

Leerlaufmessungen an Leistungstransformatoren mit statischen Frequenzumrichtern

No-load measurements on power transformers using static frequency converters

Dipl.-Ing. Kai Mössner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Leibfried

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Deutschland
moessner@ieh.uni-karlsruhe.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von Leerlaufmessungen an Verteiltransformatoren vorgestellt, die mit einem statischen Frequenzumrichter als Spannungsquelle durchgeführt wurden. Da die Ausgangsspannung des Wechselrichters ohne Regelung mit Hilfe eines statischen Pulsmusters erzeugt wurde, wurde hierbei besonders auf die Symmetrie des an den Verteiltransformatoren anliegenden Spannungssystems geachtet, der Verzerrungsgrad der erzeugten Prüfspannung und die Unterschiede der ermittelten Leerlaufverluste sowie des Leerlaufstroms unter verschiedenen Rahmenbedingungen evaluiert.

Abstract

This paper presents the results of no-load measurements performed on distribution transformers using a static frequency converter to provide a sinusoidal test voltage. As the default inverter setup did not contain a control scheme for the output voltage, the assessment of the measurement results was focused on the symmetrical shape of the generated voltage system, the degree of distortion and deviations of the measured no-load losses and no-load current for different conditions and limiting factors.

1 Einleitung

Bei der Neuausrüstung oder Modernisierung von Prüffeldern für Leistungs- und Verteiltransformatoren werden in heutiger Zeit neben rotierenden Umformern auch statische Frequenzumrichter installiert, um frequenz- und amplitudenvariable Prüfspannungen zu erzeugen. Vor allem der gegenüber Motor-Generatorsätzen reduzierte Aufwand bei der Wartung und die überschaubaren Kosten bei der Anschaffung sowie der vertretbare Transportaufwand bei mobilen Systemen zur Prüfung von Leistungstransformatoren vor Ort sprechen für den Einsatz von statischen Frequenzumrichtern. Im einfachsten Fall können hierzu Frequenzumrichter aus der Antriebstechnik unverändert übernommen werden, die durch modularen Aufbau bei hohen Stückzahlen vergleichsweise kostengünstig produziert werden können. Durch einen Versuchsaufbau im Labor wurde nun überprüft, inwieweit sich ein solcher Frequenzumrichter ohne aktive Regelung der Ausgangsspannung des Wechselrichters dazu eignet, Wechselspannungsprüfungen an Verteiltransformatoren durchzuführen. Aufgrund der nicht sinusförmigen Stromaufnahme im Leerlauf liegt dabei ein besonderes Augenmerk auf der Durchführung von Messungen zur Ermittlung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms. Um Aussagen über die Symmetrie des speisenden Spannungssystems, Verzerrungsgehalt der Spannung sowie Abweichungen beim Leerlaufstrom und bei den ermittelten Leerlaufverlusten treffen zu können, wurden Leerlaufmessungen bei Speisung durch den einge-

setzten Frequenzumrichter unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt und den Resultaten gegenübergestellt, die bei Einsatz eines rotierenden Umformers und eines netzgespeisten Stelltransformators erreicht werden konnten.

2 Versuchsanordnung

2.1 Versuchsaufbau

Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, mit dem die im Folgenden dargestellten Ergebnisse erlangt wurden. Ein Netztransformator dient zur galvanischen Trennung der Versuchsanordnung vom Labornetz und zur Anpassung der Netzspannung an die Eingangsspannung des statischen Frequenzumrichters. Der Nenn-Ausgangsstrom des statischen Frequenzumrichters beträgt 210 A, die maximale Ausgangsspannung und die Eingangsspannung betragen 690 V bei einer maximalen Frequenz der Grundschiwingung der Ausgangsspannung von 194 Hz. Durch ein nachfolgendes L-C-Sinusfilter wird die pulsförmige Ausgangsspannung des Wechselrichters gefiltert, sodass am folgenden Anpasstransformator primärseitig eine sinusförmige Spannung anliegt. Der Anpasstransformator weist ein in acht Stufen einstellbares Übersetzungsverhältnis auf, sodass sich die gewünschte Spannung am Prüfling in Abhängigkeit von der Aussteuerung des Wechselrichters und der gewählten Anzapfung ergibt.

