

Analytische Ermittlung des Nutschlitzanteils der Stator-Rotor-Kapazität zur Vorausberechnung und Reduzierung von Lagerspannungen in elektrischen Maschinen

J. O. Stockbrügger, B. Ponick

Schnellschaltende Zweipunkt-Wechselrichter ermöglichen einen verlust- und geräuscharmen drehzahlveränderbaren Betrieb einer elektrischen Maschine. Der Trend zu umrichter gespeisten Antrieben wird durch sinkende Anschaffungskosten zusätzlich verstärkt. Die durch das Schalten der Leistungstransistoren erzeugten steilen Spannungsfanken und die vom Umrichter verursachte inhärente Gleichtaktspannung führen jedoch zu unerwünschten parasitären Effekten. Die Gleichtaktspannung, auch als Common-Mode-Spannung bezeichnet, wird durch den Umrichter in die Motorwicklung eingepreßt. Über die Wicklung-Rotor-Kapazität entsteht ein Abbild der Common-Mode-Spannung auf der Motorwelle, die auch an den Motorlagern anliegt und die Durchschlagsfestigkeit des Schmierfilms der Lager überschreiten und zu EDM-Lichtbogenentladungen führen kann, welche in der Beschädigung der Motorlager resultieren.

Für die Bestimmung der an den Motorlagern anliegenden Spannung ist die Ermittlung der Kapazität zwischen Statorblechpaket und Rotor erforderlich. Die kapazitive Kopplung zwischen dem Stator und dem Rotor im Aktiveil der elektrischen Maschine wird mithilfe eines Zylinderkondensators modelliert. Der Einfluss der Nutöffnung des Statorblechpakets kann mittels des Carter-Faktors berücksichtigt werden. In diesem Artikel wird durch FEM-Simulationen der Einfluss der Permittivität des im Nutschlitz eingesetzten Materials untersucht und eine analytische Bestimmung der Stator-Rotor-Kapazität unter Berücksichtigung der dielektrischen Eigenschaften des Nutschlitzmaterials erarbeitet.

Schlüsselwörter: Stator-Rotor-Kapazität; Lagerspannung; EDM-Ströme; Traktionsantrieb

Analytical determination of the slot portion of the stator-to-rotor capacitance for the prediction and reduction of bearing voltage in electrical machines.

Fast-switching inverters enable a low-loss and low-noise variable-speed operation of an electrical machine. The trend towards inverter-fed drives is further strengthened by falling costs. However, the steep voltage flanks generated by the switching of the power transistors and the inherent common mode voltage caused by the inverter lead to undesirable parasitic effects. The common mode voltage is impressed into the motor winding by the inverter. An image of the common mode voltage on the motor shaft is produced via the winding rotor capacitance. This voltage appears at the motor bearings and can exceed the dielectric strength of the lubricant film of the bearings causing discharge currents and damage to the motor bearings.

To calculate the bearing voltage, it is necessary to determine the stator-to-rotor capacitance. The capacitive coupling between the stator and the rotor in the active part of the electric machine is modelled with the help of a cylindrical capacitor. The influence of the slot opening of the stator lamination can be taken into account using the Carter factor. In this article the influence of the permittivity of the material used in the slot openings is investigated by FEM simulations. An analytical determination of the stator-to-rotor capacitance is developed while taking into account the dielectric properties of the slot material.

Keywords: stator-to-rotor capacitance; bearing voltage; EDM currents; traction motor

Eingegangen am 8. Mai 2020, angenommen am 27. Mai 2020, online publiziert am 4. Juni 2020
© Der/die Autor(en) 2020, korrigierte Publikation 2021



1. Einleitung

Die in den Motorlagern fließenden parasitären EDM-Lagerströme (EDM = Electric Discharge Machining) führen neben chemischen Schmierstoffveränderungen auch zu Materialveränderungen der Laufbahnen und der Wälzkörper der Lagerung [1]. EDM-Ströme treten im Bereich der Flüssigkeitsreibung/ Vollschmierung bei der Überschreitung der kritischen Feldstärke des Schmierfilms im Wälzlager auf und resultieren aus der Lichtbogenentladung der Lagerkapazität [2]. Die Lagerspannung U_l kann mit Hilfe des in Abb. 1 dargestellten

Ersatznetzwerks zu

$$U_l = \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{sr} + C_{l1} + C_{l2}} \cdot U_{cm} \quad (1)$$

