

SIMPACK Kraftelement: Drehstromasynchronmotor als Komponente eines schlupfgeregelten Traktionsantriebes

Die rechnerische Simulation der Lauf- und Antriebsdynamik eines Triebfahrzeuges bis zur Haftwertgrenze muß die Wechselwirkung der Kräfte in der Rad/Schiene-Kontaktfläche nachbilden:

- Längsschlupfkräfte infolge elektrischem Antriebssystem und Schlupfregelung,
- Längs- und Querschlupfkräfte infolge Spurführung der mechanischen Komponenten Radsatz, Drehgestell und Lokkasten in der Gerade, im Bogen und bei Gleisunregelmäßigkeiten.

Neue Komponenten in SIMPACK erlauben, das elektrische System Drehstromasynchronmotor mit feldorientierter Regelung bereitzustellen und mit den regelungstechnischen und mechanischen SIMPACK-Komponenten zu koppeln. Die Simulation der kompletten Antriebs-Schlupf-Regelung eines Triebfahrzeugs wird damit möglich. Mechanisches System, Schlupfregelung und typische Bogenlaufsimulationen werden in einem Beitrag in der nächsten SIMPACK News vorgestellt, während wir uns hier auf das neuen SIMPACK-Modul *Electric Drives* konzentrieren.

Dr.-Ing. Wolfgang Hauschild, Ing.-Büro Dr. Hauschild, Berlin

Vereinfachungen bei der Modellierung eines Drehstrom-Traktionsantriebes

Die Simulation der Lauf- und Antriebsdynamik eines Triebfahrzeuges bis zur Haftwertgrenze erfordert eine sinnvolle Vereinfachung des Antriebssystems, bestehend aus

- Haupttransformator und Einspeisestromrichter,
- Gleichspannungszwischenkreis,
- Traktionswechselrichter,
- Fahrmotor mit Drehmomentenregelung,
- mechanischer Antriebsstrang und
- Schlupfregelung,

auf die zur Aufgabenstellung zwingend notwendigen Komponenten. Die Schaltungsvariante mit Gleichstrom-zwischenkreis und entsprechendem Traktionswechselrichter sowie zugehöriger Drehmomentenregelung hat dagegen an Bedeutung verloren.

Die netzseitigen Teile einschließlich des Gleichspannungszwischenkreises werden nun vernachlässigt, so daß abgesehen vom mechanischen Antriebsstrang und der Schlupfregelung nur noch der maschinenseitige Wechselrichter und der Fahrmotor mit Drehmomentenregelung verbleiben.

Der Traktionswechselrichter formt mit Taktfrequenz $>100\text{Hz}$ die Zwischenkreisspannung in ein Drehspannungssystem mit variabler Amplitude und Frequenz um, indem durch Pulsweitenmodulation die Spannungsgrundschwingung als Pulsmuster abgebildet wird und die getakteten Spannungsblöcke in die 3 Stränge des Fahrmotors eingespeist werden.

Der Fahrmotor mit Drehmomentenregelung auf Basis der feldorientierten Regelung besteht deshalb aus

- Regler zur entkoppelten Regelung der momentenbildenden y -Komponente Statorstrom,
- Modulator zur Berechnung der Pulsmuster, die vom Traktionswechselrichter geschaltet werden,
- Maschinengleichungen des Asynchronmotors,
- Flußmodell zur Berechnung der Entkopplungsterme,

- Entkopplungsterme in der Regelkreisrückführung.

Taktfrequenzen $>100\text{Hz}$ liegen aber bei weitem über den relevanten Eigenfrequenzen $<25\text{Hz}$ des mechanischen Antriebsstranges und erzeugen zudem unerwünscht hohe Rechenzeiten, so daß eine weitere Vereinfachung vorgenommen werden muß. Dabei sollen folgende Grundsätze beibehalten werden:

1. Die physikalischen Größen Spannung, Strom, Fluß, etc. werden als Grundschwingung abgebildet.
2. Die feldorientierte Regelung auf den Rotorfluß ermöglicht die entkoppelte Regelung der momentenbildenden y -Komponente Statorstrom.
3. Die Maschinengleichungen von Einzelmotor und Doppelmotor (= 2 elektrisch parallelgeschaltete Einzelmotoren am gemeinsamen Umrichter) werden im rotierenden, rotorflußfesten Koordinatensystem aufgestellt.
4. Die Schnittstellen des SIMPACK Kraftelementes Drehstromasynchronmotor sollen eine spätere Erweiterung auf kompliziertere Modellierungen des geregelten Asynchronmotors problemlos ermöglichen.

Maschinengleichungen und vereinfachte feldorientierte Regelung

Die wichtigsten Arbeitsschritte zur Aufstellung der Maschinengleichungen und der vereinfachten feldorientierten Regelung werden jetzt zusammengestellt.

Das dynamische Verhalten eines Drehstromasynchronmotors wird vorteilhaft mit der Raumzeigerschreibweise dargestellt. Bei symmetrisch gebauten Drehstromasynchronmotoren werden die 3 Stranggrößen für Spannungen, Ströme und Flüsse zu einem komplexen Raumzeiger zusammengefaßt. Die Maschinengleichungen werden abschließend in die Komponenten Real- und Imaginärteil aufgespalten.

Die physikalischen Größen Spannung, Strom, Kreisfrequenz, Drehmoment und Scheinleistung werden mit Bezugswerten im Nennpunkt der Maschine normiert. Da die ebenfalls normierten Maschinenkonstanten nur wenig von der Nennleistung abhängen, kann in der normierten Schreibweise das dynamische Verhalten der Maschine weitgehend unabhängig von der Nennleistung dargestellt werden.

