

## Statische Umrichter für Hochspannungsprüfungen an Leistungstransformatoren

W. Hauschild <sup>1)</sup>

A. Thiede <sup>1)</sup>

T. Leibfried <sup>2)</sup>

F. Martin <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH, Marie-Curie-Straße 10, 01139 Dresden  
E-Mail: [hauschild@highvolt.de](mailto:hauschild@highvolt.de)

<sup>2)</sup> Universität Karlsruhe, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe  
E-Mail: [leibfried@ieh.uni-karlsruhe.de](mailto:leibfried@ieh.uni-karlsruhe.de)

### 1 Einführung

Prüfungen und Messungen mit hohen Wechselspannungen an Leistungstransformatoren |I| |I<sub>2</sub>| spielen in der Qualitätssicherung im Werk (Typ- und Stückprüfungen) seit jeher eine dominierende Rolle; insbesondere

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

In den letzten Jahren ist ein steigendes Interesse an der Durchführung solcher Wechselspannungsprüfungen auch vor Ort im Umspannwerk zu verzeichnen, um einerseits den Erfolg von Vor-Ort-Montagen oder Reparaturen nachzuweisen, andererseits um zu diagnostischen Aussagen in Verbindung mit Teilentladungs (TE) -Messungen zu gelangen.

Für die Prüfungen (1) (3) und (4) benötigte hohe Wechselspannungen werden durch Induktion im Prüfobjekt Leistungstransformator selbst erzeugt. Die erforderliche Prüfleistung stellt traditionell ein Motor-Generator(M/G)-Satz zur Verfügung, dessen Ausgangsspannung an die Eingangsspannung des zu prüfenden Leistungstransformators durch einen geeigneten Transformator angepasst werden muss. Der hohe Blindleistungsbedarf (insbesondere bei (4)) wird nicht durch den M/G-Satz allein, sondern auch durch kapazitive Kompensationen abgedeckt. Bei der Wicklungsprüfung (2) wird eine separate Wechselspannungsquelle (Prüftransformator oder Resonanzkreis) eingesetzt.

M/G-Sätze sind in der Antriebstechnik weitgehend durch statische Umrichter abgelöst worden. Die für Transformatorenprüfungen benötigten M/G-Sätze sind Sondermaschinen, die am Markt schwer erhältlich und zudem teuer sind. Statische

Umrichter sind hingegen in immer größerer Vielfalt, mit höheren Leistungen und zu akzeptablen Preisen verfügbar. Diese Konstellation führte zu Überlegungen, *statische Umrichter* bei Transformatorenprüfungen einzusetzen, zumal beste Erfahrungen mit Resonanzkreisen variabler Frequenz, die mit statischen Umrichtern gespeist werden, bei der Prüfung von Kabelsystemen, GIS und anderen kapazitiven Prüflingen vorliegen I3I. Da aus der Literatur wenige Anwendungen bekannt sind I4I, wird hier über Untersuchungen berichtet, die mittlerweile zum Prototyp eines speziell für Transformatorenprüfungen entwickelten statischen Umrichters geführt haben.

## 2 Anforderungen und Lösungsansätze

Die aus Standards I1I I2I und betrieblicher Praxis resultierenden Anforderungen gelten für einen vollständigen Prüfkreis, der den Prüfling einschließt und dessen Herzstück ein statischer Umrichter werden soll, so wie es heute meist ein M/G-Satz ist. Nachfolgend werden diese Anforderungen besonders im Hinblick auf den Wechselrichter behandelt.

