Finite-Elemente-Analysen von Permanentmagnet-Synchronmaschinen für Traktionsantriebe mit Stern- oder Dreieckschaltung

Marko Sušić

Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen
Technische Universität Wien

21. Juli 2010

Inhalt

1 Stromeinprägung bei feldorientierter Regelung für Stern- oder Dreieckschaltung

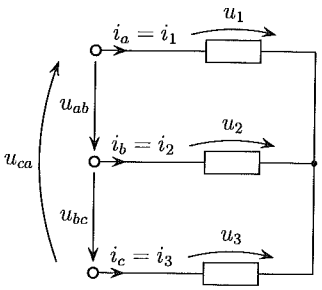
2 Finite-Elemente-Modell (2D)

3 Numerische Ergebnisse: Strangspannungen, Drehmoment, Kreisstrom

4 Vergleich: Simulation und Messung

1 Schaltungen

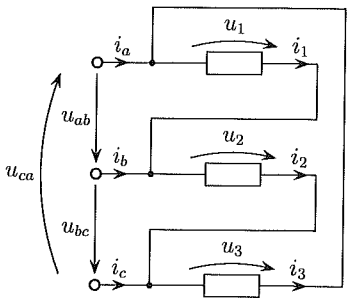
Sternschaltung



$$\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} i_k = i_0 = 0$$

$$\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} u_k = u_0 \neq 0$$

Dreieckschaltung



$$\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} i_k = i_0 \neq 0$$

$$\frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} u_k = u_0 = 0$$

Feldorientierte Regelung (i_d, i_q, γ):

$$\begin{aligned} i_1 &= i_0 + i_d \cos(\gamma) && - i_q \sin(\gamma) \\ i_2 &= i_0 + i_d \cos(\gamma - 2\pi/3) && - i_q \sin(\gamma - 2\pi/3) \\ i_3 &= i_0 + i_d \cos(\gamma - 4\pi/3) && - i_q \sin(\gamma - 4\pi/3) \end{aligned}$$

Kreisstrom i_0:

- Durch feldorientierte Regelung nicht erfasst
- Für jede Rotorstellung und jeden Stromraumzeiger unbekannt

1 Kreisstromiteration

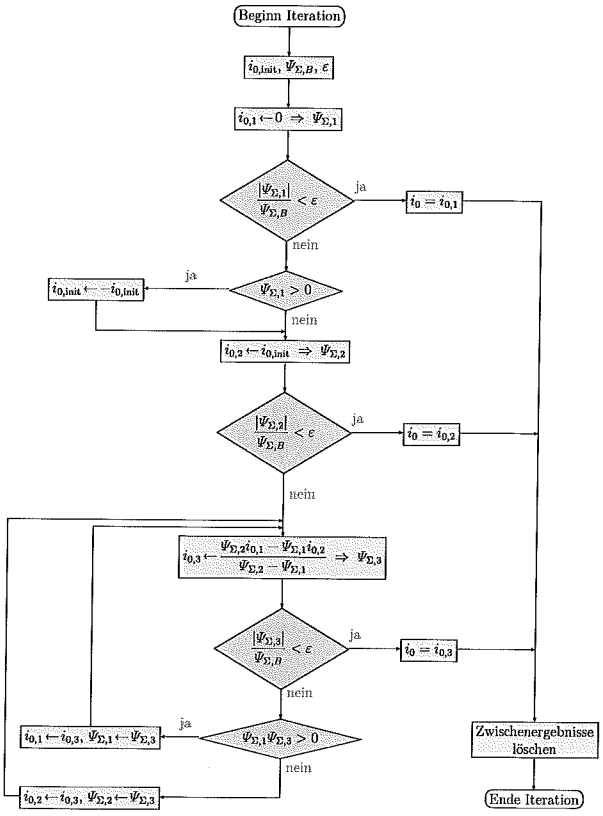
- Iterative Bestimmung des Kreisstromes i_0 in der Simulation
- Dreieckschaltung:

$$\sum_{k=1}^{m} u_k = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{m} \Psi_k = 0$$

