

7. VDI-Fachtagung mit begleitender Fachausstellung

Schwingungen von Windenergieanlagen 2016

07. und 08. Juni 2016, Bremen

Mit einer Session zu Geräuschen, Schallmessungen und -übertragung

Hören Sie Top-Vorträge zu folgenden Themen:

- Erfahrungsbericht zu akustischen Messungen an Windenergieanlagen im Feld
- Messdaten-basierte Restnutzungsdauer-Ermittlung von Windenergieanlagen
- Schwingungsgrenzwerte an WEA-Fundamenten und Kontrollmessungen
- Optimization of gear configuration for the WTG dynamic Vibration
- Dynamische Effekte im mechanischen Triebstrang von WEA durch Störungen im elektrischen Netz
- Prognose der durch Windenergieanlagen verursachten Schwingungsimmissionen an hochsensiblen Anlagen
- Schwingungsbeurteilung nach VDI 3834-1 bzw. DIN ISO 10816-21 und deren Integration in die Überwachung großer Anlagenpopulationen

Tagungsleitung

Prof. Dr.-Ing. Robert Liebich, Leiter Konstruktion und Produktzuverlässigkeit im Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, Technische Universität Berlin

Prof. Dr.-Ing. Andreas Reuter, Leiter Institutsteil Windenergie, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Bremerhaven

Gekoppeltes elektromagnetisch-strukturdynamisches Oberwellenmodell eines Asynchrongenerators zur Analyse des Drehschwingungsverhaltens in Multi-Megawatt Windenergieanlagen

(Coupled Electromagnetic and Structural Dynamic Model of an Induction Generator for Analysis of Harmonics and Torsional Vibrations in Multi-Megawatt Wind Energy Systems)

Sebastian Rick^{1,2}, David Franck^{1,2}, Kay Hameyer^{1,2}

¹ Center for Wind Power Drives (CWD), RWTH Aachen University

² Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University

Kurzfassung

Antriebsstränge von Windenergieanlagen erfahren Belastungen basierend auf Drehschwingungen, welche zur beschleunigten Alterung und zum Ausfall der Anlagen führen. In dieser Arbeit wird ein Oberwellenmodell eines Asynchrongenerators vorgestellt, mit welchem drehschwingungsanregende Effekte in einer elektromagnetisch-strukturdynamischen Umgebung analysiert werden. Parasitäre Effekte, wie Wicklungs- oder Nutungsobertöne, werden im Modell untersucht. Es wird gezeigt, dass Schwingungen im elektromagnetischen Modell durch die Identifikation von elektromagnetischen Feder- und Dämpfungskonstanten mit einer Struktursimulation koppelbar sind.

Abstract

Torsional vibrations cause stresses in the drive train of a wind energy system, which result in system failures. In this work a model of an induction generator concerning harmonics is presented. The torsional vibrations are studied in an electromagnetic and structural dynamic environment. Parasitic effects such as winding and slotting harmonics are analyzed. It is shown, that the electromagnetic vibrations can be described through spring and damping factors, which is convenient for structural dynamic simulations.

1. Einleitung und Stand der Technik

Die Modellbildung von elektromechanischen Antriebssträngen gewinnt im Rahmen des Entwicklungsprozesses von modernen Windenergieanlagen (WEA) an Bedeutung. Um die Vorhersagbarkeit des Betriebsverhaltens einer WEA zu verbessern, werden immer höhere

Anforderungen an die Modellierung der Komponenten gesetzt. Eine höhere Modelltiefe bietet die Möglichkeit zur Abbildung parasitärer Effekte, welche die Ursache für starke Belastungen im Antriebsstrang darstellen [1].

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Modellierung eines Asynchrongenerators im Kontext einer WEA. Eine Herausforderung bei der Modellierung ist die Berücksichtigung aller relevanten parasitären Effekte, um eine möglichst genaue Abbildung des realen Systems zu erhalten. Dabei stellt die elektromagnetisch-strukturdynamische Kopplung, welche bei der Erzeugung von Drehschwingungen vorherrscht, den Schwerpunkt dieser Arbeit dar.

Stand der Technik sind detaillierte elektromagnetische Modelle zur Betrachtung von Oberfeldern, welche aus verschiedenen parasitären Effekten resultieren. Auf mechanischer Seite existieren aufwendige Mehrkörpersimulationsmodelle von Generatoren, welche in numerischen Simulationsmodellen eingebettet, detaillierte Aussagen zum Schwingungsverhalten des Systems ermöglichen. Im Falle der Kopplung dieser Modelle, wird jedoch im Regelfall eine einseitige Modellkopplung herangezogen, welche z.B. die im elektromagnetischen Modellteil evaluierten Oberflächenkräfte an der Zahnkontur des Generators auf das strukturdynamische Modell aufprägt.

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell basiert auf einem analytischen Oberwellenmodell zur elektromagnetischen Kraftanregung, welches parasitäre Effekte wie Wicklungsoberfelder oder Nutungsoberfelder beschreibt. Dieses Modell wird in MATLAB Simulink integriert und mit einem analytischen strukturdynamischen Modell geringer Modelltiefe gekoppelt. Bei der Kopplung ist die beidseitige Wechselwirkung der Modelle berücksichtigt.

