Thyristor-Based High-Power On-Load Tap Changers
—
Control under Harsh Load Conditions

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Stefan P. Engel
aus Lebach

Berichter:
Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h. c. Rik W. De Doncker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler

Tag der mündlichen Prüfung: 24. November 2016

Stefan P. Engel

Thyristor-Based High-Power On-Load Tap Changers

Control under Harsh Load Conditions

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

AACHENER BEITRÄGE DES ISEA

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker
Leiter des Instituts für Stromrichtertechnik und
Elektrische Antriebe der RWTH Aachen (ISEA)
52056 Aachen

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4986-2
ISSN 1437-675X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Die Arbeit befasst sich mit thyristorbasierten Stufenschaltern für Transformatoren und deren Regelung bei verzerrten Lastströmen und gestörten Spannungen.

Bei meiner Arbeit haben mich viele liebe Menschen direkt oder indirekt unterstützt, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte.

Für die Betreuung und Unterstützung meiner Arbeit möchte ich mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater Professor Rik W. De Doncker bedanken, insbesondere vor dem Hintergrund, dass momentan alles in Richtung DC zu gehen scheint. Ihm als Institutsleiter gilt auch mein Dank für die vielseitigen, spannenden und herausfordernden Aufgaben, an denen ich während der letzten Jahre arbeiten und wachsen durfte.

Herrn Professor Armin Schnettler danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats und das der Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Die Arbeit ist im Rahmen eines Projektes mit der AixControl GmbH und der Maschinenfabrik Reinhausen (MR) entstanden. Ein großer Dank geht an das AixControl-Team, das entscheidend zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat, allen voran Jochen von Bloh und Stephan Thomas. Stephan danke ich außerdem für die wertvollen Anmerkungen beim Korrekturlesen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. Karsten Viereck und Andrey Gavrilov von MR für die ausgezeichnete Zusammenarbeit bedanken.

Allen ISEAnern gilt mein Dank für die ausgesprochen angenehme Arbeitsatmosphäre am Institut. Ein besonderer Dank geht an Nils Soltau für die gemeinsamen Arbeiten an unseren Veröffentlichungen, und an meine langjährigen Bürokollegen Thomas Butschen, Marco Stieneker und Hauke van Hoek für die fachlichen Diskussionen, die gute Gemeinschaft und so manchen erheiternden Moment.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mich immer unterstützt und gefördert haben, und die dadurch den entscheidenden Grundstein für diese Arbeit gelegt haben. Zu guter Letzt möchte ich von Herzen meiner lieben Frau Agnethe für ihre Liebe und ihre uneingeschränkte Unterstützung danken.

Aachen, im Dezember 2016 *Stefan Engel*

Abstract

Photo-voltaic installations and wind farms are erected faster than network extension can be realized. Furthermore, the volatile nature of these renewable power sources leads to increased voltage fluctuations in the connected medium-voltage and low-voltage ac grids. Mechanical on-load tap changers are widely used to keep the voltage in these grids within prescribed limits. However, mechanical on-load tap changers are not designed for the high number of switching cycles that are required in grids that have high capacity on volatile sources. Their contacts can only handle a limited number of switching actions during their lifetime.

This thesis investigates fully electronic on-load tap changers that are capable of switching extremely fast and that exhibit virtually no wear due to switching actions.

In the first part of the thesis, topologies of classical mechanical and modern solid-state on-load tap changers are reviewed and their operation principles are outlined. Different types of switching cells and configurations of solid-state on-load tap changers are compared. It is shown that modularized topologies tend to have a lower number of solid state switches and taps and that the required blocking voltage of the switches is lower compared to less modular topologies.

Different semiconductor switching devices are briefly discussed and the choice for the thyristor, which features a high current capability and low losses at a reasonable cost, is motivated. An anti-parallel connection of two thyristors is used to obtain a bidirectional ac switch.

A generalized approach for the control of the commutation process is elaborated in the second part of the thesis. The complex switching process is outlined for different load cases with ideal voltage and current waveforms and a simplified model of the transformer winding. A generalized control approach is developed that reduces all possible commutations to two basic commutation processes.

In the third part, disturbances of load current and grid voltage are investigated. The disturbances that can be expected during operation are derived based on relevant standards and application-specific conditions. Furthermore, the influence of the transfer characteristics of the transformer with focus on the cross coupling of the windings is studied. Successively, a robust control is developed. The new control scheme uses separate gate trigger signals for each thyristor of a bidirectional thyristor pair. Thereby, safe commutation at highly disturbed load currents is achieved. Robustness against voltage disturbances is accomplished by a new zero crossing predictor for the grid voltage. Undesired short-circuits from tap to tap during commutation are avoided effectively. Consequently, the stress on the switching elements is reduced significantly.

Based on the previous investigations, design rules for thyristor-based tap changers and the corresponding transformers are derived.

A detailed simulation model of transformer and tap changer is synthesized in the last part of the thesis. The model is exemplary verified using a low-power experimental setup of a 9-step prototype tap changer. The simulation is used to comprehensively test the developed control under highly disturbed load conditions. Basic switching tests are performed on a 27-step prototype with a nominal regulating range of $\pm 7600\,\mathrm{V}$ and a current capability of $950\,\mathrm{A}$.

Contents