

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.

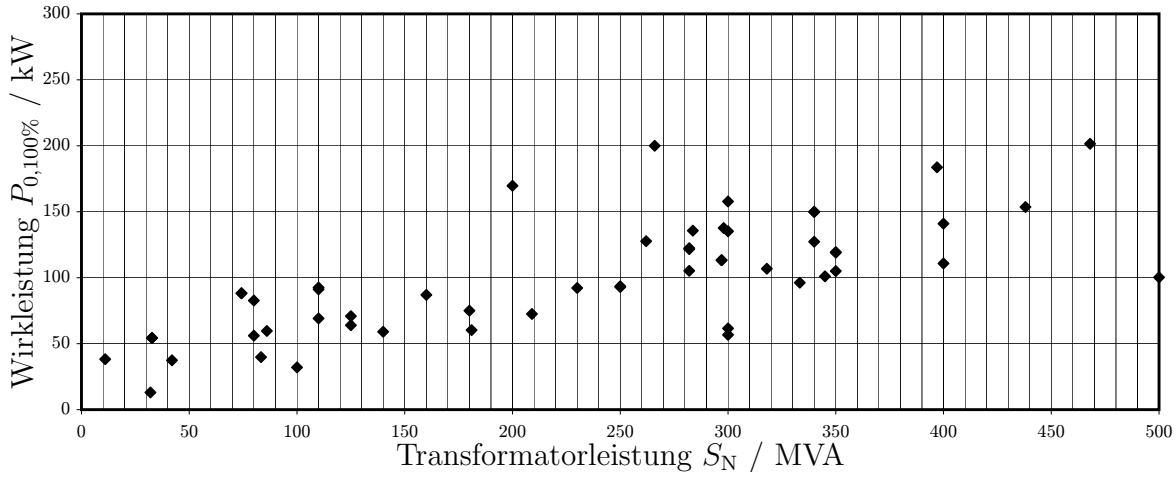


Abb. 3.1: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Leerlaufverluste mit 100 % U_N

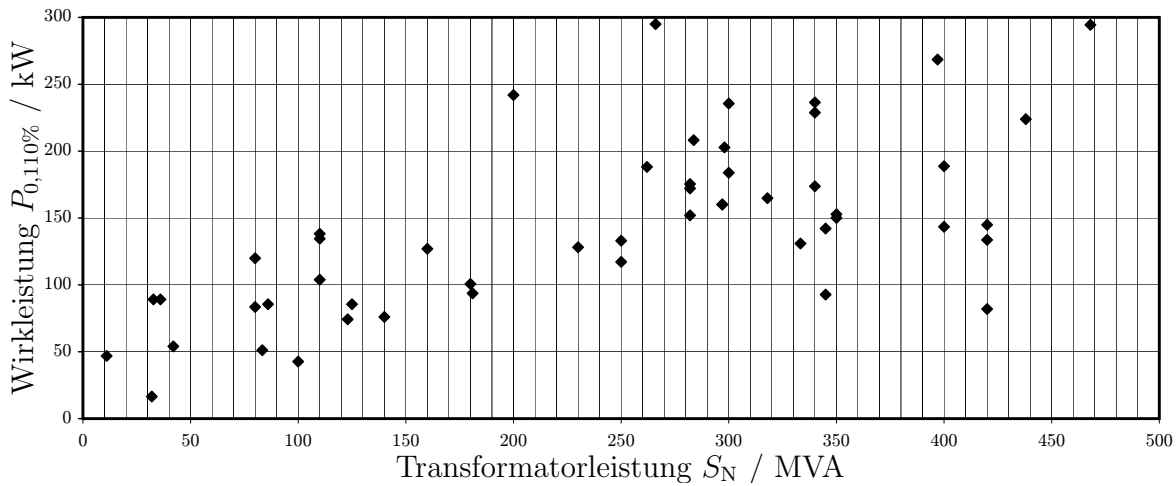


Abb. 3.2: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Leerlaufverluste mit 110 % U_N

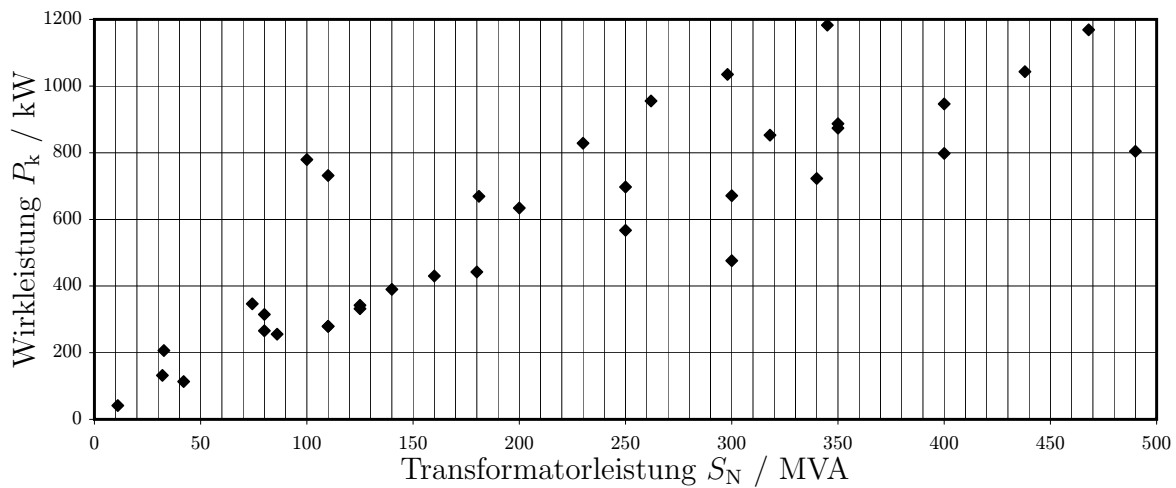


Abb. 3.3: Wirkleistungsbedarf bei der Messung der Kurzschlussverluste