

STEUERUNG FÜR EINE 100 kW GESCHALTETE RELUKTANZMASCHINE (SRM)

M. Holub, F. Laube

1 EINLEITUNG

Am Institut wurde ein 100 kW Geschalteter Reluktanzmotor/Generator konstruiert. Um dessen Eigenschaften im Experiment überprüfen und die vollautomatische Steuerung für den Motor auslegen zu können, wurden ein spezieller Prüfstand und ein Frequenzumrichter für die SRM entwickelt und aufgebaut. Zur Darstellung der verschiedenen Betriebsarten (Motor-/Generatorbetrieb) und Lastfälle bietet das Steuerungssystem die Möglichkeit der freien Parametereinstellung sowie intelligente Überwachungsfunktionen. Damit lassen sich alle gewünschten Steuerungsparameterkombinationen realisieren. Maschinenparameter und Sollwerte sind einstellbar und Fehlersituationen können sofort erkannt werden.

2 ZIELSETZUNG

Das **Bild 1** zeigt die 100kW Versuchsmaschine mit der zugehörigen Motorsensorik.

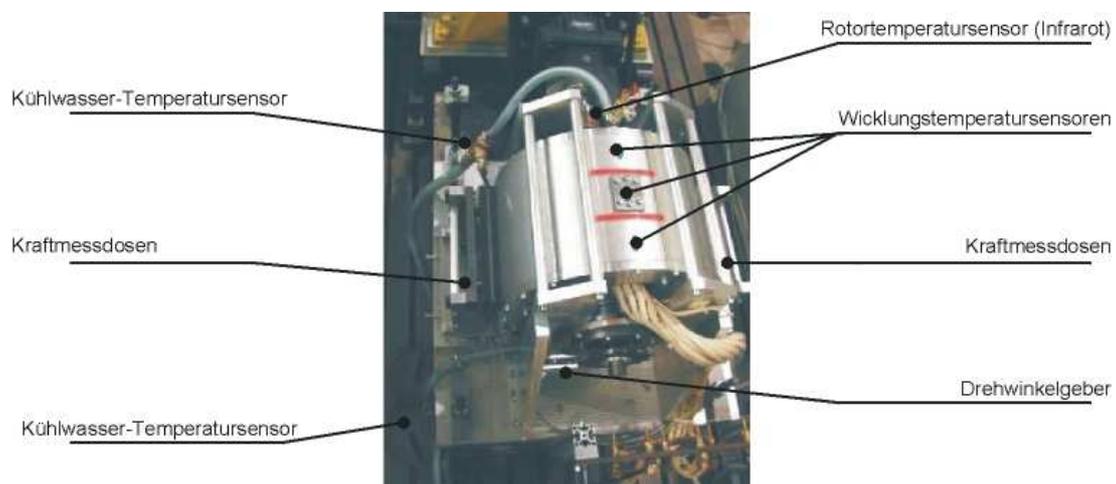


Bild 1: 100 kW SRM Versuchsmotor mit Motorsensorik

Während der Versuchsdurchführung müssen alle Sensorwerte und Steuerungsparameter ständig überwacht und gegebenenfalls angepasst werden. Außerdem besteht die Notwendigkeit der Implementierung einer Speicherfunktion. Mit Hilfe einer LabView basierten grafischen Oberfläche lassen sich alle Messwerte gleichzeitig darstellen und bearbeiten (Filterung, A/D Wandlung, Umrechnung). Des Weiteren können Alarmzustände signalisiert und alle Messwerte auf der Festplatte des Rechners gespeichert werden.

