

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 414

Dipl.-Ing. Eike Garbe,
Ålesund

Beeinflussung des Geräuschs von Induk- tionsmaschinen durch innovative Ständer- und Läufergeometrien

Leibniz
Universität
Hannover



Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Beeinflussung des Geräuschs von Induktionsmaschinen durch innovative Ständer- und Läufergeometrien

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
(abgekürzt: Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Eike Matthias Garbe
geboren am 12.11.1982 in Hannover

2015

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Bolte

Tag der Promotion: 15.06.2015

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Eike Garbe,
Ålesund

Nr. 414

Beeinflussung des
Geräuschs von Induk-
tionsmaschinen durch
innovative Ständer-
und Läufergeometrien



Institut für
Antriebssysteme und
Leistungselektronik

Garbe, Eike

Beeinflussung des Geräuschs von Induktionsmaschinen durch innovative Ständer- und Läufergeometrien

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 414. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

130 Seiten, 53 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341421-5, ISSN 0178-9481,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Geräusch – Induktionsmaschine – unregelmäßige Nutanordnung – Nutposition – Pendelmoment – Luftspaltweite – Modulation

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, in wie weit das Geräuschkpektrum von Induktionsmaschinen durch eine unregelmäßige Anordnung und/oder Formgebung der Läufer-nuten derart aufgeweitet werden kann, dass es für den Menschen angenehmer erscheint. Es wird dazu ein Formelwerk zur Berechnung der geräuschanregenden magnetischen Kräfte aufgebaut, welches insbesondere auch den Einfluss auf das Drehmoment berücksichtigt. Mithilfe dieser analytischen Darstellung lassen sich optimierte unregelmäßige Geometrien erstellen, wobei insbesondere die Möglichkeiten zur Beeinflussung des Geräuschs von Induktionsmaschinen mit Käfigläufern anhand ausgesuchter Beispiele untersucht werden.

Es wird zudem separat ein Verfahren entwickelt, mit dem sich durch unterschiedlich lange Ständerzähne und somit unterschiedliche Luftspaltweiten, das Luftspaltfeld von elektrischen Maschinen mit geringer läuferseitiger Felderregung oberwellenärmer gestalten lässt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341421-5

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik (IAL) der Leibniz Universität Hannover sowie parallel zu meiner anschließenden Industrietätigkeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, der mich zu dieser Arbeit ermuntert hat und immer gerne zu fachlichen Diskussionen bereit war. Insbesondere danke ich ihm dafür, mir zwei je dreieinhalbmonatige Aufenthalte als Gastwissenschaftler an Norges teknisk-naturvitenskapelige Universitet (NTNU, Trondheim, Norwegen) und an der Kungliga Tekniska högskolan (KTH, Stockholm, Schweden) zu ermöglichen. Mein Dank gilt dabei auch den Mitarbeitern am Institut für „elkraftteknikk“ an der NTNU sowie der Abteilung für „elektrisk energiomvandling“ an der KTH für die jeweils entgegengebrachte Gastfreundschaft.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Bolte für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Meinen Kollegen am IAL danke ich für die stets angenehme Zusammenarbeit.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie. Hier vor allem meinen Eltern, die mich während meiner gesamten Ausbildung immer unterstützt haben. Insbesondere gilt der Dank jedoch meiner Frau und meinen Söhnen, die mich stets zum Erreichen meiner Ziele motiviert haben.

