz bei verschiedenen inneren und äußeren Fehlern wirkt.

2 Theoretische Grundlagen und Ausgangspunkte der Untersuchung

2.1 Maschinenarten der bürstenlosen Erregung

Zur Erregung von Generatoren in Kraftwerksblöcken werden je nach Leistungsanforderung und Bauweise verschiedene Erregereinrichtungen und -maschinenarten eingesetzt. Dabei wird zwischen statischen und bürstenlosen Erregersystemen unterschieden.
Kleinere Einheiten enthalten meistens statische Erregereinrichtungen. Dagegen werden große Synchrongeneratoren in der Regel mit einem bürstenlosen Erregersystem ausgestattet, um den Wartungsaufwand und die Betriebsunterbrechungen möglichst gering zu halten [18].
Beim bürstenlosen Konzept werden die drei verwendeten Maschinenarten, d.h. der Generator, die Haupt- und Hilfserregersynchronmaschine, auf einer gemeinsamen Welle montiert, wie im Bild 1.2 dargestellt. Alle drei Maschinen sind Synchronmaschinen, die sich allerdings in der Bauart voneinander unterscheiden und verschiedene Spannungen, Frequenzen und Leistungen aufweisen. Für die Realisierung des bürstenlosen Konzepts werden Synchronmaschinen eingesetzt, die jedoch unterschiedlich ausgeführt sein müssen:

- Generator
  Es handelt sich meist um eine zwei- oder vierpolige Synchronmaschine mit Fremderregung.
- Haupterregermaschine
  Die Haupterregermaschine ist ebenfalls eine fremderregte mehrpolige Außenpolsynchronmaschine.
- Hilfserregermaschine
  Diese Synchronmaschinenart wird als ein hochpoliger Dauermagnetläufer ausgeführt.

Die Ausführung ohne Hilfserregermaschine in Form einer statischen Erregereinrichtung wird selten realisiert, weil durch die Versorgung über einen Transformator aus dem Eigenbedarfnetz die Erregereinrichtung von der Spannung an den Generatorklemmen abhängig wird. Demgegenüber ist das bürstenlose Erregersystem von die-

ser Spannung unabhängig, was insbesondere bei Kurzschlüssen im Netz für die Versorgungssicherheit sehr wichtig ist.
Bevor die komplexen elektrischen Abläufe innerhalb des Drei-Maschinen-Systems behandelt werden, sollen diese individuellen Maschinenarten zunächst näher betrachtet werden.

2.1.1 Generator

Die elektrische Energie wird überwiegend von Drehstromsynchrongeneratoren bereitgestellt, die als Schenkel- oder Vollpolgeneratoren ausgeführt sind. Das Leistungsspektrum der Generatoren erstreckt sich bis zu 2000 MVA bei einer Spannung von bis zu 27 kV und einer Frequenz von 50 oder 60 Hz. Generatoren mit Hochspannungsstatorwicklungen ermöglichen sehr hohe Spannungen (z.B. 110 kV), welche die Leistung des Generators sogar ohne den Einsatz eines Transformators direkt ins Netz einspeisen [19]. Der Generator enthält unabhängig von seinen Erregersystemen folgende Teile:

- Ständer

  mit Blechpaket, Stabwicklungen und Gehäuse

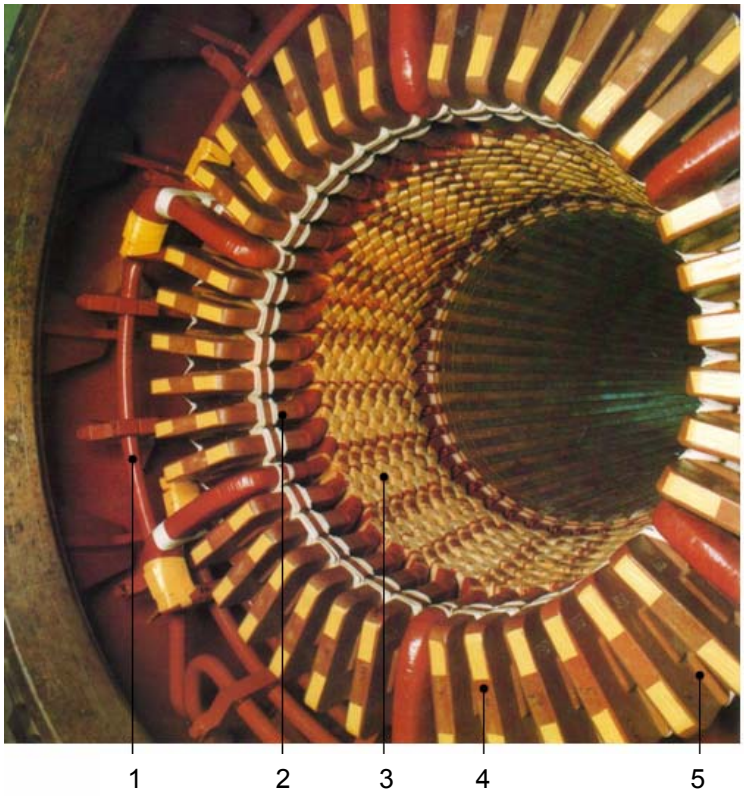
- Rotor

  mit Wicklungen und Kappen.

Im Blechpaket des konventionellen Synchrongenerators befindet sich die dreisträngige Ständerwicklung, die als Zweischicht-Stabwicklung ausgeführt ist. Diese Wicklungen werden gleichmäßig in die am Umfang verteilten Rechtecknuten des Ständerblechpaketes eingebaut. Diese Drehstromwicklungen sind an das Drehstromnetz angeschlossen und bauen im Luftspalt ein Drehfeld auf. Der Wickelkopf des Ständers wird zur Aufnahme der Stromkräfte bei Kurzschluss in der Regel durch Abstützungen gegen eine Deformation gesichert (s. Bild 2.1).
Die Schaltleitungen, die Anfang und Ende der Wicklungsstränge bilden, bestehen aus Kupferrohren, durch die Kühlgas, Luft oder Wasser strömt. Die isolierten Stäbe sind mit den Wicklungsträgern durch Bandagen fest verschnürt. Der Durchmesser

und die effektive Eisenlänge eines solchen Generators sind mehrfach größer als bei Erregersynchronmaschinen.

Die Wärmeverluste der Ständerwicklung werden durch indirekte Kühlung, z.B. durch strömende Luft, über die Isolierungshülse quer zur Lamellierung in radialen Kühlschlitzen abgeführt. Bei der direkten Kühlung des Ständers werden die Kühlkanäle der Stäbe direkt mit Luft, Kühlgas oder nichtleitfähigem Wasser durchströmt [20].



1: Schaltleitungen
2: Isolierter Stab
3: Stabbandage
4: Gasumlenkkappe
5: Keil

Bild 2.1: Ständerwickelkopf

Der Rotor eines Generators muss große Beanspruchungen durch Fliehkräfte und Kurzschlussmomente aushalten. Er besteht aus folgenden Komponenten:

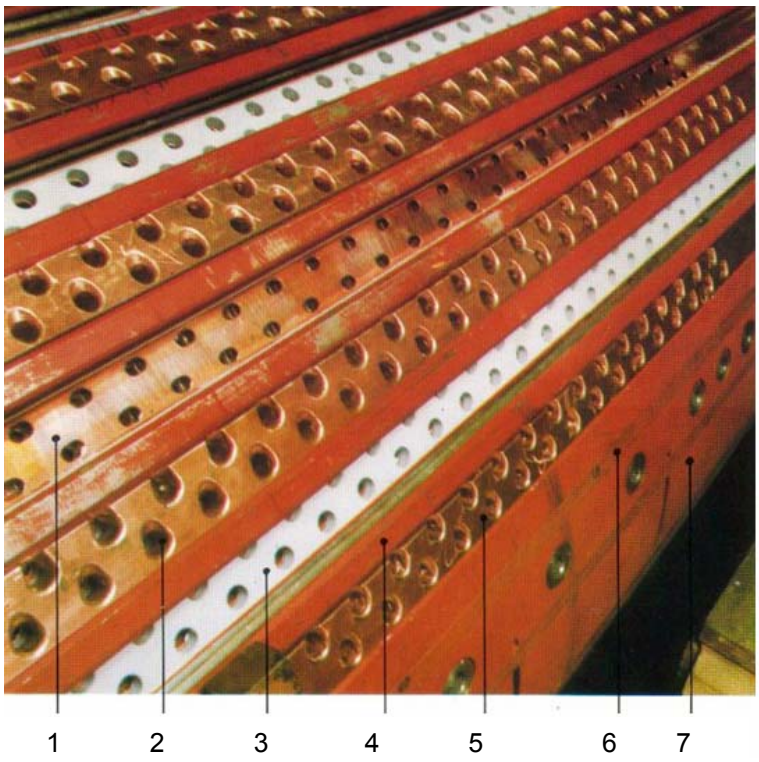
- Massiver Wellenkörper
- Läuferwicklungen
- Dämpferstäbe
- Rotorkappen.

Der Turbogeneratorenläufer wird meist wegen höherer ertragbarer Fliehkraftspannungen und der gleichmäßigeren Gewichtsverteilung als Vollpolmaschine ausgeführt. Die Rotorlänge des Generators beträgt ein Mehrfaches des Rotordurchmessers. Die Erregerwicklungen auf dem Läuferwellenschenkel bei Vollpolmaschinen werden in Nuten eingebettet, im Umfang des Rotors symmetrisch verteilt und zuletzt durch Keile verschlossen. Bei Schenkelpolmaschinen werden häufig die Erregerwicklungen als konzentrische Spulen auf den Polen aufgebracht.

Die Dämpferwicklungen bzw. Dämpferstäbe und Nutverschlusskeile, die beidseitig durch die Rotorkappen kurzgeschlossen sind, führen im Störfall große Ausgleichsströme und dämpfen die mechanische Rotorpendelung.

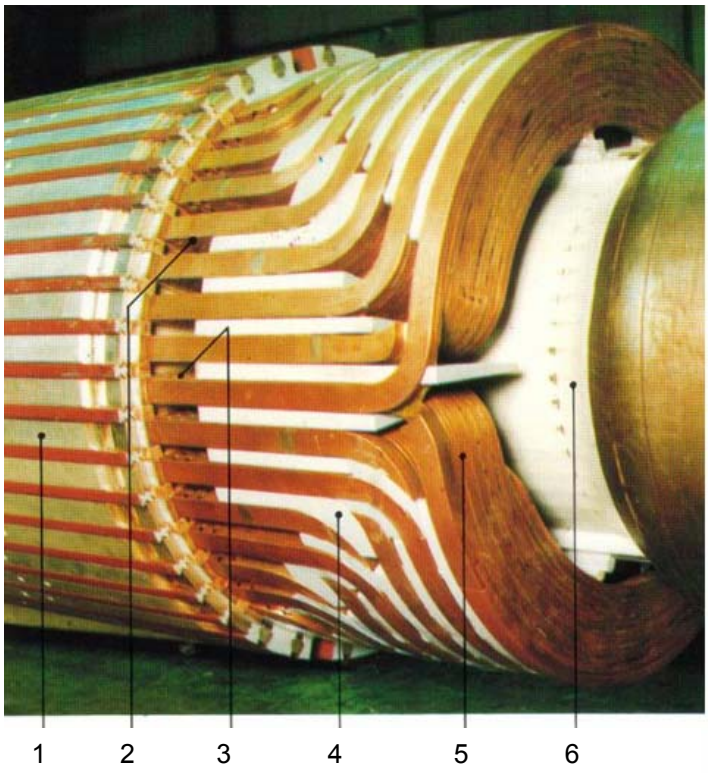
Das Leitermaterial ist Kupfer mit einem geringen Anteil Silberzusatz, das sich besonders gut für hohe thermische und mechanische Beanspruchungen eignet.

Die Keile bestehen meistens aus Kupfer mit Zusatzlegierungen, die eine hohe Festigkeit und eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Der Wärmeverlust der Rotorwicklung wird über radiale und axiale Kühlkanäle abgeführt, wobei durch Rotation des Läufers die radialen Gas- oder Luftsäulen unter dem Einfluss der Zentrifugalkräfte nach außen geschleudert werden. Abschnitte eines Turbogeneratorläufers sind in den Bildern 2.2.a und 2.2.b dargestellt.



1: Läuferwicklung
2: Gasaustritt-Luftverschlusskeil
3: Nutkopfeinlage
4: Läuferzahn
5: Nutverschlusskeil
6: Dämpferstab
7: Läuferballen

Bild 2.2.a: Abschnitt einer Turbogeneratorläuferwicklung



1: Nutverschlusskeil
2: Gaseintritt im Nutbereich
3: Gaseintritt im Wickelkopf
4: Füllstück
5: Wickelkopfbereich
6: Wellenschenkel des Rotors

Bild 2.2.b: Abschnitt eines Turbogeneratorwickelkopfs

Die Leistung des Generators lässt sich durch das Läuferaktivvolumen V_L, die Drehzahl n der Antriebsmaschinen und die Ausnutzungsziffer oder Esson'sche Zahl C grob bestimmen:

$$S_G = CV_L n \tag{2.1}$$

Die Ausnutzungsziffer ist abhängig vom Strombelag A_I, der magnetischen Luftspaltinduktion B, dem Wicklungsfaktor ξ und einem thermodynamischen Faktor K_L [21]:

$$C = K_L A_I B \xi \tag{2.2}$$

Bei gasgekühlten Maschinen kann die Ausnutzungsziffer einen hohen Wert, z.B. bei zweipoligen Turbogeneratoren bis ca. 40 kVAmin/m^3, aufweisen. Diese obere Grenze begründet sich aus heutiger Sicht durch die maximal beherrschbaren Fliehkräfte bei der Schleuderdrehzahl der Maschine und durch die Beherrschung von Biege- und Torsionsschwingungen.
Bei der Konstruktion des Rotors muss beachtet werden, dass das als Schlankheitsgrad bezeichnete Verhältnis λ (Aktivläuferlänge ℓ zu Aktivläuferdurchmesser d) auf einen Faktor λ_{Max} von 6 bis 7 beschränkt ist:

$$\lambda = \frac{\ell}{d} < 7 \tag{2.3}$$

Mit dem Schlankheitsgrad λ ergibt sich für die Maschinenleistung nach Gl. 2.1 in grober Näherung:

$$S_G \cong C \lambda d^3 n \tag{2.4}$$

Der Faktor λ hat einen Wert von ca. 4 bei dem für die vorliegende Untersuchung ausgewählten 410MVA-Generator.

Der Rotordurchmesser von Wasserkraftwerksgeneratoren ist mehrfach größer als bei Turbogeneratoren. Dies ist auf die langsame Rotordrehzahl und die daraus resultierende hohe Polpaarzahl zurückzuführen. Deshalb spielt die Begrenzung für das Rotorvolumen der Generatoren in Wasserkraftwerken eine geringere Rolle.

Eine extreme Erhöhung der Generatorleistung und damit der Ausnutzungsziffer vergrößert das Strombelags- und Luftspaltinduktionsverhältnis sowie die Wärmeverluste. Deshalb wird angestrebt, als Lösung einen Generator mit supraleitenden Wicklungen zu konzipieren [22,27,28].

Da die Luftspaltinduktion B (s. Gleichung 2.2) durch die Eisensättigung im Zahnbereich beschränkt ist, ist beim supraleitenden Generator häufig die Statorwicklung als Luftspaltwicklung ausgeführt.

Die Rotorkonstruktion hängt stark davon ab, welche Art der Erregung realisiert wird. Bei statischer Erregung wird auf der Erregerseite ein Schleifringkörper angeflanscht. Bei bürstenloser Erregung werden ein Erregerrad und eine Haupterregermaschine direkt an die Generatorwelle angekuppelt. Die Stromzuleitungen werden dabei in einer Bohrung verlegt.

2.1.2 Haupterregermaschine

In den 1960er Jahren wurden die Gleichstrommaschinen mit ihren Kommutatoren durch Drehstromerregermaschinen mit statischen Gleichrichtern ersetzt. Dadurch entfielen die Kommutatoren und deren Kohlebürsten, sodass der Erregersatz völlig wartungsarm wurde.

Die technische Entwicklung der bürstenlosen Erregeranordnungen hat erst die Siliziumdiode mit den Grenzdaten 500 V, 10 kA, Schaltverzögerungen von einigen Mikrosekunden und einem Leitspannungsabfall von 2 bis 3 V mit ihrer mechanischen Unempfindlichkeit und ihrer hohen Belastbarkeit ermöglicht.

Bei der bürstenlosen Erregung im Drei-Maschinen-System ist die Haupterregersynchronmaschine, die als Außenpolmaschine ausgeführt ist, auf eine gemeinsame Welle mit dem Generator und Gleichrichterrad montiert. Daher befinden sich die drei Ankerdrehstromwicklungen der Haupterregermaschine im Gegensatz zur Innenpolmaschine auf dem rotierenden Wellenstrang des Erregersatzes (s. Bild 2.3).

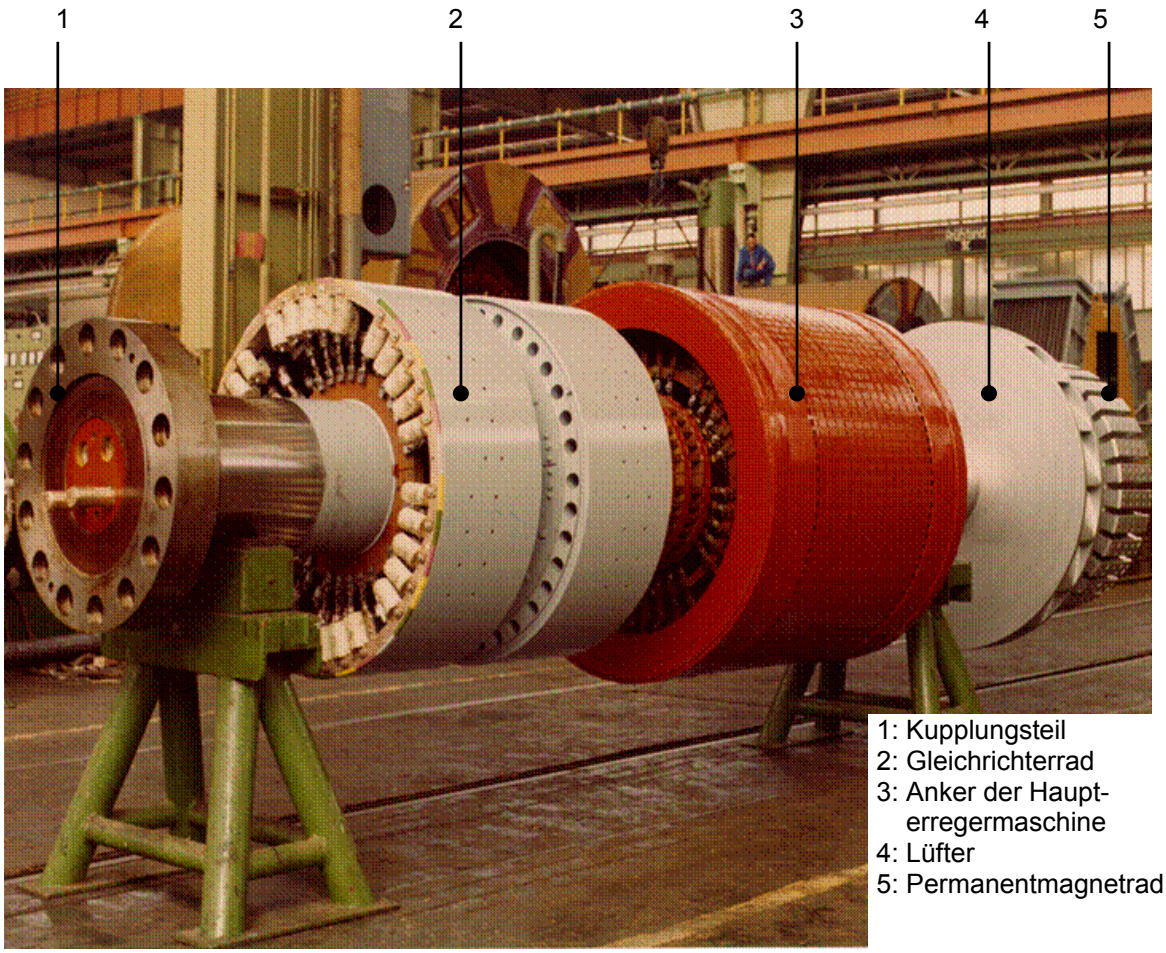


Bild 2.3: Läufer des Erregersatzes

Die Ströme in der rotierenden Drehstromwicklung dieser Außenpolmaschine werden über Stromrichter gleichgerichtet, und sie speisen die Erregerwicklung des Generators. Über die Außenpole im Ständer wird die Maschine solange elektrisch hoch erregt, bis am Ausgang des rotierenden Gleichrichters, der mit den rotierenden Drehstromwicklungen zusammengeschlossen ist, der notwendige Spannungs- und Strombetrag für die Generatorerregerwicklung erreicht ist.

Bei der Außenpolmaschine kann die Polpaarzahl höher liegen als beim Rotor des Turbogenerators. Durch die Auswahl der geeigneten Polpaarzahl am Statorumfang kann die gewünschte Frequenz erreicht werden. Die Größe der Zeitkonstante für den Anstieg der Erregung wird durch die hohe Induktivität und die Konstruktion der Außenpole bestimmt. Sie kann unter anderem durch die Blechung und die Reduzierung der Wirbelströme verkleinert werden.

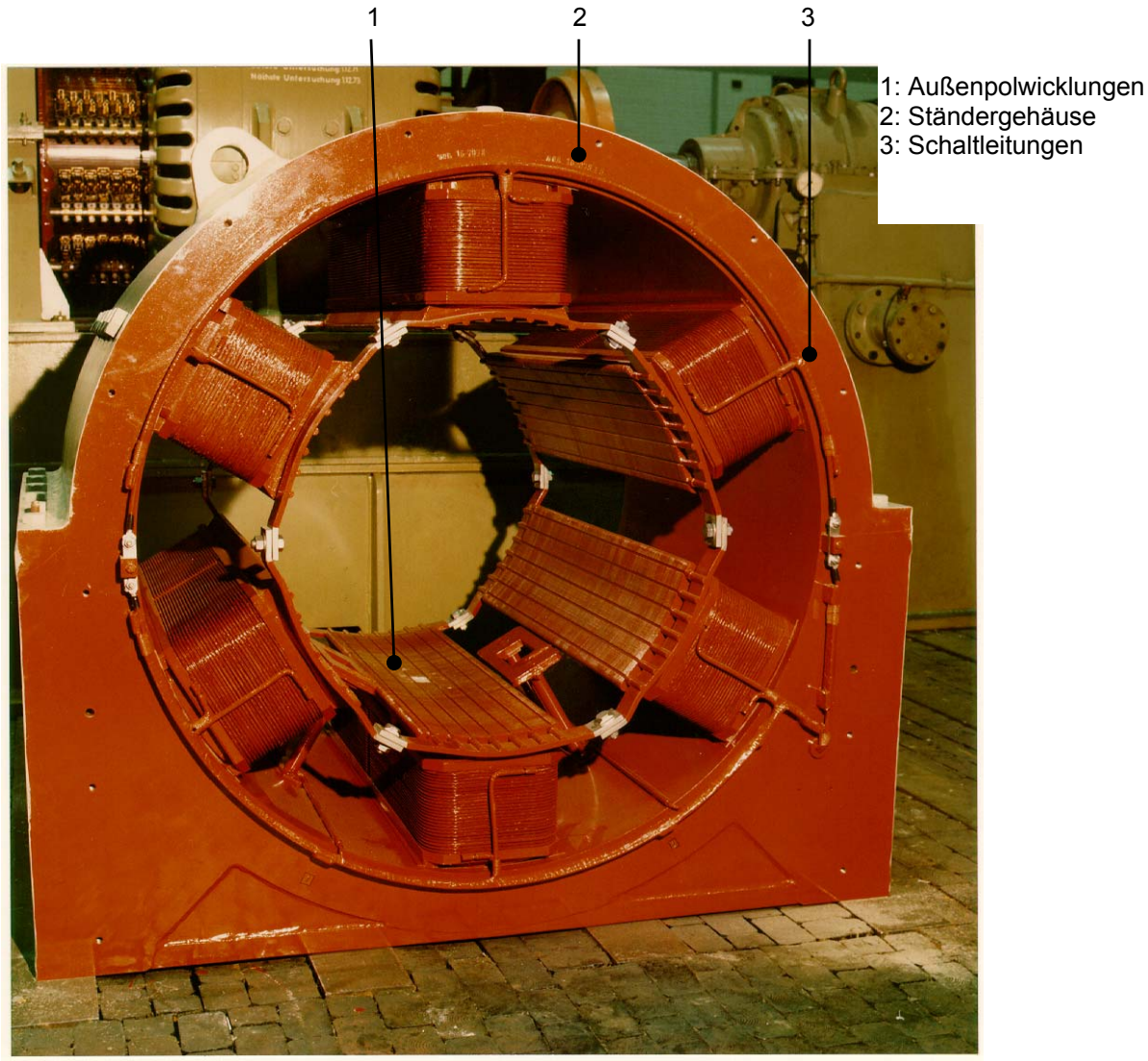


Bild 2.4: Ständer der Außenpolsynchronmaschine

Die Außenpole der Haupterregermaschine sind am Umfang des Ständers verteilt. Der Ständer einer Außenpolsynchronmaschine mit sechs Polen, die für diese Arbeit verwendet wurde, ist im Bild 2.4 dargestellt.
Vorteilhaft bei der Außenpolmaschine ist vor allem, dass der Läuferdurchmesser durch die im Ständer angebrachten Erregerspulen nicht überdimensioniert ausgelegt werden muss und so die mechanischen Beanspruchungen der Erregerspulen reduziert werden.

2.1.3 Hilfserregermaschine

Der Hilfserreger wird bei den meisten Erregereinrichtungen als Permanentmagnetsynchronmaschine konstruiert. Seine Anbindung im Erregerkreis ist in Abschnitt 2.1.2 ebenfalls in Bild 2.3 dargestellt. Er zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Bürstenlose Erregung
- Kleine Ankerrückwirkung
- Niedrige Läufererwärmung
- Niedrige Massenträgheit des Rotors.

Die Permanentmagnetmaschine ist, von Leistung und Geometriegröße her, die kleinste Maschine in dieser Untersuchung und wird auf eine gemeinsame Welle mit Haupterreger und Generator montiert.
Das Bild 2.5 zeigt als Beispiel ein Schnittbild einer 6-poligen Synchronmaschine mit dem Permanentmagnetläufer. Die Magnetmaterialien ermöglichen hohe Luftspaltinduktionen, sodass in den Elektroblechen der Maschine hohe Feldstärken bis ca. 1.5 T auftreten können.
Die Leistungsdichte, die Temperaturbeständigkeit und die Entmagnetisierung selbst werden maßgeblich durch die für die Läuferpole verwendeten Materialien bestimmt.

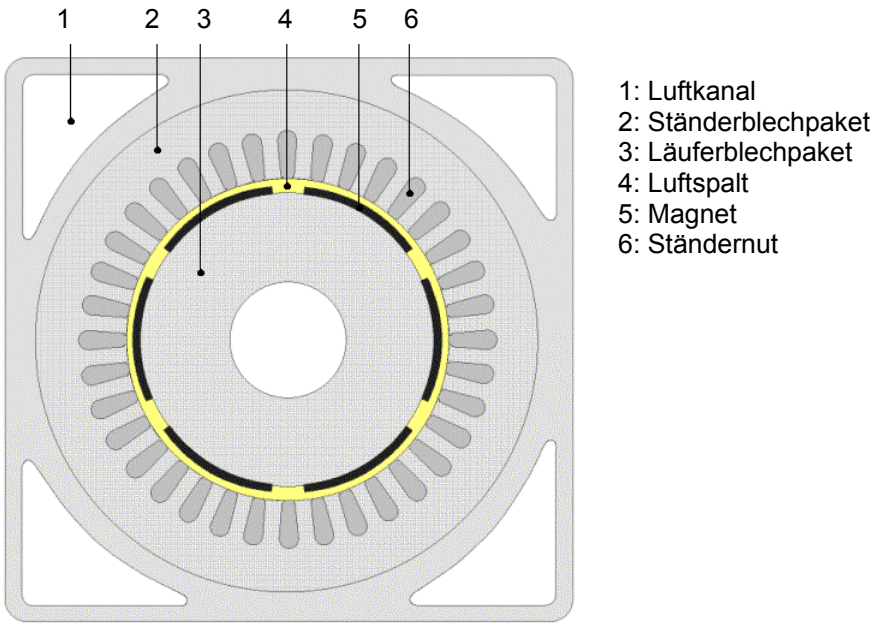


Bild 2.5: 6-polige Synchronmaschine mit Permanentmagnetläufer

In Tabelle 2.1 sind einige Eigenschaften der häufig verwendeten Dauermagnetmaterialien aufgelistet. Die Magnetmaterialien bestehen aus verschiedenen Legierungen oder aus Seltenenerdestoffen.

Magneteigenschaften	Hartferrit	AlNiCo	SmCo	NdFeB
Remanenzinduktion B (T)	0.38 bis 0.42	0.64 bis 1.4	0.85 bis 1.0	1.0 bis 1.3
Reversible Permeabilität μ_r	1.05	5	1.05	1.1
Dichte ρ_v (kg/dm^3)	4.8	7.0	8.2	7.4
Max. Arbeitstemperatur T (°C)	250	450	300	120
Spez. Widerstand ρ_{el} (µΩ cm)	10^{12} bis 10^{16}	40 bis 70	50 bis 60	140

Tabelle 2.1: Eigenschaften der Magnetmaterialien, Quelle [23]

Die meisten Magnetwerkstoffe sind magnetisch isotrop, d.h. sie haben unabhängig von der Richtung gleiche magnetische Eigenschaften. Durch technologische Sondermaßnahmen, wie z.B. plastisches Verpressen im Gesenk (ähnlich dem Kaltwalzen von Blech) lassen sich anisotrope Magnete herstellen, bei denen die magnetischen Eigenschaften in Vorzugsrichtung verbessert sind [23].

Bei der Dimensionierung der Permanentmagnetmaschinen muss nicht nur auf Einhaltung magnetischer Eigenschaften, sondern auch auf die maximale Arbeitstemperatur, Druck- und Zugfestigkeit sowie die Biegefestigkeit der Dauermagnete geachtet werden. Für den Einsatz in großen Kraftwerksblöcken sind diese Maschinenarten wegen ihrer langen Lebensdauer, der hohen Belastbarkeit und ihres wartungsarmen Betriebs prädestiniert. Für die Torsionsauslegung ist vorteilhaft, dass der Rotor der Permanentmagnetmaschinen ein niedrigeres Massenträgheitsmoment als die konventionellen Maschinen aufweist.

Da die relative Permeabilität der meisten Magnete ähnlich wie in Luft etwa bei 1 liegt, besitzt der magnetische Kreis in den Polgebieten einen höheren magnetischen Widerstand im Vergleich mit Nichtmagnetläufern.

Dieser höhere magnetische Widerstand R_m verringert den magnetischen Fluss Φ ($\Phi=\Theta/R_m$). Dies verstärkt sich vor allem durch die kleine Polteilung, die hohe Polzahl, den Luftspalt und die Permanentmagnete. Die Summe dieser Einflüsse führt zur kleineren Ankerrückwirkung. Das Einlassen der Magnete in das Rotorblech kann dazu führen, dass bei dieser Maschinenart die Längsreaktanz X_d kleiner als die Querreaktanz X_q wird, was bei den in dieser Arbeit verwendeten Hilfserregermaschinen der Fall ist.

2.2 Mathematische Beschreibung

Die Berechnung der elektrischen Maschinen basiert auf vielschichtigen Geometriestrukturen und Abmessungen sowie auf komplexen Verfahren zu elektromagnetischen Feldtheorien. Die elementaren Berechnungen für die Drehfeldmaschinen lassen sich aber auf folgende fundamentale Gleichungen zurückführen:

a) Maxwellgleichungen für die Beschreibung der zeitlichen Entwicklung und der Zusammenhänge von elektrischem und magnetischem Feld durch elektrische Feldstärke E, magnetische Flussdichte B, Stromdichte J, magnetische Feldstärke H, elektrischen Verschiebungsfluss D, Geschwindigkeit v und Raumladungsdichte ρ:

$$\mathrm{rot}\,\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t}\vec{D} \tag{2.5}$$

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B} + \mathrm{rot}(\vec{v} \times \vec{B}) \tag{2.6}$$

$$\mathrm{div}\,\vec{D} = \rho \tag{2.7}$$

$$\mathrm{div}\,\vec{B} = 0 \tag{2.8}$$

Wobei die induzierte Spannung e_{ind} in den Stäben der elektrischen Maschine in Anwesenheit des magnetischen Felds sich nach dem Satz von Stokes durch eine Differenzialform über die feldeingeschlossene Fläche s ausdrücken lässt:

$$e_{ind} = \oint \vec{E}\,d\ell = \iint (\mathrm{rot}\,\vec{E})\,ds \tag{2.9}$$

Die Materialeigenschaften werden in den untenstehenden Gleichungen durch Permeabilität μ, Permittivität ε und elektrische Leitfähigkeit γ berücksichtigt.

$$\vec{J} = \gamma\,\vec{E} \tag{2.10}$$

$$\vec{B} = \mu\,\vec{H} \tag{2.11}$$

$$\vec{D} = \varepsilon\,\vec{E} \tag{2.12}$$

b) die Lorentz-Kraft F_L im vom Strom I durchflossenen Leiter mit der Effektivlänge ℓ in der elektrischen Maschine in Anwesenheit des magnetischen Felds B:

$$F_L = I\left(\vec{\ell} \times \vec{B}\right) \tag{2.13}$$

c) Kirchhoffsche Gesetze für Knoten und Maschen:

$$\sum I_K = 0 \tag{2.14}$$

$$\sum U_m = 0 \tag{2.15}$$

Für die Nachbildung der elektromagnetischen Abläufe und die Untersuchung der dynamischen Vorgänge innerhalb und außerhalb der Drehfeldmaschinen müssen die Gleichungen 2.5 bis 2.15 entsprechend der Vielfalt der Anlagenkomponenten und ihrem geometrischen Aufbau sowie der verschiedenen Randbedingungen erweitert werden. Dies führt schließlich zu einem großen elektromechanischen Gesamtsystem, das aus Netz, Transformator, Generator, Erregereinrichtung, Wellenstrang, Spannungs- und Turbinenregler besteht. Im Endeffekt erhält man ein gekoppeltes Differenzialgleichungssystem mit zeitveränderlichen und nichtlinearen Koeffizienten mit bis zu einigen hundert Freiheitsgraden.
Die Lösung dieses Gleichungssystems ist nur bei Einsatz eines umfangreichen Simulationsprogramms möglich. Das Gleichungssystem kann hier im Zeitbereich durch numerische Integration gelöst werden.
Wegen der Größe des Gesamtsystems ist es zwingend notwendig, bei jedem der Teilsysteme komprimierte und berechnungsfreundliche Modelle anzuwenden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ersatzschaltmodelle des Generators und des Erregersatzes abgeleitet und in Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für die Lösung des Drei-Maschinen-Systems begutachtet.

2.2.1 Direkte Differenzialgleichungen

Eine schematische Darstellung der Synchronmaschine im dreisträngigen System findet sich im Bild 2.6, für diese Maschine kann das Gleichungssystem 2.16 angegeben werden. Hierzu kann der Ständer der Synchronmaschine durch die drei im Stern geschalteten Wicklungen (L_U, r_U, L_V, r_V, L_W, r_W) ersetzt werden.
Der Rotor wird durch den Erregerkreis F mit einer Gleichspannungsquelle U_F und einer Erregerwicklung (L_F, r_F) sowie durch zwei Dämpferkreise D und Q mit den

Dämpferersatzwicklungsimpedanzen (L_D, r_D, L_Q, r_Q) dargestellt. Für den Sternpunkt der Ständerseite kann in der schematischen Darstellung der Synchronmaschine eine Impedanz (L_n, r_n) über Erde berücksichtigt werden.

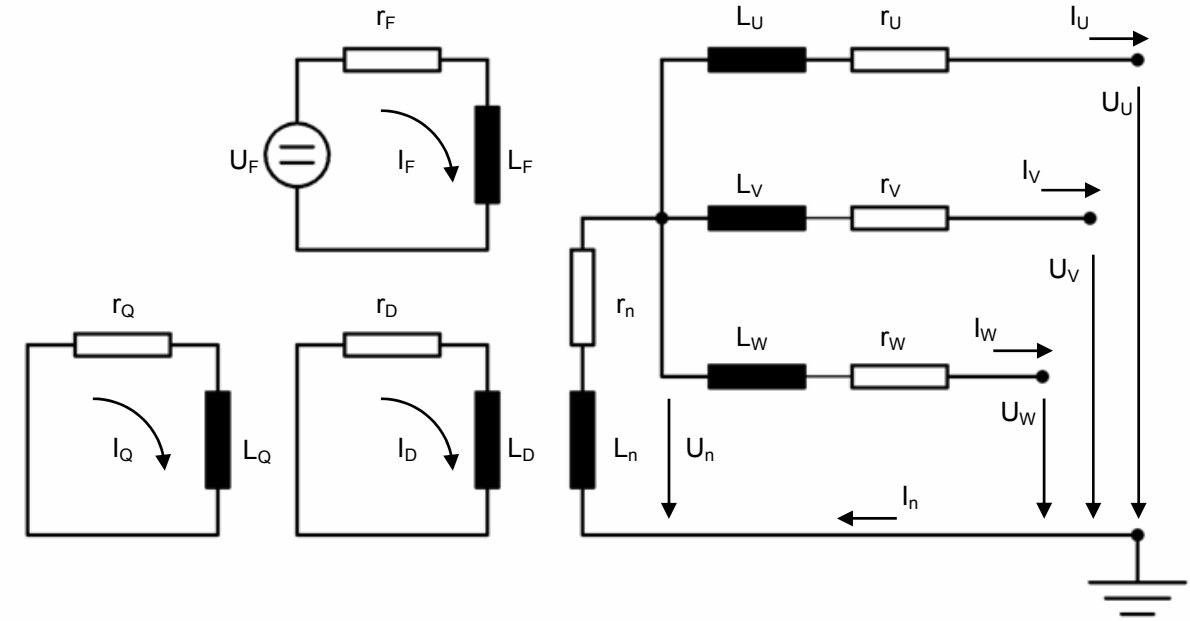


Bild 2.6: Schematische Darstellung einer Synchronmaschine

Die sechs Spannungsgleichungen (U_{UVW}, U_{FDQ}) für das im Bild 2.6 dargestellte dreisträngige System in der Hypermatrix 2.16 können vollständig das Verhalten der Synchronmaschine im Hinblick auf ihre elektrischen Abläufe beschreiben:

$$\begin{bmatrix} U_{UVW} \\ U_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} r_{UVW} & 0 \\ 0 & r_{FDQ} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{UVW} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_{UVW} \\ \Psi_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Bei einem symmetrischen dreisträngigen System ist die Sternspannung U_n gleich Null. Die Ständerwiderstände r_{uvw} (mit r_a=r_U=r_V=r_W) und die Rotorwiderstände r_{FDQ} sind schwach besetzte Diagonalmatrizen.

Die Flussverkettungen des dreisträngigen Systems (Ψ_{UVW}) und des Rotors (Ψ_{FDQ}) sind in Gleichung 2.16 über die Ströme (I_{UVW}, I_{FDQ}) und über die Rotorlage θ(t) zeitabhängig.

In einer realen Maschine sind alle Wicklungen aufgrund der magnetischen Unsymmetrie und der Rotordrehung miteinander gekoppelt. Diese Kopplung wird im Differenzialgleichungssystem durch zeitveränderliche Koeffizienten ausgedrückt. Dadurch ist jedoch die Struktur der Gleichungen nicht überschaubar. Sie können nur durch direkte numerische Integrationen gelöst werden. Diese magnetischen Kopplungen

sind in den Flussverkettungsgleichungen 2.17 dargestellt, in denen alle elektrischen Kreise sowohl innerhalb der Statorwicklungen als auch der Rotorwicklungen sowie zwischen Stator und Rotor miteinander gekoppelt sind.

$$\begin{bmatrix} \Psi_U \\ \Psi_V \\ \Psi_W \\ \\ \Psi_F \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{UU} & L_{UV} & L_{UW} & L_{UF} & L_{UD} & L_{UQ} \\ L_{VU} & L_{VV} & L_{VW} & L_{VF} & L_{VD} & L_{VQ} \\ L_{WU} & L_{WV} & L_{WW} & L_{WF} & L_{WD} & L_{WQ} \\ & & & & & \\ L_{FU} & L_{FV} & L_{FW} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{DU} & L_{DV} & L_{DW} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{QU} & L_{QV} & L_{QW} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_V \\ I_U \\ I_W \\ \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Zur besseren Übersicht wurde die Hypermatrix-Form gewählt, in der die Induktivitäten nach ihrer Zugehörigkeit zum Stator (Indizes: U,V,W) bzw. Rotor (Indizes: F,D,Q) gruppiert sind.

Der zweite Quadrant (links oben) der Hypermatrix 2.17 beschreibt hier die Eigen- und Gegeninduktivitäten innerhalb der Statorwicklungen und der vierte Quadrant der Hypermatrix bezieht sich auf die magnetischen Kopplungen nur innerhalb des Rotors. Die übrigen Induktivitäten, die sich im ersten und dritten Quadranten der Hypermatrix befinden, erfassen die magnetischen Kopplungen zwischen Stator und Rotor.

Setzen wir die Gleichung 2.17 in 2.16 ein, so erhalten wir ein Differenzialgleichungssystem mit zeitabhängigen Induktivitäten, was sich für die Berechnung als Nachteil erweist. Die Eigen- und Gegeninduktivitäten der einzelnen Statorphasen hängen von der Lage des Läufers θ(t) ab und lassen sich durch periodische Funktionen darstellen [24].

Die Vereinfachung der Hypermatrix führt zu einer übersichtlicheren Struktur, aus der Eigen- und Gegeninduktivitäten in folgenden Gleichungen (2.18 bis 2.24) abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} L_{UU} &= L_S + L_P \cos 2\theta \\ L_{VV} &= L_S + L_P \cos 2(\theta - 120°) \\ L_{WW} &= L_S + L_P \cos 2(\theta + 120°) \end{aligned} \tag{2.18}$$

In den Gleichungen der Eigen- und Gegeninduktivitäten wurde nur die Grundwelle berücksichtigt. Bei einer realen Maschine ist der Mittelwert der Ständereigeninduktivi-

tät L_S größer als die Amplitude der Oszillationen der Eigeninduktivität L_P. Die Winkelabhängigkeit der Induktivitäten ist im Bild 2.7 dargestellt.

