

Identifikation und Prädiktion von Fehlern bei Käfigläufer-Niederspannungs-Normmotoren

Von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Christoph Haug

aus Freudenstadt

Hauptberichter: Prof. Dr. H.-J. Gutt

Mitberichter: Prof. Dr. K. Feser

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2002

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
der Universität Stuttgart

2003

Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe

Band 9

Christoph Haug

**Identifikation und Prädiktion von Fehlern bei
Käfigläufer-Niederspannungs-Normmotoren**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Haug, Christoph:

Identifikation und Prädiktion von Fehlern bei Käfigläufer-Niederspannungs-
Normmotoren/Christoph Haug.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus dem Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe ; Bd. 9)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2002

ISBN3-8322-1237-X

Copyright Shaker Verlag 2003

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1237-X

ISSN 1431-9888

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe (IEMA) der Universität Stuttgart, welches nach der Emeritierung des Institutsdirektors, Herrn Prof. Dr. H.-J. Gutt, als Abteilung am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) weitergeführt wurde.

Mein besonderer Dank gilt dem emeritierten Direktor des Instituts, Herrn Prof. Dr. H.-J. Gutt, für die stete Förderung und Unterstützung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptberichtes.

Herrn Prof. Dr. K. Feser danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Anfertigung des Mitberichtes, sowie für die interessanten Einblicke in die Arbeit des von ihm geleiteten Institutes.

Diese Arbeit wurde angeregt und unterstützt von der Fa. Siemens A&D in Bad Neustadt a. d. Saale. Mein ganz spezieller Dank gilt dabei Herrn Dr. Niedermeier, der sich sehr für dieses Projekt eingesetzt hat.

Danken möchte ich meinen ehemaligen Kollegen am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe, insbesondere Herrn Dr. A. Beisse, Dr. V. Bosch, Herrn Prof. Dr. A. Grüner und Herrn J. Lebsanft, die ihr Wissen stets bereitwillig mit mir geteilt haben. Weiterhin gilt mein Dank Herrn T. Kolb für die gute kollegiale Zusammenarbeit.

Herrn Csismarek, Herrn H. Dick, Frau A. Fischer und den Herren von der Zentralwerkstatt danke ich für die stets freundliche Unterstützung bei meiner Arbeit.

Mein großer Dank gilt schließlich meiner Lebenspartnerin für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der Zeit des Entstehens dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

FORMELZEICHEN	4
ABSTRACT	10
1 ZUSAMMENFASSUNG	20
2 EINLEITUNG	21
2.1 KÄFIGLÄUFER-NIEDERSpannungs-NORMMOTOREN	21
2.2 PROBLEMSTELLUNG	22
2.3 ANWENDERBEFRAGUNG.....	25
2.4 AUFGABENSTELLUNG	29
3 SYSTEMKONZEPTION EINES „INTELLIGENTEN NORMMOTORS“	30
3.1 MODULARES HARDWAREKONZEPT	31
3.1.1 Mikrokontroller-Modul	32
3.1.2 Analog- und Sensor-Modul	32
3.1.3 Kommunikations-Modul	33
3.1.4 Spannungsversorgungs-Modul	34
3.1.5 Verbindungsmodul	34
3.2 MODULARES SOFTWAREKONZEPT	35
3.3 KOMMUNIKATION UND VISUALISIERUNG	36
4 IDENTIFIKATION- UND PRÄDIKTION VON FEHLERN IM ZUSTANDSRAUM	38
4.1 STRATEGIEN ZUR FEHLERIDENTIFIKATION UND -PRÄDIKTION.....	38
4.1.1 Definition des Monitoring	39
4.1.2 Definition der Fehleridentifikation	42
4.1.3 Definition der Fehlerprädiktion	43
4.1.4 Definitionsüberblick	43
4.2 DER ZUSTANDSRAUM ZUR FEHLERANALYSE	44
4.2.1 Transformationen.....	45
4.2.1.1 Effektivwertbildung	45
4.2.1.2 Mittelwertberechnung	46
4.2.1.3 Standardabweichung	47
4.2.1.4 Maximum- und Minimumbildung	47
4.2.1.5 Real- und Imaginärteilbildung	48
4.2.1.6 Spektralanalyse	48
4.2.1.6.1 Fouriertransformation	48
4.2.1.6.2 Wigner-Ville-Verteilung	51
4.2.1.6.3 Choi-Williams-Verteilung	51
4.2.2 Merkmalsextraktionen.....	53