Ålesund im Juni 2015
Eike Garbe

Für Torbjørn

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen und Symbole	VII
Kurzfassung	IX
Abstract	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Koordinatensystem	4
2.2 Physiologische Grundlagen des Hörens	4
2.3 Schrägung	5
3 Berechnung des Luftspaltfelds	7
3.1 Strombelagswellen der Ständerwicklung	7
3.2 Wicklungsfaktor der Ständerwicklung	11
3.3 Felderregewellen der Ständerwicklung	11
3.4 Luftspaltleitwertwellen	12
3.4.1 Schrägung	16
3.4.2 Magnetische Spannung über den Eisenwegen	17
3.5 Ständerseitig erregte Induktionswellen	18
3.6 Läuferückwirkung	19
3.6.1 Induzierte Spannung	20
3.6.2 Nutstreuinduktivitäten	24
3.6.3 Einfluss der Stromverdrängung	25
3.6.4 Diskrete Betrachtung des Läuferkäfigs	30
3.6.5 Kontinuierliche Betrachtung des Läuferkäfigs	33
3.6.6 Wicklungsfaktor der Läuferwicklung	39
3.6.7 Schrägung	41
3.6.8 Rückwirkung auf den Ständerstrom	41
4 Geräuschanregung und Drehmomentbildung	42
4.1 Drehmoment	42
4.1.1 Schrägung	46
4.1.2 Drehmoment des kontinuierlichen Modells	46
4.2 Radialkraftwellen	47
4.3 Tangentialkräfte	48
4.4 Jochzugwellen	54
4.5 Schwingung des Jochs und Schallabstrahlung	56
4.6 Schlussfolgerung	59

5	Untersuchung des Berechnungsverfahrens	60
5.1	Vereinfachte Berechnung der resultierenden Luftspaltleitwertwellen	60
5.2	Vergleich von diskreter und kontinuierlicher Betrachtung des Läufers	61
5.3	Methoden zur Drehmomentberechnung	65
5.4	Flussaufteilung zur Berechnung der Tangentialkräfte an den Zähnen	66
5.5	Berechnung der Tangentialkräfte an den Zähnen	67
6	Variation der Ständergeometrie	69
6.1	Gleichmäßige Ständergeometrie	69
6.2	Variation der Zahnbreiten	74
6.3	Variation der Luftspaltweite	75
6.4	Phasenwinkelkorrektur	77
6.4.1	Einfluss auf die Variation der Luftspaltweite	78
6.4.2	Nachteile der Phasenwinkelkorrektur	80
7	Entwurf und Untersuchung von Beispielmaschinen	81
7.1	Entwurfsgang	81
7.2	Gleichmäßige Geometrien	82
7.3	Variation der Läufergeometrie	83
7.3.1	Wahl der Läufernutbreiten	83
7.3.2	Einbeziehung von Nichtlinearitäten	85
7.3.3	Maschine „B“	86
7.3.4	Maschine „C“	88
7.4	Variation der Ständergeometrie	103
7.4.1	Maschine „A“	103
7.4.2	Maschine „C“	105
7.4.3	Reluktanzmaschine auf Basis von Maschine „C“	111
8	Zusammenfassung	115
	Literaturverzeichnis	117

Symbole

x	Allgemeine Variable	X	Effektivwert einer harmonischen Größe
x	Augenblickswert einer zeitveränderlichen Größe	\bar{x}	Mittelwert
x	Konstante	\mathbf{x}	Vektor
\hat{x}	Amplitudenwert	\mathbf{X}	Matrix
\underline{x}	Komplexe Variable	\tilde{x}	Unterscheidungsmarke
$\Re\{\underline{x}\}$	Realteil einer komplexen Variable	\check{x}	Unterscheidungsmarke
$\Im\{\underline{x}\}$	Imaginärteil einer komplexen Variable	x'	Bezogene Größe
\vec{x}	Komplexer Raumzeiger	x'	Unterscheidungsmarke
X	Allgemeine Variable	x''	Unterscheidungsmarke
		x^*	Längenmaß (sonst Bogenmaß)
		\angle	Winkel
		$=:$	Rechtsseitige Definition