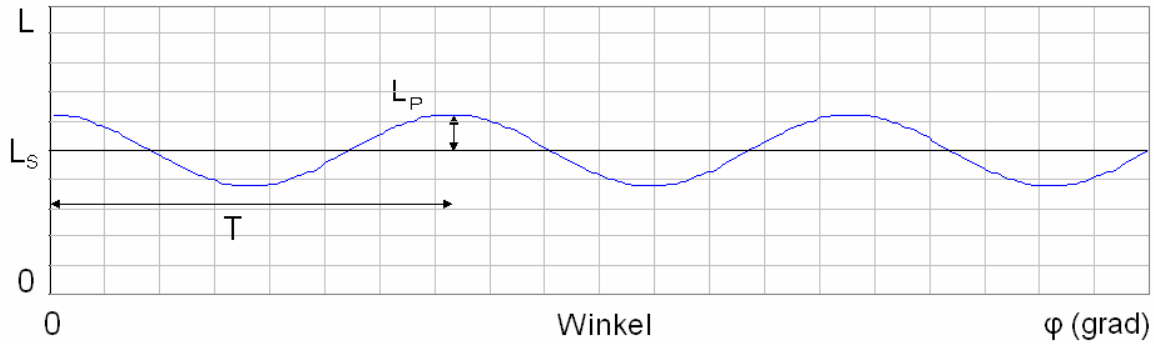


Bild 2.7: Oszillation der Eigeninduktivitäten

Betrachtet man eine Maschine vom Rotor her, so treffen alle auf dem Rotor angebrachten Wicklungen auf einen symmetrisch aufgebauten Stator, deshalb sind die Eigeninduktivitäten im Feld- und Dämpferkreis konstant (s. Gleichung 2.19):

$$L_{FF} = L_F \qquad L_{DD} = L_D \qquad L_{QQ} = L_Q \tag{2.19}$$

Ähnlich wie die Eigeninduktivitäten sind die Gegeninduktivitäten des Ständers (s. Gleichung 2.20) von der augenblicklichen Lage des Rotors θ(t) abhängig, sodass auch hier dieselbe Winkelbezeichnung angegeben werden kann. Da jedoch die einzelnen Ständerphasen zueinander räumlich um 120° verschoben sind, ist der Mittelwert der Gegeninduktivität M_S halb so groß wie die Ständereigeninduktivität L_S (d.h. $M_S=L_S \cos(120°)= -0.5L_S$):

$$\begin{aligned} L_{UV} &= L_{VU} = -M_S - M_P \cos 2(\theta + 30°) \\ L_{VW} &= L_{WV} = -M_S - M_P \cos 2(\theta - 90°) \\ L_{WU} &= L_{UW} = -M_S - M_P \cos 2(\theta + 150°) \end{aligned} \tag{2.20}$$

Im ersten und dritten Quadranten der Matrix 2.17 befinden sich hauptsächlich die Gegeninduktivitäten der Rotor- und Statorwicklungen. Bei drehendem Rotor ändert sich stets die Lage des Ständerflusses zum Rotorfluss, sodass für die Kopplung der beiden Flüsse nur eine direkte cosθ-Abhängigkeit entsprechend Gleichung 2.21 gilt:

$$\begin{aligned} L_{UF} &= L_{FU} = M_{SF} \cos\theta \\ L_{VF} &= L_{FV} = M_{SF} \cos(\theta - 120°) \\ L_{WF} &= L_{FW} = M_{SF} \cos(\theta + 120°) \end{aligned} \tag{2.21}$$

Die Gegeninduktivitäten im Dämpferkreis D zu den Ständerwicklungen können ähnlich definiert werden:

$$\begin{aligned} L_{UD} &= L_{DU} = M_{SD}\cos\theta \\ L_{VD} &= L_{DV} = M_{SD}\cos(\theta - 120°) \\ L_{WD} &= L_{DW} = M_{SD}\cos(\theta + 120°) \end{aligned} \tag{2.22}$$

Die Gegeninduktivitäten sind im Dämpferkreis Q räumlich um 90° zum Dämpferkreis D verschoben, wodurch sich die entsprechende Kopplung zur Statorwicklung als sinθ-Abhängigkeit ausdrücken lässt [25, 56], deshalb gilt:

$$\begin{aligned} L_{QU} &= L_{QU} = M_{SQ}\sin\theta \\ L_{VQ} &= L_{QV} = M_{SQ}\sin(\theta - 120°) \\ L_{WQ} &= L_{QW} = M_{SQ}\sin(\theta + 120°) \end{aligned} \tag{2.23}$$

Die Gegeninduktivitäten zwischen dem D-, Q- und F-Kreis im Rotor können vernachlässigt werden, da keine bzw. nur schwache Zwischenkopplung besteht:

$$L_{FQ} = L_{FQ} = 0 \qquad L_{DQ} = L_{QD} = 0 \qquad L_{FD} = L_{DF} = M_{FD} \tag{2.24}$$

Werden die abgeleiteten Abhängigkeiten für die Eigen- und Gegeninduktivitäten in die Hypermatrix 2.17 eingesetzt, so ergibt sich die Flussverkettung für alle betrachteten Wicklungen, und insofern lassen sich wiederum die Differenzialgleichungen 2.16 der Synchronmaschine angeben.
Die Sättigung wird häufig bei der Aufstellung des Gleichungssystems 2.16 vernachlässigt, d.h. die Induktivitäten werden als konstant angenommen. Dies bedeutet hier, dass in der Gleichung 2.25 der erste Term d.h. I(∂L/∂I)(dI/dt) vernachlässigt wird.

$$\frac{\partial}{\partial t}\Psi = I\left(\frac{\partial L}{\partial I}\cdot\frac{dI}{dt}\right) + L\frac{dI}{dt} \tag{2.25}$$

Bei der praktischen Anwendung hat sich durchgesetzt, die Sättigung nachträglich in das Gleichungssystem einzuführen, indem die Induktivität L als Funktion des Stroms I angegeben wird. Für eine grobe Näherung wird die Induktivität als konstante Größe angenommen, der Betrag wird jedoch den jeweiligen Betriebszuständen näherungsweise angepasst. So werden häufig in Ersatzschaltbildern der Maschine alle Reak-

tanzen mit dem Faktor 0.8 bei voll gesättigter Maschine und mit 0.9 bei halb gesättigter Maschine beaufschlagt. Hierbei wird z.B. beim Hochlauf oder Klemmenkurzschluss der Maschine mit voll gesättigten Reaktanzen und bei Fehlsynchronisation oder fern liegenden Kurzschlüssen, meist auf der Oberspannungsseite, mit halb gesättigten Reaktanzen gerechnet. Eine genauere Berücksichtigung der Sättigung wurde in [57] ausgearbeitet.

2.2.2 Park'sches Modell der Synchronmaschine

Die Modellierung der Synchronmaschine nach Park bzw. Canay [1,3,4] nutzt die Erkenntnis aus, dass sich ein dreiphasiges Feld der Drehstromwicklung als eine Überlagerung von zwei um 90° voneinander verschobenen Wechselfeldern abbilden lässt. Betrachtet man die Struktur der Eigen- und Gegeninduktivitäten aus der Hypermatrix 2.17, so lassen sich insbesondere für den Stator Symmetrien innerhalb der Matrix erkennen, die für die Vereinfachung des Gleichungssystems der Synchronmaschine ausgenutzt werden können.
Park [1] hat erkannt, dass durch die Wahl einer geeigneten Transformation in Form der Matrix T (s. Gl. 2.27) ein gekoppeltes Gleichungssystem mit zeitveränderlichen Koeffizienten in eine weit gehend entkoppelte Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten überführt werden kann. Formell bedeutet dies die Transformation der dreiphasigen Spannungen und Ströme (U_{UVW}, I_{UVW}) in ein neues d-q-Rotorkoordinatensystem.
Gleichzeitig müssen die reellen Parameter der in 2.16 beschriebenen Gleichungen der elektrischen Maschine entsprechend der Transformationsvorschriften in d-q-Parameter überführt werden (s. Gl. 2.26, 2.27):

$$\begin{bmatrix}\Psi_{0dq}\\ \Psi_{FDQ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}T & 0\\ 0 & E_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_{UVW}\\ \Psi_{FDQ}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}T & 0\\ 0 & E_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}L_{SS} & L_{SR}\\ L_{RS} & L_{RR}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}T^{-1} & 0\\ 0 & E_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}T & 0\\ 0 & E_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_{UVW}\\ I_{FDQ}\end{bmatrix} \tag{2.26}$$

Mit der Transformationsmatrix T:

$$T=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2}\\ \cos\theta & \cos(\theta-120°) & \cos(\theta+120°)\\ \sin\theta & \sin(\theta-120°) & \sin(\theta+120°)\end{bmatrix} \tag{2.27}$$

Wobei die vier Elemente L_{SS}, $L_{RR,}$, L_{SR} und L_{SR} (Indizes: Rotor R und Ständer S) der Hypermatrix die Eigen- und Gegeninduktivitäten der Synchronmaschine in Gleichung 2.17 repräsentieren. Das Element E_3 bezeichnet die 3×3-Matrix, θ bildet den Winkel zwischen einer Referenzspannungsphase und der d-Achse in der Transformationsmatrix T (s. Bild 2.8). Mithin zerfällt die Matrix 2.17 durch die Transformation mit der Park-Martix T in eine relativ schwach besetzte Matrix [25]:

$$\begin{pmatrix} \psi_0 \\ \psi_d \\ \psi_q \\ \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_{SF} & kM_{SD} & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_{SQ} \\ & & & & & \\ 0 & kM_{SF} & 0 & L_F & M_{FD} & 0 \\ 0 & kM_{SD} & 0 & M_{FD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_{SQ} & 0 & 0 & L_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_q \\ \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{pmatrix} \tag{2.28}$$

$$k=\sqrt{3/2} \qquad L_0=L_S-2M_S \qquad L_d=L_S+M_S+(3/2)L_P \qquad L_q=L_S+M_S-(3/2)L_P \tag{2.29}$$

Durch die Anwendung der Matrix 2.27 erhalten wir die transformierten Spannungen, Ströme und Flüsse des dreisträngigen Systems:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} u_0 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix} \text{ und } \begin{bmatrix} \Psi_0 \\ \Psi_d \\ \Psi_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \Psi_u \\ \Psi_v \\ \Psi_w \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

Für die Bestimmung der korrekten Parameter in 2.27 ist es sinnvoll, aus der Vielfalt der Möglichkeiten diejenige Transformationsmatrix zu wählen, bei der Leistungsinvarianz zwischen realem und transformiertem Berechnungsmodell besteht (s. Gl. 2.31):

$$\begin{bmatrix} I_0 & I_d & I_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_U & I_V & I_W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

Wird diese Transformation bei dreiphasigen Strömen und Spannungen in einem symmetrischen System und einem Belastungspunkt mit festem Winkel α_I und α_U angewandt, wird der zeitabhängige Term mit dem Rotorpositionswinkel θ eliminiert:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \hat{I}\sin(\theta + \alpha_I + 0°) \\ \hat{I}\sin(\theta + \alpha_I - 120°) \\ \hat{I}\sin(\theta + \alpha_I + 120°) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 \\ (3/2)\hat{I}\sin\alpha_I \\ (3/2)\hat{I}\cos\alpha_I \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{I}\sin\alpha_I \\ \hat{I}\cos\alpha_I \end{bmatrix} \tag{2.32}$$

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_d \\ U_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \hat{U}\sin(\theta + \alpha_U + 0°) \\ \hat{U}\sin(\theta + \alpha_U - 120°) \\ \hat{U}\sin(\theta + \alpha_U + 120°) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 \\ (3/2)\hat{U}\sin\alpha_U \\ (3/2)\hat{U}\cos\alpha_U \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{U}\sin\alpha_U \\ \hat{U}\cos\alpha_U \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

Die Maschinengleichungen des dreisträngigen Systems und deren Ableitungen werden bei einem angenommenen Betriebspunkt durch die Parktransformation T auf die d-q-Koordinaten überführt, sodass die Ständerwicklung eine feste Lage gegenüber den Polen erhält (s. Bild 2.8).

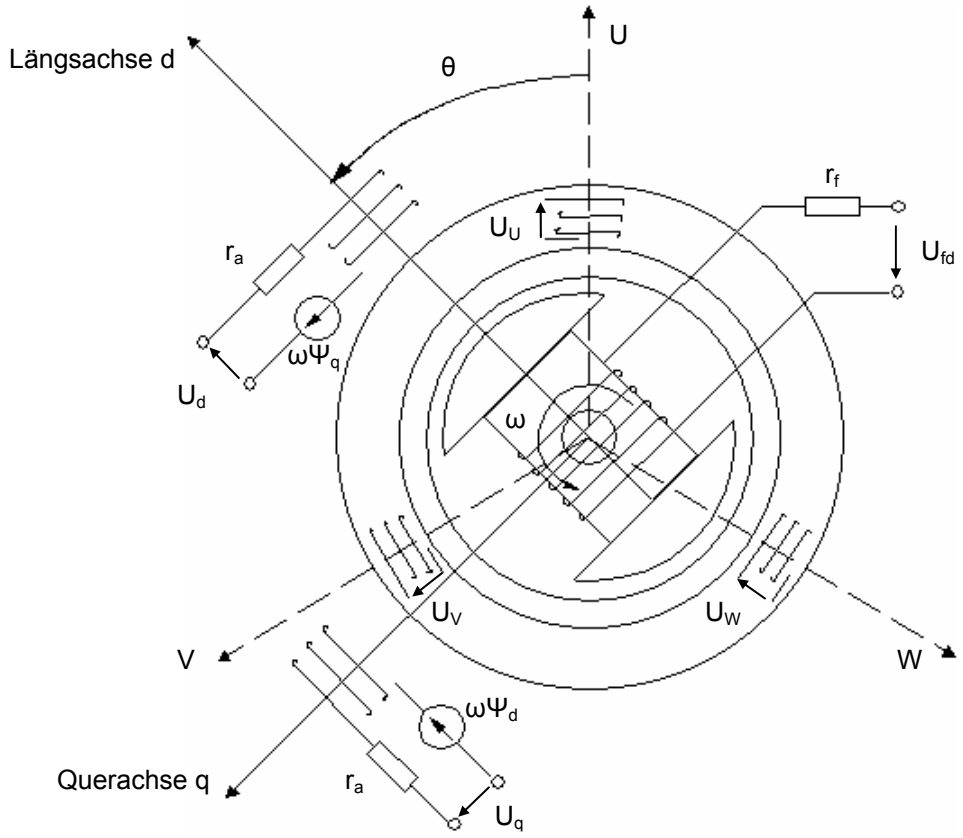


Bild 2.8: Querschnitt einer zweipoligen Synchronmaschine

Die Matrizengleichung 2.16 wird entsprechend der Transformationsvorschriften durch die Matrix T in das d-q-System umgesetzt:

$$\begin{bmatrix} U_{0dq} \\ U_{FDQ} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} T(r_{UVW})T^{-1} & 0 \\ 0 & r_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0dq} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} T(d\Psi_{UVW}/dt) \\ d\Psi_{FDQ}/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (dT/dt)\Psi_{UVW} \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} U_{n,0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Hierbei stellt $U_{n,0dq}$ die parktransformierte Sternspannung U_n dar. Mit $\Psi_{0dq}=T\,\Psi_{UVW}$ gilt für die Ableitung des Flusses:

$$\frac{d\Psi_{0dq}}{dt}=\frac{dT}{dt}\Psi_{UVW}+T\frac{d\Psi_{UVW}}{dt} \tag{2.35}$$

$$T\frac{d\Psi_{UVW}}{dt}=\frac{d\Psi_{0dq}}{dt}-\frac{dT}{dt}T^{-1}\Psi_{0dq} \tag{2.36}$$

$$\frac{dT}{dt}T^{-1}\Psi_{0dq}=\omega\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&-1\\0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Psi_0\\\Psi_d\\\Psi_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\-\omega\Psi_q\\\omega\Psi_d\end{bmatrix} \tag{2.37}$$

Im Fall der Sternbehandlung und Unsymmetrie können Sternspannung und -strom (U_n, I_n) in Gleichung 2.16 ebenfalls auf das d-q-System transformiert werden:

$$U_{n,0dq}=T\,U_n=-T(r_nE_3)T^{-1}\,T\,I_n-T(L_nE_3)\,T^{-1}\,T\frac{dI_n}{dt} \tag{2.38}$$

In der Unsymmetrie besitzt die transformierte Sternspannung $U_{n,0dq}$ nur ein Element in der ersten Zeile:

$$U_{n,0dq}=-T(r_nE_3)\,T^{-1}I_{n,0dq}-T(L_nE_3)T^{-1}\frac{dI_{n,0dq}}{dt}=-\begin{bmatrix}r_0I_0\\0\\0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}L_0dI_0/dt\\0\\0\end{bmatrix} \tag{2.39}$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 2.37 und 2.39 in 2.34 ergeben sich die allgemeinen Park'schen Differenzialgleichungen der Synchronmaschine:

$$\begin{bmatrix}U_0\\U_d\\U_q\\U_F\\U_D\\U_Q\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}r_0&0&0&0&0&0\\0&r_a&0&0&0&0\\0&0&r_a&0&0&0\\0&0&0&r_f&0&0\\0&0&0&0&r_D&0\\0&0&0&0&0&r_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_0\\I_d\\I_q\\I_F\\I_D\\I_Q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\-\omega\Psi_q\\\omega\Psi_d\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Psi_0\\\Psi_d\\\Psi_q\\\Psi_F\\\Psi_D\\\Psi_Q\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}r_0I_0\\0\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix}-\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}r_0I_0\\0\\0\\0\\0\\0\end{bmatrix} \tag{2.40}$$

Der Sternstrom I_n und der transformierte Sternstrom $I_{n,\,0dq}$ (d.h. I_0) sind bei symmetrischer Betrachtung und isoliertem Sternpunkt gleich Null (I_0=0) zu setzen, dadurch

ergeben sich durch die Betrachtung der in 2.28 d-q-transformierten Eigen- und Gegeninduktivitäten die endgültigen Parkmodellgleichungen.

$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_d \\ U_q \\ U_F \\ U_D = 0 \\ U_Q = 0 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} r_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_a & \omega L_q & 0 & 0 & k\omega M_{SQ} \\ 0 & -\omega L_d & r_a & -k\omega M_{SF} & -k\omega M_{SD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_q \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_{SF} & kM_{SD} & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_{SQ} \\ 0 & kM_{SF} & 0 & L_F & M_{DF} & 0 \\ 0 & kM_{SD} & 0 & kM_{DF} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_{SQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_q \\ I_F \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \qquad (2.41)$$

In der Systemgleichung 2.41 der Synchronmaschine ist der Faktor k= $\sqrt{3/2}$, da es sich bei der Parktransformationsmatrix um eine leistungsinvariante Form ($T^{-1}=T^T$) handelt.

Für die Synchronmaschine werden verschiedene Ersatzschaltbilder verwendet, die sich durch die berücksichtigten Koppelinduktivitäten im Rotorkreis oder die Anzahl der erweiterten Rotorzweige unterscheiden.

Das nachstehende Bild 2.9 zeigt ein erweitertes Ersatzschaltbild der Synchronmaschine nach Canay [3,4]. Im ursprünglichen Ersatzschaltmodell von Park waren die Rotorkoppelinduktivitäten X_{cd} und X_{cq} nicht vorhanden, ebenso gab es nur einen Dämpferzweig auf der q-Achse. Bei der ursprünglichen Darstellung der Maschine konnten die elektromagnetischen Vorgänge im Rotor nur sehr grob erfasst werden. Die Schwäche des ursprünglichen Modells liegt darin, dass die Wechselanteile nicht richtig auf die Dämpfer- und Feldwicklung aufgeteilt werden, obwohl die gesamte Summe korrekt ist. Will man diese Aufteilung verbessern, so muss im Längszweig zwischen Hauptinduktivität (X_{hd} bzw. X_{hq}) und Dämpferzweig eine zusätzliche Streuinduktivität (X_{cd}, X_{cq}) angebracht werden, wodurch die unterschiedliche magnetische Kopplung zwischen Hauptfeld, Dämpfer und Erregerfeld berücksichtigt wird. Diese Erweiterung wurde erstmalig von Canay [2,3] vorgeschlagen und hat sich inzwischen

als Standard durchgesetzt. Die Kenndaten für die drei im Ersatzschaltbild 2.9 verwendeten Maschinen sind im Anhang detailliert aufgelistet und beschrieben.

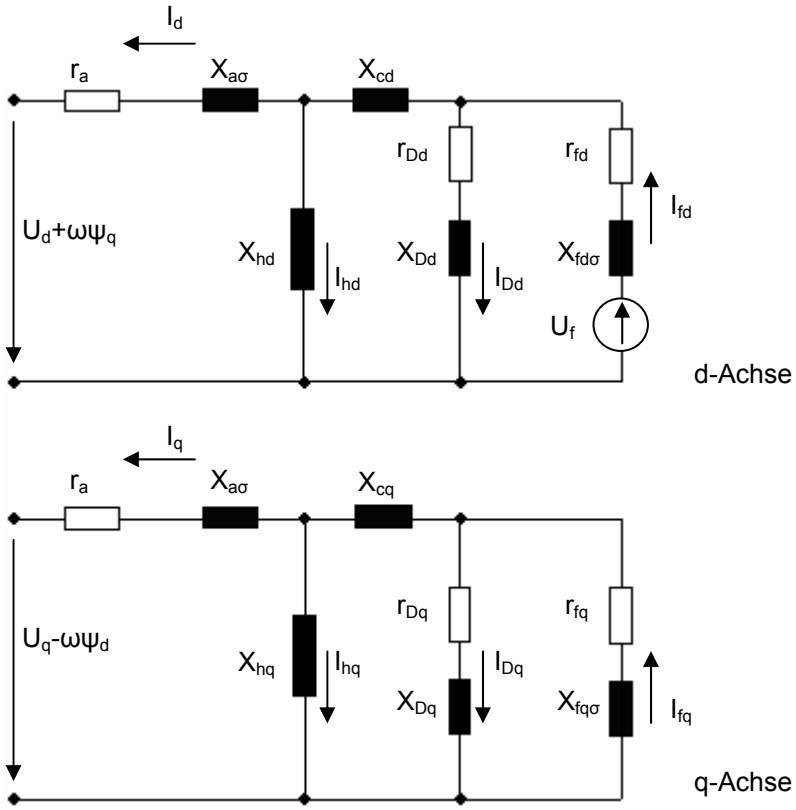


Bild 2.9: Erweitertes Ersatzschaltbild der Synchronmaschine nach Canay

Bei niederfrequenten Pendelungen ergeben sich größere Differenzen zwischen den berechneten und gemessenen Strömen, da in solchen Fällen die Eindringtiefe des magnetischen Flusses größer ist, und die Ströme nicht nur im Dämpfer und der Eisenoberfläche fließen, sondern auch im Balleninneren [6,7,8]. Damit diese Ausgleichsvorgänge mit niederfrequenten Pendelungen richtig simuliert werden, muss das Ersatzschaltbild um weitere Dämpferkreise erweitert werden [2,3].
Die wesentlichen Vor- und Nachteile bei der Beschreibung der Synchronmaschine mit dem Park'schen Modell sind nachfolgend zusammengefasst:

(+) Das transformierte Maschinengleichungssystem ist erheblich vereinfacht und enthält die zeitunabhängigen Eigen- und Gegeninduktivitäten.

(+) Die einfache Struktur der d-q-Ersatzschaltbilder ermöglicht eine leicht verständliche Zuordnung der physikalischen Maschineneigenschaften.

(+) Der Einfluss der Ersatzschaltparameter auf transiente Ströme, Spannungen und Momente lässt sich bestimmen.

(+) Die d-q-transformierten Ströme und Spannungen sind im stationären Betrieb zeitunabhängig und hängen nur noch von einem festen Winkel ab.

(+) Die Ersatzschaltbilder lassen sich leicht erweitern, um spezielle Maschineneigenschaften zu untersuchen.

(+) Relativ leichte Bestimmung der meisten Parameter mit messtechnischen und rechnerischen Methoden.

(+) Berücksichtigung niederfrequenter Pendelungen ist durch zusätzliche Dämpferkreise möglich.

(-) Vernachlässigung der Sättigung der Eisenwege und Hysterese

(-) Nur das Grundwellenverhalten der Maschine wird erfasst.

Die Sättigung kann nachträglich durch die Anpassung der Ersatzschaltbilder der d-q-Achse berücksichtigt werden. Hierbei wird die Hauptfeldinduktivität durch die Korrektur der entsprechenden Leerlaufkennlinie der Induktivitäten X_{hd} und X_{hq} angepasst, während die Sättigung der Streuwege z.B. bei Kurzschluss durch einen Korrekturfaktor bei Streuinduktivitäten einbezogen wird.

2.2.3 Kettenleitermodelle

Die in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Ersatzschaltbilder beschreiben die Eigenschaften der Maschine in einem verhältnismäßig engen Frequenzbereich.
Will man diese Frequenz dennoch ausdehnen, so muss die Anzahl der Ersatzrotorkreise sehr stark vergrößert werden, wodurch aus dem einfachen Netzwerk ein ausgedehntes elektrisches Kettenleitermodell entsteht [6,9]. Das so erweiterte Modell gibt das Klemmenverhalten der Maschine im Gesamtspektrum der Frequenzen besser wieder, hat jedoch den Nachteil, dass die realen Bauteile der Synchronmaschine teilweise nicht mehr direkt den einzelnen Stromkreisen zugeordnet werden können. Bei dieser speziellen Erweiterung wird die Feldwicklung mit dem Gleichstrom I_{fd} nicht direkt an die Hauptreaktanz X_{hd}, sondern an einen Zwischenkreis angehängt, wie im Bild 2.10 dargestellt.

Durch Erweiterungen auf mehrere Zweige (r_1 bis r_5) können z.B. neben dem Erreger- und Dämpferverhalten die Wirbelströme im massiven Eisen sowie die Einflüsse der Läuferballengebiete und der Läuferkappe berücksichtigt werden.

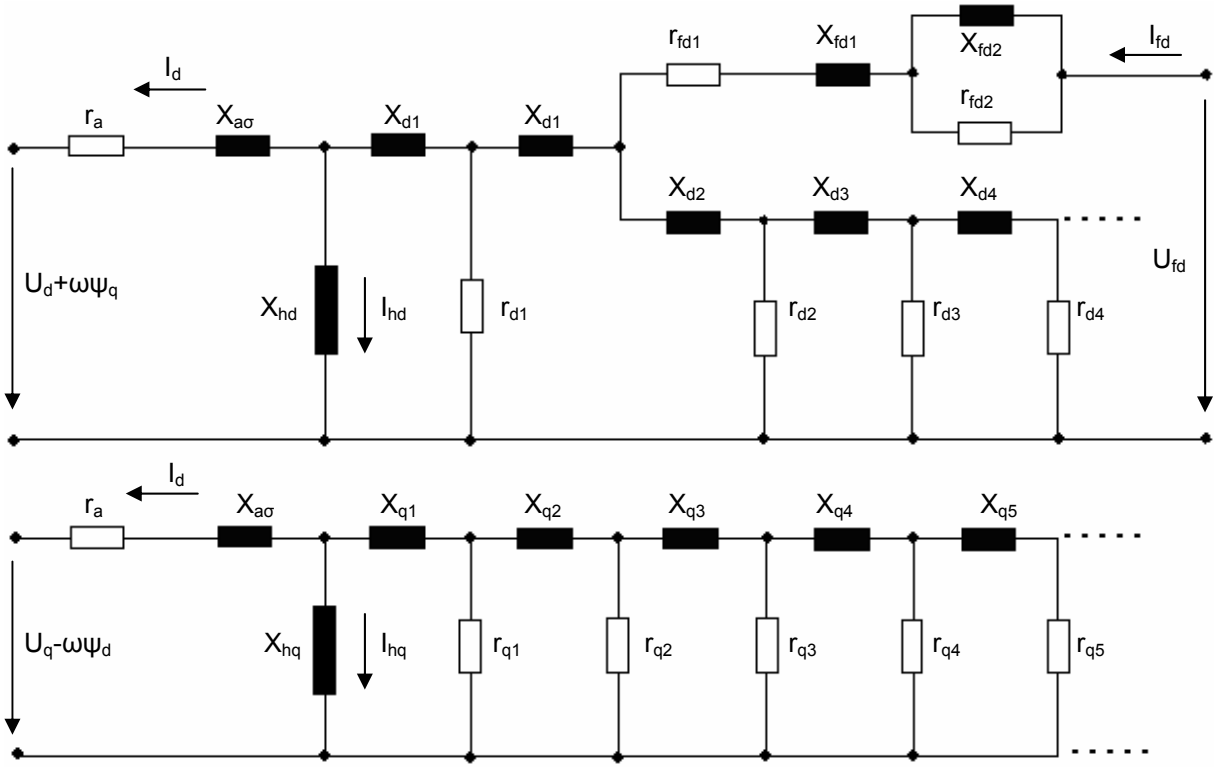


Bild 2.10: Kettenleitermodell der Synchronmaschine

Der hohe Aufwand für die Bestimmung der Parameter war der Grund dafür, dass derartige Messungen und Parameteridentifikationen selten durchgeführt wurden [27, 28]. Das erweiterte Kettenleitermodell dient vor allem der Verifizierung der Ergebnisse des konventionellen Parkmodells, wobei das Augenmerk insbesondere auf die transienten Vorgänge mit langsamen Polradpendelungen gerichtet wird.

Das Kettenleitermodell bietet für die Untersuchung des Drei-Maschinen-Systems die Möglichkeit an, die direkte elektrische Kopplung zwischen Generator und Erregermaschinen zu verwirklichen. Deshalb wird bei dieser Arbeit das Park'sche Ersatzmodell erweitert, sodass aus ihm ein elektrisches Kettenleitermodell aus d-q-Ersatzschaltbildern für die Synchronmaschinen mit den unterschiedlichen Spannungen, Frequenzen und Leistungen entsteht.

2.3 Erregersysteme der Synchronmaschine

Bei der Stromerzeugung durch den Generator ist je nach Netzbelastung und Netzspannung eine angepasste Erregerleistung notwendig, die Erregersysteme haben hier die folgenden wichtigen Aufgaben zu erfüllen:

- Erregung des Synchrongenerators
- Blindleistungsregelung
- Spannungshaltung.

Die Erregersysteme setzen sich aus unterschiedlichen Erregermaschinen, Transformatoren und den leistungselektronischen Gleichrichtern zusammen, deshalb gibt es eine Vielzahl verschiedener Erregereinrichtungen. Hierbei stellen die Erregermaschinen in der Regel die dreiphasigen Ströme mit mehrfacher Netzfrequenz bereit, und die Gleichrichter wandeln die Drehströme in den Gleichstrom für den Generator um. Die Regelung der Spannungen und Ströme geschieht mit komplexen Leistungselektronikschaltungen z.B. durch den Soll-Ist-Vergleich der Generatorklemmenspannung. Für das gesamte Regelsystem zur Erregung der Synchrongeneratoren wird eine Versorgungsleistung von ca. ein bis drei Prozent installiert, die in der Regel durch kleinere Erregermaschinen von einigen kW- bis MW-Leistungsbereichen bereitgestellt wird.
Die Erregermaschinen sind entweder mechanisch mit dem Generator und der Turbine auf einer gemeinsamen Welle gekoppelt oder haben individuell getrennte Antriebe. In der Praxis werden folgende sechs Erregersysteme und deren Kombinationen eingesetzt:

1) DC-Erregermaschinen
2) Permanentmagnet-Erregermaschinen
3) Selbsterregte, kompoundierte Synchrongeneratorsysteme
4) Statische Erregermaschinen mit einem gesteuerten Gleichrichter
5) Innenpol-Drehstromerregergenerator mit Dioden- oder Thyristorstromrichter

6) Außenpol-Drehstromerregergenerator mit rotierendem, ungesteuertem Gleichrichter.

Bei der Auswahl der genannten Möglichkeiten spielen die Anforderungen an das Erregersystem eine wichtige Rolle. Die wichtigsten Anforderungen sind:

a) Netzunabhängige Versorgung der Erregereinrichtungen
b) Wartungsarmes Erregersystem
c) Keine Zusatzerwärmung durch den Kontakt der Kohlebürsten mit den Schleifringen
d) Schnelle Erregung.

Bei der klassischen Nachbildung des Erregersystems werden regelungstechnische Standardblöcke verwendet, die einzelne Elemente wie z.B. Haupterreger, Hilfserreger und Gleichrichter nur sehr grob berücksichtigen. Die zugehörigen Zeitkonstanten, Verstärkungsfaktoren und Begrenzungen werden so gewählt, dass das grundsätzliche Blockverhalten nahezu identisch mit dem Spannungs- und Stromverhalten an der Schnittstelle zwischen dem Regler und der Erregerwicklung des Generators ist. Die Anbindung des Reglerblocks an das Park'sche Ersatzschaltbild erfolgt über die d-Achse. In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Reglermodellen [15,48,53], die aufgrund ihres physikalischen Charakters in drei große Klassen aufgeteilt sind:

- Statische Erregersysteme (ST)
- Gleichstromerregermaschinen (DC)
- Drehstromerregersysteme (AC).

Sie werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer beschrieben.

2.3.1 Statische Erregersysteme (ST)

Statische Erregereinrichtungen werden neben dem Turbosatz auf dem Fundament aufgestellt. Die Gleichstromversorgung der rotierenden Generatorerregerwicklung erfolgt über Schleifringe mit Kohlebürsten.
Der typische Aufbau besteht aus einem Stromrichter, einem Reglerteil, den Schleifringen und einem Drehstromtransformator, der in der Regel aus dem Eigenbedarfsnetz gespeist wird.
Es gibt eine Vielzahl von ST-Systemen, die sich durch die Ausführung der einzelnen Komponenten, wie z.B. geregelte Stromrichter, voneinander unterscheiden. Ihre grundlegende Struktur ist im Bild 2.11 dargestellt.

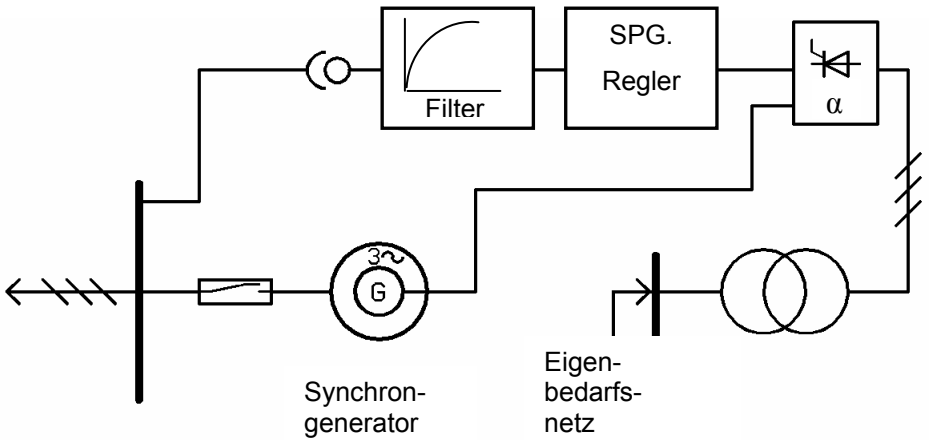


Bild 2.11: ST-Erregersystem

Die größten Vorteile dieser Art der Erregung sind der einfache Systemaufbau und die Möglichkeit der direkten Spannungs- und Strommessung, die für die Generatorsteuerung sehr wichtig ist. Diese Vorteile werden allerdings durch eine Vielzahl von Nachteilen aufgewogen:

- Die Versorgung der Erregereinrichtungen ist netzabhängig.
- Die Kohlebürsten sind häufig zu wechseln.
- Durch Kohlebürsten können höhere Verluste entstehen.
- Die Wartungsarbeiten sind im Vergleich mit der bürstenlosen Erregung umfangreicher.

In der Vergangenheit kamen ST-Erregersysteme bei kleineren bis mittleren Maschinenleistungen zum Einsatz. Für einen größeren Turbosatz werden sehr hohe Ströme (bis 10 kA) benötigt, die in den ST-Systemen mit einem vertretbaren Aufwand in den rotierenden Wicklungen nicht zu gewährleisten sind.
Hinzu kommt, dass bei Maschinen großer Leistung der Wellendurchmesser auf der Erregerseite größer ist, wodurch die Schleifringe ebenfalls größere Durchmesser aufweisen und daher hohe Umlaufgeschwindigkeiten haben. Dadurch wird die Gleichstromversorgung erheblich erschwert.

2.3.2 Erregersysteme mit Gleichstrommaschinen (DC)

Das DC-Erregersystem besteht aus der Gleichstrommaschine (GM), deren Ankerkreis mit den Schleifringen des Synchrongenerators (SG) verbunden ist (s. Bild 2.12). Üblicherweise wird diese Gleichstrommaschine fremderregt ausgeführt.
Den für den Generator erforderlichen Erregerstrom liefert der Ankerstrom der Gleichstrommaschine, der mit deren Erregung über einen Regelkreis eingestellt wird. Hierbei wird die Generatorklemmenspannung mit der Führungsgröße (U) des Spannungsreglers (SPG) verglichen, und schließlich wird durch die Stelleinrichtung (SE) eine geeignete Erregerspannung des Generators eingestellt.

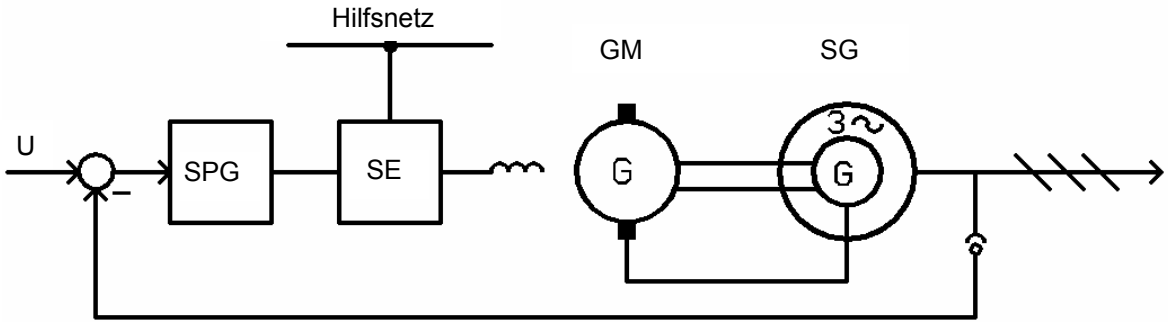


Bild 2.12: DC-Erregersystem

Bei der Nachbildung des Spannungsreglers wird die fremderregte Gleichstrommaschine durch ein linearisiertes Modell mit Zeitkonstanten näherungsweise ersetzt, die für verschiedene Arbeitspunkte wie z.B. Leerlauf, Bemessungsbetrieb und Betrieb an

der Stabilitätsgrenze bestimmt werden sollen. Für die Untersuchung des dynamischen Verhaltens bei größeren Abweichungen, wie z.B. zur Bestimmung der Erregeranstiegszeit, wird das Modell durch Einführung einer Sättigungskennlinie erweitert [13]. Als Nachteil ist zu nennen, dass bei dieser Technik die große Zeitkonstante der Erregerwicklung der Haupterregermaschine sehr schnellen Änderungen der Erregerspannung am Synchrongenerator entgegenwirkt [30]. Ein weiterer Nachteil bei den Gleichstrommaschinen sind die hohen Wirbelstromverluste [31].
Ferner ist der hohe Wartungsaufwand wegen der Schleifringe und des Wechselns der Kohlebürsten zu erwähnen. Deshalb ist dieses Modell weniger für Kraftwerke zu empfehlen.

2.3.3 Drehstromerregersysteme (AC)

Die verschiedenen Erregersysteme sind in den IEEE-Studien [14,15] für Drehstromerregersysteme ausführlich beschrieben und dort als AC1- bis AC6-Modelle klassifiziert. Es handelt sich um grobe Nachbildungen der eingesetzten Drehstromerregermaschinen und Gleichrichter mit unterschiedlichen Regelkreisen.
Hierbei ähneln sich die AC1- und AC2-Modelle und werden für die bürstenlose Erregerausführung benutzt. In diesen Modellen wird dem Haupterreger ein ungesteuerter Gleichrichter zugeordnet.
Die AC3- und AC4-Modelle werden bei selbsterregten Synchronmaschinen verwendet und unterscheiden sich durch Diodengleichrichter (AC3) und Thyristorengleichrichter (AC4).
Beim AC5-Modell handelt es sich um kleine Erregersysteme wie bei Permanentmagnetmaschinen. Das AC6-Modell beschreibt Erregersysteme mit gesteuerten Gleichrichtern, bei denen die maximale Reglerausgangsspannung abhängig von der Terminalspannung ist.
Eine der AC-Varianten, welche durch die Anforderungen a) bis d) in Abschnitt 2.3 genau beschrieben ist, ist die im Bild 2.13 dargestellte bürstenlose Erregerausführung. Sie besteht aus einer Außenpolmaschine als Haupterreger und einer Innenpolmaschine in hochpoliger Permanentmagnetausführung als Hilfserreger.

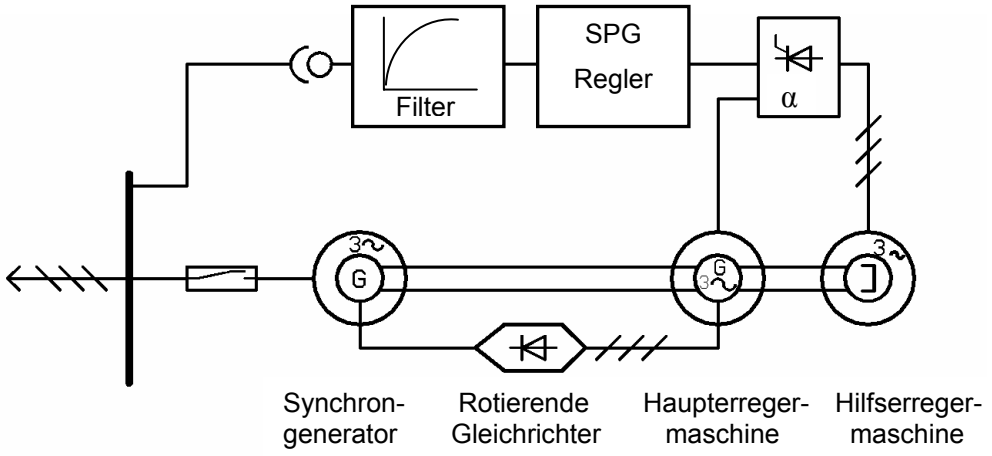


Bild 2.13: Bürstenloses Erregersystem

Beide Erregermaschinen inklusive des gesteuerten Gleichrichters sind auf der gleichen Welle montiert und bilden den Erregersatz, der an den Generator angeflanscht ist. Sie beziehen die mechanische Leistung von der Turbine. Das System nach Bild 2.13 lässt sich durch ein Reglerstrukturdiagramm mit 13 Blöcken hinreichend genau beschreiben. Die einzelnen Blöcke im Bild 2.14 erfassen näherungsweise physikalische Vorgänge im Reglersystem.

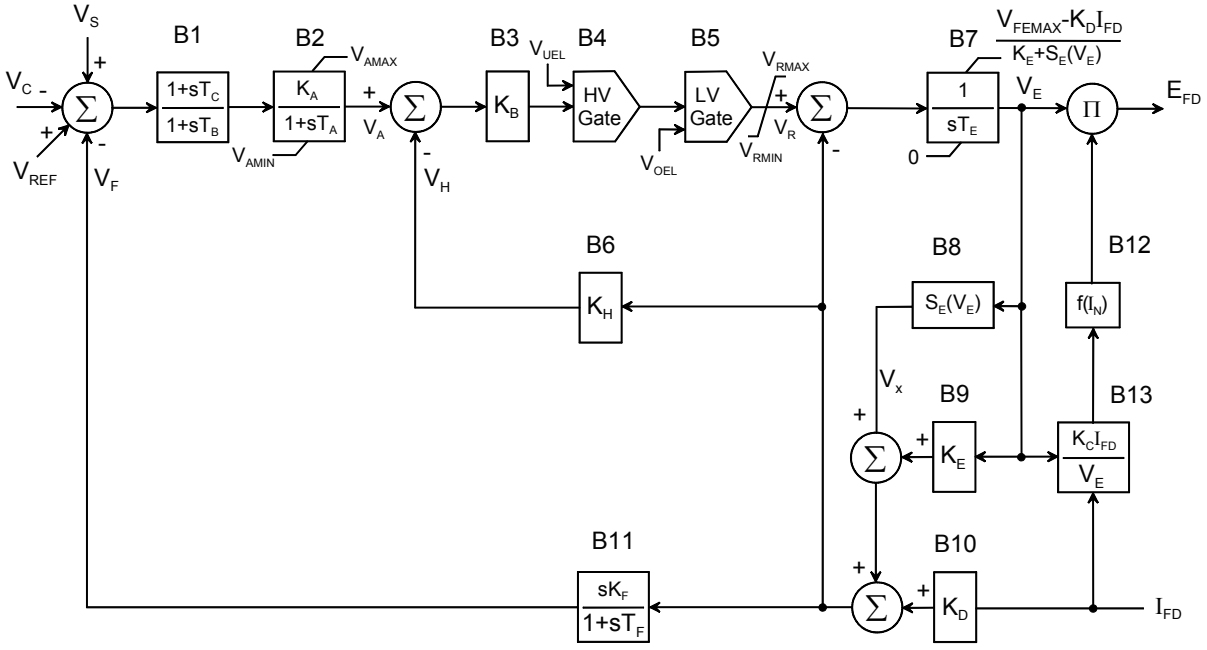


Bild 2.14: AC2-IEEE-Modell für bürstenlose Erregung

Diese Reglerblöcke haben folgende Funktionen:

- Der Eingang des Blocks 1 erhält die Regeldifferenz, die aus dem Vergleich des Terminalsignals V_C (Ist-Wert) mit dem Signal V_{REF} (Soll-Wert) und möglichen Erweiterungen, z.B. dem Power-System-Stabilisator-Signal $V_{S,}$ entsteht.
- Die Regelblöcke B1 und B2 im Spannungsregler bewirken eine dynamische Verstärkung des Eingangssignals, bei der die Regelabweichung durch den hohen Faktor (K_A) im Verzögerungsglied vergrößert wird.
- Im Block B3 wird das Reglersignal durch ein Proportionalglied weiter verstärkt.
- Bei den Blöcken B4 und B5 handelt es sich um die Unter- und Obererregerbegrenzung (V_{UEL}, V_{OEL}).
- Im Integriererblock B7 werden die Erregermaschinen allein durch ihre Zeitkonstante (T_E) berücksichtigt.
- Im Block B8 kann eine grobe Sättigungskennlinie für die Erregermaschine angenommen werden. Die Blöcke B9 und B10 beschreiben die Erregermaschinenkonstanten (K_E, K_D). Die Ausgangssignale der drei Blöcke werden anschließender unter Einfluss der dynamischen Ausgangsspannung V_E und des Erregerstroms I_{FD} zusammengeführt und als Eingangssignal für die stabilisierenden Rückkopplungen V_F und V_H mittels B11 und B6 benutzt.
- Der Gleichrichter kann sehr grob durch die Blöcke B12 und B13 einbezogen werden.

