

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Verzeichnis wichtiger Formelzeichen und Symbole | vii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 3 |
| 2.1 Einsatzgebiete für sensorlose Verfahren | 3 |
| 2.2 Randbedingungen für den Einsatz geberloser Systeme im industriellen Umfeld | 4 |
| 2.3 Modellierung der permanenterregten Synchronmaschine | 5 |
| 2.4 Polradorientierte Regelung | 7 |
| 2.5 Übersicht über bekannte Verfahren | 9 |
| 2.6 Abhängigkeit der Statorinduktivität | 11 |
| 2.6.1 Induktivitäten bei Berücksichtigung der magnetischen Sättigung . . | 12 |
| 2.6.2 Drehmoment bei Berücksichtigung der magnetischen Sättigung . . . | 16 |
| 2.6.3 Bestimmung der differentiellen Induktivität | 16 |
| 2.7 Versuchsaufbau | 21 |
| 3 Verfahren zur Lageschätzung | 23 |
| 3.1 Flussschätzer | 23 |
| 3.1.1 Prinzip des Flussschätzers | 24 |
| 3.1.2 Fehlerkompensation | 24 |
| 3.1.3 Anmerkungen zur Realisierung | 27 |
| 3.2 Lageschätzung über die magnetische Asymmetrie | 29 |
| 3.2.1 Aufschalten eines Testsignals | 30 |
| 3.2.2 Bestimmung der Induktivitätsverteilung | 31 |
| 3.2.3 Bestimmung der Rotorlage | 33 |
| 3.2.4 Bewertung des Verfahrens | 34 |
| 3.2.5 Messergebnisse | 36 |
| 3.3 Gesteuerter Hochlauf | 37 |
| 3.4 Vergleich der Verfahren | 39 |
| 3.5 Verfahrenswechsel | 40 |
| 3.5.1 Wechsel zwischen Induktivitätsmessung und Flussschätzung | 41 |
| 3.5.2 Wechsel zwischen gesteuertem und geregelttem Betrieb | 42 |
| 3.6 Initialisierung | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Verfahren zur Drehzahlschätzung | 51 |
| 4.1 | Differenzierer | 52 |
| 4.2 | Nachlaufsynchronisation (PLL) | 54 |
| 4.3 | Beobachter | 56 |
| 4.3.1 | Beobachterstruktur | 56 |
| 4.3.2 | Entwurf eines modalen Beobachters | 58 |
| 4.3.3 | Beobachterentwurf nach Ackermann | 60 |
| 4.3.4 | Erweiterte Beobachterstruktur | 62 |
| 4.3.5 | Kombination von Differenzierer und Beobachter | 64 |
| 4.4 | Vergleich und Bewertung | 66 |
| 5 | Anwendung auf schnelle Synchronmaschinen | 69 |
| 5.1 | Beschreibung der Applikationen | 70 |
| 5.2 | Implementiertes Verfahren | 71 |
| 5.2.1 | Ausrichtphase | 71 |
| 5.2.2 | Gesteuerter Anlauf | 73 |
| 5.2.3 | Geregelter Betrieb | 73 |
| 5.3 | Einsatz von Filtern | 74 |
| 5.4 | Messergebnisse | 76 |
| 6 | Zusammenfassung | 85 |
| | Anhang | 87 |
| A | Berechnungen | 87 |
| A.1 | Aufschaltung eines Gleichanteils bei der Initialisierung | 87 |
| B | Technische Daten des Prüfstands | 91 |
| B.1 | Maschinenparameter Servomotor | 91 |
| B.2 | Umrichter | 92 |
| B.3 | Modifizierter Umrichter | 92 |
| B.4 | Maschinenparameter Flüssigkeitspumpe | 93 |
| B.5 | Maschinenparameter Labormaschine | 93 |
| B.6 | Elektrische Daten der Drossel incl. 250m Kabel | 93 |
| B.7 | Maschinenparameter Turbomolekularpumpe 1 | 94 |
| B.8 | Maschinenparameter Turbomolekularpumpe 2 | 94 |
| B.9 | DSP-Board | 95 |
| | Literaturverzeichnis | 96 |

