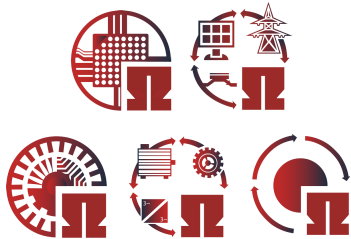


ELSYS Note



Kurzschlussdrehmoment

In dieser ELSYS-Note wird das Kurzschlussdrehmoment einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) untersucht. Das Drehmoment wird durch Kupferverluste und die Drehmomentgleichung berechnet. Beide Ansätze zeigen eine gute Übereinstimmung und validieren die vereinfachten Modellannahmen.

Die PMSM

Das Ziel dieses ELSYS Notes ist es, den stationären Kurzschlussstrom aus dem Ersatzschaltbild der PMSM zu bestimmen. In dem hier beschriebenen Versuch werden die Anschlussklemmen der Maschine kurzgeschlossen, und der Motor wird aus dem Stillstand beschleunigt. Dabei könnten die Drehzahl und der Statorstrom, insbesondere bei einem transienten Einschwingvorgang, mit einem Oszilloskop gemessen und aufgezeichnet werden.

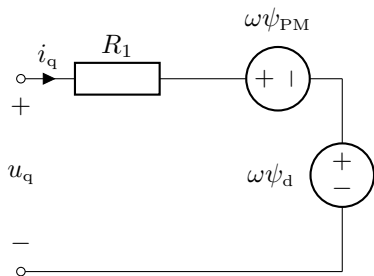


Abb. 1 ESB der q -Achse

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) zeichnet sich dadurch aus, dass der Rotor mit Permanentmagneten ausgestattet ist. Die Anordnung der Magneten kann variieren, von innenliegenden Magneten bis hin zu Magneten, die auf der Oberfläche angebracht und mit einer Bandage gesichert sind. Zunächst betrachten wir das Ersatzschaltbild der q -Achse, wie in Abb. 1 dargestellt.

Zur Bestimmung der Parameter des Motors werden in der Regel zuerst die Parameter R_1 und ψ_{PM} ermittelt. Der Statorwiderstand R_1 ergibt sich aus einer Messung des **Gleichstromwiderstands**. Der durch die Permanentmagneten erzeugte Fluss induziert eine Spannung in den Statorwicklungen. Um ψ_{PM} zu bestimmen, wird der Motor mit offenen Klemmen angetrieben und die induzierte Spannung an den Klemmen gemessen. Für eine in Stern geschaltete Wicklung kann dieser Parameter wie folgt berechnet werden:

$$\psi_{PM} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{eff}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2\pi f} \quad (1)$$

$$\omega\psi_d = 0 \text{ V s} \quad \forall \quad i_d = 0 \text{ A}$$

Da der Motor mit offenen Klemmen betrieben wird, ist der Strom gleich Null, was bedeutet, dass $\psi_d = 0 \text{ V s}$.

Kurzschlussstrom

Der Kurzschluss bezieht sich auf einen Klemmenkurzschluss der Maschine. In diesem Fall werden die Klemmenspannungen in den Ersatzschaltbildern auf null gesetzt. Das Ersatzschaltbild der d -Achse ist in Abb. 2 dargestellt.

Die Komponentenströme sowie der Gesamtstrom können nun berechnet werden, wenn die Klemmenspannung auf Null gesetzt wird.

Dies führt zu folgenden Zusammenhängen, wobei die Parameter L_d und L_q berücksichtigt werden:

$$i_{ks}(\omega_e) = \sqrt{i_d^2(\omega_e) + i_q^2(\omega_e)}$$

$$i_d(\omega_e) = -\frac{\omega_e^2 L_q \psi_{PM}}{R_1^2 + \omega_e^2 L_d L_q}$$

$$i_q(\omega_e) = -\frac{\omega_e R_1 \psi_{PM}}{R_1^2 + \omega_e^2 L_d L_q} \quad (2)$$

$$\omega_e = p \omega_m$$

$$\omega_m = 2\pi \frac{n}{60} \quad n \text{ in rpm}$$

Aus Gleichung (2) folgt, dass $i_q = 0 \text{ A}$ ist, wenn ω zunimmt. Der d -Strom kann dann berechnet werden als:

$$i_d = -\frac{\psi_{PM}}{L_d} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich, dass der Parameter L_d durch den stationären Kurzschlussstrom ermittelt werden kann. Hierfür werden die Klemmen des Motors kurzgeschlossen und der Motor fremd angetrieben.