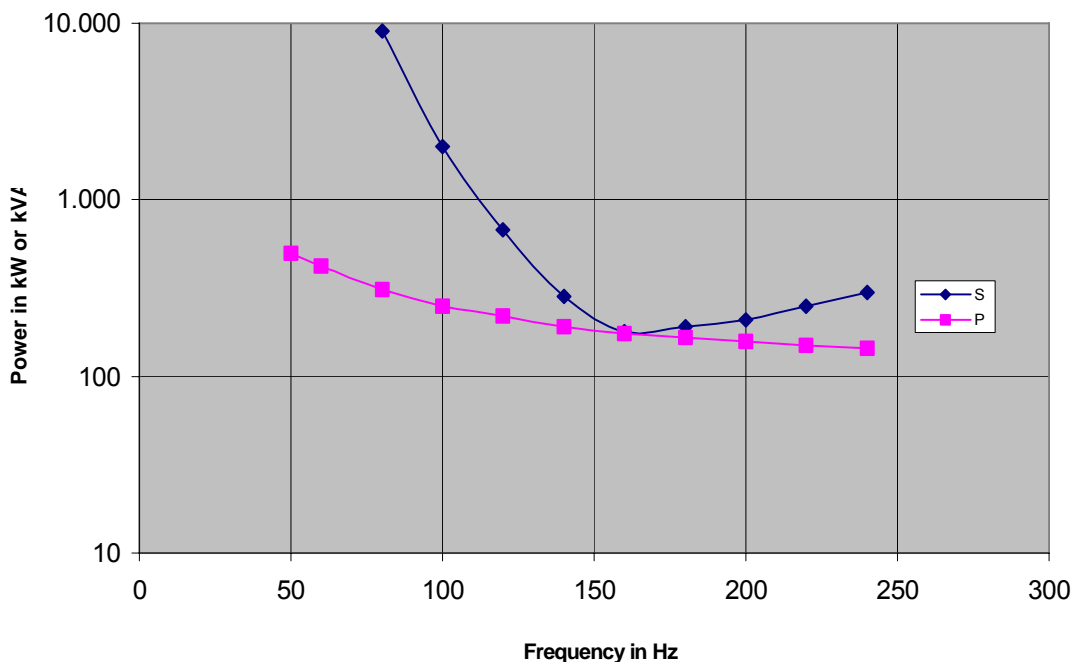


Bild 1: Erforderliche Prüfleistung S und Verluste P für Leistungstransformator bei der induzierten Stehspannungsprüfung (Selbstkompensation bei  $f_g = 160\text{Hz}$ )

Der **Leistungsbedarf** ist eine Größe, die abhängig von der Nennleistung des zu prüfenden Transformators einen weiten Bereich überdeckt und zusätzlich aus Wirk- und Blindleistungsanteil besteht. Da der Umrichter nur den Wirkleistungsbedarf, d.h. die Verluste, decken sollte, muss für eine möglichst feinstufige **Kompensation** gesorgt werden. Unterhalb einer Grenzfrequenz  $f_g \approx 80\text{...}200\text{Hz}$  sind zu prüfende Transformatoren eine induktive Last, die eine kapazitive Kompensation erfordert, oberhalb eine kapazitive Last (Bild 1). Bei der Frequenz  $f_g$  ist der Transformator durch seine Verluste eine ohmsche Last, er kompensiert sich selbst. Will man die

*Selbstkompensation* für die induzierte Stehspannungsprüfung nutzen, muss  $f_g > 100\text{Hz}$  (bzw.  $120\text{Hz}$ ) liegen, was durch induktive Kompensation erreichbar ist. Die Kombination von induktiver und kapazitiver Kompensation ermöglicht die hinreichende *Feinstufigkeit* für alle bereitzustellenden Blindleistungen. Die vom Umrichter für verschiedene Prüfungen bereitzustellenden Verlustleistungen wurden beispielhaft aus einem größeren Pool von Transformatoren bis  $500\text{MVA}$  ausgewertet (Bilder 2 und 3). Aus diesen und ähnlichen Auswertungen folgt, dass für induzierte Stehspannungsprüfung (1) und Leerlauf-Verlustmessung (3) eine *dreiphasige Wirkleistung* von ca.  $50$  bis  $400\text{kW}$  ausreicht, während Kurzschluss-Verlustmessungen (4) bis zum Dreifachen dieser Leistung erfordern. Bei letzteren muss die *Kompensation* den Anforderungen entsprechend gewählt werden und kann bis zu mehreren  $10\text{MVA}$  betragen. Sowohl die Wirkleistung des Wechselrichters als auch die Blindleistungen der Kompensationsanlage müssen neben dem Dreiphasenbetrieb auch einphasig bereitgestellt werden. Der Wirkleistungsbedarf für die angelegte Spannungsprüfung (2) liegt noch unter dem für Prüfungen im Leerlauf.

