

Modellierung des Betriebsverhaltens eines Synchrongenerators als Stromerzeuger

Bert Henrik Herrmann¹, Maximilian Ringel¹, Daniel Jörss¹, Christian Fink^{1*}

¹. Fakultät für Maschinenbau, Hochschule Wismar, Philipp-Müller-Str. 14, 23966 Wismar, Germany
*christian.fink@hs-wismar.de

Abstract. Im Rahmen des BMBF-finanzierten Forschungsprojektes SIDYN soll das Betriebsverhalten eines Stromerzeugers in Inselnetzen mit dynamischen Netzlasten simulativ untersucht werden. Der präsentierte Entwicklungsstand beschreibt das mechanisch-elektrische Generator-Netz-Modell. Es werden die Herausforderungen bei der Modellierung und Parametrierung eines solchen Synchrongenerators beschrieben. Zur Validierung wurde ein Synchrongenerator beschafft, der zukünftig im Zusammenspiel mit einem Deutz TD 2.9 -Turbodieselmotor als Referenzprüfstand dienen soll.

Ziel der Entwicklung ist ein Simulationsmodell, das keine symmetrische Belastung voraussetzt und somit für Inselnetze typische Belastungszustände sicher simulieren kann. Das Modell soll möglichst flexibel erweiterbar sein, so dass es im Verlauf der Entwicklung angepasst werden kann. Entsprechende Anpassungen werden im Rahmen der Prüfstandsmessungen erwartet. Zur Gewährleistung einer bestmöglichen Anpassbarkeit wurde nicht auf bestehende physikalische Modelle der Simscape®-Umgebung aufgebaut, sondern es erfolgte eine komplette Neuentwicklung eines signalfussorientierten MATLAB Simulink®-Modells. Der Entwicklungsstand entspricht in etwa dem SI-Modell aus der MATLAB Simscape® Electrical Bibliothek. Demgemäß wurde dieses aufgrund fehlender Prüfstandsergebnisse für eine Model-by-Model-Validierung benutzt, deren Ergebnisse ebenfalls präsentiert werden.

Einleitung

Im Rahmen des BMBF-finanzierten Forschungsvorhabens SIDYN soll das Betriebsverhalten eines Stromerzeugers in Inselnetzen mit dynamischen Netzlasten auf Grundlage eines modularen Simulationsmodells abgebildet werden. Das soll die Möglichkeit zur Variation unterschiedlicher Motor- und Netzkonfigurationen sowie verschiedener Lastszenarien bieten.

Ein Inselnetz ist ein vom öffentlichen Stromnetz unabhängiges System aus Stromerzeugern (meist Synchrongeneratoren und Verbrauchern).

Zur Erweiterung des bereits vorgestellten Simulationsmodells eines Industriebmotors [1] sollen hier die elektromechanischen und elektrischen Modellansätze beschrieben werden. Es geht vor allem darum, ein tieferes Verständnis zum dynamischen Verhalten eines Synchrongenerators mit angeschlossener Last aufzubauen und ein Systemmodell aufzustellen, das flexibel anpassbar ist. Der Aufbau und eine Anwendung eines solchen Modells setzt ein tiefgreifendes Verständnis über die physikalischen Zusammenhänge voraus. Verfügbare Modelle in MATLAB Simscape® zeigen eine plausible Funktion, jedoch sind die Modellbeschreibungen nicht vollumfänglich nachvollziehbar. Aus diesem Grund sowie der Forderung nach einer anpassbaren Modelltiefe für eine spätere Anwendung wurde der Aufbau eines MATLAB Simulink®-Modells favorisiert, welches das Generator- und Regelverhalten realitätsnah abbildet.

Generatorsysteme werden meist aus Rechenvorschriften von Motormodellen abgeleitet. Diese Modelle verhalten sich ähnlich, erfüllen aber nicht die Anforderung zur Berechnung eines benötigten Drehmoments aus einer bekannten elektrischen Last am Generator bei einer bestimmten Drehzahl unter Berücksichtigung einer geregelten Erregung.

Bezogen auf die Anwendung, soll ein Synchrongene-

rator in verschiedenen Belastungsszenarien simuliert werden, der direkt mit einem Verbrennungsmotor gekoppelt ist. Daraus folgen die Bedingungen, dass eine Drehzahl des Verbrennungsmotors unter Wirkung einer drehelastischen Kupplung zu jedem inkrementalen Zeitpunkt vorgegeben ist. Aus der elektrischen Last folgt im Generator ein notwendiges Drehmoment, das als Lastanforderung zum Verbrennungsmotor zurückgeführt wird.

Zur Validierung der entwickelten Modelle erfolgt ein Vergleich mit Simulationsergebnissen äquivalenter Modelle aus MATLAB Simscape® sowie im späteren Projektverlauf mit Prüfstandsmessungen.

