Analyse und Simulation des Temperatureinflusses auf einen optischen Spannungswandler

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
der
Brandenburgischen Technischen Universität genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von
Dipl.-Ing. Maik Honscha
geboren am 30.08.1970
in Altdöbern

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Pfeiffer
Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2010

Berichte aus der Elektrotechnik

Maik Honscha

Analyse und Simulation des Temperatureinflusses auf einen optischen Spannungswandler

Shaker Verlag
Aachen 2010

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

Zugl.: Cottbus, BTU, Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9622-3
ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als technischer Angestellter und später als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

In erster Linie gilt meinen Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz, der mich für die Thematik gewinnen und begeistern konnte, für seine Anregungen und die kontinuierliche Betreuung der Arbeit.
Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Pfeiffer danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und für die Übernahme des zweiten Gutachtens.
Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss bedanken.

Ich danke allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die Unterstützung, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) Holger Häusler für die Ratschläge in vielen technischen und messtechnischen Details und der vielen konstruktiven Ideen und Kritiken, die zum Gelingen der Untersuchungen beigetragen haben. Herrn Dipl.-Ing. (FH) Alexander Feige danke ich für die Zuarbeiten im Bereich der Optoelektronik und Datenerfassung, ohne die eine Durchführung der Forschungsarbeiten nicht möglich gewesen wäre.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meiner Lebensgefährtin Angela für das Verständnis und die Unterstützung, die sie meiner Arbeit entgegenbrachte und damit an deren Gelingen einen deutlichen Anteil hat.

Maik Honscha
Cottbus, im Juli 2010

Kurzfassung

Gegenüber konventionellen Messverfahren bieten Verfahren zur optischen Messung hoher Spannungen Vorteile hinsichtlich der elektrischen Verträglichkeit, Betriebssicherheit, Umweltverträglichkeit und Diagnosemöglichkeiten wie z.B. das Online-Monitoring. Besonders bei sehr hohen Spannungsebenen sinkt der Isolationsaufwand im Vergleich zu konventionellen Produkten, wodurch die Herstellungskosten wettbewerbsfähig werden können.

Allerdings wirkt auf den optischen Spannungswandler nicht nur die Nutzgröße „elektrische Feldstärke“, sondern auch Störgrößen wie Temperatur, mechanische Einflüsse und Störfelder, die die Genauigkeit derartiger Wandler negativ verändern.

Das Messprinzip des in dieser Arbeit vorgestellten optischen Wandlers beruht auf dem Pockels-Effekt, wobei eine Anzahl von Sensorkristallen aus Bismutgermanat ($Bi_4Ge_3O_{12}$) zwischen der Hochspannungs- und der Erdelektrode die auf sie wirkenden Feldstärken aufsummiert und damit eine optische Quasi-Integration der elektrischen Feldstärke durchführt.

Im Fokus dieser Arbeit steht, wie sich die Störgröße Temperatur mittelbar und unmittelbar auf die Genauigkeit des optischen 123kV-Spannungswandlers auswirkt. Anhand von Feldrechnungen wird aufgezeigt, wie sich die Feldstärken in den relevanten Bereichen ändern, wenn sich die Permittivität des die Sensorkristalle umgebenden Isolierstoffes temperaturbedingt ändert. Der unmittelbare Temperatureinfluss auf die passiven optischen Komponenten Verzögerungsplatte, Polarisatoren und Sensorkristall wird experimentell ermittelt.

Ausführliche Untersuchungen an Lichtquellen, Lichtwellenleitern und Kollimatoren dienen dazu, eine optimale Lösung für die Auslegung des Sensoraktivteils zu finden mit dem Ziel, einen hohen Anteil an auswertbarer optischer Leistung mit sehr geringem Rauschanteil zu erhalten.

Durch die sorgfältige Auswahl der optischen Komponenten und Isolierstoffe sowie deren mechanisch spannungsfreier Fixierung kann der verbleibende Temperaturfehler mittels einfacher Temperaturkompensation durch Mittelwertbildung auf ±0,5 % reduziert werden. Temperaturtests in der Klimakammer verifizieren die in den Feldrechnungen erhaltenen Ergebnisse.

Einjährige Feldttests in Verteilnetzen von regionalen Energieversorgern dienen zur Überprüfung der Langzeitstabilität.

Analysis and simulation of temperature dependence on an optical voltage transformer

Abstract

Compared with conventional measuring systems, methods for optical measuring of high voltages offer advantages regarding electromagnetic compatibility, operating safety, environmental sustainability and diagnostic possibilities like online monitoring. Especially at very high voltage levels the insulation effort is reduced in comparison to conventional products. That's why the production costs for optical instrument transformers can be competitive at very high voltage levels first.

However, not only the desired parameter "electric field strength" is acting on the optical voltage transformer, but also unwanted parameters like temperature, mechanical influences and field disturbances which can decrease the accuracy of such instrument transformers.

The measurement principle of the optical transducer presented in this work is based on the Pockels effect, whereby a number of sensor crystals of Bismuthgermanat ($Bi_4Ge_3O_{12}$) between the high voltage electrode and the earth electrode summing up the acting field strengths and thus performing a quasi-optical integration of the electric field.