4.2.3	Definition eines Zustandsraums und eines Zustandsvektors zur Fehleranalyse	55
4.3	FEHLERIDENTIFIKATION	56
4.3.1	Polynomklassifikation	58
4.3.2	Einfache Ballungsklassifikation	59
4.3.3	Regelbasierte Fehleridentifikation mittels unscharfer Intervalle	60
4.3.4	Schnelle parallele Fehleridentifikation	62
4.4	FEHLERPRÄDIKTION	65
4.4.1	Feste Fehlerprädiktion aus einem Erfahrungsschatz	65
4.4.2	Fehlerprädiktion durch Gradientenauswertung	66
5	FEHLERQUELLEN UND -URSACHEN BEI NORMMOTOREN	68
5.1	AUFBAU EINES KÄFIGLÄUFERMOTORS	68
5.2	LAGERSCHADEN	69
5.2.1	Schmierung	69
5.2.2	Materialermüdung	69
5.2.3	Unwucht	71
5.3	ASYMMETRISCHE SPEISUNG	72
5.3.1	Mit- und gegenlaufende Welle der Luftspaltinduktion	72
5.3.2	Rüttelmoment	74
5.3.3	Überhitzung	77
5.4	WICKLUNGSDEFEKT	77
5.4.1	Isolationsversagen	78
5.5	ROTORDEFEKT	79
5.6	UNWUCHTEN UND EXZENTRIZITÄTEN	79
5.7	ÜBERHITZUNG	80
6	DATENGEWINNUNG UND -VERARBEITUNG	81
6.1	DIREKT GEMESSENE GRÖßEN	82
6.1.1	Zeitfunktion der drei Phasenspannungen	83
6.1.2	Frequenz der Phasenspannung	84
6.1.3	Mechanische Drehzahl	85
6.1.4	Verlauf der Wicklungstemperatur und Lagertemperaturen	85
6.1.5	Zeitfunktion der Vibration	86
6.2	ABGELEITETE GRÖßEN VOM TYP TRANSFORMATION	87
6.2.1	Effektivwerte der Phasenspannungen und der Vibration	87
6.2.2	Asymmetrie der Phasenspannungen	87
6.2.3	Das Frequenzspektrum der Phasenspannungen	87
6.2.4	Das Frequenzspektrum der Vibration	88
6.2.5	Der Schlupf	89
7	ERMITTLUNG VON DREHMOMENT, STROM UND VERLUSTWINKEL	90
7.1	EINFACHE NÄHERUNGSWEISE BERECHNUNG DES DREHMOMENTS	91
7.2	DIE LEERLAUFKENNLINIE	93
7.3	DIE STROMORTSKURVEN	95

7.3.1	<i>Temperaturabhängigkeit</i>	95
7.3.2	<i>Schlupfabhängigkeit</i>	97
7.3.3	<i>Vergleich zwischen Messung und Berechnung</i>	98
8	BESTIMMUNG DER UNWUCHT DURCH AUSWERTUNG DER VIBRATION	100
8.1	ANALYSE DES EFFEKTIVWERTES DER VIBRATION	100
8.1.1	<i>Abhängigkeit der Vibration von der Belastung</i>	100
8.1.2	<i>Temperatur und Betriebszeitabhängigkeit der Vibration</i>	101
8.2	ANALYSE DES FREQUENZSPEKTRUMS DER VIBRATION	101
8.2.1	<i>Analyse des Frequenzspektrums am Motor der Achshöhe 160</i>	110
8.3	AUSWERTUNG DES VIBRATIONSSPEKTRUMS MITTELS UNSCHARFER LOGIK	112
9	TEMPERATURPROGNOSE	115
9.1	AUSGANGSSITUATION	115
9.2	VEREINFACHTES THERMISCHES ERSATZSCHALTBILD	117
9.3	VERGLEICH VERSCHIEDENER VERFAHREN	118
9.3.1	<i>Verfahren von Vetter</i>	118
9.3.2	<i>Verfahren von Zeller</i>	119
9.3.3	<i>Unterschiede der Verfahren</i>	119
9.4	DSFI-ALGORITHMUS	120
9.4.1	<i>Mathematische Grundlagen</i>	120
9.4.2	<i>Vorteile und Nachteile</i>	121
9.5	UMSETZUNG IN SOFTWARE	121
9.5.1	<i>Modulares Konzept</i>	121
9.6	EXPERIMENTELLE ÜBERPRÜFUNG DER TEMPERATURPROGNOSE	123
9.7	ANPASSUNG DES VERFAHRENS NACH ZELLER	125
10	AUSBLICK	126
	LITERATURVERZEICHNIS	127
	ANHANG	132
A1	DATEN DER UNTERSUCHTEN VIBRATIONSSENSOREN	132
A1.01	MIKROMECHANISCHE SENSOREN	132
A1.02	PIEZOELEKTRISCHER SENSOR	133
A2	DATEN DER UNTERSUCHTEN MOTOREN	134
A2.01	1,5 kW ACHSHÖHE 90L	134
A2.02	15 kW ACHSHÖHE 160	135
A3	MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN DES DSFI-ALGORITHMUS	136