Die wesentlichen Nachteile sämtlicher vorstehender Erregermodelle (ST, DC, AC) sind:

a) Die physikalischen Größen in einzelnen Komponenten, wie Ströme und Spannungen, können nicht ermittelt werden, sodass eine Aussage hinsichtlich ihrer Belastungen nicht möglich ist.

b) Das dynamische Verhalten der Erregermaschinen mit Gleichrichtern in Störfällen kann nicht erfasst werden.

c) Die Anpassungen der Modelle an verschiedene Erregersysteme sind häufig aufwändig.

d) Die Regelblöcke mit Zeitkonstanten führen zu zeitverzögerten Reaktionen des Spannungsreglers auf Signaländerungen.

Deshalb werden diese Reglermodelle in Untersuchungen wegen fehlender Herstellerparameter häufig durch vereinfachte Modelle ersetzt.
Bezüglich der Punkte c) und d) zeigen die digitalen Entwürfe solcher Erregermodelle immer mehr Vorteile und reduzieren die Pendelungen im Modell. Die digitalen Regler verfügen über Hardware mit großen Abtastraten und Algorithmen, die leichter ersetzt und erweitert werden können [29,55].
Ein bürstenloses Erregersystem, das in dieser Arbeit im Vordergrund steht, wird in der Regel mit einem vereinfachten AC1- oder AC2-Modell grob nachgebildet. Eine genaue Nachbildung des im Bild 2.13 dargestellten Systems für die bürstenlose Erregung des Generators ist allein aus programmtechnischen Gründen nicht realisierbar, weil die drei Synchronmaschinen verschiedene Frequenzen, Spannungen und Polauslegungen haben.

2.4 Gleichrichterschaltungen bei bürstenloser Erregung

Für die Umwandlung des dreiphasigen Spannungssystems in ein Gleichspannungssystem werden die Brückenschaltungen in der Gleichstromantriebstechnik vorwiegend als Sechs-Pulsschaltung ausgeführt, und diese werden gleichfalls für den Einsatz in Erregersystemen der Synchronmaschinen verwendet.
Das Ziel dieser Arbeit ist nicht die Entwicklung oder Erforschung der zahlreichen Gleichrichterschaltungen mit verschiedenen Leistungshalbleitern, sondern die Einbeziehung der Einflüsse realitätsnaher Gleichrichterschaltungen auf Spannungen und Ströme im Erregersystem des Synchrongenerators. Diese Gleichrichterschaltungen haben bei der vorliegenden Arbeit im Drei-Maschinen-System folgende Aufgaben:

- Gleichrichten dreiphasiger Spannungen der Hilfs- und Haupterregersynchronmaschine
- Sichere Bereitstellung des notwendigen Stroms für die Generatorversorgung
- Regelung der Generatorspannung
- Elektrische Verbindung der Ständerseite der Hilfserregermaschine mit den Außenpolen der Haupterregermaschine und die Verbindung der Drehwicklungen des Rotors der Haupterregermaschine mit der Generatorfeldwicklung (Bild 1.2, Abschnitt 1.3).

Gewöhnliche ungesteuerte und gesteuerte Brückenschaltungen im Erregersystem der Synchronmaschine lassen sich in der Regel durch sechs Siliziumdioden oder Thyristoren sowie IGBTs (Insulated Gate Bipolartransistors) realisieren, bei denen die zugehörigen Generatorspannungsphasen nur für einen Teil der Periode mit dem Ausgang leitend verbunden sind. Die allgemeinen charakteristischen Grenzdaten von Leistungshalbleitern, die häufig in Erregersystemen verwendet werden, sind in der Tabelle 2.2 aufgeführt.
Die Thyristoren bzw. Dioden werden im Netzdatenteil des Simulationsprogramms durch einen nichtlinearen Widerstandszweig entweder als hochohmiger Sperrwiderstand oder als niederohmiger Widerstand im Durchlassbereich nachgebildet.

Leistungs-halbleiter	Spannungs-grenze (kV)	Stromgrenze (kA)	Leitspanungs-abfall (V)	Schalt-verzögerung (µs)	Minimale Pulsweite (µs)	Ansteuerungs-aufwand
Diode (Si.)	0.5	10	2	bis 2	---	---
Thyristor	5.5	6.5	3	bis 300	bis 500	mittel
IGBT	3.0	3.0	4	bis 1.2	bis 5	klein

Tabelle 2.2: Charakteristische Daten von Leistungshalbleitern, Quelle [32]

Die Modellierung der Zündimpulse des gesteuerten Ventils erfolgt im Reglerteil, indem z.B. Impulsdauer, Verzögerungszeit und Schleusenspannung, bei der sich das Ventil im Durchlass befindet, als Vorgaben für diese Steuerbausteine im Programm benutzt werden können.
Durch die Zusammenschaltung dieser Bausteine können verschiedene Gleichrichter aufgebaut werden.
Die Gleichrichterbrückenschaltung gehört zu den wichtigsten Komponenten der bürstenlosen Erregereinrichtungen und muss detailliert modelliert werden. Das nachfolgende Bild 2.15 verdeutlicht einen Ausschnitt aus der Erregereinrichtung.

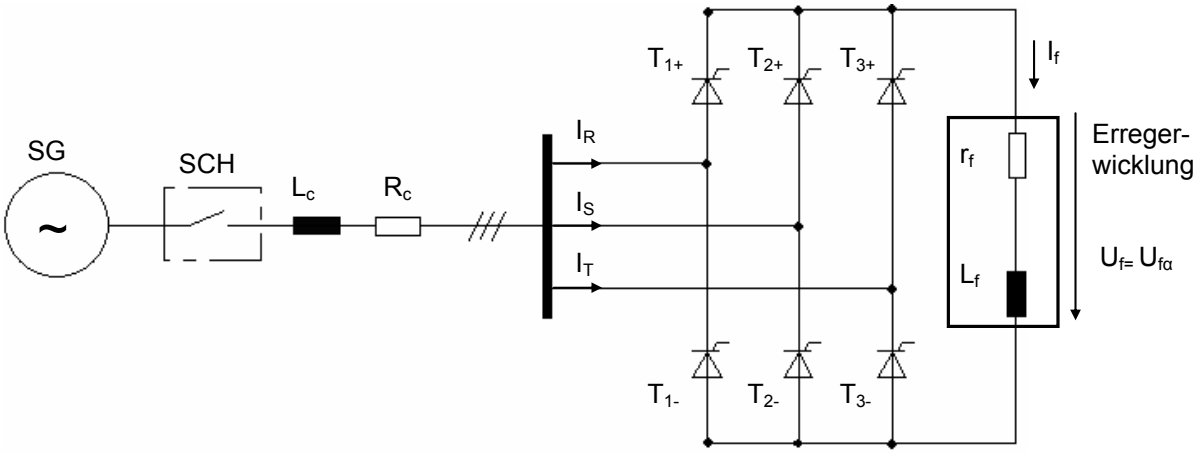


Bild 2.15: Dreiphasige Gleichrichterbrückenschaltung

Die im Bild 2.15 dargestellte Brückenschaltung findet sich sowohl beim Haupterreger als auch beim Hilfserreger und wird dort als gesteuerter und ungesteuerter Gleichrichter eingesetzt.

Die Gleichrichter, die im rotierenden Teil des Erregersystems der bürstenlosen Synchronmaschinen zum Einsatz kommen, sind z.B. aufgrund der extrem wirkenden Fliehkräfte so stark in der Auswahl ihrer Bauteile eingeschränkt, dass vom Kraftwerkshersteller eigentlich nur ein bestimmter Gleichrichterschaltungstyp meistens als 6-Pulsschaltung (B6-Schaltung) eingesetzt wird. Deswegen werden in den folgenden Abschnitten einige dieser Schaltungstypen, ihre elektrischen Eigenschaften und die damit verbundenen Probleme bei numerischen Berechnungen der Simulation ausführlich behandelt.

Die Ausgangsspannung $U_{f\alpha}$ liegt an der Erregerwicklung (r_f, L_f) an. Sie ist eine Gleichspannung, die in einer Wechselspannungsperiode am Ausgang sechs Pulse aufweist. Diese sechs Pulse ergeben sich aus den Hüllkurven der verketteten Wechselspannungen.

Bei einem dreiphasigen System verdoppelt sich wegen der Phasenverschiebung zwischen den jeweils wirkenden positiven und negativen Abschnitten der speisenden Spannungen die Anzahl der Pulse, aus denen die Ausgangsspannung zusammengesetzt wird. Deshalb treten sowohl Gleichstromanteile als auch höherfrequente Anteile auf.

Setzt man statt der Dioden Thyristoren ein, so kann auch jetzt nur derjenige Thyristor neu gezündet werden, der das höchste Anodenpotenzial hat. Dies ist wie beim Diodengleichrichter frühestens ab dem Schnittpunkt zweier Phasenspannungen der Fall. Über eine Steuerelektronik kann die Zündung nicht im natürlichen Zündzeitpunkt, sondern später, um den Steuerwinkel α (sog. Phasenanschnittsteuerung) verzögert, erfolgen [32,33].

Hierbei ist die Ausgangsspannung U_{f0} maximal, wenn der Steuerwinkel α gleich Null ist. Dieser Fall ähnelt dem Verhalten eines Gleichrichters, der jedoch statt der Thyristoren Dioden enthält. Hierbei leitet jede Diode für 1/3 der Periode, d.h. für einen Stromflusswinkel von 120°. Perioden, in denen beide (positive und negative) Gruppen leiten, sind zeitmäßig um 1/6 der Periodendauer, d.h. um 60° gegeneinander verschoben.

Die entstehende Spannung $U_{f\alpha}$ wird über eine Glättungsinduktivität L_f an die Last R_f gelegt. In der Regel wird L_f groß genug dimensioniert, sodass trotz der pulsierenden und gleichgerichteten Spannung der resultierende Ausgangsgleichstrom I_f praktisch konstant bleibt. R_f und L_f repräsentieren in dieser Arbeit die Feldwicklungen der Haupterregermaschine und des Generators.

Alle Wechselspannungskomponenten fallen dann an der Glättungsinduktivität ab, und am Lastwiderstand liegt nur der Mittelwert $U_{f\alpha}$ der Ausgangsspannung an. Der so genannte Kommutierungs- oder Überlappungswinkel γ wird durch den induktiven Anteil L_C der Zuleitungen oder die Streuinduktivitäten der Transformatoren und die Ankerinduktivität der Maschine beeinflusst. Für die Ausgangsspannung ergeben sich folgende Gleichungen:

$$U_{f0} = \frac{3}{\pi\sqrt{3}} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} \sqrt{2} U_{SG} \cos \omega t \, d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{SG} \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} = 1.35 U_{SG} \tag{2.42}$$

$$I_{R,eff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_f^2 \, d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_f \tag{2.43}$$

Hierbei ist U_{SG} die verkettete Spannung des dreiphasigen Drehstromsystems. Wegen der großen Feldinduktivität der Erregerwicklung kann der Laststrom I_f während des Kommutierungsvorgangs als konstant angenommen werden.

Durch die Kommutierung wird der Mittelwert der Ausgangsspannung etwas herabgesetzt. Dieser Einfluss kann jedoch vernachlässigt werden.

Weiterhin ist bekannt, dass sich der Strom in der einschaltenden Phase von 0 auf I_f ändert. Daher erhält man durch eine Integration, hier am Beispiel des Kommutierungsvorgangs von der Phase R auf die Phase S unter Vernachlässigung der Ohmschen Verluste gegenüber dem induktiven Anteil, folgende Gleichungen:

$$I_f = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\alpha+\gamma}{\omega}} \frac{U_R - U_S}{2L_C} dt \tag{2.44}$$

$$U_R - U_S = \sqrt{2} U_{SG} \sin \omega t \tag{2.45}$$

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{\omega L_C I_f}{\sqrt{2} U_{SG}} \tag{2.46}$$

Bei den gesteuerten Gleichrichtern in Form einer B6-Brückenschaltung kann sich der Steuerwinkel α zwischen 0° und 90° bewegen [32]. Unter Annahme eines Überlappungswinkels γ infolge der Kommutierung durch die vorgeschaltete Induktivität L_C im Bild 2.15 und der Vernachlässigung der parasitären Elemente der Schaltung ergibt sich:

$$U_{f\alpha} = U_{f0} \frac{\cos\alpha + \cos(\alpha + \gamma)}{2} \tag{2.47}$$

Dadurch wird die aufgenommene Gleichstromwirkleistung P_f abhängig vom Steuerwinkel α:

$$P_f = U_{f0} I_f \cos\alpha \tag{2.48}$$

$$P_{SG} = \sqrt{3} U_{SG} I_{SG} \cos\varphi \tag{2.49}$$

Die Gleichstromleistung P_f ist bei Schaltungen mit geringen Verlusten etwa gleich der Synchrongeneratorwirkleistung P_{SG} anzunehmen.
Die Tatsache, dass die Maschine bei einem großen Steuerwinkel eine hohe Blindleistung liefern muss, erklärt die verbrauchte Steuerblindleistung Q_{SB} und die Verzerrungsleistung Q_V der Brückenschaltung nach Gleichung 2.50. Für die Verzerrungsleistung, die auch als Oberschwingungsblindleistung bezeichnet wird, ist die Nichtsinusförmigkeit des Speisestromes verantwortlich [40]:

$$Q_V = \sqrt{S_{SG}^2 - P_f^2 - Q_{SB}^2} \tag{2.50}$$

In diesem Fall kann die Scheinleistung des Generators S_{SG} beträchtlich größer als die Wirkleistung sein, und der Strom hat eine andere Kurvenform als die Spannung. Daher ist der Strom stärker als die Spannung verzerrt.
Die durch den Anschnitt entstandene Phasenverschiebung zwischen Generatorstrom und -spannung ist näherungsweise identisch mit dem Steuerwinkel α. In solchen Fällen wird davon ausgegangen, dass eine gesteuerte Gleichrichterbrücke die Synchronmaschine vorwiegend induktiv belasten würde [40], obwohl nach [34] eine in-

duktive Belastung nur eine Phasenverschiebung einer sinusförmigen Grundwelle der Spannung gegenüber dem Strom bedeutet, wie der Spannungs- und Stromverlauf im Bild 2.16 zeigt.

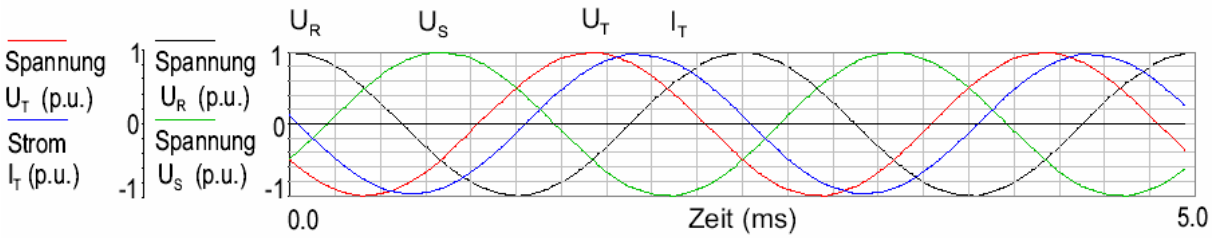


Bild 2.16: Grundschwingungsverläufe für Spannungen und Strom der induktiv belasteten Synchronmaschine

Die Strom- und Spannungsverläufe sind in einem Netz mit Thyristorbetrieb (s. Bild 2.17) nicht vergleichbar mit einem Netz mit Drosselbetrieb, da die Kurvenformen der Ströme voneinander stark abweichen. Durch den Einsatz der Gleichrichter und dadurch entstehende nichtsinusförmige Spannungs- und Stromverläufe werden Oberschwingungen in Drehfeldmaschinen hervorgerufen.

Zur Dimensionierung elektrischer Anlagen ist daher die Kenntnis des genauen Kurvenverlaufs der Spannungen und Ströme unerlässlich, wenn gewünscht wird, genauere Zusatzverluste durch Oberschwingungen zu ermitteln.

Konventionelle Messgeräte können aufgrund der Verzerrung diese Zusatzverluste und Oberschwingungen nicht erfassen. Um diesen Unterschied veranschaulichen zu können, wird im Simulationsprogramm eine 61kVA-Synchronmaschine, die in dieser Arbeit als Hilfserreger verwendet wurde, einmal nur mit einer konstanten, induktiven Last und einmal nur mit der beschriebenen B6-Thyristorenbrückenschaltung belastet. Der Einfluss der unterschiedlichen Belastung der Synchronmaschine vor allem durch den Gleichrichter wird besonders in den Spannungs- und Stromverläufen in den Bildern 2.16 und 2.17 deutlich.

Die harmonische Spannungsverzerrung im Diagramm 2.17, die häufig in der idealisierten Betrachtung der Spannungsquelle vernachlässigt wird, wird vor allem durch die Wechselwirkungen zwischen Maschine und Gleichrichterbrücke verursacht. Diese harmonischen Verzerrungen und deren Einflüsse sind im bürstenlosen Erregersystem des Drei-Maschinen-Systems schwer zu erfassen.

Deshalb wird auch in Forschungsarbeiten und Berechnungsprogrammen häufig von einer sinusförmigen oder gut geglätteten Kurve ausgegangen.

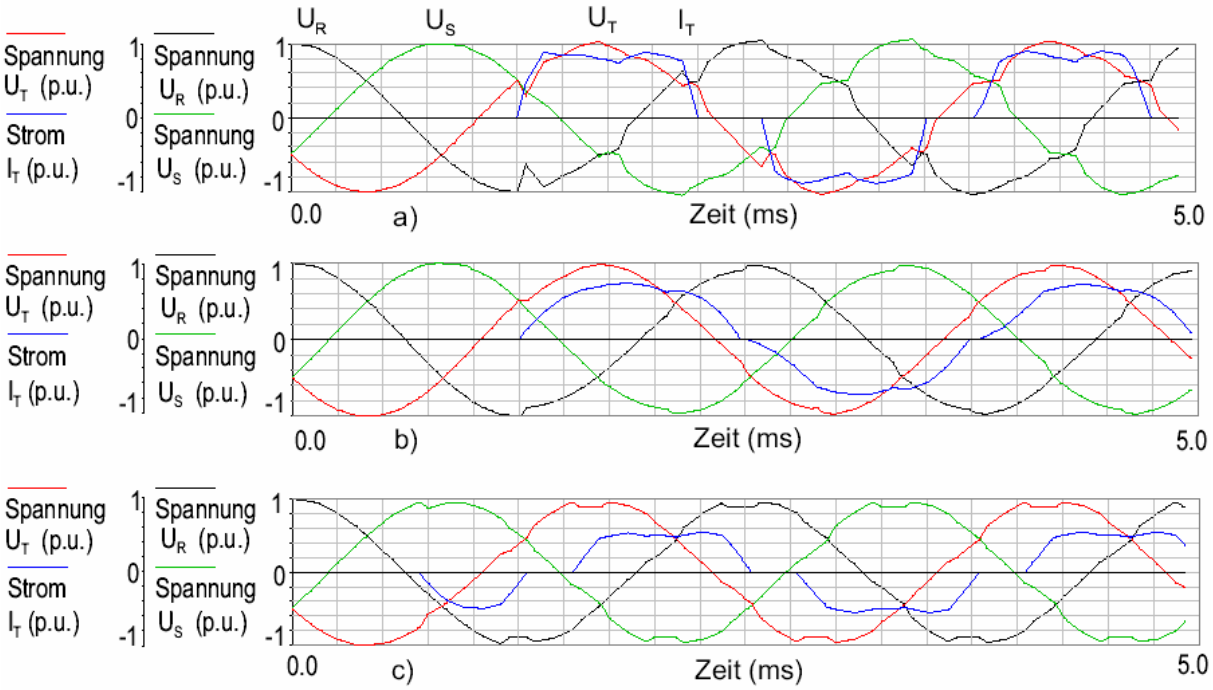


Bild 2.17: Einfluss der Steuerung des Gleichrichters auf Spannungs- und Stromverläufe der mit Thyristoren belasteten Synchronmaschine

a) Steuerwinkel $\alpha = 0°$, Kommutierungswinkel $\gamma \approx 14°$

b) $\alpha = 0°$ und $\gamma \approx 50°$, $L_C = 0.2$ mH

c) $\alpha \approx 40°$ und $\gamma \approx 22°$, $L_C = 0.2$ mH

Durch die Berechnung der transienten Vorgänge innerhalb des Drei-Maschinen-Systems im Zeitbereich werden die einzelnen Stromkreise und Netzwerkelemente wie z.B. Gleichrichterbrücken sowie deren vorstehend beschriebene Einflüsse berücksichtigt. Sie werden unter Verwendung jeweils eines gesteuerten und ungesteuerten Gleichrichters in den nächsten Abschnitten veranschaulicht.

2.4.1 Ungesteuerte Diodenbrückenschaltung der untersuchten Erregereinrichtung

Die ungesteuerte Brückenschaltung im Erregersystem der Synchronmaschine ist in der Regel aus Siliziumdioden aufgebaut. Bei Dioden können die Schaltzeitpunkte im Vergleich mit anderen Halbleitern allerdings nicht frei vorgegeben werden.
Der Mittelwert der pulsierenden Gleichspannung am Ausgang des Gleichrichters hat gemäß Gleichung 2.42 den Wert des 1.35-fachen der verketteten Spannung, falls die vorgeschalteten Elemente L_C und R_C vernachlässigt werden und von einer sinusförmigen Maschinenspannung ausgegangen wird. Dies lässt sich technisch nicht immer exakt mit einer ungesteuerten B6-Schaltung und einer realen Synchronmaschine als Einspeisungsquelle realisieren.
In der zu untersuchenden Schaltung wird der ungesteuerte Gleichrichter vom Anker der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Haupterregermaschine gespeist. In der vorliegenden Arbeit wird im Anker der Maschine ein Drehstrom mit einer Frequenz von 150 Hz erzeugt.
Damit der Ausfall einiger Dioden nicht zum Zusammenbruch der Erregereinrichtung führt, werden mehrere Dioden parallel geschaltet und mit einem RC-Glied zum Schutz des Systems versehen, wie es im Bild 2.18 dargestellt ist.

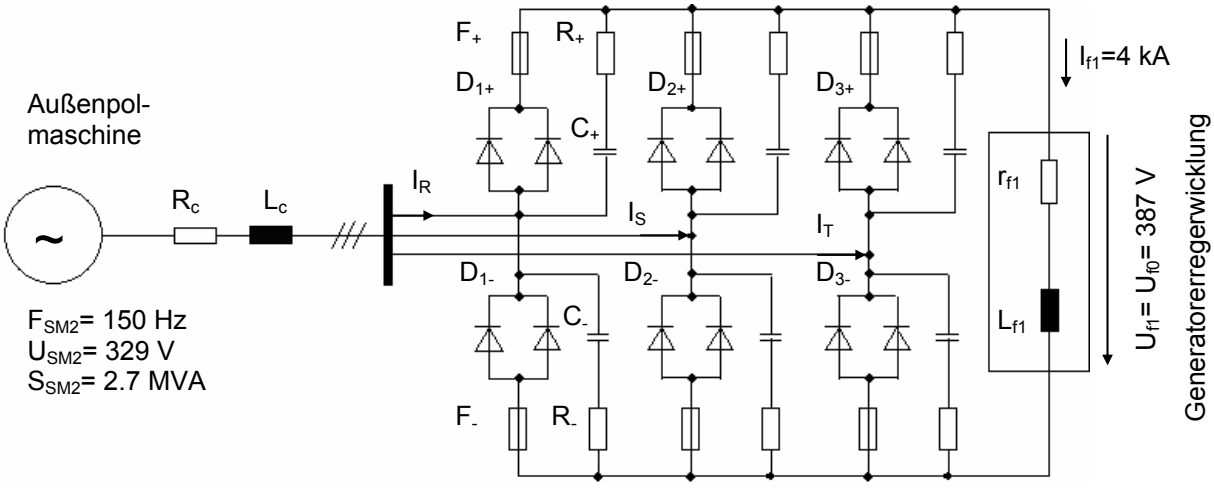


Bild 2.18: Ungesteuerte Gleichrichterbrücke mit der Haupterregermaschine

Durch die Parallelschaltung der Dioden werden die Teilströme durch die einzelnen Dioden und damit die lokale Wärmeentwicklung reduziert.

Als zusätzliche Schutzmaßnahme werden die Dioden über eine Hochleistungssicherung (F_+ und F_-) mit dem Ausgang des Gleichrichters verbunden.

Die Generatorerregerwicklung (R_{f1}, L_{f1}) wird durch die Gleichrichterbrücke gespeist und weist eine große Induktivität auf. Dadurch wird der Ausgangsstrom, der auch gleich dem Erregerstrom des Generators ist, hinreichend geglättet.

Um die Eigenschaften und das Verhalten der Gleichrichterbrücke zu veranschaulichen, ist es sinnvoll die zeitlichen Verläufe der Spannungen und Ströme in den einzelnen Elementen anhand des im Bild 2.18 vorgestellten Netzwerks zu berechnen. In dieser Arbeit wird für die Berechnung als Beispiel eine 2.67MVA-Außenpolmaschine benutzt, die ein Bestandteil des Turbosatzes ist. Sie enthält einen Gleichrichter mit insgesamt 96 Siliziumdioden, 12 RC-Gliedern und 48 Sicherungen [35]. Detaillierte Angaben zum verwendeten Gleichrichter befinden sich im Anhang.

Die messtechnische Erfassung der Ströme und Spannungen der ungesteuerten Brückenschaltung, welche Erregerstrom und -spannung des Generators bilden, ist in diesem Bereich aufgrund des rotierenden Teils und der extrem hohen Fliehkräfte sehr schwierig.

Die berechneten Spannungen und Ströme in der ungesteuerten Gleichrichterbrücke und in der Haupterregermaschine sind für Anfang und Ende des Einschaltvorgangs in den Bildern 2.19 und 2.20 dargestellt.

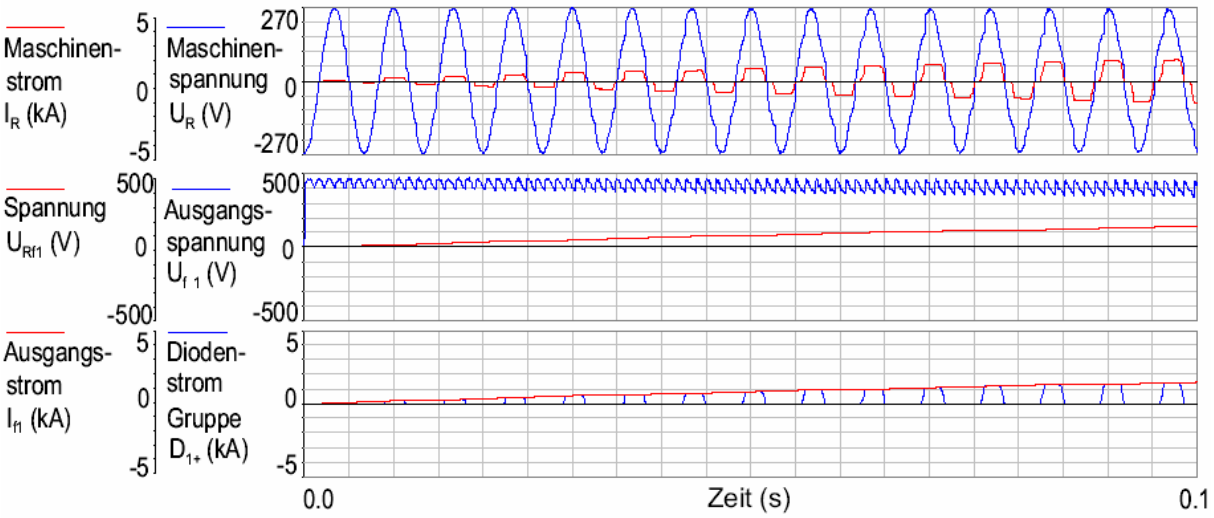


Bild 2.19: Spannungen und Ströme im rotierenden Gleichrichter und in der Haupterregermaschine zu Beginn des Einschaltvorgangs

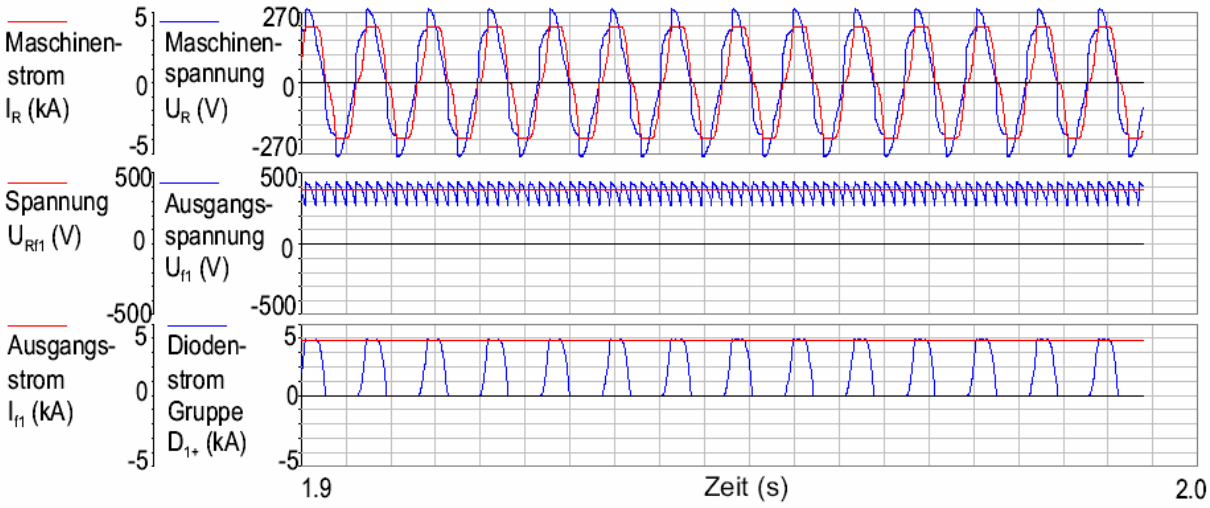


Bild 2.20: Spannungen und Ströme im rotierenden Gleichrichter und in der Haupterregermaschine nach dem Einschaltvorgang

Ausgangsspannung und -strom (ca. 387 V und 4 kA) sind hier in diesem Beispiel durch Oberschwingungen mit einem 900Hz-Anteil überlagert [36]. Diese Tatsache ist in den Bildern 2.19 und 2.20 erkennbar.

Diese Oberschwingungen werden durch die hohe Induktivität am Ausgang der Gleichrichterbrücke stark geglättet. Sie sind sowohl messtechnisch als auch rechnerisch schwer zu erfassen und entstehen hier durch nichtsinusförmig verlaufende Spannungen und Ströme, wie bereits erläutert wurde. Die Oberschwingungen belasten die elektrischen Maschinen zusätzlich, indem sie lokale Wärme und Geräusche erzeugen. Weiterhin können sie je nach auftretender Amplitudenhöhe zum Ausfall des Gleichrichters führen und das Schaltvermögen der Schutzeinrichtungen im Erregersystem des Turbogenerators beeinträchtigen [37,38,39].

Da der Stromverlauf in den rotierenden Drehstromwicklungen aufgrund der Belastung mit dem Gleichrichter von der Sinusform abweicht, muss die Haupterregermaschine über die Außenpole mit höherem Erregerstrom (I_{f1}) und höherer Erregerspannung (U_{f1}) versorgt werden, damit der notwendige Strom- und Spannungswert an den Generatorfeldwicklungen bereitgestellt wird.

Die durch die Gleichrichterbrücke verursachten Oberschwingungen pflanzen sich über den Stator in das Innere der Maschine fort. Sie sind insbesondere im Ankerstrom sowie im Dämpfer- und Feldstrom deutlich zu erkennen (s. Bilder 2.21 und 2.22).

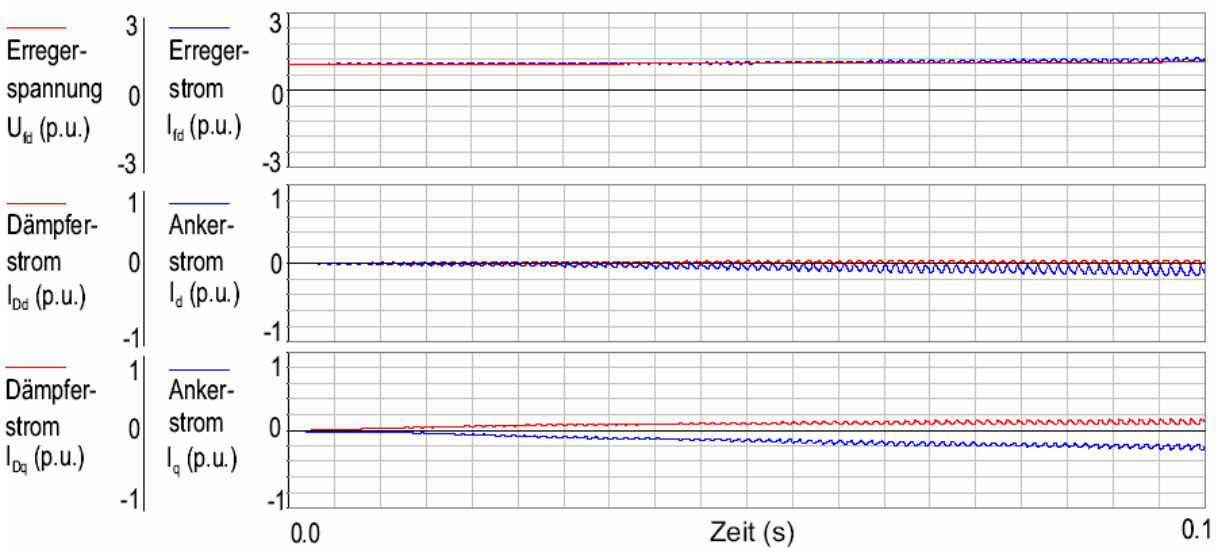


Bild 2.21: Einfluss des ungesteuerten Gleichrichters auf die d-q-transformierten Maschinengrößen zu Beginn des Einschaltvorgangs

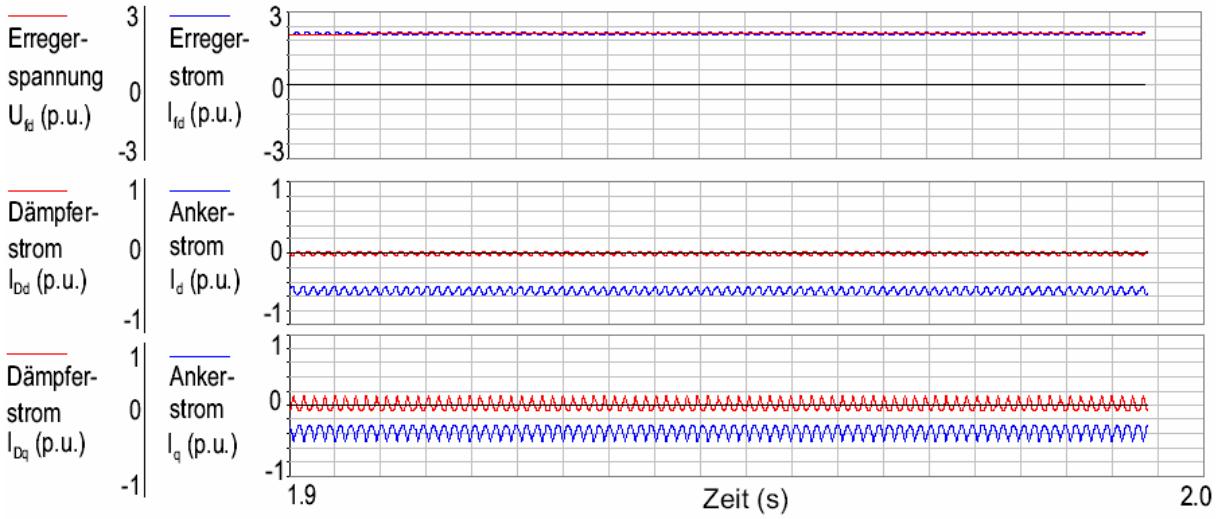


Bild 2.22: Einfluss des ungesteuerten Gleichrichters auf die d-q-transformierten Maschinengrößen nach dem Einschaltvorgang

Die Oberschwingungen werden durch Kopplung von einer Maschine in die andere übertragen, allerdings werden ihre Amplituden stark gedämpft. Hierbei ist zu beachten, dass der Generator und Haupterreger durch unterschiedliche Gleichrichter versorgt werden. Nach der Betrachtung des Stromverlaufs in den Bildern 2.19 und 2.20 wird deutlich, dass, obwohl der Drehstrom (I_n) mit Oberschwingungen behaftet ist, die Klemmenspannung (U_n) der Maschine nur gering verzerrt wird.

Am Gleichrichterausgang bleibt der Gleichstrom (I_{f1}) im Erregerkreis stets nahezu oberschwingungsfrei, auch wenn die Gleichspannung starke Oberschwingungen aufweist.

Fazit:

Die ungesteuerte Gleichrichterbrücke verursacht im Erregerkreis zusätzliche Oberschwingungen, welche die sinusförmigen Spannungen und Ströme der Erregermaschine beeinträchtigen. Dennoch wird weiter an der Lösung nach Bild 2.18 festgehalten, weil eine Ausführung mit gesteuertem Gleichrichter wegen der aufwändigen Elektronik deutlich teurer ist. Hinzu kommt, dass hier spezielle Bauelemente für sehr hohe Fliehkräfte entwickelt und erprobt werden müssen.

2.4.2 Gesteuerte Thyristorenbrückenschaltung der untersuchten Erregereinrichtung

Die gesteuerte Gleichrichterbrücke wird bei der bürstenlosen Erregereinrichtung eingesetzt, um die Drehspannungen und -ströme der Hilfserregermaschine in ein regelbares Gleichspannungs- und Gleichstromsystem umzuwandeln. Dieser Gleichstrom wird hier benötigt, um die Außenpole der Haupterregermaschine zu versorgen.
Die gesteuerte Gleichrichterbrücke ist ortsfest auf dem Fundament montiert, sodass die Probleme durch hohe Fliehkräfte, wie sie bei der rotierenden Einrichtung im Vordergrund standen, keine Bedeutung mehr haben. Eine einfache Schaltung der gesteuerten Thyristorenbrücke mit der 400Hz-Hilfserregermaschine wird in Bild 2.23 vorgestellt.

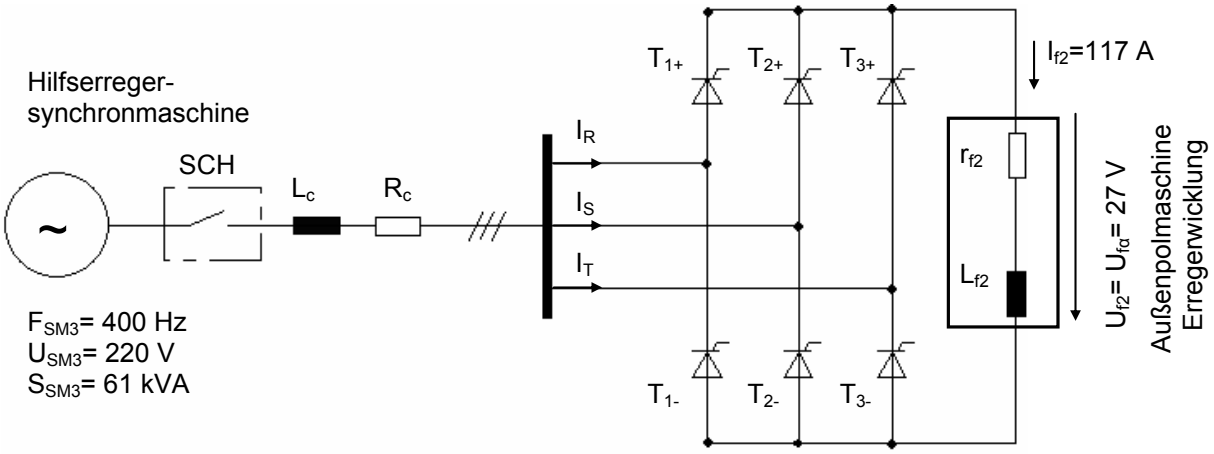


Bild 2.23: Gesteuerte Gleichrichterbrücke mit der Hilfserregermaschine

Die wichtigste Aufgabe der Thyristorenbrücke ist die Regelung des Stroms in der Erregerwicklung der Haupterregermaschine, wodurch wiederum die Drehspannungen und -ströme der rotierenden Ankerwicklung der Haupterregermaschine geregelt werden. Diese werden gleichgerichtet und bestimmen die Höhe des Erregerstroms und -flusses des Generators.
Bei der Bestimmung des Regelbereichs muss die Impedanz (L_C, R_C), die sich zwischen der Maschine und Gleichrichterbrücke befindet, berücksichtigt werden. Dies können entweder einfache Zuleitungen oder vorgeschaltete Transformatoren sein. Die Ausgangsspannung ($U_{f\alpha}$) des gesteuerten B6-Gleichrichters kann maximal das 1.35-fache der verketteten Spannung erreichen. Niedrigere Spannungswerte können

gemäß Gleichung 2.42 und 2.47 durch den Steuerwinkel α und den Kommutierungswinkel γ eingestellt werden.

Die Ausgangsspannung der gesteuerten Gleichrichterbrücke hat in dem vorliegenden Beispiel eine ca. 8-fach niedrigere Spannung (ca. 27 V) als die Nennspannung der Hilfserregermaschine (220 V) im angegebenen Nennbetriebspunkt. Dieser Spannungsunterschied ist notwendig, da die Steuerung die Ausgangsspannung im Fall eines Kurzschlusses oder eines Spannungsabfalls auf der Netzseite schnellstmöglich mehrfach erhöhen muss. Dieser Unterschied bedeutet weiterhin, dass ein solcher Gleichrichter im regulären Betrieb einen großen Steuerwinkel hat. Dadurch treten hohe harmonische Verzerrungen auf, wie zuvor gezeigt wurde.

Durch den Steuerwinkel α und die vorgeschalteten Komponenten R_C und L_C werden die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom auf niedrige Werte von ca. 27 V und 117 A eingestellt. Der Erregerstrom wird durch die große Induktivität der Außenpole am Ausgang gut geglättet. Der hohe Steuerwinkel verursacht in der Hilfserregermaschine die Spannungsverzerrungen.

Obwohl der benötigte Wirkleistungsbedarf der Erregerwicklung (R_{f2} im Bild 2.23) der Haupterregermaschine nur ca. 3 kW beträgt, muss aufgrund hoher Verzerrungsblindleistung und der großen Spannungsreserve eine 61kVA-Hilfsrregerpermanentmagnetmaschine eingesetzt werden.

