



Florian Martin



**Hochspannungsprüfsystem auf Basis  
leistungselektronischer Frequenzkonverter**



 Cuvillier Verlag Göttingen

# Hochspannungsprüfsystem auf Basis leistungselektronischer Frequenzkonverter

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Universität Fridericiana Karlsruhe  
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. *Florian Martin*  
aus Buchen (Odw.)

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Mai 2008

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried  
Universität Karlsruhe (TH)

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat  
Technische Universität zu Braunschweig

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008  
Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2008

978-3-86727-636-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-636-8

„There is always a way  
to do it better... find it!“

Thomas A. Edison



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am *Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)* der *Universität Karlsruhe (TH)*. An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die mich bei der Anfertigung dieser Dissertation unterstützt haben.

Mein aufrichtiger Dank gebührt dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried für die Übernahme des Hauptreferats, die Möglichkeit zur fachlichen Weiterbildung und die verantwortliche Einbindung in andere Aufgabenfelder. Ganz besonders bedanke ich mich für das freundschaftliche und vertrauensvolle Verhältnis und sein aktives Interesse an meinem wissenschaftlichen und beruflichen Fortkommen. Danken möchte ich für die ausgezeichneten Arbeitsmöglichkeiten am IEH, die mir während meiner Tätigkeiten in Forschung und Lehre von sehr großem Nutzen waren.

Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Kurrat danke ich für die Übernahme des Korreferats und sein großes Interesse an der Thematik der vorliegenden Arbeit.

Besonderen Dank möchte ich allen ehemaligen und jetzigen wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts aussprechen, insbesondere dem Akademischen Oberrat des Instituts, Herrn Dr.-Ing. Rainer Badent, der mich, abgesehen von kritischen, aber überaus konstruktiven Anmerkungen im Bereich der Hochspannungstechnik, im Speziellen der Hochspannungsprüftechnik, außerordentlich förderte.

Dank gebührt an dieser Stelle auch Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zöller, dessen ebenfalls auf dem Gebiet der Leistungselektronik geplante Dissertation und seine hervorragende, in diese vorliegende Arbeit einfließende Diplomarbeit, zu zahlreichen außerordentlich konstruktiven und hilfreichen Diskussionen führte.

Mein herzlicher Dank gilt ebenso den Herren Dr.-Ing. Markus Hemmer, Dr.-Ing. Bernd J. Hoferer und Dr.-Ing. Martin Sack sowie Herrn Betr.-Ing. Otto Müller, von deren Kenntnis und Erfahrung ich in unterschiedlichster Weise profitieren konnte. Darüber hinaus bedanke ich mich für das überaus freundschaftliche Verhältnis innerhalb des Teams und die vielen schönen Stunden, die wir miteinander verbracht haben.

Dank sagen möchte ich allen meinen Diplomanden, Studienarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften für die harmonische und freundschaftliche Zusammenarbeit sowie die tatkräftige Unterstützung. Ohne ihr großes Interesse an der Thematik und

---

ihre engagierte, selbständige und zielorientierte Mitarbeit wäre die Dissertation in dieser Form nicht möglich gewesen.

Bei den Mitarbeitern des Elektro-Mechanischen Servicelabors bedanke ich mich für ihre Mithilfe und die Realisierung einzelner Komponenten.

Die Sekretärinnen des Instituts haben mich immer bei der Ausführung administrativer Aufgaben unterstützt. Herzlichen Dank.

Mein Dank gilt ferner der Firma *HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH* für die materielle wie auch immaterielle Unterstützung. Besonderer Dank gebührt dem Geschäftsführer Herrn Dr.-Ing. Bernd Kübler und dem ehemaligen Technischen Direktor Herrn Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Wolfgang Hauschild, durch den die Vision und die technische Konzept für das Projekt entstand. In dem für mich zuerst fremden Feld der Leistungselektronik hat Herr Dipl.-Ing. Andreas Thiede, Abteilungsleiter und Entwicklungsingenieur Leistungselektronik, zu jeder Zeit mit seinem Fachwissen und seiner Hilfsbereitschaft die Entwicklung enorm gefördert und maßgeblich zum Gelingen des Projekts beigetragen.

Weiter danke ich meinen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Christoph Herold und Dipl.-Ing. Kai Mössner für die geopferte Zeit zur sorgfältigen Korrektur des Manuskripts sowie die Einbringung von Verbesserungsvorschlägen.

Größter Dank gehört meinen Eltern Ulrike und Josef Martin, die mir meine Ausbildung ermöglichten und diese stets unterstützten und förderten.

Nicht zuletzt kann ich mich nicht genug bei meiner Lebensgefährtin und zukünftigen Frau Dipl.-BW. (BA) Steuerberaterin Julia Beigert bedanken, die mir seit Jahren Ansporn und Unterstützung in den vielen Dingen gibt, die das Leben lebenswert machen.

