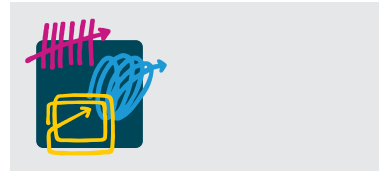


sps ipc drives



Elektrische Automatisierung
Systeme und Komponenten
Internationale Fachmesse und Kongress

Nürnberg, 25. – 27.11.2014
mesago.de/sps



Answers for automation



mesago
Messe Frankfurt Group

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Georg Frey, Walter Schumacher, Alexander Verl (Hrsg.):

SPS IPC Drives 2014

1. Auflage, 2014



Apprimus Verlag, Aachen, 2014

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen, Germany

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-272-1

Modellprädiktive dynamisch energieeffiziente Betriebsführung einer Asynchronmaschine

Prof. Dr.–Ing. Gernot Schullerus, Hochschule Reutlingen, Fakultät Technik

1. Einleitung

Die Steigerung der Energieeffizienz von Asynchronmaschinen ist ein in Forschung und Entwicklung viel diskutiertes Thema. Ursache dafür ist zum einen das Bestreben, die Asynchronmaschine im Vergleich mit der Synchronmaschine attraktiver zu machen und zum anderen die Vorschriften, die eine höhere Energieeffizienz fordern ebenso wie Anwender, die aus unterschiedlichen Gründen eine „Energiesparfunktion“ für die Asynchronmaschine wünschen.

Neben der baulichen Optimierung der Asynchronmaschine wurden in den letzten dreißig Jahren eine Reihe von Verfahren zur Betriebsführung der Asynchronmaschine entwickelt, deren Ziel es ist, bei gegebenen mechanischen Größen den Betriebspunkt mit dem größten Wirkungsgrad einzustellen. Wie der Überblick aus Schullerus (2013) und die darin angegebenen Literaturstellen zeigen, existieren zahlreiche Verfahren zur energieeffizienten Betriebsführung sowohl für U/f–Steuerverfahren als auch für feldorientierte Verfahren, die jeweils den bezüglich des Wirkungsgrads optimalen Betriebspunkt explizit berechnen oder durch ein Suchverfahren online ermitteln. Diese Verfahren sind für Anwendungen geeignet, bei denen die Asynchronmaschine im Wesentlichen in stationären Betriebspunkten betrieben wird, wie dies bei Pumpen, Lüftern oder Förderantrieben der Fall ist.

Bei Anwendungen, bei denen jedoch ständige Lastwechsel auftreten, können die für den stationären Fall entwickelten Verfahren dazu führen, dass der Energiebedarf insgesamt steigt. In Klenke und Hofmann (2011) wird dieser Fragestellung für einen Positioniervorgang nachgegangen und ein erster Lösungsansatz vorgestellt. Stumper et al. (2013) gibt einen kurzen Überblick über die bisherigen Optimierungsverfahren für dynamische Vorgänge und schlägt eine Methode vor, bei der eine suboptimale Trajektorie für dynamische Übergänge anhand einer parametrisierten Kurve berechnet wird.

Der vorliegende Beitrag geht einen anderen Weg. Dabei wird ein in Graichen et al. (2010) für dynamische Systeme vorgeschlagener modellprädiktiver Lösungsansatz auf das hier vorliegende Problem der energieeffizienten Betriebsführung von Asynchronmaschinen bei Lastwechseln angewendet.

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Modellgleichungen für die Asynchronmaschine sowie die Beziehungen für die Verluste in einer Asynchronmaschine angegeben. Daran anschließend wird im Abschnitt 3 das Optimierungsproblem formuliert und die Lösung nach Graichen et al. (2010) skizziert. Der Abschnitt 4 diskutiert die Auswahl der Verfahrensparameter bei der Anwendung und stellt die erzielten Ergebnisse dar.

2. Modellbildung

Für dynamische Anwendungen werden Asynchronmaschinen feldorientiert betrieben. Bei der häufig verwendeten rotorflussorientierten Darstellung ergibt sich ein besonders einfacher Zusammenhang zwischen der Rotorflussverkettung Ψ_2 und der als Magnetisierungsstrom bezeichneten Komponente I_{1d} des Statorstromzeigers einerseits sowie zwischen dem Motormoment M_M , der Polpaarzahl Z_p der Maschine, der Rotorflussverkettung und

der drehmomentbildenden Komponente I_{1q} des Statorstromzeigers andererseits:

$$\dot{\Psi}_2 = -\frac{R_2}{L_\mu} \Psi_2 + R_2 I_{1d}, \quad (1)$$

$$M_M = \frac{3}{2} Z_p \Psi_2 I_{1q}. \quad (2)$$

Die dabei verwendeten Motorparameter sind die Parameter des in der Abbildung 1 dargestellten Invers- Γ -Ersatzschaltbilds.

