

Methode zur Steuerung einer permanent-erregten Synchronmaschine unter Berücksichtigung des Zwischenkreisstroms

Philipp Wagner, Michèle Hirsch, Gunther Götting, Hans-Christian Reuss

Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Pfaffenwaldring 12
70569 Stuttgart

Philipp.Wagner@fkfs.de, Michele.Hirsch@de.bosch.com,
Gunther.Goetting@de.bosch.com, Hans-Christian-Reuss@fkfs.de

Abstract: Es wird eine neuartige Methode vorgestellt zur Erstellung von Stromtrajektorien für eine permanent-erregte Synchronmaschine unter Berücksichtigung des Zwischenkreisstroms. Dazu wird ein Zwischenkreisstrommodell und ein Modell für die maximale Stromänderung pro Zeitschritt hergeleitet und beschrieben. Die analytischen Modelle ermöglichen die Konstruktion einer zeitoptimalen oder energieoptimalen Stromtrajektorie.

1 Einleitung

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge spielen eine entscheidende Rolle bei den Anstrengungen zur Verringerung des Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes und zur Reduktion lokal keine gesundheitsschädlichen Emissionen. Der Antrieb solcher Fahrzeuge besteht aus einer drei-phasigen permanent-erregten Synchronmaschine (PSM), einer B6-Brücke mit Zwischenkreiskondensator, sowie einer Batterie. In Abbildung 1 ist schematisch der elektrische Antrieb zu sehen.

Die feldorientierte Regelung (**Field Oriented Control**: FOC) ist bei PSMs weitverbreitet und berechnet mittels Strom-Regler einen Spannungsvektor, welcher durch Schaltzustände unter Anwendung einer Pulsweitenmodulation (PWM) generiert wird [1]. Hier werden die dreiphasig-sinusförmigen Ströme i_s^{ABC} , Spannungen u_s^{ABC} und Flüsse ψ_s^{ABC} der PSM mittels d/q Transformation in Gleichgrößen als komplexe Vektoren im rotorfesten Koordinatensystem (dq-System) überführt. Ein klassischer Strom-Regler kann z.B. mit einer modellprädiktiven Regelung (**Model Predictive Control**: MPC) erweitert werden. Eine MPC prädiziert aufgrund eines PSM-Modells den Stromverlauf durch die Wahl des Spannungsvektors [2],[3].

Die primäre Aufgabe eines Traktionsantriebs ist ein gefordertes Drehmoment zu liefern. Um das geforderte Drehmoment einzustellen, muss ein Stromarbeitspunkt auf der entsprechenden Iso-Drehmomenten-Kennlinie eingestellt werden. Bei einem Arbeitspunktwechsel bzw. einer Drehmomentänderung, muss die PSM in einen neuen Stromarbeitspunkt überführt werden. Da der Strom in der Stator-Induktivität sich nicht sprunghaft ändern kann, muss beim Wechsel vom aktuellen in den neuen Arbeitspunkt eine Stromtrajektorie gewählt werden. Bei der FOC ist die Stromtrajektorie implizit durch die Regelparameter bestimmt. Bei einer MPC z.B. wird die Stromtrajektorie dagegen durch eine geeignete Kostenfunktion und zugehörige Nebenbedingungen explizit berechnet [4]. Falls die PSM ohne Rückkopplung geregelt werden soll, also gesteuert wird, kann die Stromtrajektorie für den Arbeitspunktwechsel modelbasiert berechnet werden. Eine solche Steuerung der PSM ist z.B. im Fehlerfall interessant, da zur Ausführung der vorausberechneten Steuerfolge, keine Sensordaten mehr benötigt werden. Zudem kann eine Steuerung für einmalig schnelle Arbeitspunktwechsel verwendet werden oder zur Vorsteuerung bei einer geschlossenen Regelung.

