

Direct Torque Control für den verlustoptimalen Betrieb eines Permanentmagnet-Synchronmotors mit eingebetteten Magneten

Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with Respect to Optimal Efficiency

Dipl.-Ing. Tobias Grote, Dipl.-Wirt. Ing. Michael Meyer, Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Universität Paderborn, 33098 Paderborn, Germany

Kurzfassung

Wegen ihrer guten Eigenschaften in Bezug auf Leistungs- und Drehmomentdichte sowie ihres hohen Wirkungsgrads kommt Permanentmagnet-Synchronmotoren mit in den Rotor eingelassenen Magneten (interior permanent magnet synchronous motors, IPMSM) eine immer größere Bedeutung zu. Durch die Integration der Permanentmagnete in den Rotor ist der magnetisch wirksame Luftspalt entlang des Rotorumfangs nicht konstant, was zu einer stark asymmetrischen Induktivitätsverteilung führt. Dies hat zur Folge, dass zusätzlich zu dem bekannten Hauptdrehmoment ein Reluktanzdrehmoment auftritt, welches für den verlustoptimalen Betrieb berücksichtigt werden muss. In diesem Beitrag wird die dafür notwendige Erweiterung des bekannten Regelungskonzeptes „Direct Torque Control“ (DTC) vorgestellt, die den verlustoptimalen Betrieb von IPMSM sowohl im Ankerstell- als auch im Flussschwäcbereich, unter Berücksichtigung von Strom- und Spannungsgrenze, gewährleistet.

Abstract

Due to their high torque and power per volume ratio, interior permanent magnet synchronous motors (IPMSM) are widespread electrical machines for traction drive applications. IPMSM exhibit a significant degree of saliency along the rotor circumference. Thus, in order to exploit the full potential of an IPMSM drive, it is mandatory to utilize the reluctance torque. In this contribution a Direct Torque Control (DTC) structure is proposed which ensures optimal efficiency at low rotor speed as well as at flux weakening operation. The proposed structure utilizes two Look Up Tables (LUT) for the determination of efficiency-optimal set values for flux and torque. The LUT are generated based on measurement results. So, they do already account for saturation effects.

1 Einleitung

Angesichts steigender Kraftstoffkosten und strenger umweltpolitischer Richtlinien kommt neuen Konzepten und Entwicklungen für sparsame und umweltfreundliche Fahrzeugantriebe eine immer größere Bedeutung zu. Eine viel versprechende Technologie sind Fahrzeuge mit Hybridantrieb. Bei Hybridfahrzeugen besteht der Antrieb aus einer Kombination von Elektro- und Verbrennungsmotor. Durch diese Kombination ergeben sich Freiheitsgrade, die für eine Verbesserung hinsichtlich Schadstoffemission und Verbrauch genutzt werden können.

Wegen ihrer guten Eigenschaften in Bezug auf Leistungs- und Drehmomentdichte sowie ihres hohen Wirkungsgrads sind Permanentmagnet-Synchronmotoren (PMSM) mit in den Rotor eingelassenen

Magneten für den Einsatz im Antriebsstrang eines Hybridfahrzeugs hervorragend geeignet. Solche Motoren weisen konstruktionsbedingt allerdings eine stark asymmetrische Induktivitätsverteilung entlang des Rotorumfangs auf. Dies führt dazu, dass neben dem bekannten Hauptdrehmoment, das ausschließlich von der Bestromung quer zur Magnetisierungsrichtung abhängt, auch ein Reluktanzdrehmoment auftritt. Dieses Reluktanzdrehmoment hängt auch von der Stromkomponente in Magnetisierungsrichtung ab und muss für einen wirkungsgradoptimalen Betrieb solcher PMSM berücksichtigt werden. Daher wird ein Regelungsverfahren benötigt, welches die Wirkung von Haupt- und Reluktanzdrehmoment sowohl im Ankerstell- als auch im Flussschwäcbereich optimal ausnutzt [1-7].

In diesem Beitrag wird die dafür notwendige Erweiterung des bekannten Regelungskonzeptes „Direct Torque Control“ (DTC) [8] vorgestellt. Bei diesem Regelungsverfahren werden das Drehmoment und der Ständerfluss als Sollgrößen vorgegeben.

Um den verlustoptimalen Betrieb sowohl im Ankerstell-, als auch im Flussschwäcbereich zu gewährleisten, wurde eine Sollwertvorgabe entworfen, die mit Hilfe zweier „Look Up Table“ (LUT) die jeweils wirkungsgradoptimale Kombination von Fluss und Drehmoment vorgibt.

2 Motormodell

Die Gleichungen für das Maschinenmodell werden in rotorfesten d,q -Koordinaten angegeben. Diese Darstellungsform hat bei Motoren mit asymmetrischer Induktivitätsverteilung ($L_d \neq L_q$) den zusätzlichen Vorteil, dass die Stranginduktivitäten in diesem mit dem Polrad rotierenden Koordinatensystem unabhängig vom Polradwinkel sind.

