

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 421

Dipl.-Ing. Wilfried Holzke,
Bremen

Entwicklung eines Messsystems für Feldmessungen in Windenergieanlagen und echtzeitfähige Implementierung eines Lebensdauermodells zur Zustandsüberwachung von Leistungshalbleitern



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Entwicklung eines Messsystems für Feldmessungen in Windenergieanlagen und echtzeitfähige Implementierung eines Lebensdauermodells zur Zustandsüberwachung von Leistungshalbleitern

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Wilfried Holzke
aus Bremen

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jan Wenske
Eingereicht am:	30. 04. 2020
Tag des Promotionskolloquiums:	01. 07. 2020

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Dipl.-Ing. Wilfried Holzke,
Bremen

Nr. 421

Entwicklung eines
Messsystems für
Feldmessungen in
Windenergieanlagen
und echtzeitfähige
Implementierung eines
Lebensdauermodells zur
Zustandsüberwachung
von Leistungshalbleitern



Berichte des Instituts für elektrische
Antriebe, Leistungselektronik und
Bauelemente der Universität Bremen

Holzke, Wilfried

Entwicklung eines Messsystems für Feldmessungen in Windenergieanlagen und echtzeitfähige Implementierung eines Lebensdauermodells zur Zustandsüberwachung von Leistungshalbleitern

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 421. Düsseldorf: VDI Verlag 2020.

160 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen.

ISBN 978-3-18-342121-3, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Für die Dokumentation: Messsystem – Langzeitmessung – Auswertung – Windenergieanlage – Leistungshalbleiter – Lebensdauer – Zustandsüberwachung

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Bereich der Messtechnik für Windenergieanlagen und der Zustandsüberwachung von in Frequenzumrichtern eingesetzten Leistungshalbleitern. Sie befasst sich mit der Entwicklung eines Messsystems, welches in eine Datenerfassungs- und eine Datenablageeinheit aufgeteilt ist, wobei beide Einheiten über einen Feldbus verbunden sind. Mit dem Messsystem können Langzeitaufzeichnungen durchgeführt werden, wobei Spannung, Strom, Temperatur und Feuchte mit unterschiedlichen Abtastraten erfasst werden können. Die erhobenen Messdaten werden hinsichtlich der Betriebsbedingungen der Leistungshalbleiter ausgewertet. Weiterhin wird ein Modell zur Abschätzung der Restlebensdauer echtzeitfähig implementiert. Das Modell berücksichtigt sowohl thermomechanische als auch elektrochemische Effekte. Mit der Implementierung des Modells wird das Messsystem zu einem Zustandsüberwachungssystem erweitert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.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 www.dnb.de.

Dissertation Universität Bremen

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2020

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 978-3-18-342121-3

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) der Universität Bremen.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Bernd Orlik für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen im Rahmen meiner Promotion danken. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Darüber hinaus danke ich für das Vertrauen und die Möglichkeit, viele interessante Projekte am Institut bearbeiten zu können, was ebenfalls zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Meinem Korreferenten Herrn Professor Dr.-Ing. Jan Wenske danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die nützlichen Hinweise.

Frau Professorin Dr.-Ing. Johanna Myrzik und Herrn Professor Dr.-Ing. Nando Kaminski danke ich ebenfalls für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme der Prüfertätigkeit.

Für die stets gute Zusammenarbeit danke ich allen Kolleginnen und Kollegen sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IALB, des Bremer Centrums für Mechatronik (BCM), der Firma Breuer-Motoren, der Firma Deutsche Windguard sowie des Fraunhofer-Instituts für Windenergiesysteme (IWES).

Mein Dank gilt zudem den zahlreichen Studierenden, die ich im Rahmen ihrer verschiedenen Arbeitsvorhaben betreuen durfte, welche mit ihrem engagierten Arbeitseinsatz ebenfalls einen Beitrag geleistet haben.

Im Besonderen danke ich Herrn Dr.-Ing. Matthias Joost für die gute Zusammenarbeit in zahlreichen Forschungsprojekten und die Möglichkeit auf sein großes Wissen beispielsweise im Bereich der Modellbildung und Regelungstechnik zurückgreifen zu dürfen.