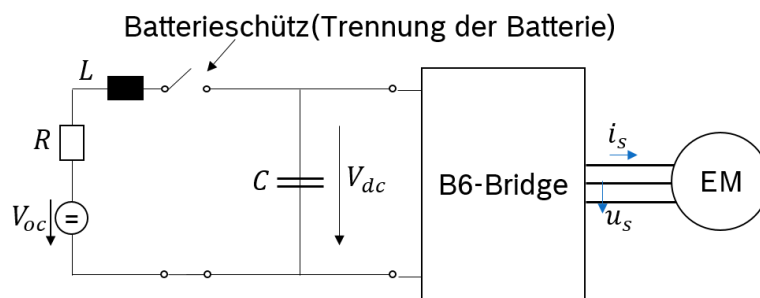


Abbildung 1: Übersicht elektrischer Antrieb

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges analytisches Modell zur Verbesserung der Regelung einer elektrischen Maschine mittels einer Steuerung vorgestellt. Dazu wird eine Strom-Trajektorie zwischen dem aktuellen und dem Zielarbeitspunkt geplant und konstruiert. Die Planung der Stromtrajektorie erfolgt hinsichtlich dem zeitoptimalen und dem energieoptimalen Optimierungskriterium und wird in der dq-Stromebene dargestellt. Für die Planung einer solchen Trajektorie werden analytische Modelle hergeleitet. Das analytische Modell dient einerseits zur Berechnung von optimalen Strom-Trajektorien und kann andererseits auch genutzt werden, um auf anderem Wege, z.B. durch direkter Optimierer, ermittelte Steuerfolgen zu interpretieren. Der komplexere Ansatz der energieoptimalen Steuerfolge basiert auf der Betrachtung des Eingangstroms in die B6 Brücke, dem Powermodulstrom i_{PM} , dessen Beschreibung im Folgenden genauer erläutert wird.

2 Modellierung

Im Folgenden werden die analytischen Gleichungen zur Planung einer Strom-Trajektorie hergeleitet. Die Gleichungen liefern ein tiefgehendes Verständnis in der Planung von optimalen Strom-Trajektorien und ermöglichen die geometrische Interpretation von Strom-Trajektorien hinsichtlich ihres Optimierungsziel. Für die Planung der zeitoptimalen Trajektorie wird die maximal mögliche Stromänderung pro Zeitschritt benötigt und die energieoptimale Trajektorie benötigt zusätzlich eine Beschreibung des Powermodul-Stroms.

2.1 Modell der permanent-erregten Synchronmaschine

Für die Prädiktion wird zunächst ein analytisches Grundwellenmodell der PSM benötigt, welches die Zusammenhänge zwischen Klemmenspannung und Phasenströmen im dq-Koordinatensystem beschreibt [1]. Die Spannungsgleichungen (1), (2) für die Grundwelle einer PSM im dq-Koordinatensystem in Abhängigkeit der beiden Phasenstromkomponenten i_d und i_q , sowie der magnetischen Flussverkettungskomponenten ψ_d und ψ_q lauten für die d-Komponente u_d und die q-Komponente u_q der Spannung:

$$u_d = R_s i_d - \omega_e \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \omega_e \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \quad (2)$$

Die Variable R_s beschreibt den seriellen Statorwiderstand der PSM und die Variable ω_e repräsentiert die elektrische Kreisgeschwindigkeit.

Die Gleichungen (3), (4) für die magnetische Flussverkettung ψ_d und ψ_q in Abhängigkeit des Permanentmagnet-Flusses ψ_f , sowie der Induktivität in d-Richtung L_d als auch in q-Richtung L_q lauten:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

In Tabelle 1 sind die Parameter der untersuchten PSM sowie für dessen Betriebsgrenzen gelistet. Mit diesen Parametern werden alle Graphiken und Berechnungen in Kapitel 3 durchgeführt.

Tabelle 1: Parameter der PSM und des Antriebs

L_d	L_q	R_s	ψ_f	i_s^{\max}	u_s^{\max}	u_{DC}	p	n
180 μH	240 μH	15 $m\Omega$	30 mVs	400 A	300 V	450 V	6	4000 rpm

2.2 Maximale Stromänderung während einer PWM-Periode

Zur Planung einer Stromtrajektorie muss für jeden Zeitschritt, in welchem eine neue Spannung gestellt werden kann, die maximal mögliche Stromänderung ermittelt werden. Daher wird als Zeitschritt die Dauer einer PWM-Periode gewählt. Insbesondere ist für die Planung der zeitoptimale-Stromtrajektorie die maximale Stromänderung pro Zeitschritt notwendig.

Die maximale verfügbare Stator-Spannung der PSM wird durch die Zwischenkreisspannung begrenzt und die d-Komponente u_d sowie die q-Komponente u_q der Stator-Spannung muss folgende Ungleichung (5) erfüllen:

$$u_s^{\max} = K \cdot u_{DC} \geq \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (5)$$

Da nur die Stromänderung für eine PWM-Periode T betrachtet wird, gilt als Näherung für die Ableitung des Stroms nach der Zeit:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\Delta i_d}{T} \text{ bzw. } \frac{di_q}{dt} = \frac{\Delta i_q}{T} \quad (6)$$

In die Spannungsgrenze (5) werden die Spannungsgleichungen der PSM (1) und (2) mit der Näherung des Differential-Operators durch (6) eingesetzt. Nach Äquivalents-Umformungen kann die neue Gleichung durch eine Ellipsengleichung in kartesischen Koordinaten beschrieben werden.

$$\frac{(\Delta i_d - i_d^{\text{mid}})^2}{\left(\frac{u_s^{\max}}{L_d} \cdot T\right)^2} + \frac{(\Delta i_q - i_q^{\text{mid}})^2}{\left(\frac{u_s^{\max}}{L_q} \cdot T\right)^2} \leq 1 \quad (7)$$

$$i_d^{\text{mid}} = -(R_s i_d - \omega_e L_q i_q) \cdot \frac{T}{L_d} \quad (8)$$

$$i_q^{\text{mid}} = -(R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f) \cdot \frac{T}{L_q} \quad (9)$$

Die Ellipsengleichung für die maximale mögliche Stromänderung ist grundlegend für jede Stromtrajektorie, da nur so der zugängliche Lösungsraum für einen Zeitschritt bekannt ist. Je nach Optimierungsziel müssen für den Lösungsraum weitere Kriterien herangezogen werden, z.B. kann für eine energieoptimierte Stromtrajektorie der Powermodul-Strom als Hilfsgröße verwendet werden.