Der beschriebene Modellierungsansatz wird zur Kopplung mit entsprechenden Modellen anderer Komponenten einer WEA, wie z.B. Getriebemodelle oder Umrichtermodelle ausgelegt. Eine Validierung der Simulationsergebnisse durch Messungen auf dem 4 MW Systemprüfstand des Center for Wind Power Drives (CWD) der RWTH Aachen University ist angestrebt.

2. Verwendeter Beispielgenerator

In dieser Arbeit wird ein 2,75 MW Beispielgenerator als Asynchronmaschine mit Schleifringläufer eingesetzt. Die Maschine hat 72 Stator- und 90 Rotorzähne und wird mit einer gesehten Ganzlochwicklung modelliert. Im Bemessungsbetrieb wird ein effektiver Strangstrom von ca. 2,5 kA bei einer verketteten effektiven Bemessungsspannung von 720 V gespeist. Die Polpaarzahl des Generators ist 3. Die Bemessungsdrehzahl beträgt 1100 min^{-1} und das Bemessungsdrehmoment ca. 25 kNm. Der Generator wird rotorseitig

kurzgeschlossen und am Vollumrichter betrieben. Die Auswahl eines Generators mit gewickeltem Rotor ermöglicht dabei die Vermessung der Rotorströme zur besseren Validierung der Modelle.

3. Modellbildung des Generators

Das Generatormodell wird durch einen elektromagnetischen und einen strukturdynamischen Modellteil beschrieben. Die Kopplung wird dabei über die Momentandrehzahl n des Rotors der Maschine und das basierend auf der elektromagnetischen Feldtheorie berechnete Drehmoment M_{el} realisiert. Die Einkopplung eines mechanischen Antriebsmoments M_{an} , ausgehend von Getriebe, Hauptlager und Rotor der WEA, ist implementiert und in Bild 1 dargestellt.

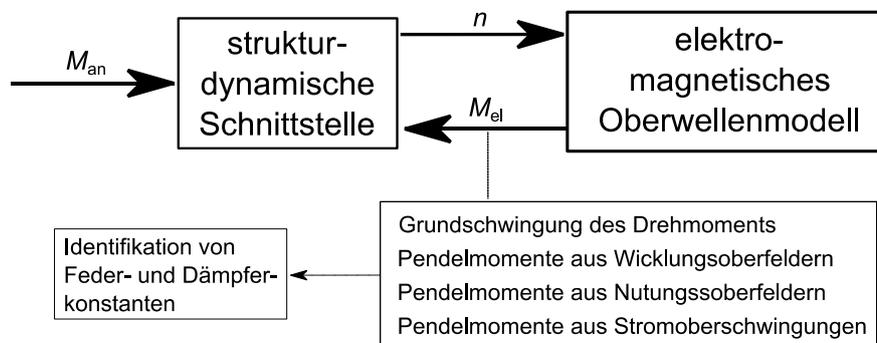


Bild 1: Strukturdiagramm des Modellaufbaus und Beschreibung der Modellkopplung.

3.1 Strukturdynamische Modellbildung

Zur strukturdynamischen Beschreibung von Drehschwingung wird die Bewegungsdifferentialgleichung für erzwungene rotatorische Bewegungen angesetzt:

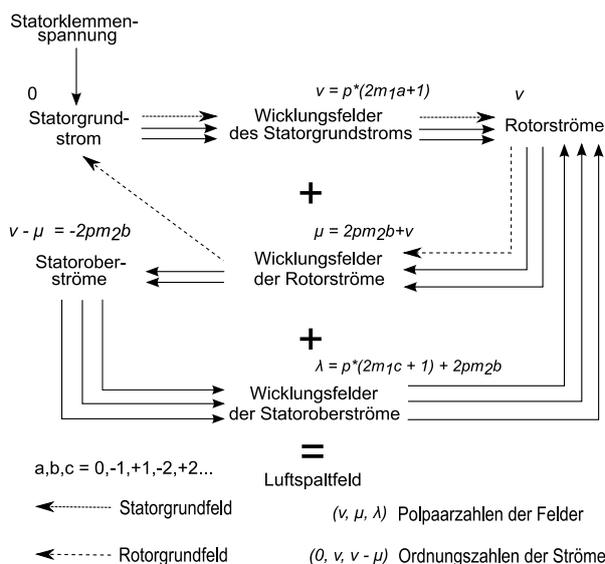
$$J\ddot{\varphi}(t) + d\dot{\varphi}(t) + k\varphi(t) = M_{Last}(t). \quad (1)$$

Die Variable M_{Last} beschreibt das Gesamtdrehmoment, welches dem vorliegenden Modell aufgeprägt wird. Dazu zählen das Antriebsmoment M_{an} , die Grundschiwingung des elektrischen Drehmoments M_{el} und diverse Pendelmomente, welche aus parasitären Effekten resultieren. Der Winkel φ stellt die aktuelle Verdrehung des Rotors gegenüber dem Stator dar und entsprechend beschreiben die erste und zweite Ableitung von φ die Drehgeschwindigkeit und Drehbeschleunigung. Erstere ist direkt in die Drehzahl der Maschine überführbar. Die Massenträgheit J , die Dämpfungskonstante d und die Federkonstante k stellen die charakteristischen Größen des Massenschwingers dar. Durch Vorgabe des Antriebsmoments M_{an} und der charakteristischen Größen J , d und k wird die aktuelle Beschleunigung, Drehzahl oder Position des Schwingers bestimmt. Werden weitere träge Massen dem beschriebenen

System hinzugefügt und schwingungsfähig gekoppelt, handelt es sich um einen Mehrmassenschwinger. Im Folgenden wird gezeigt, dass das schwingungsfähige elektromagnetische System vergleichbar zu einer trägen Masse über die Kopplung durch elektromagnetische Feder- und Dämpfungskonstanten integrierbar ist.