Die messtechnische Erfassung der Ströme und Spannungen der gesteuerten Brückenschaltung ist in diesem Bereich wegen der stationären Anbindung auf dem Fundament einfacher zu realisieren. Allerdings sind die Messungen durch die harmonischen Verzerrungen verfälscht.

Die Hilfserregermaschine ist eine 16-polige Maschine mit einer Nennspannung von 220 V. Detaillierte Angaben über die eingesetzte gesteuerte Gleichrichterbrücke und die Hilfserregermaschine befinden sich im Anhang.

Analog zu der Vorgehensweise im Abschnitt 2.4.1 werden nachfolgend die Spannungen und Ströme für die Hilfserregermaschine mit der gesteuerten Gleichrichterbrücke berechnet. Sie sind für Anfang und Ende des Einschaltvorgangs in den Bildern 2.24 und 2.25 dargestellt.

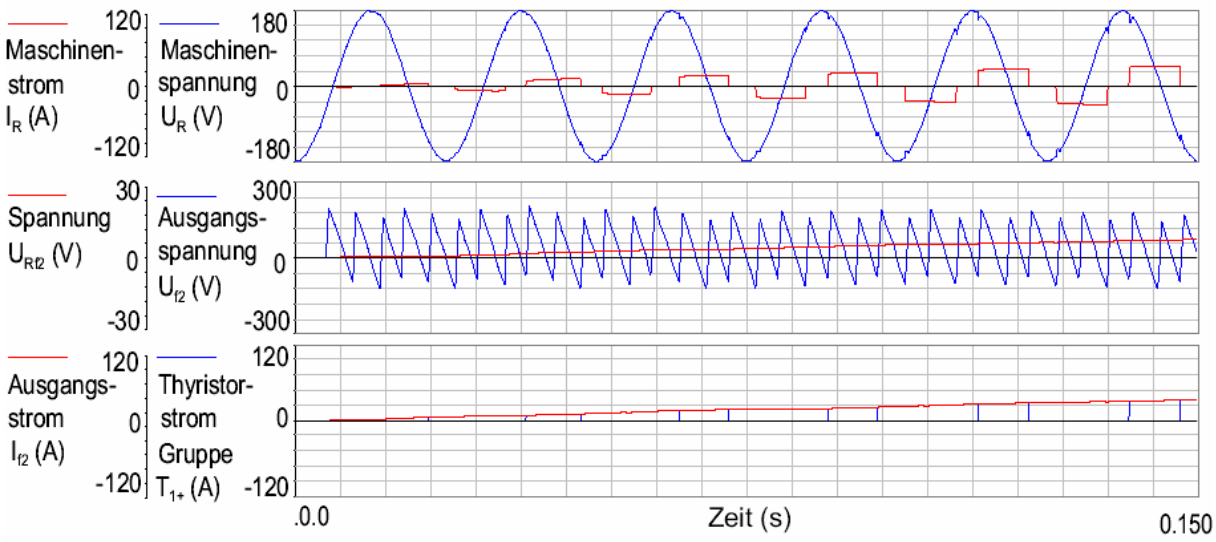


Bild 2.24: Spannungen und Ströme im gesteuerten Gleichrichter (α≈79°) und in der Hilfserregermaschine zu Beginn des Einschaltvorgangs

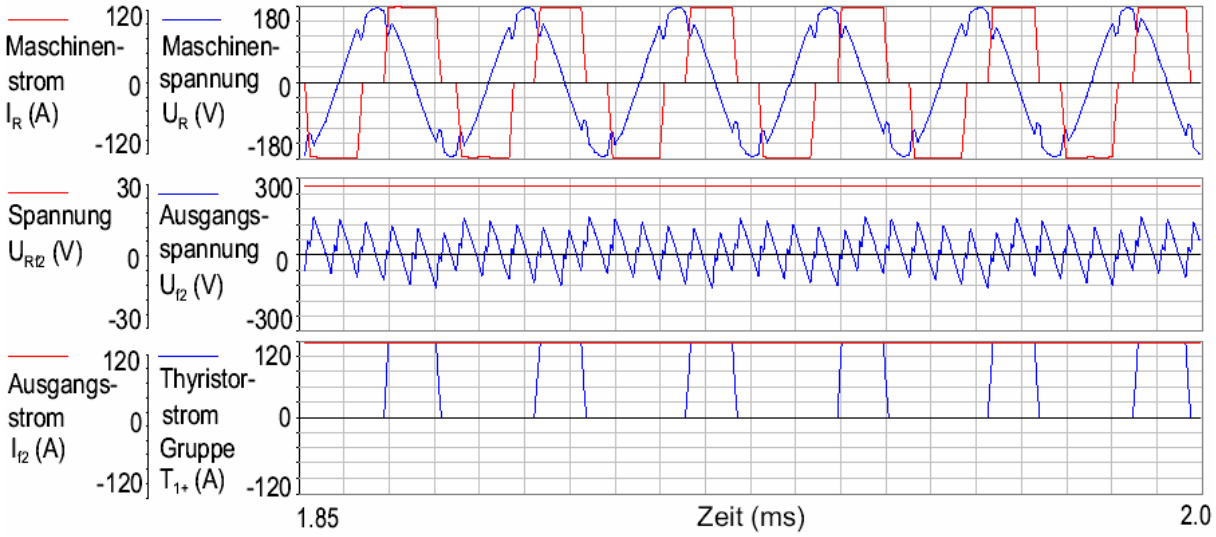


Bild 2.25: Spannungen und Ströme im gesteuerten Gleichrichter (α≈79°) und in der Hilfserregermaschine nach dem Einschaltvorgang

Die einzelnen Thyristorströme lösen sich im Kommutierungsaugenblick tatsächlich nicht stetig und sprunghaft ab. Deswegen erfolgt auch kein verzögerungsfreier Übergang von einer Transformator- bzw. Generatorspannung auf die nächste, wie in den Bildern 2.24 und 2.25 dargestellt. Im praktischen Betrieb geht der Strom innerhalb eines relativ kleinen Zeitintervalls, der Überlappungsdauer γ, auf das Folgeventil

über, weil die Streuinduktivitäten des Transformators bzw. Generators und der Zuleitungen einen steilen Anstieg des Stroms verhindern.

Die Ausgangsspannung des gesteuerten Gleichrichters wird ebenfalls mit Oberschwingungen überlagert [36]. Sie sind in den berechneten Zeitverläufen 2.24 und 2.25 deutlich erkennbar.

Darüber hinaus sind die Anforderungen an die Strom- und Spannungsbelastbarkeit der gesteuerten Gleichrichterkomponenten im Gegensatz zu den rotierenden Gleichrichterkomponenten geringer. Allein die Wirkleistung (hier 3 kW), die im Nennbetrieb von den Außenpolen der Haupterregermaschine über den gesteuerten Gleichrichter aufgenommen wird, ist ca. 500 Mal kleiner als die aufgenommene Wirkleistung der Generatorfeldwicklung (hier ca. 1500 kW).

In der praktischen Anwendung findet sich eine Vielzahl von Schaltungskonzepten für den Aufbau der gesteuerten Gleichrichter, die sich zusätzlich noch durch Bauelemente, Schutzmaßnahmen und Steuerungsarten unterscheiden. Deshalb wird hier vom Generatorhersteller in der Regel keine bestimmte Gleichrichterschaltung empfohlen, im Unterschied zum rotierenden Haupterregersatz.

Aus der Vielzahl der möglichen Schaltungsvarianten wird nachfolgend im Bild 2.26 eine 12-pulsige Gleichrichterschaltung (B12) demonstriert, die sich insbesondere durch geringen Blindleistungsanteil und verbesserte Spannungs- und Stromform auszeichnet.

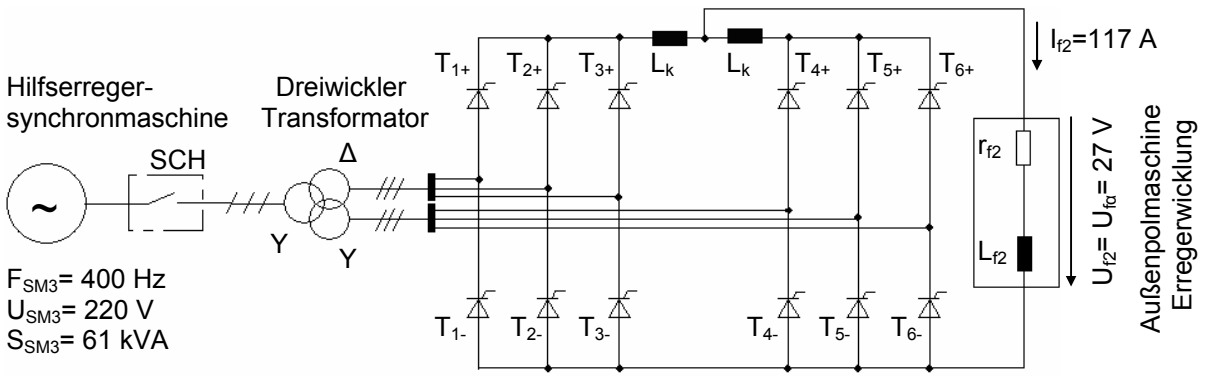


Bild 2.26: 12-pulsige Gleichrichterbrücke mit der Hilfserregermaschine

Durch Parallelschaltung der zwei 6-pulsigen Gleichrichterbrücken erhält man eine Verdoppelung der Pulszahl. Die Ausgangsspannungen der beiden Teilstromrichter sind hierbei um 30° gegeneinander versetzt. Dies wird im vorliegenden Fall durch

den Einsatz von zwei Transformatoren erreicht, die in Stern- und Dreieckschaltung ausgeführt sind oder als Dreiwickler gebaut werden.

Die zusätzliche Induktivität L_K begrenzt den Kreisstrom, der durch die eventuelle Spannungsdifferenz der beiden Gleichrichterbrückenteile hervorgerufen wird. Die Induktivität L_K entkoppelt die beiden Gleichrichterbrückenteile, indem sie die einzelnen gleichgerichteten Spannungen zum Ausgang des Gleichrichters durchschaltet. Dies spielt allerdings im Berechnungsprogramm wegen der Annahme gleichförmiger Symmetrie der Parallelschaltungen und gleichartiger Komponentenauswahl keine große Rolle. Die Oberschwingungen sind bei zwei parallelen Schaltungsvarianten gegeneinander gerichtet, dadurch werden die Amplituden der gleichfrequenten Oberschwingungen stark verringert [32, 39].

Die ermittelten Spannungs- und Stromverläufe im 12-Pulsgleichrichter und in der Hilfserregermaschine sind im Bild 2.27 dargestellt.

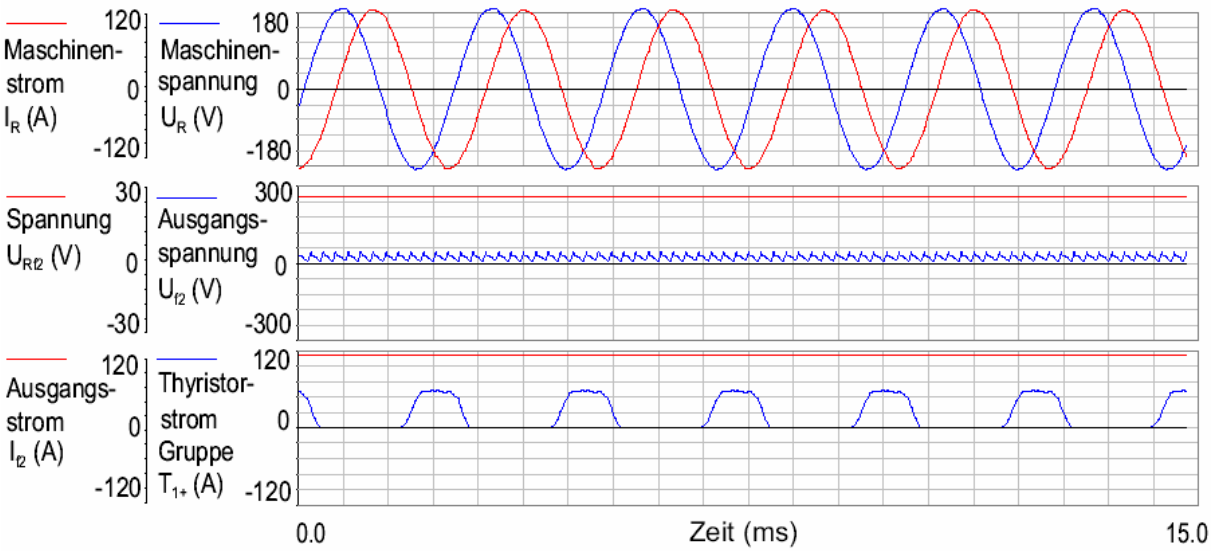


Bild 2.27: Spannungen und Ströme für Hilfserreger mit einem 12-Pulsgleichrichter

Das verwendete Simulationsprogramm erlaubt die Nachbildung der Gleichrichterschaltung nach Bild 2.26, jedoch werden durch die Grundwellendarstellung die Auswirkungen von Oberschwingungen auf die Maschinen nicht vollständig erfasst.

Die wechselnden Schaltzustände der Thyristoren, die sich hier im Zeitbereich von 0.20 ms ändern können, erzwingen die Berechnungen der Ausgleichsvorgänge im Momentanwertmodus.

Die Steuerung der Spannung und des Stroms am Ausgang des Gleichrichters kann im Programm auch einfach durch die Änderung der vorgeschalteten Impedanz bzw. der berücksichtigten Transformatorimpedanz zwischen Maschine und Gleichrichter erfolgen. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn die Verwendung des Momentanwertmodus bei der Simulation nicht erwünscht ist.

Fazit:

Die Oberschwingungen und ihre unerwünschten Auswirkungen können durch Umrichterschaltungen sowohl von Verbrauchern auf der Netzseite als auch von Erzeugeranlagen im Erregerkreis hervorgerufen werden. Die von Verbraucheranlagen erzeugten Oberschwingungen, die als Netzrückwirkungen bei Generatoren wahrgenommen werden, sind in der Regel sehr gering. Die großen Induktivitäten der sich zwischen Verbrauchern und Erzeugeranlagen befindenden Transformatoren schützen bekanntlich die Generatoren und erlauben keine schnelle bzw. sprunghafte Änderung des Stroms. Durch eine netzunabhängige, bürstenlose Erregereinrichtung können die Oberschwingungen reduziert werden. Ferner können auf diese Weise die Netzrückwirkungen auf die Erregereinrichtungen unterdrückt werden.

3 Drei-Maschinen-System

3.1 Aufbau des Drei-Maschinen-Systems

Die bürstenlose Erregung besteht hier aus Generator, Haupt- und Hilfserregermaschine, diese sind zu einem Drei-Maschinen-Netzwerk zusammengeschaltet. Die drei Maschinen werden als Synchronmaschine ausgeführt, unterscheiden sich jedoch durch ihre jeweilige Stator- und Rotorkonstruktion voneinander, wie bereits im Abschnitt 2.1 erläutert.
Um im Rahmen dieser Arbeit das Verhalten der gesamten Erregereinrichtungen bei elektrischen Netzstörungen zu untersuchen, muss ein detailliertes Simulationsmodell aufgebaut werden. Ein beträchtliches Hindernis bei der Zusammenschaltung der Maschinen stellen allerdings die unterschiedlichen Frequenzen und Spannungen dar.
Daher sind im verwendeten Berechnungsprogramm wesentliche Änderungen vorzunehmen. Dadurch soll die gemeinsame Behandlung von Maschinen und Netzwerken mit unterschiedlichen Frequenzen bei gleichzeitiger galvanischer Kopplung mit Dioden und Thyristoren der Gleichrichterbrücken ermöglicht werden.
Die allgemeinen Kenndaten der drei Synchronmaschinen, die hier als Beispiel verwendet wurden, sind in Tabelle 3.1 zu finden.

Synchronmaschinen / Kenngrößen	Generator: 2-polige Maschine	Haupterreger: 6-polige Außenpolmaschine mit Gleichrichterrad	Hilfserreger: 16-polige Permanent-magnetmaschine
Spannung U (kV)	21.0	0.387	0.220
Leistung S (MVA)	410	2.7	0.061
Frequenz f (Hz)	50	150	400
Rotordurchmesser d_R(m)	1.075	0.700	0.494
eff. Eisenlänge L_{fe} (m)	4.153	0.900	0.420

Tabelle 3.1: Charakteristische Daten der drei untersuchten Synchronmaschinen

Bei dem 2-poligen Turbogenerator handelt es sich um eine Maschine mittlerer Leistung mit direkter Gaskühlung im Rotor und Stator. Wie aus der Tabelle zu ersehen

ist, wird die Haupterregermaschine als 6-polige Außenpolmaschine ausgeführt. Sie ist an die Generatorwelle starr angekuppelt und hat eine Drehzahl n von 3000 U/min, daher ergibt sich:

$$f = \frac{n\,p}{120} = \frac{3000 \times 6}{120} = 150\,\text{Hz} \tag{3.1}$$

Die Hilfserregermaschine wird meist als Synchronmaschine mit hoher Polpaarzahl betrieben. Im vorliegenden Beispiel wurde eine 16-polige Permanentmagnetmaschine gewählt, die gemäß Gleichung 3.1 eine Statorfrequenz von 400 Hz aufweist.
Weitere wichtige Bestandteile der Erregereinrichtung sind die Gleichrichterbrücken, welche die Schnittstellen zwischen der Feldwicklung der Haupterregermaschine (Außenpole) und dem Ständer des Hilfserregers sowie zwischen dem Anker der Haupterregermaschine und der Generatorfeldwicklung bilden.
Wie bereits bei der Erörterung der Modelle der Synchronmaschinen herausgestellt wurde, werden die drei Maschinen mit den zugehörigen Ersatzschaltbildern gemäß Park nachgebildet. Die charakteristischen Induktivitäten und Widerstände der Ersatzschaltbilder der einzelnen Maschinen sind im Anhang aufgelistet.

3.2 Erweiterung des Simulationsprogramms

Nachdem das Berechungsmodell definiert wurde und seine Eigenschaften herausgearbeitet wurden, stellt sich die Frage, welcher Weg gewählt werden muss, um möglichst schnell zu einer Lösung zu kommen. Zunächst muss die Vielschichtigkeit des zu untersuchenden Systems deutlich herausgestellt werden. Es besteht aus:

- Synchrongenerator und zwei Erregermaschinen, die in transientem Zustand zu behandeln sind.
- Wellenstrang, der im Netzstörfall transiente Drehschwingungen ausführen kann
- Regler, der aus vielen Blöcken mit nicht linearen Elementen aufgebaut ist.
- Transformator, der den Generator an das elektrische Netz anbindet.

- Zwei Gleichrichterbrücken, die im Zeitbereich einschließlich ihres Verhaltens dargestellt werden müssen.

Es ist sofort zu erkennen, dass der zu behandelnde Erregersatz durch eine Vielzahl von nichtlinearen Differenzialgleichungen mit zeitveränderlichen Koeffizienten beschrieben werden muss.
Die Entwicklung eines eigenen Programms zur Lösung dieses Problems ist sehr zeitaufwändig und im kurzen Zeitrahmen dieser Arbeit nicht zu realisieren. Deswegen schien die Suche nach einem bereits verbreiteten, kommerziellen Programm Erfolg versprechend. Es stellte sich jedoch sehr schnell heraus, dass, obwohl auf dem Markt eine Vielzahl von bewährten Maschinen-Netz-Programmen angeboten wird, keines dieser Programme in der Lage ist, das vorstehend beschriebene Modell zu erfassen und zu lösen.
Die maßgebliche Schwierigkeit lag hier darin, dass die Maschinen und die Teilnetze mit ihren unterschiedlichen Frequenzen und Drehstromsystemen miteinander gekoppelt werden mussten. Deswegen wurde das Hauptaugenmerk auf das Programm NETOMAC (Network Torsion Machine Control) von Siemens [16] gerichtet, für das eine detaillierte Dokumentation und der Quellcode vorliegen. Hierbei bestand z.B. die Möglichkeit, mit Unterstützung des Autors des Simulationsprogramms die internen Programmabläufe zu erweitern, um die vielschichtigen Bestandteile dieses zu untersuchenden Systems zu behandeln.

3.2.1 Wichtige Eigenschaften des Simulationsprogramms

Das Programm NETOMAC wird zur Berechnung elektrischer Systeme, bestehend aus Maschinen, Netz, Regel- und Steuereinrichtungen, benutzt und seit 1973 ständig für Industrie- und Forschungszwecke in Zusammenarbeit mit namhaften Universitäten weiterentwickelt [16]. Das größte bisher mit dem Simulationsprogramm untersuchte System enthält 600 Generatoren und 7000 Knoten. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

- Eine Vielzahl von Möglichkeiten der Simulation elektromagnetischer und -mechanischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Systemen im Zeitbereich

- Stabilitätsteil mit Nachbildung des Netzes durch komplexe Impedanzen und der Maschinen durch Differenzialgleichungen
- Momentanwertteil mit Nachbildung von elektrischen Maschinen und Netzen durch Differenzialgleichungen
- Sehr gute Fehleranalyse bei der Nachbildung der elektrischen Anlagen am Netz
- Simulation von Torsionsschwingungssystemen
- Durchführung von Optimierungsverfahren
- Spezielle Lastflussberechnungen
- Parameteridentifikation
- Echtzeitsimulationen
- Eigenwertanalyse.

Für jede Simulation ist die Bestimmung der Lastflussverhältnisse und Anfangsbedingungen eine notwendige Voraussetzung für die anschließende Berechnung durch die Integration der Systemdifferenzialgleichungen.
NETOMAC benutzt zur Ermittlung des Systemarbeitspunktes ein Stromiterationsverfahren mit konstanter Knotenadmittanzmatrix. Die Programmumgebungstools bieten vielfältige Vorverarbeitungen, wie Parametrierung von Leitungen und elektrischen Maschinen sowie Identifikation von Modellparametern. Ein besonderes Merkmal des Simulationsprogramms ist eine große Datenbank der Spannungs- und Turbinenregler. Neben den Simulationsmöglichkeiten im Zeitbereich erlaubt das Programmsystem auch die Betrachtung von Netzen, Maschinen, Regel- und Steuereinrichtungen im Frequenzbereich. Dadurch ist die Analyse von Reglern ebenso möglich wie die Prüfung von Netzen, Schutzeinrichtungen oder Maschinen bei verschiedenen Frequenzen.

3.2.2 Verfahren zur Lösung der Differenzialgleichungen im Programm

Die numerische Integration der Differenzialgleichungen wird durch Anwendung eines Differenzenleitwertverfahrens gelöst. Jeder passive Netzzweig, der mathematisch durch eine Differenzialgleichung erster Ordnung zu beschreiben ist, kann bei numerischer Iteration mithilfe der Trapezregel durch den reellen, zeitschrittabhängigen Leitwert Y_{jk} und eine parallelgeschaltete Stromquelle bzw. eine in Reihe geschaltete Spannungsquelle, wie im Bild 3.1, ersetzt werden [41].

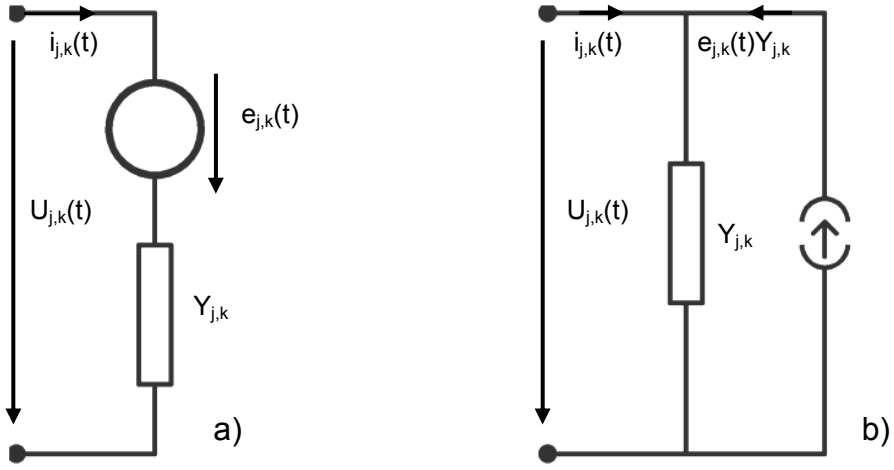


Bild 3.1: Modell eines Zweiges beim Differenzenleitwertverfahren mit einem reellen, zeitabhängigen Leitwert Y_{jk}
a) eine in Reihe geschaltete Spannungsquelle $e_{jk}(t)$
b) eine parallel geschaltete Stromquelle $i_{jk}(t)= e_{jk}(t)Y_{jk}$

Das aus einer Näherungslösung mit der numerisch absolut stabilen Trapezregel und der Knotenanalyse entstandene Differenzenleitwertverfahren wird zur Simulation der Ausgleichsvorgänge in Energieversorgungssystemen verwendet [43]. So ergibt sich z.B. für die Berechnung der Spannung an der Induktivität L:

$$L\frac{\partial i}{\partial t} = U(t) \tag{3.2}$$

$$L(i(t+\Delta t) - i(t)) = \frac{\Delta t}{2}(U(t+\Delta t) + U(t)) \tag{3.3}$$

Nach Bild 3.1a gilt für den Strom $i_{jk}(t)$ die Gleichung 3.4:

$$i_{jk}(t) = Y_{jk}[U_{jk}(t) - e_{jk}(t)] \tag{3.4}$$

Setzt man diese in 3.3 ein, so ergibt sich nach kurzer Zwischenrechnung die Gleichung 3.5:

$$Y_{jk} e_{jk}(t+\Delta t) = -[Y_{jk} - \frac{\Delta t}{2L}][U_{jk}(t+\Delta t)] - [Y_{jk} + \frac{\Delta t}{2L}]U_{jk}(t) + Y_{jk} e_{jk}(t) \qquad (3.5)$$

Wird für den Differenzenersatzleitwert Y der Induktivität L die Beziehung Y = Δt/2L eingesetzt, dann verschwindet in 3.5 der Vorfaktor vor der Zweigspannung u(t+ Δt). Daher ergibt sich für die Zweigquellenspannung zum Zeitpunkt (t+Δt) nach Auflösung von 3.5 einen Ausdruck, der nur vom Zeitpunkt t abhängt:

$$e_{jk}(t+\Delta t) = e_{jk}(t) - 2U(t) \qquad (3.6)$$

Die Potenzialverteilung in einem aus vielen einzelnen Zweigen bestehenden Netz lässt sich dadurch sofort berechnen [17]:

$$u^{+}(t) = (Y_{ad}^{-1} K Y) e(t) \qquad (3.7)$$

Hierbei bedeuten:

Y_{ad} Knotenpunkt-Admittanzmatrix (zeitabhängig)

K Knotenpunkt-Zweig-Inzidenz-Matrix

Y Admittanzmatrix (zeitschrittabhängig)

u^{+} Vektor der Knotenpunktpotenziale

e(t) Anfangswert der Zweigquellenspannungen e(t)

Ist die Potenzialverteilung $u^{+}(t)$ bekannt, dann können im nächsten Iterationsschritt Zweigspannungsquellen zum Zeitpunkt (t+Δt) berechnet werden. Diese werden im nächsten Schritt als neue Anfangswerte angenommen. In der Matrix F ist die Formel für die Berechnung von passiven Elementen enthalten:

$$e(t+\Delta t) = F\begin{pmatrix} e(t) \\ K^{T} u^{+}(t) \end{pmatrix} \qquad (3.8)$$

Da das Verfahren einfach zu programmieren ist, arbeiten bekannte Programme zur Simulation von Maschinen und Netz, wie NETOMAC und EMTP, auf Grundlage dieses Verfahrens [43]. Ein weiterer Vorteil des beschriebenen Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Knotenadmittanzmatrix zur Beschreibung des Netzes, das mit dem Drei-Maschinen-System gekoppelt ist, zu verwenden. Das erspart zum einen die beim Maschenverfahren benötigte aufwändige Baumsuche, zum anderen sind die vorteilhaften Lösungsverfahren für gering besetzte Matrizen z.B. Dreieckfaktorisierung und Vorwärts-Rückwärts-Substitution anwendbar [17,43].

3.2.3 Ablaufschema des Simulationsprogramms

Das Ablaufschema des Programms für die Integration des Differenzialgleichungssystems wird im Bild 3.2 für die Synchronmaschine am elektrischen Netz vorgestellt. Dieser Berechnungsablauf wurde im Simulationsprogramm direkt umgesetzt [42].

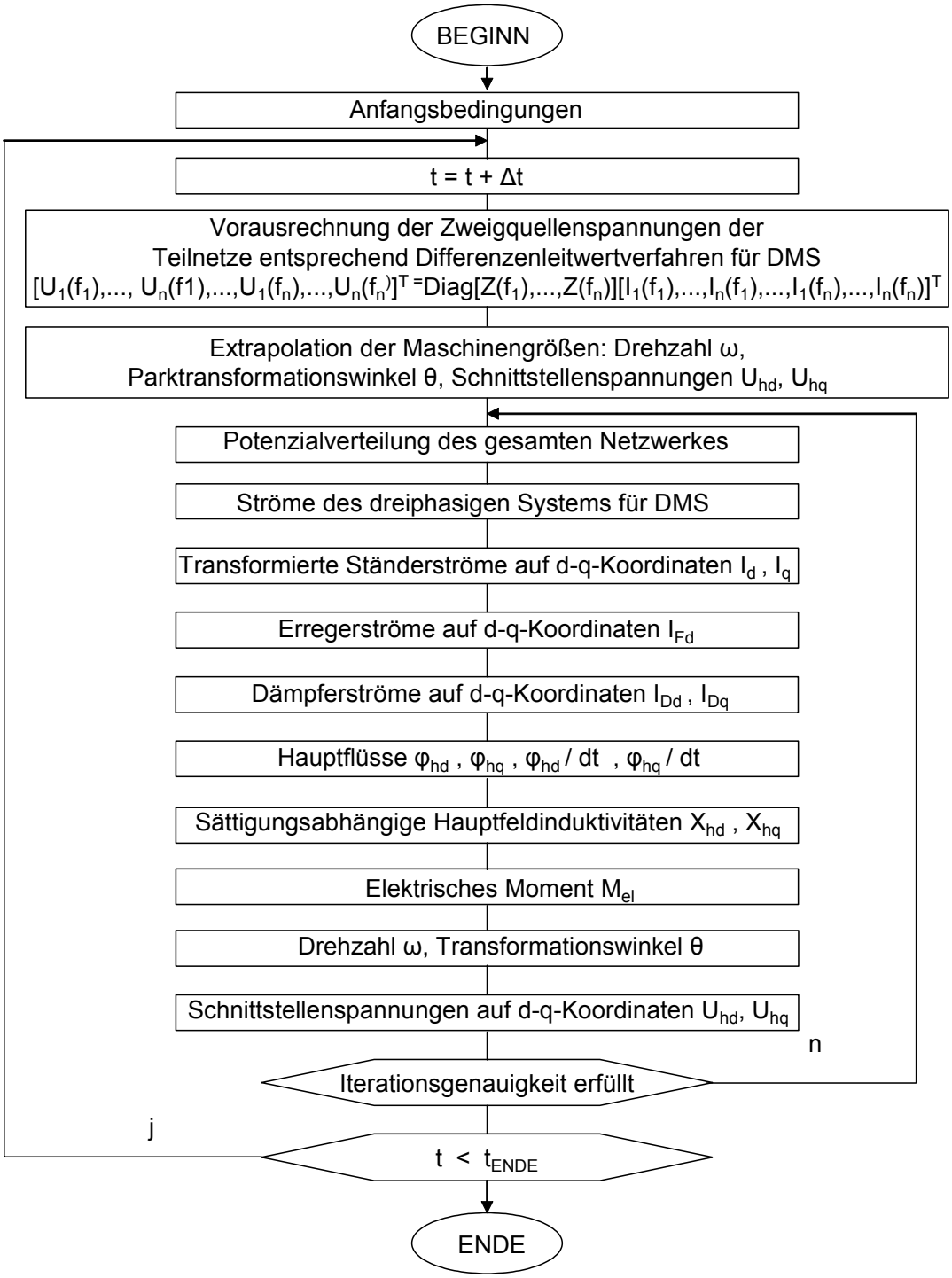


Bild 3.2: Ablaufschema für die Integration der Differenzialgleichungen der elektrischen Maschine am Netz mit Iteration der Maschinengrößen

Damit das Simulationsprogramm elektromagnetische und elektromechanische Ausgleichsvorgänge in Maschinen am elektrischen Netz berechnen kann, werden zuerst die Anfangsbedingungen und die Eingabeparameter abgearbeitet. Die Berechnung des stationären Anfangszustands bei symmetrischem Netz wird mit einer üblichen einphasigen Lastflussberechnung durchgeführt, bei unsymmetrischem Netz kann der Lastfluss auch dreiphasig im Programm ermittelt werden.
Vor der Integration der Differenzialgleichungen von Maschinen und Teilnetzen müssen die Anfangsbedingungen und ihr Zustand bekannt sein. An den einzelnen Knotenpunkten sollten folgende Vorgaben für die Verbraucher bzw. Einspeisungen iterativ erfüllt sein:

a) Spannungsbetrag und -winkel (Slack)

b) Spannungsbetrag und Wirkleistung

c) Wirkleistung und Blindleistung

d) Konstanter Strom.

Die Lasten werden für den Integrationsteil den an den Knoten angeschlossenen, aktiven Elementen zugeordnet oder in passive Verbraucher konstanter Impedanz umgeformt.
Die bei der Integration benötigten Startwerte lassen sich für die Synchronmaschine aus ihrem für den stationären Betrieb geltenden Zeigerdiagramm ermitteln. Die am Ende eines jeden Rechenlaufs vorhandenen Werte können abgespeichert und als Anfangsbedingungen für eine neue Rechnung benutzt werden [16]. Anschließend wird die Potenzialverteilung im gesamten Netzwerk des Drei-Maschinen-Systems (DMS) der für den Zeitpunkt (t+Δt) zu ermittelnden Zweig-Quellenspannungen bestimmt.
Nach der Berechnung der Potenzialverteilung des Netzes anhand des Differenzenleitwertverfahrens werden die dreiphasigen Ströme für die drei Synchronmaschinen ermittelt. Dabei werden die dreiphasigen Ströme mithilfe der Park’schen Transformationsmatrix vom festen auf das rotierende Koordinatensystem übertragen.
Die Berechnungen der Ströme in den d-q-Parkersatzschaltbildern und deren Ableitungen sowie der Hauptfluss der Maschinen werden entsprechend dem Ablaufsche-

ma im Bild 3.2 unter Einbeziehung der mathematischen Beschreibung in Abschnitt 2.2 durchgeführt.

Während beim Differenzenleitwertverfahren die Lösung des Differenzialgleichungssystems des Netzes unter der Voraussetzung linearer passiver Netzelemente in einem einzigen Schritt nur mit den vom Zeitpunkt t her bekannten Werten der Zweig-Quellenspannungen und der Zweigspannungen stattfindet, sind die Schnittstellenspannungen e(i, t+Δt) solange iterativ zu verbessern, bis die von den Maschinen ins Netz eingeprägten Ströme zueinander passen.

Für den Aufbau des Netzes bietet die Simulationssoftware zahlreiche Betriebsmittel, wie passive und aktive Netzelemente, als Makrobausteine mit verschiedenen Topologien an. Sie können je nach Bedarf neu zusammengestellt und erweitert werden. Diese Bausteine sind miteinander verknüpft, und das Differenzialgleichungssystem wird vom Programm nach Vorgabe der Topologie und der Daten mit dem Knotenpunktverfahren bzw. dem Differenzenleitwertverfahren aufgestellt und gelöst.

Die Modellbildung beliebiger Komponenten im Netz erfolgt in Makromodulen in Form von blockorientierter Programmierung in Kombination mit Fortran-Statements. Das können z.B. Makromodule für den gesteuerten und ungesteuerten Gleichrichter sowie für das Hochspannungsnetz sein, das aus Maschinentransformator, Leitungen, Lastanforderungen und externen Netzanschlüssen besteht.

3.2.4 Anwendung auf das Drei-Maschinen-System

Für die Durchführung der Simulation des Drei-Maschinen-Systems sind im Programm folgende Schritte erforderlich:

a) Im ersten Schritt wird der Generatorsatz in die Teilsysteme Generator, Haupt- und Hilfserregermaschine unterteilt und durch die Vorgabe der charakteristischen Parameter beschrieben. Dabei werden alle Drehfeldmaschinen mit dem d-q-Ersatzschaltbildmodell nachgebildet.

b) Nach der Eingliederung werden die einzelnen Komponenten zu einem Gesamtmodell miteinander verbunden, das aus Generator, Haupt- und Hilfserregermaschine, Gleichrichtersatz und Netz besteht. Hier ist insbesondere zu beachten, dass die einzelnen Maschinen die drei unterschiedlichen Frequenzen 50, 150 und 400 Hz haben. Die Kopplung soll nicht über Differenzialgleichungen sondern im zweiten Schritt über ein Ersatznetzwerk realisiert werden, um später aus den Netzwerkgrößen nicht nur die Spannungen und Ströme, sondern auch magnetische Induktion und Fluss ableiten zu können.

c) Für die Simulation sollte der Sourcecode für den hier vorliegenden Spezialfall erweitert werden. Anschließend werden die in b) definierten Teilsysteme als Eingabenmakromodule dargestellt. Sie sollen in Form von Unterprogrammen implementiert werden und die Daten der Gleichrichter, Maschinen und Netzkomponenten enthalten, sodass alle genannten Komponenten in komplexer Form leicht geändert oder je nach Bedarf erweitert werden können.

Im Kontrollunterprogramm und Störgrößenblock erfolgt die Definition der Rechenparameter bzw. der Schaltvorgänge während der Simulation. Die Schaltvorgänge werden im Gesamtnetzwerk des Drei-Maschinen-Systems durch Admittanzen realisiert, die sich plötzlich von sehr kleinen auf sehr große Werte (und umgekehrt) ändern. Diese Vorgänge können durch verschiedene Kriterien (z.B. den Stromnulldurchgang) gesteuert werden.
Der Störgrößenblock im Bild 3.3 steuert sowohl nachgebildete Störfälle als auch die Ein- und Ausschaltung des Ersatzzweiges, der in dieser Arbeit für die Kopplung des Erregersatzes mit dem Generator modelliert ist.

Das Blockdiagramm 3.3 zeigt den vereinfachten Berechnungsablauf mit Unterprogrammteilen für die Untersuchung des Drei-Maschinen-Systems (DMS).

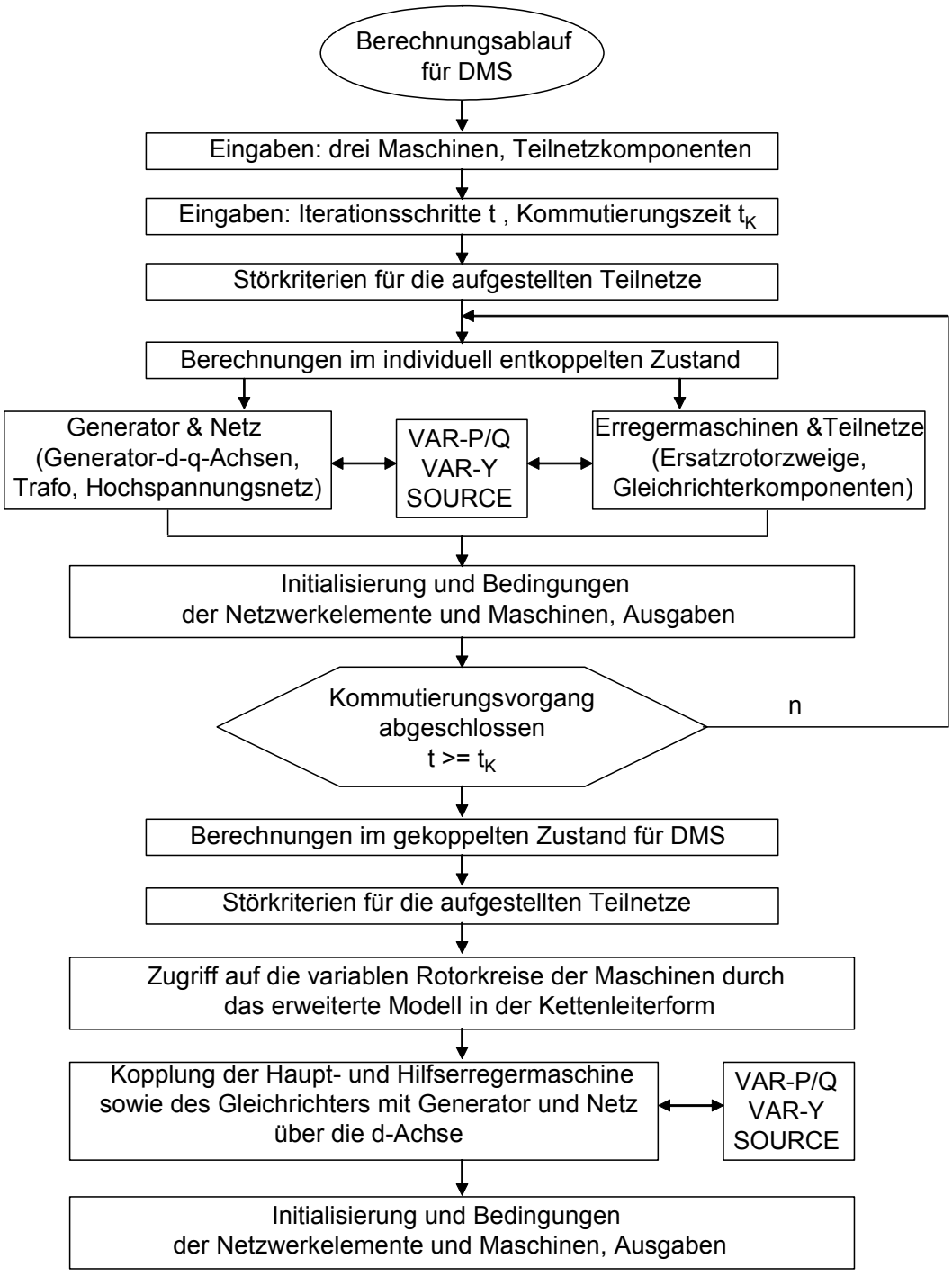


Bild 3.3: Blockdiagramm zum Berechnungsablauf für das Drei-Maschinen-System

Beim Ablauf des Programms wird zuerst der Generator, entkoppelt von Erregermaschinen und Gleichrichtern, durch Vorgabe eines festen Werts oder Reglers für einen bestimmten Betriebspunkt stationär belastet.
Der Erregersatz, der aus Erregermaschinen, Gleichrichterbrücken mit Ersatzwiderständen und -induktivitäten besteht, kann nur dann auf den Generatorfeldkreis aufgeschaltet werden, wenn Strom und Spannung am Ausgang des rotierenden Gleichrichters mit Generatorerregerspannung und -strom im entkoppelten Zustand übereinstimmen.
Die Kommutierungszeit ist in erster Linie abhängig von der Stromanstiegszeit im Ersatzerreger am Ausgang des rotierenden Gleichrichters und von den Stromübergängen in den Gleichrichtern. Je nach Bezeichnung werden Maschinen und Netzzweige als variable Admittanzen, Quellen oder Lasten in der Lastflussberechnung berücksichtigt.
Nachdem der Kommutierungsvorgang vorüber ist, werden anschließend der Ersatzerregerwiderstand und die Ersatzerregerinduktivität durch den Störgrößenblock und einen Eingriff in den variablen Rotorkreis getrennt sowie die direkte Kopplung des Erregersatzes mit dem Generator hergestellt. Bei der Verwendung von Leistungselektronikkomponenten stellte es sich zunächst als problematisch heraus, dass wegen der Interpolationsgenauigkeit bei der Anwendung der Trapezregel nur kleine Zeitschrittweiten sinnvoll einsetzbar sind. Die Anwendung der Trapezregel bei der Näherungslösung eines Integrals basiert hier auf einer intervallweisen Linearisierung; dieses Problem minimiert sich wiederum aufgrund leistungsstarker Rechner mit GHz-Takten.
Damit die Kopplung der drei Maschinen nach den Ablaufdiagrammen 3.2 und 3.3 behandelt werden kann, sind alle Teilnetze, Maschinen, Gleichrichter und deren Steuerungen in einem gemeinsamen Netzwerk zu erfassen, und entsprechende Lösungsansätze sind zu erarbeiten. Der schaltungstechnische Entwurf und die Lösungsansätze für das bürstenlose Drei-Maschinen-System werden im folgenden Abschnitt behandelt.