Karlsruhe, im Mai 2008



Florian Martin

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ziel der Arbeit</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Anforderungen an Spannungsquellen für Hochspannungsprüfungen</b>	<b>7</b>
3.1	Spannungsart und Spannungsform	7
3.2	Leistungsbedarf bei der Prüfung von Transformatoren	8
3.3	Kompensierter Punkt	12
3.4	Leerlaufverhalten eines Leistungstransformators	16
3.5	Teilentladungsgrundstörpegel	18
<b>4</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>19</b>
4.1	Leistungselektronische Frequenzumrichter	19
4.1.1	Frequenzkonverter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter)	21
4.1.1.1	Gleichrichter	22
4.1.1.2	Zwischenkreis	23
4.1.1.3	Wechselrichter	23
4.1.1.4	Sinusfilter	25
4.1.2	Frequenzkonverter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter)	26
4.1.2.1	Gleichrichter	27
4.1.2.2	Zwischenkreis	27
4.1.2.3	Clamping-Kreis	27
4.1.2.4	Wechselrichter	27
4.2	Teilentladungen (TE)	28
4.2.1	Detektion von Teilentladungen	29
4.2.2	Klassische TE-Interpretation	30
<b>5</b>	<b>Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis (U-Umrichter)</b>	<b>33</b>
5.1	Ausgangsspannungsform	35

5.2	Echtzeitregelung der Ausgangsspannung . . . . .	36
5.2.1	Regelkonzept . . . . .	36
5.2.1.1	Schaltzustände des Wechselrichters . . . . .	37
5.2.2	Reglersynthese . . . . .	40
5.2.2.1	Stromregelung . . . . .	43
5.2.2.2	Spannungsregelung . . . . .	52
5.2.2.2.1	Reglerentwurf bei ohmscher Last . . . . .	53
5.2.2.2.2	Reglerentwurf bei ohmsch-induktiver Last . . . . .	58
5.2.2.2.3	Reglerentwurf bei ohmsch-kapazitiver Last . . . . .	63
5.2.2.2.4	Universeller Reglerentwurf . . . . .	64
5.2.2.3	Ansteuerlogik und Verriegelung . . . . .	64
5.2.2.3.1	Ansteuerlogik . . . . .	64
5.2.2.3.2	Verriegelung . . . . .	65
5.3	Simulation . . . . .	66
5.3.1	Simulationsmodell . . . . .	66
5.3.1.1	Wechselrichter . . . . .	68
5.3.2	Simulationsergebnisse . . . . .	69
5.4	Realisierung der Echtzeitregelung . . . . .	75
5.5	Realisierung der Echtzeitregelung in analoger Schaltungstechnik . . . . .	76
5.6	Digitale Realisierung . . . . .	77
5.7	Ergebnisse zur Regelung der Ausgangsspannung . . . . .	79
5.7.1	Leerlauf . . . . .	79
5.7.2	Ohmsche Last . . . . .	81
5.7.3	Induktive Last . . . . .	82
5.7.4	Ohmsch-Induktive Last . . . . .	83
5.7.5	Ausgangsfrequenzen bis 200 Hz. . . . .	84
5.7.6	Stabilität der Ausgangsspannung . . . . .	85
5.7.7	Leistungsaufnahme des Ausgangsfilters . . . . .	86
5.7.8	Zusammenfassung . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Frequenzumrichter mit Stromzwischenkreis (I-Umrichter).</b> . . . . .	<b>87</b>
6.1	Entwurf und Realisierung des I-Umrichters . . . . .	88
6.1.1	Gleichrichter . . . . .	88
6.1.2	Zwischenkreis . . . . .	89
6.1.3	Wechselrichter . . . . .	90
6.1.3.1	Steuerung und Regelung . . . . .	90
6.1.3.2	Schaltzustände des Wechselrichters . . . . .	92