3.2 Elektromagnetische Modellbildung

Das elektromagnetische Oberwellenmodell wird durch eine beidseitige Kopplung von Induktionsdrehfeldern zwischen Stator und Rotor des WEA Generators beschrieben (siehe Bild 2) [3]. Hierbei wird zunächst von einer rein sinusförmigen Statorklemmenspannung ausgegangen, die einen Statorgrundstrom zur Folge hat. Über die Ordnungszahl v werden die Polpaarzahlen der aus dem Grundstrom resultierenden Wicklungsfeldern im Luftspalt beschrieben, welche durch Induktion von Spannungen im Rotor, Rotorströme mit den Polpaarzahlen v zur Folge haben. Die aus den Rotorströmen gebildeten Wicklungsfelder mit den Polpaarzahlen μ bewirken wiederum durch Induktion einen Beitrag zum Statorgrundstrom, erzeugen aber auch weitere Statoroberströme. Diese Oberströme führen zu Wicklungsfeldern mit den Polpaarzahlen λ , welche wiederum die Bildung von Rotorströmen zur Folge haben. In [3] ist gezeigt worden, dass diese Wicklungsfelder keine weiteren Rotorströme bewirken, die nicht schon in den Polpaarzahlen v enthalten sind. Die Gleichungen 2-4 beschreiben das resultierende Luftspaltfeld im Rotor (2), im Stator (3) und die Superposition beider Feldanteile (4).



Magnetisches Feld im Stator:

$$\lambda, b \underline{B}_1(x_1, t) = \frac{\mu_0 m_1 w_1}{\delta_{\text{eff}} \pi \lambda} \cdot \lambda k_{w1} \cdot b I_1 \sqrt{2} e^{j(b \omega t - \lambda x_1 - 2pm_2 b \beta_2)} \quad (2)$$

Magnetisches Feld im Rotor:

$$\mu, v \underline{B}_2(x_2, t) = \frac{\mu_0 m_2 w_2}{\delta_{\text{eff}} \pi \mu} \cdot \mu k_{w2} \cdot v I_2 \sqrt{2} e^{j(v \omega t - \mu x_2 - 2pm_2 b \beta_2)} \quad (3)$$

Superposition der Felder:

$$\underline{B}(x_1, t) = \sum_{\lambda} \sum_b \lambda, b \underline{B}_1(x_1, t) + \sum_{\mu} \sum_v \mu, v \underline{B}_2(x_1, t) \quad (4)$$

Bild 2: Berechnung der Luftspaltfelder im elektromagnetischen Oberwellenmodell. Beschreibung der Kopplung und Darstellungen der Feldgleichungen.

Die Variablen zur Beschreibung der Polpaarzahlen ν , μ und λ , und die damit verknüpften Zählvariablen a , b und c , beeinflussen die magnetische Feldbildung ebenso wie die Größen der Polpaarzahl p , effektiven Luftspaltweite δ_{eff} und Oberwellenschlüpfe s . Darüber hinaus haben stator- (Index 1) und rotorbezogene (Index 2) Größen, wie die Strangzahlen $m_{1,2}$, die effektiven Windungszahlen $w_{1,2}$, die Wicklungsfaktoren $k_{w1,2}$ und die Bezugswinkel im zylindrischen Koordinatensystem $\beta_{1,2}$ einen Einfluss auf die Feldbildung. Entscheidende Größen für die Berechnung der Wicklungsfelder sind die Oberströme I im Stator und Rotor, welche im folgenden Kapitel beschrieben werden.

3.2.1 Spannungsgleichung

Grundlage des elektromagnetischen Oberwellenmodells ist die Spannungsgleichung in Matrizenform:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} R \\ s \end{bmatrix} + j\omega \cdot [L] \right) \cdot \begin{bmatrix} b=0 I_1 \\ \vdots \\ b=b_{\text{max}} I_1 \\ \nu=p I_2 \\ \vdots \\ \nu=\nu_{\text{max}} I_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dieses lineare Gleichungssystem enthält für jeden betrachteten Stator bzw. Rotoroberstrom eine weitere Zeile in der Matrix. Die Spannung \underline{U}_1 wird als sinusförmige Eingangsspannung vorausgesetzt. Die Widerstandsmatrix R ist eine Diagonalmatrix und wird definiert aus geometrischen Größen des Wicklungssystems. Sie ist verknüpft mit dem für jede Oberwelle verschiedenen Oberwellenschlüpfen ν_s und b_s (siehe Gleichungen 2, 3 und 5). Die Induktivitätsmatrix L wird durch Modellgrößen des Generators, wie die effektive Luftspaltweite δ_{eff} , die Windungszahl w und die Polpaarzahlen μ und λ definiert [4]. Die Induktivitätsmatrix ist in vier Teilmatrizen unterteilt, welche die Selbstinduktivitäten und Gegeninduktivitäten von Stator und Rotor beschreiben. Die Statoroberströme werden über die Laufvariable b und die Rotoroberströme über die Polpaarzahlen ν dargestellt. Jede Polpaarzahl repräsentiert einen Oberstrom, welcher wiederum entsprechende Felder hervorruft.