Für die Komponenten der Ständerspannungen gilt

$$\begin{aligned} u_d &= R i_d + L_d \dot{i}_d - \omega_{RS} L_q i_q \\ u_q &= R i_q + L_q \dot{i}_q + \omega_{RS} L_d i_d + \omega_{RS} \psi_p \end{aligned} \quad (1)$$

Das Drehmoment ergibt sich zu

$$T = \frac{3}{2} p (\psi_p \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d i_q), \quad (2)$$

wobei der erste Summand das Hauptdrehmoment, der zweite das Reluktanzdrehmoment angibt.

Der Arbeitsbereich des Synchronmotors wird von zwei Größen begrenzt. Zum einen darf zum Schutz des Motors und des Wechselrichters ein maximaler Ständerstrom nicht überschritten werden, zum anderen ist die maximal verfügbare Wechselrichterspannung begrenzt. Für den maximal zulässigen Strom gilt

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{\max}^2. \quad (3)$$

Die begrenzende Spannung ergibt sich im stationären Betrieb unter Vernachlässigung der ohmschen Verluste zu

$$\omega_{RS} \sqrt{(\psi_p + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \leq \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} = U_{\max} \quad (4)$$

Aus dieser Beziehung folgt, dass das Produkt aus Drehfrequenz und dem Fluss im Motor den Spannungsbedarf im oberen Drehzahlbereich bestimmt. Bei gegebener Drehzahl kann die Spannungsgrenze somit auch als Grenze des maximalen Flusses

$$\psi = \sqrt{(\psi_p + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2} \leq \psi_{\max}(\omega_{RS}) = \frac{U_{dc}}{\sqrt{3} \omega_{RS}} \quad (5)$$

interpretiert werden.

Diese Flussbegrenzung lässt sich in der d,q -Ebene als Ellipse darstellen. Für verschiedene Drehzahlen ergibt sich eine Schar von Ellipsen, deren gemeinsamer Mittelpunkt bei

$$i_d = -\frac{\psi_p}{L_d}, i_q = 0 \quad (6)$$

liegt. In **Bild 1** sind die Ellipsen (magenta) des maximal verfügbaren Flusses für verschiedene Drehfrequenzen $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$ bei konstanter Zwischenkreisspannung dargestellt.

u_d, u_q	Spannungen im d,q -Koordinatensystem
i_d, i_q	Ströme im d,q -Koordinatensystem
R	Statorwiderstand
L_d, L_q	d - bzw. q -Komponente der Statorinduktivität
ω_{RS}	Elektrische Kreisfrequenz des Rotors
ψ_p	Hauptfluss der Permanentmagneten
I_{\max}	Maximal zulässiger Statorstrom
U_{dc}	Zwischenkreisspannung
p	Polpaarzahl

Tabelle 1 Formelzeichen

3 Verlustoptimaler Betrieb von IPMSM

Da mit steigendem Gesamtstrom auch die ohmschen Verluste der Maschine steigen, muss für den verlustoptimalen Betrieb die Stromzeigerlänge minimiert werden. Für ein gegebenes Drehmoment ist die Stromzeigerlänge dort minimal, wo die Kurve konstanten Drehmoments den kleinsten Abstand zum Ursprung des Koordinatensystems hat. Einige Kennlinien konstanten Drehmoments, welche hyperbelartig verlaufen, sind in **Bild 1** blau dargestellt. Für den verlustoptimalen Betrieb des IPMSM ist demzufolge eine d -Komponente ungleich Null erforderlich. Diese verlustoptimalen Arbeitspunkte ergeben dann die Kennlinie maximalen Drehmoments bei minimalem Gesamtstrom, welche in **Bild 1** grün dargestellt ist und im Folgenden als Optimierungskennlinie bezeichnet wird.

3.1 Betrieb im Ankerstellbereich

Solange das geforderte Drehmoment in einem Arbeitspunkt auf der Optimierungskennlinie gestellt werden kann, sollte der Motor in diesem verlustoptimalen Bereich betrieben werden. Der Bereich