---

6.1.3.3	Ansteuerlogik und Verriegelung . . . . .	94
6.1.4	Gesamtsystem . . . . .	95
6.2	Simulation . . . . .	96
6.2.1	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Kapazität, der Ausgangsfrequenz und dem Zwischenkreisstrom . . . . .	96
6.2.2	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Hysteresen- breite . . . . .	99
6.2.3	Spannungsqualität in Abhängigkeit von der Last . . . . .	100
6.3	Messergebnisse . . . . .	102
6.3.1	Analyse der Spannungsform . . . . .	102
6.3.2	Analyse des Sprungs am Nulldurchgang . . . . .	104
6.3.3	Belastung mit induktiver Last . . . . .	104
6.3.4	Zusammenfassung . . . . .	105
6.4	Teilentladungsmessung . . . . .	105
6.5	Zusammenfassung . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Vergleich zwischen Umrichter mit Spannungs- und Strom- zwischenkreis . . . . .</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>Dreiphasigkeit des Wechselrichters. . . . .</b>	<b>109</b>
8.1	Drei Einphasensysteme. . . . .	109
8.2	Drehstrombrückenschaltung . . . . .	110
8.2.1	Schaltungstopologie . . . . .	110
8.2.2	Regelkonzept. . . . .	111
8.2.3	Simulationsergebnisse . . . . .	113
8.3	Zusammenfassung . . . . .	115
<b>9</b>	<b>Teilentladungs-Störunterdrückung . . . . .</b>	<b>117</b>
9.1	Analyse der Störsituation . . . . .	118
9.2	Analyse der Störsignale . . . . .	119
9.3	Lösungsansätze zur TE-Problematik . . . . .	121
9.3.1	Optimierter Aufbau des TE-Messkreises. . . . .	121
9.3.2	Hochfrequente Störunterdrückung . . . . .	125
9.3.3	Hochleistungs-Tiefpassfilter . . . . .	126
9.3.4	Weitere Lösungsansätze . . . . .	128
9.3.4.1	Umrichteroptimierte Gating-Systeme . . . . .	128
9.3.4.2	Schmalbandige TE-Messung . . . . .	129
9.3.4.3	Offline-Diagnose . . . . .	129
9.4	Abweichende TE-Messergebnisse in umrichtergespeisten Prüfkreisen	130

---

<b>10 Hochspannungsprüfungen an Transformatoren . . . . .</b>	<b>133</b>
10.1 Wechselspannungsprüfungen an Transformatoren . . . . .	133
10.1.1 Messung der Kurzschlussverluste und der Kurzschlussspannung . . . . .	134
10.1.2 Messung der Leerlaufverluste . . . . .	135
10.1.3 Prüfung mit induzierter Wechselspannung . . . . .	137
10.1.4 Kompensierter Punkt . . . . .	139
10.2 Zusammenfassung . . . . .	140
<b>11 Weltweit erstes mobiles Hochspannungsprüfsystem für Transformatoren . . . . .</b>	<b>141</b>
<b>12 Zusammenfassung und Ausblick. . . . .</b>	<b>145</b>
12.1 Zusammenfassung . . . . .	145
12.2 Ausblick . . . . .	147
<b>Anhang . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>A Digitale Realisierung der Echtzeitregelung. . . . .</b>	<b>149</b>
A.1 Digitale Realisierung der Regelglieder . . . . .	149
A.1.1 P-Glied . . . . .	149
A.1.2 Summationsglied . . . . .	149
A.1.3 I-Glied . . . . .	150
A.1.4 $PT_1$ -Glied. . . . .	150
A.2 DSP-Software . . . . .	151
A.2.1 Programmstruktur . . . . .	152
A.2.2 Regelung.c . . . . .	153
A.2.3 Convert.c . . . . .	155
A.2.4 eCAN.c . . . . .	156
A.2.5 Convert.h . . . . .	157
A.2.6 Pi_reg.h . . . . .	157
A.2.7 Digitale, DSP-interne Sollwertvorgabe . . . . .	157
A.3 Hardware . . . . .	159
A.4 Ansteuerlogik und Verriegelung . . . . .	159
A.4.1 Ansteuerlogik . . . . .	160
A.4.2 Verriegelung . . . . .	161
<b>Abbildungen . . . . .</b>	<b>165</b>
<b>Tabellen . . . . .</b>	<b>171</b>
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>173</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis. . . . .</b>	<b>183</b>
<b>Stichwortverzeichnis. . . . .</b>	<b>187</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die stetig fortschreitende Entwicklung von immer leistungsfähigeren Halbleiter-Bauelementen, welche immer größere Spannungen und Ströme mit immer höheren Taktfrequenzen zu- und abschalten können, erschließt eine Vielzahl neuer Einsatzgebiete. Während in der Antriebstechnik leistungselektronische Umrichter die Frequenzumrichter auf der Basis von Motor-Generator-Sätzen (M-G-Sätzen) bereits weitgehend verdrängt haben, dominieren letztere nach wie vor die Prüffelder für Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik. Zur Erzeugung der erforderlichen Prüfspannungen mit verschiedenen Frequenzen wird ein drehzahlvariabler Motor mechanisch starr an einen Synchrongenerator gekoppelt. Der Synchrongenerator liefert somit in Abhängigkeit von der Motordrehzahl ein frequenzvariables Drehspannungssystem.

In der Antriebstechnik lassen sich durch die Steuerungsmöglichkeiten der Leistungselektronik die Betriebspunkte elektrischer Maschinen sehr flexibel einstellen. So sind heute auch große Maschinenantriebe und Elektrolokomotiven mit leistungselektronischen Steuerungen ausgestattet. Diese arbeiten nahezu wartungsfrei, da keine rotierenden, dem Verschleiß ausgesetzten Komponenten enthalten sind.