3.2.2 Elektromagnetische Feldberechnung

Aus den berechneten Strömen werden die Polpaarzahlen des Luftspaltfeldes nach Gleichungen 2 bis 4 für Stator und Rotor unabhängig berechnet und danach superponiert. Neben den radialen Luftspaltflussdichten $B_{1,y}$ und $B_{2,y}$ werden tangentiale Komponenten des Luftspaltfeldes $B_{1,x}$ und $B_{2,x}$ berechnet und für die Kraftberechnung (siehe Gleichung 6) berücksichtigt [5, 6]. Durch Integration der tangentialen Kraftdichte entlang der

Rotoroberfläche wird das Drehmoment der Maschine ermittelt (siehe Gleichung 7). In Bild 3 ist der räumliche Verlauf des Luftspaltfeldes und der Teilfelder resultierend aus Stator und Rotor über den Umfang der Maschine dargestellt. In diesem Fall werden die Wicklungs- und NutungsOberfelder von Stator und Rotor berücksichtigt.

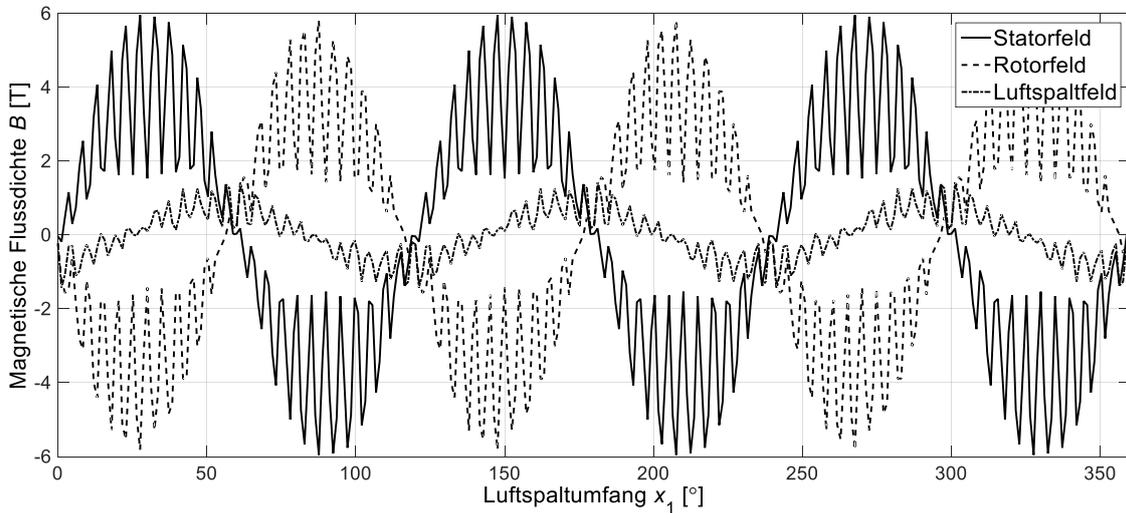


Bild 3: Verteilung des Luftspaltfeldes über den Umfang: Statorfeld, Rotorfeld und Superposition beider Felder als physikalisch wirksames Luftspaltfeld.

3.2.3 Berechnung der tangentialen Kraftdichte und des Drehmoments

Auf Grundlage der radialen und tangentialen Feldanteile im Luftspalt wird die tangentielle Kraft an der Rotoroberfläche durch

$$F_x(y_1, x_1, t) = \frac{l_{Fe} r_{\delta}^2}{\mu_0} \left(\operatorname{Re} \left(\underline{B}_{1,y}(y_1, x_1, t) \right) + \operatorname{Re} \left(\underline{B}_{2,y}(y_1, x_1, t) \right) \right) \cdot \left(\operatorname{Re} \left(\underline{B}_{1,x}(y_1, x_1, t) \right) + \operatorname{Re} \left(\underline{B}_{2,x}(y_1, x_1, t) \right) \right) \quad (6)$$

beschrieben. Das auf den Rotor wirkende Drehmoment wird durch

$$M(t) = \frac{l_{Fe} r_{\delta}^2}{\mu_0} \int_{x_1=0}^{2\pi} \left(\operatorname{Re} \left(\underline{B}_{1,y}(y_1 = 0, x_1, t) \right) + \operatorname{Re} \left(\underline{B}_{2,y}(y_1 = 0, x_1, t) \right) \right) \cdot \left(\operatorname{Re} \left(\underline{B}_{1,x}(y_1 = 0, x_1, t) \right) + \operatorname{Re} \left(\underline{B}_{2,x}(y_1 = 0, x_1, t) \right) \right) dx_1 \quad (7)$$

berechnet [7, 8]. Hierbei ist l_{Fe} die aktive Länge der Maschine und r_{δ} der mittlere Luftspaltradius. Die Koordinate y_1 beschreibt die Luftspalthöhe über dem Rotor, d.h. für $y_1=0$ wird die Lösung auf der Rotoroberfläche ermittelt. Die tangentielle Kraftverteilung wird zeitlich über die Verdrehung des Rotors und räumlich entlang der Oberfläche des Rotors ausgewertet. Dabei wird jede Kombination aus Polpaarzahlen in der Feldverteilung einzeln bestimmt. Das Drehmoment wird, gegliedert nach Teilmomenten, für verschiedene Zeitpunkte berechnet. Bild 4 zeigt links den Verlauf der tangentialen Kraft an der Rotoroberfläche für einen beliebigen