Stockbrügger, Jan Ole, Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland
(E-Mail: ole.stockbruegger@ial.uni-hannover.de); **Ponick, Bernd**, Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

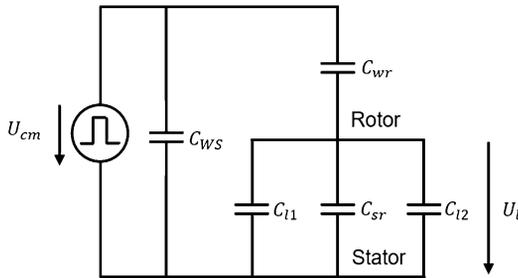


Abb. 1. Kapazitives Ersatzschaltbild des Motors [1]

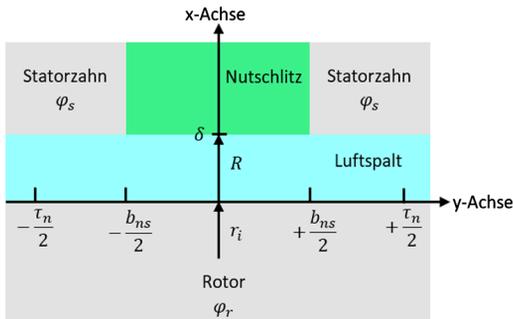


Abb. 2. Modell der betrachteten Geometrie

berechnet werden [3]. Die Eingangsquelle des Ersatzschaltbilds ist die Common-Mode-Spannung U_{cm} , welche dem Mittelwert der drei Ausgangsspannungen des Umrichters entspricht. Der in Abb. 1 dargestellte kapazitive Spannungsteiler setzt sich aus der Kapazität zwischen der Statorwicklung und dem Rotor (im Folgenden kurz Wicklung-Rotor-Kapazität) C_{wr} , der Stator-Rotor-Kapazität C_{sr} sowie den Kapazitäten der beiden Lager C_{l1} und C_{l2} zusammen. Die parallel zum Spannungsteiler angeordnete Wicklung-Stator-Kapazität C_{ws} verursacht über die Nutsisolierung einen kapazitiven, hochfrequenten Common-Mode-Strom [1].

Nach dem Stand der Technik basiert die analytische Bestimmung der Stator-Rotor-Kapazität auf der Berechnung eines Zylinderkondensators [1, 4–6]. Der Einfluss der Statornutöffnungsbreite b_{ns} wird mit dem Carter-Faktor k_c berücksichtigt. Auf Grund der im Vergleich zum Mittelwert der Flussdichte geringeren Flussdichte im Bereich der Nutöffnungen erhält die Radialkomponente der Luftspaltflussdichte eine Welligkeit. Das Verhältnis von maximaler Luftspaltflussdichte, die im Luftspalt in der Zahnachse auftritt, zur mittleren Flussdichte wird als Carter-Faktor bezeichnet [7]. Dieser wurde mittels einer konformen Abbildungen abgeleitet, wobei nur ein Medium im Feldgebiet vorliegt. Im Folgenden wird der Einfluss von unterschiedlichen im Nutschlitz vorliegenden Materialien auf die Stator-Rotor-

Kapazität untersucht und eine Berechnungsvorschrift für die Berücksichtigung der dielektrischen Eigenschaften des Nutschlitzmaterials erarbeitet.

2. Modellierung des Feldgebiets in kartesischen Koordinaten

Die grundlegende Geometrie zur Bestimmung der Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung in kartesischen Koordinaten kann der Abb. 2 entnommen werden.

Das betrachtete Feldgebiet setzt sich aus einem Nutschlitzbereich und einem Luftspaltbereich zusammen. Es wird angenommen, dass der Nutschlitzbereich in positiver x-Richtung unendlich ausgedehnt ist. Der Rotor ist ungenutzt. Für die Beschreibung des Feldgebiets wird das kartesische Koordinatensystem gewählt, daher die Krümmung des Luftspalts wird vernachlässigt. Die Zwei-Elektroden-Anordnung besteht aus dem Rotorblechpaket mit dem Potential φ_r und dem Statorblechpaket mit dem Potential φ_s . Aus Gründen der Vereinfachung wird im Folgenden das Statorpotential als Bezugspotential ($\varphi_s = 0$ V) festgelegt. Die Stator-Rotor-Kapazität C_{sr} ergibt sich folglich zu

$$C_{sr} = \frac{Q_r}{\varphi_r} \tag{2}$$

mit der Rotorladung Q_r . Zunächst wird von einer geschlossenen Statornut ausgegangen. Die periodische Nutfolge führt zur Anwendung von Neumann-Randbedingungen zur Begrenzung des Luftspaltgebiets. Das modifizierte Feldgebiet kann der Abb. 3 entnommen werden.