Mit einer Maximaldrehzahl von $n_{max} = 12000 \text{min}^{-1}$ und $N_R = 16$ Rotorzähnen ergibt sich eine maximale Maschinengrundfrequenz von

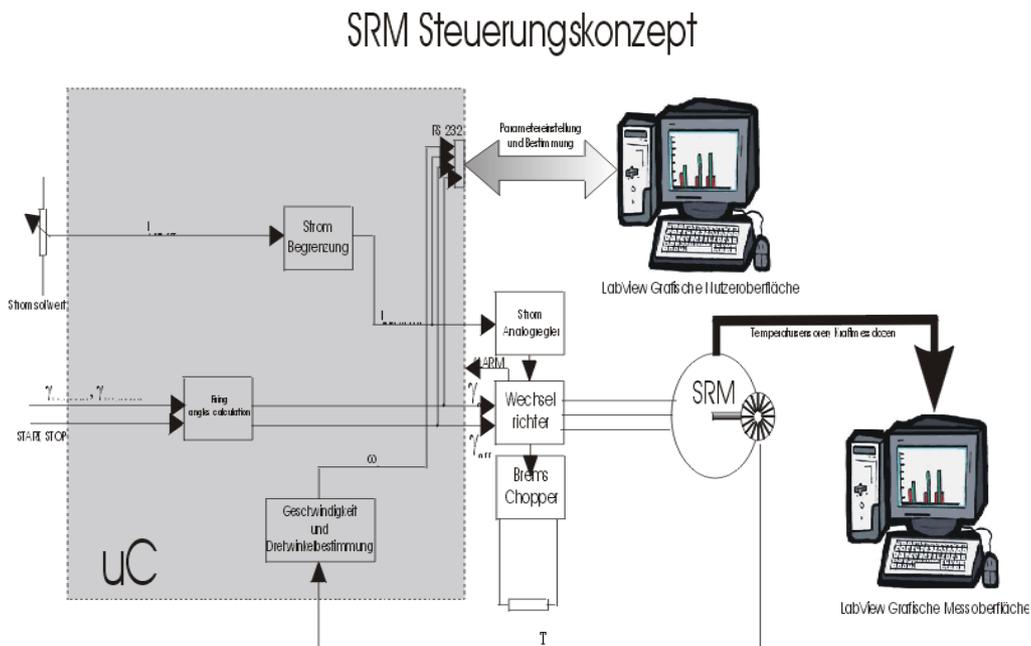
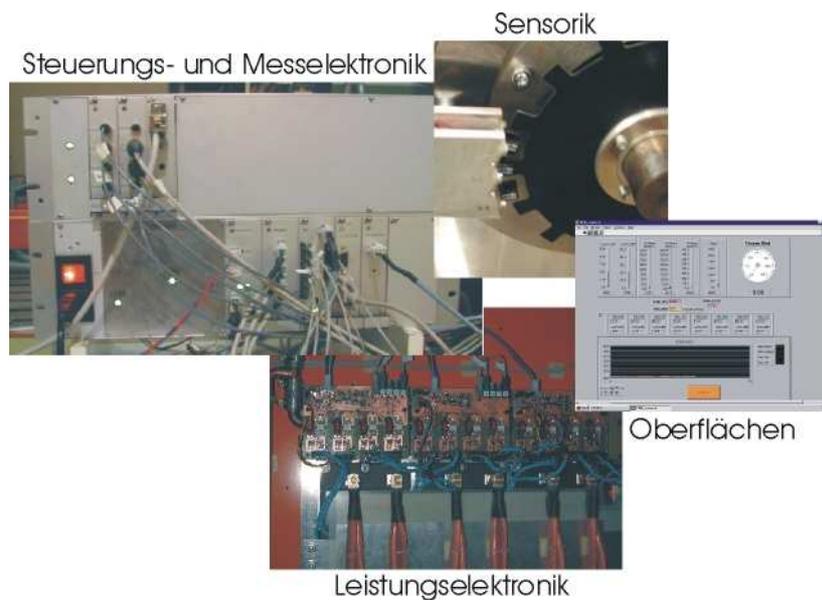
$$f_{max} = \frac{\Omega_{max} \left[\frac{\text{U}}{\text{min}} \right] \cdot N_R}{60} = \frac{12000 \cdot 16}{60} = 3200 \text{ Hz}.$$

