

Untersuchungen zur Strombelastbarkeit und Erwärmung von Hochstromanlagen

Von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades eines

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

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Tomasz Magier
geboren am 26.08.1975
in Nysa (Polen)

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing.	Steffen Großmann
	Prof. Dr.-Ing.	Gerhard Herold
	Dr.-Ing.	Thomas Schoenemann

Einreichung am:	19.12.2006
Rigorousum und Verteidigung am:	05.10.2007

Berichte aus der Energietechnik

Tomasz Magier

**Untersuchungen zur
Strombelastbarkeit und Erwärmung
von Hochstromanlagen**

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7577-8

ISSN 0945-0726

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 Dissertation entstand in den Jahren 2001 - 2006 während meiner Tätigkeit am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Helmut Löbl, der diese Arbeit angeregt hat, sie kontinuierlich betreute und mir immer wieder mit wertvollen Tipps sowie fachlichen Diskussionen zur Seite stand.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann möchte ich mich an dieser Stelle für seine wertvolle Unterstützung, die sehr guten Arbeitsbedingungen, die ich an seinem Institut hatte sowie für die Übernahme des Gutachtens herzlich bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Thomas Schoenemann, dem Leiter des Entwicklungsteams bei ABB Schweiz, danke ich für die Übernahme des Gutachtens sowie für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit seitens ABB Schweiz High Voltage Products.

Meinen Dank möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Herold für die bereitwillige Übernahme des Gutachtens aussprechen.

Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner, sowie bei allen früheren und jetzigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik für die gute Zusammenarbeit, die bereitwillige Hilfe und das ausgezeichnete Arbeitsklima bedanken.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern der Institutswerkstatt für die schnelle und fachgerechte Anfertigung meiner Versuchseinrichtungen sowie für die Hilfsbereitschaft, die ich ihrerseits erfahren habe.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Böhme für sein dauerhaftes Interesse und für seine wichtigen Hinweise zu meiner Arbeit bedanken.

Auch bei allen Studenten, die durch die Berechnungen und Auswertung der Messergebnisse an dieser Arbeit mitgewirkt haben, möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Ein herzlicher Dank möchte ich meiner Mutter aussprechen, die mir meine Ausbildung ermöglicht hat und wegen meines Auslandsaufenthaltes sich mit mir leider nur viel zu selten treffen und gemeinsam mit mir Zeit verbringen konnte.

Mein persönlicher Dank geht an meine Frau Ketsuda für das entgegengebrachte Verständnis sowie für ihre wertvolle Hilfe und Unterstützung.

Erlangen,

im August 2008

Tomasz Magier

Abstract

“Current carrying capacity and heating investigations of the high current devices for current transmission and distribution systems”

Current carrying equipment for power engineering is getting smaller and more compact in order to meet customer demands. In spite of small dimensions it should be able to carry still growing currents, which cause high current densities in the current carrying parts and therefore cause the high heating of these parts. Due to small dimensions the heat transfer from these devices is restricted too. To assure that the maximum temperature rise in the equipment parts doesn't exceed the allowed temperature rise fixed in the standards, temperatures in these parts should be calculated first, for instance with thermal networks. To achieve a good accuracy of the temperature calculation, the parameters as skin effect factor of the current path and of the enclosure, n_1 -, c_1 -factors of the affinity function $Nu = c_1(GrPr)^{n_1}$ for natural convection and n_2 -, c_2 -factors for the affinity function $Nu = c_2Re^{n_2}$ for forced convection must be known.

For this reason dependency investigations of the skin and proximity effect on the geometry of the current path and the enclosure of the Generator Circuit Breaker as well as on the geometry of the rectangular current bus bars have been carried out. In particular the influence of the enclosure, the dimensions of the current path, the phase shift between the current in the current path and in the enclosure, the influence of the different heat sink types on the current path, the temperature of the current paths and the current frequency on the skin effect of the current path and of the enclosure have been investigated. For rectangular bus bars of the three-phase current system the dimensions of the bus bar as well as its alignment and distance the other bus bars have been examined. The results of these investigations reveal parameters, which have the strongest influence on the skin effect in the current path. Another part of this work deals with heat transfer from the current path to the ambient air. The power losses produced in the current carrying parts are transferred through convection, radiation and conduction from these parts to the ambient. For better cooling effectiveness several heat sink types, for example on the parts of generator circuit breaker, can be used. To improve the accuracy of the temperature calculation with thermal networks, the n_1 - and c_1 -factors of the affinity function $Nu = c_1(GrPr)^{n_1}$

for natural convection, depending on the angle of the heat sink to the airflow have been determined experimentally. Another point of thermal investigation was the heat sink cooling with air, while the air was pre-warmed by other hot parts below the heat sink. This kind of interaction appears particularly in very compact devices and should therefore be investigated for the better accuracy of temperature calculation with thermal networks. Investigations have been carried out for different average temperatures of the heat plate, which was placed below the heat sink and for different heat sink positions to the airflow. Additionally the impact of the air stream detaining parts below the heat sink on the convective heat transfer from this heat sink by free convection was determined.