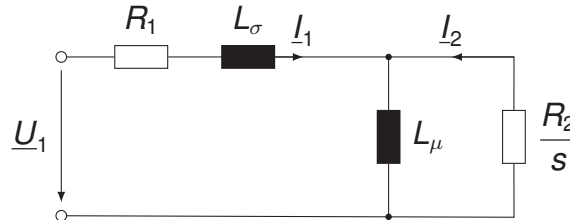


Abbildung 1: Invers- Γ -Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine

Die Beträge der darin verwendeten Zeiger für Spannungen und Ströme hängen davon ab, ob eine amplituden- oder eine leistungsinvariante Transformation der dreiphasigen Größen auf die entsprechenden Raumzeiger erfolgt. In diesem Beitrag wird von einer amplitudeninvarianten Transformation ausgegangen, so dass die Länge eines Zeigers der Amplitude der zugehörigen Sinusgröße entspricht.

Die in diesem Beitrag betrachteten Verluste sind die sogenannten Kupferverluste, die aufgrund der Widerstände der Statorwicklung und des Rotorkäfigs entstehen. Eisenverluste aufgrund von Wirbelströmen und der Ummagnetisierung der Bleche im Stator und im Rotor werden nicht berücksichtigt. Dies vereinfacht die vorliegende Darstellung, stellt aber keine grundsätzliche Einschränkung für die Anwendung des in diesem Beitrag beschriebenen Verfahrens dar. Für die Kupferverluste gilt

$$P_V = \frac{3}{2} R_1 I_1^2 + \frac{3}{2} R_2 I_2^2. \quad (3)$$

Mit den Komponenten I_{1d} , I_{1q} des Statorstromzeigers bzw. I_{2d} und I_{2q} des Rotorstromzeigers erhält man aus (3)

$$P_V = \frac{3}{2} (R_1 I_{1d}^2 + R_1 I_{1q}^2 + R_2 I_{2d}^2 + R_2 I_{2q}^2). \quad (4)$$

Bei Rotorflussorientierung gilt unter Berücksichtigung von $\Psi_{2d} = \Psi_2$

$$I_{2q} = -I_{1q}, \quad (5)$$

$$I_{2d} = -I_{1d} + \frac{1}{L_\mu} \Psi_2. \quad (6)$$

Durch Einsetzen von (5) und (6) in (4) ergibt sich die Beziehung für die Verlustleistung

$$\begin{aligned} P_V &= \frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1q}^2 + \frac{3}{2} R_1 I_{1d}^2 + \frac{3}{2} R_2 \left(\frac{1}{L_\mu} \Psi_2 - I_{1d} \right)^2 \\ &= \frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1q}^2 + \frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1d}^2 + \frac{3 R_2}{2 L_\mu^2} \Psi_2^2 - 3 \frac{R_2}{L_\mu} \Psi_2 I_{1d}. \end{aligned} \quad (7)$$

Mit den Beziehungen (1) und (6) erhält man den Zusammenhang

$$R_2 I_{2d} = -R_2 I_{1d} + \frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 = -\dot{\psi}_2$$

und damit in einem stationären Betriebspunkt für die Verlustleistung

$$P_{V,\text{stationär}} = \frac{3}{2} R_1 I_{1d}^2 + \frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1q}^2 \quad (8)$$

die aus der Literatur bekannte Beziehung.

3. Optimierungsproblem

Ausgangspunkt der Überlegungen in diesem Beitrag ist die folgende Aufgabenstellung: Die Asynchronmaschine wird in feldorientierter Regelung bei Rotorflussorientierung mit einer bestimmten Drehzahl und einem gegebenen Drehmoment betrieben. Zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgt ein Sprung des Drehmomentsollwerts. Gesucht ist ein Verlauf für die Einstellung der Prozessgrößen, so dass die Verlustenergie während des Übergangsvorgangs möglichst gering wird. Es wird angenommen, dass die Dynamik der Stromregler vernachlässigt werden kann.

Die Vernachlässigung der Stromreglerdynamik ist insofern gerechtfertigt, als deren Zeitkonstanten in der Praxis im Bereich bis zu einer Millisekunde liegen, die Zeitkonstanten für die Übergangsvorgänge nach einem Lastsprung jedoch in der Größenordnung der Rotorzeitkonstanten $T_2 = \frac{L_\mu}{R_2}$ und damit oberhalb von 50ms liegen.