Formelzeichen

Formelzeichen mit lateinischen Buchstaben

a	Steigung einer linearisierten Funktion	
\mathbf{A}	Koeffizientenmatrix	
a	Abstand des Masseschwerpunktes von der Rotationsachse	[m]
a	Abkürzung für $e^{j\frac{2}{3}\pi}$	
\underline{A}	DSFI-Matrix	
$ABS\varphi$	Ermittlung von Betrag und Phase einer komplexen Größe	
\underline{b}	DSFI-Vektor	
\mathbf{C}	Menge der komplexen Zahlen	
C	Kapazität	[F]
C_N	Luftgruppe von Wälzlagern	
CWD	Kontinuierliche Choi-Williams Verteilung	
D	Schätzvektor	
d_m	Kugeldurchmesser des Wälzlagers	[m]
e	Eulersche Zahl	
\underline{e}	DSFI-Fehlervektor	
\mathbf{F}	Fehlerräumensymbol	
f	Anzahl Fehlerarten	
F	Fliehkraft, ausgelöst durch eine Unwucht	[N]
\hat{f}	Amplitude einer Schwingung	
f^*	Konjugiert komplexe Funktion	
$f(t)$	Zeitfunktion	
f_0	Netzfrequenz	[Hz]
f_1, f_2	Grundfrequenzpaar der Luftspalt-Kraftwelle	[Hz]
$f_{chirp}(t)$	Zeitfunktion eines "Chirps"	
FFT_n	Schnelle (Fast) Fouriertransformation	
F_n	Fouriertransformation	
f_n	Mechanische Läuferdrehfrequenz	[Hz]
H	Zeichen für einen Funktionen- oder Hilbertraum	

i	Strom	[A]
I_2'	Auf die Ständerseite transformierter Läuferstrom	[A]
I_a	Ausgangsstrom	[A]
Im	Imaginärteil einer komplexen Zahl	
j	Eulersche Zahl $\sqrt{-1}$	
J_L	Trägheitsmoment der Arbeitsmaschine (Last)	
J_R	Trägheitsmoment des Motor-Rotors	
k	Faktor zur Berechnung des Anlaufmomentes	
k	Ganze Zahl, z. B. Stichprobennummer	
l	Ganzzahlige Zählvariable, Dimensionen	
L	Amplitude der Luftspaltkraftwelle	
$L_{\sigma 2}'$	Auf Ständerseite transformierte Läuferstreuinduktivität	[H]
$L_{\sigma 1}$	Ständerstreuinduktivität	[H]
$l(x)$	Linearisierte Funktion	
L_1	Amplitude der Luftspaltkraftwelle bei maximalem Luftspalt	
L_2	Amplitude der Luftspaltkraftwelle bei minimalem Luftspalt	
L_h	Hauptinduktivität einer Käfigläufermaschine	[H]
L_h	Hauptinduktivität	[H]
m	Ganzzahlige Zählvariable, Dimensionen	
M	Drehmoment	[Nm]
M	Merkmalsraumsymbol	
m	Anzahl Merkmale	
m	Masse der Unwucht	[kg]
M	Masse ohne Unwucht	[kg]
\underline{M}	quadratische DSFI-Matrix	
M_A	Anlaufmoment	
Max	Maximumfunktion	
Min	Minimumfunktion	
M_L	Bremsendes Moment der Arbeitsmaschine (Last)	
M_s	Vorgang der Merkmalsgewinnung	
m_T	Anzahl transformierter Merkmale	
MW	Arithmetische Mittelwertbildung	
MW_n	Diskrete Mittelwertberechnung	
MW_T	Kontinuierliche Mittelwertberechnung	
n	Ganze Zahl, z. B. Stichprobenmenge, Raumdimension	