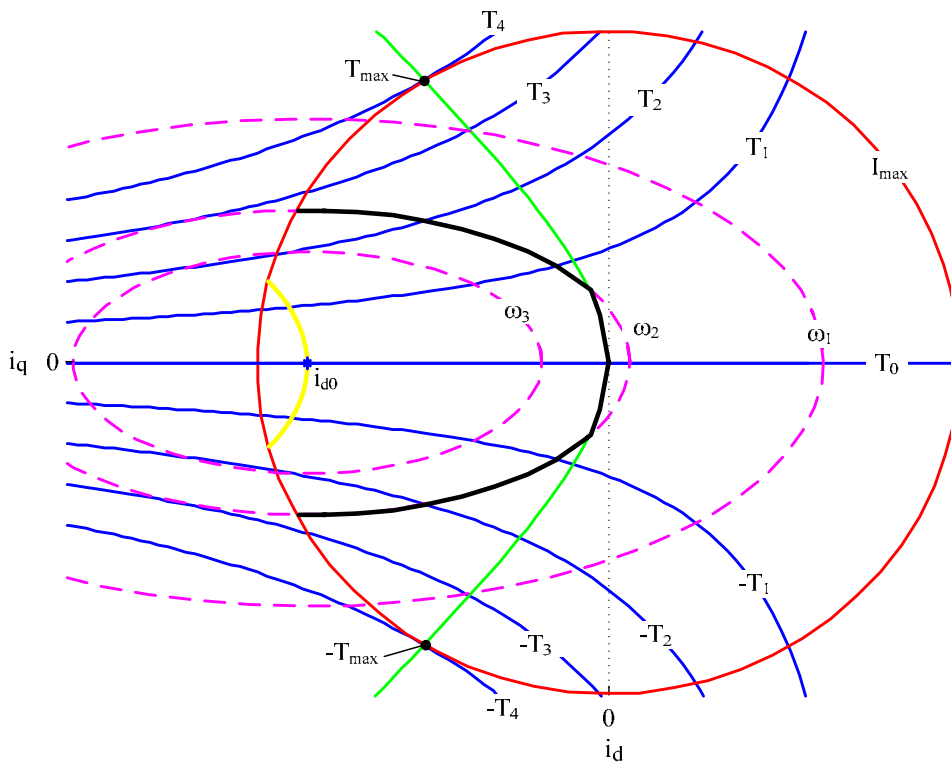


Bild 1 Charakteristische Kennlinien eines PMSM mit eingebetteten Magneten
 Rot: Strombegrenzung
 Magenta: Aus der Fluss- bzw. Spannungsbegrenzung resultierende Ellipsen
 Grün: Maximales Drehmoment bei minimalem Gesamtstrom im Ankerstellbereich
 Schwarz: Verlauf der Arbeitspunkte bei konstanter Drehfrequenz ω_2 und verlustoptimalem Betrieb
 Gelb: Maximales Drehmoment an der Spannungsgrenze im oberen Flussschwächbereich

innerhalb der Stromgrenze, in dem dieses ohne Einschränkung möglich ist, wird als Ankerstellbereich bezeichnet.

3.2 Betrieb im Flussschwächbereich

Nach (5) wird der maximal verfügbare Fluss durch die angelegte Zwischenkreisspannung und die Drehzahl bestimmt. Außerhalb der entsprechenden Flussellipsen können keine Arbeitspunkte eingestellt werden. Daher ist das erreichbare Drehmoment auf der Optimierungskennlinie bei hoher Drehzahl begrenzt (vgl. **Bild 1**). Ein so großes Drehmoment wie im Ankerstellbereich kann demnach im oberen Drehzahlbereich nicht mehr erreicht werden. Um das Drehmoment auch im oberen Drehzahlbereich größtmöglich auszunutzen, muss der Arbeitspunkt auf den Schnittpunkt der entsprechenden Flussellipse und der Kurve konstanten Drehmoments verschoben werden. Dazu muss, gegenüber dem Arbeitspunkt auf der Optimierungskennlinie, der q -Strom abgesenkt und der d -Strom weiter (als zur optimalen Ausnutzung des Reluktanzdrehmoments erforderlich) in den negativen Bereich verschoben werden. Diese Betriebsart

wird als Fluss- oder Feldschwächung bezeichnet. Mit dieser Maßnahme steigt der Gesamtstrom und damit auch die dadurch verursachten Verluste. Der Flussschwächbereich wird unterteilt in einen unteren und einen oberen Flussschwächbereich. Im unteren Flussschwächbereich wird das maximal mögliche Drehmoment an der Stromgrenze erreicht. Im oberen Flussschwächbereich wird das maximale Drehmoment erreicht, ohne an die Stromgrenze zu gelangen (in **Bild 1** gelb gekennzeichnet).

4 Verlustoptimale Sollwertvorgabe beim DTC- Regelverfahren

4.1 DTC-Regelverfahren

Das DTC-Regelverfahren beruht darauf, in Abhängigkeit der Regeldifferenzen von Drehmoment und magnetischem Fluss den jeweils optimalen Spannungsraumvektor auszuwählen, um so das Drehmoment und den Fluss gezielt und direkt, ohne Zwischenschaltung einer Pulsweitenmodulation (PWM), zu beeinflussen. Das Drehmoment wird

dabei über die Amplitude und den Winkel des Statorflusszeigers geregelt. Mit den sechs aktiven Spannungsraumzeigern $U_1 \dots U_6$ (vgl. **Bild 2a**), die der Pulswechselrichter schalten kann, stehen sechs diskrete Raumzeigerrichtungen zur Verfügung, in die eine Änderung des Statorflusses erzwungen werden kann. Wird einer der Nullspannungszeiger U_0 oder U_7 geschaltet, verändert sich der Flusszeiger näherungsweise nicht. Die Änderung des Drehmoments hängt in diesem Fall von der Winkeländerung des Permanentflusszeigers ψ_p ab, und diese wiederum von der mechanischen Drehung des Rotors. Mit der richtigen Wahl eines Spannungsraumzeigers kann also eine Änderung des Ständerflusszeigers und somit auch eine Drehmomentänderung bewirkt werden (vgl. **Bild 2**).

In welcher Weise sich der Flussbetrag und das Drehmoment durch Aufschalten bestimmter Spannungsraumzeiger ändern, hängt von der Lage des Ständerflusszeigers im ständerfesten Koordinatensystem ab. Daher wird die α , β -Ebene in sechs Sektoren unterteilt. Für jeden Sektor müssen die vier Spannungsraumzeiger bestimmt werden, die in **Bild 2b** gekennzeichneten Funktionen erfüllen.