Einen Sollwertsprung für das Drehmoment erhält man bei einer in der Praxis üblichen rampenförmigen Änderung der Drehzahl. Bei einer Änderung des Lastmoments hängt der Verlauf des Drehmomentsollwerts von der Dynamik des Drehzahlregelkreises ab. In Stumper et al. (2013) wird *PT1*-Verhalten angenommen. Tatsächlich erhält man bei einem Lastsprung des Drehmoments und einem als *PI*-Regler ausgeführten Drehzahlregler für den Verlauf des Drehmomentsollwerts *PT2*-Verhalten. Die obige Annahme bezüglich des Verlaufs des Drehmomentsollwerts gilt also nur für dynamisch eingestellte Drehzahlregler.

3.1 Konkrete Aufgabenstellung

Für ein gegebenes Drehmoment M_M erhält man aus (2) den dafür erforderlichen drehmomentbildenden Strom I_{1q} in Abhängigkeit von der Rotorflussverkettung ψ_2 zu

$$I_{1q} = \frac{2}{3} \frac{M_M}{Z_p \psi_2} \quad (9)$$

Nach dem Einsetzen von (9) in (7) hängt für ein konstantes M_M die Verlustleistung P_V nur noch von der Zustandsgröße ψ_2 und der sie beeinflussenden Stellgröße I_{1d} ab.

Die konkrete Aufgabenstellung lautet also:

Zum Zeitpunkt $t = 0$ erfolgt aus einem stationären Zustand der Maschine ein Sollwertsprung von M_{M0} auf M_{M1} . Minimiere das Gütemaß

$$J = \int_0^T \left(\frac{3}{2} (R_1 + R_2) I_{1d}^2 + \frac{2}{3} (R_1 + R_2) \frac{M_M^2}{Z_p^2 \psi_2^2} + \frac{3}{2} \frac{R_2}{L_\mu^2} \psi_2^2 - 3 \frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 I_{1d} \right) dt \quad (10)$$

unter der Nebenbedingung (1) mit den Randbedingungen $\psi_2(0) = \psi_{20}$ und $\psi_2(T) = \psi_{21}$.

Entsprechend der Aufgabenstellung ist die Maschine vor dem Drehmomentsprung und nach dem Abklingen der Übergangsvorgänge jeweils in einem stationären Zustand. Die Berechnung der Werte ψ_{20} und ψ_{21} kann daher durch Minimierung der Verlustleistung im stationären Zustand bei gegebenem Motormoment erfolgen. Man erhält nach kurzer Rechnung aus (8) unter Berücksichtigung des stationären Zustandes in (1) den Zusammenhang

$$\psi_{2,\text{stationär}} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{M_M L_\mu}{Z_p} \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1}}} \quad (11)$$

und kann daraus mit M_{M0} und M_{M1} die jeweiligen Randwerte bestimmen.

Für die Lösung dieses Optimierungsproblems kann das Hamiltonverfahren eingesetzt werden. Unter Verwendung des Kozustandsvektors λ erhält man die Hamiltonfunktion

$$\begin{aligned} H(I_{1d}, \psi_2, \lambda) = & \frac{3}{2}(R_1 + R_2)I_{1d}^2 + \frac{2}{3}(R_1 + R_2) \frac{M_M^2}{Z_p^2 \psi_2^2} + \frac{3}{2} \frac{R_2}{L_\mu^2} \psi_2^2 - 3 \frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 I_{1d} \\ & + \lambda \left(-\frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 + R_2 I_{1d} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

und daraus die notwendigen Bedingungen für ein Optimum

$$\frac{\partial H}{\partial I_{1d}} = 3(R_1 + R_2)I_{1d} - 3 \frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 + \lambda R_2 = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \psi_2} = -\frac{4}{3}(R_1 + R_2) \frac{M_M^2}{Z_p^2 \psi_2^3} + 3 \frac{R_2}{L_\mu^2} \psi_2 - 3 \frac{R_2}{L_\mu} I_{1d} - \lambda \frac{R_2}{L_\mu} = -\dot{\lambda} \quad (14)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = -\frac{R_2}{L_\mu} \psi_2 + R_2 I_{1d} = \dot{\psi}_2 .$$

Prinzipiell ergibt sich die Lösung des Optimierungsproblems aus der Lösung dieses Differentialgleichungssystems. Allerdings ist nur eine numerische Lösung möglich. Als ein möglicher Lösungsansatz bietet sich das modellprädiktive Verfahren aus Graichen et al. (2010) an, dessen Grundzüge im Folgenden kurz erläutert werden.

3.2 Näherungsweise modellprädiktive Lösung

Bei einem modellprädiktiven Verfahren wird in jedem Abtastschritt t_k das Optimierungsproblem für einen vorgegebenen Prädiktionshorizont T_p gelöst. Das Ergebnis ist eine zeitdiskrete Trajektorie für die Steuergröße. Bei der vorliegenden Aufgabenstellung wäre dies eine Folge von Sollwerten für I_{1d} . Der erste Wert dieser Folge wird als Stellgröße verwendet. Anschließend wird die Vorgehensweise für den Abtastschritt t_{k+1} wiederholt.

