Einfacher und genauer

Autor(en): **Urech, Markus / Jenni, Felix**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **106 (2015)**

Heft 7

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856677

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Einfacher und genauer

Heuristisches Verfahren zur Bestimmung der Ersatzelemente einer Dreiphasen-Asynchronmaschine

Elektrische Antriebe verbrauchen rund die Hälfte des Schweizer Stroms. Die meisten dieser Antriebe sind mit Asynchronmaschinen ausgerüstet. Wenn diese korrekt ausgelegt und gut geregelt sind, können sie deutlich effizienter betrieben werden. Für eine hochstehende, dynamische Regelung einer Asynchronmaschine müssen jedoch ihre elektrischen Ersatzparameter wie Hauptinduktivität, Streuinduktivitäten und Rotorwiderstand bekannt sein. Ein neues Bestimmungsverfahren besticht durch Einfachheit und Genauigkeit.

Markus Urech, Felix Jenni

Zur Bestimmung der Ersatzelemente von Asynchronmaschinen können diverse Methoden eingesetzt werden. Die Standardverfahren brauchen einen Stromrichter oder eine Lastmaschine und eine Wellenbremse. Am Institut für Aerosol- und Sensortechnik der Fachhochschule Nordwestschweiz wurde ein Verfahren entwickelt, das diese Komponenten nicht mehr benötigt und das zudem Nichtlinearitäten wie mechanische Verluste und die Stromverdrängung in den Rotorstäben berücksichtigt. Das neue Verfahren ist einfacher und deutlich genauer als konventionelle Methoden.

Hinterlegtes Modell

Bild 1 zeigt das hinterlegte Modell eines Stranges der Asynchronmaschine. Im Gegensatz zur Standardform des stationären Ersatzschaltbildes ist dieses Modell zusätzlich mit den Elementen R2, R3, Lσ1 und Lσ2 ergänzt. Diese Elemente erlauben die Modellierung der Stromverdrängung im Rotorkreis. R2 und R3 werden als Konstanten modelliert, die Induktivitäten Lσ1 und Lσ2 ändern sich linear mit der Rotordrehzahl. Bei einer Zunahme der mechanischen Drehzahl verringert sich ihre Induktivität und somit die Impedanz der Kettenleitung, so wie dies auch bei der Stromverdrängung der Fall ist.

Der Identifikationsprozess

Das Ziel der Identifikation ist, die Elemente in **Bild 1** so zu bestimmen, dass sie den Prüfling in jedem Arbeitspunkt so exakt wie möglich beschreiben.