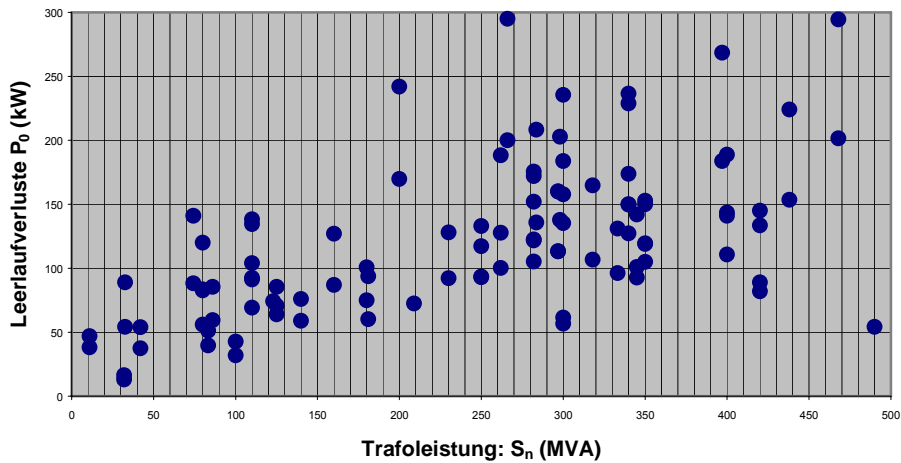


Bild 2: Wirkleistungsbedarf im Leerlauf

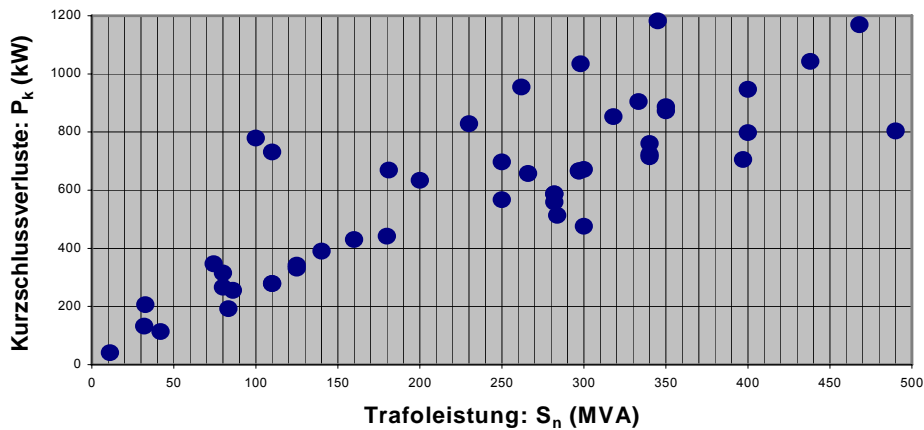


Bild 3: Wirkleistungsbedarf im Kurzschluss

Für die **Prüffrequenz** bestehen die oben erwähnten Anforderungen, so dass der Wechselrichter den *Bereich 40 bis 200Hz* abdecken muss. Während die *Verlustmessungen* ((3) und (4)) bei Betriebsfrequenz (50 oder 60Hz) erfolgen müssen, wird für die *induzierte Stehspannungsprüfungen* mindestens die doppelte Betriebsfrequenz erforderlich, um Sättigungserscheinungen, die das Erreichen der Prüfspannung verhindern würden, zu vermeiden. Der Wechselrichter ist so auszulegen, dass die zur Selbstkompensation gehörende Frequenz  $f_g$  automatisch eingestellt wird. Liegt diese unter 100Hz, ist durch induktive Kompensation die Grenzfrequenz  $f_g$  nach ausreichend hohen Werten zu verschieben. Für die angelegte Stehspannungsprüfung kann, da keine enge Frequenzvorgabe existiert ( $f > 40\text{Hz}$ ) I11, besonders wirtschaftlich ein *Resonanzkreis variabler Frequenz* mit einer Festdrossel (Induktivität L) aufgebaut werden. Setzt man für die Kapazitäten der zu prüfenden Transformatoren einen Bereich  $C = 5...30\text{nF}$  an, so folgt unter der Voraussetzung einer Prüffrequenz  $f = 50\text{ Hz}$  bei  $C = 30\text{nF}$  die Induktivität der Festdrossel zu

$$L = 1 / ((2\pi f)^2 \cdot C) \approx 340\text{H} \quad (1)$$

und damit ein Frequenzbereich der angelegten Stehspannungsprüfung von

$$f = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) \approx 50\text{ Hz}...120\text{Hz}. \quad (2)$$

Wird die angelegte Spannungsprüfung bei Festfrequenz (50 oder 60Hz) verlangt, kann mit einer Stelldrossel ( z.B.  $L = 200...4000\text{H}$ ) ein *Resonanzkreis variabler Induktivität* aufgebaut werden.

Für den **Gehalt an Harmonischen** (THD = total harmonic distortion) in der Prüfspannung geben die Standards I11 I21 einen Grenzwert von  $\text{THD} \leq 5\%$  vor. Wird dieser Wert eingehalten, so ist auch das nach IEC 60060 - 1 I51 geforderte Verhältnis zwischen Scheitel- und Effektivwert in der Regel innerhalb des geforderten Bereiches

$$\hat{U} / U_{\text{eff}} = \sqrt{2} (1 \pm 0,05). \quad (3)$$

Diese Forderung wird von einem Umrichter nicht ohne weiteres erfüllt, insbesondere wenn die unten dargestellten Bedingungen für TE - Messungen gleichzeitig eingehalten werden sollen. Hier bedarf es im Vergleich zu den in der Antriebstechnik üblichen Umrichtern neuartige Lösungen bezüglich Umrichtertopologie und/oder Umrichtersteuerung.

Für die **Messung von Teilentladungen** sollte bei induzierter Messspannung ein vom Umrichter herrührender Grundstörpegel I61 unter  $30\text{pC}$  eingehalten werden, obwohl IEC 60076-3 I11 insgesamt sogar  $100\text{pC}$  zulässt. Neben den bekannten externen Einflüssen I61, wird der Grundstörpegel durch die Schaltimpulse des Umrichters und deren Ausbreitung im TE – Messkreis mitbestimmt. Die Einhaltung eines solchen Grundstörpegels ist also nicht allein durch Topologie und Konstruktion des Umrichters zu gewährleisten, sondern fordert externe Filter, optimierte Leitungsführung (einschließlich Erdung) und angepasste TE – Messtechnik. Sollen auch bei der angelegten Spannungsprüfung Teilentladungen gemessen werden, dürfte dies wegen des verwendeten Resonanzprinzip leichter möglich sein I31.