3.3 Schaltungstechnischer Entwurf des Gesamtmodells

Für die Untersuchung des bürstenlosen Drei-Maschinen-Systems, das in ein gemeinsames Netz eingebunden wird, müssen die einzelnen Komponenten der Erregereinrichtung zu einem elektrischen Netzwerk zusammengeschaltet werden.
Entsprechend dem physikalischen Aufbau erfolgt die Verbindung der einzelnen Maschinen über die Gleichrichterbrücken und potenzialfreien Übertrager, wie im Schaltplan nach Bild 3.4 gezeigt ist. Dieser bildet die Grundlage für die weitere Untersuchung, deshalb ist es notwendig, seine einzelnen Bausteine zu beschreiben:

Die Synchronmaschinen werden mithilfe des Kettenleitermodells dargestellt, wobei die erweiterte Rotorstruktur verwendet wird. Wird dieser Vorgang sowohl für die d-Achse als auch für die q-Achse bei allen drei Maschinen durchgeführt, und werden anschließend die Gleichrichterbrücken im Erregerkreis als Schnittstellen zwischen den Maschinen benutzt, so ergibt sich ein Netzwerk gemäß Bild 3.4.
Hier wird der Generator (mit 10 im Schaltplan gekennzeichnet) auf der Statorseite (21 kV) über den Maschinentransformator 11 und die Übertragungsleitungen in ein starres Netz eingebunden. Der Transformator wird in der häufig benutzten Schaltgruppe Yd5 modelliert und auf der Oberspannungsseite (380 kV) an zwei starke Netze 12 von jeweils 5 GVA Kurzschlussleistung angeschlossen. Diese Netzstruktur wird benötigt, um bei der Untersuchung die Standardstörfälle, wie Netzzuschaltungen, ein-, zwei- und dreipolige Kurzschlussabschaltungen zu simulieren.
Die Generatorfeldwicklung bei der Park'schen Darstellung des Netzwerks der d-Achse wird vom Ausgang 9 der rotierenden Gleichrichterbrücke 7 mit Gleichstrom gespeist. Die Verbindung erfolgt durch den überbrückten Schalter SW_4 und den potenzialfreien Übertrager 8, mit dem auch die beiden Spannungen simulationsbedingt und verlustfrei angepasst werden. Die rotierende Gleichrichterbrücke 7 besteht aus einer Vielzahl von Leistungsdioden, im vorliegenden Beispiel 96, die mit Sicherungen und parallel geschalteten RC-Gliedern gesichert sind, sodass der Ausfall einiger Dioden keinen Einfluss auf das gesamte System hat.
Für den Gleichrichter 7 wurde hier am Ausgang 9 ein Ersatzerregerkreis modelliert, der bei der Kopplung des Gleichrichters an die Erregerwicklung der Maschine durch die Öffnung des Schalters SW_5 von der Schaltung getrennt wird.

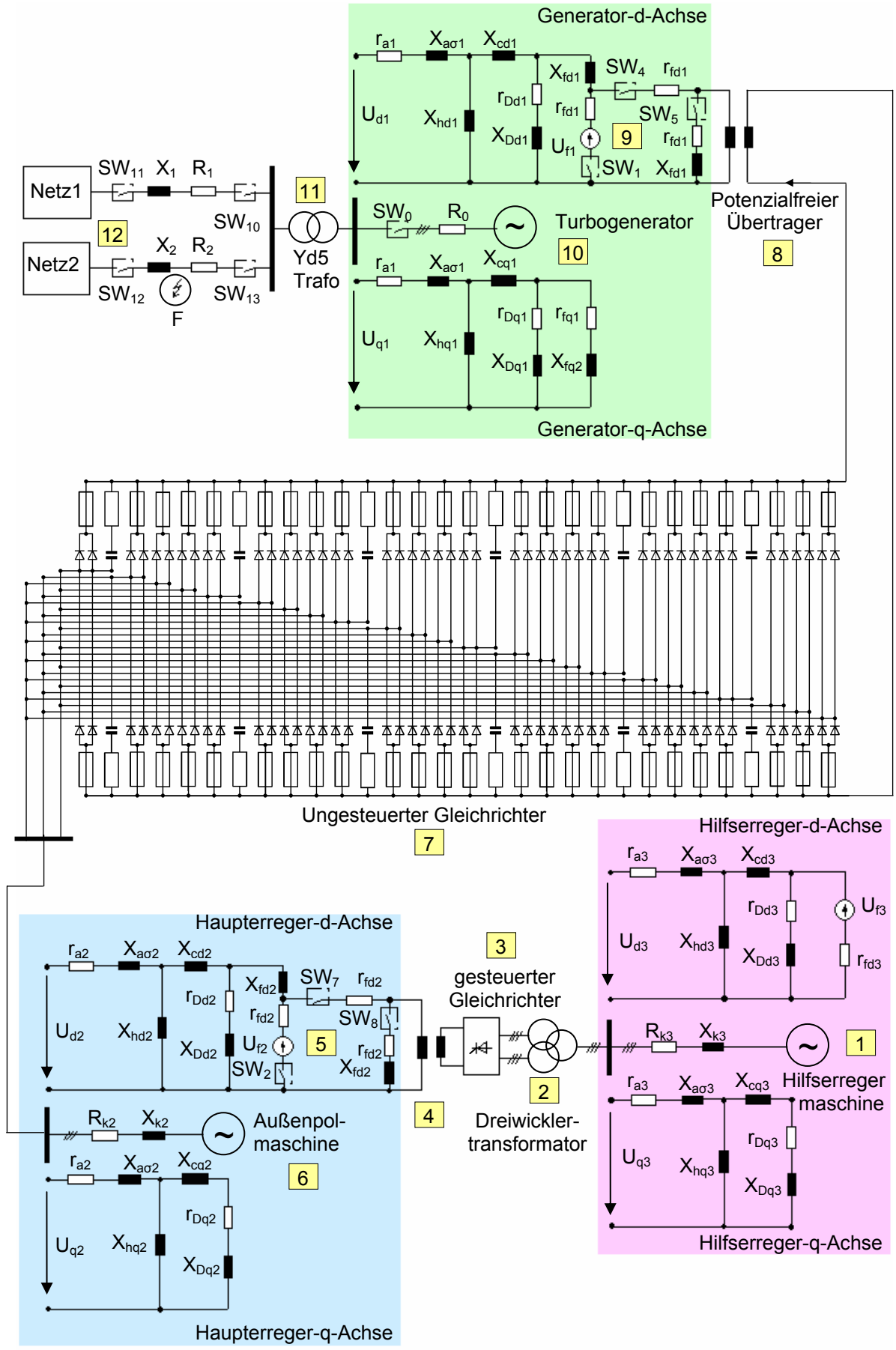


Bild 3.4: Schaltungstechnische Realisierung des Drei-Maschinen-Systems

Die interne Generatorerregerspannungsquelle U_{f1} wird ebenfalls während der Kopplung durch Öffnen von Schalter SW_1 (auf dem Generatorfeldzweig) getrennt. Somit wird der Generatorerregerkreis direkt mit dem Gleichrichterausgang 9 verbunden.
Der Eingang des rotierenden Gleichrichters wird dreiphasig aus dem Anker der Haupterregermaschine 6 gespeist. Sie ist als Außenpolmaschine ausgeführt, sodass der statisch auf dem Fundament befestigte Maschinenständer die Erregerwicklung 5 trägt.
Ähnlich wie beim Generator wird diese in der Park'schen Darstellung der d-Achse durch die Ausgangsspannung der gesteuerten Gleichrichterbrücke 3 versorgt. Die Kopplung erfolgt ebenfalls durch einen potenzialfreien Übertrager 4 und den überbrückten Schalter SW_7.
Für den gesteuerten Gleichrichter 3 wurde am Ausgang 5 ein Ersatzerregerkreis eingesetzt, der ebenfalls nur bei der Kopplung über Schalter SW_8 von der Schaltung getrennt wird. Die interne Erregerspannungsquelle U_{f2} der Außenpolmaschine wird hier im gekoppelten Zustand des Modells durch den Schalter SW_2 (auf dem Feldzweig der Haupterregermaschine) getrennt, und der Erregerkreis (Außenpole) ist direkt mit dem gesteuerten Gleichrichterausgang 5 zusammengeschaltet.
Über die Thyristorenbrücke 3 im Schaltplan 3.4 können drei für das bürstenlose Drei-Maschinen-System wichtige Größen beeinflusst werden:

- Erregerstrom der Haupterregermaschine
- Erregerstrom des Generators
- Spannung des Generators.

Der gesteuerte Gleichrichter 3 auf der Primärseite wird durch zwei dreiphasige Systeme versorgt, die um einen Spannungswinkel von 30° zueinander mittels eines Dreiwicklertransformators 2 verschoben sind, der wiederum durch dreiphasige Ständerwicklungen der Hilfserregermaschine 1 gespeist wird. Sie ist als Permanentmagnetmaschine ausgeführt, sodass ihre Pole keine weitere Erregung benötigen.

3.4 Kopplung des Generators mit der Haupt- und Hilfserregermaschine

Die zuletzt im Schaltplan 3.4 beschriebenen Erweiterungen des variablen Rotorkreises zu einem elektrischen Kettenleitermodell haben sich bei mehreren Arbeiten bewährt [8,44,45] und waren die Grundvoraussetzung für die Modellierung der drei Maschinen. Dabei mussten folgende drei Problemstellungen gelöst werden:

a) Unterschiedliche elektrische Frequenzen

Die drei betrachteten Synchronmaschinen sind zwar auf eine Welle montiert, sie haben jedoch unterschiedliche Polpaarzahlen, sodass sich folgende Maschinenausführungen ergeben:

- 16-polige Hilfserregermaschine mit 400Hz-Statorfrequenz
- 6-polige Haupterregermaschine mit 150Hz-Ankerfrequenz
- 2-poliger Generator mit 50Hz-Statorfrequenz.

Für die Modellierung bedeutet dies, dass in einem Modell drei unterschiedliche Drehsysteme zu berücksichtigen sind. Gleichzeitig müssen wegen der nichtlinearen Kopplung zwischen Netz, Maschinen und Wellenstrang die Gleichungen aller drei Drehstromsysteme zu einem gesamten Gleichungssystem vereinigt und simultan im Zeitbereich gelöst werden. Daraus folgt, dass sowohl bei der Aufstellung des gesamten Gleichungssystems als auch bei der numerischen Lösung die drei Drehstromsysteme in die Admittanzmatrix einfließen müssen. Dies erfordert einen großen Eingriff in das Simulationsprogramm.

b) Direkte galvanische Kopplung zwischen den Synchronmaschinen

Die direkte galvanische Kopplung zwischen Generator, Haupt- und Hilfserregermaschine muss auch durch ein elektrisches Netzwerk realisiert werden, wie es im Schaltplan 3.4 vorgesehen ist. Entsprechend der realen Ausführung werden die sinusförmigen Spannungen und Ströme durch einen gesteuerten Gleichrichter (gespeist von der Hilfserregermaschine) und durch einen ungesteuerten Gleichrichter (gespeist vom Anker der Haupterregermaschine) in eine Gleichspannung und einen Gleichstrom umgewandelt und dem jeweiligen Erregerkreis zugeführt.

Die beiden Gleichrichter bestehen aus einer Vielzahl von Ventilen, welche einzeln mithilfe eines nichtlinearen Schalters nachgebildet werden. Dadurch ergeben sich im Berechnungsmodell Drehsystemspannung und Gleichspannung, die bis zu 10% von den realen Spannungen abweichen können, sodass vor der Zusammenschaltung der Synchronmaschinen die Nachjustierung der Parameter des Erregerkreises notwendig ist. Dies ist deshalb sehr aufwändig, weil für jede Maschine das Übertragungsverhältnis der Statorwicklung zur Rotorwicklung unterschiedlich ist. Das hat zur Folge, dass, von den Generatorklemmen aus gesehen, die drei Übertragungsstufen für die Spannungen, Ströme und Impedanzen berücksichtigt werden müssen.

Die im Netzwerk beim Erregerkreis eingebauten idealen Spannungsübertrager werden benötigt, um die einzelnen Maschinen im entkoppelten Zustand zunächst auf ihre Nennleistung zu bringen und diese dann zusammenzuschalten. Hervorzuheben ist, dass die Zusammenschaltung von drei unterschiedlichen Drehstromsystemen nur deswegen möglich ist, weil diese über einen Gleichstromkreis miteinander gekoppelt sind.

c) Regelung der Erregereinrichtung

Die Regelung der Erregereinrichtung muss realitätsnah simuliert werden. Entsprechend der Realisierung in der Anlage müssen bei der Darstellung der Hilfserregermaschine die zugehörigen Thyristoren beachtet werden, sodass je nach Gleichrichterventilzustand die Änderung der Erregerspannung und des Erregerstroms der Haupterregermaschine erfolgen kann. Dabei muss die Steuerungslogik (z.B. ungefähr 2-fache Erregung bei Kurzschluss) mit der realen Erregung der Anlage übereinstimmen.

4 Dynamisches Verhalten des Drei-Maschinen-Systems

4.1 Untersuchungsumfang

Bei der Berechnung des Drei-Maschinen-Systems wird geprüft, ob die Erregerkomponenten im Hinblick auf ihre maximale Belastung besser ausgenutzt werden können. Hierzu wird im ersten Schritt der Nennlastbetrieb simuliert, um die Spannungs- und Stromcharakteristik beim stationären Zustand im Erregersystem zu bestimmen. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Einflüsse der Störfälle auf Generator und Erregersystem untersucht. Aus einer Vielzahl von Störfällen, die den Generator und das Erregersystem gefährden können, wurden für die vorliegende Untersuchung folgende Störfälle als repräsentativ ausgewählt:

a) Störfälle und Schaltvorgänge außerhalb des Generators

   Hierzu zählen folgende Standardstörfälle:

   - Generatorklemmenkurzschlüsse
   - Fehlsynchronisierung mit großem Fehlwinkel
   - Kurzschlussabschaltungen von kraftwerksnahen Fehlern

b) Störfälle innerhalb des Generators bzw. der Erregereinrichtung

   Hier werden folgende Störfälle an verschiedenen Stellen des Drei-Maschinen-Systems betrachtet:

   - Unterbrechung des Stroms in der Generatorerregerwicklung
   - Kurzschluss an den Klemmen des Ankers der Haupterregerwicklung
   - Fehler im Bereich des Diodengleichrichters der Haupterregermaschine
   - Fehler im Bereich des Thyristorengleichrichters der Hilfserregermaschine.

Die Analyse dieser schweren Störfälle bildet den Kern der Untersuchung in diesem Kapitel.

4.2 Wichtige repräsentative Berechnungsgrößen

Das gesamte Simulationsmodell ist sehr umfangreich und wird durch einige hundert Funktionen verschiedener physikalischer Größen beschrieben, um die Auswirkungen der behandelten Fehler zu erfassen. Es ist daher zwingend notwendig, die wichtigen repräsentativen Größen herauszusuchen und diese für die Beurteilung des dynamischen Verhaltens und der Beanspruchung der Maschinen und ihrer zugehörigen Gleichrichter heranzuziehen. Für die nachstehende Untersuchung richtet sich das Hauptaugenmerk auf die folgenden Größen:

a) Im Generator

- Ständerspannung und -strom (U_{G1}, I_{G1})
- Erregerspannung und -strom (U_{f1}, I_{f1})

b) In der Haupterregermaschine

- Ankerspannung und -strom (U_{SM2}, I_{SM2})
- Außenpolspannung und -strom (U_{f2}, I_{f2})
- Ausgangsspannung und -strom des ungesteuerten Gleichrichters (U_{f1}, I_{f1})
- Diodenstrom (I_{D+})

c) Im Bereich der Hilfserregermaschine

- Ständerspannung und -strom (U_{SM3}, I_{SM3})
- Ausgangsspannung und -strom des gesteuerten Gleichrichters (U_{f2}, I_{f2})
- Thyristorstrom (I_{T+}).

Die dynamischen Vorgänge in Störfallsituationen spielen für die kostenaufwändige Maschinenentwicklung eine wichtige Rolle. Mithilfe dieser Kenngrößen ist es möglich zu beurteilen, wie sich das komplexe Drei-Maschinen-System verhält und wie die elektrodynamischen Vorgänge innerhalb des Generators und des Erregersystems ablaufen. Ferner lässt sich davon ableiten, welchen Belastungen die Erregereinrichtung während der Störfälle ausgesetzt ist.

Von großem Vorteil ist hier die Ermittlung wichtiger Kenngrößen, die in der Regel aufgrund der rotierenden Rotor- und Gleichrichterkomponenten im Erregerkreis des Generators messtechnisch schwer zu erfassen sind.

4.3 Abgleich des Erregerkreises im stationären Zustand

Die Erweiterungen im Bereich des Rotorkreises ermöglichen die direkte Kopplung des Generators mit der Haupt- und Hilfserregermaschine bei unterschiedlichen Frequenzen, Spannungen, und Leistungen. Die wichtigsten Erweiterungen, die zu einer galvanischen Kopplung des gesamten Netzwerks führen, sind:

a) Ausdehnung des Rotorkreises zu einem elektrischen Kettenleitermodell

b) Verwendung potenzialfreier Übertrager zur Kopplung der einzelnen Maschinen

c) Einfügen von Ersatzwiderständen und Schaltern zur Herstellung eines verträglichen Nennbelastungszustands in allen drei Maschinen.

Diese Schalter wurden auch im Netzwerk eingebaut, um unterschiedliche Fehler in der Erregereinrichtung simulieren zu können.
Die Kopplung wird dabei in mehreren Schritten vollzogen. Zu Beginn der Berechnung werden alle drei Synchronmaschinen entkoppelt und anschließend an den Nennzustand herangeführt. Daraufhin wird die Berechnung solange fortgesetzt, bis der stationäre Zustand sowohl im Ersatzkreis als auch im tatsächlichen Generatorerregerkreis erreicht ist (s. Bild 4.1).
Wegen des nichtlinearen Charakters der beschriebenen Differenzialgleichungen kann dieser Zustand nicht durch eine geschlossene Lösung erreicht werden. Daher werden die Maschinenerregerkreise durch Zusatzschaltungen zunächst voneinander entkoppelt. Danach wird der Generator direkt mit der Haupterregermaschine über den Hilfserregerzweig in 8 verbunden. Der Kopplungsvorgang ist in Bildern 4.1 und 4.2 veranschaulicht. Unmittelbar vor der Kopplung werden die Schalter SW_1 und SW_5 geöffnet, auf diese Weise werden Ersatzwiderstand und -induktivität vom Erregerkreis getrennt. Gleichzeitig wird SW_4 geschlossen, und dadurch wird der Gleichrichter mit dem tatsächlichen Erregerkreis des Generators verbunden.

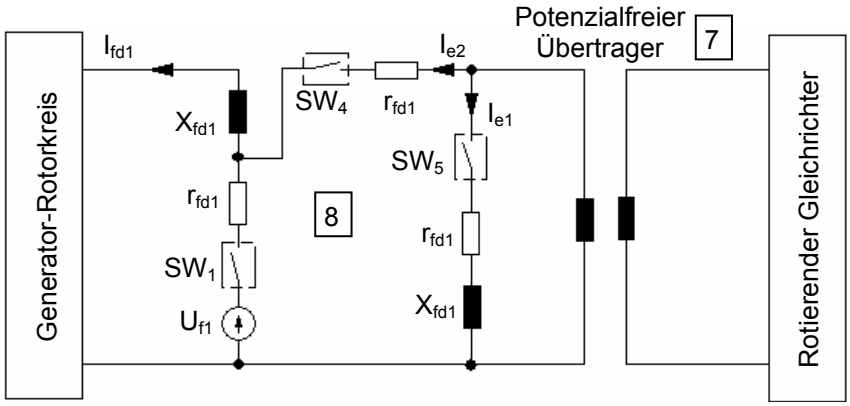


Bild 4.1: Ausschnitt des Generatorerregerkreises

Ob die Schaltung sich bei der Kopplung korrekt verhält und das System richtig reagiert, wird anhand eines Netzfehlers überprüft. Im Bild 4.2 sind der Strom (I_{e1}) im Ersatzkreis und der Strom (I_{fd1}) im tatsächlichen Erregerkreis dargestellt.

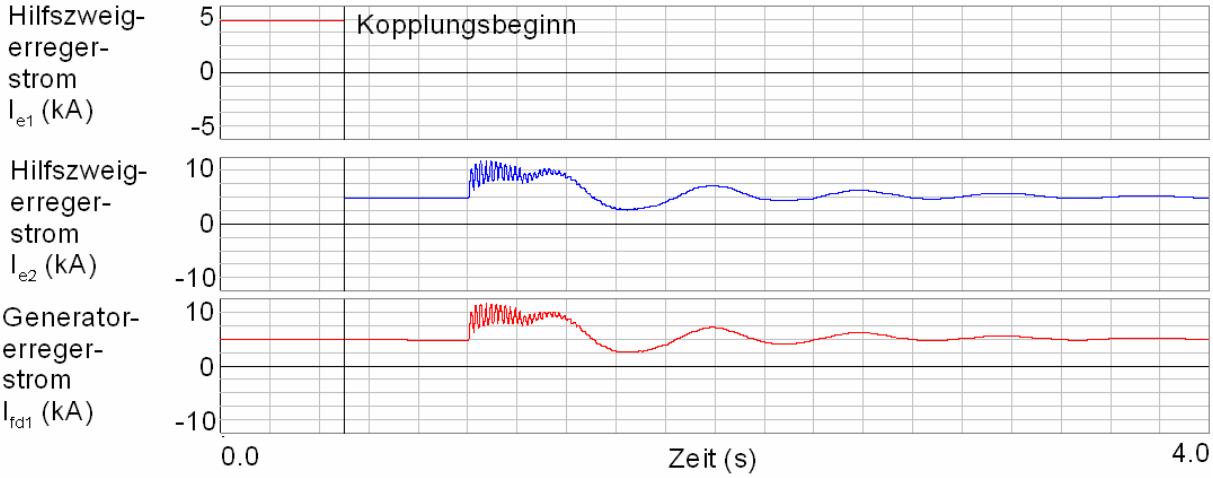


Bild 4.2: Kopplungsvorgang im Generatorerregerkreis mit nachfolgender netzseitiger, dreipoliger Kurzschlussabschaltung mit 200 ms Fehlerklärungszeit

Aus Bild 4.2 geht hervor, dass nach dem beschriebenen Kopplungsvorgang sowohl die Ströme im Ersatzzweig des Netzwerks als auch im tatsächlichen Generatorerregerkreis stabil sind. Diese stimmen in der Größe vor und nach der Kopplung gut überein. Die Kopplung der Außenpole der Haupterregermaschine mit der Hilfserregermaschine wird auf die gleiche Art und Weise wie beim Generatorerregerkreis umgesetzt. Mit der entworfenen Netzstruktur (Schaltentwurf 3.4 im Abschnitt 3.3) können der stationäre Nennlastbetrieb und der transiente Zustand bei verschiedenen Störfällen im Generator und Erregersystem nach dem Abgleich des Erregerkreises, wie in den Bildern 4.1 und 4.2 gezeigt, im nachfolgenden Abschnitt untersucht werden.

4.4 Nennlastbetrieb

Zu Beginn der Untersuchung wird der stationäre Betrieb im Nennlastpunkt simuliert. Hierbei gilt es vor allem zu überprüfen, ob alle drei Maschinen nach der Kopplung für einen längeren Zeitbereich auch stabil bleiben. Weiterhin sollen die berechneten Größen, wie Spannungen und Ströme, für die als Beispiel untersuchten Maschinen mit den Herstellerangaben übereinstimmen. Im Bild 4.3 sind die berechneten Verläufe in einem Zeitabschnitt von 100 ms für die drei Maschinen dargestellt.

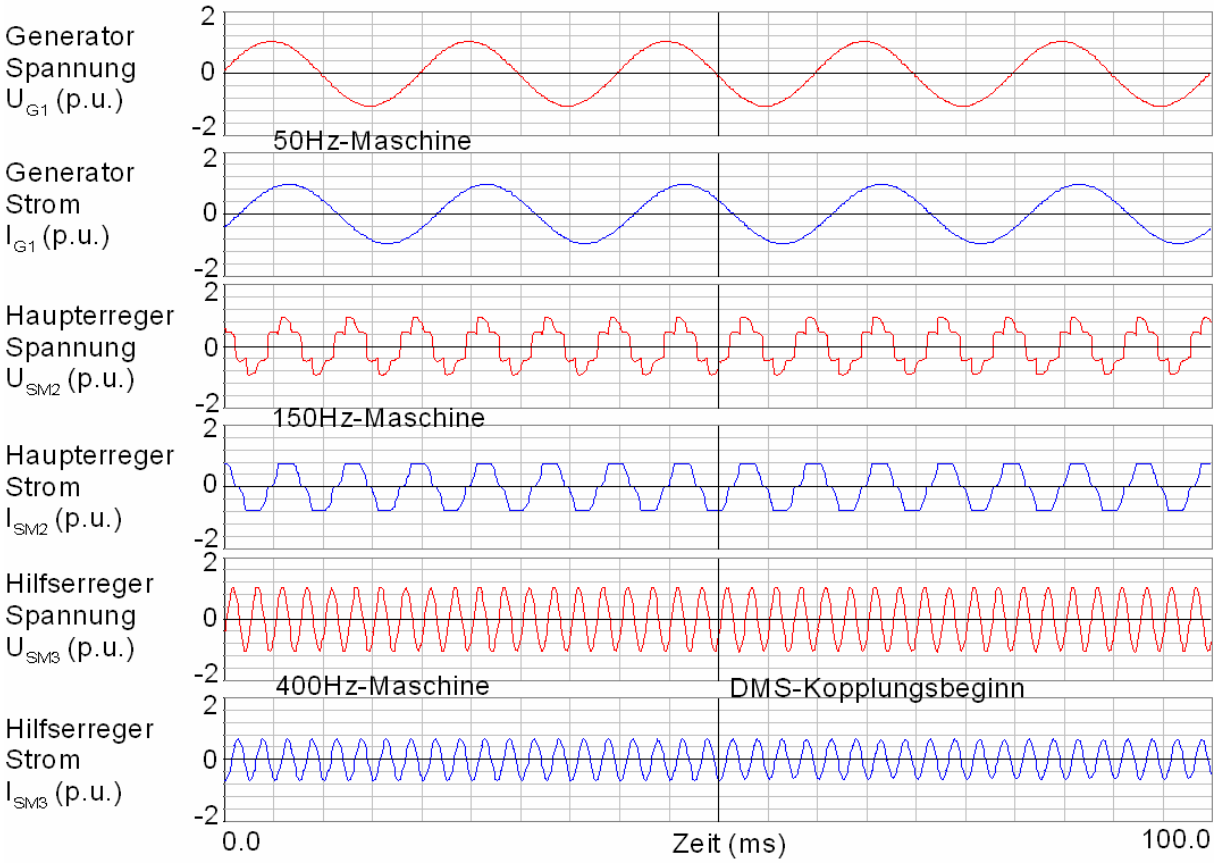


Bild 4.3: Spannungen und Ströme des Drei-Maschinen-Systems während der Kopplungsphase im Kurzzeitbereich

Die Kenngrößen der drei Maschinenarten wurden bereits im Abschnitt 3.1 aufgeführt. Hierbei ist erkennbar, dass durch den ungesteuerten 6-Pulsgleichrichter die Spannungs- und Stromverläufe der Anker-Drehwicklungen der Haupterregermaschine am stärksten von der idealen Sinusform abweichen, während bei der Hilfserregermaschine aufgrund des eingeführten gesteuerten 12-Pulsgleichrichters geringere

Abweichungen festzustellen sind. Sie lassen sich übersichtlich durch Fourier-Analyse der in der Berechnung erfassten Grund- und Oberwellen miteinander vergleichen, wie in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Frequenz / Maschinenarten	Grundwelle (Hz)	Oberwellen-ordnungszahl	Oberwellen-gehalt (%)
Generator	50	15	0.02
Außenpolmaschine	150	5	17.4
		7	7.2
Permanentmagnet-maschine	400	3	4.7
		7	1.7

Tabelle 4.1: Grund- und Oberwellen der Maschinen

Der Oberwellengehalt wird durch den Erregerstrom über die Anschnittspannung am Ausgang des gesteuerten Gleichrichters geändert.
Im Bild 4.3 ist die größte Abweichung von der Sinusform im Ankerkreis der Außenpolmaschine zu erkennen. Durch die große Erregerinduktivität des Generators wird jedoch der Strom am Ausgang des Gleichrichters weit gehend geglättet, sodass beim Generator der Einfluss der Oberwellen zu vernachlässigen ist.
Die Stromverläufe in der Diodengleichrichterbrücke sind im Bild 4.4 dargestellt. Diese Ströme sind in einem einzelnen Diodenkreis im positiven und negativen, rotierenden Gleichrichterteil bei Nennbetrieb aufgezeigt.

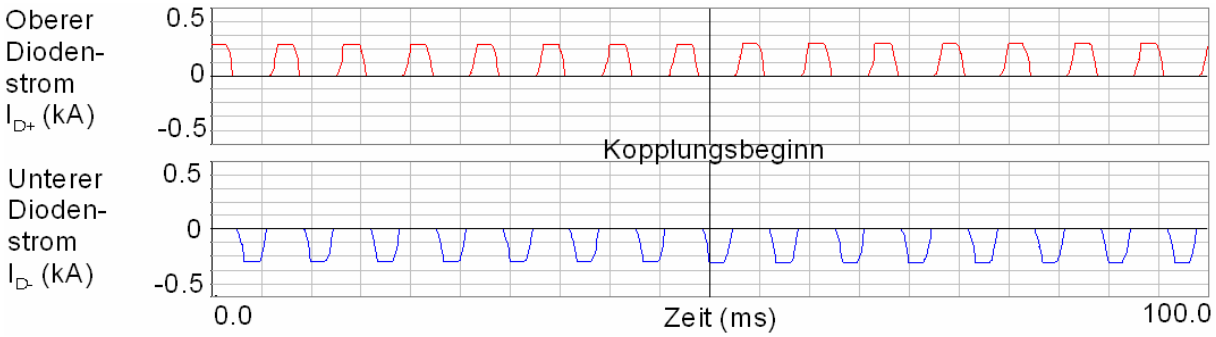


Bild 4.4: Stromverläufe im rotierenden Diodengleichrichter auf der 150Hz-Seite

Ebenso zeigt Bild 4.5 den Stromverlauf in einem einzelnen Thyristorkreis im positiven und negativen Gleichrichterteil der Hilfserregermaschine bei Nennbetrieb.

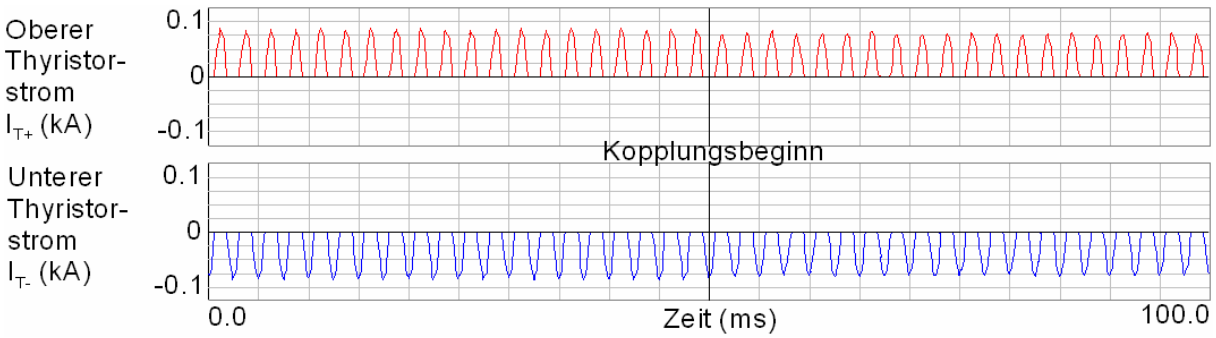


Bild 4.5: Stromverläufe in der Thyristorenbrücke auf der 400Hz-Seite

Eine sehr wichtige Fragestellung am Anfang der Untersuchung war, ob die Werte der eingestellten Ströme und Spannungen in den einzelnen Maschinen mit den Herstellerangaben übereinstimmen. In der Tabelle 4.2 findet sich die Antwort:

Kenngrößen des Drei-Maschinen-Systems		Simuliert	Angaben vom Hersteller	max. zuläss. Stoßwert	nicht direkt messbar (n. m.)
Generator	Ständerspannung U_{G1}(kV)	21kV	21kV	--	--
	Ständerstrom I_{G1}(kA)	11.30	11.320	--	--
	Erregerspannung U_{f1}(kV)	0.374	0.387	0.774	n. m.
	Erregerstrom I_{f1}(kA)	3.940	3.966	8.0	n. m.
Haupterreger	Ankerspannung U_{SM2}(kV)	0.329	0.329	--	n. m.
	Ankerstrom I_{SM2} (kA)	3.944	3.966	--	n. m.
	Außenpolspannung U_{f2}(kV)	29.00	26.60	54.44	--
	Außenpolstrom I_{f2}(kA)	0.118	0.115	0.236	--
	Diodenstrom I_{D+}(kA)bei 60°	0.250	--	0.690	n. m.
Hilfs-erreger	Ständerspannung U_{SM3}(kV)	0.220	0.220	--	--
	Ständerstrom I_{SM3} (kA)	0.117	0.115	--	--
	Thyristorstrom I_{T+}(kA)	0.06	--	1.0	--

Tabelle 4.2: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Spannungen und Strömen im stationären Zustand

Die geringen Abweichungen beweisen, dass das Simulationsmodell sehr gut abgeglichen ist, sodass nun die Basis für die dynamischen Untersuchungen geschaffen wurde.

4.5 Stoßerregung

Zur Verbesserung der Stabilität des Kraftwerksblocks gehört die Stoßerregung zum geplanten Sonderbetrieb bei entfernten Netzfehlern und wird zur schnellen Erhöhung der Erregerspannung und des Erregerstroms der Außenpolmaschine eingeleitet. Diese Erhöhung erfolgt am Ausgang des gesteuerten Gleichrichters der Hilfserregermaschine. Dies bewirkt daraufhin einen Anstieg von Generatorerregerspannung und -strom. Der Stoßfaktor beträgt hier üblicherweise das 1.5- bis 2.5-fache des Erregernennwerts, wobei die Zeitdauer auf 10 Sekunden begrenzt ist.

Da die Erregermaschinen und die Gleichrichter beim Entstehen der Generatorspannung beteiligt sind, wird das korrekte Verhalten der gesamten Erregereinrichtung im dynamischen Zustand am Beispiel der Stoßerregung untersucht.

Es wird angenommen, dass ein dreipoliger Kurzschluss im Netz 100 km von der Sammelschiene entfernt auftritt, der durch den Netzschutz nicht abgeschaltet wird und infolgedessen mehrere Sekunden ansteht. Bei diesem Fall wurden die wichtigsten repräsentativen Größen für die Spannungen und Ströme der drei Maschinen berechnet und in den nachfolgenden Abbildungen (4.6, 4.7 und 4.8) als Zeitfunktionen dargestellt.

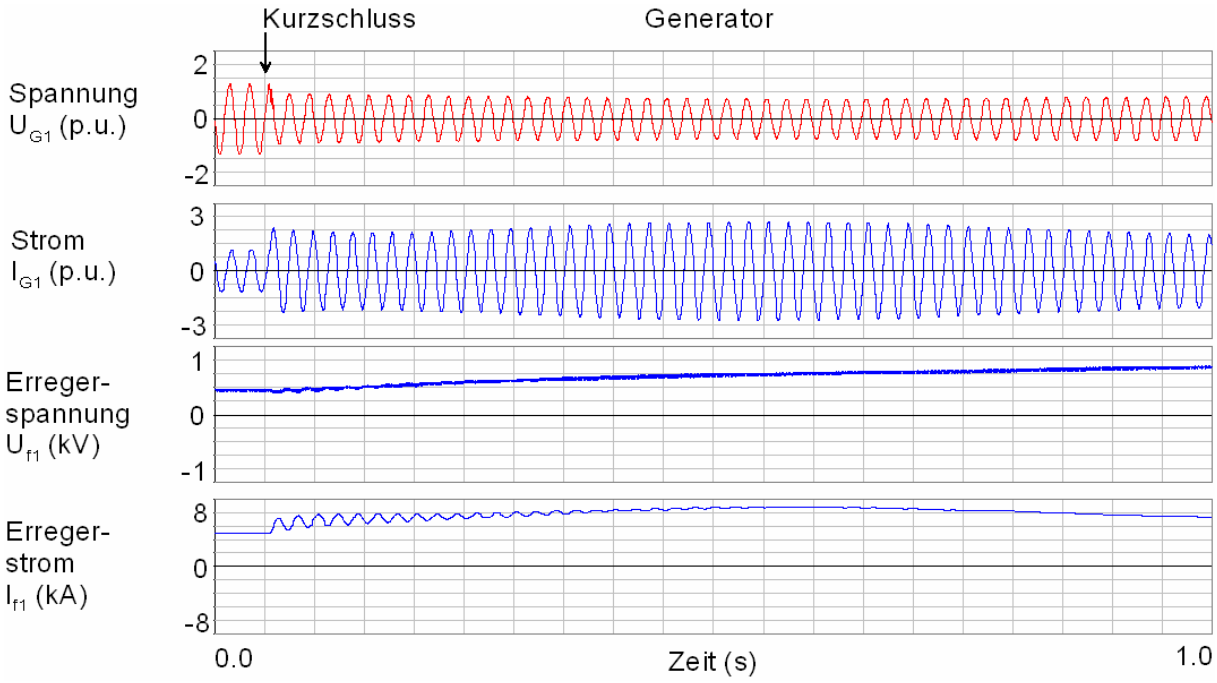


Bild 4.6: Generatorspannungen und -ströme bei Stoßerregung

Die im Bild 4.6 gezeigte Klemmenspannung bricht auf das 0.6-fache des Nennwerts ein, während der Generatorstrom auf das 3-fache seines Nennwerts ansteigt. Die Erregerspannung steigt nahezu linear auf das1.6-fache entsprechend der Stoßdauer an, wobei die Anstiegszeit ca. 500 ms beträgt. Der Generatorerregerstrom ändert sich sehr schnell infolge des Kurzschlusses und behält durch die Einwirkung des Spannungsreglers, statt abzunehmen, seinen hohen Wert von 7.1 kA bei, solange die Stoßerregung andauert.

Ähnliche Ergebnisse erhält man bei der Anwendung eines vereinfachten IEEE-Spannungsreglers, bei dem ein hoher Verstärkungsfaktor der Regelabweichung auf 600 gesetzt wurde. Die so errechneten Zeitverläufe werden im Bild 4.7 präsentiert.

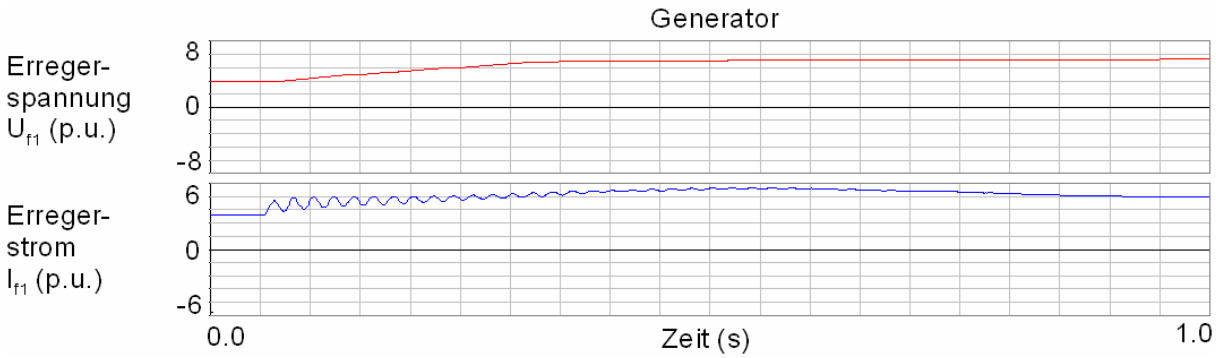


Bild 4.7: Generatorerregerspannung und -strom mit vereinfachtem IEEE-Regler

Interessante Erkenntnisse über dynamische Vorgänge innerhalb der Erregermaschinen während des Kurzschlusses und die anschließende Stoßerregung ergibt das Bild 4.8. Der dreipolige Kurzschluss macht sich bemerkbar im auf das 1.5-fache erhöhten Ankerstrom. Entsprechend steigt der Erregerstrom durch die Stoßerregung an, die am Ausgang der gesteuerten Gleichrichterbrücke eingeleitet wird.

Die Erregerspannung am Ausgang des gesteuerten Gleichrichters nimmt relativ schnell zu. Der erhöhte Erregerstrom an den Außenpolen führt zur ansteigenden Ankerspannung der Haupterregermaschine, die anschließend über die ungesteuerte Gleichrichterbrücke die Generatorerregerwicklung speist.

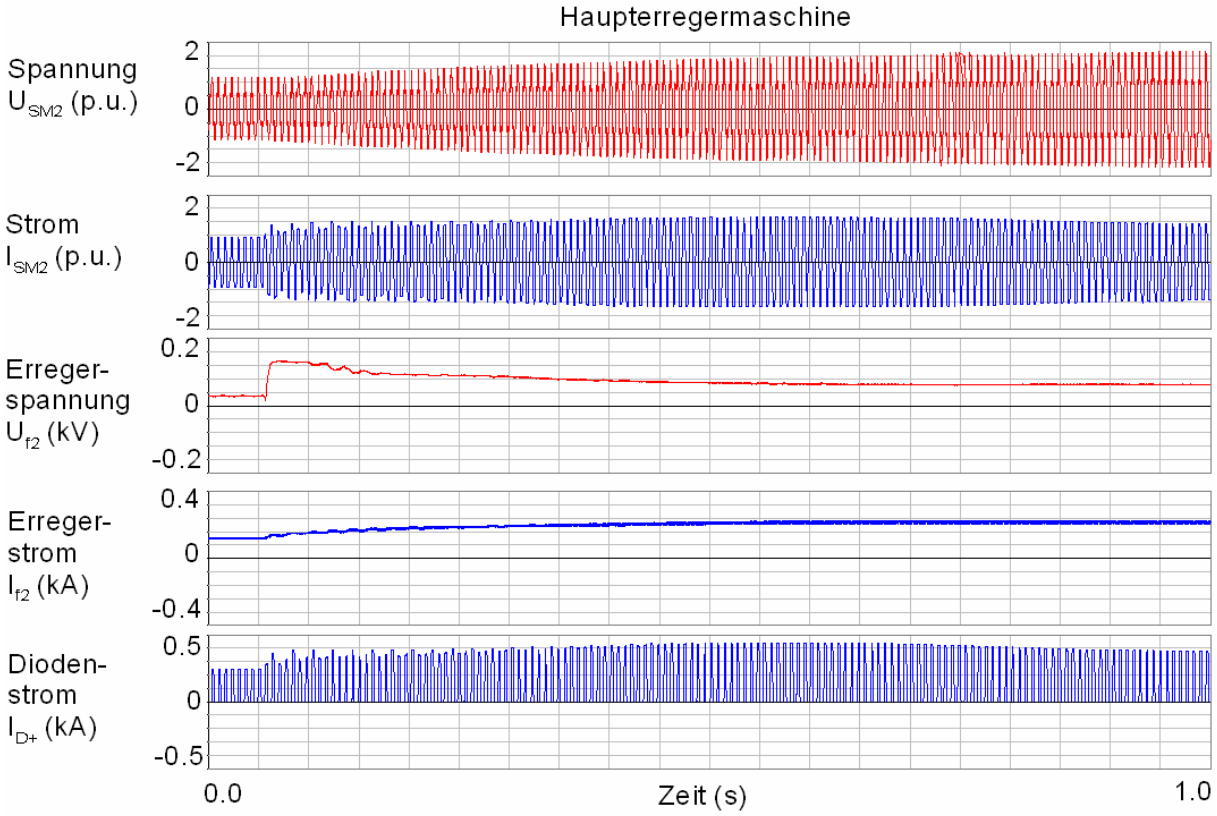


Bild 4.8: Spannungen und Ströme der Haupterregermaschine bei Stoßerregung

Die Analyse der Zeitverläufe für die Hilfserregermaschine zeigt, dass der Ständerstrom der Hilfserregermaschine durch den Netzkurzschluss auf einen Wert von ca. 1.5 p.u. ansteigt.