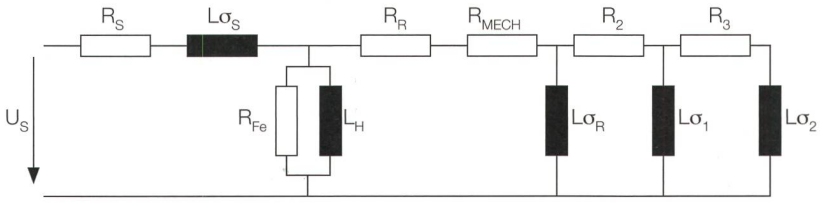
Messprozess

Die Identifikation der Ersatzelemente beruht auf den Messwerten von Statorstrom, Statorspannung und der Rotor-Drehzahl bei einem Hochlauf des Prüflings von Stillstand zu Leerlauf. Der Prüfling wird hierbei mit einer Schwungmasse belastet, wobei nur Daten aus dem dritten Quadranten der Drehmoment-Drehzahlebene verwendet werden, in dem alle elektrischen Grössen in einem quasistationären Zustand sind. Diese Bedingung ist zwingend notwendig, da nur ein stationäres Maschinenmodell hinterlegt ist. Transiente Einschalteffekte würden zu Fehlern in der Parameterbestimmung führen.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung der Daten im dritten Quadranten ist, dass Prelleffekte der Schaltgeräte vernachlässigt werden können. **Bild 2** zeigt die Drehmoment-Drehzahlebene bei einem Hochlauf der Maschine in den Quadranten QI, QIV, QIII. Bei jedem Schaltvorgang entstehen transiente Einschwingvorgänge im Statorstrom. Der Wechsel von Quadrant IV zu Quadrant III erfolgt aber ohne Schaltvorgang, entsprechend befinden sich bereits im Moment des Drehzahl-Nulldurchganges alle elektrischen Grössen in einem eingeschwungenen Zustand. Die mechanische Drehrichtung wird durch Umkehr der Phasenfolge gewechselt. Um trotz der direkten Umkehrung der Phasenfolge Maschinen grösserer Nennleistung zu identifizieren, wird ein Vorwiderstand seriell in den Statorkreis geschaltet, der die Stromaufnahme begrenzt und die Dynamik der Drehzahlumschaltung reduziert. Dies vereinfacht die Messung. Die Messgrössen werden aufgezeichnet, bis die inverse Leerlaufdrehzahl erreicht ist. Die Rohdaten werden anschliessend in Matlab importiert, wo die Filterung und die Identifikationsalgorithmen implementiert sind. Auf eine gute Filterung der Rohdaten wurde dabei grosses Gewicht gelegt. Sie wurde deshalb mit Waveletfiltern realisiert. Ein Waveletfilter basiert auf einer Wavelettransformation. Hierbei wird das Signal in eine Summe von Basisfunktionen zerlegt, die Rauschanteile gelöscht, und das Signal wieder zusammengesetzt.

Elementidentifikation

Es gibt diverse numerische Ansätze zur Bestimmung der elektrischen Ersatzparameter einer Maschine. Meist liefern populationsbasierte Suchalgorithmen wie Partical Swarm Optimization, Ant



R_S: Statorwiderstand	$L\sigma_S$, $L\sigma_R$: Stator-, Rotor-Streuinduktivität
R_{Fe}: Eisenverlustwiderstand	L_H: Hauptinduktivität
R_R: Rotorwiderstand	R_{MECH}: Mechanischer Widerstand
U_S: Statorspannung	R_2, R_3, $L\sigma_1$, $L\sigma_2$: Kettenleitung für Stromverdrängung

Bild 1 Hinterlegtes Modell.

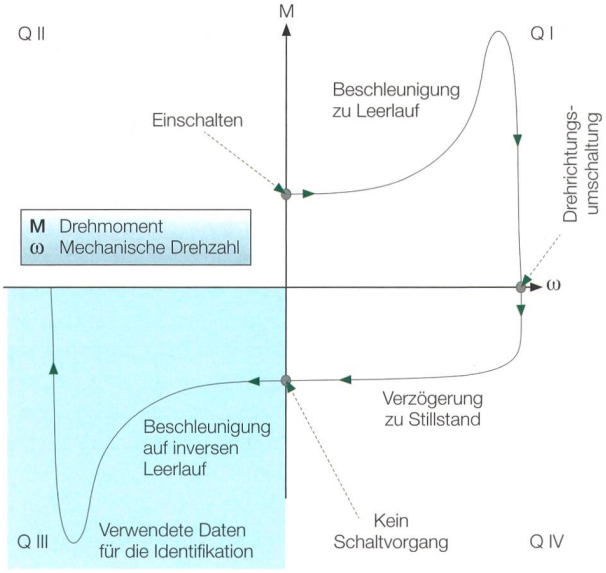


Bild 2 Drehmoment-Drehzahl-Ebene.