Wird bei Maximaldrehzahl auf das Zwischentakten verzichtet (Spannungsblockbetrieb), entspricht diese Frequenz der maximalen Ansteuerfrequenz. Mit der hohen Frequenz ergeben sich relativ hohe Anforderungen an die 1200V/400A - Leistungsschalter und den entsprechenden Mikrocontroller (Infineon 167CR). Grundsätzlich stehen für die Beeinflussung des Betriebsverhaltens vier unabhängige, optimierbare Regelungsparameter zur Verfügung (Stromgrenze I_{max} , Hystereseband ΔI , Einschaltwinkel γ_{in} , Ausschaltwinkel γ_{aus}) mit denen sich jeder Betriebspunkt (Sollmoment und Solldrehzahl) praktisch realisieren lässt. Für eine Reduzierung des Regelungsaufwandes ist es zweckmäßig, möglichst mehrere Regelungsparameter konstant zu halten, um den Steuerungsalgorithmus für den Mikrocontroller zu vereinfachen und die benötigte Rechenleistung zu reduzieren.

3 AUSFÜHRUNG

Im **Bild 2** ist das Steuerungskonzept des Antriebes und im **Bild 3** die praktische Realisierung der einzelnen Elektronikkomponenten des Systems dargestellt. Die Funktionalität der Steuerung wird auf zwei Rechner aufgeteilt. In den Steuerungsrechner werden die Steuerungsparameter eingegeben. Außerdem erfolgt hier die Kommunikation mit dem Mikrocontroller. Der zweite Rechner führt die A/D Wandlungen durch und verarbeitet die Messergebnisse. Beide Oberflächen bieten die Möglichkeit der Datenspeicherung für die weitere Datenverarbeitung.

Insbesondere aufgrund der hohen Störempfindlichkeit der Elektronik und des relativ ungewöhnlichen SRM Steuerungsprinzips (nicht sinusförmige Ströme, genaue Pulszeit-anpassung, hohe Momentschwankungen), ist beim Aufbau des Antriebssystems auf eine hohe Robustheit und Zuverlässigkeit zu achten. Aus diesem Grund wird für die besonders sensible interne Übertragung von Steuerungsimpulsen und Alarmsignalen die Lichtwellenleiter-Technologie eingesetzt. Damit wird neben einer extrem schnellen Signalübertragung auch höchste Störuneempfindlichkeit gewährleistet. Durch den Einsatz spezieller, EMV-gerechter Schaltungen und einer Potentialtrennung kann die Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen weiter herabgesetzt werden.

**Bild 2:** Steuerungskonzept**Bild 3:** Steuerungselektronik

3.1 Minimierung der Steuerungsparameteranzahl

Aufgrund der hohen benötigten Steuerungsgenauigkeit - die maximal zulässige Zeitabweichung pro Steuerungspuls beträgt $1 \mu\text{s}$ - und der hohen maximalen Maschinengrundfrequenz von 3,2 kHz ist zur Aufwandsbegrenzung die Minimierung der Anzahl der Steuerungsparameter notwendig. Außerdem muss das System auf jede Sollwertänderung schnell und eindeutig reagieren, was nur dann möglich ist, wenn einer der Steuerungsparameter (z.B. I_{max}) eine übergeordnete Stellung einnimmt. Der Steuerungsalgorithmus wird

weiter vereinfacht, wenn für die jeweilige Betriebsart (Motor/Generator) entweder Ein- oder Ausschaltwinkel konstant gehalten werden.

In mit Hilfe eines kennfeldbasierten SIMPLORER Maschinenmodells durchgeführten Simulationen wurden für den Motor- und den Generatorbetrieb alle Steuerungsparameter systematisch variiert. Als Ergebnis wurde festgestellt, welche Regelungsparameter zum Erreichen jeden Betriebspunktes im Drehzahlbereich zwischen 6000 und 12000 min^{-1} konstant gehalten werden können. Das **Bild 4** zeigt die resultierenden Kennfelder für beide Betriebsarten.