Der Bereich erstreckt sich in x-Richtung über die Luftspaltlänge δ . In y-Richtung wird eine Nutteilung im Längenmaß

$$\tau_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{N_1} \tag{3}$$

mit dem Bohringsradius R und der Anzahl der Statornuten N_1 betrachtet. Das Luftspaltgebiet besitzt die elektrische Feldkonstante ϵ_0 .

Zur Bestimmung des skalaren Potentialfelds φ in einem betrachteten Raumgebiet mit linearen, isotropen und homogenen Materialien gilt es, die Poisson-Gleichung

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\epsilon} \tag{4}$$

mit der Ladungsdichte ρ und der Permittivität ϵ zu lösen [7]. Sofern keine Raumladungen in dem Gebiet vorhanden sind, vereinfacht sich (4) zur Laplace-Gleichung

$$\Delta\varphi = 0. \tag{5}$$

Das skalare Potentialfeld ist unabhängig von der Umfangskoordinate y und der Axialkoordinate z . Die Anwendung des Laplace-Operators ergibt

$$\Delta\varphi(x) = \frac{\partial^2\varphi(x)}{\partial x^2} = 0. \tag{6}$$

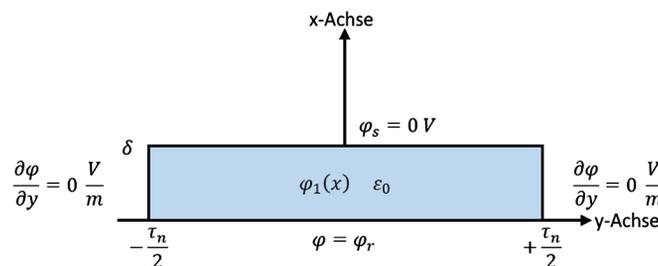


Abb. 3. Luftspaltbereich einer geschlossenen Statornut mit Randbedingungen

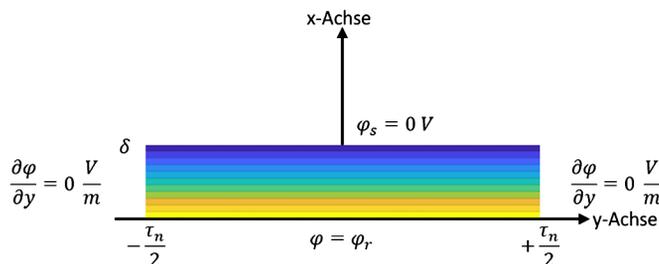


Abb. 4. Äquipotentiallinien des Luftspaltbereichs einer geschlossenen Statornut

Tab. 1. Geometrien der untersuchten Modelle

Variante	b_{ns} in mm	τ_n in mm	τ'_n in Grad	r_i in mm	R in mm	δ in mm
1	3,04	9,84	7,50	73,87	75,20	1,33
2	4,00	9,84	7,50	73,87	75,20	1,33
3	1,00	9,84	7,50	73,87	75,20	1,33
4	1,34	6,06	6,66	51,10	52,10	1,00
5	2,50	11,78	10,00	65,80	67,50	1,70
6	0,50	11,78	10,00	65,80	67,50	1,70

Das skalare Potentialfeld kann mittels direkter Integration und unter Berücksichtigung der in Abb. 3 vorgegebenen Dirichlet-Randbedingungen bestimmt werden zu

$$\varphi_1(x) = -\frac{\varphi_r}{\delta} \cdot x + \varphi_r. \tag{7}$$

In Abb. 4 werden die Äquipotentiallinien des in Abb. 3 vorgestellten Modells dargestellt. Die Äquipotentiallinien verlaufen parallel zu Rotor und Stator. Das D-Feld ergibt sich zu

$$\vec{D}_1 = \epsilon_0 E_1 \vec{e}_x = -\epsilon_0 \cdot \text{grad}(\varphi_1) = \frac{\epsilon_0 \cdot \varphi_r}{\delta} \vec{e}_x. \tag{8}$$

Die Rotorladung entspricht der Integration des D-Felds über die Oberfläche des Rotors. Nach (2) ergibt sich die Kapazität des in Abb. 3 dargestellten Feldgebiets zu

$$C_{sr,\tau_n,dk} = \frac{\epsilon_0 \cdot \tau_n \cdot l_{fe}}{\delta} \tag{9}$$

mit der Aktivteillänge in z-Richtung l_{fe} .