Herrn Dr.-Ing. Holger Raffel danke ich für die stets gute Zusammenarbeit beim Bearbeiten verschiedener Forschungsprojekte, deren Ergebnisse ebenso einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Guido Schwerdtfeger danke ich für die Unterstützung beim Aufbau der Messsysteme und bei der Wartung der Datenablage-systeme.

Bei Frau Elke Krüger möchte ich mich für die Unterstützung bei jeglichen Verwaltungsaufgaben und das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

Herrn Dipl.-Ing. Steffen Menzel danke ich für die vielen fachübergreifenden Diskussionen und seine Hilfsbereitschaft.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie für die Zeit und die Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung und Technik	3
3 Aufbau von Windenergieanlagen und Windparks	9
4 Allgemeines Messkonzept	18
4.1 Messpunkte an einer WEA	19
4.1.1 Messverfahren	21
4.2 Anforderungen an das Messsystem	27
5 Aufbau des Messsystems	29
5.1 Hardware	30
5.1.1 Analog/Digital-Umsetzer	31
5.1.2 Digitaler Signalprozessor und Mikrorechnerkarte	32
5.1.3 EtherCAT-Feldbus und Interface	33
5.1.4 Kommunikationszeiten	35
5.1.5 FPGA basierte Messwerterfassung	36
5.1.6 Industrie-PC	39
5.2 Software	39
5.2.1 Software für den digitalen Signalprozessor	41
5.2.2 Betriebssystem und Echtzeiterweiterung für den Industrie-PC	43
5.2.3 EtherCAT-Master und Konfiguration	44
5.2.4 Kommunikationsmodul und Echtzeitaufgabe	45
5.2.5 Synchronisierung der Kommunikation	45
5.2.6 Programm zur Datenablage und Datenformate	51
5.3 Automatisiertes Starten und Stoppen	53

5.4	Fernwartung	53
6	Planung und Durchführung der Feldmessung	55
6.1	Begehung des Windparks und einer Windenergieanlage	55
6.2	Auswahl von spezifischen Messpunkten	56
6.3	Anpassung des Allgemeinen Messkonzeptes	57
6.3.1	Auswahl der Messmittel	60
6.4	Integration der Komponenten in einen Schaltschrank	62
6.5	Installation der Messsysteme in den WEA	63
6.6	Aufzeichnung der Messdaten und Datenablage	65
7	Auswertung der Messdaten und Modellbildung	66
7.1	Auswertung der Messdaten	66
7.1.1	Spannung und Strom	66
7.1.2	Temperatur und Feuchte	77
7.1.3	Blitzereignisse	83
7.2	Modellbildung	84
7.2.1	Modellierung des Verhaltens einer WEA am Netz	84
7.2.2	Simulation des thermischen Verhaltens der IGBTs	88
7.2.3	Nutzung eines Rechnernetzes zur verteilten Simulation eines Windparks	98
8	Modellbasierte Zustandsüberwachung	103
8.1	Beschreibung des Modells	103
8.1.1	Berechnung des Lebensdauerconsums	104
8.1.2	Ermittlung der Schaltereignisse	108
8.1.3	Berechnung der Schaltverluste	109
8.1.4	Berechnung des thermischen Modells	109
8.1.5	Bestimmung der Temperaturzyklen	110
8.2	Umsetzung und Integration der Zustandsüberwachung	114
8.2.1	Implementierung auf dem Messsystem	114

8.2.2	Implementierung auf der Steuerung eines Frequenzumrichters	118
8.3	Einsatz- und Integrationsmöglichkeiten	119
9	Zusammenfassung & Ausblick	122
10	Literaturverzeichnis	125
10.1	Fachliteratur	125
10.2	Datenblätter	144
10.3	Software	145
	Änderungen	146

