

Beiträge aus der Elektrotechnik

**Chester Ditmanson**

**Development of a Distributed Control System  
for a Novel Modular Wind Turbine Drive**

 VOGT

Dresden 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the  
Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation  
„Development of a Distributed Control System for a Novel Modular Wind  
Turbine Drive“ von Chester Ditmanson überein.

© Jörg Vogt Verlag 2017  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-017-9

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)

Technische Universität Dresden

**Development of a Distributed Control System  
for a Novel Modular Wind Turbine Drive**

**MSc Chester Ditmanson**

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktoringenieurs**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Klaus Röbenack

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet

Prof. Dr.-Ing. habil. Mariusz Malinowski

Tag der Einreichung: 30. Januar 2017  
Tag der Verteidigung: 07. Juni 2017



# ABSTRACT

In this work, the development of an electronic control system for a novel, highly modular, direct-drive wind turbine power converter and generator system is presented. The novel system features a flux-switching permanent magnet generator and the converter is composed of up to 12 parallel-connected low-voltage back-to-back two-level voltage source converters. The developed control system should equip each converter module with a local control platform, and a central control platform should perform central coordination tasks, including a novel multilevel modulation scheme of the grid-side converters. Other requirements for the control system include a high grid-side control frequency (24 kHz), and use of 100BASE-TX Ethernet equipment for communications. The system should both support fault-tolerance of the converter modules and be itself fault tolerant. For fault tolerance, it was chosen to implement a second, redundant central control platform which can immediately assume control of the system if it detects a failure of the active one.

Solutions in the literature all feature a lower number of modules, or a lower required control frequency. Most literature focuses on the ring network topology for scalability, but the high latency in a ring network is not compatible with a high module number and, simultaneously, a high control frequency. The literature on using Ethernet as a converter-internal communications medium is also scarce, although Ethernet for industrial fieldbus and motion control systems is well established. However, the latter are not optimal for use within a converter, since the performance of these solutions is insufficient for a power electronics system regarding determinism, latency, and synchronization. Regarding the redundant central controller, no literature was found addressing this in the context of a multi-module converter.

A solution was proposed here with a novel, light-weight Ethernet protocol. The proposed protocol operates by each platform continually re-transmitting small 40 byte packets at intervals of 5  $\mu$ s to each directly connected communications partner. Advantages of this scheme include: low FPGA resource utilization, an inherent lost link watchdog capability, low latency, inherent communications reliability, and support for a novel synchronization scheme.

An in-depth analysis of synchronization among control platforms and the derivation of the novel synchronization scheme are another important contribution of this work. The novel synchronization scheme exploits the periodic transmission

of the Ethernet packets to communicate timing information; the scheme limits synchronization error to 50 ns. Results of extensive testing are shown which verify that this synchronization error is always maintained, even after fail-over events to the redundant central controller.

The proposed solution was demonstrated to successfully control a 500 kW and a 3 MW test stand. It was demonstrated how the system continues operation without pause for failures of the active central controller or of local controllers or modules. The methods presented, as well as the analysis on synchronization, could be useful for other power electronics systems with distributed controllers.

# KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wird die Entwicklung einer Anstauerelektronik für einen neuartigen Antrieb inklusive Generator sowie Umrichter für eine direktangetriebene Windenergieanlage vorgestellt. Der neuartige Antrieb besteht aus einem Flusschalt-Permanentmagnet-Generator und einem modularen Umrichter, der aus einer Parallelschaltung von bis zu 12 Niederspannungs-Zweipunktstromrichtern in *back-to-back*-Konfiguration am Gleichspannungszwischenkreis zusammengesetzt wird. Die zu entwickelnde Anstauerelektronik sollte jedes Umrichtermodul mit einer lokalen Controlplattform (Lokalcontrol) ausstatten, während eine zentrale Controlplattform (Zentralcontrol) gemeinsame Funktionen, unter anderem ein neuartiges Mehrpunktmodulationsverfahren für die Netzseiten der Umrichtermodule, ausführt. Wichtige weitere Anforderungen für die Anstauerelektronik waren: Eine hohe netzseitige Regeltaktfrequenz (24 kHz) und die Verwendung von 100BASE-TX-Ethernet-Hardwarekomponenten für die Kommunikation. Das System sollte die Fehlertoleranz der Umrichtermodule unterstützen und auch selbst Fehlertoleranz aufweisen. Diesbezüglich wurde entschieden, eine zweite redundante zentrale Controlplattform einzusetzen, die sofort die Ansteuerung des Systemes übernimmt sobald ein Ausfall der aktiven Zentralcontrol detektiert wird.