Verzeichniss wichtiger Formelzeichen und Symbole

mathematische Operatoren

| | |
|---------------------|--------------------------------|
| * | Sollwert |
| \sim | Schätzwert |
| $\hat{}$ | Schätzwert, Amplitude |
| - | Vektorielle Größe, Zeigergröße |
| $\Im\{ \}$ | Imaginärteil |
| Δ | Differenz |

Formelzeichen und Symbole

| | |
|-----------------------|---|
| A | Systemmatrix |
| B | Eingangsmatrix |
| c_n | Amplitude des n. Fourierkoeffizienten (komplexe Darstellung) |
| C | Ausgangsmatrix, Kapazität |
| D | Durchgriffsmatrix |
| $f; f_{abt}; f_S$ | Frequenz; Abtastfrequenz; Schaltfrequenz |
| $f(\dots)$ | Funktion, abhängig von ... |
| $G(s)$ | Übertragungsfunktion |
| $i; i_S; I_S$ | Strom; Ständerstrom; Effektivwert des Ständerstroms |
| i_μ | Magnetisierungsstrom |
| J | Massenträgheitsmoment |
| $K_p; T_n$ | Streckenverstärkung; Streckenzeitkonstante |
| $L; L_\delta$ | Induktivität; differenzielle Induktivität |
| $m_L; m_M$ | Lastmoment; von der Maschine aufgebrachtes Moment |
| n | Drehzahl, natürliche Zahl |
| p | Polpaarzahl |
| $Q; Q_B$ | Transformationsmatrix (Rotationsmatrix); Beobachtbarkeitsmatrix |
| r | Korrektur- bzw. Rückführgröße |
| R | Widerstand, Rotationsmatrix |
| t | Zeit |
| $u; u_S; U_S; U_{ZK}$ | Spannung, Eingangsgröße; Ständerspannung; Effektivwert der Ständerspannung; Zwischenkreisspannung |
| x | Zustandsgröße |

| | |
|----------------------|---|
| y | Ausgangsgröße |
| Z | Impedanz |
| ε_{RS} | Winkel zwischen Rotor- und Statorfeld |
| $\eta; \eta_{IS}$ | Wirkungsgrad; Richtung des Stromzeigers im gesteuerten Betrieb |
| κ | Verstärkungsfaktor der drehzahlabhängigen Lagekorrektur, Entwurfparameter für den Beobachterentwurf |
| μ | Permeabilität |
| ω | Kreisfrequenz |
| $\varphi; \varphi_n$ | Phase; Phase des n. Fourierkoeffizienten (komplexe Darstellung) |
| $\psi; \Psi_P$ | magnetischer Fluss; Polradfluss |
| ξ | Richtung in der Rotorebene |

tiefgestellte Indizes

| | |
|-----------------|---|
| a, b, c | Komponenten in den Strangrichtungen |
| d, q | Komponenten in rotorfesten Koordinaten |
| diff | über einen Differenzierer bestimmte Größe |
| D | Drossel |
| F | Filter |
| $HP; I; TP$ | Hochpass; Integrator; Tiefpass |
| IS | auf den gesteuerten Stromzeiger bezogen |
| k | Zählindex für Abtastperioden |
| kor | Korrektur |
| min; max | Minimalwert; Maximalwert |
| N | Bemessungswert |
| obs | über einen Beobachter bestimmte Größe |
| S | Statorgröße |
| $uU; oU$ | untere Umschaltfrequenz; obere Umschaltfrequenz |
| test | Testsignal |
| trans | im Übergangsbereich zur Transformation verwendete Größe |
| x, y | Komponenten in am Statorstrom orientierten Koordinaten |
| α, β | Komponenten in statorfesten Koordinaten |
| Ψ | über den Flusschätzer bestimmte Größe |

hochgestellte Indizes

| | |
|-----|-----------------------------------|
| R | Größe in rotorfesten Koordinaten |
| S | Größe in statorfesten Koordinaten |

Abkürzungen

| | |
|-----|--|
| AP | Arbeitspunkt |
| G | (Lage- / Drehzahl-) Geber |
| PLL | Phase Locked Loop, Phasennachlaufsynchronisation |
| PSM | Permanenterregte Synchronmaschine |