Die Gleichung (8) verdeutlicht, dass das D-Feld im gesamten Feldgebiet konstant ist. Der Abbildung 5 ist der mittels FEM Simulationen bestimmte Verlauf des D-Felds auf der Rotoroberfläche der in Tab. 1 enthaltenen ersten Maschinenvariante für den Fall einer mit Luft gefüllten Nutöffnung bei einem Rotorpotential von $\varphi_r = 1$ V zu entnehmen. Die Einsattlung des D-Felds ergibt sich durch den Einfluss des in Abb. 2 enthaltenen Nutschlitzes mit der Breite b_{ns} . Der nach (8) berechnete Betrag des D-Felds der ersten Maschinenvariante entspricht dem Anfangs- und Endwert und somit dem maximalen Wert des in Abb. 5 dargestellten Verlaufs. Mit (9) wird folglich eine zu große Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung berechnet.

Der in Abb. 5 enthaltene Mittelwert des Verlaufs des D-Felds kann mit Hilfe des Carter-Faktors bestimmt werden. Dieser wurde zwar für ein magnetostatisches Problem abgeleitet. Das hier betrachtete elektrostatische Feldproblem ist jedoch vollständig analog, sodass die Lösung unmittelbar übertragbar ist. Der Carter-Faktor berechnet sich nach [8] zu

$$k_c = \frac{\tau_n}{\tau_n - \gamma \cdot b_{ns}} \tag{10}$$

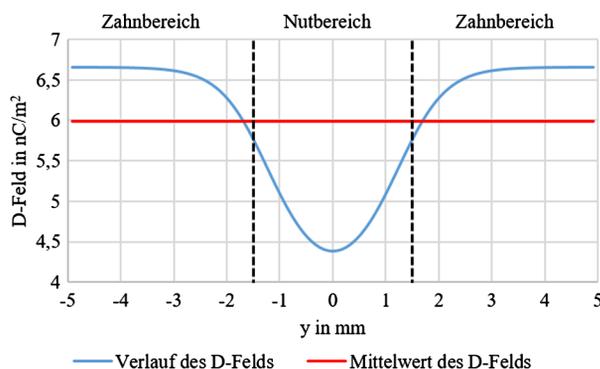


Abb. 5. Darstellung des mittels FEM bestimmten Verlaufs des D-Felds auf der Rotoroberfläche

mit der Näherung für die Hilfsgröße γ

$$\gamma = \frac{1}{1 + 5 \cdot \frac{\delta}{b_{ns}}} \tag{11}$$

Der Mittelwert des D-Felds \bar{D} auf der Rotoroberfläche ergibt sich damit zu

$$\bar{D} = \frac{|D_1|}{k_c} = \frac{\epsilon_0 \cdot \varphi_r}{k_c \cdot \delta} \tag{12}$$

Mit Hilfe des Mittelwerts des D-Felds kann die Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung unter Berücksichtigung der Statornutöffnung ermittelt werden als

$$C_{sr,\tau_n,k_c} = \frac{\bar{Q}_r}{\varphi_r} = \frac{1}{\varphi_r} \cdot \int_0^{l_{fe}} \int_{-\frac{\tau_n}{2}}^{+\frac{\tau_n}{2}} \bar{\sigma}_x = \frac{\epsilon_0 \cdot \tau_n \cdot l_{fe}}{k_c \cdot \delta} \tag{13}$$

Im Gegensatz zu (9) wird die Stator-Rotor-Kapazität durch (13) nicht mit dem maximal vorliegenden Betrag des D-Felds, sondern mit dem Mittelwert des D-Felds auf der Rotoroberfläche bestimmt.