Die Lösungen aus der Literatur weisen entweder eine kleinere Anzahl von Umrichtermodulen oder eine niedrigere Regeltaktfrequenz auf. Die meisten Quellen beschränken sich auf die ringförmige Netzwerktopologie, weil diese bezüglich der Modulanzahl gut skaliert, wobei aber die Latenzzeit anwächst. Die hohe Modulanzahl und die gleichzeitige Forderung einer hohen Regeltaktfrequenz ist mit der steigenden Latenzzeit der Ringtopologie nicht kompatibel. Man findet nur wenige Literaturquellen über Ethernet als umrichterinternes Kommunikationsmedium, während Ethernet für industrielle Feldbusse und Bewegungssteuerungen sehr etabliert ist. Letzteres ist jedoch für die Verwendung innerhalb eines Umrichters nicht optimal, denn die Eigenschaften solcher Lösungen genügen nicht den Anforderungen leistungselektronischer Systeme bezüglich Determinismus, Latenzzeit und Synchronisation. Hinsichtlich der redundanten Zentralcontrol wurde keine Literatur gefunden, welche diesbezüglich einen aus vielen Modulen bestehenden Umrichter behandelt.

Diese Arbeit stellt ein neuartiges vereinfachtes Ethernetprotokoll vor, um die Anforderungen zu erfüllen. Das neue Protokoll funktioniert so, dass jede Con-

troplattform ständig kleine Datenpakete mit 40 byte Nutzdaten in Intervallen von  $5\mu\text{s}$  an jeden direktverbundenen Kommunikationspartner verschickt. Einige Vorteile dieses Verfahrens sind der geringe Bedarf an FPGA-Ressourcen, die eingebaute Detektionsfähigkeit für Verbindungsausfälle, eine niedrige Latenzzeit und die hohe Zuverlässigkeit sowie die Unterstützung einer neuen Synchronisationsmethode.

Eine ausführliche Erörterung der Synchronisation von Controlplattformen und die Ableitung und Umsetzung der neuen Synchronisationsmethode machen einen weiteren Beitrag dieser Arbeit aus. Die neue Synchronisationsmethode nutzt die periodische Übertragung der Ethernetpakete um eine Zeitbasis zu kommunizieren. Der Synchronisationsfehler wird durch die neue Methode auf 50 ns begrenzt. Die Ergebnisse ausführlicher Prüfungen zeigen, dass dieser Synchronisationsfehler immer eingehalten wird, auch nachdem die redundante Zentralcontrol nach einem Fehler der aktiven Einheit die Kontrolle übernimmt.

Es wird gezeigt, dass die vorgestellte Lösung eine 500 kW sowie eine 3 MW Teststand betreiben kann. Abschließend wird vorgestellt, wie das System den Betrieb ohne Pause fortsetzt und zwar bei Ausfällen der aktiven Zentralcontrol, der Lokalcontrol oder der Umrichtermodule. Die vorgestellten Methoden sowie die Analyse der Synchronisation können auf andere leistungselektronische Systeme mit verteilter Ansteuerelektronik übertragen werden.



# ACKNOWLEDGMENTS

This dissertation has been an endeavor which many people have enabled by means of their direct and/or moral support.