Colony Optimization oder genetische Algorithmen genauere Resultate als die einfacheren trajektorienbasierten Algorithmen wie Hill-Climbing, Tabu-Search oder Simulated Annealing. Der Vorteil der populationsbasierten Meta-Heuristiken besteht darin, dass nicht nur eine einzige Näherungslösung gesucht wird, sondern eine ganze Population von Lösungsmöglichkeiten. Genetische Algorithmen (GA) eignen sich besonders für Optimierungsprobleme, wo der Suchraum viele Extremstellen aufweist. Mit einem GA reduziert sich die Gefahr wesentlich, nur ein lokales Optimum zu finden, da der Suchraum gleichzeitig an mehreren verschiedenen Stellen untersucht wird. Deshalb werden die Ersatzelemente mit einem genetischen Algorithmus identifiziert. Die Identifikation einer Asynchronmaschine mit einem genetischen Algorithmus ist in dieser Form ein neuartiger Ansatz. Zwar gibt es bereits einige wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit der Identifikation von Asynchronmaschinen mit populationsbasierten Algorithmen beschäftigen, aber alle diese Verfahren benötigen einen Stromrichter. Zudem werden bei diesen Verfahren die Nichtlinearitäten wie Stromverdrängung, Sättigung, Eisenverluste und mechanische Verluste nicht berücksichtigt.

Bild 3 beschreibt die generelle Struktur des Lösungsalgorithmus zur Bestimmung der Ersatzelemente. Die gemessenen Grössen Statorstrom, Statorspannung und mechanische Drehzahl dienen als Eingangswerte für den Algorithmus. Der genetische Algorithmus passt die Parameter, also die gesuchten elektrischen Ersatzelemente im hinterlegten Modell, solange an, bis die Abweichung zwischen Modellvektor und Messvektor minimal ist. Das Modell stimmt dann mit den Messgrössen überein.

Genetischer Suchalgorithmus

Die Grundidee genetischer Algorithmen stützt sich auf die biologische Evolutionstheorie von Charles Darwin. Die natürliche Evolution hat im Verlaufe von Jahrmillionen komplexe Mechanismen für die Erhaltung und Weiterentwicklung von Arten und Lebewesen entwickelt. Diese Mechanismen werden bei einem genetischen Algorithmus angewendet und auf einem Rechner implementiert. Das heisst, die Asynchronmaschine wird wie ein Lebewesen beschrieben:

Individuum einer Population: das Set **[Rs Lσs LσR RFe LH RR RMECH R2, R3, Lσ1, Lσ2].**

Gene eines Individuums: die Werte **Rs Lσs LσR RFe LH RR RMECH R2, R3, Lσ1, Lσ2.**

Die Gene eines Individuums entsprechen also den gesuchten Parametern im Modell von **Bild 1**. Die Anzahl der verwendeten Individuen wird als Population bezeichnet. Innerhalb einer Population werden die drei Evolutionsfaktoren Rekombination, natürliche Selektion und Mutation simuliert.

Rekombination

Bei der Rekombination wird das genetische Material zweier Individuen neu kombiniert. In der Natur erfolgt die Rekombination, die Gründung einer neuen Generation, durch die biologische Reproduktion. Beim genetischen Algorithmus erfolgt die Rekombination durch einen Austausch der Gene zweier Individuen. Das heisst, zwei Individuen bilden ein neues Individuum. Welche Gene dabei ausgetauscht werden, erfolgt rein zufällig. Im folgenden Beispiel rekombiniert Individuum01 mit Individuum02 zu Individuum12:

$Individuum_{01}$ = [A B C D E]
$Individuum_{02}$ = [V U X Y Z]
$Individuum_{12}$ = [A B X D Z]

Natürliche Selektion

Individuen mit einer höheren Fitness vermehren sich stärker, und somit wird auch deren genetische Information stärker ausgebreitet. In der Natur erreicht ein Individuum eine höhere Fitness, wenn es, im Vergleich zu seinen Artgenossen, besser an die Umwelt angepasst ist. Beim genetischen Algorithmus erreicht ein Individuum dann eine gute Fitness, wenn das Modell die Maschine gut beschreibt. In **Bild 3** bedeutet das, dass die Differenz zwischen Modell- und Messgrössen minimal ist. Je besser die Fitness eines Individuums, desto häufiger rekombiniert das Individuum. Dabei können Individuen mit sehr hohen Fitnesswerten auch mehrmals rekombinieren.