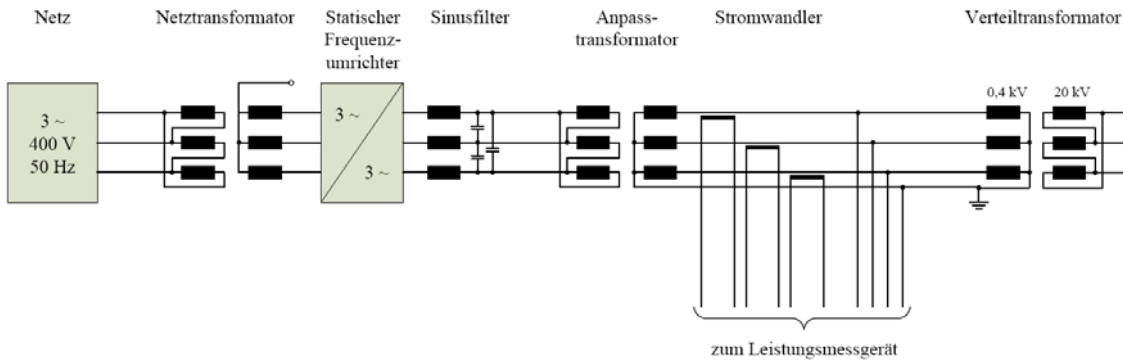


Abbildung 1 Versuchsaufbau zur Leerlaufmessung

Die Leerlaufmessungen wurden an drei verschiedenen Verteiltransformatoren durchgeführt. Es handelt sich dabei ausschließlich um Zweiwicklungstransformatoren der Schaltgruppe Dyn5 mit den Nennspannungen 20 kV / 400 V. Die Bemessungsfrequenz der betrachteten Transformatoren f_r beträgt 50 Hz; die Bemessungsleistung S_r und die relative Kurzschlussspannung u_k der Verteiltransformatoren sind in Tabelle 1 verzeichnet.

Bezeichnung des Transformators	S_r	u_k
TR1	250 kVA	6 %
TR2	400 kVA	4 %
TR3	800 kVA	4 %

Tabelle 1 Daten der verwendeten Verteiltransformatoren

Neben den Messungen mit statischem Frequenzumrichter und Anpasstransformator wurden Vergleichsmessungen mit einem rotierenden Umformer und einem netzgespeisten Stelltransformator durchgeführt, die beide ohne Anpasstransformator mit den Prüflingen verbunden wurden.

2.2 Erfassung der Messwerte

Die Messung von Spannung und Strom und die Berechnung der abgeleiteten Größen wurde mit einem Leistungsmessgerät vorgenommen, dessen maximale Fehler für sinusförmige Ströme und Spannungen bei einer Frequenz von 50 Hz zu 0,05 % des Messwerts und 0,05 % des Messbereichsendwerts angegeben werden. Die Spannung wurde an den Klemmen der Verteiltransformatoren direkt gemessen. Die zur Messung des Stroms eingesetzten Stromwandler weisen einen maximalen Amplitudenfehler von 0,69 % und einen maximalen Phasenfehler von 18 Minuten auf. Eine zusätzliche Visualisierung der Spannung und des Stroms erfolgte mit einem digitalen Speicheroszilloskop.

2.3 Kriterien zur Analyse der Spannungsform

Die Leerlaufverluste von Leistungs- oder Verteiltransformatoren sind sehr stark von der Schwingungsform der Prüfspannung abhängig [1]. In [2] wird daher explizit gefordert, dass bei Leerlaufmessungen an Leistungstransformatoren „[...] möglichst sinusförmige und symmetrische

Spannungen an allen drei bewickelten Schenkeln anliegen“. Um die Symmetrie des durch den statischen Frequenzumrichter erzeugten Spannungssystems beurteilen und vergleichen zu können, wurden für jede Messung verschiedene Kennwerte zur Quantifizierung der Unsymmetrie berechnet. Das Aufstellen von

$$\left| \frac{U - \bar{U}}{\bar{U}} \right| \quad (1)$$

und

$$\left| \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \right| \quad (2)$$

für die jeweils gemessenen Werte des Scheitelwerts, des Effektivwerts und des Gleichrichtwerts der Spannung gibt Auskunft darüber, wie sehr die Spannung der einzelnen Phasen vom Mittelwert differiert bzw. die maximal und minimal gemessenen Werte voneinander abweichen. Der Kennwert der Unsymmetrie nach Gleichung 1 wird i. A. bis zu einem Wert von 3 % als akzeptabel betrachtet.

Gemäß der für Hochspannungsprüfungen allgemein anzuwendenden Norm [3] muss der Zusammenhang zwischen Scheitel- und Effektivwert einer Prüfspannung

$$\left| \frac{\hat{U} - \sqrt{2}U_{\text{eff}}}{\sqrt{2}U_{\text{eff}}} \right| \quad (3)$$

stets kleiner sein als 5 %. Weiterhin darf der Wert der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_{n,\text{eff}}^2}}{U_{1,\text{eff}}} \quad (4)$$

5 % nicht überschreiten. Zur Bewertung der Symmetrie der positiven und negativen Halbwelle kann zusätzlich die relative Differenz der Beträge der Scheitelwerte hinzugezogen werden. Diese wird bis zu einem Wert von 2 % als akzeptabel angesehen. Bei der Leerlaufmessung an Leistungstransformatoren wird zusätzlich gefordert, dass der Wert für

$$|d| = \left| \frac{U' - U_{eff}}{U'} \right| \quad (5)$$

3 % nicht überschreiten darf, wobei der korrigierte Gleichrichtwert U' aus dem Gleichrichtwert U_{rect} nach

$$U' = 1,1107 \cdot U_{rect} \quad (6)$$

berechnet wird [2].