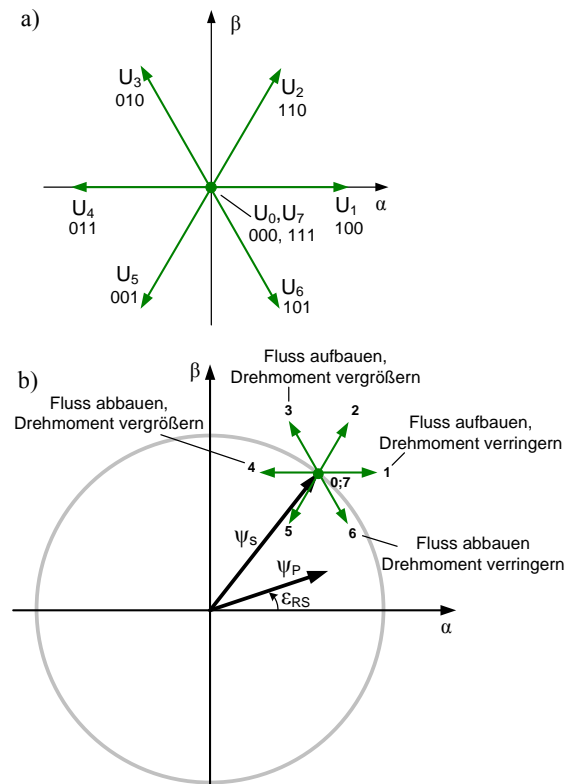


Bild 2 a) Mögliche schaltbare Spannungsraumzeiger mit zugehörigen Steuerworten
b) Auswahl des optimalen Spannungsraumzeigers bei positiver Drehrichtung

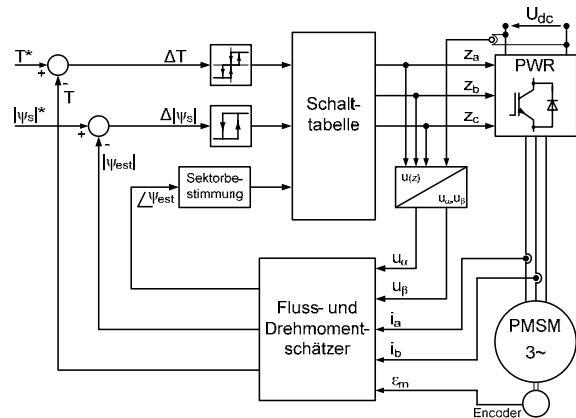


Bild 3 Blockschaltbild des DTC-Regelverfahrens

4.2 Reglerstruktur

Ausgehend von der Funktionsweise lässt sich die Reglerstruktur für das DTC-Regelverfahren entwerfen (**Bild 3**). Als Sollwerte dienen der Regelung sowohl das Drehmoment als auch der Betrag des Flusszeigers. Diese sollen mit hysteresebefahenen, schaltenden Reglern innerhalb von vorgegebenen Toleranzbändern gehalten werden.

Das Kernstück einer DTC-Reglerstruktur bildet eine Schalttabelle, in dem die resultierenden Kombinationen aus Sektoren und Spannungsraumzeigern hinterlegt sind. Neben den Signalen von Drehmoment- und Flussregler wird als weitere Eingangsgröße der Sektor benötigt, in dem sich der Flusszeiger befindet. Ausgegeben werden binäre Steuersignale, welche als Stellbefehle für die Ventile des Pulswechselrichters dienen.

Da die benötigten Istwerte von Fluss und Drehmoment sowie die Phasenlage des Flusszeigers nicht direkt zu messen sind, kommt ein Fluss- und Drehmomentschätzer zum Einsatz.

4.3 Sollwertvorgabe für verlustoptimalen Betrieb

Basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 3 lässt sich die DTC-Reglerstruktur um eine Sollwertvorgabe erweitern, welche mit Hilfe von zwei Kennlinien (LUT) den verlustoptimalen Betrieb im Ankerstell- und Flussschwäcbereich unter Berücksichtigung der Strom- und Spannungsgrenzen erlaubt. Die Struktur der resultierenden Sollwertvorgabe zeigt **Bild 4**.

Als Sollgröße wird nur das Drehmoment vorgegeben. Der Sollfluss wird im Ankerstellbereich der ersten Kennlinie $\psi_{opt}(T)$, die die Kombinationen aus