1 Recherche nach Modellen

Vor der Entwicklung und Implementierung eines eigenen Modells erfolgte eine Recherche hinsichtlich verfügbarer Modelle in der zu benutzenden Modellierungs- und Simulationsumgebung MATLAB Simulink®. Der Fokus lag auf bestehenden Modellen, die die Möglichkeit bieten, bei definierter Winkelgeschwindigkeit und Sollspannung einen lastfallabhängigen Momentenverlauf zu bestimmen. In der MATLAB Simscape® Toolbox Electrical [2] sind solche Modelle vorhanden und beschrieben. Jedoch ist die Parametrierung nicht trivial und bedarf einiger Einarbeitung. Es ist die Wahl zwischen einem auf SI-Einheiten bzw. auf PU-Einheiten basierten Modell zu treffen. Zur Verifizierung des selbst erstellten Modells wurde sich für das SI-Einheitenmodell entschieden. Im Simscape®-Modell fehlen jedoch grundlegende Annahmen zu Signalarückkopplungen sowie die Einbeziehung der elektrischen Lasten. Demgemäß wurde eine eigene Modellentwicklung angestrebt, die eine flexible Anpassung des Modells im Rahmen des Projektverlaufs erlaubt.

Für erste Modellvalidierungen kann das SI-Einheitenmodell in Simscape® herangezogen werden. Als Anwendungsfall dient die Standardkonfiguration eines Generators mit 42,5 kVA.

2 Modellbeschreibung und Implementierung

Leitfäden zur Modellierung von Synchrongeneratoren können in der Literatur u.a. unter [2], [3], [5], [6], [9] und [10] gefunden werden. Es sei erwähnt, dass die Bezeichnung von Modellgrößen stark divergiert, weshalb eine Normierung wünschenswert wäre. Die hier beschriebene Modellierung basiert auf dem vom IEEE (Institute of

Electrical and Electronic Engineers) veröffentlichten Manuskript [3] sowie [2]. Hieraus geht hervor, dass unter Berücksichtigung einer Ersatzschaltung im d-q-Koordinatensystem die folgenden grundlegenden Gleichungen 1 und 2 für die Flussverkettung im rotorbezogenen Modell aufzustellen sind:

$$u_d = -i_d R_a - p \omega_{mech} \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$u_q = -i_q R_a + p \omega_{mech} \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (\text{Gl. 2})$$

Für das elektromagnetische Moment gilt Gleichung 3. Somit kann das Moment T, welches der Generator im eingestellten Lastzustand zum Antrieb benötigt, ermittelt werden.

$$T = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{Gl. 3})$$

Die grundlegenden Funktionen und Zusammenhänge sind in Abbildung 1 dargestellt. Wobei ausschließlich der innere Block der fremderregten Synchronmaschine in den Quellen ausführlich beschrieben ist.

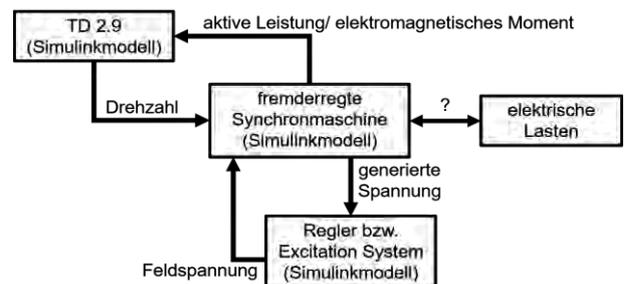


Abbildung 1: Darstellung der Subsysteme und Wechselwirkungen

Fraglich bleibt, welche Spannungen u_d und u_q bei gegebener Drehzahl und Feldspannung generiert werden und welche Ströme i_d und i_q sich daraus ergeben. Die Frage nach der Funktionsweise des Modells klärt sich erst mit der Einbindung einer elektrischen Last in das Modell, welche den Spannungsausgang des Generators mit einem Strom belastet und somit eine Leistung vom Generatorsystem fordert. Da die Lastauswirkung einfacher in zeitdiskreten Ursprungskoordinaten zu bewerten ist, soll die Lastrechnung nach der Rücktransformation aus dem d-q-Koordinatensystem erfolgen. Somit ergibt sich ein weiterer Rückkoppelzweig über die Last (siehe Abbildung 2).

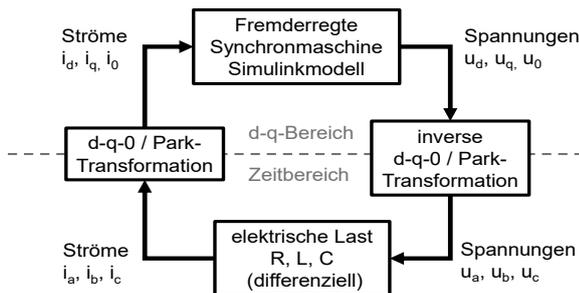


Abbildung 2: Darstellung der Lasteinbindung mit Hin- und Rücktransformation

Im Wesentlichen entspricht die Einbindung eines geeigneten Lastmodells der Modellierung des Betriebsverhaltens des Generatorsystems.

Das Hauptaugenmerk liegt auf der Betrachtung der Phasenverschiebungen der einzelnen Ströme i_a , i_b und i_c zu den jeweiligen Spannungen u_a , u_b und u_c . Zudem soll das Modell eine asymmetrische Belastung einer rein ohmschen bis hin zu induktiven und kapazitiven Lasten ermöglichen.