Der Grundgedanke des in Graichen et al. (2010) vorgeschlagenen Verfahrens besteht darin, das Optimierungsproblem iterativ und nur näherungsweise bis zu einer Anzahl an vorgegebenen Iterationsschritten zu lösen. Die resultierende Lösung ist für die praktische Anwendung nach bisherigen Erfahrungen ausreichend nahe am gewünschten Optimum (vgl. Graichen et al. (2010)). Durch die Begrenzung auf eine feste Anzahl an Iterationen kann die Rechenzeit begrenzt und vorhersagbar gemacht werden.

Für das in diesem Beitrag vorgestellte Problem ergibt sich demnach die folgende prinzipielle Vorgehensweise:

1. Für $t \in [t_k, t_k + T_P]$ wird eine Steuertrajektorie $I_{1d}(t)$ festgelegt und die daraus resultierenden Wert für $\Psi_2(t)$ mit (1) ermittelt.
2. Iteration zur Lösung des Optimierungsproblems
 - (a) Durch Rückwärtsintegration von (14) werden die Werte $\lambda(t)$ ermittelt.
 - (b) Mit diesem Ergebnis und (13) wird die Suchrichtung für die iterative Verbesserung der Lösung ermittelt. Mit einer ebenfalls berechneten Schrittweite wird eine verbesserte Trajektorie $I_{1d}(t)$ berechnet. Eine Begrenzung der Steuergröße kann dabei berücksichtigt werden.
 - (c) Mit der verbesserten Trajektorie $I_{1d}(t)$ wird eine erneute Prädiktion für $\Psi_2(t)$ durchgeführt.
 - (d) Wurde die Anzahl an gewünschten Iterationen erreicht, ist die neue Steuertrajektorie berechnet. $I_{1d}(t_k)$ wird als Stellgröße für den Prozess verwendet und das Verfahren beginnt erneut für t_{k+1} . Andernfalls beginnt die nächste Iteration mit 2(a).

Die obige Beschreibung des Verfahrens beschränkt sich auf wesentliche Grundzüge der Methode. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte und eine Diskussion der Hintergründe ist in Graichen et al. (2010) gegeben.

4. Anwendung des Verfahrens

Nach der Darstellung der prinzipiellen Vorgehensweise bei dem hier eingesetzten modellprädiktiven Verfahren steht in diesem Abschnitt die Anwendung im Vordergrund. Dabei wird zunächst im Abschnitt 4.1 der Einfluss einiger Parameter des modellprädiktiven Verfahrens auf das Ergebnis an einem einfachen Modell untersucht. Der Abschnitt 4.2 zeigt dann die in der Simulation mit einem drehzahlgeregelten Motor erzielten Ergebnisse.

4.1 Einfluss der Verfahrensparameter

Für die Anwendung wird ein bereits verfügbares Softwarepaket GRAMPC der Autoren von Käpernick et al. (2014) verwendet. Darin sind die Algorithmen für die einzelnen Schritte des Verfahrens bereits implementiert. Der Anwender des Verfahrens muss allerdings noch die Verfahrensparameter festlegen. In Käpernick et al. (2014) werden zahlreiche Parameter angegeben, mit denen Einstellungen zur Prädiktion, zur Integration, zur Stellgrößenbegrenzung oder Schrittweitensteuerung in der Iteration vorgenommen werden können. Im vorliegenden Beitrag werden die Parameter

- Prädiktionshorizont T_P ,
- die maximale Anzahl der Iterationen $N_{I_{\max}}$ zur Verbesserung der Lösung des Optimierungsproblems sowie
- die Anzahl N_{hor} der Datenpunkte, die bei der Vorgabe der Steuertrajektorie im Schritt 1, bei der Prädiktion der Rotorflussverkettung und der Rückwärtsintegration berechnet werden,

betrachtet. Jeder dieser Parameter beeinflusst die Rechenzeit des Verfahrens. Ein sinnvoller Wert für die Wahl des Prädiktionshorizonts ist offensichtlich der Wert

$$T_P = 3T_2 = 3 \frac{L_\mu}{R_2},$$

da nach drei Rotorzeitkonstanten entsprechend (1) die Rotorflussverkettung Ψ_2 und damit auch die Verlustleistung P_V ihren stationären Endwert erreicht. Im stationären Zustand kann der bezüglich der Verluste optimale Wert für I_{1d} mit den bekannten Verfahren aus der Literatur (vgl. z.B. Schullerus (2013)) ermittelt werden.