To improve the convective heat transfer from the current path to the ambient forced cooling of this path can be used. It allows transferring much more heat power from the current path and therefore higher current loads without exceeding its maximal allowed temperature rise. The effectiveness of the heat sink by the forced convection depends similar to the free convection on its alignment in the cooling air stream and on its design. The velocity of the cooling air and the bypass above and besides of the heat sink are relevant too. To investigate all these parameters two heat sink types (pin fin heat sink and fin heat sink) were investigated in different wind tunnels, with different positions to the air stream as well as with different velocities of the cooling air. For each heat sink the convective heat transfer coefficient α_{K0} and the c_2 -, n_2 -factors of the affinity function $Nu=c_2Re^{n_2}$ have been determined. The comparison between the values of the convective heat transfer coefficient α_{K0} shows which heat sink and which heat sinks positions in the air stream are particularly favorable for convective heat transfer from the heat sink.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Problemstellung.....	5
2.1	Wärmequellen.....	5
2.2	Wärmeübertragung.....	7
3	Erkenntnisstand.....	9
3.1	Wärmenetzmethode.....	9
3.1.1	Wärmequellen.....	10
3.1.2	Wärmewiderstände.....	17
3.1.3	Wärmekapazitäten.....	23
3.2	Ähnlichkeitstheorie.....	23
3.3	Statistische Versuchsplanung.....	31
4	Aufgabenstellung.....	33
5	Einfluss der Stromverdrängung auf die Wärmequellen der Strombahn.....	37
5.1	Analytische Untersuchungen zur Stromverdrängung (ANSYS).....	37
5.1.1	Unendlich langer Leiter - 2D Analyse.....	38
5.1.1.1	Einfache Geometrien - Verifizierung der Ergebnisse mit Angaben aus der Literatur.....	38
5.1.1.2	Verlustleistung und Stromverdrängung im Generator – Leistungsschalter.....	40
A)	Einpolig gekapselter Leiter.....	40
a)	Einpolig gekapselter Leiter – Einfluss der Kapsel.....	40
b)	Einpolig gekapselter Leiter – Einfluss der Leitergeometrie.....	45
c)	Einpolig gekapselter Leiter – Einfluss der Phasenverschiebung der Ströme zwischen Leiter und Kapsel.....	45
d)	Einpolig gekapselter Leiter – Einfluss des Deckels in der Kapsel des Schalters.....	46
B)	Drei einpolig gekapselte Leiter – Einfluss der Geometrie und der Stromsymmetrie.....	49
5.1.1.3	Stromschienenanordnungen im Drehstromsystem.....	55
5.1.2	Dreidimensionale Anordnungen – 3D Analyse.....	62
5.1.2.1	Einsatz von Kühlkörper am Leiter von Hochstrombahnen und deren Einfluss auf die Stromverdrängung.....	62
5.1.2.2	Radiale Ausrichtung der Kühlrippen am Leiter.....	64
A)	Generator – Leistungsschalter - Kühlrippen auf den Leiter angeschlossen (großer Schalter – GLS1).....	65
a)	Rippen über ganzen Umfang des Leiters verteilt.....	65
b)	Kühlrippen am Leiter des Generator-Leistungsschalters GLS1.....	67

c) Kühlrippen am Leiter des Generator-Leistungsschalters GLS2....	71
B) Generator – Leistungsschalter (kleiner Schalter - GLS3).....	75
a) Rippenkühlkörper an den Leiter angeschraubt.....	75
- Kühlkörper mit dem Leiter galvanisch verbunden.....	75
- Kühlkörper vom Leiter elektrisch isoliert.....	79
b) Kühlrippen an den Leiter angegossen.....	79
c) Schlitzten der Kühlrippen.....	80
d) Einfluss der Kühlkörperabmessungen auf den Verlustleistungsfaktor.....	82
5.1.2.3 Axiale Ausrichtung der Kühlrippen am Leiter.....	87
A) Kühlkörper an den Leiter angegossen.....	87
a) Kühlrippen über den ganzen Umfang des Leiters verteilt.....	87
b) Kühlrippen seitlich am Leiter des Generator-Leistungsschalters GLS1 – axial zum Leiter ausgerichtet.....	91
B) Kühlkörper an den Leiter angeschraubt.....	93
- galvanisch mit dem Leiter verbunden.....	93
- elektrisch vom Leiter isoliert.....	95
5.1.2.4 Stiftkühlkörper.....	98
5.2. Experimente zur Verifizierung der berechneten Verlustleistungsfaktoren...	103
5.3. Auswahl der optimalen Geometrie der Kühlrippen mit Hilfe der Approximationsfunktion.....	105
6 Thermische Untersuchungen zum konvektiven Wärmeübergang.....	109
6.1 Freie Konvektion.....	109
6.1.1 Einfluss des Winkels zwischen Kühlkörper und Horizontale auf die Ähnlichkeitsfunktion $Nu = f(GrPr)$	110
6.1.2 Einfluss warmer anströmender Luft auf die Ähnlichkeitsfunktion $Nu = f(GrPr)$	117
6.2 Erzwungene Konvektion.....	121
6.2.1 Rippenkühlkörper.....	122
6.2.2 Stiftkühlkörper.....	130
6.2.2.1 Fluchtende Ausrichtung der Stifte.....	131
6.2.2.2 Versetzte Ausrichtung der Stifte.....	136
7 Temperaturberechnung mit der Wärmenetzmethode.....	139
8 Zusammenfassung.....	149
9 Literaturverzeichnis.....	151
10 Häufig verwendete Formelzeichen.....	157
11 Lebenslauf.....	161