Ein geeigneter Ansatz besteht in der Eingabe der entsprechenden Leistungen, welche in Wirkleistungskomponenten (ohmscher Lastanteil) und Blindleistungskomponenten (kapazitive und induktive Lastanteile) unterteilt werden können. Die eingegebenen Leistungswerte werden vorab in äquivalente Widerstands-, Kapazitäts- bzw. Induktivitätswerte umgerechnet werden. Ein Ersatzschaltbild beschreibt diesen Ansatz in Abbildung 3 in Form eines Schwingkreises. Demnach stehen x_F , x_R und x_L für die äquivalenten Widerstandswerte der Feldleistung, der ohmschen Leistung sowie dem ohmschen Widerstand der induktiven Last. Der Parameter L steht für die Induktivität und C gibt die Kapazität wieder. Jeder Phase wird ein solcher Schwingkreis zugeordnet. $U_c(t)$ steht dabei für die entsprechenden Spannungsverläufe der 3 Phasen u_a , u_b und u_c .

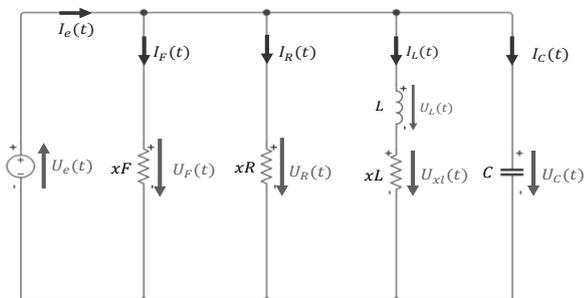


Abbildung 3: Last als Schaltungsäquivalent für einen RLC-Schaltkreis

Demzufolge wurde die Differenzialgleichung 4 entwickelt, die das dynamische Verhalten des oben abgebildeten RLC-Schwingkreises beschreibt und bei den eingestellten Lasten für jede Phase den zum Spannungsverlauf zugehörigen Stromverlauf angibt. Gleichung 4 wurde anschließend in ein MATLAB Simulink® Subsystem überführt.

$$I(t) = U(t) \left(\frac{1}{x_F} + \frac{1}{x_R} - \frac{CxL}{L} \right) + \frac{1}{L} \left(1 + \frac{xL}{x_F} + \frac{xL}{xR} \right) U(t) dt - \frac{xL}{L} \int I(t) dt + c \frac{dU(t)}{dt} \quad (\text{Gl. 4})$$

Soll eine Leistungsvorgabe erfolgen, müssen Funktionen zur Umrechnung der Parameter aus den Leistungswerten in äquivalente Widerstandswerte implementiert werden. Abbildung 4 zeigt diese Kopplung mit der notwendigen Last, um aus den Spannungsäquivalenten u_d , u_q und u_0 auf die resultierenden Ströme i_d , i_q und i_0 zu schließen. Mittels der inversen dq0-Transformation werden die Spannungen zuerst in zeitvariante Sinusspannungen u_a , u_b und u_c transformiert. Dann werden die Lastrechnungen im Statorsystem mittels der Differenzialgleichung 4 für jede Phase bestimmt, um daraufhin die resultierenden Ströme mit der dq0-Transformation wieder in das rotorbasierte Modellsystem zurückzuführen. Dieses Vorgehen ist notwendig, um sämtliche Phaseninformationen dem elektromechanischen Grundmodell zurück koppeln zu können.

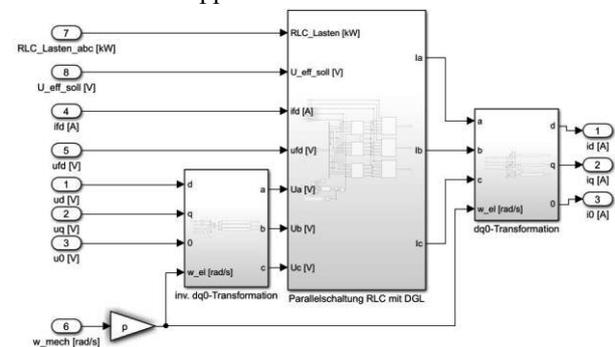


Abbildung 4: Umsetzung der Lasteinbindung in MATLAB Simulink®

In Abbildung 5 ist die gesamte Verknüpfung des Gleichungsansatzes zur Modellierung des Generatorsystems inklusive der elektrischen Last auf Basis des Strukturdiagramms aus Abbildung 2 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Matrizendarstellung im dq0-System Parametrierungen voraussetzt, die im aktuellen Schleifendurchlauf berechnet werden müssen. Dadurch ergeben sich bei direkter Umsetzung in MATLAB Simulink® diverse algebraische Schleifen, die durch Feedback-Loops bzw. durch geeignete Wahl von Startwerten aufzulösen