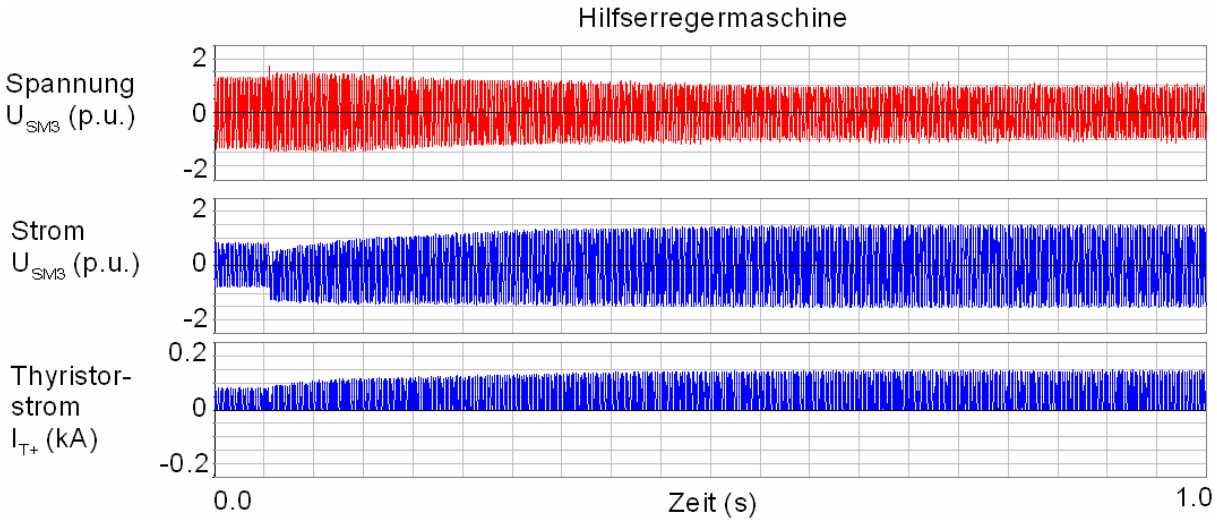


Bild 4.9: Spannungen und Ströme der Hilfserregermaschine bei Stoßerregung

Entsprechend der Anforderung für die Stoßerregung erhöht sich der Thyristorstrom auf das 2-fache seines Nennwerts. Die Spannung der Hilfserregermaschine sinkt dabei auf das ca. 0.8-fache.

4.6 Störfälle außerhalb des Generators

Laut VDE 0530 müssen die Maschinen so ausgelegt werden, dass sie den drei- bzw. zweipoligen Stoßkurzschluss ohne bleibende Schäden überstehen und den Betrieb nach einer eventuellen Kurzinspektion wieder aufnehmen können. Für die Fehlsynchronisierung und kraftwerksnahe Kurzschlüsse gibt es keine solch explizite Forderung. Es wird jedoch vom Hersteller angestrebt, dass auch bei diesen Fehlern keine Zerstörung der Maschine erfolgt. Dabei wird hingenommen, dass die Lebensdauer der Maschinen verkürzt wird und möglicherweise leichte Verformungen des Materials in den Kopplungsflanschen der Welle oder eine Lockerung der Bandage im Wickelkopfbereich des Generators auftreten werden [47].
Da die Erregereinrichtung ein Bestandteil des kompletten Generators ist, gelten diese Forderungen auch für die Haupt- und Hilfserregermaschine. Nachfolgend werden die Auswirkungen der verschiedenen Störfälle auf die Erregereinrichtung untersucht.

4.6.1 Dreipoliger Kurzschluss an den Generatorklemmen

Der Generatorklemmenkurzschluss gehört aufgrund der Kapselung der Generatorabgänge zu den seltenen Störfällen. Wenn er allerdings auftritt, dann sind die Auswirkungen insbesondere auf den Wickelkopf und die Erregereinrichtung sehr gravierend. Bei der Simulation wird angenommen, dass dieser Fehler direkt an den Klemmen im Spannungsnulldurchgang und daher bei der größten Flussverkettung mit der zugehörigen Phase auftritt. Der Differenzialschutz erkennt den Fehler sofort und leitet innerhalb von 60 ms eine schnelle Entregung der Maschine ein.
Der ermittelte Zeitverlauf im Bild 4.10 zeigt das Verhalten des Generators bei einem dreipoligen Kurzschluss an den Generatorklemmen. Hierbei steigt der Generatorstrom nach der Einleitung des Kurzschlusses von 1 auf das 11-fache seines Nennwertes an und nimmt aufgrund der großen Induktivität nur langsam ab. Die abklingenden 50Hz-Schwingungen werden hier durch das Gleichfeld des Generatorstators verursacht.

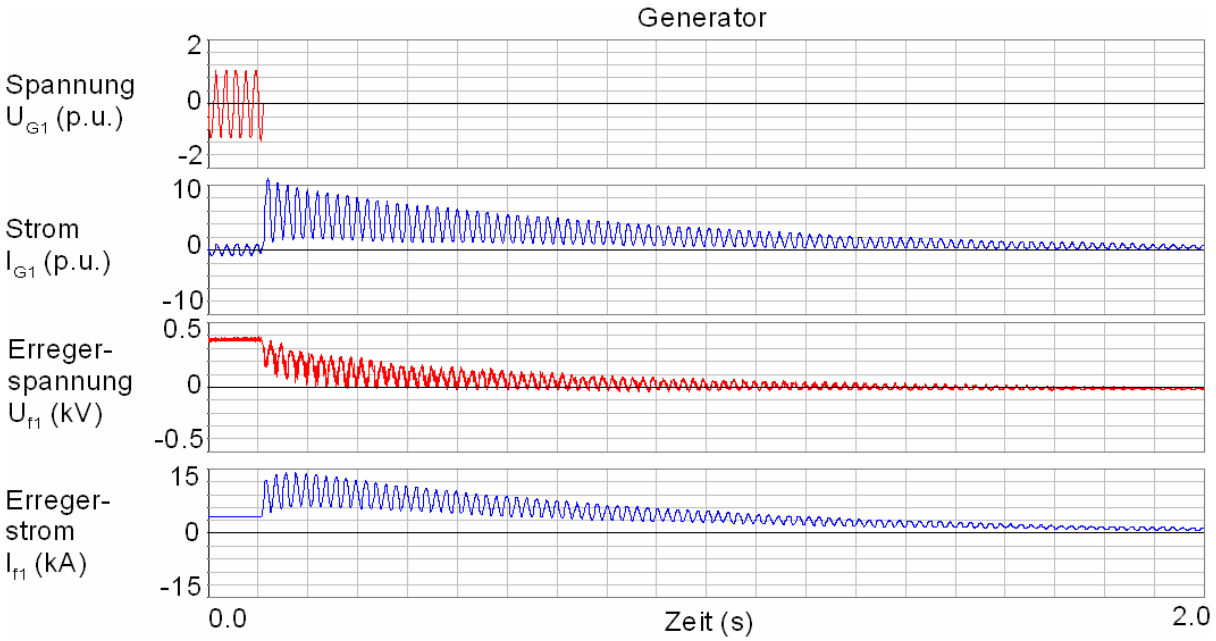


Bild 4.10: Spannungs- und Stromverläufe im Generator bei einem dreipoligen Klemmenkurzschluss

Die Ausgleichsvorgänge innerhalb der Haupterregermaschine und des ungesteuerten Gleichrichters sind im Bild 4.11 dargestellt, die bei diesen Betrachtungen besonders interessieren.

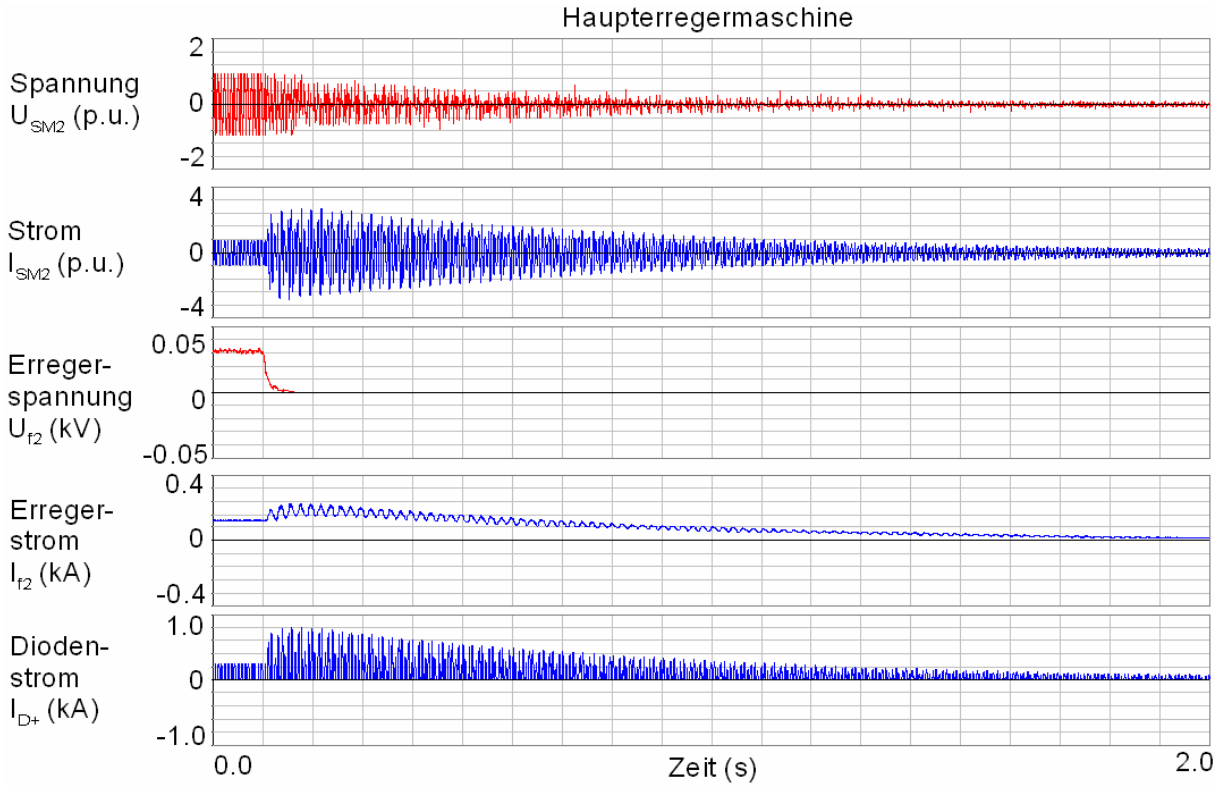


Bild 4.11: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine bei einem dreipoligen Generatorklemmenkurzschluss

Der Generatorklemmenkurzschluss wirkt auf die Außenpolmaschine ein, sodass der zugehörige Erregerstrom dann auf das 3.5-fache seines Nennbetriebswerts ansteigt und ähnlich wie der Generatorstrom nach ca. 2 Sekunden auf Null absinkt. Der Diodenstrom in der ungesteuerten Gleichrichterbrücke steigt auf das 3.3-fache (0.83 kA) des Stroms im Nennbetrieb.
Dagegen wirkt sich der Generatorklemmenkurzschluss auf die Hilfserregermaschine kaum aus (s. Bild 4.12). Die schnelle Entregung wird durch ein Signal aus dem Generatorschutz ausgelöst, das dann an das Steuermodul weiter geleitet wird.

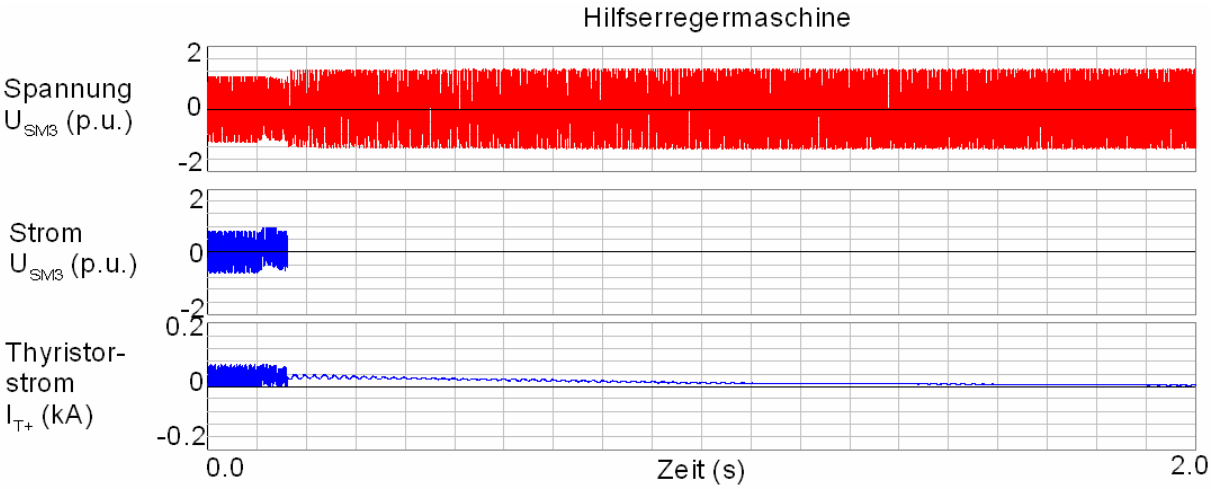


Bild 4.12: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine bei einem dreipoligen Generatorklemmenkurzschluss

4.6.2 Fehlsynchronisierung

Große Kraftwerke sind in der Regel mit einer automatischen Synchronisierungseinrichtung ausgestattet, sodass eine Zuschaltung des Generators an das Netz mit sehr geringem Winkel und kleinem Schlupf geschieht. Eine Fehlsynchronisierung ist also eine schwere Störung, die nur bei Ausfallen bzw. Fehlfunktion dieser Einrichtung auftreten kann. Sie kann ebenfalls bei Anlagen vorkommen, die von Hand synchronisiert werden.
Es ist in der Literatur [49] bekannt, dass sich die höchsten Wicklungsbeanspruchungen für einen Fehlwinkel von 180° ergeben, während die schwerste Belastung der Welle bei 120° erfolgt. Für die Untersuchung wurde dennoch der Fall für die Fehlsyn-

chronisierung mit 120° gewählt, weil diese Störung im Betrieb als Folge des Vertauschens von zwei Phasen in der Synchronisierungseinrichtung häufiger vorkommt.
Die Synchronisierung mit dem Netz findet beim Leerlauf statt, d.h. der Erregerstrom beträgt nur ca. ein Drittel des Nennstroms.
Analog zum Klemmenkurzschluss zeigen die Bilder 4.13 bis 4.15 die Zeitfunktionen für die Ströme und Spannungen in den Maschinen. Aus den Verläufen ist ersichtlich, dass die Fehlsynchronisierung eine schwere Belastung für den Generator und die Erregereinrichtung darstellt.

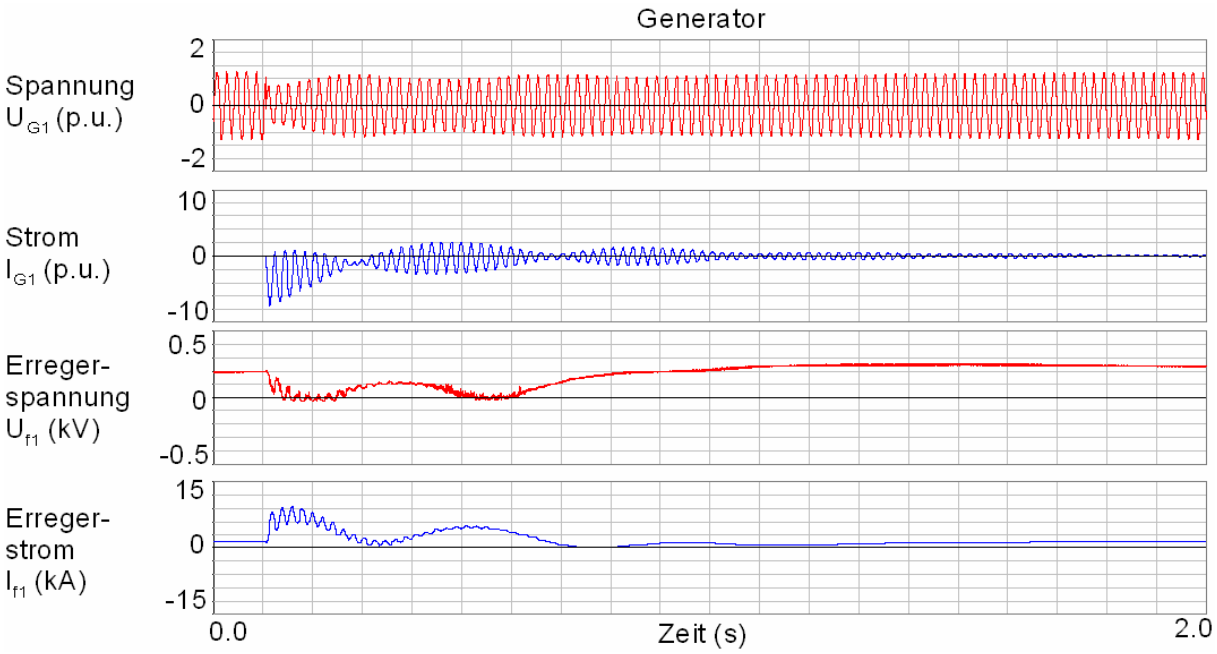


Bild 4.13: Spannungs- und Stromverläufe im Generator bei Fehlsynchronisierung mit einem Fehlwinkel von 120°

Der Generatorstrom erreicht maximal das ca. 8-fache des Nennwerts, dagegen erhöhen sich der Generatorerregerstrom und der Ankerstrom der Haupterregermaschine nur auf das ca. 7-fache des Leerlaufwerts. Ähnlich wie beim Klemmenkurzschluss klingt der 50Hz-Anteil des Stroms im Generator nach 2 Sekunden auf Null ab.
Sowohl beim Generator als auch bei der Außenpolmaschine sind Anteile mit niedriger Frequenz (1 bis 3 Hz) deutlich erkennbar, welche Folge der Polradpendelungen des Generators sind.

Der Strom in den Gleichrichterdioden der Haupterregermaschine (s. Bild 4.14) steigt direkt nach der Fehlsynchronisierung vom Leerlaufbetriebswert auf das ca. 5-fache (0.06 kA) an.
Die Ankerspannung der Haupterregermaschine bricht sehr stark ein, der Ankerstrom wächst dagegen auf ca. 2 p.u bei diesem Störfall.

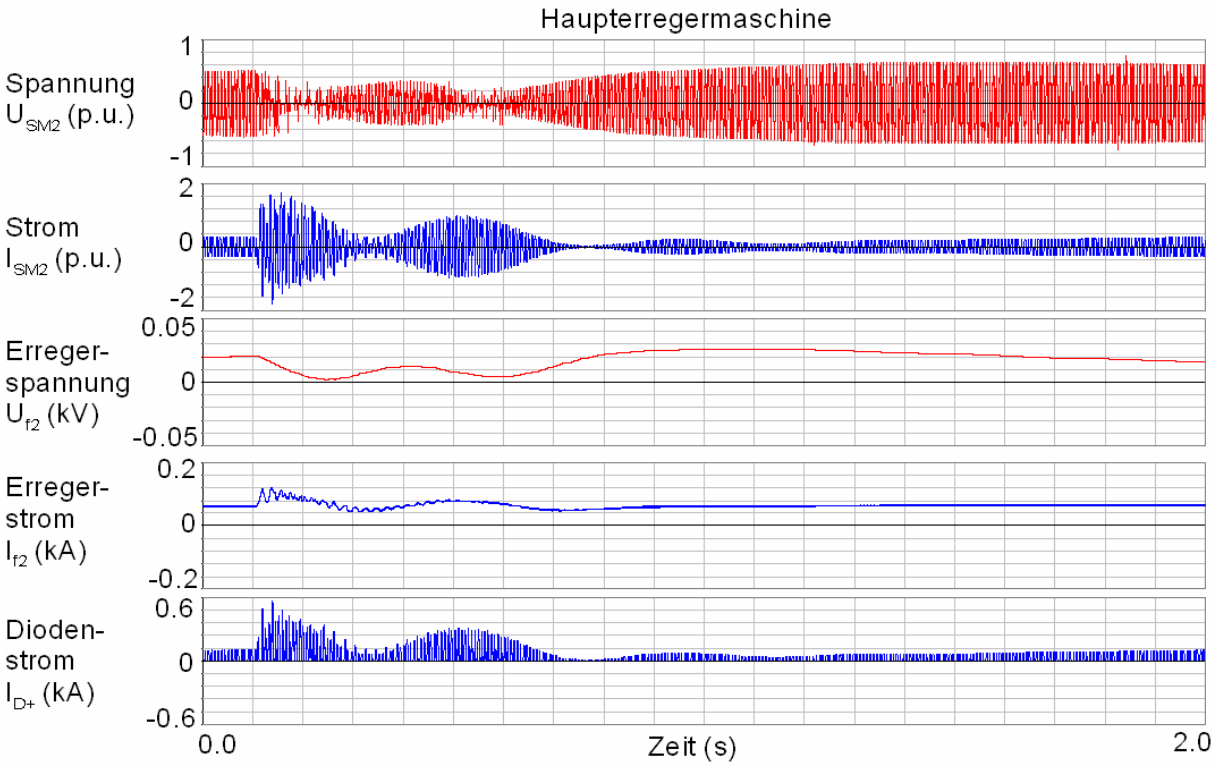


Bild 4.14: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine bei Fehlsynchronisierung mit einem Fehlwinkel von 120°

In der Hilfserregermaschine werden die hohen Ausgleichsvorgänge durch diesen Störfall weniger stark als im Generator und Haupterreger wahrgenommen. Hierbei erreichen der Strom in der Hilfserregermaschine und der Thyristorstrom unmittelbar nach dem Fehlereintritt das 2-fache des Stroms im Leerlaufbetrieb (s. Bild 4.15).
Beim Stromverlauf des Generators (s. Bild 4.13) kann ein deutlicher Unterschied dieses Störfalls im Vergleich zum Generatorklemmenkurzschluss beobachtet werden. Hier wird der Stromverlauf nach dem Störfall von niederfrequenten Polradschwingungen begleitet.

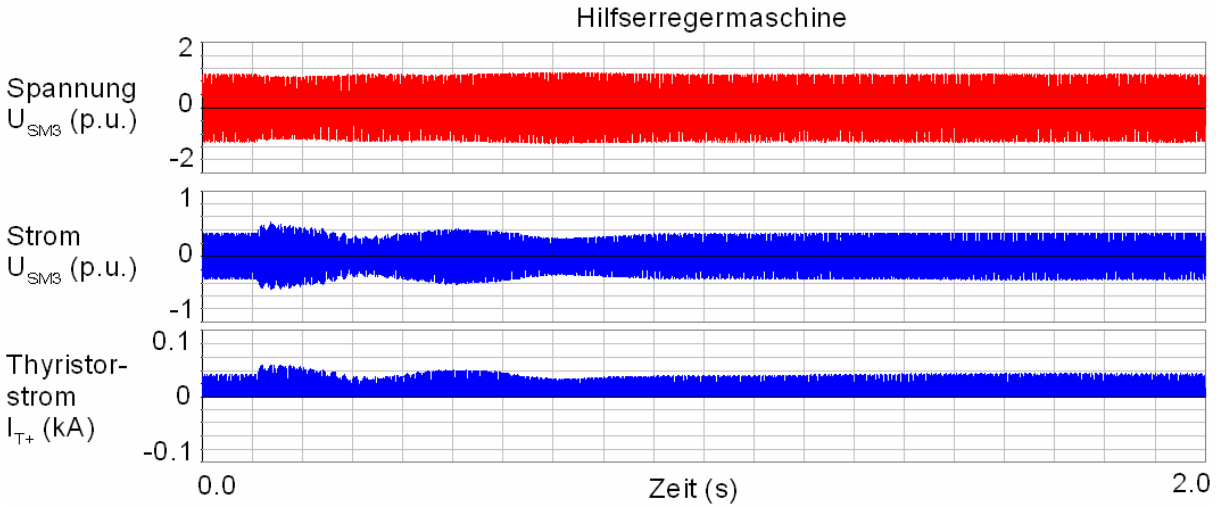


Bild 4.15: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine bei Fehlsynchronisierung mit einem Fehlwinkel von 120°

Die auftretende Fehlsynchronisierung kann durch den veränderten Polradwinkel des Generators verdeutlicht werden, wie das Bild 4.16 zeigt.

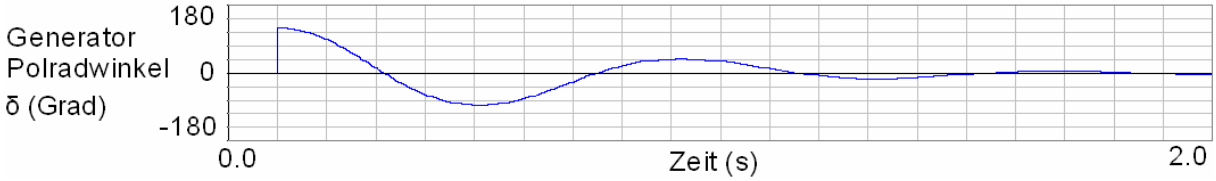


Bild 4.16: Generatorpolradwinkel bei Fehlsynchronisierung mit Fehlwinkel von 120°

Ähnliche Belastungsarten ergeben sich für den Generator bei der Zuschaltung von Teilnetzen (Leitungen in das ursprüngliche Netz). Allerdings ist der hier auftretende Fehlwinkel sehr klein. Er liegt zwischen 5° und 10°, sodass dieser Vorgang als normale Betriebsoperation betrachtet werden kann.

Aus diesem Grund wird hier auf die Darlegung der berechneten Zeitfunktionsverläufe für eine Fehlsynchronisierung bei kleinem Fehlwinkel verzichtet. Zur Vervollständigung der Untersuchung werden jedoch für diesen Fall die Beträge der Spannungen und Ströme der drei Maschinen bei vergleichender Betrachtung aller untersuchten Störfälle ausgewertet (s. Tabellen 5.1 bis 5.3 im Kapitel 5).

4.6.3 Dreipolige Netzkurzschlüsse

Der dreipolige Fehler auf der Netzseite in Kraftwerksnähe gehört zu den schwersten Störfällen im System Netz-Turbosatz, deshalb ist es erforderlich, seine Auswirkung auf die Erregereinrichtung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird ein System gemäß Bild 4.17 betrachtet.

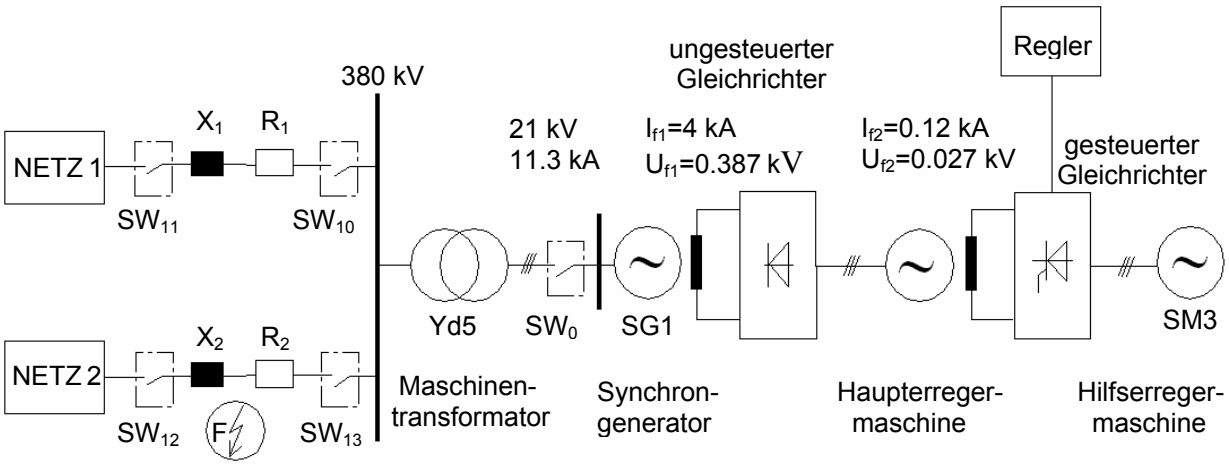


Bild 4.17: Drei-Maschinen-System am Netz

Hierbei speist der Generator über einen Maschinentransformator in zwei starke Teilnetze ein. Der dreipolige Kurzschluss wird auf den Abgang mit Netz 2 in direkter Nähe des Kraftwerks eingeleitet. Anschließend wird der Fehler durch die Schalter SW_{12} und SW_{13} weggeschaltet.

Die relativ lange Fehlerklärungszeit (FKZ) wurde so gewählt, dass der Turbosatz seine Stabilität trotz der massiven Pendelungen nach der Abschaltung des Fehlers nicht verliert.

Das zugrunde liegende Netz und die Transformatordaten sind im Anhang aufgeführt. Die Ergebnisse der Simulation sind für eine Fehlerklärungszeit von 200 ms in den Abbildungen 4.18 bis 4.20 dargestellt.

Nach dem Fehlereintritt steigt der Generatorstrom auf das 6-fache des Nennstroms an, während die Generatorspannung ungefähr auf das 0.4-fache einbricht (s. Bild 4.18).

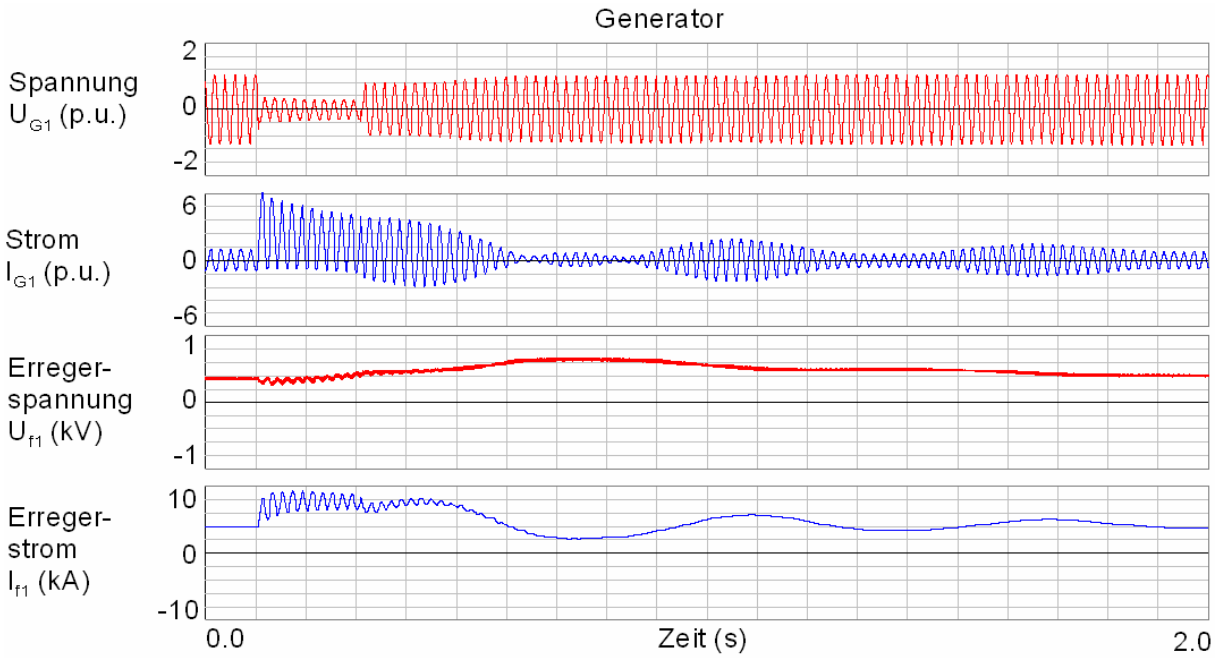


Bild 4.18: Spannungs- und Stromverläufe im Generator bei einer dreipoligen Kurzschlussabschaltung auf der Oberspannungsseite

Der Regler ist bestrebt, die Generatorspannung zu halten, daher erhöht er die Spannung an den Außenpolen über den gesteuerten Gleichrichter. Dadurch steigt die Spannung der Haupterregermaschine nach etwa 500 ms auf das ca. 1.5-fache an (s. Bild 4.19).

Der Kurzschluss pflanzt sich vom Generator über die Haupterregermaschine bis zur Hilfserregermaschine fort. Die Ausgleichsvorgänge sind dann jedoch im Hinblick auf Ströme und Spannungen etwas moderater, weil der Kurzschluss auf der Oberspannungsseite eingeleitet wurde und die Ströme im Generator deutlich abgesunken sind. Ähnlich wie bei der Fehlsynchronisierung kommt es zu starken Polradpendelungen, die jedoch nach ca. 2 Sekunden weit gehend gedämpft werden.

Nach der Wegschaltung der fehlerbehafteten Leitung kehrt der Generator allmählich in seinen stabilen Zustand zurück. Der maximale Erregerstrom (s. Bild 4.18) erreicht bei diesem Störfall den 2.5-fachen Nennstrom (10 kA).

Der Strom in den Gleichrichterdioden der Haupterregermaschine (s. Bild 4.19) steigt ebenfalls vom Nennwert (0.025 kA) auf das 2.4-fache (0.06 kA) an, während der Thyristorstrom (s. Bild 4.20) innerhalb von 200 ms das ca. 2-fache des Nennstroms erreicht.

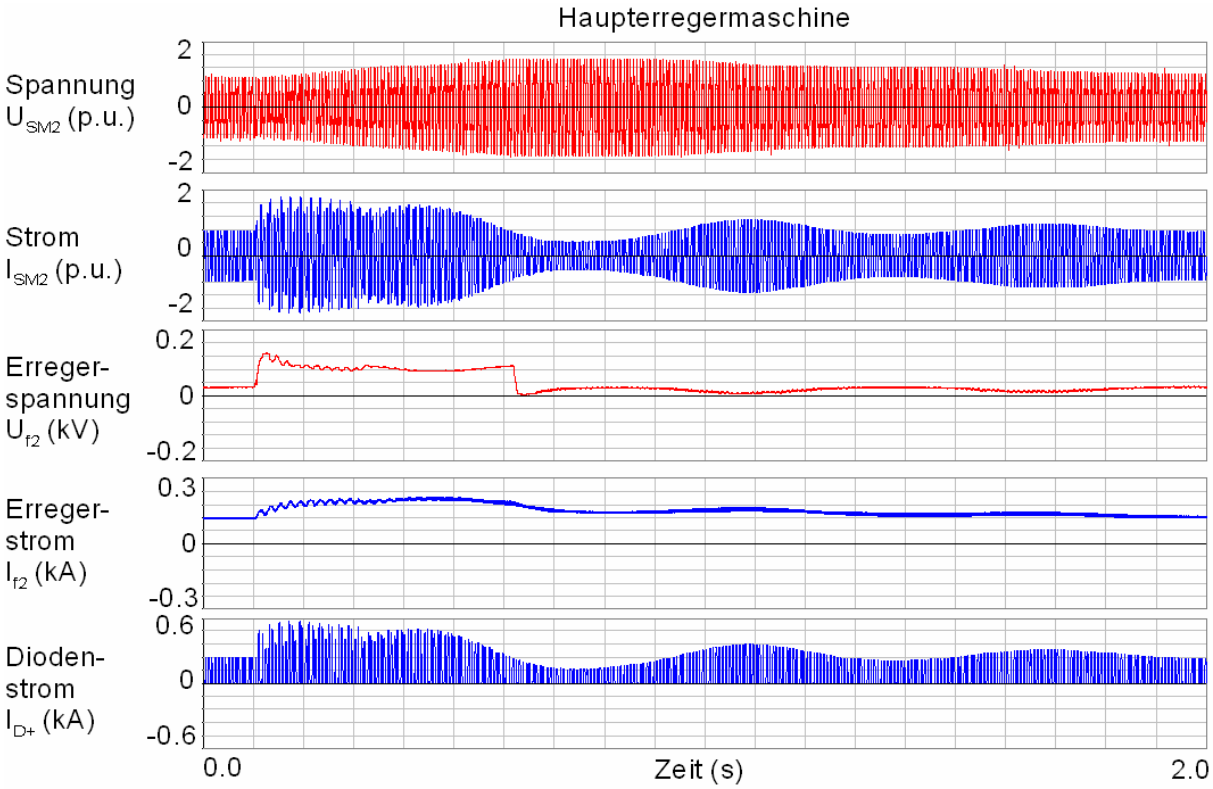


Bild 4.19: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine bei einer dreipoligen Kurzschlussabschaltung auf der Oberspannungsseite

Auf der Hilfserregermaschinenseite beträgt die Spannung ungefähr 300 ms nach dem Störfalleintritt ca. 0.85 p.u., und der Strom verdoppelt sich beinahe.

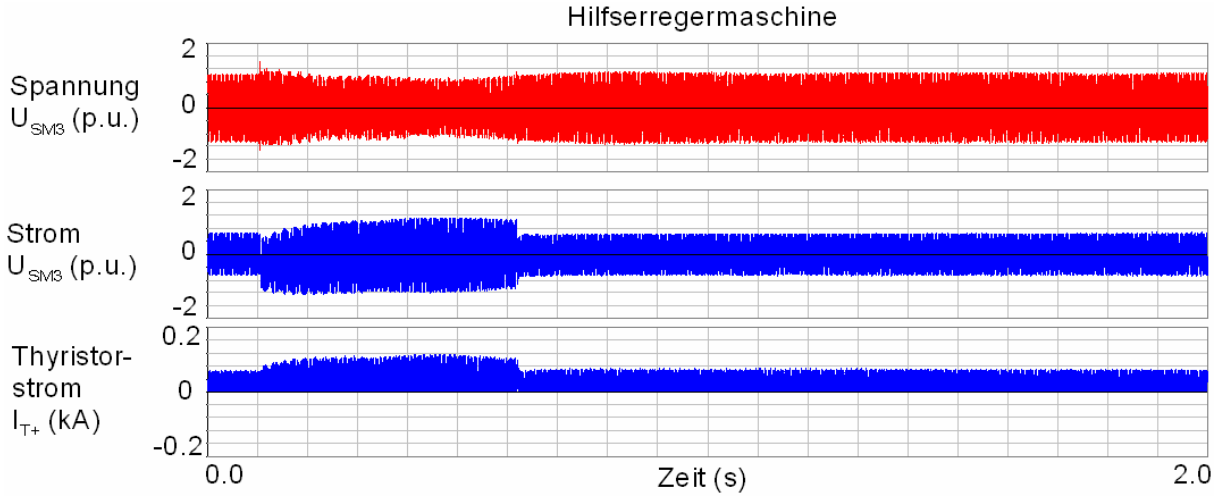


Bild 4.20: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine bei einer dreipoligen Kurzschlussabschaltung auf der Oberspannungsseite

In der vorstehenden Betrachtung wurden nur die ausgewählten Beispiele präsentiert, bei denen man davon ausgehen konnte, dass sie zu den schwersten äußeren Störfällen in Bezug auf die Beanspruchung der Erregereinrichtung zählen.
Vollständigkeitshalber wurden im Rahmen dieser Arbeit weitere Schalthandlungen und Störfälle untersucht, um ein breites Spektrum der Belastung der einzelnen Komponenten zu erhalten. Hierzu zählen:

- Fehlsynchronisierung bei 180°
- Netzzuschaltung mit einem Fehlwinkel von 15°
- Asynchroner Lauf nach dreipoligem Fehler
- 1-poliger Netzkurzschluss mit nicht erfolgreicher Kurzunterbrechung
- 2-polige Kurzschlussabschaltung in Kraftwerksnähe.

Da der Charakter der berechneten Zeitfunktionen weit gehend mit den vorstehenden Verläufen übereinstimmt, wurde hier auf die Darstellung der entsprechenden Plotbilder verzichtet. Um dennoch ein vollständiges Bild über die mögliche Belastung der Erregereinrichtung zu gewinnen, wurden für diese Fälle die Beträge der Spannungen und Ströme ausgewertet. Sie sind in den Tabellen 5.1 bis 5.3 im Kapitel 5 aufgeführt.

4.7 Störfälle innerhalb der Erregereinrichtung

Nachdem die umfassenden Simulationen für das Drei-Maschinen-System durchgeführt wurden, eröffnet sich dem Berechner die Möglichkeit, die verschiedenartigen Fehler innerhalb der Erregereinrichtung zu analysieren. Daraufhin können diese mit den auf der Klemmen- bzw. Netzseite auftretenden Belastungen verglichen werden. Um die Zahl der Fälle zu reduzieren, beschränkt man sich bei der Festlegung der zu untersuchenden Fehlerarten auf Erfahrungen mit Schäden in diesem Bereich. Literaturstudien und der Erfahrungsaustausch mit Experten ergeben, dass folgende Fehler für Dimensionierung und Schadensklärung von Interesse sind:

- Unterbrechung des Stroms in der Generatorerregerwicklung

- Ausfall großer Anzahl von Dioden im rotierenden Gleichrichter
- Kurzschluss im Anker der Haupterregermaschine.

Diese Fälle werden einzeln in den folgenden Abschnitten behandelt.

4.7.1 Unterbrechung des Stroms in der Generatorerregerwicklung

Dieser Fehler kommt relativ häufig vor und wird durch Brüche der Rotorstäbe, meistens in der Lötverbindung im Rotorwickelkopf des Generators, verursacht [26]. Durch den anstehenden Lichtbogen wird die Isolation stark beschädigt, sodass sich der Fehler auf andere Spulen ausweiten kann. Bei bürstenloser Erregerausführung besteht keine Möglichkeit, den Erregerstrom direkt zu messen, sodass der Fehler nicht genau lokalisiert werden kann [51].
Ein Schaden im Rotorwickelkopf eines 40MVA-Generators ist im Bild 4.21 erkennbar.

Bild 4.21: Gebrochene Polwicklung im Wickelkopf

Für die Simulation wird angenommen, dass der Stabbruch im Nennbetrieb des Generators eingetreten ist und dadurch die sofortige Unterbrechung des Erregerstromes stattfindet. Die Ergebnisse der Simulation sind in den Bildern 4.22 bis 4.24 zu sehen.