### 3 Systemkonzept

Neben den oben behandelten Anforderungen werden Schaltung und Ausführung des Umrichters durch das Konzept des vollständigen Transformator-Prüfsystems bestimmt (Bild 4). Der Ausgang des *Umrichters* (15...660V/400A; dreiphasig, wahlweise einphasig) wird über den *Anpasstransformator* an die benötigte Eingangsspannung des zu prüfenden Leistungstransformators angepasst. Die *Kompensation* wird geteilt: Eine große Kondensatorbank wird zwischen Anpasstransformator und Prüfling angeordnet, um den erheblichen Blindleistungsbedarf bei der Messung der Kurzschlussverluste zu decken. Zur nötigen Feinstufigkeit der Kompensation dient eine stellbare L-C-Kombination zwischen Umrichter und Anpasstransformator, mit der auch die Frequenz der Selbstkompensation beeinflusst werden kann und die bei allen Prüfungen im Kreis bleibt.

Messungen von Strom und Spannung (bei Bedarf einschließlich Phasenwinkel) sind am Prüfling primär und sekundärseitig durchführbar. Ebenso sind Teilentladungsmessungen mehrkanalig an allen Durchführungen (primäre, sekundäre, Sternpunkt) möglich. Weitere Messgrößen, z.B. Temperaturen, können erfasst werden, doch ist das Messtechnik-Konzept nicht Gegenstand dieser Betrachtung.

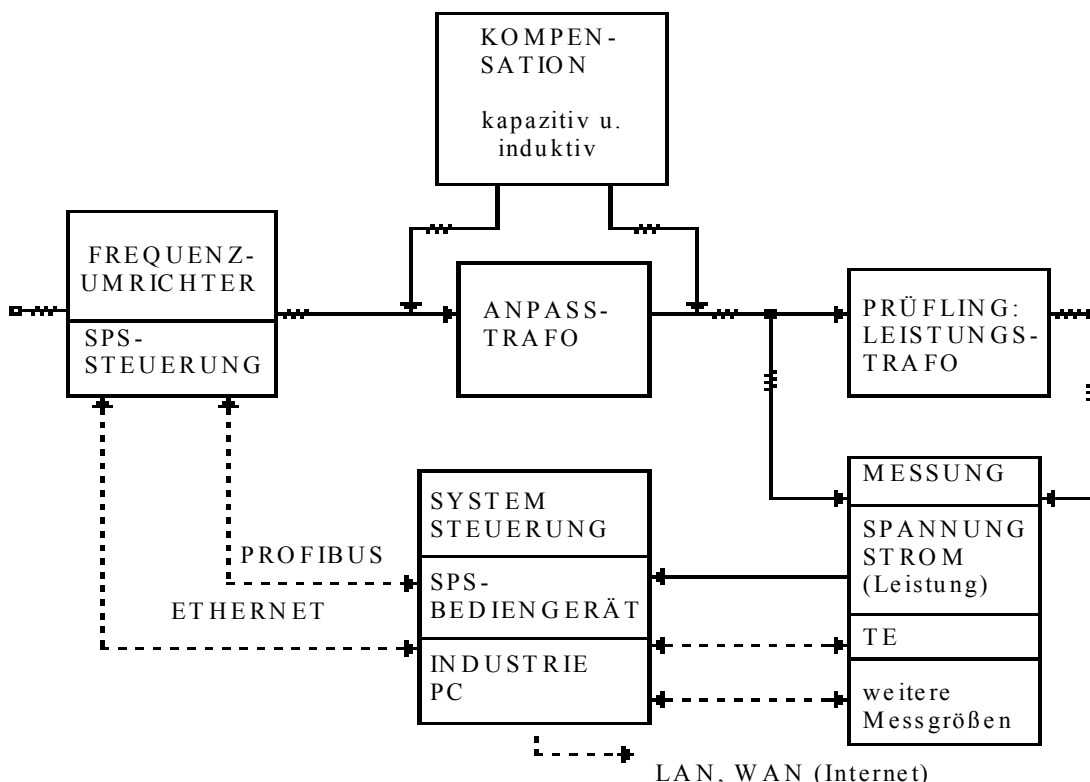


Bild 4: Blockschaltbild des Transformator-Prüfsystems mit statischem Umrichter

Die zentrale *Steuerung* (Bild 4) erfolgt mit speicherprogrammierbaren Komponenten (SPS), die untereinander mit einem optischen Profibus verbunden sind. Die gemessenen Strom- und Spannungsdaten sind in die Steuerung einbezogen, die

vom SPS-Bediengerät aus erfolgt. Anstelle des Bediengerätes (bzw. in Redundanz dazu) kann das System von einem industriellen Personalcomputer (IPC) aus bedient werden, auf dem auch die TE-Messwerte und weitere Messgrößen verarbeitet werden. Die IPC-Steuerung kann zur Datenübertragung an ein lokales Rechnernetz (LAN) und auch an das Internet (WAN) angeschlossen werden. Ein Internetanschluss würde auch Ferndiagnose und Fernwartung durch den Hersteller ermöglichen.

