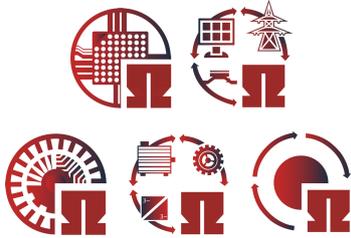


ELSYS Note



Dreiphasigen Klemmenkurzschluss

Beim dreiphasigen Klemmenkurzschlussversuch muss das maximale Drehmoment mit der Belastungsmaschine abgestimmt werden. Reicht deren Leistung nicht aus, erfolgt der Kurzschluss erst bei einer festgelegten Drehzahl. Diese ELSYS Note beschreibt die Vorgehensweise und deren Einfluss auf die Induktivitätsbestimmung.

Zielsetzung

Dazu wird der Kurzschlussstrom bei einer ausreichend hohen Drehzahl gemessen und daraus bei bekannter Flussverkettung die Induktivität bestimmt. Das Kurzschließen der Wicklungen soll erst nach Erreichen der Zieldrehzahl geschehen. Dies hat den Vorteil, dass die Belastungsmaschine kleiner dimensioniert werden kann, verglichen mit der Beschleunigung aus dem Stand bei vorhandenem Kurzschluss.

dq-Modell

Im einsträngigen parktransformierten Ersatzschaltbild der PMSM im Kurzschluss sind die Gleichungen in (1) für die Ströme gültig. Mit diesen Gleichungen kann der Kurzschlussstrom, wie in Abb. 1(a) dargestellt, in Abhängigkeit der Maschinenparameter und der Drehzahl bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \omega_{ph} &= p \cdot \frac{n}{60} \cdot 2\pi \\ i_{sc}(\omega_{ph}) &= \sqrt{i_d^2(\omega_{ph}) + i_q^2(\omega_{ph})} \\ i_d(\omega_{ph}) &= -\frac{\omega_{ph}^2 L_q \psi_{pm}}{R^2 + \omega_{ph}^2 L_d L_q} \\ i_q(\omega_{ph}) &= -\frac{\omega_{ph} R \psi_{pm}}{R^2 + \omega_{ph}^2 L_d L_q} \end{aligned} \quad (1)$$

Bei einer Maschine mit Oberflächenmagneten ist das Drehmoment unabhängig von der Induktivität und kann wie folgt berechnet werden

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \psi_{pm} \cdot i_q \quad (2)$$

Das Drehmoment in Abhängigkeit der Drehzahl wird in Abb. 1(b) dargestellt.

Voraussetzung

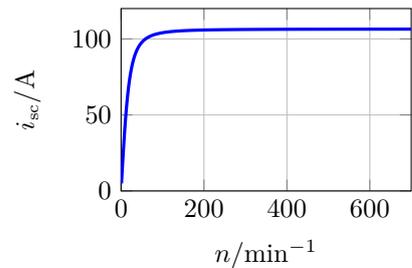
Für die Auswertung muss nur die Flussverkettung ψ_{pm} bekannt sein. Diese kann aus dem Leerlaufversuch gewonnen werden. Zusätzlich muss die nicht saliente Bauform bereits nachgewiesen sein, damit gelten $L_d = L_q$. Denn aus der Grenzwertbetrachtung in Gleichung (3) geht hervor, dass nur die Induktivität in der d-Achse für hohe Drehzahlen gilt.

$$\begin{aligned} \lim_{\omega_{ph} \rightarrow \infty} (i_d(\omega_{ph})) &= -\frac{\psi_{pm}}{L_d} \\ \lim_{\omega_{ph} \rightarrow \infty} (i_q(\omega_{ph})) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

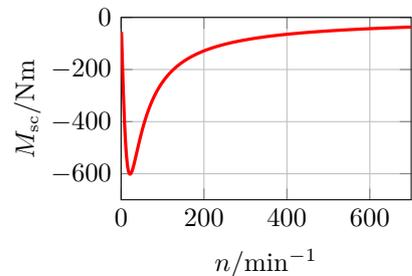
$$L_d = \left| -\frac{\psi_{pm}}{i_d} \right|$$

Für die Planung der Mess- und Betriebsmittel kann es sinnvoll sein die Kurven wie in Abb. 1 in Abhängigkeit der Drehzahl zu simulieren. In der Abbildung ist das Kurzschlussdrehmoment für eine PMSM mit

den Parametern $R = 0,1588 \Omega$, die Induktivitäten $L_q = L_d = 4,71 \text{ mH}$, $\psi_{pm} = 0,502 \text{ Vs}$ und $p = 15$.



(a) Strom $i_{sc}(n)$



(b) Drehmoment $M(n)$

Abb. 1: Kurzschluss

Für hohe Drehzahlen stellt sich ein konstanter Kurzschlussstrom von ca. 105 A ein. Für das Erreichen des stationären Kurzschlussstroms ist ein sehr hohes Drehmoment erforderlich. Steht das Drehmoment auf dem Prüfstand nicht zur Verfügung, kann der Motor im Leerlauf auf eine Zieldrehzahl beschleunigt werden und erst bei Erreichen der Drehzahl kurzgeschlossen werden.