2.3 Herleitung des gemittelten Powermodul-Stroms

Energetisch betrachtet fließt im Motorbetrieb Energie von der Batterie in den Zwischenkreiskondensator. Je nach Schalterstellung des Inverters fließt die Energie vom Zwischenkreiskondensator in die PSM. Umgekehrt fließt im Generatorbetrieb die Energie von der PSM je nach Schalterstellung zurück in den Zwischenkreiskondensator und Batterie. Der Spannungs-Modulator stellt im Mittel für eine PWM-Periode die gewünschte Klemmenspannung zur Verfügung. Daher werden im Folgenden die gemittelten Strom- und Spannungsgrößen für eine PWM-Periode betrachtet. Zur Bewertung des Energieflusses soll der mittlere Powermodul-Strom \bar{i}_{PM} dienen; die Zwischenkreisspannung u_{DC} wird während einer PWM-Periode T als konstant angenommen. Die Leistung des Zwischenkreises \bar{P}_{DC} für eine PWM-Periode lautet:

$$\bar{P}_{DC} = \frac{1}{T} \int u_{DC} i_{PM} dt = u_{DC} \cdot \bar{i}_{PM} \quad (10)$$

Außerdem kann die Leistung an den Maschinenklemmen einer PSM P_{PSM} im dq-Koordinatensystem durch das Skalarprodukt von Spannungszeiger, bestehend aus d-Komponente u_d und q-Komponente u_q , und Stromzeiger, bestehend aus d-Komponente i_d und q-Komponente i_q beschrieben werden. Für eine allgemeingültige Formulierung wird der konstante Vorfaktor K eingeführt, dessen konkreter Wert von der gewählten dq-Transformation abhängt - leistungs-invariant: $K = 2/3$, amplituden-invariant $K = \sqrt{2}/3$ oder effektivwert-invariant $K = \sqrt{2}/\sqrt{3}$.

$$P_{PSM} = \frac{2}{3K^2} (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (11)$$

Aus Gleichung (10) und (11) kann eine Leistungsbilanz unter Vernachlässigung der Inverterverluste aufgestellt werden, d.h. die Leistung an den Maschinenklemmen muss dann gleich der Zwischenkreisleistung sein. Daraus ergibt sich eine Beschreibung des Powermodulstroms in Abhängigkeit von den dq Strömen und Spannungen, die später für die Bestimmung der energieoptimalen Stromtrajektorie genutzt werden kann.

$$\bar{P}_{DC} \approx P_{PSM} \quad (12)$$

Nachdem die Bilanzgleichung (12) nach dem Powermodul-Strom \bar{i}_{PM} aufgelöst wird, erhalten wir dessen Gleichung (13).

$$\bar{i}_{PM} = \frac{2}{3K^2} \frac{(u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q)}{u_{DC}} \quad (13)$$

2.4 Einfluss der Inverterverluste auf den Powermodul-Strom

Im nächsten Schritt soll die getroffene Vereinfachung der Vernachlässigung der Inverterverluste kurz näher beleuchtet werden. Dazu wird die Leistungsbilanz mit Berücksichtigung der Inverterverluste P_{loss}^{inv} aufgestellt und es folgt die Beschreibung für den Powermodulstrom i_{PM}^{real} .

$$i_{PM}^{real} = \frac{(P_{PSM} + P_{loss}^{inv})}{u_{DC}} \quad (14)$$

In Tabelle 2 sind die Auswirkungen der Inverterverluste qualitativ dargestellt. Dazu muss zwischen den zwei Betriebsbereichen, Motorbetrieb und Generatorbetrieb, der PSM unterschieden werden. Im Motorbetrieb nimmt die PSM Energie auf und der Betrag der Leistung P_{PSM} wird positiv gezählt; wohingegen im Generatorbetrieb die PSM Energie abgibt und der Betrag der Leistung P_{PSM} negativ gezählt wird. Die Inverterverluste müssen in beiden Betriebsbereichen positiv gezählt werden. Unter Anwendung von Formel (14) folgt, dass der Powermodul-Strom mit Berücksichtigung der Inverterverluste immer größer sein wird; Energietisch betrachtet wird Energie immer im Inverter vernichtet. Infolgedessen wird der Powermodul-Strom i_{PM} bei Vernachlässigung der Inverterverluste unterschätzt. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Durch den Wirkungsgrad als Korrekturfaktor, kann der absolute Wert des Powermodul-Stroms korrigiert werden.

