ELSYS Note

Abplattung vs. Zuspitzung im Luftspaltfeld

Hohe Flussdichten in elektrischen Maschinen führen zu starker Sättigung in Zähnen und Joch. Während frühere Ansätze nur die Zahnsättigung erfassten, beschreibt der neue Zuspitzungsfaktor zusätzlich die Jochsättigung. Die Kombination beider Faktoren ermöglicht eine genauere Berechnung der Luftspaltinduktion und zeigt in numerischen Simulationen Abweichungen unter 5 %.

Einleitung

Moderne rotierende elektrische Maschinen zeichnen sich durch hohe Kompaktheit und Leistungsdichte aus, wodurch Joche und Zähne stark magnetisch ausgenutzt werden. Dies verursacht Sättigungsharmonische, die das Luftspaltfeld verzerren und unerwünschte Effekte wie Leistungsverluste, Drehmomentschwankungen und zusätzliche Kreisströme hervorrufen.
Während eine erhöhte magnetische Spannung in den Zähnen den Luftspaltflussdichteverlauf abflacht, führt Jochsättigung zu einer Zuspitzung der Luftspaltinduktion. Bisherige semi-analytische Magnetkreisrechnungen berücksichtigen nur einen **Ablattungsfaktor für die Zähne**, da ältere Maschinen geringere Jochflussdichten aufwiesen [1, 2].
Mit steigenden Anforderungen an Kompaktheit ist ein analytischer Ansatz zur Erfassung der Jochsättigung erforderlich.

Überlagerung

Die Luftspaltinduktion wird durch Oberwellen beeinflusst, die aus der diskreten Verteilung der Wicklungen und Nutöffnungen resultieren. Diese Wicklungsharmonischen können sich mit den durch die Sättigung entstehenden Harmonischen überlagern – abhängig von der Strangzahl m:

$$\nu = p \cdot (1 + 2 \cdot m \cdot g) \quad g \in \mathbf{Z} \qquad (1)$$

Bei einer dreiphasigen Wicklung treten Sättigungsoberschwingungen der Ordnungen $5p$ und $7p$ auf, die sich mit den Wicklungsharmonischen überlagern. Um den Einfluss der Sättigung auf die Luftspaltinduktion gezielt zu untersuchen, ist daher eine mehrphasige Wicklung mit einer Strangzahl $m > 3$ erforderlich.

Numerische Simulation

Zur Analyse des Einflusses der magnetischen Sättigung in Zähnen und Joch auf die Luftspaltinduktion wird eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) durchgeführt. Dafür werden die Simulationsmodelle in separate Zahn- und Jochbereiche unterteilt.
Um die Effekte gezielt zu isolieren, wird in einem Bereich das reale Verhalten des Elektroblechs durch eine nichtlineare Kommutierungskurve modelliert, während der andere Bereich eine konstant hohe Permeabilität μ_r erhält. Auf diese Weise können die Sättigungseffekte von Zahn und Joch unabhängig voneinander untersucht werden.

Zuspitzungsfaktor

Die magnetische Permeabilität in den Zähnen wird als konstant hoch angenommen. Analog zum Abplattungsfaktor nach W. Nürnberg wird hier ein neuer Faktor zur Abschätzung der Zuspitzung definiert. Dieser basiert auf den magnetischen Spannungsfällen der beiden Joche $V_{\mathrm{J},1}$ und $V_{\mathrm{J},2}$ sowie des Luftspalts V_δ:

$$k_\mathrm{J} = \frac{V_{\mathrm{J},1} + V_{\mathrm{J},2}}{V_\delta} = \frac{V_\mathrm{J}}{V_\delta} \qquad (2)$$

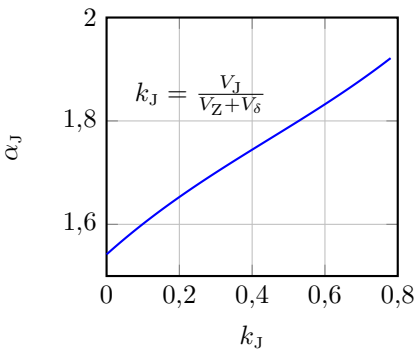
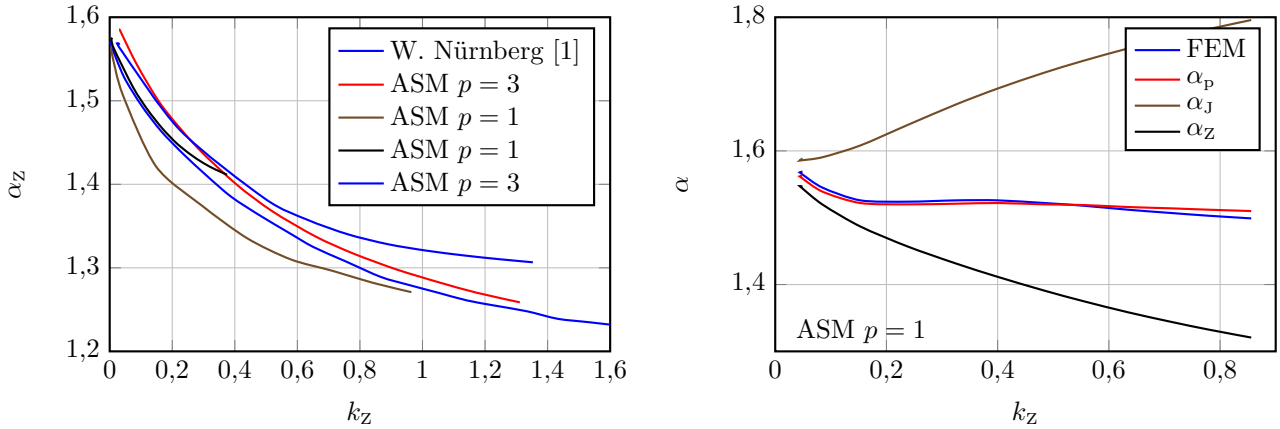