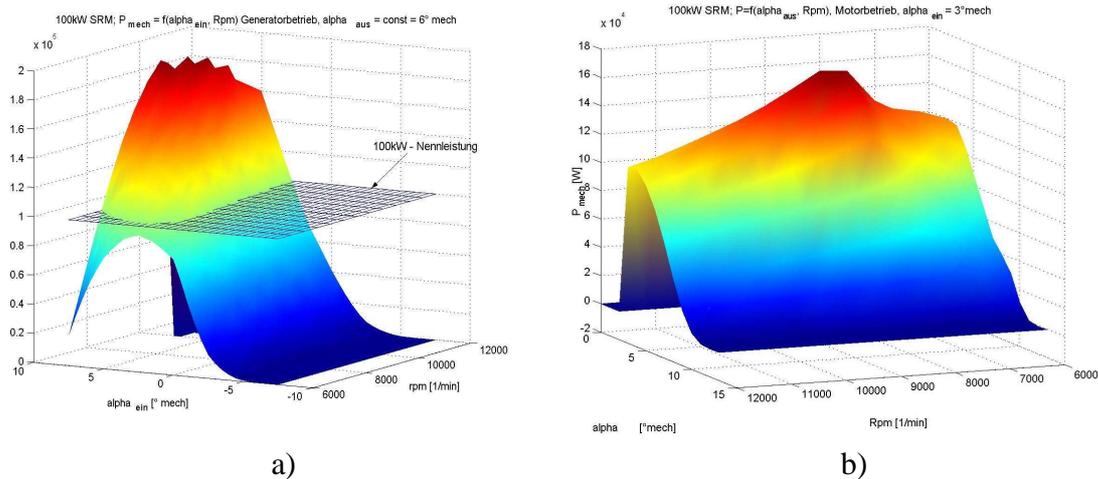


Bild 4: Kennlinienfelder für die Parametervariation (Einpulsbetrieb)

- a) Generatorbetrieb (Variation von γ_{ein} ; $\gamma_{\text{aus}} = \text{const.}$)
- b) Motorbetrieb (Variation von γ_{aus} ; $\gamma_{\text{ein}} = \text{const.}$)

Wie die Kennfelder zeigen, ist es möglich, die Nennleistung von 100 kW über den gesamten Drehzahlbereich bei Variation nur eines Steuerungsparameters zu erreichen. Einzelpulsbetrieb bedeutet, dass der Strom ohne Zwischentakten nach dem Erreichen des Sollstromwertes I_{max} durch Anlegen der negativen Zwischenkreisspannung abgeschaltet wird. Diese Betriebsart wird bei hohen Drehzahlen bevorzugt, um die Schaltfrequenz der IGBTs zu begrenzen.

4 VERGLEICH ZWISCHEN SIMULATIONS- UND MESSERGEBNISSEN

Um die Gültigkeit der Simulationsmodelle überprüfen zu können, ist es notwendig, die auf FE-Rechnungen (*Look-up tables*) basierenden, zeitlichen Verläufe der Maschinengrößen mit Messwerten zu vergleichen. Das dafür verwendete Simulationsmodell wurde mit MATLAB-Simulink erstellt. Im **Bild 5** und **Bild 6** sind ausgewählte simulierte und gemessene Verläufe vergleichsweise dargestellt.