Bei der Prüfung von Betriebsmitteln zur Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie werden bisher leistungselektronische Spannungsquellen nur zur Prüfung von Kabelsystemen und SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen verwendet. Für diese Resonanzprüfsysteme variabler Frequenz, die von statischen Umrichtern gespeist werden, liegen sehr positive Erfahrungen vor. Infolgedessen ist die Erweiterung des Einsatzbereichs auf Werks- und Vor-Ort-Prüfungen unterschiedlichster Betriebsmittel der Energietechnik die logische Konsequenz.

Im Vergleich zu den Resonanzprüfkreisen, bei denen für die Generierung der Sinusspannung am Prüfling eine Anregung des Schwingkreises ausreichend ist, muss bei Betriebsmitteln, die nicht in Resonanz betrieben werden können, die sinusförmige, frequenz- und amplitudenvariable Wechselspannung von der Quelle zur Verfügung gestellt werden. Die Anforderungen an eine derartige Quelle sind daher wesentlich anspruchsvoller als an eine Spannungsquelle für ein Resonanzprüfsystem. Unabhän-

gig vom Prüfobjekt sind variable, jedoch für eine Prüfung fest einstellbare Frequenzen erforderlich. Für den europäischen und amerikanischen Markt werden hauptsächlich Sinusspannungen mit einer Frequenz von 50 oder 60 Hz benötigt, jedoch auch 16,7 Hz für Bahnanwendungen und bis zu 200 Hz für die induzierte Spannungsprüfung von Transformatoren. Abgesehen von der Frequenzvariabilität ist für eine derartige Spannungsquelle eine stufenlos einstellbare Amplitude der Ausgangsspannung zwingend erforderlich.

Die Notwendigkeit eines solchen Systems wird deutlich, wenn die im Einsatz befindlichen Betriebsmittel der Energietechnik genauer betrachtet werden. In einer Vielzahl von Fällen ist bereits ein Alter erreicht, das ein baldiges Ende der Betriebszeit erwarten lässt. Der Betreiber steht schon jetzt vor der Entscheidung, eine Modernisierungsmaßnahme oder eine Ersatzbeschaffung durchzuführen. Geht es dabei um schwergewichtige Betriebsmittel wie z.B. Leistungstransformatoren kann der Transport zur schwierigsten und zu einer sehr kostspieligen Herausforderung werden, deren Lösung aus betriebswirtschaftlicher Sicht unter Umständen nicht möglich ist. Weltweit finden Hersteller und Betreiber immer wieder die Situation vor, dass Transportwege seit dem Bau einer Anlage vor vielen Jahren nicht mehr zur Verfügung stehen. Beispielsweise wurden Schienenverbindungen stillgelegt, oder Brücken sind aufgrund ihres Alters nicht mehr mit der ursprünglichen Tonnage belastbar. Aus diesem Grund ist die Modernisierung von Betriebsmitteln vor Ort aus Machbarkeits- und Kostengründen eine interessante Alternative zum Rücktransport ins Werk geworden. Diese neue Situation führte im ersten Schritt dazu, dass die Vor-Ort-Modernisierung und -Reparatur weiterentwickelt wurde. Während noch vor einigen Jahren der Tausch von ganzen Wicklungen bei Leistungstransformatoren ausgeschlossen war, steht mittlerweile selbst in entlegenen Teilen der Erde diese Technologie bereit [KB04], [Kaw04], [Alb04], [WW06].

Zu einer vollständigen Vor-Ort-Reparatur oder -Modernisierung gehört die abschließende elektrische Endprüfung [WSVW06], [Wer07b], [Wer07a], [MMN04], [Asc04]. Werden aufgrund der schwierigen Bedingungen vor Ort die Maßnahmen im Vergleich zu den Werksprüfungen reduziert, ist dennoch, zum Nachweis der ordnungsgemäß durchgeführten Arbeiten, die Wechsellspannungsprüfung unumgänglich [TLVP06].

Im Zusammenhang mit Vor-Ort-Prüfungen kommt der Prüfspannungserzeugung erhebliche Bedeutung zu. Aufgrund von mangelnden Alternativen wurden bisher auch vor Ort Motor-Generator-Sätze verwendet [Asc04], [TLVP06], [WSVW06]. Bedenkt man die steigende Nachfrage von Vor-Ort-Prüfungen, so können die M-G-Sätze auf Dauer den Anforderungen an ein Vor-Ort-Prüfsystem nach Mobilität, d.h. niedrigen Transportkosten und damit niedrigem Gewicht und geringen Abmessungen kaum gerecht werden. Das Vor-Ort-Prüfsystem muss des Weiteren eine hohe Zuverlässigkeit und mindestens die gleiche Funktionalität bieten wie das in einem Herstellerwerk stationär installierte Prüfsystem.