Tabelle 2: Auswirkung der Inverterverluste auf den genäherten Powermodul-Strom i_{PM}

Betriebsbereich	PSM-Leistung	Inverterverluste	Powermodul-Strom	Auswirkung auf i_{PM}
Motorbetrieb	$P_{PSM} > 0$	$P_{loss}^{inv} > 0$	$i_{PM}^{real} > i_{PM}$	Unterschätzung
Generatorbetrieb	$P_{PSM} < 0$	$P_{loss}^{inv} > 0$	$i_{PM}^{real} > i_{PM}$	Unterschätzung

2.5 Modell des Powermodul-Stroms in der dq-Stromebene

Zur Planung einer Stromtrajektorie in der dq-Stromebene soll der Powermodul-Strom nur Abhängigkeiten von i_d und i_q aufweisen; die Abhängigkeit von den Klemmenspannungen u_d und u_q muss folglich geeignet eliminiert werden. Hierbei wird die Zwischenkreisspannung als konstant angenommen. Diese Umformung ist mit Hilfe der Gleichungen (1), (2), (3), (4) möglich und führt zu folgender Beschreibung, dass sich der i_{PM} aus zwei additiven Komponenten (15) interpretieren lässt:

$$\bar{i}_{PM} = i_{PM}^{steady} + i_{PM}^{dynamic} \quad (15)$$

$$i_{PM}^{steady} = \frac{2}{3K^2} \cdot \frac{1}{u_{DC}} \cdot (R_s(i_d^2 + i_q^2) + \omega\psi_f i_q + \omega(L_d - L_q)i_d i_q) \quad (16)$$

$$i_{PM}^{dynamic} = \frac{2}{3K^2} \cdot \frac{1}{u_{DC}} \cdot \left(\frac{d\psi_d}{dt} \cdot i_d + \frac{d\psi_q}{dt} \cdot i_q \right) \quad (17)$$

Der mit i_{PM}^{steady} bezeichnete Anteil (16) beschreibt den stationären Anteil, welcher durch den aktuellen stationären Stromarbeitspunkt definiert wird. Der mit $i_{PM}^{dynamic}$ bezeichnete Anteil (17) beschreibt den dynamischen Anteil, der durch eine Flussänderung bzw. Stromänderung auftritt.

2.6 Strom-Gradient des Powermodul-Stroms

Als nächstes wird der Strom-Gradient des Powermodul-Stroms gebildet, um eine energiefluss-optimierte Stromtrajektorie planen zu können. Denn durch einen Arbeitspunktwechsel ändert sich der Powermodul-Strom und folglich auch der Energieaustausch zwischen Maschine und Zwischenkreis-Schaltung. Dies wird für beide Powermodul-Strom-Anteile untersucht. Zur Berechnung der Strom-Gradient wird Gleichung (16) nach den beiden Stromkomponenten i_d und i_q abgeleitet und es folgt Gleichung (18) der Strom-Gradient für die stationäre Komponente:

$$\nabla i_{PM}^{steady} = \frac{2}{3K^2} \cdot \frac{1}{u_{DC}} \cdot \begin{pmatrix} 2R_s i_d + \omega_e(L_d - L_q)i_q \\ 2R_s i_q + \omega_e\psi_f + \omega_e(L_d - L_q)i_d \end{pmatrix} \quad (18)$$

Analog wird der Strom-Gradient für die dynamische Komponente des Powermodul-Stroms, Gleichung (17), gebildet. Durch das zusätzliche Einsetzen von Gleichung (3) und (4) erhalten wir Gleichung (19) unter Berücksichtigung, dass bei einer PSM die zeitliche Ableitung nach dem Permanentmagnet-Fluss ψ_f null ist.

$$\nabla i_{\text{PM}}^{\text{dynamic}} = \frac{2}{3K^2} \cdot \frac{1}{u_{\text{DC}}} \cdot \begin{pmatrix} L_d \frac{di_d}{dt} + 2 i_d \frac{dL_d}{dt} \\ L_q \frac{di_q}{dt} + 2 i_q \frac{dL_q}{dt} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Durch Betrachtung von Gleichung (18) wird ersichtlich, dass der Strom-Gradient des stationären Anteils auch nur vom stationären Stromarbeitspunkt der PSM abhängt. Wenn ein gefordertes Drehmoment eingestellt werden soll, ist dies der unvermeidbare Strom bzw. der unvermeidbare Energiefluss zwischen Zwischenkreis-Seite und Maschinen-Seite. Dahingegen besteht die Möglichkeit den Energiefluss zu beeinflussen, indem während einer Drehmomentänderung der dynamische Anteil entsprechend ausgewählt wird, siehe die Abhängigkeit zur Stromänderung in Gleichung (19). Daher ist der dynamische Anteil zur Planung einer Strom-Trajektorie ausreichend und wird hier zur Planung einer energieoptimierten Trajektorie verwendet.