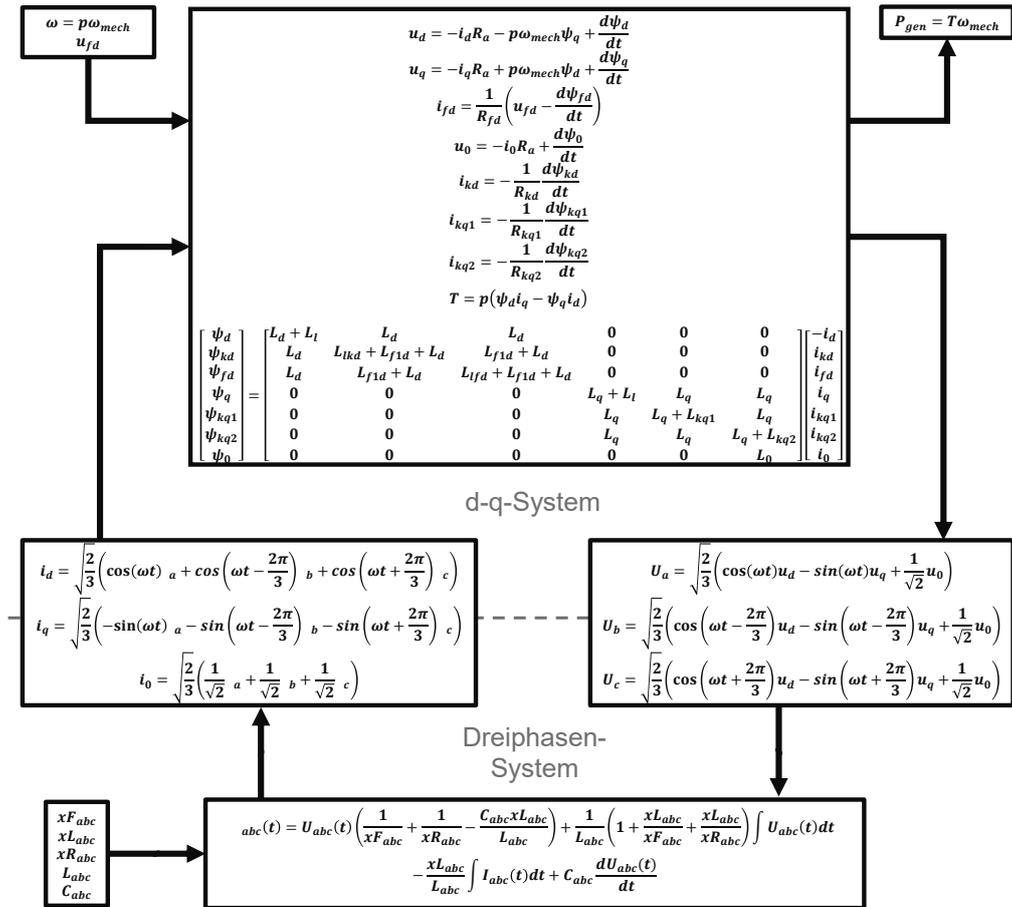


Abbildung 5: Zusammenstellung und Verknüpfung aller verwendeten Gleichungen

sind. Der bestmögliche Umgang mit dieser Anforderung ist Thema aktueller wissenschaftlicher Arbeiten, um ein stabil laufendes Simulationsmodell gewährleisten zu können. Neben den Gleichungen für die Ströme i_d und i_q , beinhaltet Abbildung 5 weitere Gleichungen zur Bestimmung des Erregerfeldstromes i_{fd} sowie der Ströme in den d- und q-Dämpferwicklungen i_{kd} , i_{kq1} und i_{kq2} . Weiterhin ist die Matrix für alle im Modell verwendeten Flussverkettungen dargestellt. Die Indizes abc im Dreiphasensystem, sollen darauf verweisen, dass diese Berechnungen für jede Phase separat durchgeführt werden.

Im Zusammenspiel mit einem geeigneten Intervall folgt ein numerisches Modell, welches Simulationen auf Basis des mathematischen Modells und eingestellten Lasten ermöglicht. Das Modell beschreibt in dieser Form die Modellvariante 2.2 aus dem IEEE 1110 – Design Guide [3] (siehe Abbildung 6).

Zur Vereinfachung auf das Model 2.1 nach [3], mit

nur einem Dämpferkreis, kann in der q-Achsen-Ersatzschaltung (unteres Schaltbild in Abbildung 6) der Zweig aus L_{kq2} und R_{kq2} weggelassen werden. Diese Anord-

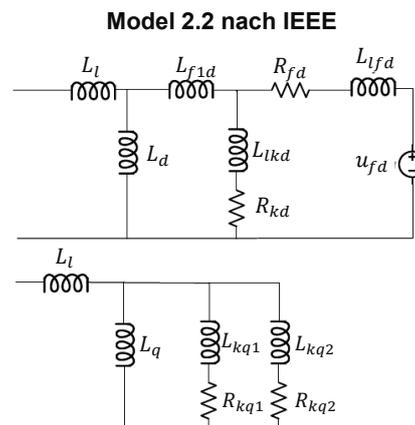


Abbildung 6: Darstellung der Modellvariante nach IEEE; Formelzeichen angepasst [3]