---

Weitere Anforderungen an ein neu zu entwickelndes Prüfsystem sind daher Modularität und nicht zuletzt die stationäre Einsetzbarkeit in Prüffeldern. Gerade der letzte Aspekt würde ein Konzept für ein neues Prüfsystem für Transformatoren auf eine deutlich breitere Basis stellen und es nicht nur für mobile Systeme attraktiv machen.

Als Kern eines solchen Prüfsystems ist ein statischer Frequenzkonverter, basierend auf leistungselektronischen Komponenten, vorstellbar, da dieser im Vergleich zu den herkömmlichen M-G-Sätzen folgende Vorteile besitzt:

- Geringere Investitionen
- Hohe Verfügbarkeit und geringer Wartungsaufwand, da keine mechanisch rotierenden Bauteile vorhanden sind
- Kompakte Bauform
- Mobilität
- Modularer Aufbau und somit Skalierbarkeit des Systems
- Die Variabilität der Spannungsquelle ist sehr hoch: Rampen, Zyklusprüfung und unterschiedliche Spannungsformen sind möglich
- Kombination aus hoher Leistung und hoher Dynamik, d.h. der Energieeintrag in die Fehlerstelle bei Prüflingsversagen ist gering

Nach der Formulierung der Ziele dieser Arbeit in Kapitel 2 beschreibt das dritte Kapitel die genauen Anforderungen an einen leistungselektronischen Frequenzumrichter als Prüfspannungsquelle in der Hochspannungsprüftechnik. Ausgehend von den Anforderungen aus den relevanten Normen an die Qualität der Prüfspannung wird im zweiten Schritt der Leistungsbedarf definiert. Auch die für den Leistungsbedarf relevanten Erläuterungen zum kompensierten Punkt und die Notwendigkeit der erhöhten Prüfspannungsfrequenz bei der induzierten Spannungsprüfung von Transformatoren werden in diesem Kapitel diskutiert. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit der Festlegung von Grenzwerten des durch den Umrichter verursachten Teilentladungs-Grundstörpegel.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit unterschiedlichen Umrichtertopologien. Die nutzbaren Umrichter mit Strom- und Spannungszwischenkreis werden genauer erläutert. Ein weiterer Teil des Kapitels beschäftigt sich mit den Grundlagen zu Teilentladungen. Zur Erzeugung der Prüfwechselspannung kommen, wie in Kapitel 4 beschrieben, zwei Umrichtertopologien in Frage. Der Entwurf, die Simulation, die Realisierung und die Messergebnisse des U-Umrichters wie auch des I-Umrichters sind in den Kapiteln 5 und 6 sowie dem Anhang A beschrieben. Abgeschlossen wird dieser

Teil der Arbeit durch den Vergleich und die Beurteilung der Eigenschaften beider Systeme in Kapitel 7.

Speziell für die Prüfung von Drehstrom-Transformatoren ist ein dreiphasiges Prüfungssystem zwingend erforderlich. Kapitel 8 stellt zwei Möglichkeiten dar und diskutiert deren Vor- und Nachteile.

Der hohe Teilentladungs-Grundstörpegel, der bisher bei leistungselektronisch gespeisten Prüfkreisen eine prüfungsbegleitende TE-Messung unmöglich machte, stellt, abgesehen von den Anforderungen an die Spannungsform, die zweite große Herausforderung dar. Die Ursache und die Lösungsmöglichkeiten werden in Kapitel 9 erörtert.

Um die Einsetzbarkeit bei realen Prüfungen zu verifizieren, werden in Kapitel 10 die Ergebnisse der ersten unrichtergespeisten Wechselspannungsprüfung an Transformatoren vorgestellt.

Das letzte Kapitel schließt als Zusammenfassung die Arbeit ab und gibt Ausblick auf weitere Entwicklungen, um den Einsatzbereich leistungselektronischer Systeme in der Hochspannungsprüftechnik auszubauen.

# Kapitel 2

## Ziel der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer selbstgeführten frequenz- und amplitudenvariablen Spannungsquelle auf der Basis leistungselektronischer Komponenten, die als Ersatz der herkömmlichen M-G-Sätze als Kern eines mobilen Hochspannungsprüfsystems eingesetzt werden kann. Hauptaugenmerk gilt dabei den technischen Lösungen der entstehenden Herausforderungen:

- Die Einhaltung, der gemäß den relevanten Normen geforderten Qualität der Ausgangsspannung ( $THD < 5\%$ ) [IEC60-1], [IEC60-3], [IEC76-1].
- Die Reduktion der umrichterbasierten Störeinkopplung in den Hochspannungskreis, mit dem Ziel einen Grundstörpegel zu erreichen, der prüfungsbegleitende TE-Messungen ermöglicht ( $q_{\text{stör}} < 50\text{ pC}$  für die Prüfung von Leistungstransformatoren bzw. im Idealfall  $q_{\text{stör}} < 1\text{ pC}$ , damit die Spannungsquelle für beliebige Hochspannungsprüfungen eingesetzt werden kann [IEC76-3], [IEC270])
- Die Optimierung des Systems hinsichtlich der Mobilität, d.h.
  - die Minimierung des Gewichts und die Verringerung der Verluste, um ein möglichst gutes Leistungs-zu-Gewichtsverhältnis [kVA/kg] zu erzielen, und
  - die Realisierung der Spannungsquelle mit einem möglichst geringen Bauvolumen.

