

MESSUNGEN AN EINER SCHWUNGRAD - SRM

M. Holub, J. Hoffmann, P. Hoffmann

1 EINLEITUNG

Zur Ein- und Auskopplung von Energie in rotierenden Speichern bieten sich Maschinentypen an, die im Leerlauf annähernd verlustfrei betrieben werden können. Diese Bedingung wird z. B. von Asynchronmaschinen erfüllt. Aus der Gruppe der statorerregten Synchronmaschinen kommen vor allem Switched-Reluctance-Maschinen (SRM) in Betracht. Auf Grund ihres relativ einfachen und stabilen passiven Rotoraufbaus weisen sie eine kleine Trägheitsmasse auf und können für diesen Anwendungsfall vorteilhaft bis zu höchsten Drehzahlen betrieben werden.

Am IMAB wurde eine SRM mit einer Nennleistung von $P = 100 \text{ kW}$ für den Einsatz mit einem Schwungmassenspeicher berechnet, gebaut und in Betrieb genommen.

Nach vielen Vorversuchen zur Entwicklung des günstigsten Steuerverfahrens kam es im Rahmen dieser Versuche zum erstmaligen Probelauf im vorgesehenen Nennbetrieb und zur Aufnahme der entsprechenden Messwerte zum Nachweis der geforderten Eigenschaften.

2 AUFBAU DES PRÜFSTANDS

2.1 Mechanischer Aufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus den Hauptkomponenten Motor/Generator, Getriebe und Belastungsmaschine (**Bild 1**). Der Versuchsmotor ist eine SRM mit einem wassergekühlten Stator und luftgekühltem Rotor. Auf den Stator wirkende Kräfte können mit Hilfe von Kraftsensoren aufgenommen werden. Diese befinden sich beidseitig des Stators.

Die Temperaturen werden in der Ständerwicklung, am Rotor und am Kühlwasser gemessen. Zusätzlich wird auch die Getriebetemperatur überwacht.

Das Getriebe wird zwischen Versuchs- und Belastungsmaschine geschaltet und dient dazu, die Drehzahl und das Moment zu wandeln. So kann die hochoberdrehende Reluktanzmaschine an die niedertourig drehende Belastungsmaschine angeschlossen werden. Drehzahl und Drehmoment sind für beide Maschinen separat messbar.