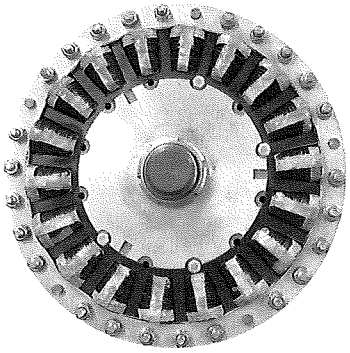
- Ströme aus feldorientierter Regelung erzeugen i.a. einen Nullfluss
- Kompensation des Nullflusses durch Kreisstrom i_0
- Strangsymmetrie:

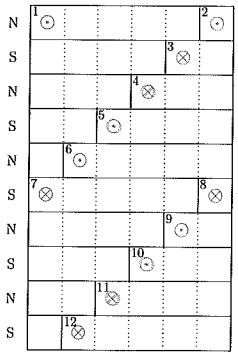
$$\frac{\partial \Psi_k}{\partial i_k} > 0 \ , \ \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_k} > \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_j}$$

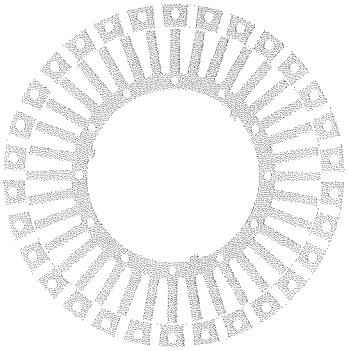
- Iteration durch Anwendung der *Regula Falsi*

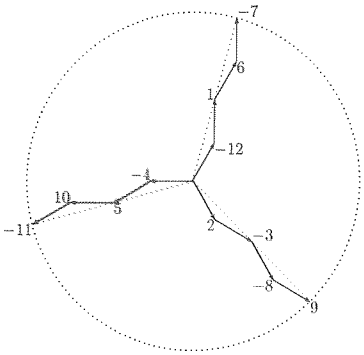


2 Permanentmagnet-Synchronmaschine



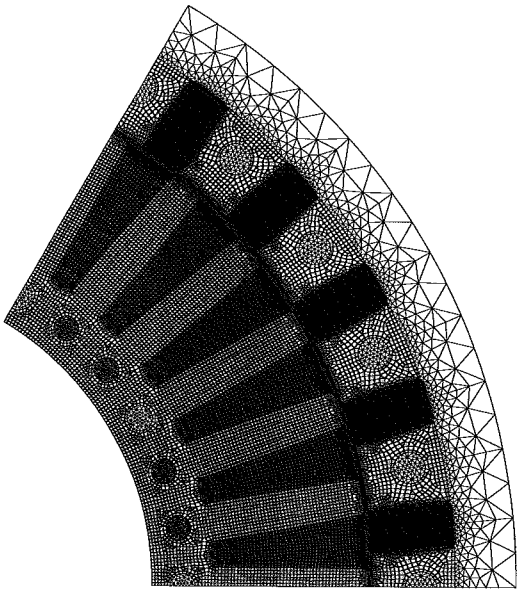






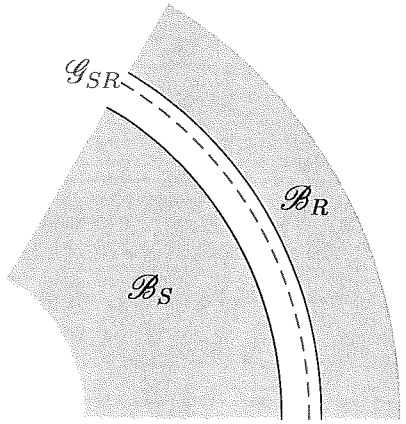
- Außenläuferbauart
- Einschicht-Zahnspulenwicklung
- Drei Urwicklungen entlang des Umfanges
- Serienschaltung der drei Urwicklungen
- Antisymmetrie der halben Urwicklung

2 Finite-Elemente-Modell (2D)



- Reduziertes Modell durch Ausnutzung von Symmetrien in Geometrie (halbe Nutteilung, halbe Polteilung) und Wicklung (halbe Urwicklung)
- Symmetrisches Netz repräsentiert Periodizität der Statornuten und Rotorpole
- Getrennte Modelle für Stator und Rotor
- Drehbewegung durch Sliding-Surface-Methode
- Implementierung in *ANSYS/APDL*