Eine erfolgreiche Umsetzung dieser Anforderungen, speziell der ersten beiden, ist die Voraussetzung für den Einsatz einer leistungselektronischen Spannungsquelle in der Hochspannungsprüftechnik.



## Kapitel 3

# Anforderungen an Spannungsquellen für Hochspannungsprüfungen

### 3.1 Spannungsart und Spannungsform

Der internationalen Norm IEC 60060-1 bzw. dem deutschen Pendant DIN VDE 0432-1 sind allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen zu entnehmen, die für jede Prüfung mit Nennwechselfspannungen über 1 kV verbindlich sind [IEC60-1], [VDE0432-1].

Die Anforderungen sehen im Einzelnen folgendermaßen aus:

1. Die Prüffrequenz muss variabel einstellbar sein ( $45 \text{ Hz} \leq f \leq 65 \text{ Hz}$ ) und bis zu 200 Hz für die induzierte Wechselfspannungsprüfung von Transformatoren (IEC 60076-3 [IEC60-3])
2. Die Höhe der Prüfspannung ist definiert als Spitzenwert geteilt durch  $\sqrt{2}$ , d.h. zur Messung muss eine Scheitelspannungsmesseinrichtung verwendet werden.
3. Die Spannungsform soll für positive und negative Halbschwingung annähernd gleich sowie sinusförmig sein.
4. Das Verhältnis vom Spitzenwert zum Mittelwert der Prüfspannung darf um maximal 5 % abweichen.

Die Mindestanforderungen an die Qualität der Sinusform (Anforderungen 2. bis 5.) sind laut Norm erfüllt, wenn der Effektivwert der harmonischen Oberschwingungen kleiner als 5 % des Effektivwertes der Grundschwingung ist:

$$D = \sqrt{\sum_{k=2}^H \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \leq 5 \% \quad (3.1)$$

$D$  steht für den Klirrfaktor, der in der Literatur häufig als  $THD$  (Total Harmonic Distortion) bezeichnet wird.  $U_k$  ist die Spannungsgröße der  $k$ -ten Oberschwingung,

$U_1$  die Spannungsgröße der Grundschwingung und  $H$  die höchste betrachtete Oberschwingung. Bei der Prüfung von Leistungstransformatoren ist laut IEC 60076-1, die siebte Oberschwingung die höchste zu berücksichtigende Oberschwingung. Handelsübliche Messgeräte und andere Normen betrachten häufig das Spektrum bis zur 50. Oberschwingung.

Für *Vor-Ort-Prüfungen* werden die Kriterien den oftmals schwierigen Bedingungen vor Ort angepasst. Nach IEC 60060-3 „Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 3: Begriffe und Anforderungen für Vor-Ort-Prüfungen“ [IEC60-3] kann das Verhältnis des Scheitelwerts durch Wurzel zwei zum Effektivwert der Spannung um  $\pm 15\%$  abweichen. Ist die Abweichung größer als  $5\%$  muss jedoch gewährleistet sein, dass der Spitzenwert der positiven und negativen Sinuswelle um weniger als  $2\%$  abweicht. Des Weiteren wird der Frequenzbereich der Sinusspannung auf 10 bis 500 Hz erweitert, wenn keine Reglementierung durch ein anderes technisches Komitee gegeben ist. Auch sind die Grenzabweichungen zur Stabilität der Spannung während der Prüfung von  $\pm 1\%$  auf  $\pm 3\%$  des spezifizierten Wertes für eine Prüfungsdauer kleiner 60 s und von  $\pm 3\%$  auf  $\pm 5\%$  für Prüfungen, bei denen die Spannung länger als 60 s anliegt, erweitert worden [IEC60-3].

## 3.2 Leistungsbedarf bei der Prüfung von Transformatoren

Unter der Voraussetzung, dass die beiden Hauptprobleme, der bisher zu hohe Grundstörpegel zur TE-Messung und die schlechte Qualität der Sinusform, gelöst werden können, müssen die Leistungsanforderungen an die Frequenzumrichter festgelegt werden. Während bei stationären Systemen eine hohe Flexibilität durch eine hohe verfügbare Leistung garantiert wird, steht bei mobilen Anwendungen Kosten, Gewicht und Baugröße im Vordergrund. Wünschenswert ist eine den Leistungsanforderungen entsprechende Quelle. Da das erste System für Transformatorenprüfungen vor Ort vorgesehen ist, soll ausgehend von dem Leistungsbedarf bei der Transformatorenprüfung die Systemleistung des Umrichters festgelegt werden.