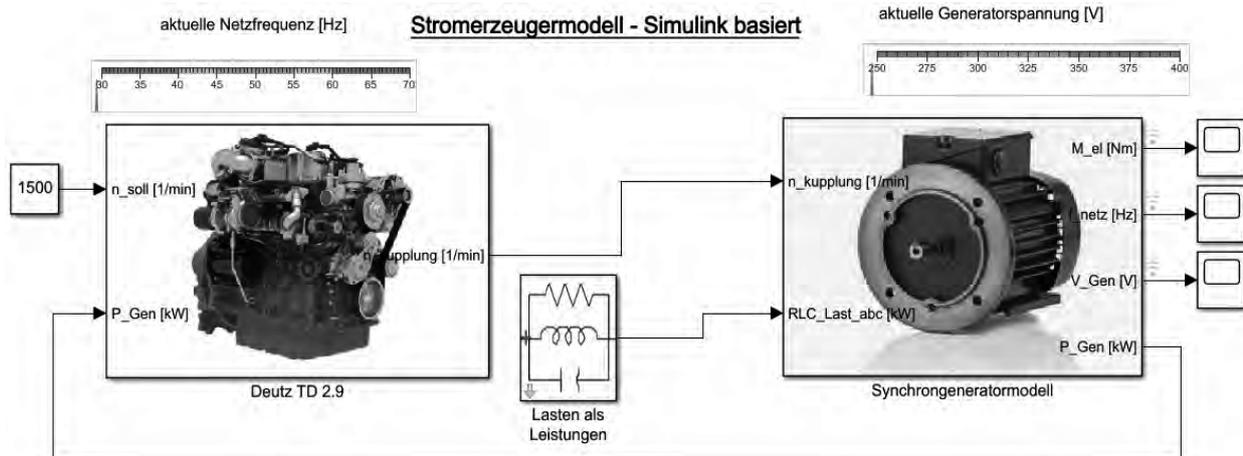


Abbildung 7: Oberste Modellebene und Benutzeroberfläche zur Eingabe von Lasten sowie Darstellung der wichtigsten Prozessparameter; Bildelemente des Simulink®-Modells (Bildelemente aus [11] und [12])

nung entspricht dann dem zu modellierenden Synchron-generator im Prüfaufbau, jedoch immer noch mit vereinfachter Darstellung des Erregerkreises.

Die Implementierung des signalflußorientierten Modells in MATLAB Simulink® ist in Abbildung 7 in der obersten Modellebene des gesamten Simulink®-Modells (Synchrongenerator und Verbrennungsmotor nach [1]) dargestellt. Die Anforderung aus dem Projekt nach einer einfachen Bedienoberfläche, die das Zusammenspiel aus Generator und Motor abbildet, ist somit erfüllt. Es können Lasten als ohmsche, induktive oder kapazitive Leistungen getrennt für jede einzelne Phase definiert und mit Lastsprüngen versehen werden.

Die resultierenden Netzschwankungen werden in Frequenzstabilität und Spannungsstabilität angezeigt. Wichtige Modellparameter des Verbrennungsmotors und des Synchrongenerators können über Anklicken der entsprechenden Subsystemblöcke eingegeben werden. Somit wurde ein vollständig in MATLAB-Simulink® erstelltes Modell entwickelt, das mit einer reduzierten Parametrierung arbeitet und noch ohne die Berücksichtigung des transienten und subtransienten Verhaltens rechnet. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben vorerst der Temperatureinfluss sowie die Sättigungseffekte. Die konkrete Weiterführung der Modellentwicklung wird abhängig von den Messergebnissen am geplanten Prüfstand entschieden.

Für eine erste Validierung dient ein MATLAB Simscape® Modell, welches laut [2] ebenfalls die Eigenschaften des vorgestellten Modells beinhaltet. In dem Simscape®-Modell für einen Synchrongenerator wird die Erregerleistung aus einer externen Spannungsquelle bezogen. Um die Vergleichbarkeit der beiden Modelle

zu gewährleisten, wird auch in dem Simulink®-Modell die Erregerleistung von außen bezogen. Es besteht aber nach wie vor die Option die Erregerleistung aus der generierten Leistung zu entnehmen, diese Option wurde in dem Simscape®-Modell nicht realisiert. Auch die Berücksichtigung von Sättigungseffekten wird im Simscape®-Modell deaktiviert. Zudem sei hier erwähnt, dass die Modellparametrierungen sich in der Wahl geeigneter Startwerte und der Regelparameter des Excitation Systems unterscheiden können, da hierzu nicht alle Informationen aus dem Simscape® Modell herausgelesen werden können. Der Modellcode ist gesperrt und Parameter können ausschließlich nachvollzogen werden, wenn diese editierbar sind.