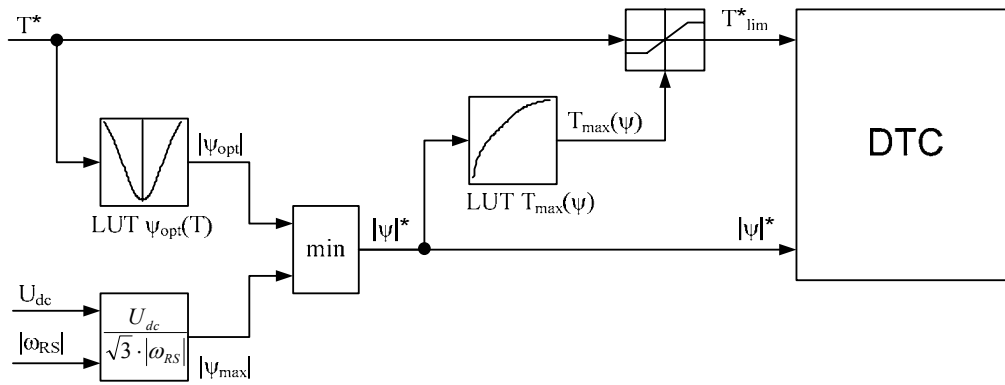


Bild 4 Vorgabe der verlustoptimalen Sollwerte für Ständerfluss und Drehmoment

Drehmoment und Fluss auf der Optimierungskennlinie enthält, entnommen. Kann der optimale Sollfluss auf Grund der begrenzten Spannung nicht mehr erreicht werden, wird als Sollwert der maximal verfügbare Fluss $|\psi_{max}|$ vorgegeben. Die zweite Kennlinie $T_{max}(\psi)$ enthält das maximal stellbare Drehmoment in Abhängigkeit des Flusses und stellt sicher, dass durch die Begrenzung des Soll Drehmoments die Stromgrenze eingehalten wird.

4.4 Erstellen der Kennlinien

Um eine möglichst effektive Ausnutzung des PMSM zu erreichen, sollten auch Sättigungseffekte bei der Erstellung der benötigten Kennlinien berücksichtigt werden. Da keine Informationen über die Sättigung der Induktivitäten vorlagen, wurde das Kennfeld des verwendeten PMSM in einer Messreihe aufgenommen.

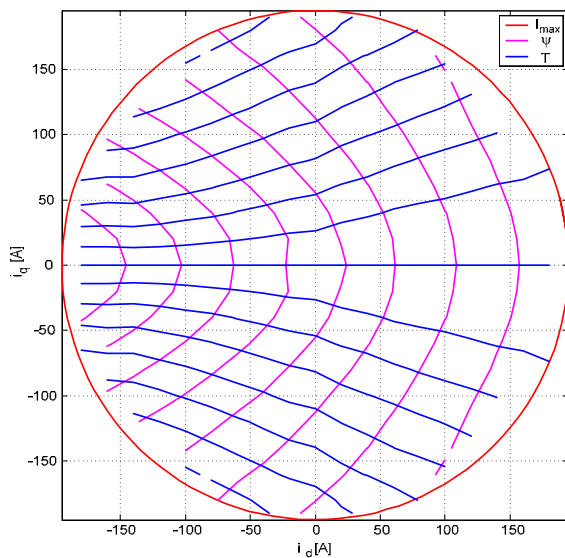


Bild 5 Aus Messung resultierendes Kennlinienfeld des PMSM

Dazu wurden über den gesamten zulässigen Arbeitsbereich in der i_d, i_q -Ebene die Spannungskomponenten u_d und u_q , sowie das Drehmoment bei konstanter Drehzahl aufgezeichnet und das resultierende Kennlinienfeld generiert (**Bild 5**).

Für die Kurven konstanten Drehmoments wurden die Arbeitspunkte kleinsten Gesamtstroms ermittelt. Diese sind die verlustoptimalen Arbeitspunkte im Ankerstellbereich und ergeben die Optimierungskennlinie. Jedem dieser verlustoptimalen Arbeitspunkte konnte aus dem ermittelten Kennfeld der zugehörige Flusswert zugeordnet werden. Diese Kombinationen ergeben die Kennlinie aus **Bild 6**, die in dem LUT $\psi_{opt}(T)$ hinterlegt ist.

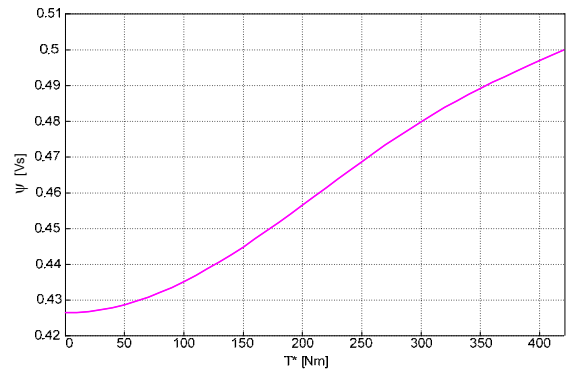


Bild 6 Implementierte Kennlinie $\psi_{opt}(T)$

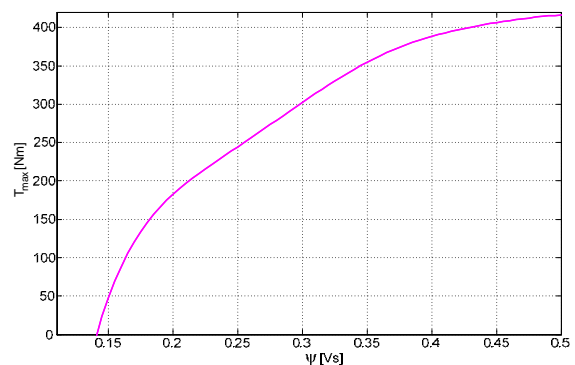


Bild 7 Implementierte Kennlinie $T_{max}(\psi)$

Das maximal erreichbare Drehmoment ist durch den Schnittpunkt von Optimierungskennlinie und Stromgrenze gegeben. Da der verwendete Motor keinen oberen Flussschwäcbereich aufweist, liegt der Arbeitspunkt für das maximal erzielbare Drehmoment im gesamten Flussschwäcbereich auf dem Schnittpunkt der entsprechenden Flussellipse und der Stromgrenze. Dieser Zusammenhang von Fluss und Drehmoment an der Stromgrenze lässt sich ebenfalls dem aufgenommenen Kennfeld entnehmen und als Kennlinie darstellen (**Bild 7**). Hieraus entstand der LUT $T_{\max}(\psi)$.