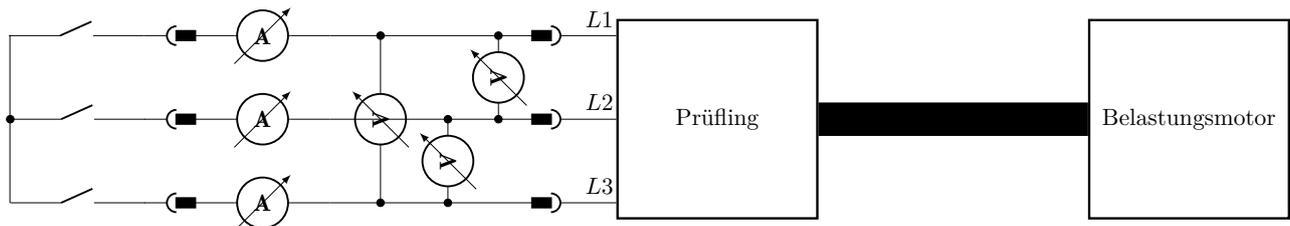


Abb. 2: Messschaltung Kurzschlussversuch

Versuchsaufbau

In der Abb. 2 sind die Messstellen der Ströme und Spannungen eingezeichnet. Es werden die Strangstromme $I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$ mit Stromzangen und die Außenleiterspannungen $U_{12}(t)$, $U_{23}(t)$, $U_{31}(t)$ direkt mit einem Leistungsmessgerät gemessen. Im Versuchsaufbau ist ein **No-ckenschalter** integriert, mit dessen Hilfe die Wicklungen kurzgeschlossen werden, wenn die Zieldrehzahl erreicht wurde.

Der Trigger, um die Aufzeichnung zu starten, ist der Betrag der Leiterströme. Übersteigt dieser eine Schwelle, wird die Aufzeichnung vor und etwa 10 Sekunden nach dem Triggerereignis abgespeichert.

Versuchsdurchführung

Zur Durchführung des Versuchs wird die Antriebsmaschine drehzahl geregelt auf eine Drehzahl (im Beispiel größer als $n = 300 \text{ min}^{-1}$) beschleunigt. Der Prüfling wird dabei mit offenen Klemmen betrieben, sodass kein Strom in der Statorwicklung fließt.

Hat der Prüfling die Zieldrehzahl erreicht, wird der Schalter geschlossen, um einen dreiphasigen Klemmenkurzschluss zwischen Motorklemmen herzustellen. In Abb. 3(a) sind die Phasenströme während des Schaltvorgangs zu sehen.

Die Belastung während des Schalt-

vorgangs ist enorm. Dies ist auch in Abb. 3(b) zu sehen. Hier ist das Drehmoment der Motorwelle während des Schaltvorgangs gezeigt.

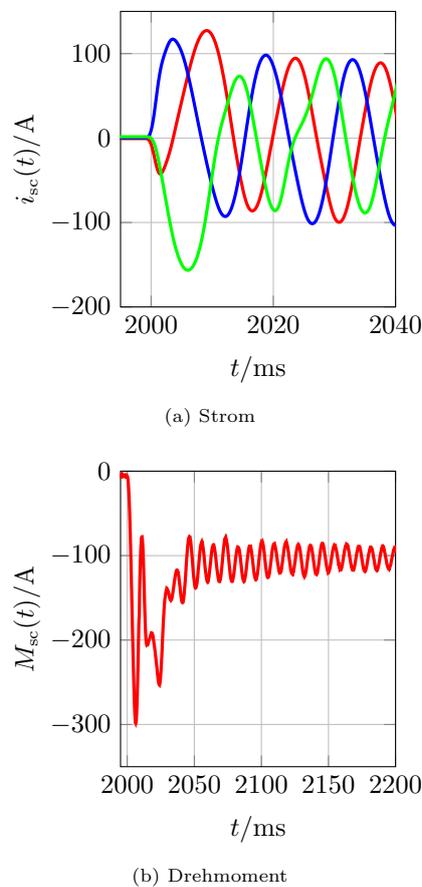


Abb. 3: Schaltvorgang

Versuchsauswertung

Der gemessene Spitzenwert des Kurzschlussstroms entspricht dem Strom in der d-Achse. Bei einer ausreichend hohen Drehzahl ist der Strom in der q-Achse näherungsweise 0 A, sodass die Gleichung (3) verwendet werden kann. Abb. 4 zeigt

den ermittelten Spitzenstrom gemittelt über alle Phasen. Eingesetzt in die Gleichung 3 ist die Induktivität:

$$L_d = \left| -\frac{\psi_{pm}}{i_d} \right| = \left| -\frac{0,502}{99,36} \right| = 5,052 \text{ mH} \quad (4)$$

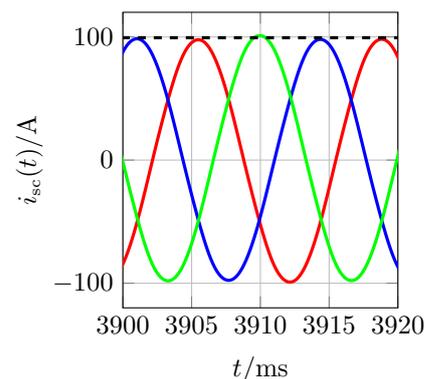


Abb. 4: Kurzschlussstrom Auswertung

Zusammenfassung

Mit dem gezeigten Verfahren lässt sich die Induktivität sehr gut ermitteln. Das benötigte Drehmoment wurde mit dem Verfahren reduziert, sodass die Belastungsmaschine wesentlich kleiner dimensioniert werden kann, damit das dq-Ersatzschaltbild auf einem Back-to-Back Prüfstand parametrieren werden kann. Beim Schaltvorgang entstehen dennoch hohe Belastungen für die Betriebsmittel, die vor der Versuchsdurchführung analysiert werden sollten.