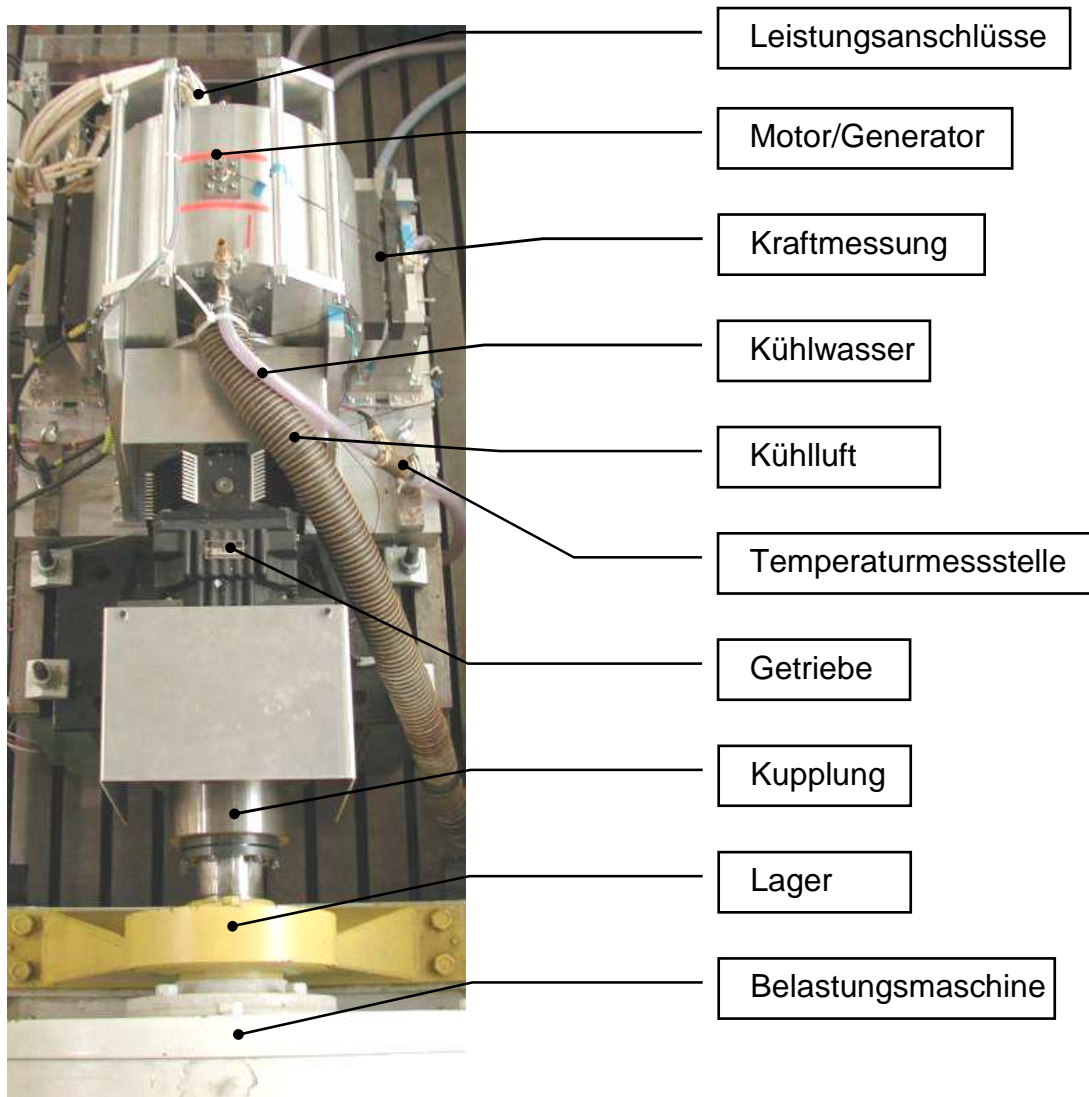


Bild 1: Anordnung der Versuchsmaschine

2.2 Steuerungsprinzip

Bild 2 zeigt das angewandte Steuerungsprinzip. Zum Einsatz kommt ein vereinfachtes System, bei dem nur der Ausschaltwinkel verändert wird. Stromsollwert, Stromhysterese und der Einschaltwinkel bleiben im ganzen Drehzahlpektrum des Schwungmassenspeichers konstant. Der Ausschaltwinkel ist in einer Tabelle (Look-Up Table) im Mikrocontroller diskret gespeichert. Unter Berücksichtigung realer Betriebszustände werden alle Zwischenwerte mittels Interpolationsroutinen berechnet.

Der Stromregler gibt als obere Abschaltswelle den für die Leistungshalbleiter maximalen Stromwert aus. Die sich real einstellende Stromamplitude wird jedoch durch die Schaltwinkelkombination und die aktuelle Drehzahl bestimmt.