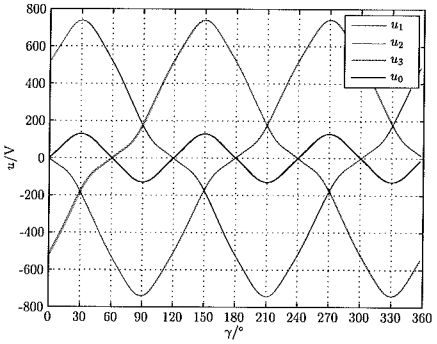
2 Sliding-Surface-Methode



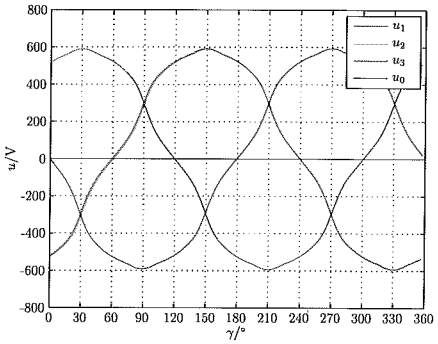
- Gemeinsame Schnittstelle $\mathscr{G}_{SR}$ der beiden Modelle im Luftspalt
- Äquidistante Diskretisierung der Schnittstelle in Umfangsrichtung
- Verknüpfung der unbekannten Freiheitsgrade an der Schnittstelle entsprechend der Winkellage des Rotors
- Inkrement der Drehung durch Diskretisierung festgelegt (Locked-Step-Verfahren)
- Keinerlei Neuvernetzung erforderlich
- Gleiche Qualität der numerischen Ergebnisse bei unterschiedlichen Rotorstellungen

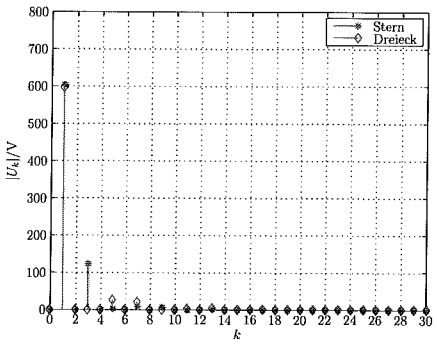
3 Leerlauf-Strangspannungen

Sternschaltung



Dreieckschaltung

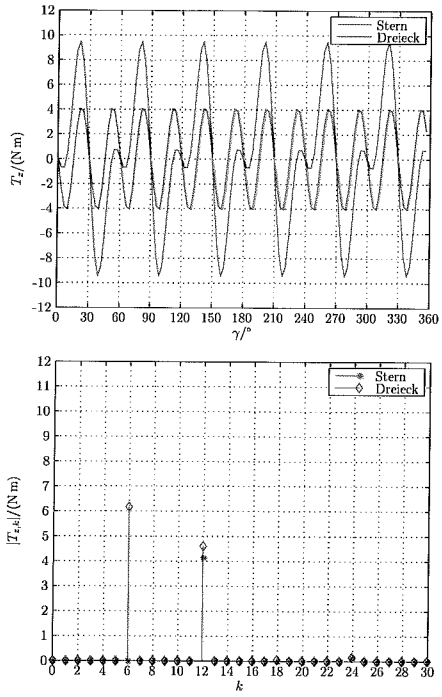




- Symmetrische Strangspannungen
- Sternschaltung: Nullspannung
- Dreieckschaltung: $U_k = 0$ für $k = 3l$, $l \in \mathbb{N}$

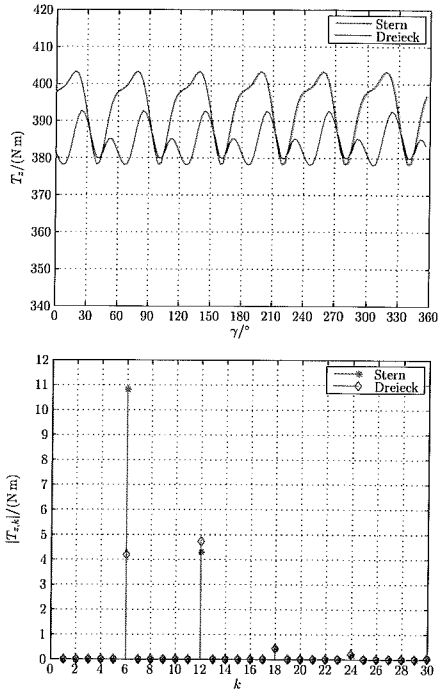
3 Luftspaltdrehmoment

Rastmoment ($i_d = 0,\ i_q = 0$)