Je nach Prüfumfang, der mit dem System bestritten werden soll, werden Kompensation und Messtechnik angepasst. Sollen z.B. nur Spannungsprüfungen durchgeführt werden, wird die erwähnte große Kondensatorbank entfallen und die Spannungsmessung wird auf die dafür üblichen Anforderungen I51 reduziert.

Das Systemkonzept ist für Prüfsysteme mit stationären Einsatz im Prüffeld und für solche im mobilen Vor-Ort-Einsatz identisch, doch richtet sich die quantitative Ausführung nach den jeweiligen Erfordernissen.

## 4 Umrichter

### 4.1 Grundschialtung

Der prinzipielle Aufbau des statischen Frequenzumrichters geht aus Bild 5 hervor. Dargestellt ist die Schaltung für eine Ausgangsphase sowie die zentralen Baugruppen SPS und Bediengerät. Der Eingang des Leistungskreises wird durch Niederspannungs-Schaltgeräte und das Netzfilter gebildet. Es schließt sich der halbgesteuerte *Gleichrichter* (B6HK) an. Er wird in der Phase der Zwischenkreisaufladung über die Baugruppe PCC gesteuert; danach arbeitet er mit einem Zündverzug von  $0^\circ$ . Über den *Zwischenkreiskondensator* schließt sich die ausgangsseitige *Wechselrichter-H-Brücke* an, die eine Phase des Anpasstransformators mit einer Ausgangsspannung variabler Amplitude und Frequenz speisen kann.