Zeitpunkt. In der rechten Darstellung wird der zeitliche Verlauf des Drehmomentes im Bemessungsbetrieb dargestellt. Die Kraftverteilung verdeutlicht, dass lokal sowohl positive als auch negative Kraftanteile in Bezug auf die Drehrichtung wirken. Um diese zu analysieren, werden parasitäre Effekte, welche Pendelmomente verursachen, untersucht.

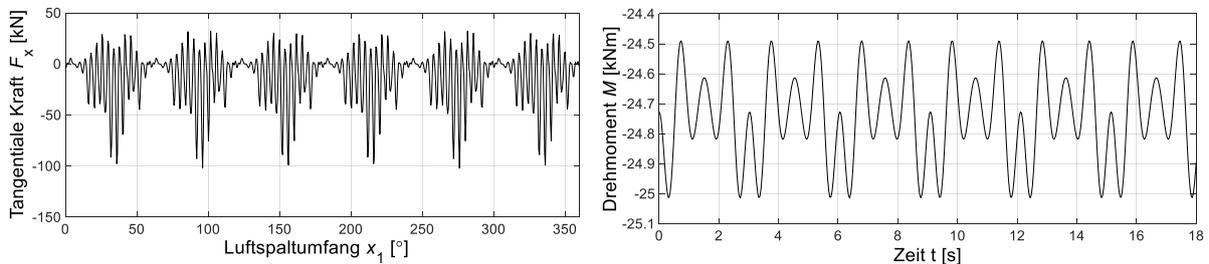


Bild 4: Kraftverlauf im Luftspalt entlang der Rotoroberfläche (links). Zeitlicher Verlauf des Drehmoments resultierend aus der Integration entlang des Luftspaltes (rechts).

4. Modellbildung von parasitären Effekten

In diesem Kapitel werden relevante parasitäre Effekte für den Generator einer WEA vorgestellt. Jeder genannte Effekt führt zu einer periodischen Beeinflussung des Drehmoments und regt somit Drehschwingungen an. Die in dieser Arbeit betrachteten parasitären Effekte sind:

- Wicklungsoberfelder,
- Nutungsoberfelder,
- Exzentrizitätsoberfelder,
- externe elektrische Einflüsse auf den Generator, z.B. Stromüberschwingungen resultierend aus der Umrichtertaktung und
- externe mechanische Einflüsse, z.B. Drehschwingungen ausgehend von Lagerschäden oder Anregungen aus der Getriebeverzahnung.

Im Folgenden wird jeder parasitäre Effekt in seiner Wirkung erläutert, seine Implementierbarkeit in das Drehschwingungsmodell wird dargestellt und die Analogie zur Feder- und Dämpfungskonstante eines Massenschwingers aufgezeigt.

4.1 Wicklungsoberfelder

Die Wicklung des WEA Generators wird durch den Zonungsfaktor und Sehnungsfaktor abgebildet. Der Einfluss der Wicklung auf die Feldverteilung wird durch die Wicklungsfaktoren $k_{w1,2}$ (Gleichung 2 bis 4) berücksichtigt. Im elektromagnetischen Modellteil werden die hierfür relevanten Feldanteile unabhängig ausgewertet und entsprechende Teildrehmomente ermittelt. Bild 5 zeigt eine Testsimulation des Modells. Hierbei wird ein Hochlauf am starren

Netz simuliert und nach 10s eine Belastung mit Bemessungsmoment auf mechanischer Seite aufgeschaltet. Eine Auswahl der niedrigsten Polpaarzahlen der Wicklungsoberfelder wird in dieser Simulation berücksichtigt. Das Modell beschreibt auf elektromagnetischer Seite den stationären Betrieb zum jeweils betrachteten Zeitpunkt, d.h. beim Anfahren bzw. beim Laststoß sind keine transienten Effekte berücksichtigt, weshalb keine resultierenden Überschwingungen im Drehmoment zu erkennen sind. Auf mechanischer Seite wird eine Trägheit zur Beschreibung des Rotors des Generators modelliert. Teilmomente, resultierend aus einzeln ausgewählten Wicklungsoberfeldern, werden ausgewertet (siehe Bild 5, unten rechts). Das dargestellte Teilmoment hat eine große Amplitude von ca. 5 kNm. Es ist zu beachten, dass aufgrund unterschiedlicher Laufrichtungen der Feldwellen sich die Teilmomente im Gesamtmoment teilweise gegenseitig aufheben. Die dominante Amplitude im Teildrehmoment während der Beschleunigungsphase in den ersten 8 Sekunden (Bild 5, unten rechts) ist auf die Trägheit des magnetischen Feldes zurückzuführen. Daraus folgt, dass in Gleichung 1 ein Pendelmoment der Form

$$M_{wick} = J_{Feld} \cdot \ddot{\varphi} \quad (8)$$

als Teilkomponente von M_{Last} anliegt. Über die vorliegende Beschleunigung und die Berechnung des Drehmoments aus Gleichung 7 ist die elektromagnetische Trägheit des Luftspaltfeldes J_{Feld} definiert.