n	Läuferdrehzahl	$[s^{-1}]$
\mathbf{N}	Normierungsmatrix	
n_0	Synchrondrehzahl	$[s^{-1}]$
N_k	Klassenanzahl	
n_L	Wälzlagerdrehzahl	$[s^{-1}]$
P	Wirkleistung	$[W]$
p	Polpaarzahl der Käfigläufermaschine	
\mathbf{P}	Prognoseraumsymbol	
P	Anzahl Prognosewerte	
P_δ	Luftspaltleistung	$[W]$
r	Radiale Entfernung der Unwucht	$[m]$
R	Widerstand	$[\Omega]$
\mathbf{R}	Menge der reellen Zahlen	
R_2'	Auf Ständerseite transformierter Läuferwiderstand	$[\Omega]$
R_{20}'	Läuferwiderstand bei Raumtemperatur	$[\Omega]$
\underline{R}_V	obere DSFI-Dreiecksmatrix	
R_I	Ständerwiderstand	$[\Omega]$
R_{I0}	Ständerwiderstand bei Raumtemperatur	$[\Omega]$
Re	Realteil einer komplexen Zahl	
$ReIm$	Real- und Imaginärteilenmittlung einer komplexen Größe	
R_{Fe}	Eisenverlustwiderstand	$[\Omega]$
RMS_n	Diskrete Effektivwertberechnung	
RMS_T	Kontinuierliche Effektivwertberechnung	
s	Läuferschlupf	
ST	Spektral-Transformation	
T	Periodendauer oder Intervall	$[s]$
t	Zeit	$[s]$
\underline{T}	DSFI-Matrix, symbolisiert Householder-Transformation	
T_i	Zeitdauer bis zum Erreichen eines Inkrementalgeberstriches	$[s]$
t_k	Zeitpunkt der k-ten Stichprobe	$[s]$
U	Effektivwert einer Spannung	$[V]$
U	Unwucht	$[kg\ m]$
u	Zeitveränderliche Spannung	$[V]$
U_I	Effektivwert der Strangspannung	$[V]$
U_l	Effektivwert der Motorklemmenspannung	$[V]$

$U_{1,2,3}$	Phasenspannungen	[V]
U_a	Ausgangsspannung	[V]
U_g	Gegenlaufende Spannung	[V]
U_h	Induzierte Spannung	[U]
$U_{L1,2}$	Phasenspannungen	[V]
U_m	Mitlaufende Spannung	[V]
U_{REF}	Referenzspannung	[V]
V	DSFI-Verlustfunktion	
v_Z	Geschwindigkeit der Zustandsraumschwerpunktverschiebung	
\underline{W}	DSFI-Wichtungsmatrix	
WVD_T	Kontinuierliche Wigner-Ville-Verteilung	
x	Allgemeine reelle Variable	
\underline{x}	DSFI-Vektor	
$X'_{2\sigma}$	Auf Ständerseite transformierte Läuferstreureaktanz	[Ω]
X'_2	Läuferreaktanz	[Ω]
$X_{I\sigma}$	Ständerstreureaktanz	[Ω]
X_I	Ständerreaktanz	[Ω]
X_h	Hauptreaktanz einer Käfigläufermaschine	[Ω]
x_k	Werte der k-ten Stichprobe	
Y	Zielraum	
y	Zielvektor	
z	Komplexe Zahl	
Z	Zustandsraumsymbol	
z''	Stabzahl des Läufers	
z_G	Grenzvektor des Zustandsraumes	
z_i	Strichzahl des Inkrementalgebers	
z_i	Merkmalswert	
z_M	Mittelwert des Zustandsraumschwerpunktes	