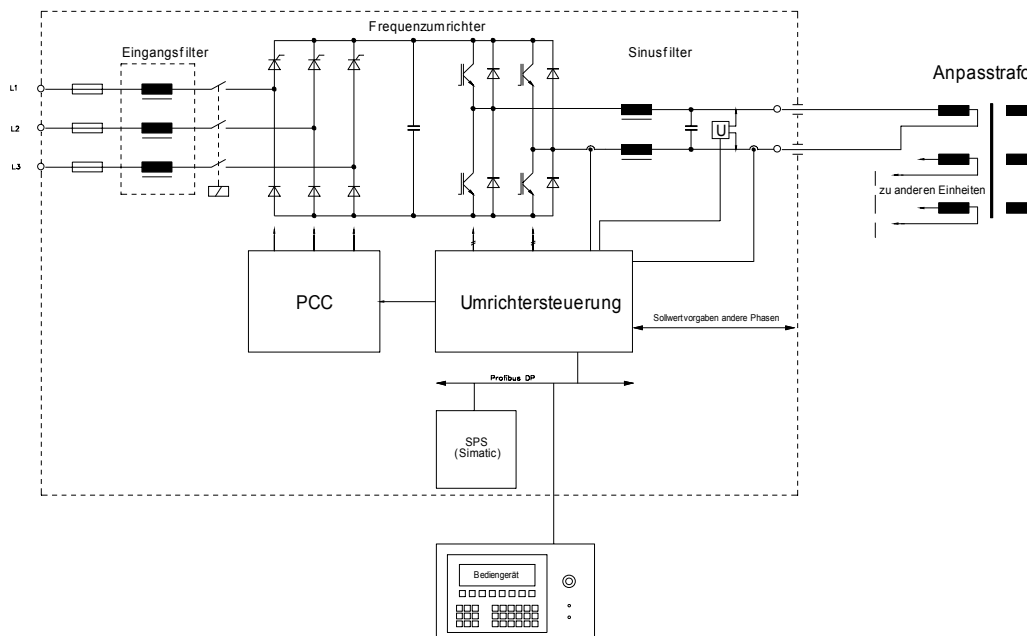


Bild 5: Grundschialtung einer Umrichtereinheit

Die Ausformung der sinusförmigen Ausgangsspannung mit geringem Klirrfaktor (THD  $\leq 5\%$ ) erfolgt durch das der H-Brücke nachgeschaltete, *geregelt* Sinusfilter. Die Umrichtersteuerung vergleicht den Ausgangsspannungs-Istwert über dem Filterkondensator mit dem Sollwert. Aus der Regelabweichung wird ein Pulsmuster für den Wechselrichter abgeleitet, welches den Filterdrosseln Ströme einprägt, die zum Abbau dieser Regelabweichung führen; so dass eine brauchbare Sinusform entsteht. Die beiden übrigen Ausgangsphasen werden über baugleiche Leistungskreise gespeist [7]. Die Umrichtersteuerung einer Phase übernimmt dabei eine Master-Funktion und stellt die Sollwertsignale für die Umrichtersteuerungen der beiden anderen Phasen bereit und sorgt so für die echt dreiphasige Ausgangsspannung des Anpasstransformators. Zeitkritische Schutz- und Überwachungsfunktionen übernimmt jede Umrichtersteuerung selbst für die eigene Ausgangsphase. Die zentrale SPS steuert die Niederspannungs-Schaltgeräte, kommuniziert mit dem Bediengerät und der Master-Umrichtersteuerung und übernimmt zeitunkritische Schutz- und Überwachungsfunktionen.

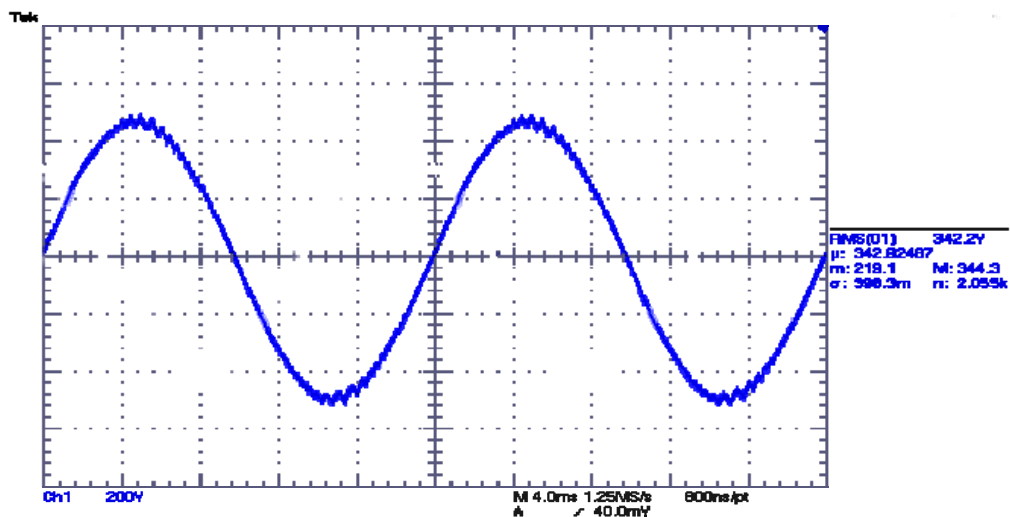


Bild 6: Ausgangsspannung des Umrichters mit geregeltm LC-Filter (340V, 70A invertiert, ohmsch-induktive Last)

## 4.2 Ausführung

Nachfolgend wird eine Ausführung des Umrichters bis 400 A beschrieben, die im Zusammenspiel mit dem Anpasstransformator die dreiphasige bzw. einphasige Prüfung ermöglicht. Sie besteht aus zwei Umrichterschränken (Bild 7; je ca. 1,2m x 0,8m x 2,0m). Im ersten Schrank befinden sich Leistungsschalter, Sicherungen, Eingangsfiler sowie ein Umrichter bestehend aus gesteuertem Gleichrichter mit Zwischenkreiskondensator und zweiphasigem Wechselrichter mit gesteuertem Sinusfilter. Im zweiten Schrank befinden sich zwei weitere Umrichter mit ihren jeweiligen Sinusfiltern. Die gemeinsame SPS-Steuerung befindet sich im ersten Schrank. Sie ist über Profibus mit dem separaten SPS-Bediengerät (Bild 7) verbunden. Das Bediengerät enthält neben dem Operator-Panel die Geräte zur Scheitelwertmessung und den Noataus-Schalter.