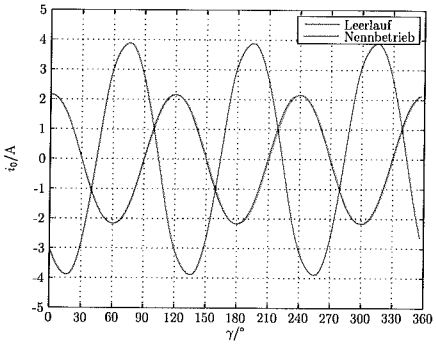
$k_Y = 12l\ ,\ k_\Delta = 6l\ ,\ l \in \mathbb{N}$

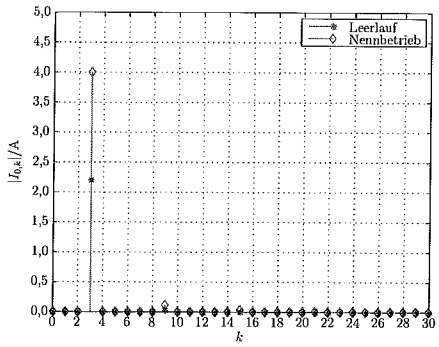
Lastmoment ($i_d = 0,\ i_q = 1$)



$k_Y = k_\Delta = 6l\ ,\ l \in \mathbb{N}$

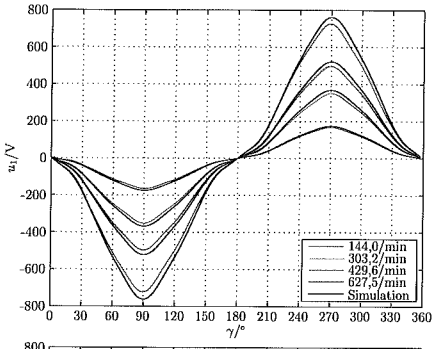
3 Kreisstrom der Dreieckschaltung

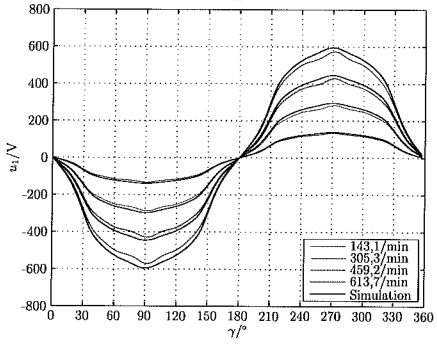




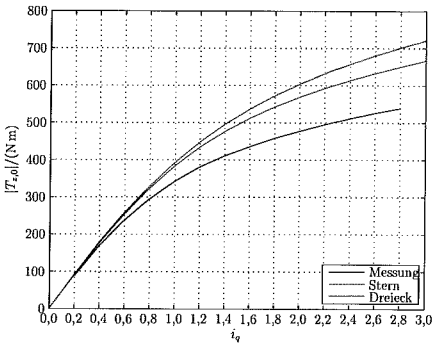
4 Vergleich: Simulation und Messung

Leerlaufspannungen





Drehmoment



- Streuung der Materialparameter (Remanenzflussdichte)
- Unsymmetrien (Exzentrizität, Fertigungstoleranzen)
- Axiale Streuflussanteile durch Sättigung im Eisen

Zusammenfassung

- Simulation der feldorientierten Regelung erfordert iterative Bestimmung des Kreisstromes i_0 bei Dreieckschaltung
- Reduktion der Modellgröße durch Ausnutzung der Symmetrien
- Wiedergabe der Symmetrie in der Geometrie durch das Finite-Elemente-Netz liefert symmetrische Ergebnisse
- Unterschiede in den Ergebnissen zwischen Stern- und Dreieckschaltung vor allem durch Kreisstrom i_0

Ende

Danke für ihre Aufmerksamkeit!