5 Messergebnisse

Abschließend wurde die Funktion der Regelung an einem Versuchsstand umfassend getestet und das Verhalten intensiv untersucht. Die Implementierung der Regelung erfolgte auf einem Industrie-PC mit echtzeitfähiger Hardware der Firma dSPACE GmbH. In **Bild 8 bis Bild 11** sind einige Ergebnisse aus den praktischen Versuchen dargestellt, die das dynamische Verhalten der Regelung dokumentieren.

Polpaarzahl	p	3
Statorwiderstand	R	$0,06\Omega$
Permanentfluss	ψ_p	427mVs
d -Komponente der Statorinduktivität (ohne Sättigung)	L_d	$1,51\text{mH}$
q -Komponente der Statorinduktivität (ohne Sättigung)	L_q	$2,97\text{mH}$
Maximaler Statorstrom	I_{\max}	196A

Tabelle 2 Motorparameter

5.1 Transientes Betriebsverhalten

Die Dynamik und die stationäre Genauigkeit lassen sich mit Hilfe einer Sprungantwort untersuchen. Dazu wurde zunächst bei einer Drehzahl von 1000min^{-1} zum Zeitpunkt $t=0$ ein Drehmoment-sollwertsprung von 0Nm auf 150Nm aufgeschaltet. Betrachtet werden die Verläufe des Drehmoments, des Flusses und der Ströme (**Bild 8**).

Bei dem Verlauf der Ströme fällt auf, dass die d -Komponente nach Aufschalten des Sollwertsprungs zunächst positiv ist, was zu einem negativen Reluktanzdrehmoment führt. Der Grund hierfür ist der Sprung des Flusssollwertes, der aus dem Drehmomentsollwertsprung resultiert. Um den höheren geforderten Fluss zu erreichen, stellt sich zunächst der positive Strom in d -Richtung ein, der zu dem negativen Reluktanzdrehmoment führt. Dieses Verhalten wirkt sich zwar nachteilig auf die Dreh-

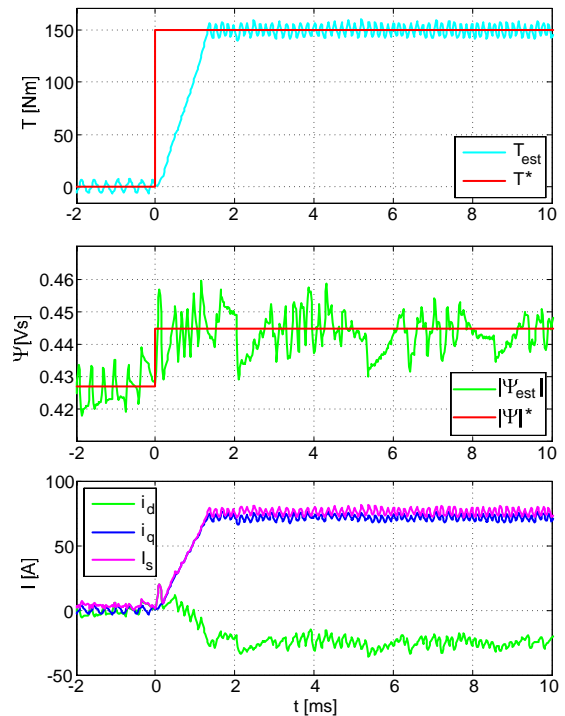


Bild 8 Sprungantwort bei $n=1000\text{min}^{-1}$

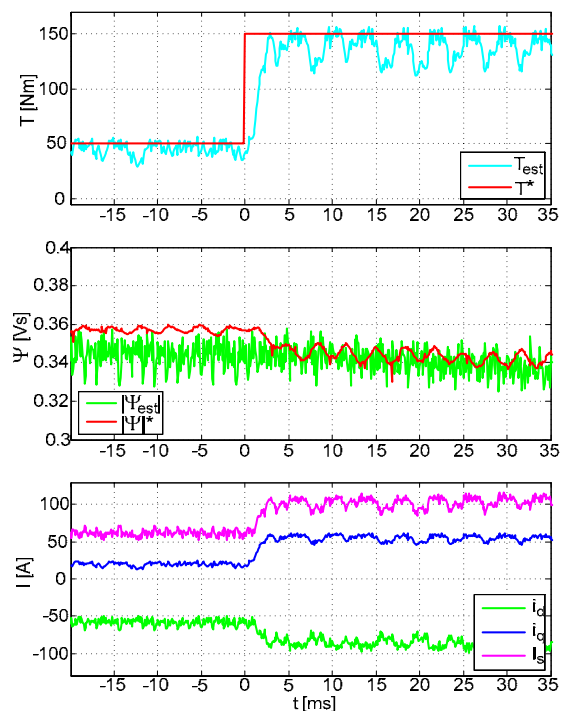


Bild 9 Sprungantwort bei $n=2300\text{min}^{-1}$

momentdynamik aus. Da sich die Amplitude des Flusses jedoch schneller als das Drehmoment einstellt, wird sichergestellt, dass stets genügend Fluss im Motor ist, um das geforderte Drehmoment stellen zu können. Ein so genanntes „Wegkippen“ des Motors kann somit ausgeschlossen werden. Dennoch zeigt sich die ausgezeichnete Drehmomentdynamik des DTC-Regelverfahrens. Das ge-