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzung		Einheit
A	Querschnittsfläche Anpassungskonstante der Arrhenius-Gleichung	m ²
C	Kapazität	F
C _{th}	Thermische Kapazität	J/K
C _{Tn}	Thermische Kapazität Nr. n	J/K
C _{ZK}	Zwischenkreiskapazität	F
C _{ZK1}	Zwischenkreiskapazität 1	F
C _{ZK2}	Zwischenkreiskapazität 2	F
D	Diode	
E _A	Aktivierungsenergie	J
E _{V,Schalt}	Verlustenergie beim Schalten eines IGBT	J
E _{th}	Wärmeenergie	J
I	Strom	A
I _c	Kollektor-Strom	A
I _{Eff}	Effektivwert eines Stromes	A
I _N	Netzstrom	A
I _{MW_N}	Mittelwert eines Stromes über folgende Werte	A
I _{MW_V}	Mittelwert eines Stromes über vorausgehende Werte	A
I _{N1}	Strom der Phase 1	A
I _{N2}	Strom der Phase 2	A
I _{N3}	Strom der Phase 3	A
I _{Rn}	Rotorstrom Nr. n	A
I _{str}	Strangstrom	A
I _{V_N}	Varianz gemittelt über folgende Werte	
I _{V_V}	Varianz gemittelt über vorausgehende Werte	
I _n	Strom Nr. n	
I(s)	Strom im Laplace-Bereich	A

L	Induktivität	H
	Lebensdauer eines Bauelements	s
L_n	Induktivität Nr. n	H
	Lebensdauerverbrauch Nr. n	
L_D	Induktivität für den Hochsetzbetrieb	H
L_L	Lastinduktivität	H
L_N	Netzinduktivität	H
L_V	Lebensdauerverbrauch	
$L_{V_{ges}}$	Gesamtlebensdauerverbrauch	
N	Anzahl, beispielsweise Windungen einer Spule	
N_f	Zyklen bis zum Versagen eines Bauteils	
P	Wirkleistung	W
P_V	Verlustleistung	W
P_{VD}	Verlustleistung einer Diode	W
P_{VT}	Verlustleistung eines Transistors	W
$P_{V,Leit}$	Durchlassverluste	W
$P_{V,Schalt}$	Schaltverluste	W
R_L	Lastwiderstand	Ω
R_n	Widerstand Nr. n	Ω
R_{th}	Thermischer Widerstand	K/W
R_{Tn}	Thermischer Widerstand Nr. n	K/W
RH	relative Feuchte	%
RH_n	relative Feuchte Nr. n	%
RH_U	relative Feuchte im Schaltschrank	%
RH_{Ref}	Referenzwert einer relativen Feuchte	%
$RH[k]$	Abtastwert einer relativen Feuchte	%
S	Schalter	
$S_{m,n}$	IGBT Nr. n des Stromrichters Nr. m	

Formelzeichen und Abkürzungen

T	Temperatur	°C
	absolute Temperatur	K
	Periodendauer	s
T_a	Abtastzeit	s
T_{Dn}	Temperatur der Schicht Nr. n einer Diode	°C
T_{Tn}	Temperatur der Schicht Nr. n eines Transistors	°C
T_J	Temperatur der Sperrschicht eines Halbleiters	°C
$T_{J,M}$	Mittelwert der Temperaturen $T_{J,min}$ und $T_{J,max}$	°C
$T_{J,max}$	maximale Temperatur	°C
$T_{J,min}$	minimale Temperatur	°C
T_K	Temperatur eines Kühlkörpers	°C
T_n	Temperatur Nr. n	°C
T_U	Umgebungstemperatur im Schaltschrank	°C
T_W	Temperatur außerhalb der WEA	°C
$T_R(\rho)$	Rotationsmatrix	
T_1	Temperatur 1	°C
T_2	Temperatur 2	°C
T_{Ref}	Temperaturreferenzwert	°C
$T[k]$	Abtastwert einer Temperatur	°C
U	Spannung	V
U_A	Ausgangsspannung eines Messverstärkers	V
$U_{A,max}$	Maximale Ausgangsspannung eines Messverstärkers	V
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung	V
U_E	Eingangsspannung eines Messverstärkers	V
U_{E1}	Eingangsspannung 1 eines Messverstärkers	V
U_{E2}	Eingangsspannung 2 eines Messverstärkers	V
U_{Eff}	Effektivwert einer Spannung	V
$U_{F,n}$	Feldspannung Nr. n	V
U_i	induzierte Spannung	V
U_n	Spannung Nr. n	V
U_N	Netzspannung	V
U_{12}	verkettete Spannung zwischen den Leitern 1 und 2	V
U_{23}	verkettete Spannung zwischen den Leitern 2 und 3	V