2.1 Einfluss der Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials auf die Stator-Rotor-Kapazität

Zur Herleitung des Carter-Faktors wird angenommen, dass der Luftspalt- und der Nutschlitzbereich mit Luft gefüllt sind. Bei einem

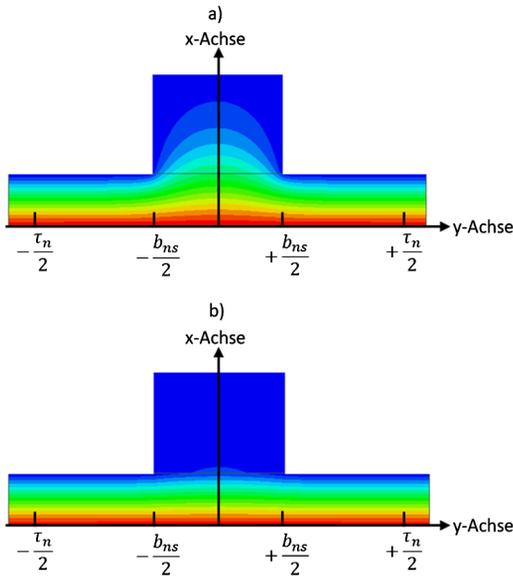


Abb. 6. FEM bestimmte Äquipotentiallinien im Gebiet einer Nutteilung a) Modell mit einer relativen Permittivität im Nutschlitz $\epsilon_{r,ns} = 1$ b) Modell mit einer relativen Permittivität im Nutschlitz $\epsilon_{r,ns} = 10$

vergossenen Stator unterscheiden sich hingegen die Permittivitäten der beiden Bereiche. Die Abbildung 6 enthält mittels FEM bestimmte Äquipotentialflächen des in Abb. 2 enthaltenen Feldgebiets mit unterschiedlichen Materialien im Nutschlitz für die in Tab. 1 enthaltene ersten Maschinenvariante.

In Abb. 6a ist der Nutschlitz mit Luft gefüllt. Für Abb. 6b wird im Nutschlitz ein Medium mit einer relativen Permittivität $\epsilon_{r,ns} = 10$ verwendet. Während in Abb. 6a im Bereich des Nutschlitzes ein konvexer Verlauf des Potentials in Richtung der Statorwicklung zu erkennen ist, liegt im Luftspaltbereich in Abb. 6b eine annähernd vom Nutschlitz unabhängige Potentialverteilung vor.

Der Verlauf der Äquipotentiallinien im Luftspaltgebiet ähnelt dem in Abb. 4 dargestellten Potentialfeld eines Plattenkondensators. Die Abbildung 7 stellt die Verläufe der D-Felder auf der Rotoroberfläche für die beiden in Abb. 6 enthaltenen Modelle dar. Es ist zu erkennen, dass das D-Feld des in Abb. 6b dargestellten Modells im Bereich der Nutöffnung eine deutlich geringere Einsattlung vorweist. Der Mittelwert des Verlaufs des D-Felds ist gegenüber dem in Abb. 6a enthaltenen Modell höher, und somit steigt die kapazitive Kopplung zwischen dem Stator und dem Rotor an. Grundsätzlich gilt, dass in einem Bereich mit einer gegenüber dem nachfolgenden Bereich geringeren Permittivität eine Stauchung der Äquipotentiallinien erfolgt. Je deutlicher sich die Permittivitäten der angrenzenden Bereiche unterscheiden, desto größer ist der Effekt der Stauchung. Folglich ist die Stator-Rotor-Kapazität abhängig von der relativen Permittivität des Mediums, welches im Nutschlitz vorliegt.

2.2 Bestimmung der Stator-Rotor-Kapazität unter Berücksichtigung der Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials

Die Abhängigkeit der Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung von der Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Mediums wird mittels FEM-Software analysiert. Die Abbildung 8 stellt die von der relativen Permittivität abhängige Rotor-Stator-Kapazität einer Nutteilung der in Tab. 1 enthaltenen ersten Maschinenvariante dar.