Für die Analyse des Einflusses der beiden anderen Parameter $N_{I_{\max}}$ bzw. N_{hor} wird für jeweils einen der beiden Parameter zuerst ein möglichst kleiner Wert ausgewählt und anschließend dieser Wert so lange erhöht, bis sich durch die Erhöhung keine sichtbare Verbesserung mehr ergibt.

Die Analyse erfolgt auf der Grundlage eines sehr einfachen Modells, bei dem nur die Dynamik der Rotorflussverkettung Ψ_2 nach (1) berücksichtigt wird. Der drehmomentbildende Strom I_{1q} wird aus der aktuellen Rotorflussverkettung und dem Drehmoment mit (9) ermittelt. Für die Berechnung von I_{1d} werden zwei Verfahren verwendet und gegenübergestellt:

- Verfahren 1: Stationär optimaler Wert für Ψ_2 nach (11)
Die nach (11) berechnete stationär optimale Flussverkettung wird über einen Flussregler eingestellt. Die Stellgröße dieses Reglers ist der Magnetisierungsstrom I_{1d} .
- Verfahren 2: Modellprädiktives Verfahren nach Abschnitt 3.2

Für beide Verfahren werden mit (7) jeweils die Verlustleistungen und aus deren Integration die Verlustenergien W_{V1} für Verfahren 1 bzw. W_{V2} für das modellprädiktive Verfahren 2 während des Übergangsvorgangs bestimmt.

Die Abbildung 2 zeigt den Vergleich für $\Delta W_{V12} = W_{V1} - W_{V2}$, wenn jeweils $N_{I_{\max}}$ bzw. N_{hor} verändert wird. Die in der Optimierung und dem vereinfachten Modell verwendeten Motor-daten beschreiben eine Asynchronmaschine mit einer Nennleistung von 370W. Als Lastsprung wird ein Drehmomentsprung von 100% auf 25% des Motornennmoments M_N verwendet.

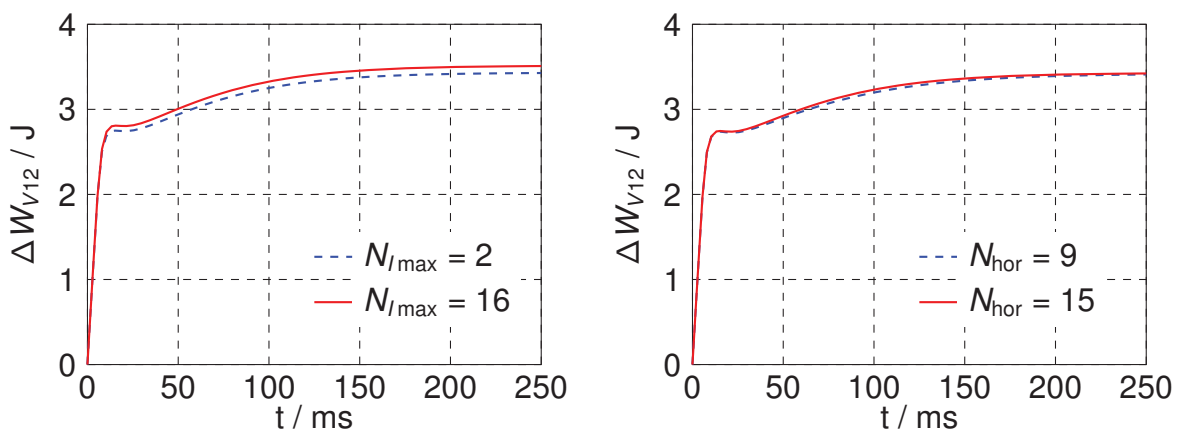


Abbildung 2: Änderung von $N_{I_{\max}}$ (links) bzw. N_{hor} (rechts) bei einem Lastsprung von 100% auf 25% M_N

Die Ergebnisse zeigen, dass in allen Fällen die Verlustenergie W_{V2} bei der Anwendung des modellprädiktiven Verfahrens geringer ist, als die zum Vergleich herangezogene Energie W_{V1} . Ebenso wird deutlich, dass bereits mit einer Anzahl von $N_{I_{\max}} = 2$ Iterationen ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden kann. Auch die Anzahl der in der Prädiktion verwendeten Datenpunkte kann mit $N_{\text{hor}} = 9$ klein gehalten werden.

Dies gilt auch für die in der Abbildung 3 gezeigten Simulationsergebnisse für einen Lastsprung von 25% auf 100% M_N . Die Abweichung zwischen den Ergebnissen für $N_{\text{hor}} = 9$

und $N_{hor} = 15$ ist zwar deutlich sichtbar aber dennoch vertretbar gering. Die Anzahl der Iterationen hat auch in diesem Fall keinen nennenswerten Einfluss.