Bei der Transformatorenprüfung stellt der Prüfling eine komplexe Last  $\underline{Z}$  dar. Die resultierende aufgenommene Scheinleistung  $\underline{S}$  besteht aus veränderlichen Anteilen von Wirk- und Blindleistung. Insbesondere die Blindleistungsaufnahme variiert bei den verschiedenen Prüfungen erheblich. Da bei der Vor-Ort-Prüfung von Leistungstransformatoren hauptsächlich die folgenden vier dielektrischen Prüfungen durchgeführt werden, muss deren Leistungsbedarf genauer analysiert werden:

1. **Induzierte Stehspannungsprüfung**  
(Windungsprüfung) bei Frequenzen  $> 100$  Hz,
2. **Angelegte Stehspannungsprüfung**  
(Wicklungsprüfung) bei Frequenzen  $> 40$  Hz,
3. **Messung der Leerlaufverluste**  
bei Nennspannung und Betriebsfrequenz (50/60 Hz),
4. **Messungen der Kurzschlussverluste**  
bei Nennstrom und Betriebsfrequenz (50/60 Hz).

Die für die Prüfungen 1., 3. und 4. benötigten hohen Wechselspannungen werden durch Induktion im Prüfobjekt selbst erzeugt. Die erforderliche Prüfleistung wird durch die Quelle zur Verfügung gestellt. Die Ausgangsspannung der Quelle wird an die Eingangsspannung des zu prüfenden Leistungstransformators durch einen geeigneten Transformator angepasst. Der hohe Blindleistungsbedarf (insbesondere bei der Messung der Kurzschlussverluste) kann nicht durch die Quelle allein, sondern muss durch kapazitive Kompensation abgedeckt werden. Bei der Wicklungsprüfung (2.) wird ein separater Resonanzkreis eingesetzt, der jedoch ebenso aus dem Umrichter erregt werden kann [HTLM06].

Aus wirtschaftlicher Sicht ist das Marktsegment der Leistungstransformatoren mit einer Nennscheinleistung bis 500 MVA interessant, da es hier eine Vielzahl verschiedener Hersteller gibt. Leistungstransformatoren mit einer Nennscheinleistung größer 500 MVA werden nur in geringen Stückzahlen von wenigen Herstellern produziert. Daher erscheint es sinnvoll, den Umrichter möglichst so zu dimensionieren, dass Leistungstransformatoren bis 500 MVA Nennscheinleistung geprüft werden können.

Zur Untersuchung des Leistungsbedarfs bei Prüfungen an Transformatoren unterschiedlicher Leistungsklassen liegen Prüfberichte von Transformatoren aus Produktionen in den Jahren 2002 und 2003 vor. Anhand der Angabe von Spannungen, Strömen und Wirkleistungen konnten Schein- und Blindleistungsaufnahme für die *Messung der Leerlaufverlustleistung*  $P_0$  und der *Kurzschlussverluste*  $P_k$  berechnet werden. Da die Messung der Leerlaufverluste sowohl bei 100 % der Nennspannung wie auch im übererregten Zustand des Transformators bei 110 % der Nennspannung durchgeführt wird, sind die Leistungsaufnahmen beider Prüfungen abgebildet. Die Abbildungen 3.1 bis 3.6 zeigen die Leistungsaufnahme getrennt nach Prüfung sowie nach Wirk- und Blindleistung in jeweils einem Diagramm.