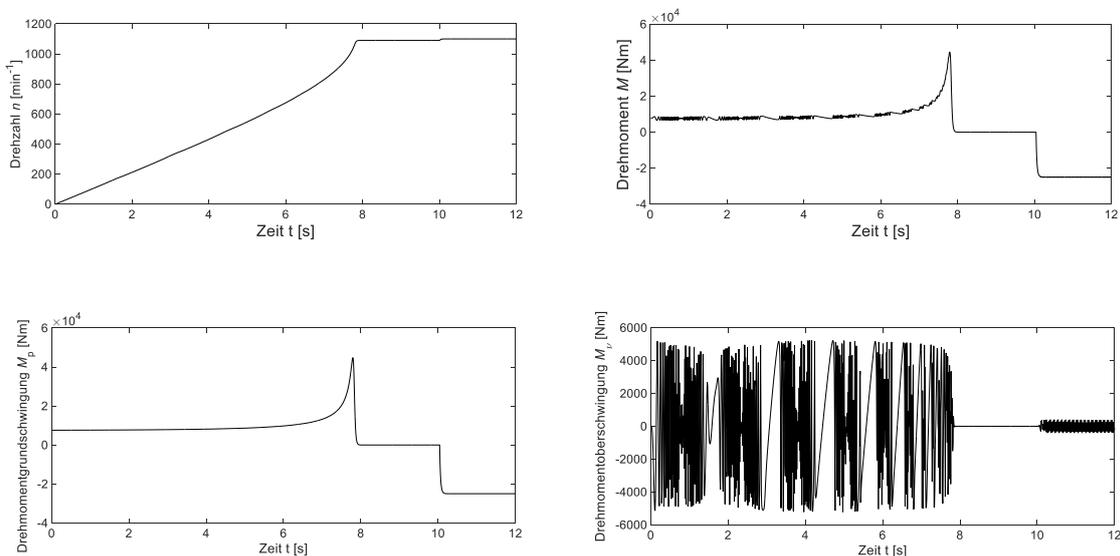


Bild 5: Hochlauf der Asynchronmaschine am starren Netz und Belastung mit Bemessungsmoment (generatorisch). Zeitlicher Verlauf der Drehzahl (oben links). Zeitlicher Verlauf des gesamten elektrischen Moments (oben rechts), der Grundschiwingung des elektrischen Moments (unten links) und einer dominanten Oberschwingung des elektrischen Moments (unten rechts).

4.2 Nutungsoberfelder

Aufgrund einer Leitwertvariation entlang des Luftspaltes entstehen parametrische Oberfelder [7], welche auch als Nutungsoberfelder oder Nutharmonische bezeichnet werden. Die Nutharmonischen werden über eine Permeanzfunktion (siehe Bild 6, links) abgebildet, welche mit Hilfe der Theorie der konformen Abbildungen bestimmt wird [9]. Der Verlauf des Luftspaltfeldes unter Berücksichtigung der Nutungsoberfeldern wird in Bild 6, rechts dargestellt. Eine Schrägung des Generators hat zur Folge, dass die beschriebenen Nutungsoberfelder stark reduziert werden, weshalb aus Zwecken der Anschaulichkeit eine Simulation ohne Schrägung durchgeführt worden ist, um die Einflüsse der Nutharmonischen darzustellen. Die Amplitude der Statornutharmonischen kommt bei diesem Fall auf ca. 10% des Bemessungsdrehmoments. Im Falle einer Schrägung jedoch, verschwinden die Anteile der Nutharmonischen völlig.

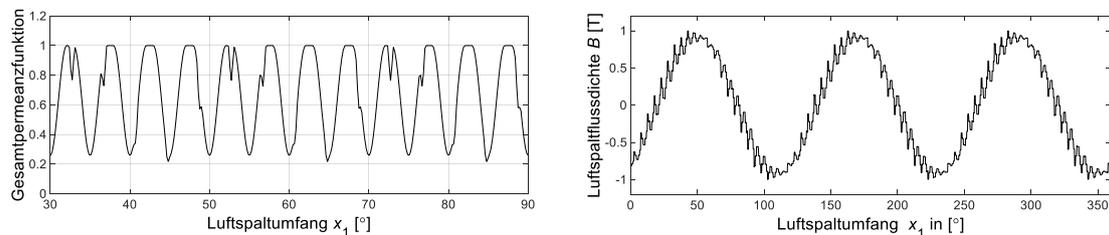


Bild 6: Gesamtpermeanzfunktion als Superposition von Statorpermeanz- und Rotorpermeanzfunktion (links). Luftspaltfeld des WEA Generators unter Berücksichtigung der Nutung (rechts).

In Bild 7 ist der zeitliche Verlauf der tangentialen Kraft an einer festen Position im Luftspalt an der Oberfläche der Rotorzahnkontur für das zuvor beschriebene Testszenario berechnet worden. Wie auch in der räumlichen Verteilung der tangentialen Kraft in Bild 4 dargestellt ist, wechselt die wirkende Kraft ihr Vorzeichen. Die Pendelung des mit diesen Kraftänderungen einhergehenden Drehmoments hat eine dämpfende Wirkung auf den Drehmomentverlauf.