2.7 Beziehungen zwischen Leistung, Energie und Powermodul-Strom

Hier werden die mathematischen Zusammenhänge zwischen dem Powermodul-Strom und der Leistung und der Energie gezeigt. Die folgenden Gleichungen verdeutlichen nochmals, weshalb der Powermodulstrom eine geeignete Hilfsgröße für die Energie-Optimierung einer Stromtrajektorie ist. Der berechnete Powermodul-Strom ist unter der Annahme einer näherungsweise konstanten Zwischenkreisspannung u_{DC} proportional zur Leistung P_{DC} und die Berechnung ist wie folgend:

$$\bar{P}_{\text{DC}} = u_{\text{DC}} \cdot \bar{i}_{\text{PM}} \quad (20)$$

Die Energie E_{DC} berechnet sich für eine im untersuchten Intervall konstante Zwischenkreisspannung u_{DC} durch Integration des gemittelten Powermodul-Stroms.

$$E_{\text{DC}} \approx u_{\text{DC}} \int \bar{i}_{\text{PM}}(t) dt \quad (21)$$

Der Powermodulstrom ist demnach direkt proportional zur Leistung und beschreibt nach Aufsummieren über die Zeit den Energiefluss. Ferner wird der Energiefluss minimiert, wenn nur für einen Zeitschritt der Powermodul-Strom aufgrund einer geschickten Wahl der Stromtrajektorie kleiner wird.

3 Steuerungskonzept

Zur direkten Steuerung der PSM von einem aktuellen Stromarbeitspunkt zu einem Zielpunkt sind zunächst viele Stromtrajektorien möglich. Der Arbeitspunktwechsel soll unter Einhaltung von zwei unterschiedlichen Zielen stattfinden. Zum einen wird zwischen der zeitoptimalen und zum anderen zwischen der energieoptimalen Steuerfolge unterschieden. Die zeitoptimale Steuerfolge soll in kürzester Zeit, also so schnell wie möglich, zum neuen Zielpunkt gelangen. Geometrisch bedeutet dies quasi den kürzesten Abstand der möglichen Punkte zum Zielpunkt zu wählen. Die energieoptimale Steuerfolge berücksichtigt zusätzlich den Powermodul-Strom und der Powermodul-Strom wird je nach Anwendungsfall minimiert oder maximiert, um den Energiefluss zu beeinflussen.

Das Vorgehen zur Erstellung einer Stromtrajektorie und einer Steuerfolge ist wie folgend: Als erstes wird rekursiv eine Stromtrajektorie berechnet bis der gewünschte Zielpunkt erreicht ist. Dazu wird für jeden Zeitschritt nacheinander ein möglicher Stromwert berechnet. Je nach Optimierungskriterium, zeitoptimal oder energieoptimal, wird ein anderer Stromwert ausgewählt. Nach Berechnung der Stromtrajektorie kann diese in eine Steuerfolge umgewandelt werden, indem aus den Ströme mittels eines Maschinenmodells (1), (2) die benötigten Spannungen für eine Steuerfolge berechnet werden. Zuletzt werden mittels PWM Schaltsignale aus der Steuerfolge berechnet.

3.1 Zeit-optimale Steuerfolge

Zur Berechnung der zeitoptimalen Stromtrajektorie wird für jeden Zeitschritt der kleinste Abstand zwischen der Begrenzung der maximal möglichen Stromänderung und dem Zielpunkt gewählt.

In Abbildung 2 ist die Wahl des zeitoptimalen nächsten Arbeitspunkt für einen Zeitschritt dargestellt. Links in der dq-Ebene ist der Startpunkt mit einem grünen Kreis gekennzeichnet, der Zielpunkt mit einem roten Kreuz und der ausgewählte Arbeitspunkt als schwarze Kreuz. Für jeden Zeitschritt gibt es aufgrund der Spannungsbegrenzung einen festen Bereich von Betriebspunkten -innerhalb der schwarzen Ellipsen, die im jeweiligen Zeitschritt erreicht werden können. Dies ist der Bereich der maximal möglichen Stromänderung für einen Zeitschritt und wird durch die Ellipsen-Gleichung (7) beschrieben. Rechts ist der Abstand zwischen dem Rand der Ellipse und dem Zielpunkt aufgezeichnet. Das Minimum des Abstandes ist als schwarze Kreuz markiert. Dies ist der ausgewählte Arbeitspunkt zur Planung der zeitoptimalen Stromtrajektorie.