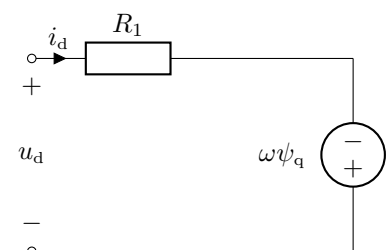
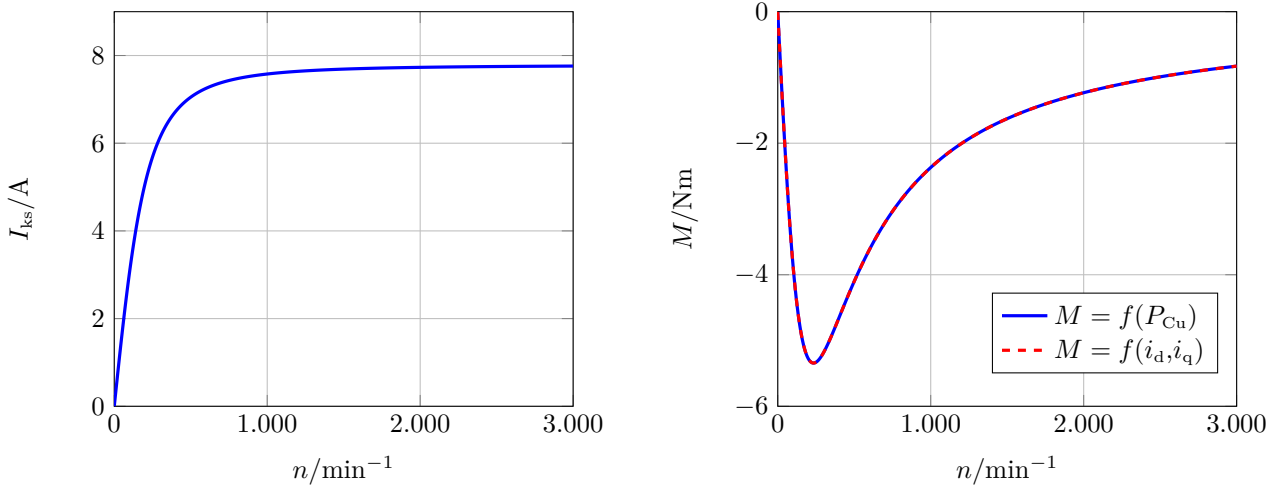


Abb. 2 ESB der d -Achse



(a) Effektivwert der Kurzschlussstrom

(b) Luftspalt Drehmoment

Abb. 3 Stationäre Kurzschlussstrom der PMSM

Diese Erkenntnis wird nun auf einen Motor mit Oberflächenmagneten angewendet. Für diese Anordnung der Magneten gilt, dass $L_d = L_q$. Der Motor stammt aus einem Praktikumsversuch an der Hochschule.

Leistungsdiagramm

In dem Versuch besteht die Möglichkeit, das Luftspaltdrehmoment aus den Strömen zu berechnen. Dies setzt jedoch voraus, dass der Leistungsfluss bekannt ist. Dafür betrachten wir zunächst ein einfaches Beispiel, wie in Abb. 4 dargestellt. Die mechanische Leistung an der Welle, P_{mech} , kann nur bestimmt werden, wenn die Verluste im Stator und Rotor bekannt sind.

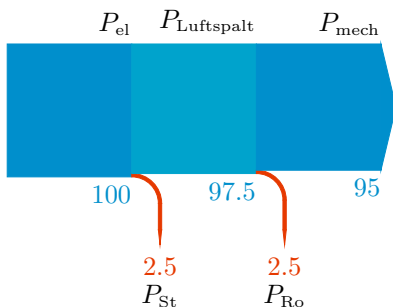


Abb. 4 Sankey-Diagramm

Bei niedrigen Frequenzen können

die Eisenverluste sowie die Verluste in den Permanentmagneten vernachlässigt werden, d.h., P_{Fe} und P_{Ro} sind Null. Die mechanische Leistung entspricht somit der Luftspaltleistung. Da ebenfalls die elektrische Leistung Null ist, folgt, dass das Drehmoment durch die Kupferverluste angenähert werden kann, d.h.

$$P_{\text{Luftspalt}} \approx -3R_1 I_{sc}^2$$

$$\therefore M \approx -\frac{3R_1 I_{sc}^2}{\omega_m} \quad (4)$$

Drehmomentgleichung

Das Kurzschlussdrehmoment kann bei bekannten Maschinenparametern als Funktion der Drehzahl aus den Strömen in (2) berechnet werden:

$$M = \frac{3}{2} p (\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d) i_q$$

$$= \frac{3}{2} p \cdot \psi_{PM} i_q \quad \text{für } L_d = L_q \quad (5)$$

Diese Gleichung wird für den 8-poligen Labor-Motor mit Oberflächenmagneten verwendet. Die Parameter des Motors sind $L_d = L_q = 14.7 \text{ mH}$, $R_1 = 1.44 \Omega$ und

$\psi_{PM} = 161.8 \text{ mV s}$. Die berechneten Strom- und Drehmomentwerte sind in Abb. 3(a) bzw. Abb. 3(b) dargestellt.

Die Übereinstimmung der Drehmomente aus den Kupferverlusten nach (4) und den berechneten Werten aus (5) zeigt, dass das Luftspaltdrehmoment bei einer Kurzschlussmessung aus dem Stillstand zuverlässig abgeschätzt werden kann.

Zusammenfassung

Das Drehmomentverhalten einer permanent erregten Synchronmaschine wurde unter Kurzschlussbedingungen untersucht. Dabei wurden die Klemmenspannungen in den Ersatzschaltbildern auf Null gesetzt, um das Kurzschlussverhalten zu modellieren. Die abgeleiteten Gleichungen für Ströme und Drehmoment wurden anhand eines 8-poligen Labor-Motors überprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass die Drehmomentberechnungen aus den Kupferverlusten gut mit den theoretischen Werten übereinstimmen. Dies ermöglicht eine zuverlässige Abschätzung des Luftspaltdrehmoments und des erforderlichen Drehmoments der Lastmaschine.