3 Modellvalidierung

Zur Validierung des Simulink®-Modells werden die Berechnungsergebnisse mit Ergebnissen des Simscape®-Modells für einen Synchrongenerator mit 42,5 kVA verglichen. Beide Synchrongeneratormodelle sind mit einem Verbrennungsmotormodell eines Deutz TD 2.9 4-Zylinder Turbodiesel mit 49 kW gekoppelt. Für eine ausführliche Beschreibung des Verbrennungsmotormodells wird auf [1] verwiesen. Verbrennungsmotor und Synchrongenerator sind über eine elastische Kupplung miteinander verbunden. Somit ist die Ausgangsgröße des Verbrennungsmotormodells der zeitliche Drehzahlverlauf hinter der elastischen Kupplung. Dieser Drehzahlverlauf bildet anschließend die Eingangsgröße für das jeweils verwendete Synchrongeneratormodell. Über den Parameter n_{soll} wird die gewünschte Solldrehzahl des Verbrennungsmotors vorgegeben, ein Drehzahlregler hält die Motordrehzahl

auf einem vorgegebenen Wert, im Validierungsfall 1500 min^{-1} . Im untersuchten Szenario soll ein ohmscher Lastsprung von 9 kW auf 30 kW bei einem Zeitpunkt von 10 s simuliert werden. Anschließend kommt es zum Zeitpunkt von 20 s zu einer induktiven Lastaufschaltung von 12 kVar . Dabei werden alle drei Phasen symmetrisch belastet. Die Generatorausgangsspannung wird über einen PID-Regler auf einem Effektivwert von 325 V , gemittelt über alle drei Phasen, gehalten. Eine kapazitive Lastaufschaltung wird nicht untersucht, da diese in der Praxis sehr selten auftritt. Der gesamte Simulationszeitraum beträgt 25 s . Es werden die Verläufe der Netzfrequenz, des elektromagnetischen Momentes und der Generatorausgangsspannung zwischen dem Simulink®- und dem Simscape®-Modell verglichen. Die für beide Modelle verwendeten Parameter sind in der untenstehenden Tabelle aufgelistet¹:

Parameter	Parameterwert
R_a	$0,1810 \Omega$
p	2
R_{fd}	$0,1002 \Omega$
R_{kd}	$0,0664 \Omega$
R_{kq1}	$0,0292 \Omega$
R_{kq2}	$0,0079 \Omega$
L_d	$0,02529 \text{ H}$
L_l	$0,00095 \text{ H}$
L_{lkd}	$0,00139 \text{ H}$
$L_{fl,d}$	$0,00132 \text{ H}$
$L_{lf,d}$	$0,00190 \text{ H}$
L_q	$0,01114 \text{ H}$
L_{kq1}	$0,00069 \text{ H}$
L_{kq2}	$0,00248 \text{ H}$
L_0	$0,00009 \text{ H}$
Proportional Gain	1
Integral Gain	1
Differential Gain	0
$U_{\text{eff_soll}}$	325 V
N_{soll}	1500 min^{-1}
xL	$0,45 \Omega$

In Abbildung 8 ist der Verlauf der Netzfrequenz, wel-

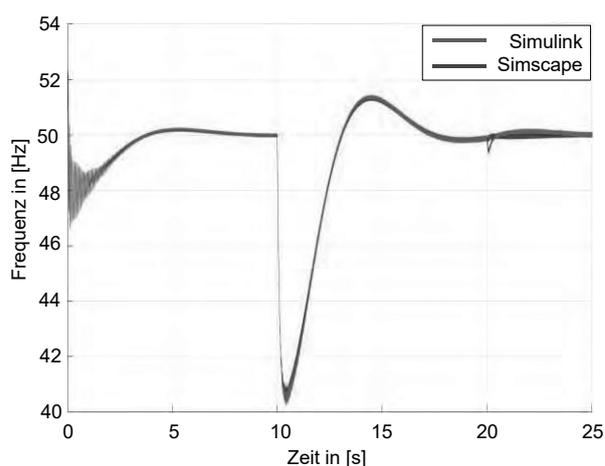


Abbildung 8: Vergleich der Netzfrequenz bei ohmscher und induktiver Lastzuschaltung

che proportional zur Motordrehzahl ist, für den beschriebenen Lastfall dargestellt. Durch die Vorgabe der Startwerte kommt es in den ersten Sekunden zu einem Einschwingverhalten. Ab ca. acht Sekunden wurden quasi stationäre Zustände erreicht. Verbrennungsmotor und Generator laufen mit einer Leistung von rund 9 kW bei 1500 min^{-1} , was aufgrund der Polpaarzahl einer Netzfrequenz von 50 Hz entspricht. Durch den ohmschen Lastanstieg auf 30 kW kommt es zu einem Einbruch der Netzfrequenz auf rund 40 Hz . Durch die Drehzahlregelung des Verbrennungsmotors schwingt die Netzfrequenz in der Folge leicht über und erreicht anschließend ihren Sollwert

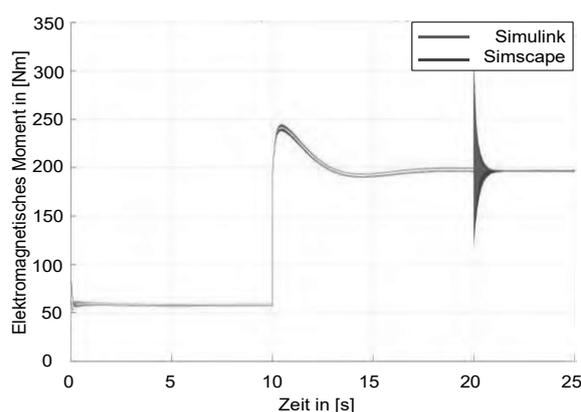


Abbildung 9: Vergleich des elektromagnetischen Momentes bei ohmscher und induktiver Lastzuschaltung

¹ Die Ermittlung der Parameterwerte geht nicht vollständig aus Datenblättern oder Messungen hervor, sondern muss teilweise aus Funktionsbeschreibungen oder Materialbedingungen ermittelt werden [4]. In diesem Fall wurden sie dem Beispielmodell aus MATLAB® Simscape entnommen.

von 50 Hz. Man kann erkennen, dass der Verlauf des Simulink®- Modells mit dem des Simscape®- Modells größtenteils übereinstimmt und ähnliche Verhaltensweisen zu beobachten sind. Abweichungen sind ausschließlich bei der Zuschaltung der induktiven Last zu beobachten.