Der Verlauf der Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung C_{sr,τ_n} in Abhängigkeit von der relativen Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials $\epsilon_{r,ns}$ kann mit Hilfe der in Abb. 8 dargestellten

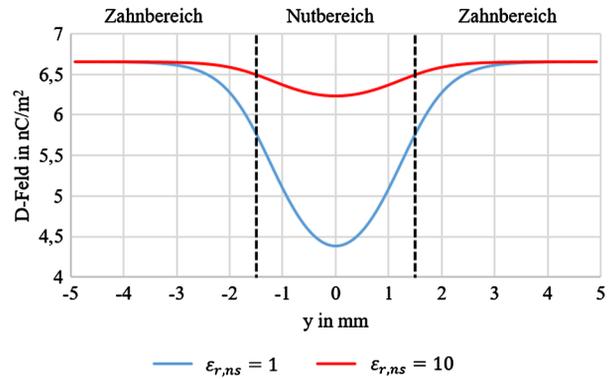


Abb. 7. Darstellung der mittels FEM bestimmten Verläufe des D-Felds auf der Rotoroberfläche mit unterschiedlichen Nutschlitzmaterialien

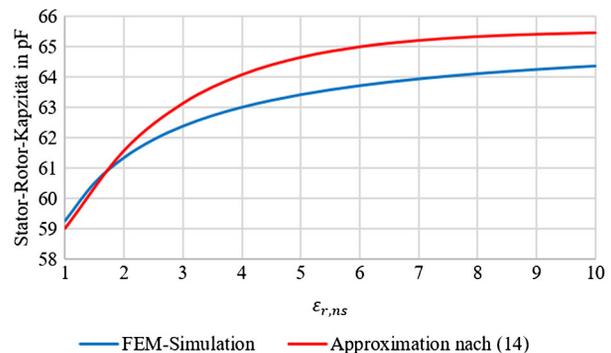


Abb. 8. Stator-Rotor-Kapazität in Abhängigkeit von der im Nutschlitz vorliegenden Permittivität

exponentiellen Übertragungsfunktion

$$C_{sr,\tau_n}(\epsilon_{r,ns}) = C_{sr,\tau_n,k_c} + (C_{sr,\tau_n,\rho k} - C_{sr,\tau_n,k_c}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\epsilon_{r,ns}-1}{\tau}}\right) \quad (14)$$

mit dem Anfangswert C_{sr,τ_n,k_c} , dem stationären Endwert $C_{sr,\tau_n,\rho k}$ und der Konstanten

$$\tau = 2 \quad (15)$$

approximiert werden. Der Anfangswert entspricht der Kapazität, welche bei einem mit Luft gefüllten Nutschlitz mit $\epsilon_{r,ns} = 1$ vorliegen würde.

Als stationärer Endwert wird die Kapazität eines Plattenkondensators $C_{sr,\tau_n,\rho k}$ angenommen. Der stationäre Endwert wird annähernd bei einer relativen Permittivität von zehn erreicht. Diese relative Permittivität entspricht auf Grund der gewählten Exponentialfunktion näherungsweise dem fünffachen Wert der Konstante τ .

Die Bestimmungsgleichung der Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung (13) kann umgeformt werden zu

$$C_{sr,\tau_n}(\epsilon_{r,ns}) = \sigma_s \cdot C_{sr,\tau_n,k_c} = \frac{\sigma_s \cdot \epsilon_0 \cdot \tau_n \cdot l_{fe}}{k_c \cdot \delta} \quad (16)$$

mit

$$\sigma_s = 1 + (k_c - 1) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\epsilon_{r,ns}-1}{2}}\right). \quad (17)$$

Der Koeffizient σ_s beschreibt die Änderung der Stator-Rotor-Kapazität einer Nutteilung in Abhängigkeit von der relativen Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials. Die gesamte Stator-Rotor-Kapazität einer elektrischen Maschine ist das Produkt aus (16) und der Anzahl der Statornuten.

3. Modellierung des Feldgebiets in Polarkoordinaten

Im Gegensatz zu Abb. 2 liegt in rotierenden elektrischen Maschinen ein zylindrischer Luftspaltbereich vor. Das elektrische Feld be-

Tab. 2. Vergleich der analytisch berechneten, längenbezogenen Stator-Rotor-Kapazitäten einer Nutteilung in kartesischen Koordinaten nach (16) mit den FEM-Ergebnissen

