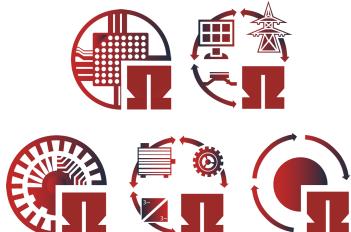


ELSYS Note

Mind the Gap



Wir zeigen eine kompakte Methode zur Analyse der Luftspaltflussdichte elektrischer Maschinen. Moderne FEM-Modelle verwenden einen meshfreien Luftspalt, wodurch Rotationsschritte ohne Neuvernetzung möglich sind. Die Luftspaltflussdichte enthält Grund-, Nut- und Sättigungsharmonische, welche sich effizient mittels DFT und inverser DFT isolieren und bewerten lassen. Dieses ELSYS Note zeigt die praktische Vorgehensweise und typische Harmonische für eine Maschine mit 36 Nuten und 2 Polpaaren.

Einleitung

Für die Auslegung elektrischer Maschinen existiert eine große Bandbreite analytischer Ansätze. Viele davon sind jedoch stark spezialisiert und erfordern umfangreiche Erfahrung, um korrekt angewendet zu werden. Mit der heute verfügbaren Rechenleistung hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) als universelles Werkzeug etabliert, während analytische Modelle weiterhin wertvolle Ergänzungen für Plausibilisierungen und erste Abschätzungen darstellen.

Meshfreier Luftspalt

Der rotierende Teil elektrischer Maschinen, typischerweise der Rotor, ist für numerische Modelle besonders kritisch, da er die elektromagnetische Kraftbildung wesentlich bestimmt. Frühere FEM-Implementierungen waren durch die notwendige Neuvernetzung des Luftspalts bei jedem Rotations schritt limitiert [1]. Moderne Verfahren umgehen diese Einschränkung durch einen meshfreien Luftspalt, bei dem lediglich die Winkelposition der Randknoten aktualisiert wird [1, 2]. Dadurch bleibt das Netz über alle Drehpositionen

konsistent, und Drehmoment sowie Luftspaltgrößen können mit höherer Genauigkeit berechnet werden.

Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt des Netzes mit Rotor und Stator sowie dem meshfreien Luftspaltbereich. Dieser wird durch die Winkel θ_r und θ_s charakterisiert. Zur Modellierung einer Drehbewegung genügt es, den Rotorwinkel θ_r entsprechend zu aktualisieren.

Luftspaltflussdichte

Die Luftspaltflussdichte $B(\theta)$ enthält neben der Grundwelle stets Beiträge nutinduzierter und sättigungsbedingter Harmonischer. Für die hier betrachtete Maschine mit $Q = 36$ Statornuten und $p = 2$ Polpaaren ergeben sich die Nutharmonischen aus

$$\nu = k \cdot Q \pm p, \quad k \in \mathbb{N},$$

also bei $\nu = 34$ und $\nu = 38$ für $k = 1$. Sättigung erzeugt zusätzliche Verzerrungen, die sich vor allem in niedrigeren normierten Ordnungen manifestieren. Für die untersuchte Maschine treten insbesondere $\nu = 6$ und $\nu = 10$ (entspricht 3 und 5 normiert) auf.

Für die Bewertung wird die Luftspaltflussdichte typischerweise entlang einer Linie im statorseitigen

Luftspaltfeld erfasst. Als Richtwert entspricht der meshfreie Bereich etwa einem Drittel des Luftspalts.

Überlagertes Signal

Da FEM-Ergebnisse die Luftspaltflussdichte als überlagertes Gesamt signal liefern, ist eine harmonische Zerlegung erforderlich. Die diskrete Fourier-Transformation (DFT) eignet sich hier besonders gut, da die maßgeblichen Ordnungen bereits bekannt sind und gezielt selektiert werden können. Durch Anwendung der inversen DFT auf eine reduzierte Menge von Ordnungen lässt sich das Signal rekonstruieren und der Einfluss einzelner harmonischer Komponenten gezielt isolieren.