Die Verläufe des elektromagnetischen Momentes sind in Abbildung 9 dargestellt. Dabei ist eine geringe Abweichung zwischen den zwei Modellen zu beobachten. Durch den ohmschen Lastsprung von 9 kW auf 30 kW kommt es zu einer Erhöhung des elektromagnetischen Momentes. Auch hier ist durch das Regelverhalten der beiden Systeme ein Überschwingen zu verzeichnen. Gleichzeitig erklärt der Momentanstieg den Drehzahl- und somit auch den Frequenzeinbruch. Durch die sprunghafte Erhöhung der Generatorlast, steigt auch die Lastanforderung an den Verbrennungsmotor. Durch die Trägheiten des Systems kann erst mit einer gewissen Verzögerung auf den Lastanstieg reagiert werden, die Drehzahl bricht dementsprechend im ersten Moment ein. Nach dem Einschwingvorgang erreicht das elektromagnetische Moment konstante Werte.

Die induktive Lastzuschaltung führt zu einer hochfrequenten gedämpften Schwingung des Momentes, welche nach einer kurzen Zeit abklingt, sodass das Moment wieder konstante Werte erreicht. Auch hier ist zu erkennen, dass die Verläufe der untersuchten Modelle eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen. Die Unterschiede während der induktiven Lastaufschaltung können gegebenenfalls durch eine Anpassung des ohmschen Widerstandes der induktiven Last verringert werden. Dieser konnte aus dem Simscape®- Lastenmodell nicht entnommen werden.

Abbildung 10 bildet die Spannungsverläufe ab. Die Generatorsollspannung wird nach dem anfänglichen Einschwingverhalten schnell erreicht. Durch die ohmsche Lastzuschaltung bricht die Spannung ein. Eine Erhöhung der Erregerspannung durch das Excitation- System führt dazu, dass die Sollgröße anschließend schnell erreicht wird. Auch die induktive Lastzuschaltung führt zu einer Störung des Generatorspannungsverlaufes. Die Generatorspannung übersteigt kurzzeitig den Sollwert. Beide Modelle reagieren annähernd gleich auf den untersuchten Lastfall. Die größten Unterschiede sind während der induktiven Lastzuschaltung zu verzeichnen.

4 Zusammenfassung

Mit dem hier vorgestellten Modell wurde eine wich-

tige Grundlage zur Erreichung des Projektziels geschaffen. Es wurden erfolgreich ein physikalisch-mathematisches Modell in MATLAB® Simulink® entwickelt und die Zusammenhänge der Signallückkopplung über die elektrischen Lasten beschrieben. Ein Vergleich von Berechnungsergebnissen mit einem Simscape®-Modell zeigt nur geringe Abweichungen, die besonders während

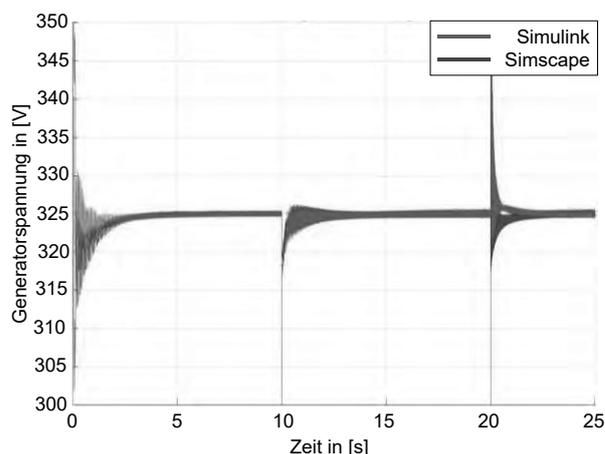


Abbildung 10: Vergleich der Generatorspannung amplitude bei ohmscher und induktiver Lastzuschaltung

der induktiven Lastzuschaltung deutlicher werden. Der erreichte Stand bietet eine gute Basis für Modellanpassungen und Modellerweiterungen. Diese richten sich nach den Messergebnissen, welche aus dem Referenzprüfaufbau gewonnen werden, der sich aktuell an der Hochschule Wismar im Aufbau befindet und im kommenden Jahr den Messbetrieb aufnimmt.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des öffentlich finanzierten Projektes SIDYN (FKZ: 13FH043PX8) erarbeitet. Die Autoren möchten sich beim BMBF für die Unterstützung des Vorhabens bedanken.