Formelzeichen mit griechischen Buchstaben

α_k	Spektralamplitude der k-ten Cosinusschwingung	
α_V	Verstärkung einer Schaltung	
α_0	Spektralanteil bei der Frequenz Null	
β_k	Spektralamplitude der k-ten Sinusschwingung	
δ	Luftspaltbreite	[m]

δ_0	Ursprünglicher Luftspalt	[m]
Δf	Frequenzauflösung der Spektralanalyse	[Hz]
$\Delta \delta$	Änderung der Luftspaltbreite	[m]
ΔL	Amplitudenänderung der Luftspaltkraftwelle	
φ	Lastwinkel	
φ_{chirp}	Phasenwinkel eines "Chirps"	
φ_u	Phasenwinkel des resultierenden Spannung	
φ_z	Phasenwinkel einer komplexen Größe z	
φ_n	Läuferwinkel	
φ_R	Drehwinkel des Rotors	
φ_g	Phasenwinkel der gegenlaufenden Spannung	
φ_m	Phasenwinkel der mitlaufenden Spannung	
μ	Mittelwert einer Gaußverteilung	
ν	Berechnungsfaktor der Luftspaltkraftwellenamplitudenänderung	
π	Kreiskonstante	
$\vartheta_{\bar{U}}$	Übertemperatur	[°C]
$\vartheta_{\bar{U}End}$	Endübertemperatur	[°C]
ϑ	Temperatur	[°C]
$\vartheta_{\bar{W}}$	Mittlere Wickelungsübertemperatur	[°C]
$\vartheta_{\bar{W}K}$	Wickelkopfübertemperatur	[°C]
ϑ_G	Grenztemperatur	[°C]
Θ	Gaußsches Fehlerintegral bzw. Wahrscheinlichkeit	
$\underline{\Theta}$	DSFI-Parametervektor	
$\underline{\rho}$	DSFI-Wichtungsfaktor	
σ_G	Glättungsfaktor	
σ_n	Empirische Standardabweichung aus n Stichproben	
σ	Standardabweichung	
τ	Integrationsvariable	
τ	Zeitkonstante	[s]
ω	Kreisfrequenz	[s ⁻¹]
ω_0	Kreisfrequenz der Netzspannung	[s ⁻¹]
ω_k	Kreisfrequenz der k-ten Spektrallinie	[s ⁻¹]
ω_n	Kreisfrequenz des Läufers	[s ⁻¹]
ω_u	Kreisfrequenz der resultierenden Spannung	[s ⁻¹]

ω_{chirp}	Kreisfrequenz eines "Chirps"	[s ⁻¹]
ζ	Integrationsvariable	
$\underline{\Psi}$	DSFI-Messmatrix	
$\underline{\psi}$	DSFI-Messvektor	
ξ	Integrationsvariable	

Abkürzungen

ABS	Absolutwert bzw. Betrag einer Zahl
CPU	Zentrale Recheneinheit (in diesem Fall der Mikrokontroller)
CWD	Choi-Williams-Verteilung
DSFI	Discrete Square root Filtering in Informationform
EEPROM	Electrical Erasable ROM
Fe	Eisen
FFT	Fast-Fourier-Transformation, Schnelle Fouriertransformation
FLASH- ROM	Per Spannungsimpuls („FLASH“) löschbares und dann wieder- beschreibbares ROM
GIF	Grafik Interchange Format, Grafikformat
IC	Integrierter Schaltkreis
IEMA	Institut für Elektrische Maschinen, zwischenzeitlich Abteilung für Elektrische Maschinen am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart.
Im	Imaginärteil einer komplexen Zahl
LED	Leuchtdiode
Max	Maximum
Min	Minimum
MW	Mittelwert
RAM	Random Access Memory; Schreib- / Lesespeicher
Re	Realteil einer komplexen Zahl
REF	Referenzwert
RMS	Root-Mean-Square, Effektivwert
ROM	Read Only Memory, Lesespeicher
RTEMS	Real-Time-Executive for Multiprozessor Systems Echtzeitbetriebssystem
SRAM	Statisches RAM
WVD	Wigner-Ville-Verteilung