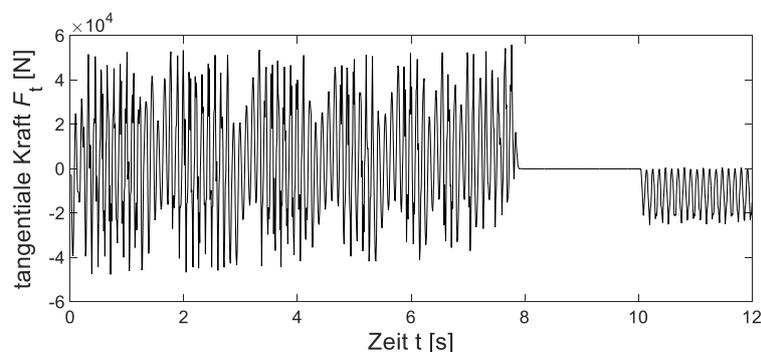


Bild 7: Zeitlicher Verlauf der tangentialen Kraft F_t an einer festen Position an der Rotoroberfläche des Generators.

Gemäß Gleichung 1 kann eine zusätzliche elektromagnetische Dämpfungskonstante bestimmt werden, die sich über die wirkende tangentiale Kraft, bzw. das entsprechende Teilmoment und den Positionswinkel des Rotors ergibt.

4.3 Exzentrizitätsoberfelder

Bei der exzentrischen Lage des Rotors im Stator, bewegt sich der Rotormittelpunkt W mit beliebiger Geschwindigkeit um den Statormittelpunkt 0 (siehe Bild 8). Dabei ergeben sich zwei Grenzfälle: auf der einen Seite bewegt sich der Rotormittelpunkt mit der Winkelgeschwindigkeit des Rotors (dynamische Exzentrizität) und auf der anderen Seite steht der Rotormittelpunkt relativ zur Winkelgeschwindigkeit des Rotors (statische Exzentrizität) [10]. Basierend auf dieser Theorie wird in [11] die elektromagnetische Feldberechnung für Exzentrizitätsoberfelder dargestellt und über die Berechnung von radialen

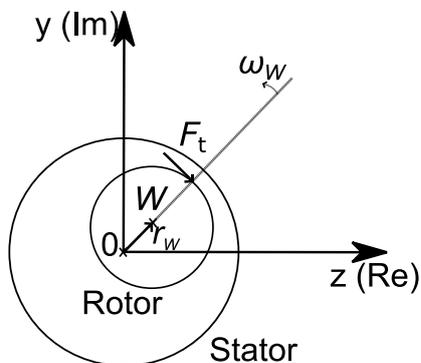


Bild 8: Dämpfende Kraftwirkung im Generator basierend auf einer exzentrischen Bewegung des Rotors im Stator.

und tangentialen Kraftkomponenten Rückschlüsse auf die Anregung der Struktur gezogen. Die wirkende Radialkraft wirkt dabei im Zusammenspiel mit dem exzentrischen Versatz als elektromagnetische Feder, während die Tangentialkraft zu einer elektromagnetisch verursachten Dämpfung führt. Die Dämpfungskonstante wird durch

$$d_e = -\frac{F_t}{\frac{dr_W}{dt}} \quad (9)$$

definiert. Dabei beschreibt r_W den Versatz des Rotormittelpunkts W vom Statormittelpunkt 0 und

$$\omega_W = \frac{dr_W}{dt} \quad (10)$$

die Winkelgeschwindigkeit des drehenden Vektors r_W (siehe Bild 8).

4.4 Stromüberschwingungen

Eine nicht ideal sinusförmige Spannung an den Maschinenklemmen führt neben dem Grundstrom zu Oberströmen, welche von außen auf den WEA Generator einwirken. Diese Oberströme können ihren Ursprung in der Taktung des Umrichters oder in netzseitigen Einflüssen haben. Die Einleitung einer variablen Spannung mit variabler Frequenz zur Abbildung von Umrichtereinflüssen wird in folgenden Arbeiten untersucht. Das Modell bietet die Möglichkeit durch das Einprägen von harmonischen in der Spannung in Gleichung 5, Oberschwingungen im Strom (siehe Bild 9) zu beschreiben. Diese führen wiederum zu

Feldoberwellen im Luftspaltfeld und erzeugen analog zu den Wicklungsfeldern Pendelmomente die am Rotor des Generators anliegen.

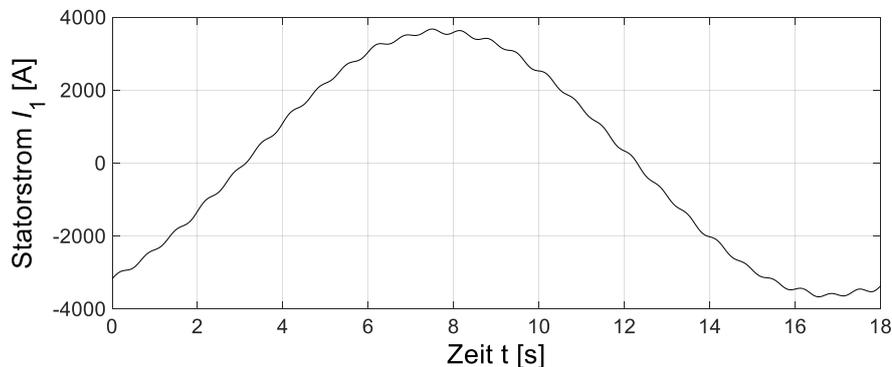


Bild 9: Statorstrom unter Berücksichtigung von extern einwirkenden Oberfeldeffekten durch den Umrichter und das Netz.