Mutation

Beim Kopieren von Erbinformationen können Fehler auftreten. Die meisten

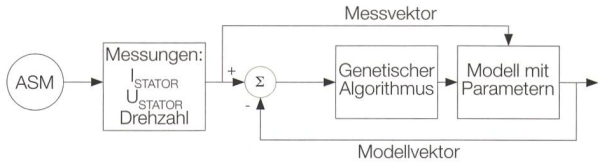


Bild 3 Prinzip des Suchalgorithmus.

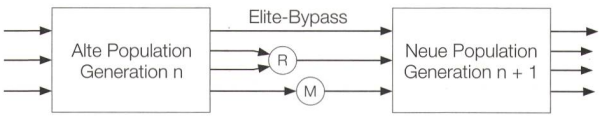


Bild 4 Austausch der Generationen.

Bilder: Urech

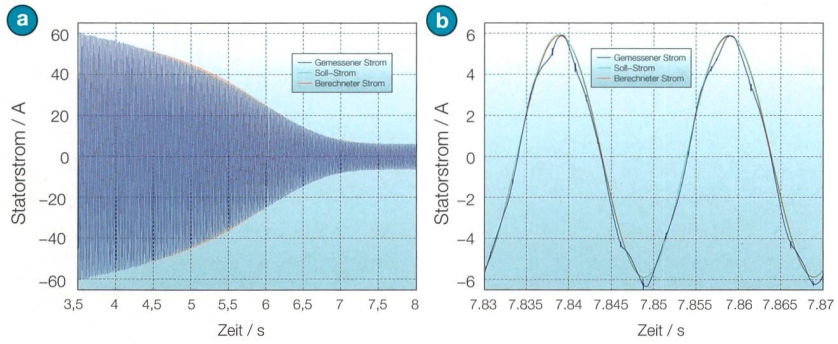


Bild 5 Stromverlauf im dritten Quadranten.

dieser Mutationen werden durch die Selektion wieder ausgelöscht, da sie keine entscheidenden Verbesserungen oder sogar Verschlechterungen mit sich bringen. Einige mutierte Individuen überleben jedoch und sorgen für neue positive Eigenschaften in der Population. In der Natur wird eine Mutation entweder zufällig oder durch äussere Einwirkungen wie radioaktive Strahlung oder chemische Substanzen ausgelöst. Beim genetischen Algorithmus wird eine Mutation durch zufällige Änderungen von Genen einzelner Individuen realisiert. Mutationen an einzelnen Genen verhindern somit, dass der Algorithmus frühzeitig in ein lokales Optimum konvergiert. Die Mutationen bringen also eine grössere Diversität in eine Population. Welche Individuen in welchen Genen mutieren, erfolgt rein zufällig.

Bild 4 zeigt den Ablauf des genetischen Algorithmus von einer Generation zur nächsten. Zu Beginn wird eine Population von Asynchronmaschinen mit einer Populationsgrösse zwischen 50 und 100 Maschinen gebildet. Diejenigen Individuen mit den besten Fitnesswerten, d.h. die Individuen, bei welchen die Differenzen zwischen Mess- und Simulationsgrössen minimal sind, werden unverändert in die nächste Generation übernommen (Elite-Bypass). Ein gewisser Anteil der neuen Generation setzt sich aus rekombinierten Individuen (R) zusammen. Schliesslich wird ein Teil der neuen Generation durch Mutation (M) gebildet. Im implementierten Algorithmus wird beim Wechsel von einer Generation zur nächsten, mit Ausnahme des Elite-Bypass, die ganze Generation ausgetauscht. Dieses Verfahren wird als Elitismus bezeichnet.

Der hier verwendete Elitismus bietet neben der relativ einfachen Programmierung den Vorteil, dass die Fitness von Generation zu Generation zunimmt. Mit jeder Generation verbessern sich somit die Gene (Ersatzelemente) des Modells, die Ersatzelemente beschreiben die Maschine immer besser.