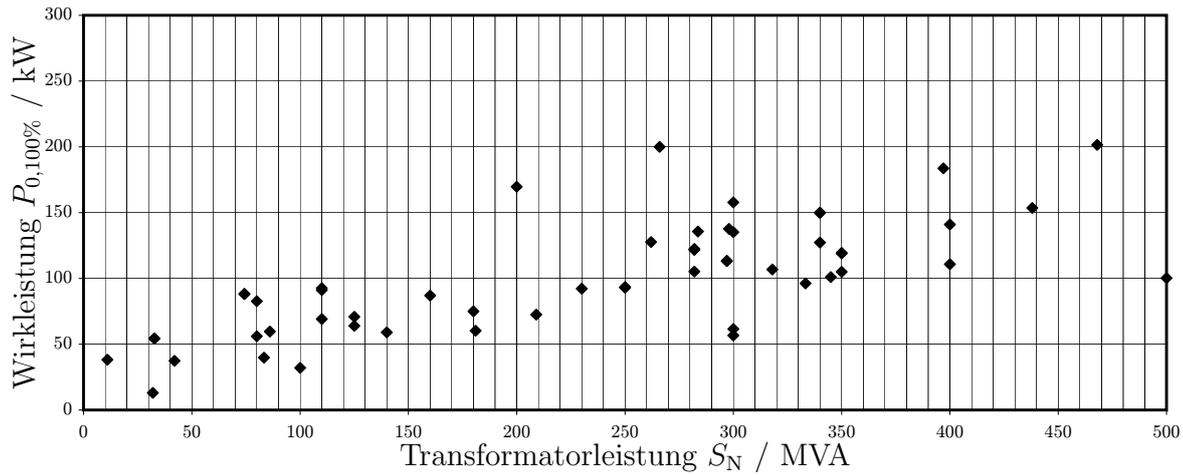


Abb. 3.1: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Leerlaufverluste mit 100 %  $U_N$

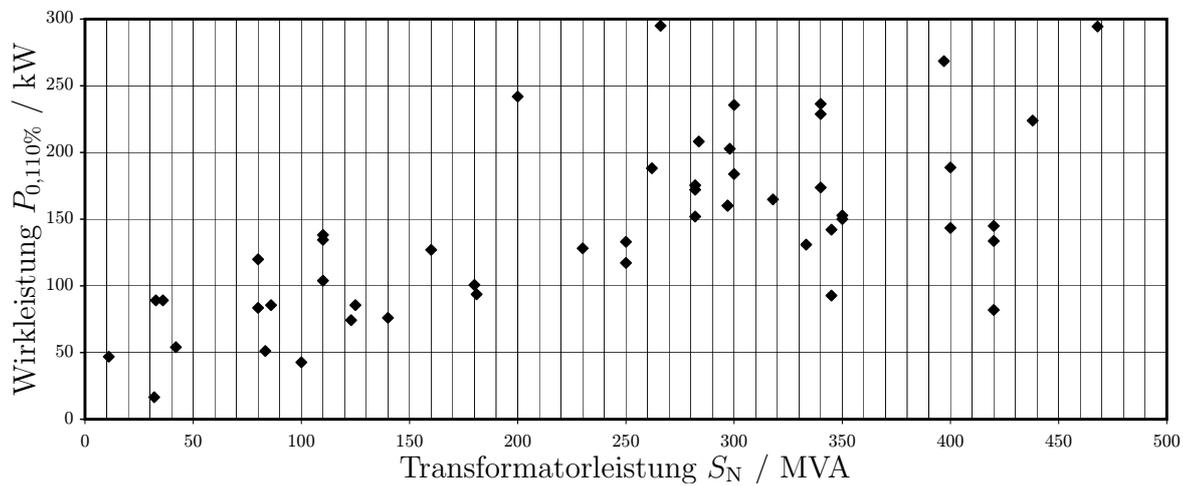


Abb. 3.2: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Leerlaufverluste mit 110 %  $U_N$

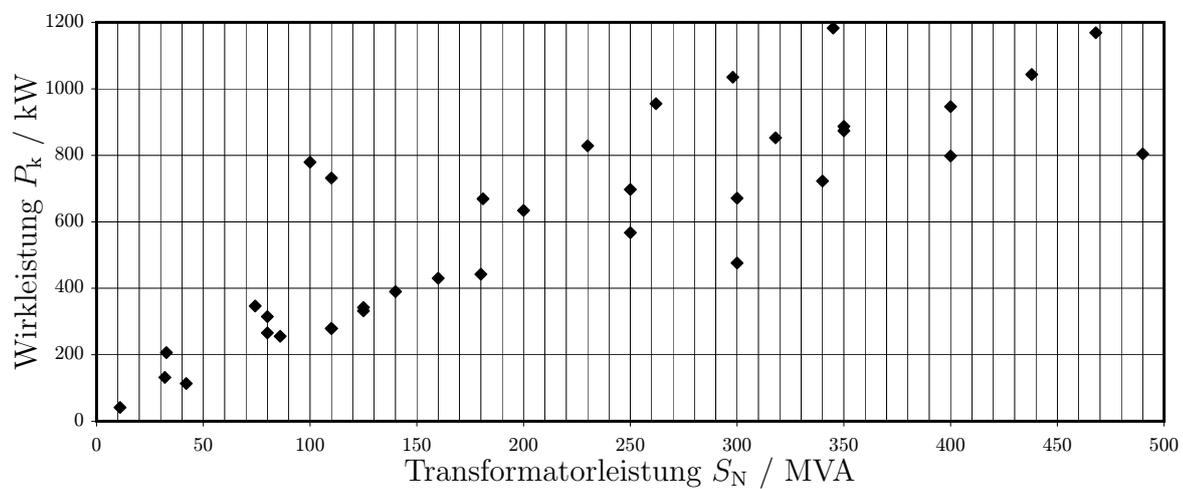


Abb. 3.3: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Kurzschlussverluste