Nomenklatur

Parameter	Bedeutung	Einheit
C	äquivalente Kapazität der kapazitiven Last	[F]
Differential Gain	Differentialanteil PID-Regler	[-]
i_a, i_b, i_c	Strom (Phase ABC/UVW)	[A]
i_d	Strom d-Achse	[A]
i_{fd}	Erregerfeldstrom	[A]
i_{kd}	d-Dämpferkreisstrom	[A]

Parameter	Bedeutung	Einheit
i_{kq}	q1-Dämpferkreisstrom	[A]
i_{kq}	q2-Dämpferkreisstrom	[A]
Integral Gain	Integralanteil PID-Regler	[-]
i_q	Strom q-Achse	[A]
i_0	Strom 0-System	[A]
L_d	Induktivität d-Achse	[H]
L	äquivalente Induktivität der induktiven Last	[H]
L_{fd}	Gegeninduktivität Feldwicklung zu d-Dämpferkreis	[H]
L_l	Statorstreuintuktivität	[H]
L_{fd}	Induktivität Feldwicklung	[H]
L_{kd}	Induktivität d-Dämpferkreis	[H]
L_{kq1}	Induktivität q1-Dämpferkreis	[H]
L_{kq2}	Induktivität q2-Dämpferkreis	[H]
L_q	Induktivität q-Achse	[H]
L_0	Induktivität 0-System	[H]
n_{soll}	Solldrehzahl	[U/min]
P_{gen}	Generatorleistung	[W]
Proportional Gain	Proportionalanteil PID-Regler	[-]
R_a	Widerstand Ständerkreis	[Ω]
RLC_Lasten_abc	Lastvorgaben (induktiv, kapazitiv und ohmsch)	[kW]
T	elektromagnetisches Moment	[Nm]
u_a, u_b, u_c	Spannung (Phase ABC/UVW)	[V]
u_d	Spannung d-Achse	[V]
U_{eff_soll}	effektiver Generatorspannungssollwert	[V]
u_{fd}	Erregerfeldspannung	[V]
u_q	Spannung q-Achse	[V]
u_0	Spannung 0-System	[V]
xF	äquivalenter Widerstand der Erregerfeldleistung	[Ω]
xL	ohmscher Widerstand der induktiven Last	[Ω]
xR	äquivalenter Widerstand der ohmschen Last	[Ω]
ψ_d	magnetischer Fluss d-Achse	[Wb]
ψ_{fd}	magn. Fluss Feldwicklung	[Wb]
ψ_{kd}	magn. Fluss d-Dämpferkreis	[Wb]
ψ_{kq}	magn. Fluss q1-Dämpferkreis	[Wb]
ψ_{kq}	magn. Fluss q2-Dämpferkreis	[Wb]
ψ_q	magn. Fluss q-Achse	[Wb]

Parameter	Bedeutung	Einheit
ψ_0	magn. Fluss 0-Achse	[Wb]
ω_{mech}	Winkelgeschwindigkeit Verbrennungsmotor	[rad/s]
ω_e	Winkelgeschwindigkeit des elektrischen Drehfeldes	[rad/s]

Referenzen

- [1] Jörss D., Herrmann B., Fink C., „Modellierung des Betriebsverhaltens eines Diesel-Industriemotors als Stromerzeuger“, Virtueller ASIM Workshop der Fachgruppen STS/GMMS & EDU, <https://www.cea-wismar.de/asim2021/tagungsband/>, 2021
- [2] The MathWorks, Inc., <https://de.mathworks.com/help/physmod/sps/power-sys/ref/synchronousmachinesifundamental.html>, letzter Zugriff: 27.10.2021
- [3] Electrical Machinery Committee of the IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for Synchronous Generator Modelling Practice and Parameter Verification with Applications in Power Systems Stability Analysis*, IEEE Std 1110™-2019: New York, 2020
- [4] Electrical Machinery Committee of the IEEE Power and Energy Society, *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Including Acceptance and Performance Testing and Parameter Determination for Dynamic Analysis*, IEEE Std 115™-2019: New York, 2020
- [5] Kundur P., *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1993: 45 ff.
- [6] Ternes B., Feldkamp J., „Modellbasierte Implementierung einer Vektorregelung für Synchronmaschinen“, Hochschule Bochum, 2015
- [7] Mrugowsky H., *Drehstrommaschinen im Inselbetrieb*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
- [8] Binder A., *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Berlin: Springer-Verlag, 2017
- [9] Beckert U., „Modellierung und Regelung der permanent-erregten Synchronmaschine - Skriptum für Nichtelektrotechniker“, TU Bergakademie Freiberg, 2011
- [10] Spoljaric et al., „Synchronous Generator Modeling Using Matlab“, University of Osijek, Croatia
- [11] Deutz AG, https://www.deutz.com/produkte/motoren?tx_deutzenginde_pi1%5Baction%5D=list&tx_deutzengines_pi1%5BconBcontro%5D=Engine&tx_deutzengines_pi1%5Bengine%5D=133&cHash=b7163a33035a85badaeb40b605e06e13, letzter Zugriff: 27.10.2021
- [12] Johannes Hübner Fabrik elektrischer Maschinen GmbH, <https://www.huebner-giessen.com/produkte/motoren-generatoren/detail/synchrongenerator/>, letzter Zugriff: 27.10.2021