Formelzeichen

A	Fläche	$k_{l\sigma}$	Stromverdrängungskoeffizient der Stabstreuinduktivität
A, a	Strombelag	L	Induktivität
a	Anzahl paralleler Wicklungszweige	l_i	ideelle Blechpaketlänge
a	Wichtungsfaktor	M	Drehmoment
B	Induktion	M	Gegeninduktivität
b	Wichtungsfaktor	m	Anzahl der Stränge
b_2	Periodenanzahl der Läufernutmodulation	N_1	Anzahl der Ständernuten
b_N	Nutbreite im Bogenmaß	N_2	Anzahl der Läufernuten
b_N^*	Nutbreite im Längenmaß	\mathbb{N}	Menge der nicht-negativen ganzen Zahlen
b_{No}	Breite des Nutschlitzes	\mathbb{N}^*	Menge der positiven ganzen Zahlen (ohne Null)
b_z	Zahnbreite im Bogenmaß	n_ν	Anzahl betrachteter Feldwellen
D	Durchmesser	n_q	Nenner der Lochzahl q (gekürzt)
I, i	Strom	p	Polpaarzahl
j	imaginäre Einheit	q	Lochzahl
\mathbf{e}	Einheitsvektor	R	Widerstand
E	Elektrische Feldstärke	r	Radius
F	Kraft	S	Elektrische Durchflutung
F_n	Normalkraft	s	Schlupf
F_t	Tangentialkraft	t	Zeit
f	Frequenz	U, u	Spannung
h_{No}	Höhe des Nutschlitzes	V	Felderregung
h_z	Zahnhöhe	V	Magnetische Spannung
J_n	Besselfunktion	v	Geschwindigkeit
k_r	Stromverdrängungskoeffizient des Stabwiderstands	W	Energie
		w	Spulenweite

w	Windungszahl	κ	elektrische Leitfähigkeit
w_N	Anzahl in Reihe geschalteter Leiter in einer Nut	κ	Polpaarzahl einer Drehwelle
x	Winkelkoordinate im Bogenmaß	Λ	magnetischer Leitwert
x^*	Winkelkoordinate im Längenmaß	λ	magnetische Leitwertdichte
x_1	ständerfeste Winkelkoordinate	λ	Wellenlänge
x_2	läuferfeste Winkelkoordinate	μ	Permeabilität
$x_{(n)}$	Position der Nut (n)	μ	Polpaarzahl einer Drehwelle
Δx_N	Nutabstand	μ_0	Permeabilität im Vakuum
$x_{z(n)}$	Position des Zahns (n)	μ_r	relative Permeabilität
Δx_z	Zahnabstand	ν	Polpaarzahl einer Drehwelle
z	Koordinate in Richtung der Längsachse	ξ	Wicklungsfaktor
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen	ξ_K	Kopplungsfaktor mit einer Käfigmasche
\mathbb{Z}^*	Menge der ganzen Zahlen ohne Null	ξ_N	Nutschlitz- bzw. Breitenfaktor
z_q	Zähler der Lochzahl q (gekürzt)	ξ_{schr}	Schrägungsfaktor
α	Abplattungsfaktor	ξ_u	Einkopplungsfaktor
β	Faktor der Induktionsabsenkung über einer Nut	ρ	Drehwinkel des Läufers
γ_{schr}	Schrägungswinkel	ρ_0	Drehwinkel des Läufers zum Zeitpunkt $t = 0$
δ	Luftspaltweite	σ	Schrägungskoeffizient einer Drehwelle
Φ	magnetischer Fluss	τ_p	Polteilung
ϑ	Modulationsstärke	Ψ	magnetischer Verkettungsfluss
$\vartheta(r)$	Verteilungsfunktion der Induktion	ω	Kreisfrequenz
		Ω	Winkelgeschwindigkeit des Läufers

Indizes

1	Ständer	mech	mechanisch
2	Läufer	N	Nut
A	Strombelag	n	Normalkomponente
a	Ständerstrang a	p	Polpaarzahl
B	Induktion	sat	sättigungsbedingt
b	Ständerstrang b	schr	Schrägung
Cu	Kupfer	sr	Schrägung
c	Ständerstrang c	t	Tangentialkomponente
Fe	Eisen	x	Richtung x -Koordinate
i	induziert	y	Richtung y -Koordinate
j	Joch	z	Richtung z -Koordinate
s	Stab	z	Zahn
r	Richtung Radialkoordinate	δ	Luftspalt
r	Ring	μ	räumliche Ordnungszahl
h	Hauptfeldanteil	ν	räumliche Ordnungszahl
σ	Streufeldanteil		
mag	magnetisch		