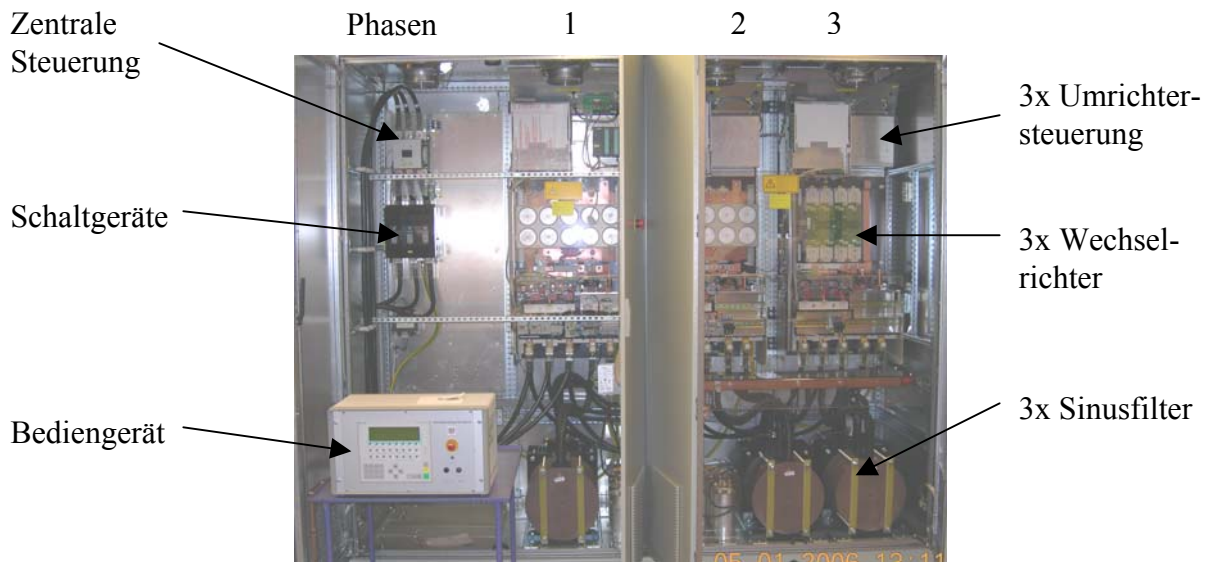


Bild 7: Ausführung des dreiphasigen Umrichter-Prototyp (Wechselrichter-Schrank mit Bediengerät)

Mit dem beschriebenen Umrichter können Wirkleistungen bis 450kW dreiphasig mit Frequenzen 40 bis 200Hz bereitgestellt werden. Werden kleiner Leistungen benötigt, bleiben die Schränke identisch, jedoch werden Gleichrichter, Wechselrichter und sonstige Komponente entsprechend leistungsärmer ausgeführt. Zur Leistungsverdoppelung werden zwei der beschriebenen Umrichtereinheiten parallel geschaltet (Bild 8), indem die Sekundärseiten ihrer Anpasstransformatoren phasengerecht verbunden werden. Die Steuerungen sind derart miteinander verknüpft, dass eine als Master, die zweite als Slave arbeitet.

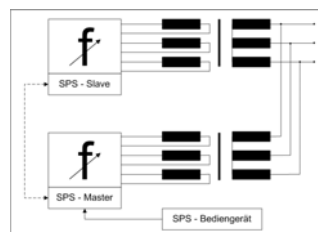


Bild 8: Zusammenschaltung zweier Umrichtermodule zur Leistungsverdoppelung

Wie erwähnt, soll der Umrichter durch feinstufige Kompensation vor allem den Wirkleistungsbedarf des Prüflings decken, doch kann er auch Blindleistung im Bereich ( $\cos \varphi = 0,2_{\text{kapazitiv}} \dots 1 \dots 0,2_{\text{induktiv}}$ ) bereitstellen. Das geregelte Sinusfilter gewährleistet, dass Harmonische den zulässigen Grenzwert (THD = 5%) nicht überschreiten. Schließlich reduzieren interne Filter störende IGBT-Schaltimpulse beträchtlich, so dass zusammen mit den erwähnten externen Maßnahmen (s. Punkt 2) auch die erforderlichen niedrigen TE-Grundstörpegel erreicht werden.

Für die angelegte Stehspannungsprüfung werden der Umrichter und der Erregertransformator genutzt, um die erwähnte zusätzliche Drosselspule als Fest- oder Stelldrossel (s. Punkt 2) einzuspeisen. Der Spannungsteiler wird dabei als Grundlastkondensator so ausgeführt, dass der Prüfkreis auch ohne den zu prüfenden Leistungstransformator in Resonanz kommen kann.



## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von statischen Umrichtern für Transformatorenprüfungen bedeutet mehr als den Ersatz der klassischen M/G-Sätze durch eine leistungselektronische Komponente. Es bedarf sowohl eines angepassten Systemkonzepts, das dem Umrichter die Bereitstellung von Wirkleistung zuweist, als auch einer Umrichtertopologie, die die einander widersprechenden Forderungen nach Sinusqualität und niedrigem TE-Grundstörspegel zu einem technisch akzeptablen Kompromiss führt. Wie Ausführung und Erprobung von Versuchsmustern und Prototypen zeigen, sind statische Umrichter für Transformatorenprüfungen wirtschaftlich ausführbar.

Die Anwendung umrichter-basierter Transformatoren-Prüfsysteme bringt eine Reihe technischer Vorteile wie Masse- und Volumenersparnis, freie Frequenzwahl und vor allem modularen Aufbau. Letzterer bedeutet, dass man sich nicht auf eine eventuell später benötigte Maximalleistung festlegen muss, sondern das System nach dem aktuellem Bedarf auslegen und später durch einen oder mehrere Umrichtermodule ergänzen kann.