Variante	Relative Permittivität $\varepsilon_{r,ns}$	$C'_{sr,\tau_n,anal}$ in pF/m	$C'_{sr,\tau_n,FEM}$ in pF/m	Abweichung in %
1	1	59,02	59,25	-0,39
	3	63,12	62,38	+1,19
	6	64,97	63,72	+1,96
	9	65,39	64,25	+1,77
2	1	55,52	55,50	+0,04
	3	61,83	60,31	+2,52
	6	64,69	62,48	+3,54
	9	65,32	63,37	+3,08
3	1	64,86	64,73	+0,20
	3	65,27	65,15	+0,18
	6	65,45	65,31	+0,21
	9	65,50	65,37	+0,20
4	1	51,10	51,30	-0,39
	3	52,72	52,53	+0,36
	6	53,45	53,03	+0,79
	9	53,61	53,22	+0,73
5	1	58,43	58,54	-0,19
	3	60,28	60,01	+0,45
	6	61,11	60,60	+0,84
	9	61,30	60,83	+0,77
6	1	61,21	60,88	+0,54
	3	61,22	61,13	+0,15
	6	61,22	61,23	-0,02
	9	61,22	61,27	-0,08

sitzt eine dominierende radiale Komponente, und das Luftspaltgebiet kann bei geschlossener Statornut als Zylinderkondensator beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der kreisförmigen Geometrie, des Einflusses der Nutöffnung und der relativen Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials ergibt sich aus der Gleichung eines Zylinderkondensators die Bestimmungsgleichung der gesamten Stator-Rotor-Kapazität eines Antriebs zu

$$C_{sr} = \frac{\sigma_s}{k_c} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot l_{fe}}{\ln\left(\frac{R}{r_i}\right)} \quad (18)$$

mit dem Außenradius des Rotors r_i . Aufgrund der geringen Krümmung können der Koeffizient σ_s und der Carter-Faktor k_c direkt auf die bekannte Kapazität eines Zylinderkondensators übertragen werden.

4. Validierung des Modells

Die Validierung des Modells erfolgt mit Hilfe von FEM-Software (ANSYS Maxwell). Die sechs untersuchten Maschinenvarianten, welche sich hinsichtlich ihrer Geometrien unterscheiden, können der Tab. 1 entnommen werden. Der FEM-Modellaufbau entspricht der in Abb. 2 dargestellten Geometrie. Eine Nutteilung kann im Längenmaß (3) und als Winkel τ'_n ausgedrückt werden.

Die Tabelle 2 enthält die nach (16) in kartesischen Koordinaten analytisch berechneten und die numerisch bestimmten Stator-Rotor-Kapazitäten einer Nutteilung in Abhängigkeit von der relativen Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials.

Die Abweichungen liegen im einstelligen Prozentbereich. Die Fehler sind durch die nicht analytisch geschlossene Feldlösung des betrachteten Gebiets zu begründen, da die Abhängigkeit der kapazitiven Kopplung von der relativen Permittivität des in der Nutöffnung vorliegenden Mediums durch eine Exponentialfunktion approximiert wird. Die Tabelle 3 enthält die nach (18) in Polarkoordinaten analytisch berechneten und die numerisch bestimmten Stator-Rotor-

Kapazitäten in Abhängigkeit von der relativen Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials.

Die Abweichungen liegen ebenfalls im einstelligen Prozentbereich und sind erneut durch die nicht analytisch geschlossene Feldlösung des betrachteten Gebiets zu begründen. Insgesamt führt der hier vorgestellte einfache Berechnungsansatz auf sehr zufriedenstellende Ergebnisse.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Arbeit präsentiert eine einfache und zeiteffiziente analytische Berechnung der Stator-Rotor-Kapazität. Die kapazitive Kopplung zwischen dem Stator und dem Rotor im Aktivteil kann grundsätzlich als Zylinderkondensator modelliert werden. Der eingeführte Koeffizient σ_s berücksichtigt den Einfluss der Permittivität des im Nutschlitz vorliegenden Materials auf die Stator-Rotor-Kapazität.

Der Einsatz eines hochpermittiven Materials im Nutschlitz führt zu einer Erhöhung der Stator-Rotor-Kapazität und nach [9] zu einer Reduzierung des Nutschlitzanteils der Wicklung-Rotor-Kapazität. Dies resultiert in einer Reduzierung der Lagerspannung. Hierbei gilt es zu beachten, dass das hochpermittive Material lediglich im Aktivteil der elektrischen Maschine eingesetzt werden sollte, da der grundsätzlich als Zylinderkondensator modellierte Stirnraumanteil der Wicklung-Rotor-Kapazität durch den Einsatz eines hochpermittiven Materials ansteigen würde.

Mit Hilfe des vorgestellten Berechnungsverfahrens kann die Auswirkung von unterschiedlichen Geometrien und Materialien auf die Stator-Rotor-Kapazität auf einfache Weise bestimmt werden.