geschätzte Drehmoment erreicht sehr schnell den Sollwert und schwankt danach um diesen. Neben der Drehmomentwelligkeit im Toleranzband tritt kein Überschwingen auf. Die Welligkeit im Schätzwert zeigt sich auch beim Flussverlauf. Dieses für das DTC-Regelverfahren typische Verhalten ist auf die hysteresebehafteten Zweipunktregler zurückzuführen. Im zeitlichen Mittel entsprechen die Istwerte den Sollwerten, weshalb die stationäre Genauigkeit gegeben ist.

Bild 9 zeigt das transiente Verhalten der Regelung im Flussschwäcbereich. Dazu wurde bei einer Drehzahl von 2300min^{-1} der Drehmomentsollwert sprunghaft von 50Nm auf 150Nm geändert. Ein solcher Betrieb ist bei kaskadierten Stromregelungen problematisch, da an der Spannungsgrenze keine Stellreserve zur Verfügung steht. Beim DTC-Regelverfahren wird erwartet, dass ein Drehmomentsollwertsprung im Flussschwäcbereich zu keinen Problemen führt, da durch die direkte Vorgabe des verfügbaren Flusses die Spannungsgrenze stets eingehalten wird. Im Vergleich mit der Drehmomentsteilheit aus **Bild 8** erfolgt der Drehmomentanstieg im Flussschwäcbereich etwas langsamer. Die Welligkeit im Sollfluss, der sich aus (5) ergibt, ist auf Schwankungen der Zwischenkreisspannung zurückzuführen.

5.2 Stationäres Betriebsverhalten

Bei der Messung aus **Bild 10** wurde bei einer konstanten Drehzahl von 500min^{-1} das Drehmoment als

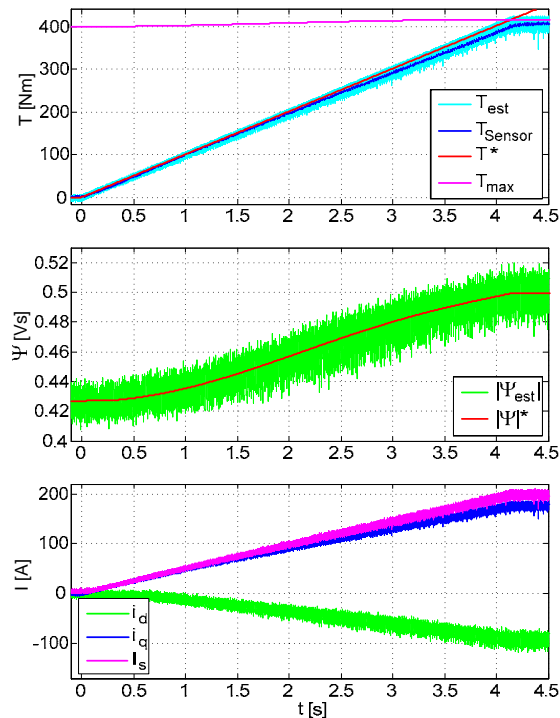


Bild 10 Verhalten bei $n=500\text{min}^{-1}$

Führungsgröße in Form einer Rampenfunktion vorgegeben. Dargestellt sind die Verläufe für Drehmoment, Fluss und Ströme. Der Flusssollwert folgt wie gefordert dem Drehmoment nach der Funktion aus **Bild 6**. Durch die Vorgabe von Drehmoment und Fluss ist der Arbeitspunkt des Motors im zulässigen Betriebsbereich eindeutig gegeben und die entsprechenden Ströme stellen sich ein. Erreicht der Gesamtstrom die Grenze des maximal zulässigen Stroms, ist auch das maximal erzielbare Drehmoment erreicht. Durch die Begrenzung des Drehmoments auf diesen Wert wird der maximal zulässige Strom nicht überschritten. Ein sicherer Betrieb des Motors an der Stromgrenze ist somit im Ankerstellbereich gewährleistet.

In **Bild 11** wurde das Soll Drehmoment wiederum als Rampenfunktion vorgegeben, allerdings bei einer wesentlich höheren Drehzahl von 2300min^{-1} . Erwartet wird, dass die Arbeitspunkte, wie in **Bild 1** gekennzeichnet, zunächst auf der Optimierungskennlinie verlaufen und beim Erreichen der entsprechenden Flussellipse dem Verlauf dieser Kennlinie des maximal verfügbaren Flusses folgen.