Resultate

Mit diesem Verfahren und dem hinterlegten Modell von **Bild 1** können die Ersatzelemente der ASM mit einer sehr hohen Genauigkeit bestimmt werden. Das Verfahren wurde erfolgreich an einer 3-kW-Maschine und an einer 11-kW-Asynchronmaschine mit jeweils einem Polpaar getestet. **Bild 5** zeigt den gemessenen Statorstromverlauf einer 3-kW-Maschine im dritten Quadranten (blau), und den Statorstrom, der aus dem Modell resultiert (rot). Im Leerlauf (ab 7,5 s) sind die Einflüsse der Sättigung sichtbar. Da die Sättigung in diesem Modell nicht berücksichtigt ist, passt der genetische Algorithmus die Elemente so an, dass das Modell mit der phasenkorrigierten Grundschwingung des gemessenen Stromes (cyan) übereinstimmt. Das Modell in **Bild 1** kann noch beliebig ergänzt werden, allerdings mit dem Nachteil einer längeren Rechenzeit. So ist es insbesondere auch möglich, die mechanischen Verluste in einem zusätzlichen Element zu beschreiben. Allerdings haben die mechanischen Verluste einer Asynchronmaschine nur einen untergeordneten Einfluss auf ihr Betriebsverhalten.

Autoren

Markus Urech, El.-Ing. M.Sc. FH, hat dieses Verfahren als Masterthesis an der Fachhochschule Nordwestschweiz entwickelt. Er war Assistent für elektrische Energietechnik am Institut für Aerosol- und Sensortechnik der FHNW.
Prof. Dr. **Felix Jenni** ist Dozent für Elektrotechnik, Leistungselektronik, Antriebs- und Regelungstechnik.
Fachhochschule Nordwestschweiz, 5210 Windisch, felix.jenni@fhnw.ch

Electrosuisse / ETG-Kommentar

Bedeutung der Modellierung

Eine elektrische Maschine besteht aus zahlreichen mechanischen Komponenten wie Lager, Dichtungen und Kupplungen. Durch Wärme, Reibung oder Schwingungen können diese Komponenten den Wirkungsgrad reduzieren. Nach Erkenntnissen aus der Praxis führt immer noch über 1% der in Maschinen eingesetzten Energie zur Beschädigung von Komponenten. Jährlich betragen die Maschinenverluste etwa 100 GWh. Um diese unerwünschten Effekte zu reduzieren, ist die Modellierung und Charakterisierung der Verlustquellen von grosser Bedeutung.

Prof. Dr. **Joseph El Hayek,** ETG-Vizepräsident und Direktor HES-SO Wallis

Résumé

Plus simplement et plus précisément

Une méthode heuristique pour déterminer les éléments du schéma équivalent d'une machine asynchrone triphasée

La plupart des moteurs électriques utilisés en Suisse sont des machines asynchrones. Correctement dimensionnées et bien réglées, ces dernières consomment nettement moins d'électricité. Pour réaliser une régulation dynamique d'excellente qualité pour une machine asynchrone, il est toutefois nécessaire de connaître les paramètres de son schéma équivalent, tels que l'inductance principale, les inductances de fuite et la résistance du rotor. Diverses méthodes existent pour y parvenir. Un nouveau processus élaboré par la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse séduit par sa simplicité et sa précision. L'identification des éléments du schéma équivalent repose entièrement sur les valeurs mesurées du courant du stator, de sa tension et du régime mécanique lors du lancement de la machine chargée d'un volant d'inertie, passant de l'état d'arrêt à celui de marche à vide. Un recours à des composants supplémentaires, tels qu'un convertisseur, une deuxième machine de charge et un frein d'arbre, ne se révèle pas nécessaire. Un algorithme génétique permet de calculer les éléments du schéma équivalent. La méthode a été testée avec succès sur une machine de 3 kW et sur une machine asynchrone de 11 kW, à chaque fois avec une paire de bornes. No