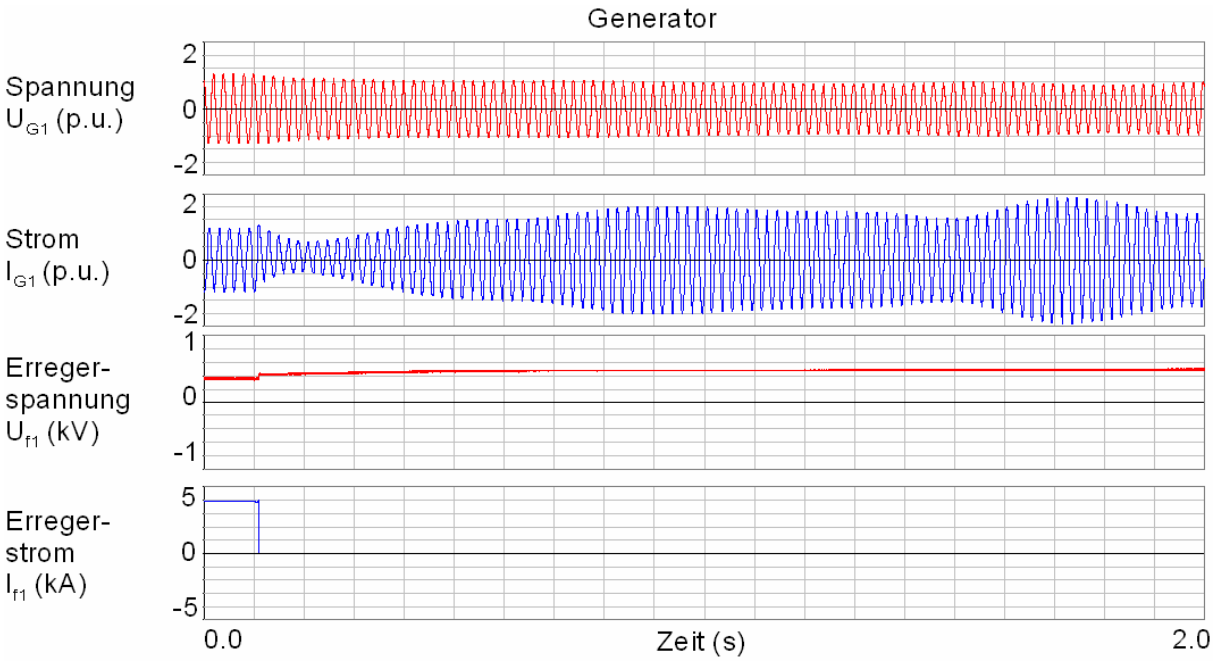


Bild 4.22: Spannungs- und Stromverläufe im Generator bei der Unterbrechung der Generatorerregerwicklung

Obwohl die Gleichstromversorgung des Generators unterbrochen wurde, wird der Rotor weiter von der Turbine angetrieben. Statt wie ursprünglich Blindleistung ins Netz einzuspeisen, nimmt der Generator jedoch Blindleistung aus dem Netz auf. Die Generatorspannung sinkt dabei auf ca. 0.7 p.u. (s. Bild 4.22).

Die Leistung des Generators ist nun deutlich kleiner als die noch nicht herunter geregelte Turbinenleistung, sodass der Generator in den asynchronen Lauf übergeht. Dies äußert sich in Pendelungen des Generatorstroms mit einer Amplitude vom 2-fachen des Nennstroms.

Nach ca. 1.5 Sekunden erkennt der Untererregerschutz den Ausfall der Erregung und trennt ihn vom Netz. Hierbei steigt die Spannung der Haupterregermaschine geringfügig an. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Unterbrechung der Erregerwicklung in diesem Fall eine fehlende Last bei der Haupterregermaschine bedeutet. Der Ausfall des Stroms in der Ankerwicklung ist ebenfalls im Bild 4.23 zu erkennen.

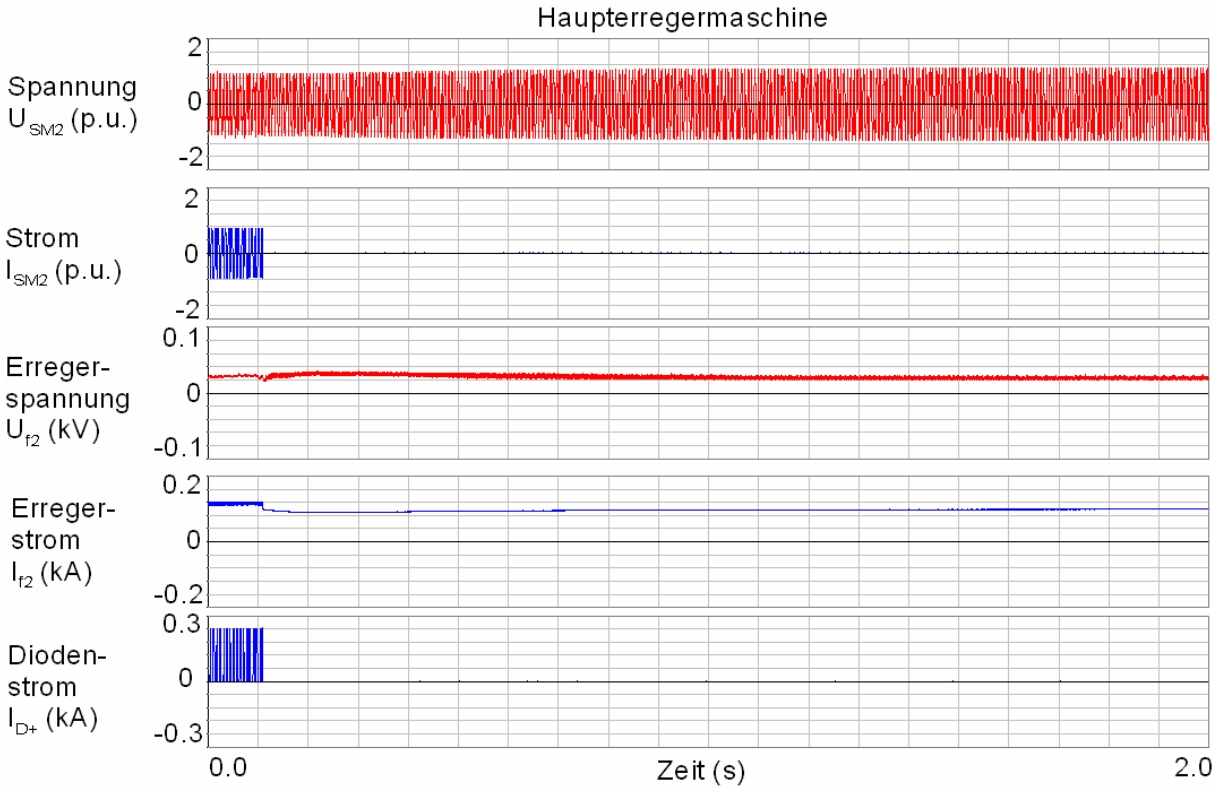


Bild 4.23: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine bei der Unterbrechung der Generatorerregerwicklung

Die Spannungs- und Stromverläufe für die Hilfserregermaschine sind im Bild 4.24 dargestellt. Hier ist durch die Unterbrechung des Generatorerregerkreises keine große Änderung bei den berechneten Größen zu erwarten.

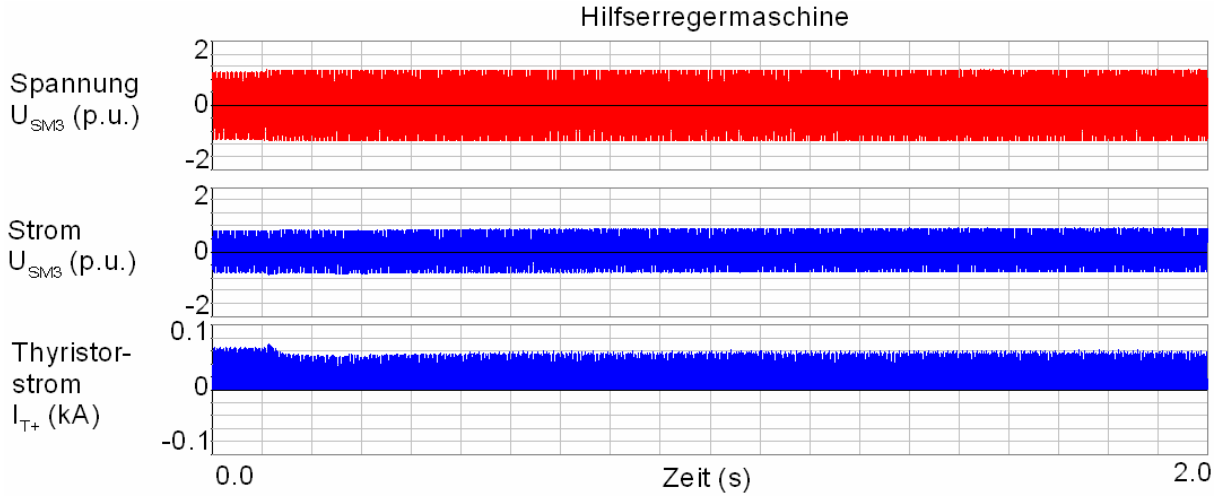


Bild 4.24: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine bei der Unterbrechung der Generatorerregerwicklung

4.7.2 Ausfall einer großen Anzahl von Dioden im rotierenden Gleichrichter

Die rotierende Gleichrichterbrücke ist nach Herstellerangaben so dimensioniert, dass auch nach dem Ausfall von 20% der parallel geschalteten Siliziumdioden eines Brückenzweiges noch voller Nennbetrieb einschließlich 1.5-facher Übererregung möglich ist. Erst der Wegfall einer großen Zahl von Siliziumdioden führt zur Beeinträchtigung des Generatorbetriebs und schließlich zur Abschaltung vom Netz.
Im folgenden Abschnitt wird der Ausfall der Dioden im gesamten Brückenzweig der Phase S simuliert, um die Auswirkung auf die Erregereinrichtung zu erfassen. Der Ausfall der Dioden führt zum Auslösen der nachgeschalteten Sicherungen, wodurch der Strom in der betroffenen Ankerwicklungsphase unterbrochen wird. Das Bild 4.25 zeigt die Folgen dieses Störfalls im Generator.

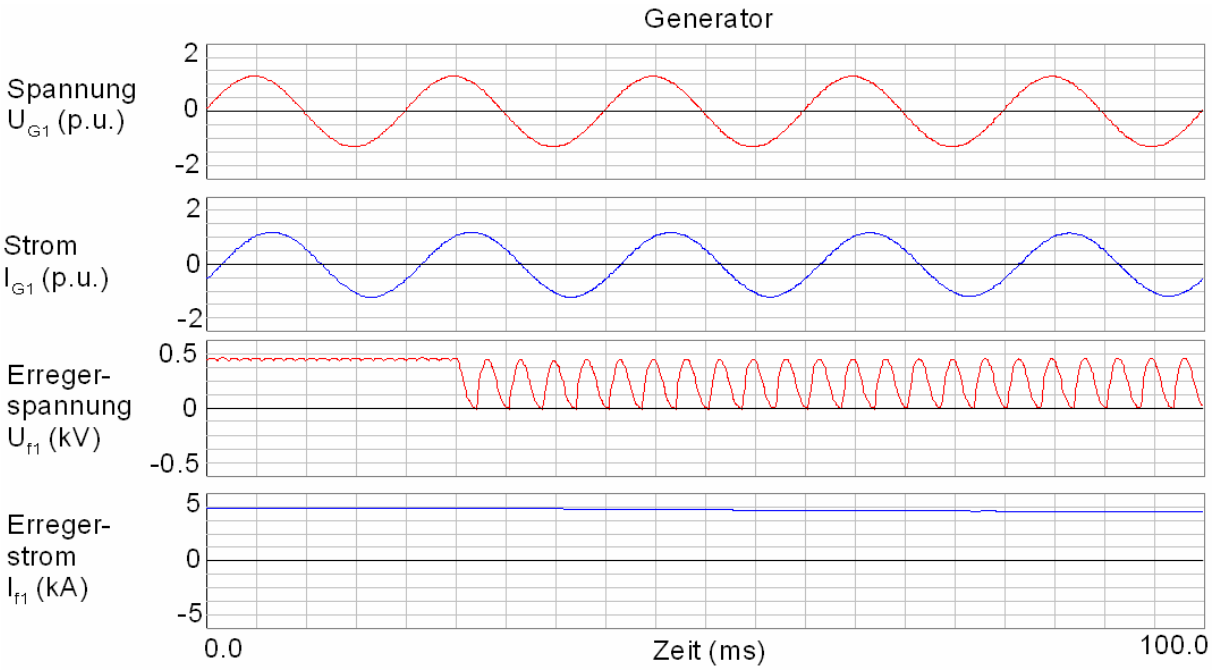


Bild 4.25: Spannungs- und Stromverläufe im Generator beim Diodenausfall

Aufgrund des Fehlers bricht die Erregerspannung des Generators auf einen Mittelwert von ca. 64% ein, der durch hohe Wechselanteile mit doppelter Frequenz des Ankers der Haupterregermaschine (300 Hz) überlagert wird. Der Erregerstrom des Generators nimmt infolgedessen langsam ab, bedingt jedoch durch die hohe Induktivität des Erregerkreises, sind die Wechselanteile relativ gering.

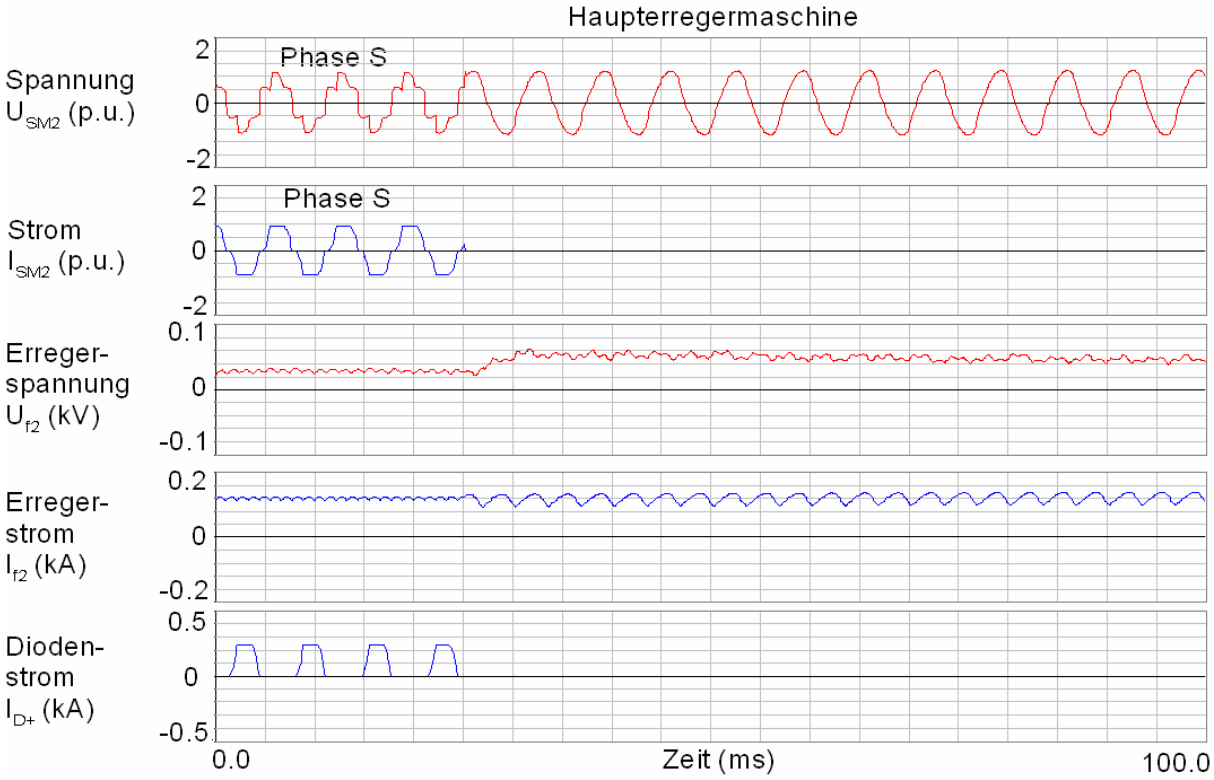


Bild 4.26: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine beim Diodenausfall

In der Haupterregermaschine bricht der Strom in der S-Phase der Ankerwicklung und im zugehörigen Brückenzweig völlig zusammen (s. Bild 4.26). Die übrigen gesunden Phasen reagieren auf die Störung mit starken Verzerrungen (s. Bild 4.27). Außenpolspannung und -strom werden hier von stark wachsenden Wechselanteilen überlagert.

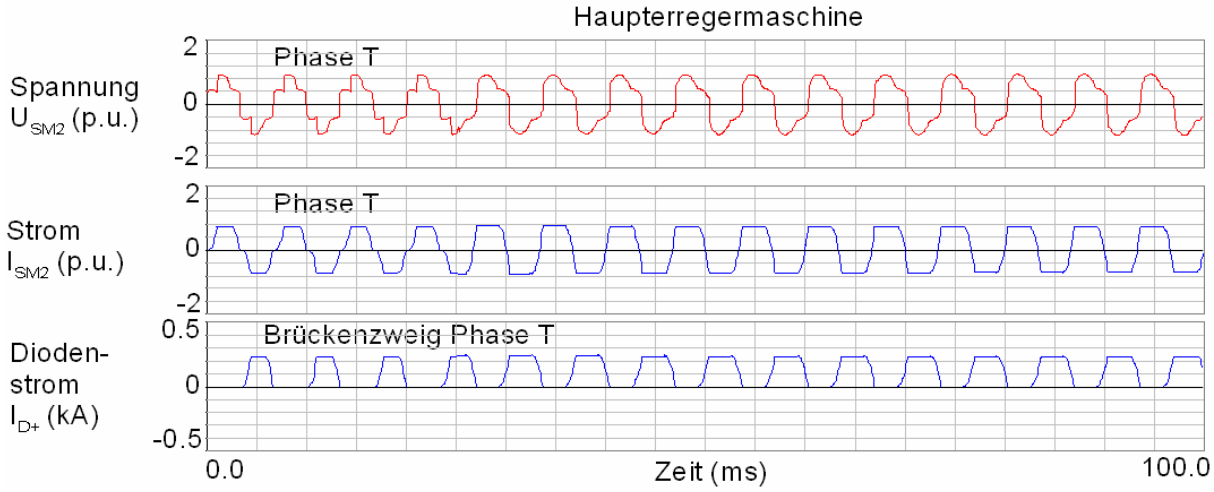


Bild 4.27: Spannungs- und Stromverläufe in der gesunden Phase in der Haupterregermaschine beim Diodenausfall

Im Bereich der Hilfserregermaschine macht sich der Ausfall des Diodenzweigs der Phase S kaum bemerkbar. Es sind kleine Schwingungen im Ständerstrom der Maschine und in den einzelnen Thyristoren zu sehen, wie im Bild 4.28 dargestellt.

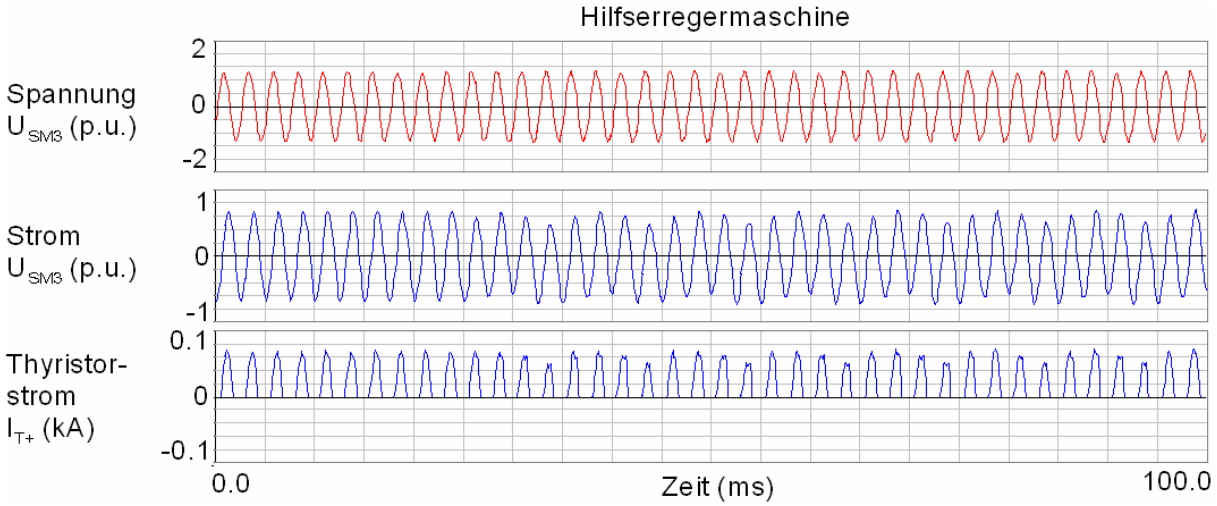


Bild 4.28: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine beim Diodenausfall

Bemerkenswert bei diesem Störfall ist, dass die Änderungen bei Generatorspannung und -strom direkt nach dem Eintritt der Störung relativ gering sind. Betrachtet man alle errechneten Größen, so fällt auf, dass klar erkennbare Änderungen der Verläufe des Erregerstroms und der Erregerspannung der Außenpolmaschine auftreten. Dort sind im Fehlerfall die Wechselanteile mit doppelter Maschinenfrequenz sichtbar. Da dieser Kreis stationär ist, sind diese Größen auch für Messungen zugänglich.

4.7.3 Zweipoliger Kurzschluss im Anker der Haupterregermaschine

Der Kurzschluss am Ausgang der dreiphasigen Ankerwicklung der Haupterregermaschine gehört zu den schwersten Störungen innerhalb der Erregereinrichtung. Infolge der Rotation des Ankers werden die Ströme normalerweise nicht messtechnisch erfasst, sodass dieser Fehler nicht rechtzeitig geklärt werden kann [51].
Dieser Störfall kommt dank spezieller konstruktiver Maßnahmen relativ selten vor, wenn er jedoch auftritt, dann führt er zur Beschädigung der Haupterregermaschine. Für die Simulation wurde vorausgesetzt, dass im Generatornennbetrieb ein zweipoliger, satter Kurzschluss zwischen den Phasen R und S der Haupterregermaschine im Bereich der Zuleitung zur ungesteuerten Gleichrichterbrücke aufgetreten ist.
Die Ergebnisse der Berechnung sind in den nachfolgenden Bildern 4.29 bis 4.32 dargelegt.

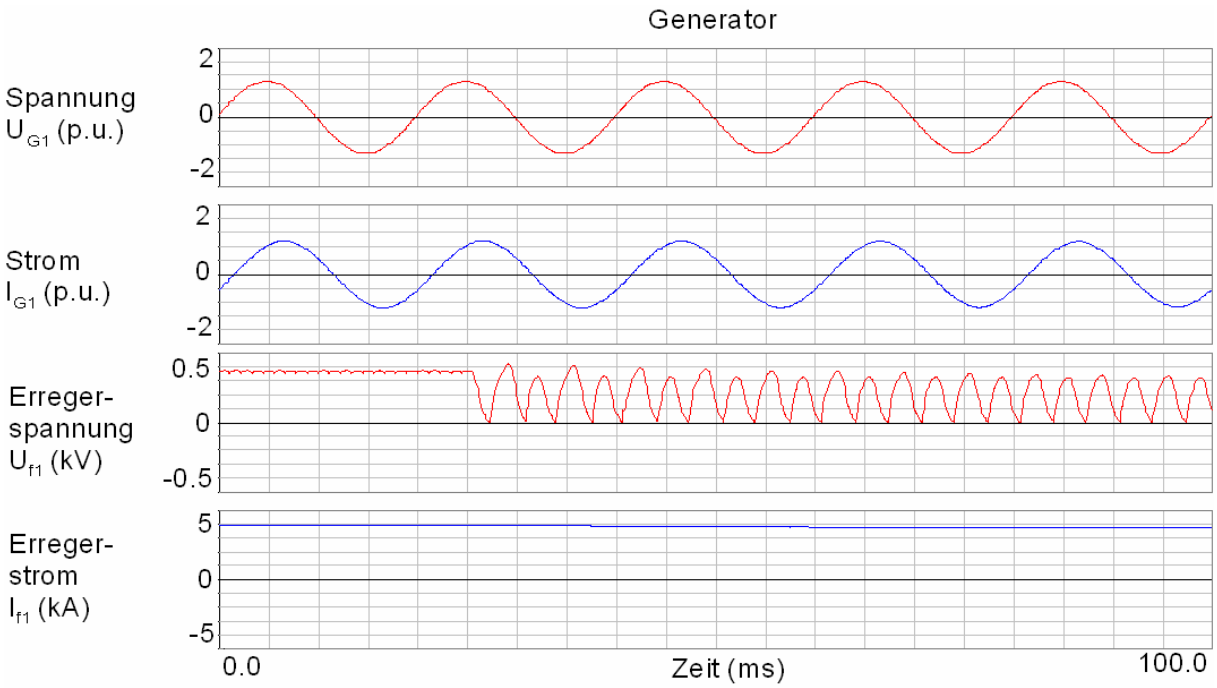


Bild 4.29: Spannungs- und Stromverläufe im Generator beim zweipoligen Kurzschluss in der Ankerwicklung der Haupterregermaschine

Nach dem zweipoligen Kurzschluss werden die zwei zugehörigen Diodenzweige nicht mehr vom Drehstromsystem versorgt, sondern von einer Wechselspannung, sodass am Ausgang der ungesteuerten Gleichrichterbrücke die Generatorerregerspannung auf einen Mittelwert von ca. 64% abnimmt. Dabei bilden sich starke Wech-

selanteile mit doppelter Frequenz des Ankers (300 Hz) aus. Der Erregerstrom nimmt nur langsam ab und passt sich schließlich nach ca. 2 bis 5 Sekunden dem neuen Mittelwert der Erregerspannung an.

Die starken Pendelungen werden überwiegend durch die große Induktivität der Rotorwicklung geglättet. Dementsprechend langsam ändert sich die Generatorspannung, die erst nach 1.5 Sekunden auf 0.95 p.u und nach ca. 3 Sekunden auf 0.90 p.u. abnimmt.

Bei genauer Betrachtung des Polradwinkels und des Generatorschlupfs ergibt sich, dass die Maschine durch die Reduktion der Erregung in den asynchronen Lauf übergeht. Die Klemmenspannungen und -ströme werden hierbei von der Stärke der Netzkurzschlussleistung beeinflusst.

Durch diesen Störfall ist die Haupterregermaschine am schwersten betroffen. Während erwartungsgemäß die stark verzerrte Ankerspannung (U_{SM2}) auf 0.4 p.u. sinkt, steigt der entsprechende, gestörte Ankerstrom (I_{SM2}) auf das ca. 6-fache des Nennwerts an (s. Bild 4.30). Ebenfalls weisen die berechneten Verläufe die üblichen 150Hz-Anteile des Ankers auf.

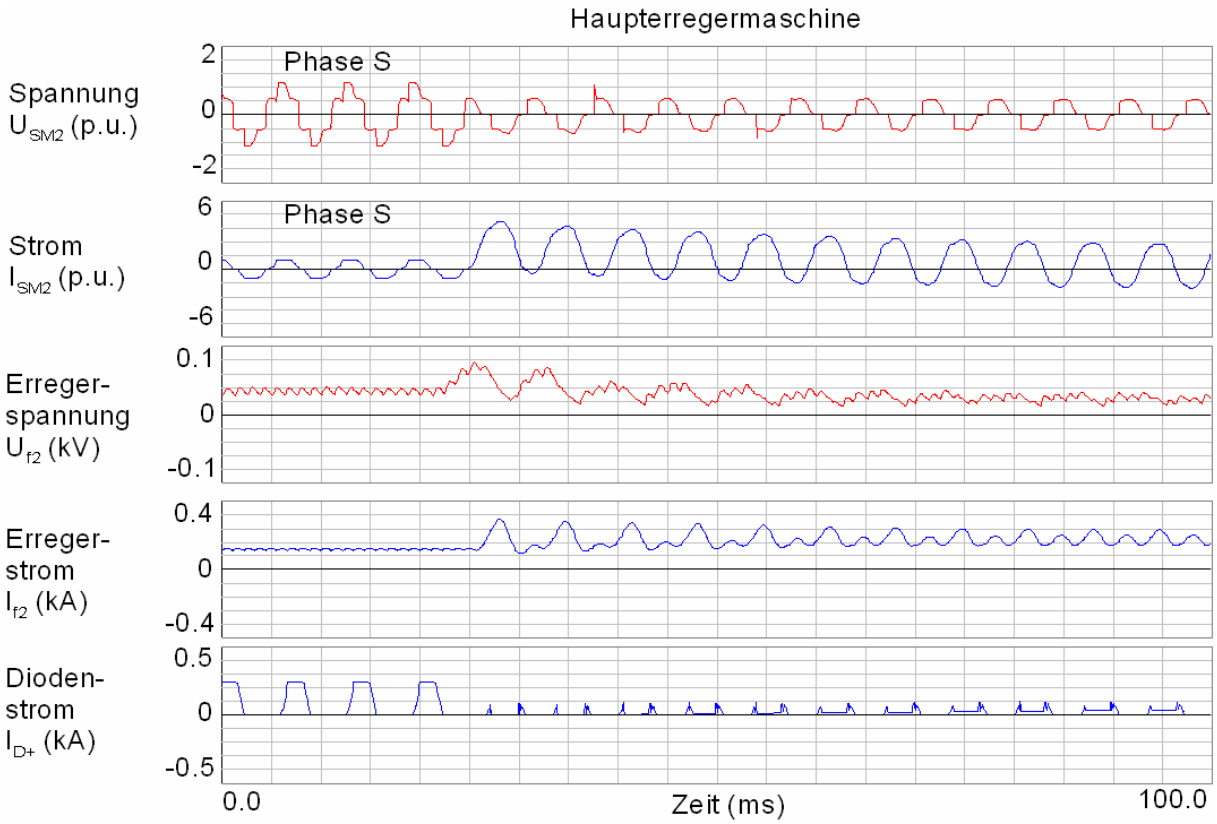


Bild 4.30: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine beim zweipoligen Kurzschluss der Ankerwicklung der Haupterregermaschine

Die Amplituden der Wechselanteile im Erregerstrom (I_{f2}) der Außenpolmaschine steigen nach dem Störfall stark an. Die ausgefallenen Diodenzweige werden noch in geringem Maß durch den Ausgang der ungesteuerten Gleichrichterbrücke versorgt, der von der gesunden Phase T der Ankerwicklung gespeist wird. Die Spannungs- und Stromverläufe in der gesunden Phase der Ankerwicklung der Haupterregermaschine sind im Bild 4.31 dargestellt.

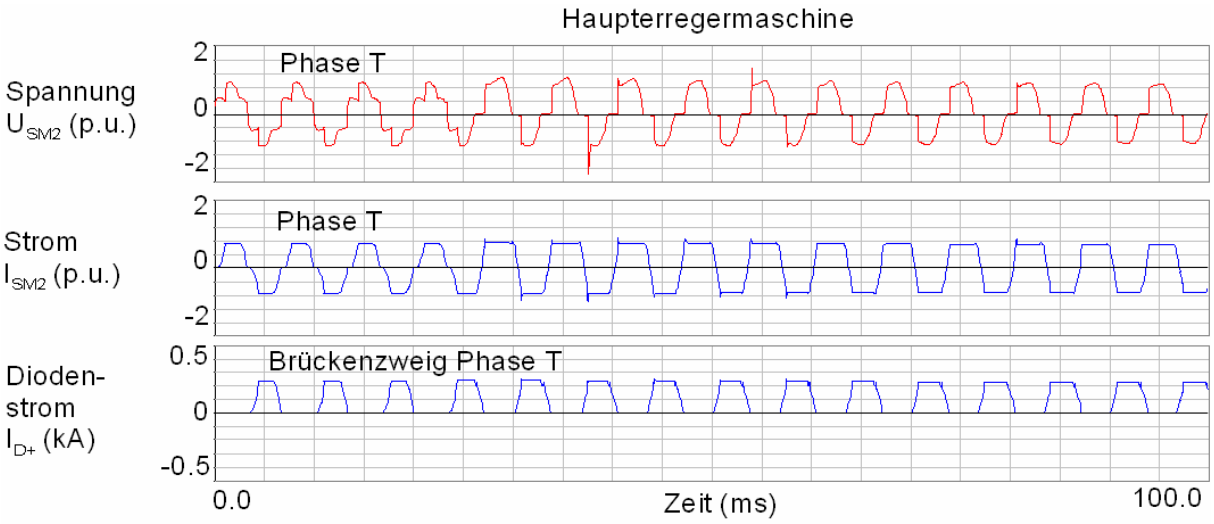


Bild 4.31: Spannungs- und Stromverläufe in der Haupterregermaschine beim zweipoligen Kurzschluss der Ankerwicklung in der gesunden Phase

Die Hilfserregermaschine wird weit gehend von der Störung in der Haupterregermaschine verschont und bleibt weiterhin in ihrem Nennbetrieb. Lediglich kleine Schwebungen und Verzerrungen sind in den Spannungs- und Stromverläufen sichtbar, wie das Bild 4.32 zeigt.

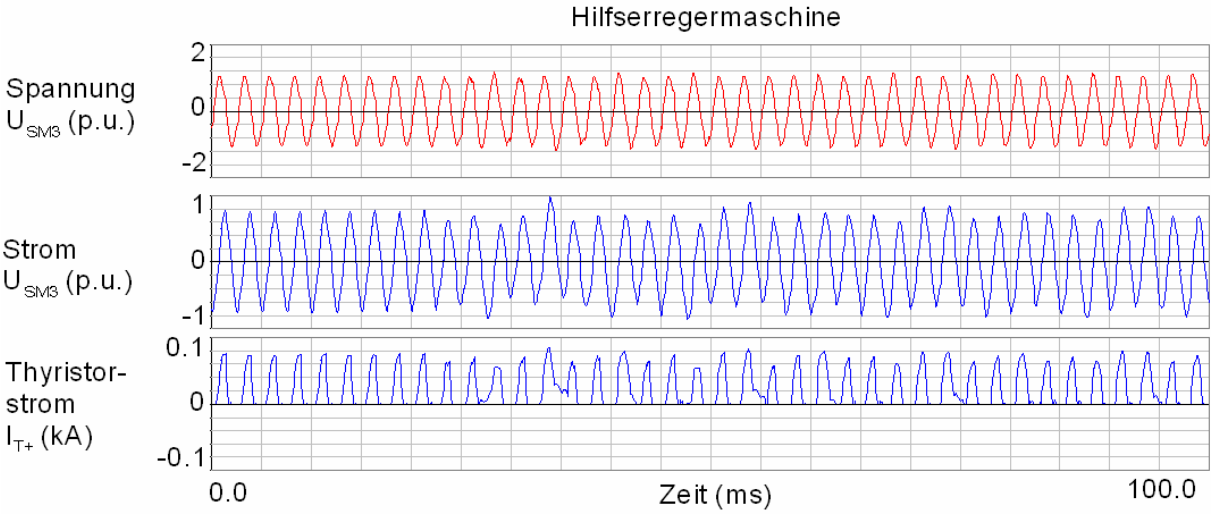


Bild 4.32: Spannungs- und Stromverläufe in der Hilfserregermaschine beim zweipoligen Kurzschluss der Ankerwicklung der Haupterregermaschine

5 Auswirkungen der untersuchten Störfälle

5.1 Vorgehensweise bei der Auswertung

Um das Störfallspektrum vollständig zu erfassen, wurden zusätzlich zu den im Kapitel 4 behandelten Fällen weitere Störungen bzw. Schalthandlungen untersucht. Hierzu gehören:

- Fehlsynchronisierung bei 180°
- Netzumschaltung beim 15° Fehlwinkel
- Asynchroner Lauf nach dreipoligem Fehler
- 1-polige Netzkurzschlussunterbrechung (1-polige KU)
- 2-polige Netzkurzschlussabschaltung
- 3-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung der Haupterregermaschine.

Die wichtigsten Ergebnisse der Simulationen werden für alle drei Maschinen und Gleichrichter miteinander verglichen. Die Auswirkung der untersuchten Störfälle auf die Erregereinrichtung wird anhand der vier folgenden, repräsentativen Größen für jede einzelne Maschine bewertet:

- Ankerspannung
- Ankerstrom
- Spannung an der Erregerwicklung
- Strom in der Erregerwicklung.

Die Ströme und Spannungen werden auf ihre Nenngrößen bezogen, um den Vergleich der Maschinen untereinander zu ermöglichen. Die Absolutwerte für die Bezugsgrößen finden sich im Abschnitt 4.4, Tabelle 4.2. Zur besseren Übersicht wird zwischen äußeren Fehlern und Fehlern innerhalb der Erregereinrichtung unterschieden.

5.2 Vergleich und Bewertung der Ergebnisse

In Übereinstimmung mit den bisherigen Erkenntnissen erfährt der Generator die größte Belastung bei äußeren Störfällen (s. Tabelle 5.1). Richtet man das Augenmerk auf die Statorwicklung, so ergeben sich die größten Ströme für den dreipoligen Klemmenkurzschluss (11 p.u.) und für die Fehlsynchronisierung (10 p.u.). Aufgrund niederfrequenter Pendelungen sind bei Fehlsynchronisierung höhere Belastungen z.B. für Stäbe, Befestigungsringe, Konsole und Wicklungsbandage zu erwarten.
Für die oben genannten Störfälle ergibt sich auch der größte Generatorerregerstrom im Bereich von 2.4 bis 3.5 p.u., wie Tabelle 5.1 zu entnehmen ist.

	Generatorkenngrößen (beim Störfall bezogen auf jeweiligen Nennbetrieb) / Untersuchte Störfälle	U_{G1}	I_{G1}	U_{f1}	I_{f1}
		Gen.-spannung	Gen.-strom	Gen.-Err.-spannung	Gen.-Err.-strom
		p.u.			
Äußere Fehler	Stoßerregung beim entfernten Netzfehler	0.5	2.2	2.0	1.8
	Generatorklemmenkurzschluss	0.0	11.0	0.0	3.5
	Fehlsynchronisierung bei 180°	0.2	10.0	0.2	3.1
	Fehlsynchronisierung bei 120°	0.5	8.0	0.5	2.4
	Netzumschaltung beim 15°-Fehlwinkel	0.98	1.6	1.05	1.17
	Asynchroner Lauf nach dreipoligem Fehler	0.4	6.0	1.7	2.8
	1-polige Netzkurzschlussunterbrechung	0.7	4.0	1.5	1.8
	2-polige Netzkurzschlussabschaltung	0.36	6.4	1.7	2.3
	3-polige Netzkurzschlussabschaltung	0.4	6.0	1.6	2.5
Innere Fehler	Unterbrechung der Generatorerregerwicklung	0.7	2.0	1.2	0.0
	Ausfall des Diodenzweigs einer Phase	0.96	0.93	0.64	0.86
	2-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung	0.93	0.95	0.64	0.69
	3-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung	0.86	1.1	0.02	0.63

Tabelle 5.1: Auswertungsergebnisse des Generators bei verschiedenen Störfällen

Die maximale Erregerspannung von 2 p.u. tritt bei der Stoßerregung auf. Sie erreicht ebenfalls einen hohen Wert von 1.7 p.u. beim asynchronen Lauf und zweipoliger Netzkurzschlussabschaltung.
Verständlicherweise tritt bei Generatorklemmenkurzschluss und Fehlsynchronisierung ein hoher Erregerstrom von 2.4 bis 3.5 p.u. auf (s. Tabelle 5.1). Da es sich nur um eine kurzzeitige Erhöhung des Stroms handelt, besteht aber keine große Gefahr für die Erregereinrichtung.
Beim einpoligen Fehler in Kraftwerksnähe und bei Netzumschaltungen ist die Belastung gering. Diese Fälle kommen jedoch relativ häufig vor, sodass dadurch im Lauf der Zeit die Lebensdauer der einzelnen Komponenten wie z.B. Wickelkopf, Welle und Gleichrichter verkürzt wird.
Im Vergleich zu den äußeren Fehlern sind die Belastungen des Generators bei den inneren Fehlern relativ gering. Die Unterbrechung der Generatorerregerwicklung muss jedoch beachtet werden, weil hier anschließend ein asynchroner Lauf des Generators folgt.
Während die maximalen bzw. minimalen Belastungen bei äußeren Generatorfehlern meistens unmittelbar nach dem Störfall auftreten, werden die stationären Endwerte bei den untersuchten inneren Fehlern erst im späteren Verlauf der Störung erreicht. Bei der Erarbeitung eines Schutzkonzepts der Erregereinrichtung muss außerdem beachtet werden, dass die inneren Fehler bei der Analyse der Klemmen des Generators unauffällig sein können und daher gar nicht oder erst viel später erkannt werden. Dies gilt insbesondere für den Ausfall des Diodenzweigs einer Phase.
Die schweren Störfälle an den Klemmen bzw. auf der Netzseite pflanzen sich über den ungesteuerten Gleichrichter bis hin zum Anker der Haupterregermaschine fort, wie aus Tabelle 5.2 hervorgeht. Es ist daher verständlich, dass die größten Anker- und Diodenströme bei den gleichen Störfällen auftreten, wie es beim Generator der Fall war. Sie erreichen bei äußeren Fehlern im Anker 1.1 bis 3.5 p.u. und in den Dioden 1.1 bis 3.3 p.u.
Bei inneren Fehlern in den Maschinen ist die Haupterregermaschine am schwersten betroffen. Die Unterbrechung in der Erregerwicklung des Generators führt zwangsweise zum Ausfall des Diodenstroms und zu einem relativ geringen Anstieg der Ankerspannung und Außenpolspannung. In der Tabelle 5.2 sind die Auswertungsergebnisse für die Haupterregermaschine eingetragen.

	Haupterregerkenngrößen (beim Störfall bezogen auf jeweiligen Nennbetrieb) / Untersuchte Störfälle		U_{SM2} Anker-spannung	I_{SM2} Anker-strom	U_{f2} Außenpol-spannung	I_{f2} Außenpol-strom	I_{D+} Dioden-stromPhase
			p.u.				
Äußere Fehler	Stoßerregung beim entfernten Netzfehler		1.7	1.8	4.0	1.8	1.6
	Generatorklemmenkurzschluss		0.0	3.5	0.0	1.5	3.3
	Fehlsynchronisierung bei 180°		0.01	3.1	1.1	1.1	2.4
	Fehlsynchronisierung bei 120°		0.2	2.4	1.1	1.1	2.3
	Netzumschaltung beim 15°-Fehlwinkel		1.0	1.1	0.98	1.0	1.1
	Asynchroner Lauf nach dreipoligem Fehler		1.5	2.8	2.3	3.0	2.8
	1-polige Netzkurzschlussunterbrechung		1.5	1.8	2.7	1.5	1.7
	2-polige Netzkurzschlussabschaltung		1.6	2.3	2.5	1.7	2.2
	3-polige Netzkurzschlussabschaltung		1.5	2.5	2.2	1.8	2.2
Innere Fehler	Unterbrechung der Generatorerregerwicklung		1.2	0.0	1.1	0.8	0.0
	Ausfall des Diodenzweigs	gestörte Ankerphase S	1.3	0.0	1.3	1.05	0.0
		gesunde Ankerphase T	1.3	0.75	-	-	0.75
	2-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung	gestörte Ankerphase S	0.35	4.2	1.2	2.3	0.2
		gesunde Ankerphase T	0.65	0.67	-	-	0.7
	3-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung		0.0	6.5	1.3	2.5	0.05

Tabelle 5.2: Auswertungsergebnisse des Haupterregers bei verschiedenen Störfällen

Beim Ausfall eines Diodenzweigs in einer Phase bricht der Strom in der gestörten Phase der Ankerwicklung völlig zusammen. Die Ankerspannung steigt allerdings durch die Auferregung in den gesunden Phasen aufgrund der Absenkung der Generatorspannung nach mehreren Sekunden auf das 1.3-fache an.

Bei Kurzschlüssen in den Ankerwicklungen fließen hohe Ströme vom 4.4 bis 6.5-fachen des Ankernennstroms in den gestörten Phasen. Die Spannung sinkt in der Ankerwicklung bei zweipoligem Kurzschluss in der gestörten Phase auf das 0.35-fache und in der gesunden Phase auf das 0.65-fache nach mehreren Sekunden ab. Der schwerste Störfall für die Haupterregermaschine ist der dreipolige Kurzschluss der Ankerwicklungen, bei dem der Ankerstrom das 6.5-fache erreicht.

Der Außenpolstrom der Haupterregermaschine ist bei Kurzschlüssen im Anker ebenfalls hoch und beträgt das 2.5-fache. Das Verhalten bei zweipoligem Kurzschluss im Anker ist ähnlich, allerdings beträgt der Ankerstrom maximal 4.2 p.u.
Anders als die Haupterregermaschine bleibt die Hilfserregermaschine weit gehend von Störungen in Generator und Haupterregermaschine verschont (s. Tabelle 5.3). Hierzu wird der Generator beim Klemmenkurzschluss bereits nach ca. 60 ms entregt, sodass die Ströme und Spannungen sehr schnell abnehmen. Die erhöhte Belastung ergibt sich bei netzseitigen Fehlern, durch welche die Stoßerregung eingeleitet wird. Hier liegen die Ströme in der Hilfserregermaschine zwischen 1.7 und 2.1 p.u. Entsprechend erreicht der Thyristorstrom das1.8 bis 2.1-fache seines Nennwerts.