Neben der Ausstattung neuer Prüffelder sind umrichter-basierte Prüfsysteme wegen ihres geringeren Platzbedarfs hervorragend für Ersatzinvestitionen in räumlich begrenzten Prüffeldern geeignet. Wegen Modularität, geringer Masse und kleinem Volumen sowie Robustheit durch Vermeidung bewegter Teile sind umrichter-basierte Transformatoren-Prüfsysteme optimal für den Vor-Ort-Einsatz anwendbar. Erste Konzepte für eine mobile Ausführung, die sich an Erfahrungen mit mobilen Kabelprüfsystemen [3] anlehnt, liegen vor (Bild 9). Beachtet man noch den Trend Leistungselektronik, so ist künftig eine breite Anwendung der beschriebenen Lösung zu erwarten.

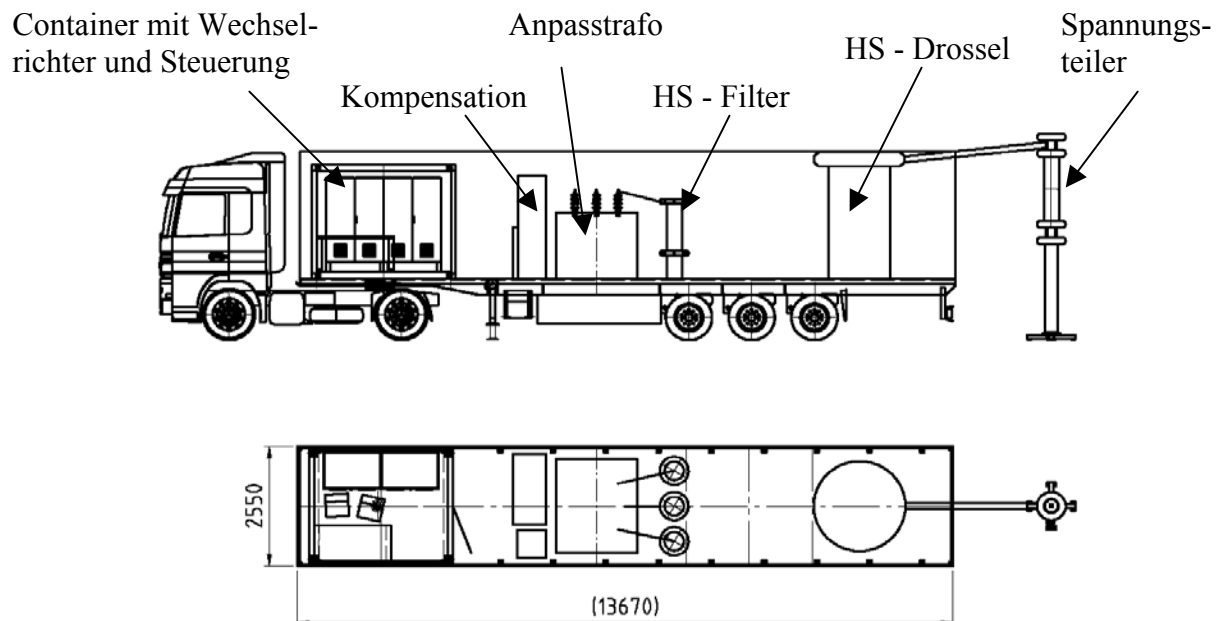


Bild 9: Mobiles Prüfsystem für die induzierte und angelegte Stehspannungsprüfung von Leistungstransformatoren bis 500MVA

## Literatur

- I11 IEC 60076-3: Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air. (Second edition 2000-03)
- I21 VDE 0532-3: Leistungstransformatoren – Teil 3: Isolationspegel, Spannungs-Prüfungen und äußere Abstände in Luft (November 2001)
- I31 W. Hauschild u.a.: The technique of AC on-site testing of HV cables by frequency-tuned resonant test systems. Cigre Report 33-304 (2002)
- I41 M. Hässig, J. Fuhr, T. Aschwanden: Grundsteine der TE-Messung an Transformatoren: Vor Ort-Erfahrungen aus off-line Messungen. HIGHVOLT Kolloquium 03; Seiten 207 - 216
- I51 IEC 60060-1: High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements (second edition 1989-11)
- I61 IEC 60270: High-voltage test techniques – Partial discharge measurement (third edition 2000-12)
- I71 Kiel, E.; Schumacher, W.; Ehrenberg, J.; Letas, H.-H.; Schrader-Hausmann, U.: High Performance Digital Control of Uninterruptable Power Supply (UPS) using an Application Specific Integrated Circuit (ASIC); EPE-Firenze 1991, Vol. 3, S. 174 – 179

## Danksagung

An den beschriebenen Konzepten, Untersuchungen und Realisierungen waren bei HIGHVOLT die Herren Dr. Winter, Stephan, Scheibler, Pfaff und Coors beteiligt, am IEH Karlsruhe im Rahmen von Diplomarbeiten die Herren Homagk, Zöller und Steger. Die Autoren danken für deren Mithilfe.