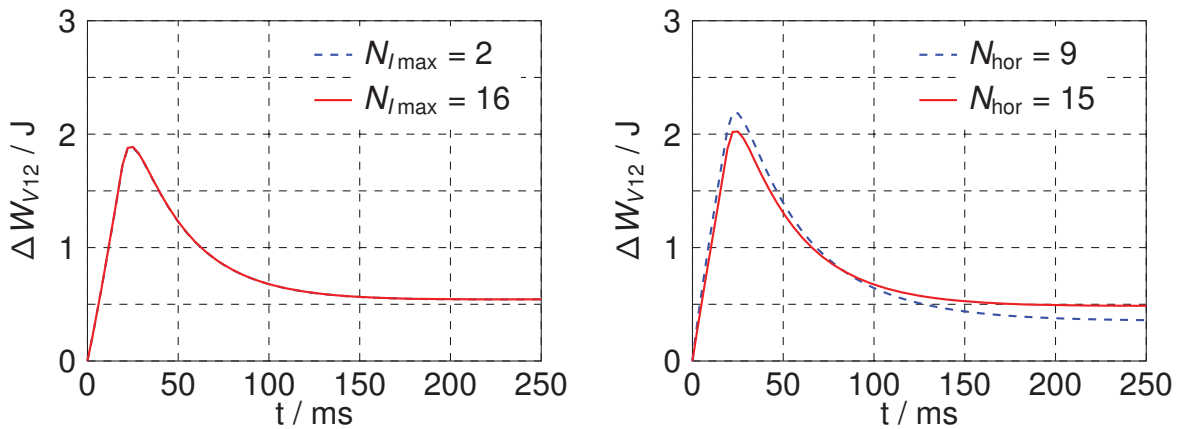


Abbildung 3: Änderung von $N_{I_{max}}$ (links) bzw. N_{hor} (rechts) bei einem Lastsprung von 25% auf 100% M_N

Die gleiche Analyse wird mit den Motordaten zweier weiterer Motoren mit einer Nennleistung von 4kW bzw. 11kW durchgeführt. Für alle drei Motoren erhält man bezüglich der Wahl der beiden Parameter vergleichbare Ergebnisse. Somit erscheint eine Wahl

$$N_{I_{max}} = 2 \quad N_{hor} = 9$$

als sinnvoll. Die Verläufe, die mit diesen beiden Werten für den Magnetisierungsstrom und den drehmomentbildenden Strom bei einem Lastsprung von 100% auf 25% M_N erzielt wurden, werden in der Abbildung 4 dargestellt.

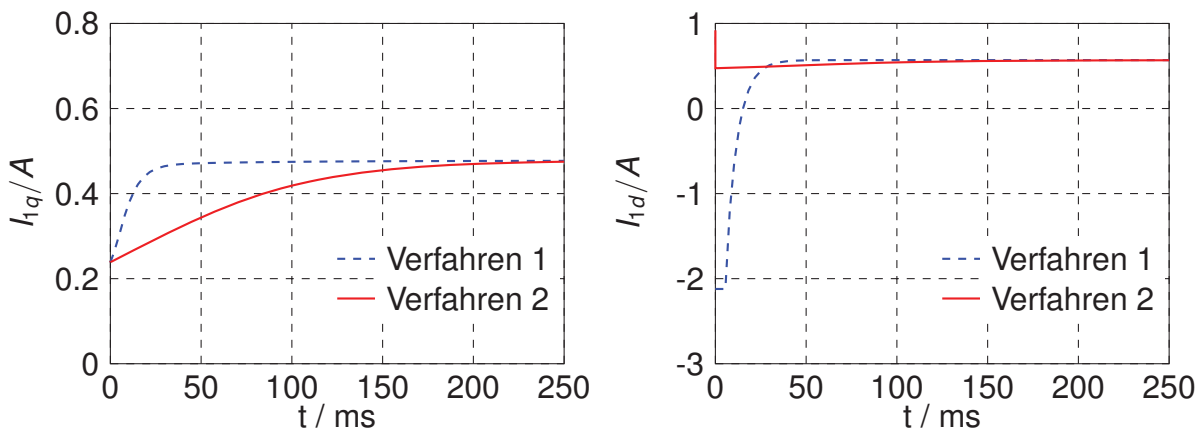


Abbildung 4: Vergleich der Ströme bei einem Lastsprung von 100% auf 25% M_N

Der Vergleich der mit dem Verfahren 1 bzw. dem modellprädiktiven Verfahren 2 erzielten Ströme zeigt, warum das modellprädiktive Verfahren ein besseres Ergebnis erzielt: Der Flussregler versucht, den neuen stationär optimalen Wert für die Rotorflussverketung möglichst rasch durch einen betragsmäßig hohen Magnetisierungsstrom einzustellen und erreicht dabei kurzzeitig seine Stellgrenze. Dies ist der wesentliche Beitrag zu den kurzfristig höheren Verlusten. Dies bedeutet, dass ein dynamisch eingestellter Flussregler bezüglich der Verluste bei Lastwechseln nachteilig ist.