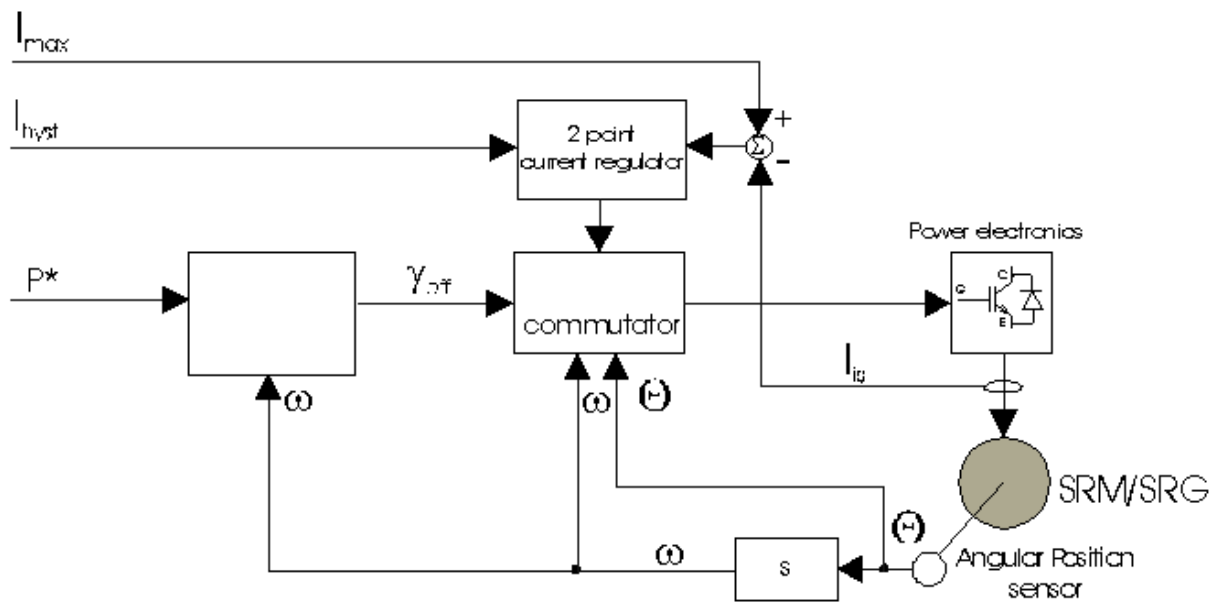


Bild 2: Steuerungsblockdiagramm einer 100 kW-SRM für einen Schwungradspeicher

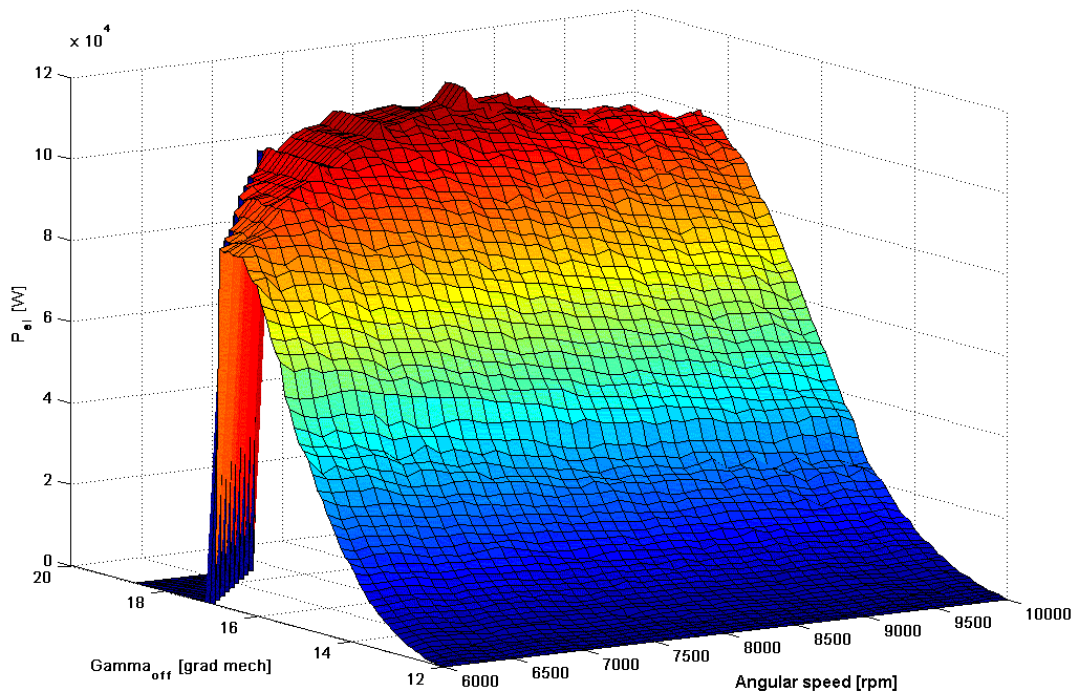


Bild 3: Elektrische Leistung (SRM als Generator) als Funktion der Drehzahl und des Ausschaltwinkels
(Einschaltwinkel $\gamma_{on} = \text{const} = 7,4$ grad mech, Simulationsergebnisse)

Bild 3 zeigt die simulationstechnische Verifizierung der oben ausgeführten, vereinfachten Steuerungsstruktur: die Maschine wird über das ganze vorgesehene Drehzahlspektrum (6000 – 10000 1/min) nur mit dem Ausschaltwinkel als Steuerparameter betrieben. Gleichzeitig ist es möglich, nur durch Verändern dieser Steuergröße jede gewünschte Leistung abzugeben. Die Beschränkung auf einen Parameter minimiert die benötigte Rechenleistung des Mikrocontrollers. Schnelligkeit d.h. kürzeste Rechenzeit haben hier höchste Priorität. Außerdem sind die Algorithmen einfach, die ganze Steuerung wird robust. Ein konstanter Einschaltwinkel bietet zusätzlich die Möglichkeit, diesen Parameter so zu wählen, dass die auftretenden Normalkräfte möglichst klein bleiben.