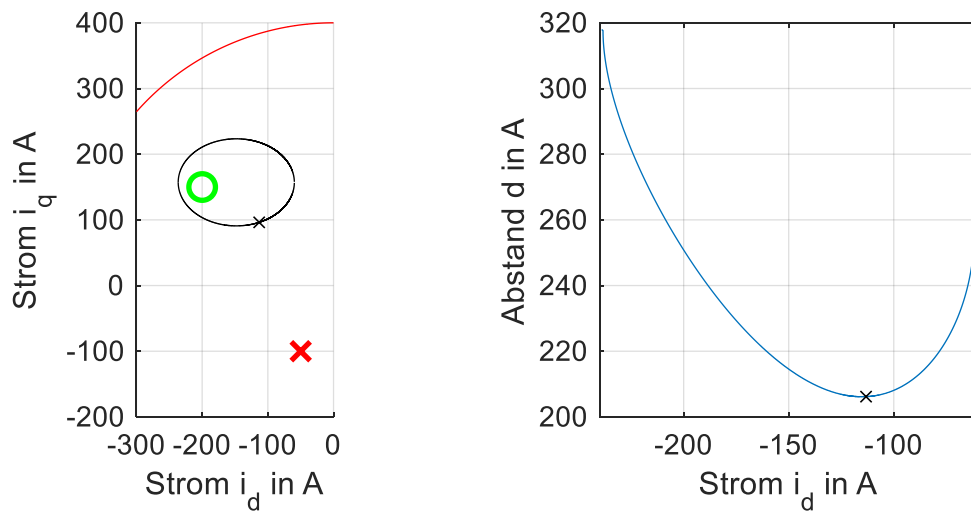


Abbildung 2: links: Planung der Trajektorie für einen Zeitschritt in der dq-Ebene, rechts: Abstand zwischen Zielarbeitspunkt und Rand der Ellipse

3.2 Energieoptimale Steuerfolge

Im Gegensatz zur zeitoptimalen Steuerfolge wird nun eine energieoptimale Steuerfolge adressiert. Dabei soll der Energieaustausch zwischen der DC-Seite und der AC-Seite des elektrischen Antriebs optimiert werden. Bei einer Drehmomentänderung, also einem Arbeitspunktwechsel, ändert sich die benötigte Leistung und folglich ändert sich mit dem Stromarbeitspunkt auch der Powermodul-Strom.

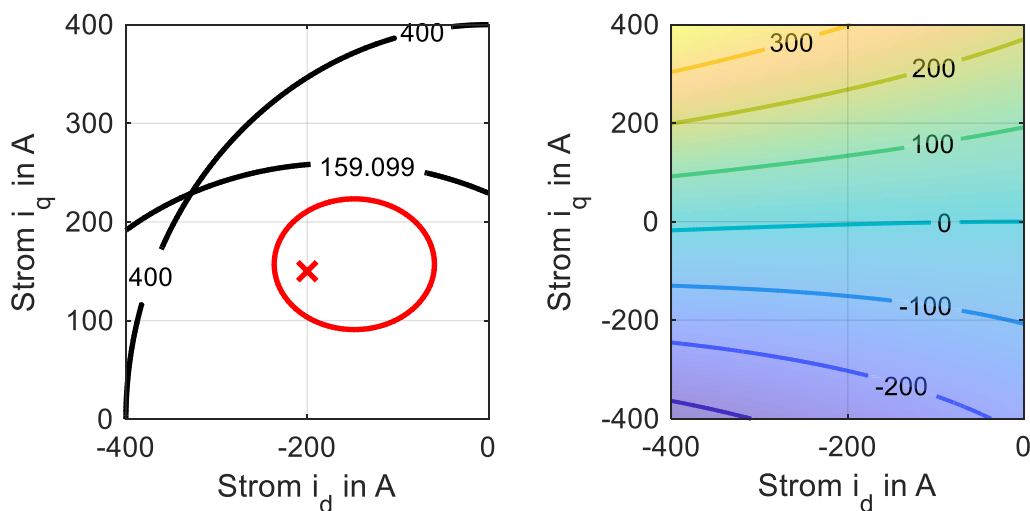


Abbildung 3: links: Start-Arbeitspunkt (x), Ellipse der maximal zugänglichen Stromänderung (rot) Strombegrenzungen (schwarze 400 A Linie), rechts: stationärer Powermodul-Strom in der dq-Stromebene

Der aktuelle Arbeitspunkt mit der Stromgrenze von 400 A, der stationären Spannungsbegrenzung von 159 V und der maximalen Stromänderung ist in Abbildung 3 (links) zu sehen. Die stationäre Komponente des Powermodul-Stroms ist in Abbildung 3 (rechts) zu sehen. Dies ist der unvermeidbare Anteil für jeden Stromarbeitspunkt und unabhängig von der Wahl der Stromtrajektorie.