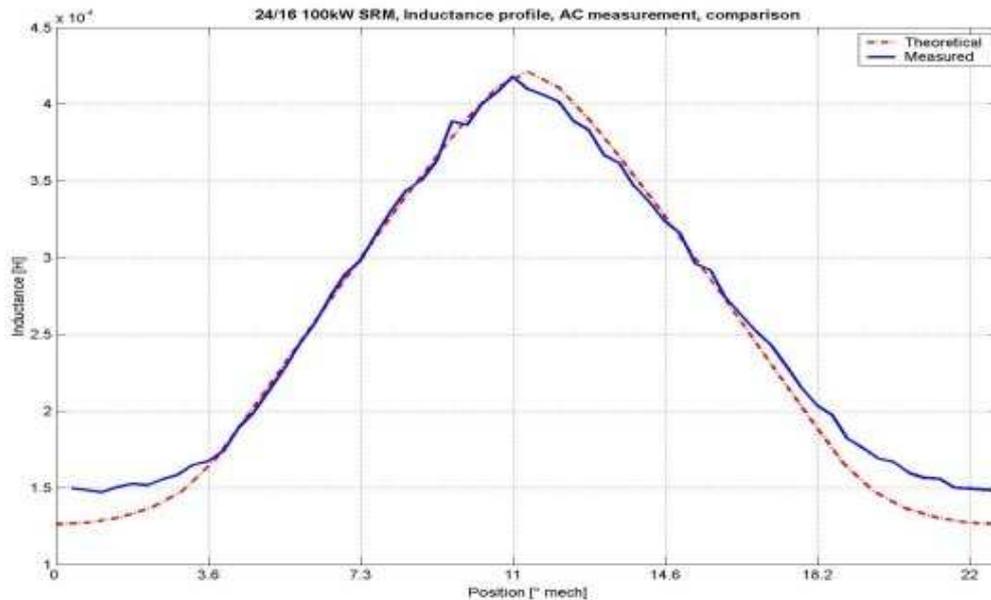
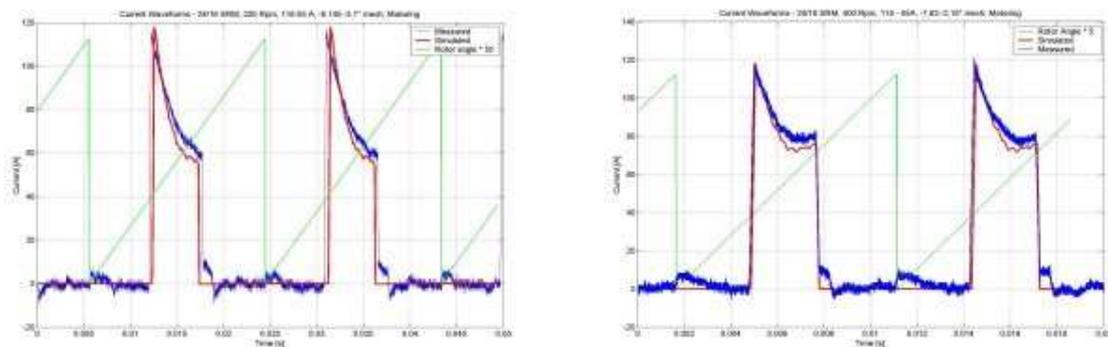


Bild 5: Gerechnete und gemessene Induktivitätsverläufe (ungesättigt)



a) $n = 200\text{min}^{-1}$

b) $n = 400\text{min}^{-1}$

Bild 6: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Stromverläufen (ungesättigt, $M_{mi}=0$)

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die bisher durchgeführten Untersuchungen an der Versuchsmaschine, einer geschalteten Reluktanzmaschine mit 100kW Nennleistung, haben gezeigt, dass das Maschinenkonzept (SRM) trotz des relativ hohen steuerungstechnischen Aufwandes für bestimmte Anwendungsfälle (hohe Drehzahlen, einfache Konstruktion) eine vielversprechende Alternative zu konventionellen Maschinenkonzepten (z.B. ASM) darstellt. Allerdings sind weitere Versuche, insbesondere zum dynamischen Maschinenverhalten bei hohen Drehzahlen, notwendig, um die Maschine endgültig bewerten zu können.