3 MESSUNGEN

Ein wichtiges Kennzeichen für die Dynamik eines Antriebs ist die sogenannte Auferrungszeit. Sie beschreibt den Zeitraum zwischen Aktivierung und Erreichen des Nennmoments einer Maschine. Die SRM zeigt dabei ein sehr günstiges Verhalten. Im Verein mit der Verlustarmut im Leerlauf und der relativ niedrigen Schaltfrequenz stellt sie für die vorgesehene Anwendung die vorteilhafteste Lösung dar.

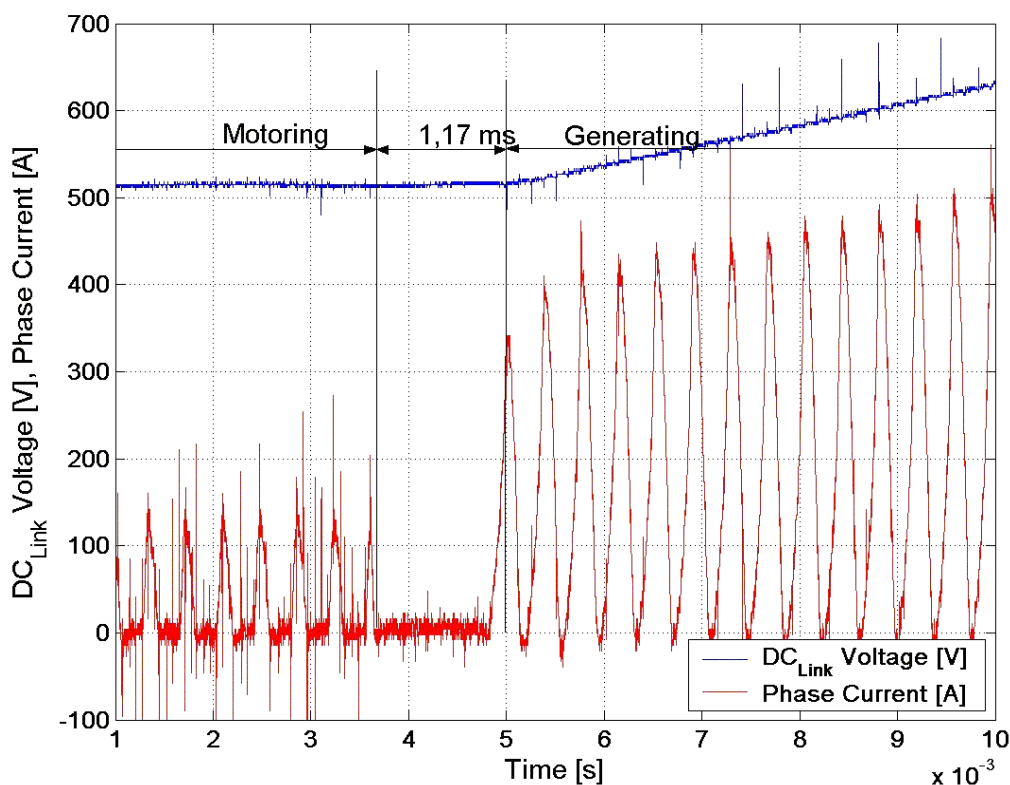


Bild 4: Auferregungszeit, 10000 1/min

In **Bild 4** ist das Umschalten der SRM von motorischem auf generatorischen Betrieb dargestellt. Die Zeit für dieses Umschalten beträgt 1,17 ms und ist damit deutlich kürzer als die in der Spezifikation für die Maschine vorgegebene Zeit von 2 ms.