4.2 Simulation im Drehzahlregelkreis

Mit den im vorhergehenden Abschnitt festgelegten Parametern wird nun eine Simulation mit einem Motormodell mit Strom- und Drehzahlregelkreis durchgeführt. Die Motordaten des Modells sind die Daten einer Asynchronmaschine mit 370W Nennleistung, die bereits bei der Untersuchung im Abschnitt 4.1 verwendet wurden.

In der Abbildung 5 werden die Simulationsergebnisse für eine Drehzahlrampe angegeben. Dabei wirkt auf den Motor dauernd ein Lastmoment von 25% M_N . Die Rampe wurde so gewählt, dass während des Beschleunigungsvorgangs im Zeitraum $t \in [0 \ 200]$ ms insgesamt ein Drehmoment von 100% M_N gefordert wird. Es werden die Verfahren 1 und 2 aus dem Abschnitt 4.1 und zusätzlich noch ein weiteres

Verfahren 3: Konstanter Fluss für optimalen Betrieb bei 100% M_N

verglichen.

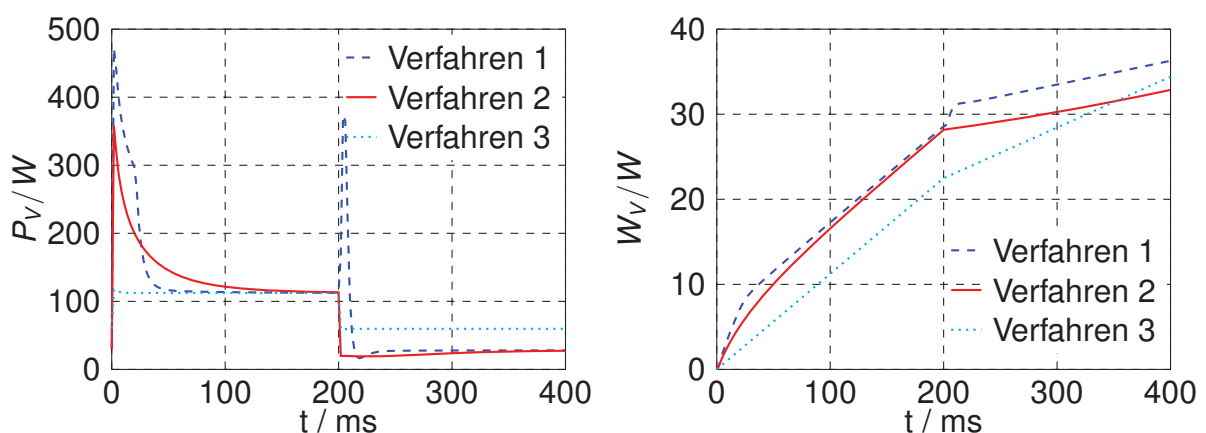


Abbildung 5: Leistung und Energie bei einer Drehzahlrampe

Der Vergleich der aus der Verlustleistung berechneten Verlustenergien ausgehend von einer Energie $W_V(t = 0) = 0$ im rechten Teil der Abbildung 5 zeigt, dass zum Zeitpunkt $t = 200$ ms nach dem Lastsprung von 25% M_N auf 100% M_N die Verlustenergie W_{V3} für das Verfahren 3 geringer ist, als in den anderen beiden Fällen. Dies entspricht der Erwartung, da bei den Verfahren 1 und 2 aufgrund der niedrigeren Flussverkettung vor dem Lastsprung zusätzlich noch Fluss aufgebaut werden muss. Die Energien W_{V1} und W_{V2} sind im Bereich $t \in [100 \ 200]$ ms nahezu gleich. Eine detaillierte Analyse zeigt, dass in diesem Bereich W_{V2} geringfügig kleiner ist als W_{V1} .

Zum Zeitpunkt $t = 200$ ms ist der Drehzahl Sollwert erreicht und das Drehmoment sinkt wieder auf den Wert von 25% M_N , der dem konstanten Lastmoment entspricht. Aus den Verläufen wird deutlich, dass ab diesem Zeitpunkt die Verfahren 1 und 2 ein besseres Verhalten aufweisen. Das modellprädiktive Verfahren 2 führt hier und über den gesamten betrachteten Zeitraum zu den besten Ergebnissen.