Abb. 1: Zuspitzungsfaktor

Die Analyse von vier Multiphasenmaschinen zeigt eine klare Korrelation – ähnlich dem Verhalten des Abplattungsfaktors (siehe Abb. 1). Durch Multiplikation beider Faktoren lassen sich Zahnsättigung und Jochsättigung gemeinsam erfassen:

$$\alpha_\mathrm{p} = \alpha_\mathrm{Z} \cdot \alpha_\mathrm{J} \cdot \frac{2}{\pi} \qquad (3)$$



(a) Abplattungsfaktor

(b) Anwendung neuer Ansatz [3]

Abb. 2: Zuspitzungsfaktor zusätzlich die Jochsättigung

Abplattungsfaktor

Die magnetische Permeabilität im Joch wird als konstant hoch angenommen. Der Einfluss der Zahnsättigung wird mit dem Abplattungsfaktor α_Z beschrieben, der von der Sättigung im Zahn k_Z abhängt. Dabei werden die magnetischen Spannungsfälle in den Zähnen V_Z und im Luftspalt V_δ berücksichtigt:

$$k_Z = \frac{V_{Z,1} + V_{Z,2}}{V_\delta} = \frac{V_Z}{V_\delta} \qquad \alpha_Z = \frac{B_\delta}{B_m} \tag{4}$$

Für geringe Sättigung liegt der Abplattungsfaktor nahe $\pi/2$, was eine nahezu sinusförmige Luftspaltinduktion bedeutet. Mit zunehmender Sättigung nimmt α_Z ab, da der magnetische Widerstand im Zahn steigt und die Induktion stärker abgeflacht wird.

Die Analyse mehrerer Maschinen zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Ansatz nach W. Nürnberg, insbesondere bei moderaten Sättigungsverhältnissen (siehe Abb. 2). Bei starker Sättigung treten leichte Abweichungen auf, die durch lokale Effekte innerhalb der Zähne bedingt sein könnten.

Ergebnisse

Der neue analytische Ansatz wurde anhand von vier Induktionsmaschinen unterschiedlicher Polpaarzahl und Sättigungsverhältnisse validiert [3]. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl der klassische Abplattungsfaktor α_Z als auch der neu definierte Zuspitzungsfaktor α_J gut mit den numerischen Simulationen übereinstimmen.

Die Kombination beider Faktoren ermöglicht eine genauere Beschreibung der Luftspaltinduktion als bisherige Methoden:

$$\alpha_P = \alpha_Z \cdot \alpha_J \cdot \frac{2}{\pi} \tag{5}$$

Insbesondere bei stark gesättigten Maschinen zeigt sich, dass der Zuspitzungseffekt die Abplattung teilweise kompensiert. In Abb. 2(b) wird gezeigt, dass sowohl die hohe Zahnsättigung als auch die Jochsättigung sich weitgehend ausgleichen. In den weiteren Maschinen zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen analytischen und numerischen Ergebnissen mit maximalen Abweichungen unter 5 %.

Die Ergebnisse belegen die Anwendbarkeit des neuen Ansatzes für Maschinen mit hohen Flussdichten. Eine weitere Validierung an realen Maschinen mit verschiedenen Geometrien und Wicklungsschemata wäre sinnvoll, um die Modellgenauigkeit weiter zu überprüfen.

Literatur

[1] Werner Nürnberg. *Die Asynchronmaschine*. 2. Aufl. Springer-Verlag, 1976. DOI: 10.1007/978-3-642-53099-9.

[2] R. Bulovas, H. Jordan, M. Purkermani und G. Röder. „Sättigungsfelder und ihre Wirkungen“. *Archiv für Elektrotechnik* 54 (1971), S. 220–228. DOI: 10.1007/BF01574909.

[3] M. Reinlein, M. Swarte, T. Hubert und A. Kremser. „Influence of yoke and tooth saturation on the air gap field in Induction Machines: A new analytical approach“. *International Conference on Electrical Machines*. 2016. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732559.