	Hilfserregerkenngrößen (beim Störfall bezogen auf jeweiligen Nennbetrieb) / Untersuchte Störfälle	U_{SM3}	I_{SM3}	I_{T+}
		Hilfserr.-maschinen-spannung	Hilfserr.-maschinen-strom	Thyristor-strom Phase T
		p.u.		
Äußere Fehler	Stoßerregung beim entfernten Netzfehler	0.85	1.8	1.8
	Generatorklemmenkurzschluss	1.2	0.0	0.0
	Fehlsynchronisierung bei 180°	0.94	0.73	0.72
	Fehlsynchronisierung bei 120°	0.95	0.7	0.7
	Netzumschaltung beim 15°-Fehlwinkel	1.0	1.0	1.0
	Asynchroner Lauf nach dreipoligem Fehler	0.8	2.1	2.2
	1-polige Netzkurzschlussunterbrechung	0.95	1.7	1.8
	2-polige Netzkurzschlussabschaltung	0.85	2.0	2.0
	3-polige Netzkurzschlussabschaltung	0.85	2.0	2.1
Innere Fehler	Unterbrechung der Generatorerregerwicklung	1.1	0.82	0.8
	Ausfall des Diodenzweigs einer Phase	1.0	1.07	1.05
	2-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung	0.97	1.2	1.1
	3-poliger Kurzschluss in der Ankerwicklung	1.0	1.1	1.1

Tabelle 5.3: Auswertungsergebnisse des Hilfserregers bei verschiedenen Störfällen

Die inneren Fehler, die für diese Untersuchung im Bereich der Haupterregermaschine (Verbindungsschnittstelle zum Generator) angenommen wurden, wirken sich nur geringfügig auf die Spannungen und Ströme innerhalb der Hilfserregermaschine aus.

6 Schutz des Drei-Maschinen-Systems

6.1 Eigenschaften der Schutzeinrichtungen

Die untersuchten inneren und äußeren Störfälle können im Generator und Erregersystem hohe Ströme und Spannungen verursachen, die zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden führen können. Daher sind die Schutzeinrichtungen ein unverzichtbarer Teil der elektrischen Anlagen. Sie werden durch Mikrocomputersysteme mit intelligenten Programmen versehen, sodass gleichzeitig eine Vielzahl von Kriterien vor der Anregung bzw. Auslösung des Schutzes abgearbeitet werden muss. Zu den wichtigsten Eigenschaften und Aufgaben idealer Schutzeinrichtungen gehören:

- Ständige Abfragen von Grenzwerten und Zeitabläufen der Messgrößen
- Datenverwaltung und -speicherung im Echtzeitbereich
- Filterung und Dämpfung der unerwünschten Störsignale in Messgrößen
- Übersichtliche Fehlermeldungen und Systemdiagnostik
- Steuerung von Signalen für die logischen Funktionen
- Überwachung der Anregebedingungen für die einzelnen Schutzfunktionen
- Entscheidung über die Schutzauslösung.

In Kraftwerken kommen zum Schutz der Turbogeneratoren insgesamt mehr als 30 verschiedene Schutzarten zum Einsatz, die meistens zur Erfassung der äußeren Fehler dienen. Sie werden als multifunktionale Schutzanlagen von verschiedenen Herstellern produziert und in Kraftwerken installiert.

6.2 Wichtige Schutzarten

Die wichtigsten elementaren Kommandos und Instruktionen der idealen Schutzanlagen werden nach der Verarbeitung vieler Anregefunktionen und Schutzkriterien ausgelöst, die üblicherweise von den gemessenen komplexen Spannungen und Strö-

men abgeleitet werden. Dabei werden die Beträge der Messgrößen ausgewertet. Die wesentlichen Schutzarten, die durch in dieser Arbeit behandelte innere bzw. äußere Fehler angeregt bzw. ausgelöst werden und für Synchronmaschinen sowie ihr Erregersystem lebenswichtig sind, sind nachfolgend charakterisiert:

a) Differenzialschutz

Durch netzseitige Kurzschlüsse oder innere Fehler ergeben sich in der Regel hohe Ausgleichsströme. Diese Ströme treten meistens kurzzeitig auf und betragen das Mehrfache des Nennwerts der Anlagen. Daher wird der Differenzialschutz ab einigen MVA als Hauptschutz gegen die Auswirkung von Kurzschlüssen in der Ständerwicklung von Synchrongeneratoren angewendet [60].
Der Differenzialschutz beruht auf einem Stromvergleich und wird deshalb auch Stromvergleichsschutz genannt. Diese Schutzart kann sowohl zur Erfassung der äußeren als auch der inneren Fehler des Turbogenerators eingesetzt werden. Das Wirkungsprinzip des Schutzes ist im Bild 6.1 schematisch dargestellt.

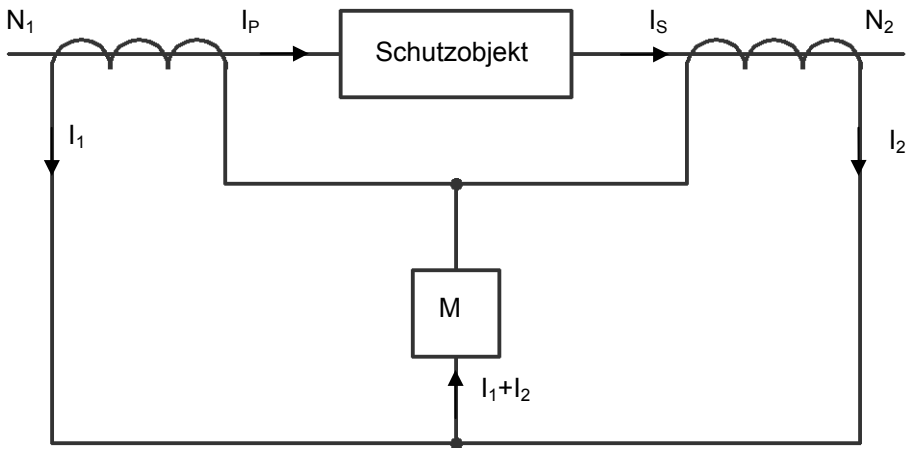


Bild 6.1: Ersatzschema des Differenzialschutzes

Werden die Sekundärwicklungen der Stromwandler N1 und N2 zu einem geschlossenen Stromkreis verbunden und wird in die Querverbindung ein Messglied M eingefügt, so bildet sich in diesem die Stromdifferenz ab. Im ungestörten Betriebszustand fließt durch das Messglied kein Strom.

Bei einem Fehler im Schutzobjekt fließen primärseitig die Ströme I_P und I_S. Die sekundärseitigen Ströme I_1 bzw. I_2 fließen als Stromsumme I_1+I_2 durch das Messglied M. Diese einfache Anordnung führt also bei einem Kurzschluss im Schutzbereich (Begrenzung durch die Stromwandler), in welchem ein für das Ansprechen des Messgliedes M ausreichender Fehlerstrom fließt, zuverlässig zum Funktionieren des Schutzes.
Während manche Schutzarten wegen bestimmter Kriterien erst spät ausgelöst werden, wird der Differenzialschutz mit einer kürzeren Zeitverzögerung ausgelöst. Daher ist dieser Schutz bei schwerwiegenden inneren und äußeren Fehlern sehr effizient und verhindert, dass sich der Fehler vom Generator in die Erregereinrichtung ausbreitet. Auf diese Weise wird auch die Erregereinrichtung wirkungsvoll geschützt.

b) Impedanzschutz

Der Impedanzschutz wird bei der Erfassung von Polschlüpfen, Kurzschlüssen im äußeren Generatorbereich und insbesondere bei der Erkennung von Unterspannungen, Kurzschlüssen sowie Unterbrechung im Erregerkreis angeregt bzw. ausgelöst [60]. Er übernimmt damit gleichzeitig Reserveschutzfunktionen für das System, bestehend aus Turbogenerator-, Transformator- und Netzschutz.
Für die Berechnung der Impedanz sind die Ströme und Spannungen der fehlerbehafteten, kurzgeschlossenen Leiterschleife ausschlaggebend, da die gemessene Impedanz (Quotient aus Betriebsspannung und Betriebsstrom) im fehlerfreien Betriebszustand üblicherweise deutlich größer als die Fehlerimpedanz ist.
Bei einpoligem Fehler wird die entsprechende Leiter–Erde–Schleife benutzt. Im Fall eines zweipoligen Fehlers werden die zwei betroffenen Phasen (Line-to-Line) mit der zugehörigen verketteten Spannung bei der Impedanzberechnung eingesetzt. Bei dreipoligem Fehler wird die gestörte Phase mit dem größten Stromwert verwendet. Das Ergebnis wird in einem R-X-Diagramm im Normal- und Fehlerbetrieb (A_1, F) ausgewertet. Tritt am Fehlerort ein Lichtbogen (R_F) auf, so wird die gemessene Impedanz etwas größer (s. Bild 6.2a). Beim Ausfall der Erregung verlagert sich der Impedanzzeiger in den vierten Quadranten.

Das Impedanzkriterium zur Erfassung des Polschlupfs wird durch das Diagramm 6.2b beschrieben, wobei der Impedanzzeiger im Normalbetrieb durch seine Lage P_1 gekennzeichnet ist.

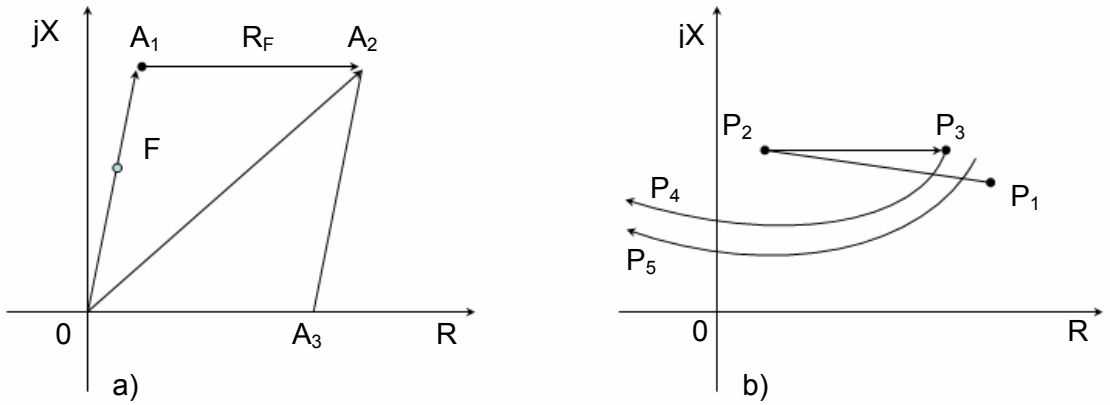


Bild 6.2: Impedanzdiagramm Quelle [60]

Bei einem Kurzschluss wechselt der Impedanzzeiger seine Lage von P_1 zu P_2 und nach Fehlerabschaltung sprungartig auf P_3, wonach der Durchschlupfvorgang bzw. die Polradpendelungen des Generators beginnen. Der Impedanzzeiger bewegt sich im ersten Durchlauf entlang der Kurve P_4 und im zweiten Schlupfvorgang entlang der Kurve P_5 [60].

c) Gleichspannungs-/Gleichstromschutz

Diese Schutzart wird verwendet, um die Schäden in der Erregereinrichtung zu vermeiden. Hier können verschiedene Gründe vorgelegen haben, die zur Anregung und Auslösung des Schutzes führen. Die unterschiedlichen Fehler, welche die Anregung bzw. Auslösung des Schutzes bewirken, sind in der nachfolgenden Tabelle 6.1 zusammengestellt.
Der Gleichspannungs-/Gleichstromschutz wird üblicherweise im statischen bzw. nicht rotierenden Bereich der Erregereinrichtung installiert.
Dieser Schutz hat einen sehr hohen Stellenwert für das Erregersystem. Er wird z.B. beim Unterstrom ausgelöst, wenn der eingestellte Grenzwert bei ca. 70% der Leerlauferregung der Maschine liegt. Die Auslöseverzögerung muss größer als die Reglerzeitkonstante des verwendeten Spannungsreglers eingestellt werden. Andernfalls

können die Regelungsvorgänge, z.B. nach kurzzeitigem Entregen und Lastwechsel, zu Fehlerauslösungen führen.
Die Überstromschutzgrenze beträgt in der Regel ca. 120% der Nennerregung. Hier liegt ebenfalls die Auslöseverzögerung oberhalb der Regelzeitkonstante, damit transiente Regelvorgänge nicht zur Auslösung des Schutzes führen.

Gründe für Schutzauslösung		Auswirkung
Reglerfehler	Untererregung	hohe Blindleistungsaufnahme der Maschine Stabilitätsgefährdung durch die Folge des Außertrittfallens Unterspannung an Generatorklemmen
	Übererregung	Erhebliche Blindleistungsabgabe Thermische Überlastung der Erregereinrichtung Überspannung an Generatorklemmen
Unterbrechung der Generatorerreger-wicklung		Erhöhte Spannung am Anker der Haupterregermaschine Stabilitätsgefährdung als Folge des Außertrittfallens Unterspannung an Generatorklemmen
Gleichrichterfehler, Ausfall eines Diodenzweigs		Erhöhter Erregerstrom durch den Regler Thermische Überlastung der Erregerwicklung Anstieg der Welligkeit bzw. Wechselanteile
Kurzschluss in der Erregereinrichtung		Hohe Oberschwingungsanteile Thermische Überlastung der Erregermaschinen Unterspannung an Generatorklemmen, Außertrittfallen

Tabelle 6.1: Auslösemöglichkeit des Gleichspannungs-/Gleichstromschutzes

Das Auslösekriterium beim Diodenausfall wird hierbei aus der Messung der Erregerstromwelligkeit gebildet. Die Welligkeit berechnet sich aus der Differenz vom maximalen zum minimalen Erregerstrom bezogen auf den Mittelwert des Stromes.

$$I_w = \frac{I_{f,max} - I_{f,min}}{I_f} 100 \qquad (6.1)$$

Mit der Gleichung 6.1 kann abgeschätzt werden, ob der Gleichrichter fehlerfrei arbeitet. Im ungestörten Betrieb liegt der Welligkeitsfaktor nach Gleichung 6.1 unter 30%.

Bei größeren Werten kann von hohen Wechselanteilen ausgegangen werden. Wie im Kapitel 4 gezeigt wurde, werden diese durch den Ausfall der Diodenzweige einer Phase oder Kurzschlüsse in der Gleichrichterversorgung hervorgerufen.

d) Außertrittfallschutz

Nach Netzkurzschlüssen mit langen Fehlerklärungszeiten oder inneren Erregereinrichtungsfehlern können starke Pendelungen der Ströme und des Polradwinkels auftreten. Die Amplituden dieser Niederfrequenzpendelungen können den mehrfachen Generatornennstrom betragen, wodurch der stabile Zustand des Generators und der Erregereinrichtung verloren gehen kann, sodass der Generator außer Tritt fällt. Nachfolgend läuft er asynchron und kann bei Stromrichtererregungen gefährliche Überspannungen in der Feldwicklung hervorrufen [60]. Bei einem Außertrittfall ändert sich der Winkel zwischen der Generator- und der Netzspannung kontinuierlich und durchläuft alle Werte zwischen 0° und 360°. Dieser Winkel ist in der vorgegebenen Lastsituation und bei störungsfreiem Betrieb konstant.
Für den Außertrittfallschutz können verschiedene Kriterien angewendet werden. Eines dieser Kriterien beruht auf der Erkenntnis, dass die Maschine bei asynchronem Lauf induktive Blindleistung aus dem Netz bezieht. Daher kann der Schutz durch die Erfassung der Phasenlagen der Klemmenströme und -spannungen bei diesem Störfall ausgelöst werden. Daraufhin werden sowohl die schnelle Trennung des Generators vom Netz als auch die schnelle Entregung der Maschinen eingeleitet. Hierzu muss in der Schutzeinrichtung die Phasenlagendifferenz der Messgrößen vom Netz und Generator analysiert werden.
Ein weiteres Kriterium beruht auf der Überwachung des Ständerstroms, der im asynchronen Lauf durch Pulsationen bzw. niederfrequente Pendelungen gekennzeichnet ist. Bei Fehlern innerhalb der Erregereinrichtung erfolgt die Anregung zeitlich verzögert, da nach einem inneren Störfall zuerst keine großen Phasen- oder Amplitudendifferenz zwischen den erfassten Netz- und Generatorspannungen festzustellen sind.

Fazit:

Bei einer bürstenlosen Erregerausführung kann der effiziente Schutz des Generators und der Erregereinrichtung durch die Verwendung parallel operierender und unterschiedlicher Fehlererfassungskriterien erzielt werden.
In Tabelle 6.2 sind die Anrege- und Auslösemöglichkeiten der wichtigsten Schutzarten bei inneren und äußeren Fehlern zusammengefasst.

Fehlerarten / Schutzarten	Anregung bzw. Auslösung durch	
	Innere Erregersystemfehler	Äußere Generatorfehler
Differenzialschutz	nicht effizient	effizient
Impedanzschutz	effizient	effizient
Gleichspannungs-/Gleichstromschutz	effizient	nicht effizient
Außertrittfallschutz	nicht effizient	effizient

Tabelle 6.2: Wichtige Schutzarten und die Auslösemöglichkeiten bei inneren und äußeren Fehlern

Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Generator, Erregersystem und Netz können die Anrege- und Auslösegrenzen der Schutzarten mithilfe der durchgeführten Simulationen genauer festgelegt werden. Dadurch können verbesserte Konzepte zur Umsetzung von Schutzmaßnahmen speziell im rotierenden Bereich erarbeitet werden.

7 Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein umfangreiches Simulationsmodell zur Untersuchung des bürstenlosen Drei-Maschinen-Systems entworfen, das aus Generator, Haupterreger, Hilfserreger und Gleichrichtern besteht und über den Maschinentransformator an das elektrische Übertragungsnetz angebunden ist.
Dadurch konnte das Verhalten des Erregersystems und des Generators am Netz bei verschiedenen äußeren Störfällen untersucht werden. Zusätzlich konnten die unterschiedlichen inneren Fehler durch detaillierte Erfassung des Erregerkreises analysiert werden, was mit dem konventionellen Modell nicht möglich war.
Die wichtigsten zu ermittelnden Kenngrößen sind hier die Ströme und Spannungen im rotierenden Bereich, die messtechnisch sehr schwer erfassbar sind. Sie geben zusammen mit den Klemmengrößen bei der Auswertung der dynamischen Vorgänge entscheidende Antworten zu maximalen Belastungen der Erregereinrichtungskomponenten und Auswahlkriterien für die Schutzeinrichtungen.
Weiterhin wurde gezeigt, dass die Erregermaschinen und Gleichrichter, die bisher nur grob durch die konventionellen Modelle mittels regelungstechnischer Blöcke berücksichtigt wurden, nun durch physikalische Komponenten realitätsnäher nachgebildet werden können.
Darüber hinaus konnten bemerkenswerte Erkenntnisse über die inneren Vorgänge im Erregersystem und Generator gewonnen werden, die zur Bestimmung der physikalischen Grenzwerte der verwendeten Bauteile und zur genaueren Beurteilung der Auslastungen im transienten Zustand beitragen. Diese Grenzwerte sind von großer Bedeutung für die Hersteller der Turbogeneratoren und Schutzeinrichtungen.
Durch den Vergleich der herkömmlichen Verfahren mit dem hier entwickelten lassen sich Resultate gewinnen, die dazu genutzt werden können, die Blockdarstellung des Erregersystems auf richtiges Verhalten zu prüfen. Außerdem können die Einstellparameter beim Entwurf des Reglers optimiert werden.
Trotz des Gelingens dieser Arbeit darf nicht übersehen werden, dass der Aufbau des gesamten Modells und der Simulation mit großem Aufwand verbunden ist. Die Beschaffung der spezifischen Daten aller Komponenten zur Erfassung der physikalischen Eigenschaften ist nur mit Unterstützung der Hersteller zu bewältigen.

Deshalb werden solche Untersuchungen in der Zukunft weiterhin eine Ausnahme bleiben. Ihr Einsatz ist voraussichtlich auf die Entwicklung neuer Erregertypen und Schutzeinrichtungen sowie auf Schadensklärungen beschränkt.

Der erste wichtige Schritt ist die Bewertung der Auswirkungen der inneren und äußeren Fehler auf die Ströme und Spannungen. Die in dieser Arbeit dargestellten Zeitfunktionen bilden eine gute Basis für die tief gehende Untersuchung der einzelnen Maschinenkomponenten.

Hysterese- und Wirbelstromverluste, Verluste in Leitern, Dioden und Thyristoren sowie die Erwärmung einzelner Bauteile können in einem Folgeschritt erfasst werden, indem die berechneten Ströme als Eingangsgrößen verwendet werden. Somit eröffnet diese Arbeit neue Perspektiven für die Dimensionierung verschiedener Erregereinrichtungen und bei der Ableitung der Schutzkonzepte für das Erregersystem.

8 Anhang

Netzdaten:

cos(φ) = 0.85

R/X = 0.1

U_{US} = 21 kV

U_{0S} = 380 kV

u_k = 14 %

u_r = 0.2 %

$S``_{k1}$ = 5000 MVA (Netz 1)

$S``_{k2}$ = 5000 MVA (Netz 2)

Kenndaten der Maschinen:

Kenndaten	Wert	Einheit		Kenndaten	Wert	Einheit
X_d	1.93	pu		X_q	1.84	pu
$X_{d´}$	0.28	pu		$X_{q´}$	0.72	pu
$T_{d´}$	0.7	sec		$T_{q´}$	0.69	sec
$T_{d"}$	0.03	sec		$T_{q"}$	0.07	sec
$X_{d"}$	0.21	pu		$X_{q"}$	0.23	pu
$X_{ad}=X_{a\sigma}$	0.18	pu		$r_{ad}=r_a$	0.001	pu
$X_{aq}=X_{a\sigma}$	0.18	pu		$r_{aq}=r_a$	0.001	pu
S_{Nenn}	410	MVA		U_{Nenn}	21.0	kV
I_F	4.0	kA		U_F	0.387	kV
I_{Nenn}	11.3	kA		Z_{Nenn}	1.1	Ω
F_{Nenn}	50	Hz		T_A	7.0	sec

Tabelle 9.1: Berechnete Generatorkenndaten

Kenndaten	Wert	Einheit		Kenndaten	Wert	Einheit
X_d	2.12	pu		X_q	1.27	pu
$X_{d'}$	0.56	pu		$X_{q'}$	---	pu
$T_{d'}$	1.13	sec		$T_{q'}$	---	sec
$T_{d''}$	0.05	sec		$T_{q''}$	0.033	sec
$X_{d''}$	0.39	pu		$X_{q''}$	0.22	pu
$X_{ad}=X_{a\sigma}$	0.16	pu		$r_{ad}=r_a$	0.006	pu
$X_{aq}=X_{a\sigma}$	0.16	pu		$r_{aq}=r_a$	0.006	pu
S_{Nenn}	2.7	MVA		U_{GN}	0.387	kV
I_F	0.115	kA		U_F	0.026	kV
I_{GN}	4.0	kA		Z_{GN}	0.6	Ω
F_{Nenn}	150	Hz		T_A	7.0	sec

Tabelle 9.2: Berechnete Außenpolmaschinenkenndaten

Kenndaten	Wert	Einheit		Kenndaten	Wert	Einheit
X_d	0.13	pu		X_q	0.23	pu
$T_{d''}$	0.0007	sec		$X_{q'}$	---	pu
$X_{d''}$	0.06	pu		$T_{q''}$	0.0004	sec
X_{ad}	0.05	pu		$X_{q''}$	0.088	pu
X_{aq}	0.05	pu		$r_{ad}=r_a$	0.003	pu
S_{Nenn}	0.06	MVA		$r_{aq}=r_a$	0.003	pu
I_{Nenn}	0.160	kA		U_{Nenn}	0.220	kV
F_{Nenn}	400	Hz		Z_{Nenn}	0.8	Ω

Tabelle 9.3: Berechnete Hilfserregermaschinenkenndaten

Ungesteuerte Gleichrichter

Durchlasswiderstand: 0.43 mΩ
RC-Glied: Widerstand 5.6 Ω und Kapazität 600 nF
Zuleitungsinduktivität L_C (Verbindung zwischen Haupterregermaschine und Gleichrichter): 14 µH

Gesteuerte Gleichrichter

Durchlasswiderstand von 0.08 mΩ
L_{f2}= 501 mH
R_{f2}= 230 mΩ
L_C=0.08 mH

9 Literaturverzeichnis

[1] Park R. H.: Two Reaction Theory of Synchronous Machines, Pt. 2. AIEE Trans. 52:352-55, 1933.

[2] Canay I. M.: Modeling of Alternating-Current Machines having Multiple Rotor Circuits, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No 2, June 1993.

[3] Canay I. M.: Determination of the Model Parameters of Machines from the Reactance Operators $X_d(P)$, $X_q(P)$, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No 2, June 1993.

[4] Canay I. M.: Ersatzschema der Synchronmaschine sowie Vorausberechnung der Kenngrößen mit Beispielen, Ecole Polytechn., Dissertation, Lausanne, Jurisverlag, 1968.

[5] Lory M. P.: Bestimmung der Reaktanzen von Turbogeneratoren mit der FE-Methode, Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule, Dissertation, 1998.

[6] Intichar L., Kulig T. S., Lehmann C.: Standard Model of Generators for System Studies, CIGRE-Symposium, Paris 1994.

[7] Drubel O.: Elektromagnetische Vorgänge und Temperaturverteilungen im Rotor großer Turbogeneratoren im gestörten Betrieb, Dissertation, Universität Dortmund, 2001.

[8] Bissig H., Kulig T. S.: Reichert K.: Modeling and Identification of Synchronous Machines, a New Approach with an Extended Frequency Range, IEEE-Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 2, pp. 270, 1993.

[9] Kulig T. S., Reichert K.: Moderne Berechnungsverfahren im Elektromaschinenbau, ETG-Fachtagung Würzburg, September 1994.

[10] Fork K., Nelles D.: Vereinfachter Signalflußplan für Spannungsregler, Elektrizitätswirtschaft, Heft 22, 1980.

[11] Falgenhauer G., Nelles D.: Vereinfachter Signalflußplan für Turbinenregler, Elektrizitätswirtschaft, Heft 24, 1981.

[12] Nelles, D.: Ursachen von Netzpendelungen und Abhilfemaßnahmen, VDI-Berichte 801, GMA/ETG-Fachtagung Netzregelung, 1990.

[13] VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, Regelung der Synchronmaschinen, Richtlinie VDI/VDE-GMA 3680, Beuth-Verlag, 2002.

[14] IEEE Committee Report: Excitation System Models for Power Systems Stability Studies, IEEE-Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-100, No 2, 1981.

[15] IEEE Power Engineering Society: IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, Std. 421.5, 1992.

[16] Kulicke B.: Digitalprogramm NETOMAC zur Simulation elektromagnetischer und magnetischer Ausgleichsvorgänge in Drehstromnetzen, Elektrizitätswirtschaft, H78, S. 18-23, Ausgabe 1979.

[17] Kulicke B.: Differenzenleitwertverfahren bei kontinuierlichen und diskontinuierlichen Systemen, Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht, Springer-Verlag, 1981

[18] Fischer R.: Elektrische Maschinen, Hauser-Verlag, 1995.

[19] Flockermann D., Kulig T. S., Sedlazeck K.: Turbo Generator with High Voltage Stator Windings, ICEMs Vol. 1, Shenyang China, 2001.

[20] Kulig T. S.: Elektromechanische Energiewandler, Vorlesungsskript, Universität Dortmund, 2000.

[21] Bödefeld T., Sequenz H.: Elektrische Maschinen, Springer-Verlag, 1971.

[22] Ataei N., Grüning A., Kulig T. S., Stuckmann C.: Netzverhalten eines Generators mit hochtemperatur-supraleitender Feldwicklung, Technischer Bericht, Universität Dortmund, 2004.

[23] Henneberger G.: Moderne Servomotoren für Werkzeugmaschinen und Handhabungsgeräte, Vorlesungsskript, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1998.

[24] Müller G.: Theorie elektrischer Maschinen, VCH-Verlag, 1995.

[25] Anderson P. M., Fouad A. A.: Power System and Stability, Vol. 1, the IOWA State University Press, USA, 1977.

[26] Kulig T. S.: Anwendung der numerischen Feldberechnung zur Modellierung elektrischer Drehstrom-Maschinen mit inneren Fehlern, Bulletin SEV/VSE 81, 1990.

[27] Kulig T. S., Liese M., Trebincevic I.: Shell Vibrations of Superconducting Generator Damper Cylinder Induces by Electrical Faults, IEEE Winter Meeting New York USA, 1995.

[28] Kulig T. S., Lambrecht D., Liese M.: Investigation of the Transient Performance of Superconducting Generators with an Advanced Network-Torsion-Machine-Program, IEEE, Dallas USA, 1984.

[29] Jiaquun Xu., Renyuan T., Yanliang Xu.: Development of Full Digital Control System for Permanent Magnet Synchronous Motor Used in Electric Vehicle, ICEMS, Shenyang China, 2001.

[30] Fischer R.: Elektrische Maschinen, Verlag Hauser, 1995.

[31] Chapman S.: Electrical Machinery Fundamentals, McGraw-Hill, USA, 2001

[32] Soter S.: Skriptum zur Vorlesung Leistungselektronik I/II, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2002.

[33] Sikkema U.: Spannungs- und Stromeffektivwerte und Spannungswelligkeiten voll- und halbgesteuerter Stromrichterschaltungen bei berücksichtigter Kommutierung, Dissertation, Universität Dortmund, 1997.

[34] Oberretl K.: Zur Frage der Blindleistung bei der Speisung eines Widerstandes R über Thyristoren, technischer Bericht TB87/6, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Universität Dortmund, 1987.

[35] Harders H.: Rechnungsangaben für Turbogeneratoren, Energieerzeugung Kraftwerk-Union (KWU), 1997.

[36] Möltgen G.: Netzgeführte Stromrichter mit Thyristoren, 3. Auflage, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1974.

[37] Engel U., Lehrmann C., Lienesch F.: Verluste umrichtergespeister Induktionsmaschinen in Funktion der Betriebsparameter, Zeitschrift Bulletin, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, SEV/VSE 7/2003.

[38] Bunzel E., Müller G.: Oberschwingungsverluste in Niederspannungsasynchronmaschinen Teil II, Zeitschrift Antriebstechnik, Heft 9, 2000.

[39] Kloss K.: Oberschwingungen, Netzrückwirkungen der Leistungselektronik, VDE-Verlag, 1996.

[40] Kloss K.: Oberschwingungen, Beeinflussungsprobleme der Leistungselektronik, Technische Akademie Wuppertal, VDE-Verlag, 1989.

[41] Povh D.: Berechnung der Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzwerken, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1971.

[42] Kulicke B.: Nachbildung von Synchron- und Asynchronmaschinen, Siemens Forschungs- und Entwicklungsbericht, Springer-Verlag, 1982.

[43] Linnert U.: Neue Differenzenleitwert-Verfahren zur Simulation dynamischer Ausgleichsvorgänge mit großer Schrittweite, Archiv für Elektrotechnik (AFE) 76, S. 101-110, 1992.

[44] Ataei N.: Simulation of Brushless Exciter Model for a Three-Machine-System, Proceedings of the IASTED International Conference Power and Energy Systems, Palm Springs, Ca USA, February, 24-26, 2003.

[45] Kulig T. S., Lambrecht D., Liese M.: Superconducting Generator Modeling by Iterative Network Equivalent Circuits for Investigation of Transient Performance, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No.7, July 1984.

[46] Ataei N., Klocke M., Kulig T. S., Werthes H., Zimmer G.: Modellierung einer Schaltkupplung und Berechnung des dynamischen Verhaltens einer Einwellenanlage, Technischer Bericht, Universität Dortmund, 2004.

[47] Drubel O, Kulig S, Senske K.: End Winding Deformations in Different Turbo Generators during 3-Phase Short Circuit and Full Load Operation, Electrical Engineering, Volume 82, No 3-4, p. 145-152, Springer-Verlag, 2000.

[48] Kabir S. M. L., Shutleworth R.: Brushless Exciter Model, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Volume 141, Issue 1, p. 61-67, 1994.

[49] Kulig T. S.: Auswirkungen von Störfällen in elektrischen Energieübertragungsnetzen auf Kraftwerksturbosätze, dem Fachbereich Elektrotechnik der Fernuniversität Hagen vorgelegte Habilitationsschrift, Hagen, 1986.

[50] Buchholz B., Lei X., Povh D., Retzmann D.: A Comprehensive Simulation for Subsynchronous Resonance Analysis, Conference Proceedings IEEE Engineering Society Summer Meeting, S. 695-700 Vol. 2, 2000.

[51] Daneschnejad M.: Erfassung von Windungsschlüssen in der Erregerwicklung eines Turbogenerators, Dissertation, Universität Dortmund, 2001.

[52] Handschin E.: Elektrische Energieübertragungssysteme, Verlag Hüthig, 1987.

[53] Saadat H.: Power System Analysis, McGraw-Hill Edition, USA, 1999.

[54] Ataei N., Kulig T. S., Werthes H., Zimmer G.: Entwicklung eines Regelkonzeptes zur Beherrschung des Inselbetriebes bei GuD-Anlagen unter Einbeziehung der Dampfturbine in den Lastabwurf für Ein- und Mehrwellenanlagen, Technischer Bericht, Universität Dortmund, 2005.

[55] Kiendl S.: Skriptum zur Vorlesung Regelungs- und Steuerungstechnik I/II, Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 1996.

[56] Fitzgarald A. E., Kingsley C., Umans S.: Electric Machinery, Ohio U.S.A., McGraw-Hill, College, 2002.

[57] Flockermann D.: Einsatz von Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Parameter nichtlinearer Ersatzschaltbilder von elektrischen Maschinen, Dissertation, Universität Dortmund, 2003.

[58] Frenck Ch., Handschin E., Hoffmann W., Reyer F., Stephanblome Th., Westermann D.: Entwicklung eines Fuzzy-Reglers für die Spannungsreglung der Synchronmaschine VDE-Fachtagung in Dortmund, November 1992.

[59] Ahmad S. S., Handschin E., Hoffmann W., Reyer F., Schlücking U., Stephanblome Th., Westermann D.: a New Method of Excitation Control Based on Fuzzy Set Theory, IEEE Transactions on Power System, Vol. 9, No. 1, February 1994.

[60] Ungrad H., Winkler W., Wiszniewski A.: Schutztechnik in Elektroenergiesystemen, Springer-Verlag, 1994.

Formelzeichen, Indizes und Schreibweisen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_I	A/cm	Strombelag
B	T	Magnetische Flussdichte
C	kVAmin/m^3	Esson'sche Zahl
cos(φ)		Leistungsfaktor
D	As/m^2	elektrischer Verschiebungsfluss
d	m	Rotordurchmesser
E	V/m	elektrische Feldstärke
E_3		3×3-Einheitsmatrix
e_{ind}	V	Induzierte Spannung
$e_{ij}(t)$	V	Zweigquellenspannung
f	Hz	Maschinenfrequenz
F_L	N	Lorenzkraft
H	A/m	magnetische Feldstärke
I	A	Maschinennennstrom
I_f	A	Erregerstrom am Ausgang des Gleichrichters
I_{GN}	A	Nenngleichstrom
I_K	A	Knotenstrom
i	A	Strom
i_{FDQ}	A	Matrix der Rotorkreisströme
i_{uvw}	A	Matrix der Ständerströme
J	A/m^2	Stromdichte
K_L		Thermodynamische Konstante
$k_{A\ bis\ E}$		Verstärkungsfaktor der Reglerblöcke
L	H	magnetische Induktivität
L_C	H	Kommutierungsinduktivität
L_f	H	Erregerinduktivität am Ausgang des Gleichrichters

Symbol	Einheit	Bedeutung
L_{FF}, L_{DD}, L_{QQ}	H	Eigeninduktivität des Rotorkreises
L_K	H	Kreisstrombegrenzungsinduktivität
L_P	H	periodisch sich ändernde Induktivität
L_n	H	Induktivität des Sternpunkts des dreiphasigen Systems
L_S	H	konstanter Eigeninduktivitätsanteil
L_{uD}, L_{vD}, L_{wD}	H	Gegeninduktivität zwischen Dämpfer- und Ständerwicklungen
L_{uF}, L_{vF}, L_{wF}	H	Gegeninduktivität zwischen Feld- und Ständerkreis
L_{uv}, L_{uw}, L_{vw}	H	Gegeninduktivität zwischen Maschinensträngen
L_{uu}, L_{vv}, L_{ww}	H	Eigeninduktivität der Maschinenstränge
ℓ	m	effektive Länge
M	Nm	Drehmoment
M_S	H	Ständergegeninduktivität
M_{FD}	H	Gegeninduktivität zwischen Feld- und Dämpferkreis
M_{SF}	H	Gegeninduktivität der Rotor- und Ständerwicklung
M_{SD}	H	Gegeninduktivität im Dämpferkreis D und Ständer
M_{SQ}	H	Gegeninduktivität im Dämpferkreis Q und Ständer
n	U/min	Drehzahl
n_{0dq}	V	Matrix der Sternpunktspannung auf d-q-Achse
r_f	Ω	Erregerwiderstand am Ausgang des Gleichrichters
R_C	Ω	Leitungswiderstand
r_{ad}	Ω	Ankerwiderstand auf d-Achse
r_{aq}	Ω	Ankerwiderstand auf q-Achse
r_{fd}	Ω	Erregerwiderstand auf d-Achse
r_{Dd}	Ω	Dämpferwiderstand auf d-Achse
r_{Dq}	Ω	Dämpferwiderstand auf q-Achse
R/X		Netzimpedanzverhältnis
r	m	Radius

Symbol	Einheit	Bedeutung
r_{FDQ}	Ω	Matrix der Rotorkreiswiderstände
r_{uvw}	Ω	Matrix der Ständerwiderstände
r_n	Ω	Sternpunktwiderstand des dreiphasigen Systems
p		Polpaarzahl
P_f	W	Erregerleistung
P_{SG}	W	Wirkleistung der Maschine
Q_V	VA	Verzerrungsleistung
Q_{SB}	VA	Steuerblindleistung
U_{Rmin}	pu	Untererregungsbegrenzung
U_{Rmax}	pu	Obererregungsbegrenzung
U_{GN}	V	Nenngleichspannung
U_m	V	Maschenspannung
$U_{ij}(t)$	V	Knotenspannung
S	VA	Scheinleistung
S_G	kVA	Scheinleistung
$S``_K$	MVA	Netzkurzschlussleistung
s		Laplace-Operator
T		Parktransformationsmatrix
T_A	s	Anlaufzeitkonstante
$T`_d$	s	transiente Zeitkonstante auf d-Achse
$T`_q$	s	transiente Zeitkonstante auf q-Achse
$T``_d$	s	subtransiente Zeitkonstante auf d-Achse
$T``_q$	s	subtransiente Zeitkonstante auf q-Achse
$T_{A\ bis\ E}$	s	Zeitkonstanten der Reglerblöcke
t	s	Zeit
U	V	Spannung
U_{f0}, $U_{f\alpha}$	V	Gleichspannung am Gleichrichterausgang
U_n	V	Sternpunktspannung des dreiphasigen Systems
U_{OS}	V	Oberspannung
U_{US}	V	Unterspannung

Symbol	Einheit	Bedeutung
U_{SG}	V	verkettete Spannung
u_k		relative Kurzschlussspannung des Transformators
u_r		ohmscher Verlustanteil des Transformators
V_L	m^3	Rotorvolumen
v	m/s	Geschwindigkeit
X_d, X_q	Ω	Synchronreaktanz auf d-q-Achse
$X`_d$, $X`_q$	Ω	transiente Reaktanz auf d-q-Achse
$X``_d$, $X``_q$	Ω	subtransiente Reaktanz auf d-q-Achse
X_{ad}, X_{aq}	Ω	Ankerstreureaktanz auf d-q-Achse
X_{cd}, X_{cq}	Ω	Canay'sche Koppelreaktanz auf d-q-Achse
X_{Dd}, X_{Dq}	Ω	Dämpferimpedanz auf d-q-Achse
X_{hd}, X_{hd}	Ω	Hauptreaktanz auf d-q-Achse
$Y_{ij}(t)$	1/Ω	zeitabhängiger Differenzenleitwert
Z_{GN}	Ω	Nennimpedanz bezogen auf Gleichspannung
Z_{Nenn}	Ω	Nennimpedanz der Maschinen
α	°	Steuerwinkel der Thyristoren
α_I	°	Stromwinkel eines Arbeitspunkts
α_U	°	Spannungswinkel eines Arbeitspunkts
γ	°	Überlappungswinkel
γ	S/m	spezifischer Leitwert
δ	°	Polradwinkel
θ	°	Rotorpositionswinkel
λ		Rotorschlankheitsgrad
μ	Vs/(Am)	magnetische Permeabilität
ξ		Wicklungsfaktor
ρ	C/m^3	Raumladungsdichte
ρ_v	kg/dm^3	Dichte
Ψ	Wb	verketteter Fluss
Ψ_{0dq}	Wb	Matrix des verketteten Flusses auf d-q-Koordinaten
ω	Hz	Kreisfrequenz

Indizes und Schreibweisen

Symbol	Bedeutung
AC	Drehstromerregersystem
C_+, C_-	Kondensatoren im positiven und negativen Teil des Gleichrichters
D	Größe der Dämpferwicklung auf d-Achse
D_+, D_-	Dioden im positiven und negativen Teil des Gleichrichters
DC	Gleichstromerregersystem
DGL	Differenzialgleichung
DIFF	Differenzierglied
DMS	Drei-Maschinen-System
d	direkt-Achse
eff	Effektivwert
F	Größe der Feldwicklung
F_+, F_-	Sicherungen im positiven und negativen Teil des Gleichrichters
Fe	Eisen
FKT	Funktion
FKZ	Fehlerklärungszeit
GEN	Generator
GL	Gleichrichter
GM	Gleichstrommaschine
i, j	Knotenindizes
K	Knotenindex
KS	Kurzschluss
KU	kurze Unterbrechung
Nenn	Nennbetriebspunkt
R_+, R_-	Schutzwiderstände im positiven und negativen Teil des Gleichrichters
OS	Oberspannung
PROP	Proportionalglied
Q	Größe der Dämpferwicklung auf q-Achse
q	quer-Achse

Symbol	Bedeutung
S	Stator
R	Rotor
R, S, T	Ständerspannungsphasen der Erregermaschine
SCH	Schalter
SM	Synchronmaschine
SE	Reglerstelleinrichtung
SPG	Spannungsregler
ST	Statisches Erregersystem
SW	Schalter
T_+, T_-	Thyristoren im positiven und negativen Teil des Gleichrichter
U_{GEN}	Ist-Wert der Generatorspannung
U_{Soll}	Soll-Wert der Generatorspannung
U, V, W	Ständerspannungsphasen des Generators
V	V-Phase der Ständerspannung
V_F	Stabilisierendes Rückkopplungssignal beim Eingang
V_H	Stabilisierendes Rückkopplungssignal
V_{OEL}	Obererregerspannung
V_{UEL}	Untererregerspannung
W	W-Phase der Ständerspannung
Yy, Yd5	Transformatorschaltgruppen

Lebenslauf

Personalien:

Name: Ataei
Vorname: Nader
Wohnort: Dortmund
Geburtsort: Gorgan/Iran
Geburtsdatum: 14.01.1963

Ausbildung:

1970-1976
Grundschule in Teheran

1977-1982
Gymnasium in Teheran
Abschluss: Abitur

1984-1987
Berufsschule für Elektrotechnik, Teheran
Abschluss: Techniker für Elektrotechnik

1989-1991
Deutsch- und Mathematikstudium, Universität Köln

1992-1998
Studium der Elektrotechnik, Universität Dortmund
Abschluss: Diplom

Wehrdienst: 1982-1984
Als Sanitäter in Shahreza

Berufliche Tätigkeit: 1991-1998
Teilzeitbeschäftigungen für die Studienfinanzierung:
als Elektriker bei der Inova GmbH in Köln, als Techniker bei der Firma Petri in Dortmund, als studentische Hilfskraft an der Universität Dortmund und der Fernuniversität Hagen.
Seit 1999
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Mechatronik der Universität Dortmund.