I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet for his guidance, helpful discussions, as well as for acting as architect of the collaboration which gave rise to this work. Also, my gratitude goes to both Dr. Jens Weber and Dr. Rodrigo Alvarez for their work as my academic advisors. Thanks also to Prof. Dr. Ing. habil. Mariusz Malinowski for conducting a review and to the other members of board of examiners of the PhD commission: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Klaus Röbenack (Chairman) and Prof. Dr. Ing. habil. Leon Urbas.

Many thanks to Peter Hein, the founder of Venpower GmbH (called PM Generators at the time of founding), and mastermind behind the novel FSPM generator design, and without whom none of this work would have been possible.

Thanks also to my colleague Nils Larsen, my closest work partner and confidant during the course of this work. Having sat across from each other, at opposing desks, for over half a decade now, I am continually amazed by his integrity, dedication, and great capacity for analytical thinking.

My gratitude also goes to the colleagues of Venpower for their hard work invested into the engineering, construction, and operation of the generators, converters, and test stands which contributed greatly to this dissertation.

I would like to express my appreciation to Stefan Kolb; without his insightful advice as well as the hard work of his team at Enasys, this dissertation would not have reached its full potential.

Of course, much gratitude goes to my dear family: Stephanie Lüning and my son Henry. Many thanks to them for their love and support during this strenuous PhD pursuit!

My parents started it all by calling me forth into this world, for which no words of thanks can ever truly suffice! Furthermore, I am very grateful for their continual support and encouragement during this challenging venture.

A special 'Thank You' to Prof. Dr.-Ing. habil. Henry Güldner and Dr. Martin Rentzsch, both instrumental for the completion of my M.Sc. degree at the

## *Acknowledgments*

TU Dresden during my “early years” in Germany.

A particularly hearty and jovial Thanks! to Dr. Michael Grieger, for his friendship, kindness, support, and for providing me with critical tutelage regarding the German culture.

A big thanks to my friends Markus Klar and Sunny Klar-Ho (and family) as well as Heike Hertzschuch for their friendship, and also for their kind engagement on the babysitting front!

Thank you also to my colleagues at the Chair of Power Electronics of the TU Dresden for the helpful discussions, advice, insights, and for fostering a generally pleasant working atmosphere. In particular, thanks to Sebastian Rojas for his intense collaboration on the project at hand (grid-side control ninja). A shout-out also goes to the Görgebros for your exuberant, mustachioed fundraising efforts annually in November.

Last but not least, this work would not have been possible without the financial support of the shareholders of Venpower GmbH, as well as funding grants from the European Regional Development Fund, the State of Brandenburg, and the Federal Republic of Germany. Thanks also to Jacobs PowerTec GmbH for the productive cooperation on this project, as well as to Fraunhofer IWES for the cooperation on testing of the 3 MW prototype.

for Henry



# TABLE OF CONTENTS

Abstract	v
Kurzfassung	vii
Acknowledgments	ix
Nomenclature	xvii
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Structure of Dissertation . . . . .	3
1.3. Existing Project-related Publications . . . . .	4
<b>2. Background and State of the Art</b>	<b>5</b>
2.1. Turbine Drivetrain Technology . . . . .	5
2.1.1. Grid Codes . . . . .	6
2.2. Modular Drivetrains for High-Power Offshore . . . . .	7
2.3. Description of Modular Drive System . . . . .	10
2.3.1. Segmented Flux-Switching Permanent Magnet Generator	10
2.3.2. Modular Parallel Multilevel Converter . . . . .	13
2.4. Requirements for the Control System . . . . .	15
2.4.1. Hardware Architecture, Structure, and Hierarchy . . . . .	15
2.4.2. Software and Functionality . . . . .	18
2.4.3. Generator-Side Controller . . . . .	19
2.4.4. Grid-Side Controller . . . . .	19
2.4.5. Multilevel Modulation . . . . .	21
2.4.6. Control Cycle Timing . . . . .	22
2.4.7. Other Requirements for the Control System . . . . .	23
2.5. State of the Art in Modular Converter Control . . . . .	24
2.5.1. Distributed Controllers for PEBBs . . . . .	24
2.5.2. Distributed Controllers for Distributed Converters . . . . .	25
2.5.3. Limits of Existing Solutions . . . . .	26
<b>3. Control System Design</b>	<b>27</b>
3.1. Communications Medium . . . . .	27