Der zweite wichtige Aspekt der Messreihe war die Beantwortung der Frage, wie gut die gebaute Maschine (zusammen mit der realisierten Regelung) in der Lage ist, die in der rotierenden Masse (hier die über das Getriebe angeflanschte Gleichstrommaschine) gespeicherte Energie abzugeben. Das entsprechende Versuchsdiagramm zeigt **Bild 5**. Die entnommene Leistung wird von der Einsetzdrehzahl $n = 10000$ 1/min bis zur unteren Grenze von $n = 6000$ 1/min auf einem konstanten Wert von 25 kW gehalten. Zum Nachweis der spezifizierten generatorischen Nennleistung von 100 kW wurde durch Anpassen der Abschaltwinkel die abgegebene Leistung schrittweise auf $P = 100$ kW gesteigert. Die in **Bild 5** für eine Leistung von 25 kW dargestellte Entladezeit verkürzte sich dadurch auf $t = 1,6$ s .

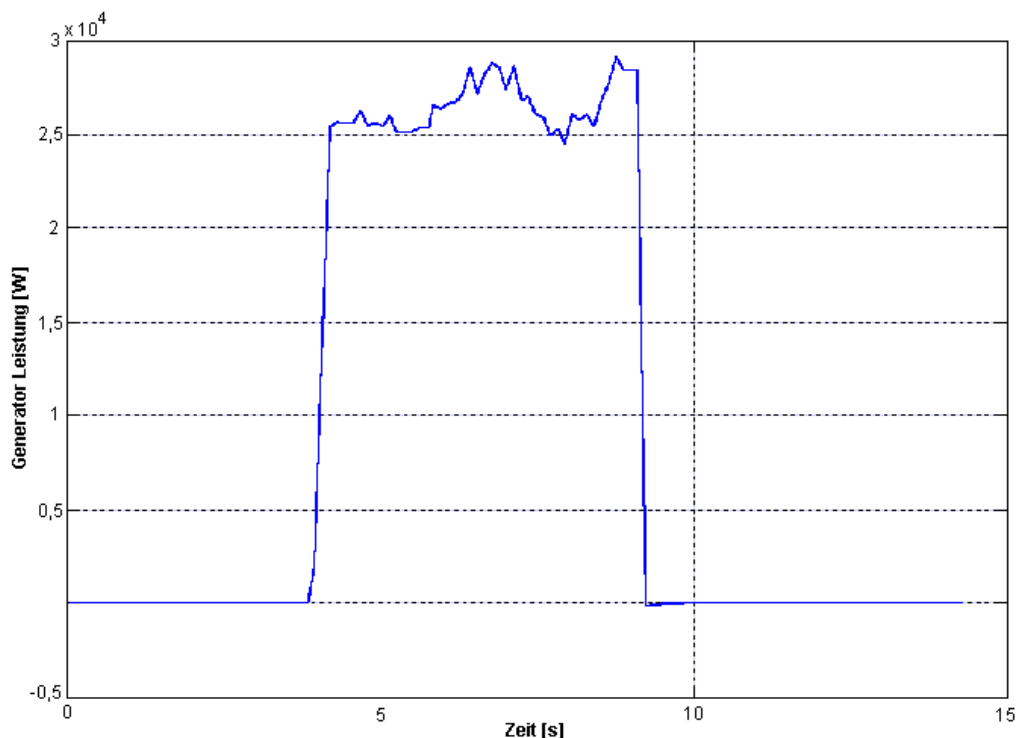


Bild 5: Elektrische Leistung (SRM als Generator)
Bremsversuch (10000-6000 Umin), 25 kW Sollleistung, Bilineare Interpolation

4 ERGEBNISSE

Durch Vorversuche wurde zunächst die grundsätzliche mechanische Stabilität der vollkommen neu konstruierten SRM belegt. Hierbei wurde die Maschine stationär motorisch/generatorisch mit Nennleistung ($P = 100$ kW) betrieben. Durch weitere Messungen konnte anschließend die mechanische Zuverlässigkeit bei plötzlich einsetzender Belastung und dem Abbremsen von 10000 1/min auf 6000 1/min nachgewiesen werden. Dieser Arbeitsbereich entspricht auch dem vorgesehenen Einsatz der Maschine.

Die gemessene Auferregungszeit liegt deutlich unter dem geforderten Wert und qualifiziert die Maschine für den vorgesehenen Einsatz in einem hochdynamischen Schwungradspeicher.