Funding Note Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.

Tab. 3. Vergleich der längenbezogenen, analytisch berechneten Stator-Rotor-Kapazitäten in Polarkoordinaten nach (18) mit den FEM-Ergebnissen

Variante	Relative Permittivität $\epsilon_{r,ns}$	$C_{Sr,anal}$ in pF	$C_{Sr,FEM}$ in pF	Abweichung in %
1	1	2819,50	2802,72	+0,60
	3	3008,00	2951,04	+1,93
	6	3093,20	3014,88	+2,60
	9	3112,20	3040,32	+2,36
2	1	2641,10	2627,52	+0,52
	3	2942,30	2857,92	+2,95
	6	3078,50	2962,56	+3,91
	9	3108,90	3005,76	+3,43
3	1	3080,60	3070,56	+0,33
	3	3104,00	3090,72	+0,43
	6	3114,60	3098,40	+0,52
	9	3117,00	3101,76	+0,49
4	1	2743,70	2731,32	+0,45
	3	2823,90	2796,66	+0,94
	6	2860,10	2822,58	+1,33
	9	2868,20	2832,84	+1,25
5	1	2080,80	2046,96	+1,65
	3	2144,10	2096,64	+2,26
	6	2172,80	2116,80	+2,65
	9	2179,20	2124,72	+2,56
6	1	2176,70	2130,84	+2,15
	3	2179,40	2133,00	+2,18
	6	2180,60	2134,08	+2,18
	9	2180,90	2134,08	+2,19

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Tischmacher, H. (2017): Systemanalysen zur elektrischen Belastung von Wälzlagern bei umrichter gespeisten Elektromotoren. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.
2. Furtmann, A. (2017): Elektrisches Verhalten von Maschinenelementen im Antriebsstrang. Dissertation, Leibniz Universität Hannover.

3. Magdun, O., Gemeinder, Y., Binder, A., Reis, K. (2011): Calculation of bearing and common-mode voltages for the prediction of bearing failures caused by EDM currents. In 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines (S. 462–467). Bologna: Power Electronics & Drives.
4. Mütze, A. (2004): Bearing currents in inverter fed AC-motors. Dissertation, TU Darmstadt.
5. Ma, X., Liu, R., Zheng, B., Zhang, Y. (2012): Analysis and calculation of capacitance parameters in induction machines to predict shaft voltage. In 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sapporo (S. 1–5).
6. Ahola, J., Muetze, A., Niemelä, M., Romanenko, A. (2019): Normalization-Based Approach to Electric Motor BVR Related Capacitances Computation. IEEE Trans. Ind. Appl., 55(3), 2770–2780.
7. Binder, A. (2017): Elektrische Maschinen und Antriebe – Grundlagen, Betriebsverhalten 2. Aktualisierte und erweiterte Aufl. Berlin: Springer.
8. Müller, G. (2008): Berechnung elektrischer Maschinen. 6. völlig neu bearbeitete Aufl. New York: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
9. Stockbrügger, J., Ponick, B. (2020): Analytische Ermittlung des Nutschlitzanteils der Wicklung-Rotor-Kapazität zur Vorausberechnung von Lagerspannungen in elektrischen Maschinen. E&I, Elektrotech. Inftech., <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00798-6>.

Autoren



Jan Ole Stockbrügger

studierte Elektro- und Informationstechnik an der Leibniz Universität Hannover, Deutschland, und erhielt im März 2018 den Master of Science. Im Anschluss an sein Studium ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz Universität Hannover angestellt worden. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Hochfrequenzeffekte von elektrischen Maschinen.



Bernd Ponick

schloss sein Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover, Deutschland, ab. Anschließend war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe tätig und wurde dort 1994 promoviert. In den folgenden Jahren arbeitete er als Entwicklungsingenieur, Berechnungsleiter und schließlich als Technischer Leiter im Berliner Dynamowerk der Siemens AG. 2003 folgte er einem Ruf auf den Lehrstuhl für Antriebssysteme der Leibniz Universität Hannover und ist seitdem einer der beiden Leiter des dortigen Instituts für Antriebssysteme und Leistungselektronik. Von 2007 bis 2016 war er als Chairman von IEC TC2 für die internationale Normung auf dem Gebiet der rotierenden elektrischen Maschinen verantwortlich.