Kurzfassung

In elektrischen Maschinen werden aufgrund der über dem Umfang periodisch wiederkehrenden Geometrien in der Regel wenige signifikante Einzeltöne erzeugt. Da derartige Geräuschspektren für den Menschen lästig erscheinen, werden zum Beispiel bei Ventilatoren die Schaufeln ungleichmäßig über dem Umfang angeordnet. Damit wird ein angenehmeres breiteres Geräuschspektrum mit reduzierter Lautstärke der dominierenden Einzeltöne erreicht.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich damit, das Verfahren einer unregelmäßigen Anordnung der Ventilatorschaufeln auf zum Beispiel die Nutpositionen und -formen von Käfigläufern in Induktionsmaschinen zu übertragen. Hierzu wird zunächst ein Formelwerk zur Berechnung der geräuschanregenden magnetischen Kräfte und Drehmomente aufgebaut, welches insbesondere für unregelmäßig angeordnete oder geformte Nuten gilt.

Durch analytische Überlegungen sowie numerische Optimierungen, welche wiederum auf der analytischen Formulierung der wesentlich zum Geräusch einer Maschine beitragenden Effekte basieren, lassen sich optimierte unregelmäßige Geometrien finden. Anhand beispielhaft ausgewählter optimierter Geometrien werden insbesondere einige Möglichkeiten zur Beeinflussung des Geräuschs von Induktionsmaschinen mit Käfigläufern untersucht. Die Beispiele sind dabei real vermessen beziehungsweise analytisch oder numerisch berechnet. Dabei zeigt die Gegenüberstellung der errechneten Werte mit den Messungen die Eignung der Berechnungsmethoden.

Zusätzlich zur Variation der Nutpositionen und -formen im Läufer wird eine auf den Zahnhöhen des Ständers basierende Methode zur Variation der Luftspaltweite über dem Umfang der Maschine hergeleitet und ebenfalls anhand einiger ausgewählter Beispiele untersucht.

Im Ergebnis zeigt sich, dass mit Hilfe der Variation der Läufernutpositionen und -formen für einige Maschinen ein deutlich angenehmeres Geräusch erzielbar ist. Für die meisten Geometrien ist hingegen kein merklich angenehmeres Geräusch erreichbar. Keine Verbesserung bezüglich des Geräuschs lässt sich durch die Variation der Luftspaltweite beobachten. Diese Variation ist dennoch sinnvoll, um bei Maschinen mit niedriger läuferseitiger Felderregung, also insbesondere bei Synchronreluktanzmaschinen, viele Induktionsoberwellen abzuschwächen.

Schlagworte

Geräusch, Induktionsmaschine, Luftspaltweite, Modulation, ungleichmäßiger Nutabstand, Nutposition

Abstract

Due to periodically repeating geometric elements in electric machines, usually only a few significant single tones will be emitted. As such noise spectra feel uncomfortable for human beings, for example fans are built with uneven blade spacings. This results in a more comfortable wider noise spectra with quieter dominant single tones.

This thesis deals with the idea to transfer the method of uneven blade spacings for example to the slot positions or geometries of cage rotors in induction machines. Therefore, a set of formulas to calculate the noise-exciting magnetic forces and torques of machines with uneven slot spacings and slot geometries will be developed.

By analytic considerations as well as numeric optimizations, which are based on the mathematical description of the main noise-causing effects in electric machines, optimized uneven geometries can be found. Based on selected examples with optimized geometries, several methods to influence the sound of cage induction machines will be investigated. Thereby, the examples will be measured respectively calculated analytically or numerically. The comparison of measurements and calculations shows applicability of the calculation methods.

In addition to the variation of the slot positions and geometries, a method to vary the air gap width by use of different stator tooth heights will be developed. It will also be analyzed with the help of selected examples.

The results show, that for some machines a much more comfortable sound can be achieved by varying the slot positions and geometries. But, for most geometries no appreciable more comfortable sound can be reached. No improvement of the sound can be observed when using the variation of the air gap width. Nevertheless, this method can be used to reduce harmonics of the magnetic flux density of machines with low field excitation of the rotor, that means especially synchronous reluctance machines.

Key words

Air gap width, induction machine, modulation, noise, slot position, uneven slot pitch