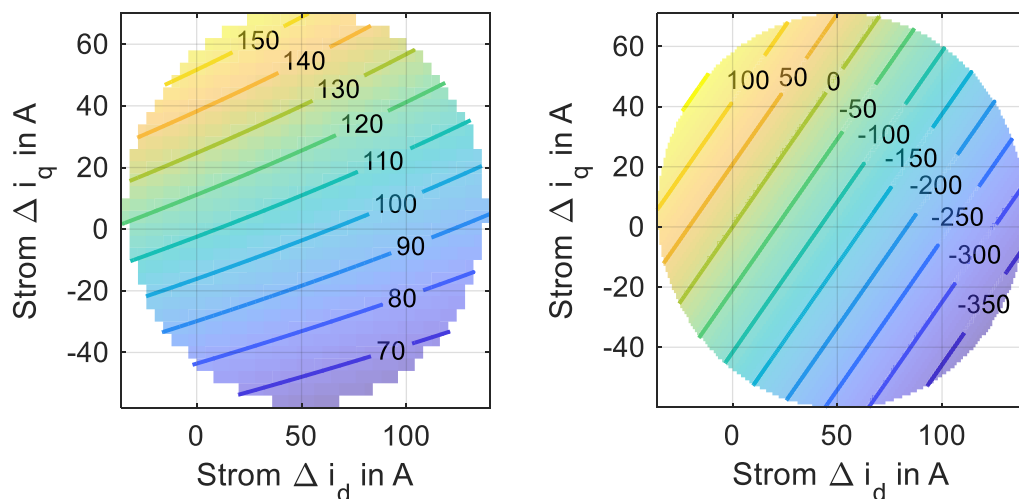


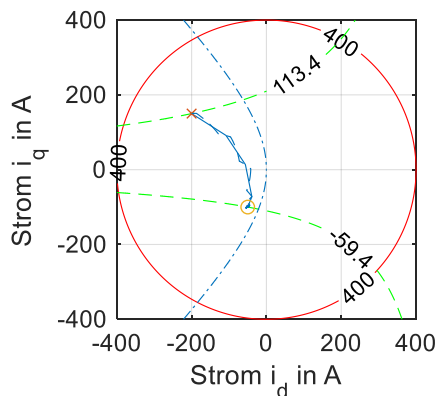
Abbildung 4: Powermodul-Strom für festen Arbeitspunkt, links: stationäre Komponente, rechts: dynamische Komponente

Um in diesem Fall eine optimale Steuerfolge zu planen, muss die dynamische Komponente des Powermodul-Stroms berücksichtigt werden. Für den aktuellen Arbeitspunkt (-200 A, 150 A) wird wieder analog zur zeitoptimalen Steuerfolge die Ellipse zur maximalen Stromänderung berechnet, siehe Abbildung 3 (links). Für diese Ellipse werden in Abbildung 4 sowohl die stationäre Komponente (links) als auch die dynamische Komponente (rechts) des Powermodulstroms dargestellt. Auf der x- und y-Achse ist jeweils die Stromänderung um den aktuellen Arbeitspunkt aufgetragen. Findet z.B. keine Stromänderung statt ist auch der dynamische Anteil der Powermodul-Strom gleich Null. Jede Iso-Linie gibt an, um wie viel Ampere sich der Powermodul-Strom ändert. Wenn z.B. eine Stromänderung einen dynamischen Powermodul-Strom von -350 A verursacht, muss dieser Stromfluss bzw. die Energie von Zwischenkreiskondensator und der Batterie aufgenommen werden können. Daher kann z.B. eine Beschränkung auf eine maximale Stromänderung durch die Rekuperationsrate des Systems limitiert werden. Mithilfe des dynamischen Anteils wird der nächste Arbeitspunkt auf einer Iso-Linie gewählt, sodass der Energieaustausch minimiert wird im Vergleich zur zeitoptimalen Trajektorie.

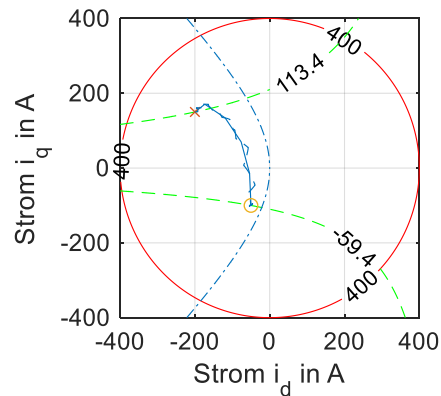
3.3 Vergleich der beiden Trajektorien

Abschließend werden die Auswirkungen der zeitoptimalen und der energieoptimalen Stromtrajektorie auf den Zwischenkreisstrom in Abbildung 5 betrachtet. Die Simulation der Ergebnisse wird in Matlab/Simulink durchgeführt mit einem linearen PSM-Modell und einer Sinus-PWM. Der Startarbeitspunkt beträgt $(-200 \text{ A} | 200 \text{ A})$, erzeugt 113.4 Nm und ist als rotes Kreuz markiert; der Ziellarbeitspunkt ist $(-50 \text{ A} | -100 \text{ A})$, liefert -59.4 Nm und ist somit ein generatorischer Betriebspunkt und als gelber Kreis gekennzeichnet. Auf den ersten Blick unterschieden sich die zeitoptimale Stromtrajektorie, siehe Abbildung 5 (a), und die energieoptimale Stromtrajektorie, siehe Abbildung 5 (b), nur bei der Wahl der ersten Schritte. Bei Betrachtung des Powermodul-Strom, siehe Abbildung 5 (c),(d), weisen der Startarbeitspunkt und der Ziellarbeitspunkt jeweils denselben Powermodul-Strom von 111 A und -54 A auf, da es sich um stationäre Arbeitspunkte handelt. In blau ist der prädizierte Powermodul-Strom pro PWM-Takt und in orange der hochauflösend simulierte Powermodul-Strom aufgetragen.