Bei einem Vergleich über die gesamte Betriebsdauer der Maschine erhält man für die Verlustenergie beim Verfahren 3 einen deutlich höheren Wert, da die Verlustleistung im stationären Betrieb bei niedrigen Drehmomenten deutlich höher ist, als bei den Verfahren 1 und 2. Berücksichtigt man zusätzlich noch die Verlustenergie vor dem Lastsprung, so weisen die Verfahren 1 und 2 bereits bei einer Zeitdauer der stationären Belastung mit 25% M_N von weniger als 100ms vor dem Lastsprung eine geringere Verlustenergie auf, als das Verfahren 3.

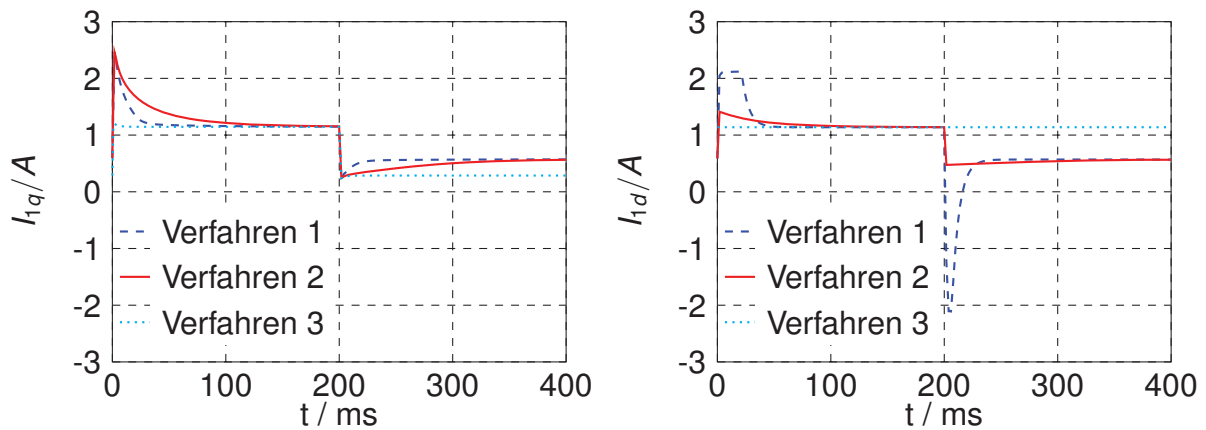


Abbildung 6: Stromverläufe bei einer Drehzahlrampe

Die Verläufe der Stromkomponenten I_{1q} und I_{1d} sind in der Abbildung 6 dargestellt. Hier ergibt sich für die Verfahren 1 und 2 das prinzipiell gleiche Verhalten, wie bei der Simulation mit dem vereinfachten Modell aus dem Abschnitt 4.1. Die Vernachlässigung der Dynamik der Stromregler und des Drehzahlreglers erscheint also gerechtfertigt.

5. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, wie ein bereits bekanntes Verfahren zur modellprädiktiven Regelung zur Optimierung der Energieeffizienz einer Asynchronmaschine im dynamischen Betrieb eingesetzt werden kann. Dazu wurden zunächst die Beziehungen für die Verlustleistung bei alleiniger Berücksichtigung der Kupferverluste im dynamischen Betrieb hergeleitet. Ausgehend davon wurde das Optimierungsproblem formuliert, der Einfluss von Parametern des modellprädiktiven Verfahrens auf das Optimierungsergebnis untersucht und damit Vorschlagswerte für diese Parameter ermittelt. Der Vergleich mit zwei weiteren Verfahren ohne Optimierung bzw. mit Optimierung allein für stationäre Arbeitspunkte zeigt die Vorteile des modellprädiktiven Verfahrens.

Literatur

- Knut Graichen, Markus Egretberger und Andreas Kugi. Ein suboptimaler Ansatz zur schnellen modellprädiktiven Regelung nichtlinearer Systeme. *at-Automatisierungstechnik*, 58(8):447–456, 2010.
- Bartosz Käpernick, Knut Graichen und Tilman Utz. GRAMPC documentation, 2014.
- F. Klenke und Wilfried Hofmann. Energy-Efficient Control of Induction Motor Servo Drives With Optimized Motion and Flux Trajectories. In *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Seiten 1–7, 2011.
- Gernot Schullerus. Auswahl des Verfahrens zum energieoptimalen Betrieb von Asynchronmaschinen. In *Tagungsband, sps ipc drives 2013*, Seiten 339–348, 2013.
- Jean-Francois Stumper, Alexander Dötlinger und Ralph Kennel. Loss Minimization of Induction Machines in Dynamic Operation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(3):726–735, 2013.