The focus of this work is to research the direct and indirect impact of the parameter temperature on the accuracy of the optical 123kV voltage transformer.

Based on field calculation is shown how the field strengths in the relevant regions is changing, if the permittivity of the insulating material surrounding the sensor crystals changes in case of temperature changing. The direct temperature influence on several passive optical components like wave plate, polarizer and sensor crystals is determined experimentally.

Detailed studies of light sources, optical fibers and collimators are used to find the optimal solution for the construction of the active sensor unit. The aim must be to achieve a high value of optical power with very slow noise.

By careful choice of the optical components and insulating materials and their fixation without any mechanical tension is it possible to reduce the temperature failure to ±0.5 %. This can be achieved by implementation of simple temperature compensation via averaging. Practical temperature test in climatic chamber verify the theoretical results, which were obtained from the field calculations.

Field test with a duration of more than 1 year, which were carried out in grids of regional energy utilities, are used to verify the long-term stability of optical voltage transformers.

Inhalt

1 EINLEITUNG 1

1.1 ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK 5

1.1.1 Einteilung nach physikalischen Wirkprinzipien 6

1.1.2 Einteilung nach der Art der Messung der elektrischen Feldstärke 9

1.1.3 Einteilung nach der Art der Auswertung der modulierten optischen Welle 13

1.2 ZIEL DER ARBEIT 16

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN 18

2.1 ELEKTROOPTISCHE MODULATION 18

2.2 PRAKTISCHER AUFBAU ZUR NUTZUNG DES LONGITUDINALEN ELEKTROOPTISCHEN EFFEKTES 21

2.3 EIGENSCHAFTEN VON ISOLIERSTOFFEN 25

2.3.1 Temperaturabhängigkeit der Permittivität 31

2.3.2 Polare und unpolare Kunststoffe 32

3 BETRACHTUNGEN ZUM ELEKTRISCHEN FELD 35

3.1 GRUNDLAGEN 35

3.2 RECHNERSIMULATION ZUR ERMITTLUNG DER ELEKTRISCHEN FELDSTÄRKE 36

3.3 ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE IN DEN SENSORKRISTALLEN 39

3.4 BESTIMMUNG DER PHASENVERZÖGERUNG ANHAND DER ERRECHNETEN FELDSTÄRKEN 46

4 OPTISCHE KOMPONENTEN UND IHRE AUSWAHLKRITERIEN 48

4.1 LICHTQUELLEN, LICHTWELLENLEITER UND KOLLIMATOREN 48

4.1.1 Einkopplungswirkungsgrad 49

4.1.2 Divergenz 52

4.1.3 Stabilität gegenüber Dejustagen 56

4.2 SENSORKRISTALLE 61

4.3 POLARISATOREN 63

4.4 λ/4-VERZÖGERUNGSPLATTE 65

4.5 STRAHLTEILER UND UMLENKPRISMEN 67

5 DER EINFLUSS DER TEMPERATUR AUF DAS VERHALTEN AUSGEWÄHLTER KOMPONENTEN 69

5.1 VERÄNDERUNG DER OPTISCHEN LEISTUNG IN DEN STECKVERBINDUNGEN 69

5.2 TEMPERATURVERHALTEN DER VERZÖGERUNGSPLATTE 72

5.3 TEMPERATURVERHALTEN DES POLARISATORS 76

5.4 TEMPERATURVERHALTEN DES SENSORMEDIUMS 77

6 KOMPENSATION DES TEMPERATUREINFLUSSES 80

6.1 KOMPENSATION ÜBER EIN LOOK – UP – TABLE 80

6.2 KOMPENSATION ÜBER MITTELWERTBILDUNG 86
6.3 OPTISCH – INTRINSISCHE KOMPENSATION 87
6.4 KOMPENSATION ÜBER FELDSTÄRKESTEUERUNG 89

7 PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN 90

7.1 UNTERSUCHUNGEN ZUM TEMPERATURVERHALTEN VON ISOLIERSTOFFEN 90
7.2 EINFLUSS DES TRÄGERMATERIALS AUF DAS TEMPERATURVERHALTEN DES SENSORAKTIVTEILS 92

8 VORSTELLUNG DES REALISIERTEN OPTISCHEN SPANNUNGSWANDLERS 100

8.1 SENSORAKTIVTEIL 100
8.2 EINSTELLUNG DES ARBEITSPUNKTES 104
8.3 OPTISCHE LEISTUNGSBILANZ DES SENSORAKTIVTEILS 104
8.4 ELEKTRONISCHE AUSWERTEEINHEIT 107

9 DARSTELLUNG DER WANDLERPERFORMANCE 109

9.1 ISOLATIONSFESTIGKEIT 109
9.2 BESTIMMUNG DES MODULATIONSGRADES 110
9.3 LINEARITÄT 111
9.4 TEMPERATURABHÄNGIGKEIT 113
9.5 LANGZEITSTABILITÄT 116
9.5.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus 116
9.5.2 Messergebnisse 119
9.5.3 Auswertung 121

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 125

11 ANHANG 129

12 LITERATURVERZEICHNIS 137

13 FORMEL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS 140