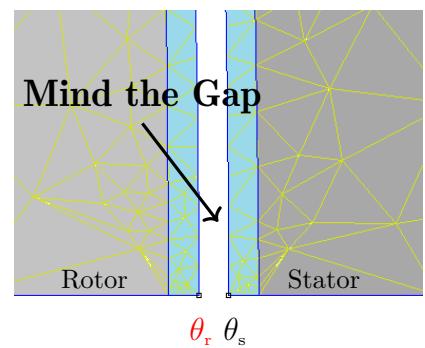
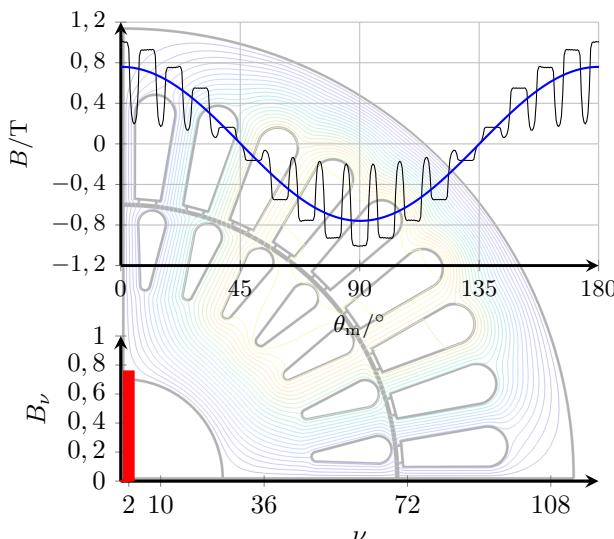
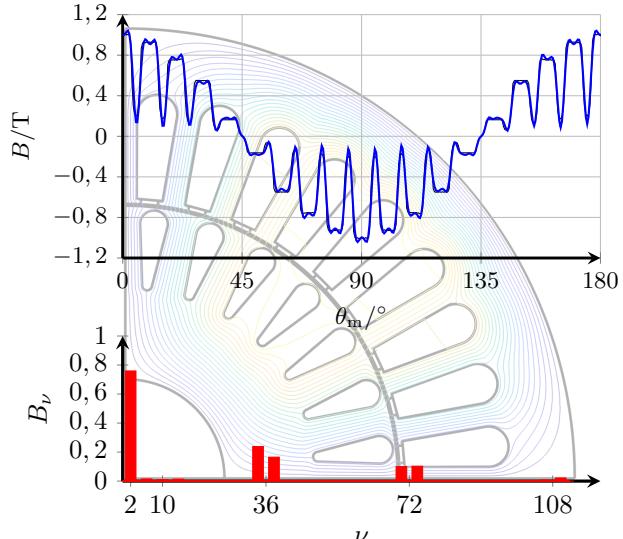


Abb. 1: Meshfreier Luftspaltbereich



(a) Rekonstruierte Grundwelle



(b) Grund- und Oberwellenanteile

Abb. 2: Die DFT als Werkzeug zur Analyse der Luftspaltflussdichte. Die inverse DFT ermöglicht die selektive Rekonstruktion und damit die gezielte Bewertung harmonischer Einflüsse.

Grundwelle

Für die Bewertung des Grundschwingungsverhaltens genügt die Rekonstruktion der Grundwelle. Abb. 2(a) zeigt eine exemplarische Auswertung für einen Betriebspunkt im Leerlauf. Die Luftspaltflussdichte wurde ausschließlich aus der Grundwelle mittels inverser DFT rekonstruiert und dem ursprünglichen FEM-Signal gegenübergestellt. Die Amplitude der Grundwelle lässt sich unmittelbar aus der DFT bestimmen und ist im zugehörigen Balkendiagramm dargestellt.

Harmonischen

Sättigungs- und Nutharmonische lassen sich ebenfalls mittels inverser

DFT gezielt rekonstruieren. In diesem Beispiel treten die dominanten Sättigungsharmonischen bei $\nu = 6, 10$ und 14 auf, entsprechend den normierten Ordnungen $3, 5$ und 7 . Die Nutharmonischen ergeben sich zu $\nu = k \cdot Q \pm p$, also beispielsweise $\{36, 72, 108\} \pm 2$ für $k = 1, 2, 3$.

Abb. 2(b) zeigt die vollständige Rekonstruktion aller Harmonischen bis $\nu = 110$. Die Darstellung umfasst sowohl das ursprüngliche FEM-Signal als auch die mittels inverser DFT gefilterte Luftspaltflussdichte, bei der die Grundwelle um die harmonischen Beiträge ergänzt wurde. Die charakteristischen Verzerrungen durch Nut- und Sättigungseinflüsse werden dadurch deutlich sichtbar. Das Balkendiagramm visualisiert die relativen Amplituden der betrachteten Ordnungen. Ein wesentlicher Vor-

teil der DFT besteht darin, dass die Phasenwinkel aller Komponenten automatisch mitbestimmt werden – eine Größe, die in analytischen Verfahren oft nur mit zusätzlichem Aufwand zugänglich ist.

Zusammenfassung

Der meshfreie Luftspaltansatz bildet eine effiziente und numerisch stabile Grundlage für rotierende FEM-Modelle elektrischer Maschinen. In Kombination mit der DFT-Analyse lässt sich die Luftspaltflussdichte klar in Grundwelle, Nutharmonische und Sättigungseinflüsse zerlegen. Dies erleichtert die Interpretation der FEM-Ergebnisse und bietet eine kompakte Gedankenstütze für den praktischen Maschinenentwurf.

Verweise

- [1] A.A. Abdel-Razek, J.L. Coulomb, M. Feliachi und J.C. Sabbonadiere. „The calculation of Electromagnetic Torque in Saturated Electric Machines within combined Numerical and Analytical Solutions in the Field Equations“. *IEEE Transactions on Magnetics* 17.6 (Nov. 1981), S. 3250–3252. DOI: 10.1109/TMAG.1981.1061743.
- [2] O.J. Antunes, J.P.A. Bastos und N. Sadowski. „Using high-order finite elements in problems with movement“. *IEEE Transactions on Magnetics* 40.2 (2004), S. 529–532. DOI: 10.1109/TMAG.2004.825317.