Unter der Annahme von sinusförmigen, elektromagnetischen Größen ohne Oberwellen werden nun die Spannungsgleichungen und die Flußverkettungsgleichungen für Stator und Rotor sowie die Gleichung des inneren elektrischen Momentes in einem mit der x-Komponente des Rotorflußraumzeigers rotierenden Koordinatensystem aufgestellt. Die rotorflußbezogene Feldorientierung ermöglicht eine entkoppelte Einstellung von

- momentenbildender y-Komponente Statorstrom mit hoher Dynamik
- flußbildender x-Komponente Statorstrom mit sehr geringer Dynamik

Das Strukturbild der Maschine wird vereinfacht, indem die gesamte Streuung der Maschine im Stator und im Hauptfeld konzentriert wird. Dies führt zu übersichtlicheren Maschinengleichungen.

Im unteren Drehzahlbereich wird der Strom auf einen Maximalwert begrenzt, im oberen Drehzahlbereich muß wegen der Leistungsbegrenzung der Maschine der Fluß abgesenkt werden. Diese Betriebsgrenzen werden als Grenzkennlinien für Statorstrom, Rotorfluß und Statorspannung in Abhängigkeit der Motorparameter und der Kreisfrequenz des Drehfeldes errechnet. Die Drehmomentenregelung arbeitet mit der vereinfachten feldorientierten Regelung, die entsprechend dem angeforderten Sollmoment m_{soll} die momentenbildende y-Komponente Statorstrom unter folgenden Nebenbedingungen einstellt:

- Flußführung auf den Rotor Grenzfluß
- Stromführung auf $|i_s| < |i_{smax}|$, indem das Sollmoment m_{soll} zur Einhaltung dieser Strombegrenzung abgeregelt werden kann.

Vereinfachte Feldorient. Regelung

$$\omega_s = \omega_m = (\omega_{m1} + \omega_{m2}) / 2$$

Do $l=1,2$

$$\psi_{max} = \psi_{max}(\omega_s)$$

$$i_{smax} = i_{smax}(\omega_s)$$

$$i_{sx} = \psi_{max} / (1 - \sigma) x_s$$

$$m_z = \psi_{max} \sqrt{l_{smax}^2 - l_{sx}^2}$$

$$m_z = \text{Min}\{m_z, |m^*| \}$$

$$m = \text{sign}(m_z, m^*)$$

$$\omega_R = \frac{(1 - \sigma) x_s}{\tau_R} \frac{m}{\psi_{max}^2}$$

ENDDO

$$i_{sx} = \frac{\psi_{max}}{(1 - \sigma) x_s}$$

$$i_{sy} = \frac{m}{\psi_{max}}$$

$$|i_s| = \sqrt{i_{sx}^2 + i_{sy}^2}$$

$$u_{sx} = r_s i_{sx} - \omega_s [\sigma x_s i_{sy}]$$

$$u_{sy} = r_s i_{sy} + \omega_s [\sigma x_s i_{sx} + \psi_{max}]$$

$$|u_s| = \sqrt{u_{sx}^2 + u_{sy}^2}$$

Maschinengleichungen des Doppelmotors

$$\Delta\omega = (\omega_1 - \omega_2) / 2$$

$$\psi_{sx} = \sigma_{sx} i_{sx} + \psi_{rx}$$

$$\psi_{sy} = \sigma_{sx} i_{sy}$$

$$\dot{\psi}_{sxd} = \Omega_N \left[-\frac{r_s}{\sigma_{sx}} (\dot{\psi}_{sxd} - \psi_{rxd}) + \omega_s \psi_{syd} \right]$$

$$\dot{\psi}_{syd} = \Omega_N \left[-\frac{r_s}{\sigma_{sx}} (\dot{\psi}_{syd} - \psi_{ryd}) - \omega_s \psi_{sxd} \right]$$

$$\dot{\psi}_{rx} = \Omega_N \left[-\frac{r_r}{\sigma_{sx}} (\dot{\psi}_{rx} / (1 - \sigma) - \dot{\psi}_{sx}) + \Delta\omega \psi_{ryd} \right]$$

$$\dot{\psi}_{ry} = 0$$

$$\dot{\psi}_{rxd} = \Omega_N \left[-\frac{r_r}{\sigma_{sx}} (\dot{\psi}_{rxd} / (1 - \sigma) - \dot{\psi}_{sxd}) + \omega_r \psi_{ryd} \right]$$

$$\dot{\psi}_{ryd} = \Omega_N \left[-\frac{r_r}{\sigma_{sx}} (\dot{\psi}_{ryd} / (1 - \sigma) - \dot{\psi}_{syd}) + \omega_r \psi_{rxd} + \Delta\omega \psi_{rx} \right]$$

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{sx}} [\psi_{rx} \psi_{sy} + (\psi_{rxd} \psi_{syd} - \psi_{ryd} \psi_{sxd})]$$

$$\Delta m_i = \frac{1}{\sigma_{sx}} [\psi_{rx} \psi_{syd} + (\psi_{rxd} \psi_{sy} - \psi_{ryd} \psi_{sx})]$$

$$m_{i,2} = m_i \pm \Delta m_i$$

$\omega_{m1,2}$ = mech. Winkelgeschwindigkeit

ψ_{sx}, ψ_{sy} = mittlerer Statorfluß

ψ_{sxd}, ψ_{syd} = Differenz Statorfluß

$m_{i,2}$ = Drehmoment