Durch die Drehzahl und die Zwischenkreisspannung ist der maximal verfügbare Fluss gegeben. Dieser Wert wird abzüglich einer Sicherheitsreserve als Sollwert für die Regelung verwendet, sobald der optimale Sollfluss diesen Wert überschreitet. Um den geforderten kleineren Flusswert zu erreichen, stellt sich ein größerer flussschwäcbender Strom in negativer d -Richtung ein. Beim Erreichen der

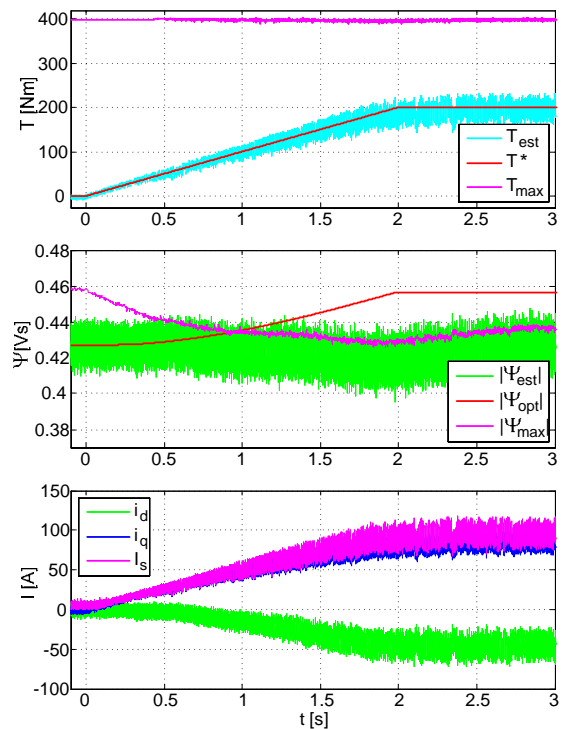


Bild 11 Verhalten bei $n=2300\text{min}^{-1}$

Stromgrenze würde daher weniger drehmomentbildender Strom in q -Richtung zur Verfügung stehen, als zur optimalen Ausnutzung von Haupt- und Reluktanzdrehmoment notwendig, weshalb auch das erzielbare Drehmoment geringer ist, als beim Betrieb im Ankerstellbereich. Diese Betriebsart entlang der Spannungsgrenze ist ein großer Vorteil des DTC-Regelverfahrens gegenüber anderen Regelungskonzepten, da sich der verfügbare Ständerfluss leicht bestimmen lässt und als Sollwert direkt vorgegeben wird.

6 Zusammenfassung

Bei PMSM mit eingebetteten Magneten trägt neben dem Hauptdrehmoment, welches aus der Stromkomponente quer zur Magnetisierungsrichtung resultiert, ein Reluktanzdrehmoment zum Gesamtdrehmoment bei, welches auch von der Stromkomponente in Magnetisierungsrichtung abhängt und für den verlustoptimalen Betrieb nicht vernachlässigt werden darf.

Das DTC-Regelverfahren bietet die Möglichkeit, durch gezielte Vorgabe von Solldrehmoment und Sollfluss IPMSM im Ankerstell- und im Flusschwächbereich wirkungsgrad-optimal zu betreiben. Die dafür erforderliche Sollwertvorgabe wurde vorgestellt und in die Reglerstruktur integriert. Da die verwendeten Kennlinien auf Messwerten basieren, sind auch Sättigungseffekte des Motors berücksichtigt, was ebenfalls zur Effizienzsteigerung beiträgt.

Die entwickelte Reglerstruktur wurde an einem Prüfstand implementiert. In zahlreichen praktischen Versuchen wurde gezeigt, dass die entwickelte DTC den Anforderungen bezüglich des verlustoptimalen Betriebs im Ankerstell- und Flusschwächbereich unter Einhaltung von Strom- und Spannungsgrenze gerecht wird. Zudem konnte die ausgezeichnete Drehmomentdynamik des DTC-Regelverfahrens nachgewiesen werden.

Da sich bei dynamischen Vorgängen der geforderte Fluss schneller als das zu stellende Drehmoment einstellt, werden kritische Betriebszustände vermieden. Im Vergleich zur weit verbreiteten Feldorientierten Regelung ist die vorgestellte Reglerstruktur sehr gut für den Betrieb im Flusschwächbereich geeignet. Ein weiterer Vorteil liegt in der relativ einfachen Implementierung.

7 Literatur

[1] Morimoto, S.; Takeda, Y.; Hisara, T.; Taniguchi, K.: Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control Considering Inverter Capacity, IEEE

Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 5, Sept./Oct. 1990

[2] Morimoto, S.; Tong, Y.; Takeda, Y.; Hisara, T.: Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, Oct. 1994

[3] Mademlis, C.; Agelidis, V.: On Considering Saturation with Maximum Torque to Current Control in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, IEEE Trans. Energy Conv, Vol. 16, No 3, Sep. 2001

[4] Mademlis, C.; Margaris, N.: Loss Minimization in Vector-Controlled Interior-Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 49, No 6, Dec. 2002

[5] Chédot, L.; Friedrich, G.: Optimal control of interior permanent magnet synchronous integrated starter-generator, EPE, Toulouse, 2003.

[6] Pan, C.; Sue, S.: A Linear Maximum Torque Per Ampere Control for IPMSM Drives Over Full-Speed Range, IEEE Trans. Energy Conv., 2005

[7] Meyer, M.; Böcker, J.: Optimum Control for Interior Permanent Synchronous Motors (IPMSM) in Constant Torque and Flux Weakening Range, IEEE EPE-PEMC 2006

[8] Takahashi, I.; Noguchi, T.: A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor, IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-22 (1986), page 820-827