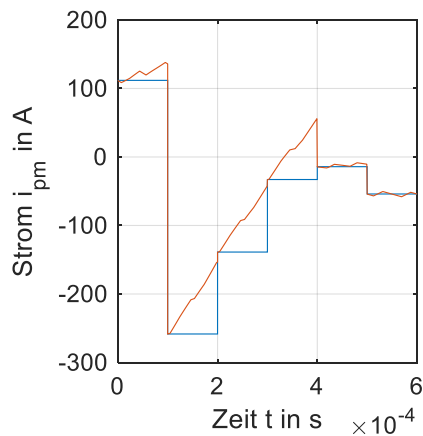
Aufgrund der unterschiedlich gewählten Stromtrajektorie wird der dynamische Anteil des Powermodul-Stroms bei der energieoptimalen Stromtrajektorie betragsmäßig minimiert. Deswegen beträgt der Powermodul-Strom nicht mehr ca. -250 A , sondern nur noch ca. -100 A im ersten Zeitschritt bei der energieoptimalen Trajektorie und der Einfluss der anders gewählten Stromtrajektorie wird verdeutlicht.



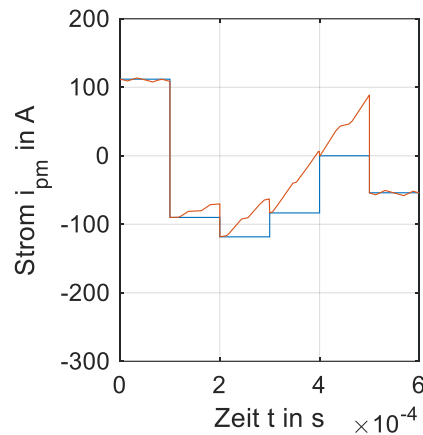
(a) zeitoptimal



(b) energieoptimal



(c) i_{PM} zeitoptimal



(d) i_{PM} energieoptimal

Abbildung 5: Vergleich zwischen zeitoptimaler und energieoptimaler Trajektorie hinsichtlich des Powermodul-Stroms (blau: prädiziert im PWM-Takt, orange: simuliert)

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept zur Stromtrajektorien-Berechnung für einen Arbeitspunktwechsel entwickelt. Der Arbeitspunktwechsel kann zum einen zeitoptimal und zum anderen energieoptimal durchgeführt werden. Dafür werden als analytische Modelle die maximale Stromänderung pro Zeitschritt und der Powermodul-Strom hergeleitet. Die Konstruktion der Stromtrajektorie erfolgt rekursiv, indem für jeden Zeitschritt hinsichtlich des Optimierungsziels ein Arbeitspunkt ausgewählt wird. Die Abbildung der zur Verfügung stehenden Spannung als Ellipse erlaubt die Berücksichtigung der maximal zugänglichen Stromänderung pro Zeitschritt und ermöglicht die Konstruktion einer zeitoptimalen Stromtrajektorie. Zusätzlich wird der Powermodul-Strom als wichtige und belastbare Größe verwendet, um den Energiefluss zwischen PSM und Zwischenkreis-Schaltung zu optimieren. Somit wird die energieoptimale Stromtrajektorie mithilfe des Powermodul-Stroms und der maximalen Stromänderung pro Zeitschritt erstellt. Das vorgestellte Konzept liefert ein Werkzeug zur Konstruktion von Stromtrajektorien und ermöglicht die Entwicklung eines echtzeitfähigen Optimierers.

Literaturverzeichnis

- [1] R. De Doncker, D. W. J. Pülle, und A. Veltman, *Advanced Electrical Drives*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011.

- [2] P. Karamanakos, E. Liegmann, T. Geyer, und R. Kennel, „Model Predictive Control of Power Electronic Systems: Methods, Results, and Challenges“, *IEEE Open Journal of Industry Applications*, Bd. 1, S. 95–114, 2020, doi: 10.1109/OJIA.2020.3020184.
- [3] Y. Wang *u. a.*, „Fast Response Model Predictive Torque and Flux Control With Low Calculation Effort for PMSMs“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Bd. 15, Nr. 10, S. 5531–5540, Okt. 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2900116.
- [4] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, und J. Rodriguez, „Predictive Control in Power Electronics and Drives“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 55, Nr. 12, S. 4312–4324, Dez. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.2007480.