4.5 Mechanisch angeregte Drehschwingungen

Neben dem Einfluss von elektrischer Seite haben bei der elektromagnetisch-strukturdynamischen Kopplung auch extern eingeprägte Drehmomente, bzw. Drehzahlschwingungen einen Einfluss auf die Feldbildung in der elektrischen Maschine. An dieser Stelle sind mechanisch angeregte Drehschwingungen zu nennen. Diese resultieren beispielsweise aus einem Lagerschaden im Hauptlager oder aus einer angeregten Schwingung in der Verzahnung des Getriebes. Eine Analyse dieser Effekte wird in weiteren Arbeiten durchgeführt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Bewertung von Belastungen an Generatoren von Windenergieanlagen (WEA) liegt ein elektromagnetisch-strukturdynamisches Oberwellenmodell einer Asynchronmaschine vor. Im Fokus stehen dabei die angeregten Drehschwingungen welche auf der einen Seite auf mechanischen Anregungen von Drehmomenten und auf der anderen Seite auf den elektrischen Drehmomenten basieren. Das Oberwellenmodell ermöglicht die Beschreibung von parasitären Effekten im WEA Generator und verknüpft diese mit der damit verbundenen mechanischen Schwingungsanregung. Damit ist eine Beschreibung der elektromagnetisch angeregten Drehmomente durch Feder- und Dämpfungskonstanten möglich.

Die Modellierung wird in Forschungsvorhaben weitergeführt und detailliert. Die Schnittstelle zu anderen WEA Komponenten, wie Getriebe und Umrichter wird erarbeitet und die damit verbundenen Drehschwingungen analysiert. Die Modellbildung wird für verschiedene Modelltiefen durchgeführt. Somit wird die Erweiterbarkeit des stationären Oberwellenmodells

hinsichtlich transientem Betrieb untersucht. Weiterführend ist die Validierung der Modelle durch Messungen am Systemprüfstand des Center for Wind Power Drives (CWD) der RWTH Aachen University geplant.

6. Literaturangaben

- [1] Whittle, M. Shin, W. Trevelyan, J. Wu, J.: *A Parametric Investigation of the Effect of Generator Misalignment upon Bearing Fatigue Life in Wind Turbines*. In: Proceedings of the EWEA Conference (EWEC), Brussels, 2011.
- [2] Berroth, J. Bi, L. Matzke, D. Werkmeister, A. Schelenz, R. Jacobs, G.: *Nacelle Test Benches for Model Validation*. In: Simpact Wind and Drive Train Conference, 2015.
- [3] Oberretl, K.: *Field-harmonic theory of slip-ring motor taking multiple armature reaction into account*. In: Proceedings of Institution of Electrical Engineers 117 (1970), August, Nr. 8, S. 1667-1674.
- [4] Oberretl, K.: *Allgemeine Oberfeldtheorie für ein- und dreiphasige Asynchron- und Linearmotoren mit Käfig unter Berücksichtigung der mehrfachen Ankerrückwirkung und der Nutöffnungen*. In: Archiv für Elektrotechnik 76 (1993), Nr. 3, S. 201-212.
- [5] Bolte, E.: *Elektrische Maschinen: Grundlagen Magnetfelder, Wicklungen, Asynchronmaschinen, Synchronmaschinen, Elektronisch kommutierte Gleichstrommaschinen*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [6] Oberretl, K.: *Das zweidimensionale Luftspaltfeld einer Drehstromwicklung mit offenen Nuten*. In: Archiv für Elektrotechnik 53 (1970), Nr. 6, S. 371-381.
- [7] Seinsch, H. O.: *Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen: Grundlagen zur analytischen und numerischen Berechnung*. Teubner, 1992.
- [8] Spä, B. Oberretl, K.: *Die Berechnung der Vertikalkraft beim einseitigen asynchronen Linearmotor mit Käfig im Sekundärteil*. In: Archiv für Elektrotechnik 65 (1982), Nr. 3, S. 139-154.
- [9] Hafner, M. Franck, D. Hameyer, K.: *Static Electromagnetic Field Computation by Conformal Mapping in Permanent Magnet Synchronous Machines*, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 46, no. 8, pp. 30105-3108, 2010.
- [10] Frohne, H.: *Über den einseitigen magnetischen Zug in Drehfeldmaschinen*. In: Archiv der Elektrotechnik 51 (1968), S. 300-308.
- [11] Früchtenicht, J. Jordan, H. und Seinsch, H. O.: *Exzentrizitätsfelder als Ursache von Laufinstabilitäten bei Asynchronmaschinen, Teil 1: Elektromagnetische Federzahl und elektromagnetische Dämpfungskonstante*. In: Archiv für Elektrotechnik 65 (1982), S. 271-281.