## Table of Contents

3.2.	Communications Protocol . . . . .	30
3.2.1.	Internet Protocol Suite . . . . .	31
3.2.2.	EtherCAT . . . . .	34
3.2.3.	New Protocol . . . . .	34
3.3.	Network Topology . . . . .	39
3.3.1.	Ring Topology . . . . .	39
3.3.2.	Star Topology . . . . .	41
3.3.3.	Network Topology Summary . . . . .	41
3.4.	Failures and Fault Tolerance . . . . .	44
3.4.1.	Motivation . . . . .	44
3.4.2.	Failure of CENTRAL C1 . . . . .	45
3.4.3.	Failure of a LOCAL Lx . . . . .	48
3.4.4.	Communications Failure C1 - C2 . . . . .	49
3.4.5.	Communication Failure C1 - Lx . . . . .	49
<b>4.</b>	<b>Synchronization</b> . . . . .	<b>51</b>
4.1.	Introduction to Synchronization . . . . .	51
4.1.1.	Timeline Synchronization . . . . .	54
4.1.2.	Cyclical Synchronization . . . . .	56
4.2.	Determining Synchronization Requirements . . . . .	57
4.2.1.	Reduction of Maximum Control Frequency . . . . .	58
4.2.2.	Increased Distortion of the IGBT Gate Pulse Timing . . . . .	60
4.3.	State of the Art in Synchronization Methods for Ethernet . . . . .	62
4.3.1.	Precision Time Protocol IEEE 1588 . . . . .	62
4.3.2.	Synchronous Ethernet . . . . .	63
4.3.3.	EtherCAT . . . . .	64
4.4.	New Synchronization Method . . . . .	65
4.4.1.	General Scheme for Regularly Transmitted Packets . . . . .	65
4.4.2.	Synchronized Modulator Counters . . . . .	69
4.4.3.	Maintaining Synchronization During Failures . . . . .	70
4.4.4.	FPGA Resource Utilization . . . . .	73
<b>5.</b>	<b>Experimental Verification</b> . . . . .	<b>75</b>
5.1.	Implementation of Control Platforms . . . . .	75
5.1.1.	Central Controller . . . . .	75
5.1.2.	Local Controller . . . . .	77
5.1.3.	Control Platforms in the System . . . . .	78
5.2.	500kW Test Stand . . . . .	80
5.2.1.	Steady-state Operation . . . . .	81
5.2.2.	Reaction to Module Failures . . . . .	82
5.2.3.	Reaction to CENTRAL Failures . . . . .	83
5.3.	3MW Test Stand . . . . .	86
5.3.1.	Rated Power Test . . . . .	86
5.3.2.	LVRT Test . . . . .	94
5.4.	Synchronization Tests . . . . .	97
5.4.1.	Verifying Synchronization with an Oscilloscope . . . . .	98
5.4.2.	Automated Measurement of Synchronization . . . . .	100
5.4.3.	Measuring Oscillator Frequency Deviation . . . . .	102

5.4.4. Effects of Increased Synchronization Error . . . . .	104
<b>6. Conclusion</b>	<b>111</b>
<b>A. Appendix</b>	<b>115</b>
A.1. Improved Energy Harvest of Modular Wind Turbine . . . . .	115
A.2. FPGA Resource Utilization Comparison: New Protocol Vs. Ether- CAT IP Core . . . . .	117
A.3. Definitions of Terms . . . . .	121
<b>Bibliography</b>	<b>130</b>
<b>About the Author</b>	<b>131</b>