U_{31}	verkettete Spannung zwischen den Leitern 3 und 1	V
U_{N12}	verkettete Netzspannung zwischen den Leitern 1 und 2	V
U_{N23}	verkettete Netzspannung zwischen den Leitern 2 und 3	V
U_{N31}	verkettete Netzspannung zwischen den Leitern 3 und 1	V
U_{Ref}	Spannungsreferenzwert	V
\underline{U}_s	Spannungsvektor	V
$U_{S,n}$	Generatorklemmenspannung Nr. n	V
U_{Str}	Strangspannung	V
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung an Kapazität C_{ZK}	V
U_{ZK1}	Teilzwischenkreisspannung an Kapazität C_{ZK1}	V
U_{ZK2}	Teilzwischenkreisspannung an Kapazität C_{ZK2}	V
U_α	Komponente des Spannungsvektors \underline{U}_s	V
U_β	Komponente des Spannungsvektors \underline{U}_s	V
U_d	Komponente des um einen Winkel gedrehten Vektors \underline{U}_s	V
U_q	Komponente des um einen Winkel gedrehten Vektors \underline{U}_s	V
$U(s)$	Spannung im Laplace-Bereich	V
$U[k]$	Abtastwert einer Spannung	V
V_N	Negatives Zwischenkreispotential	V
V_P	Positives Zwischenkreispotential	V
V_0	Neutralpunkt des Zwischenkreises	V
a_f	Beschleunigungsfaktor	
f	Frequenz	Hz
f_{A1}	Abtastfrequenz des DSP für Temperatur und Feuchte	Hz
f_{A2}	Abtastfrequenz des DSP für Spannung und Strom	Hz
f_{A3}	Abtastfrequenz des FPGA für Spannung und Strom	Hz
f_a	Abtastfrequenz	Hz
f_s	Signalfrequenz	Hz
f_b	Frequenz, bei der eine Begrenzung erfolgen muss	Hz
f_g	Grenzfrequenz eines Filters	Hz
k_B	Boltzmann-Konstante	J/K

m	Drehmoment	Nm
$m_{a,n}$	Antriebsmoment Nr. n	Nm
m_{Soll}	Solldrehmoment	Nm
n	Anzahl, beispielsweise Bitbreite eines Datenwortes	
t	Zeit	s
x, y	Anpassungskonstanten des Peck-Modells	
$u[k]$	Abtastwert einer Spannung	V
$u(t)$	Augenblickswert einer Spannung	V
α, β	Anpassungskonstanten des Coffin-Manson-Modells	
ΔT_J	Temperaturdifferenz	K
Δt	Zeitdifferenz	s
ω	Kreisfrequenz	s^{-1}
ω_N	Kreisfrequenz des elektrischen Netzes	s^{-1}
ω_0	Nennkreisfrequenz des elektrischen Netzes	s^{-1}
μ_0	magnetische Feldkonstante	$VsA^{-1}m^{-1}$
ρ	Winkel des elektrischen Netzes	°
Φ	Wärmestrom	W
ASM	Asynchronmaschine	
ASG	Asynchrongenerator	
ASIC	Anwendungsspezifische integrierte Schaltung	
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	
CMS	Condition Monitoring System	
CPU	Central Processing Unit	
CSV	Comma Separated Values	
DASG	Doppeltgespeister Asynchrongenerator	
DFÜ	Datenfernübertragung	
DSP	Digitaler Signalprozessor	
EESG	Elektrisch erregter Synchrongenerator	
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology	

ESI	EtherCAT Slave Information
ETG	EtherCAT Technology Group
FIFO	First In - First Out
FPGA	Field Programmable Gate Array
FU	Frequenzumrichter
GSM	Global Systems for Mobile Communications
HDD	Hard-Disk-Drive
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPC	Industrie-PC
ISR	Interrupt Service Routine
MMC	Multi-Modular-Converter
NAS	Network Attached Storage
NPC	Neutral Point Clamped
PC	Personal Computer
PCT	Power-Cycle-Test
PLC	Programmable Logic Controller
PMSG	permanent erregter Synchrongenerator
RAM	Random Access Memory
RIFF	Resource Interchange File Format
RMS	Root Mean Square
ROM	Read Only Memory
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPI	Serial Peripheral Interface
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SSD	Solid-State-Drive
SSH	Secure Shell
THB	Temperature-Humidity-Bias
TSEP	Temperature Sensitive Electrical Parameters
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
WEA	Windenergieanlage(n)