2.4 Korrektur der Leerlaufverluste

Die Höhe der Prüfspannung ist so einzustellen, dass der gemessene korrigierte Gleichrichtwert gleich der Bemessungsspannung des Prüflings ist. Stimmen der korrigierte Gleichrichtwert U' und der Effektivwert U_{eff} der Spannung nicht überein, so fordern die Normen zur Prüfung von Transformatoren eine Korrektur der gemessenen Leerlaufverluste. Sofern die Abweichungen von U_{eff} und U' kleiner als 3 % sind, müssen die korrigierten Leerlaufverluste gemäß [4] nach

$$P_{0,IEEE}(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + \left(\frac{U_{eff}}{U'} \right)^2 P_2} \quad (7)$$

berechnet werden, da sich der Beitrag der Wirbelstromverluste P_2 mit dem Quadrat des Effektivwerts der erregenden Spannung ändert. Der Anteil der Hystereseverluste P_1 ist abhängig vom Scheitelwert der magnetischen Flussdichte im Kern und somit vom arithmetischen Mittelwert der speisenden Spannung. Da das tatsächliche Verhältnis zwischen den Wirbelstromverlusten und den Hystereseverlusten nicht bekannt ist, werden P_1 und P_2 wie in [1] und [4] vorgeschlagen zu 0,5 angenommen. Die mittlere Öltemperatur T_m wurde bei der Korrektur der Leerlaufverluste nicht berücksichtigt. Da diese bei den Messungen nicht mehr als 10 K von der in [5] gegebenen Referenztemperatur von 20 °C abwich und davon ausgegangen werden kann, dass die Differenz zwischen der Öltemperatur im oberen und der Öltemperatur im unteren Bereich des Transformatorkessels 5 K nicht übersteigt, erlaubt [4], auf eine öltemperaturabhängige Korrektur der Leerlaufverluste zu verzichten. Zusätzlich zum beschriebenen Verfahren wurde die Korrektur der Leerlaufverluste gemäß der Anweisung in [2] vorgenommen und der richtige Wert der Leerlaufverluste nach der Vorschrift

$$P_{0,IEC} = P_m(1 + d) \quad (8)$$

berechnet.

2.5 Leerlaufstrom

Bei Dreiphasentransformatoren berechnet sich der Leerlaufstrom als arithmetisches Mittel der während der Messung der Leerlaufverluste abgelesenen Effektivwerte der drei Phasenströme [2], [4].

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse bei Bemessungsspannung

Bei den in Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 vorgestellten Ergebnissen wurde der Aussteuergrad des Wechselrichters so eingestellt, dass der korrigierte Gleichrichtwert der an den Verteiltransformatoren anliegenden Spannung gleich der Bemessungsspannung des Prüflings entsprach; zum Vergleich wurde zusätzlich eine Messung bei 110 % bzw. 105 % der Nennerregung gegenübergestellt. Da es sich bei den erregten Wicklungen jeweils um eine Wicklung in YN-Schaltung handelt, ist hierfür die Spannung zwischen den Leiteranschlüssen und dem Sternpunktanschluss relevant [2], [4]. In Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 befinden sich die Maxima der Kennwerte zur Quantifizierung der Unsymmetrie, die Maxima der Kennwerte der Verzerrung der Spannung sowie die korrigierten Leerlaufverluste und die ermittelten Leerlaufströme in Abhängigkeit von der Art der Speisung für jeden untersuchten Transformator.

Die Unsymmetrie des speisenden Spannungssystems steigt mit steigender Bemessungsleistung der untersuchten Transformatoren. Betrachtet man jeden Prüfling für sich, so steigt die Unsymmetrie mit größer werdendem Übersetzungsverhältnis des Anpasstransformators; das Spannungssystem mit der höchsten Symmetrie ließ sich mit dem Motor-Generator-Satz bzw. bei TR3 mit dem Frequenzumrichter in Verbindung mit dem kleinsten möglichen Übersetzungsverhältnis des Anpasstransformators erreichen. Bis auf zwei Ausnahmen lagen jeweils beide ermittelten Kennwerte für die Unsymmetrie unter dem geforderten Grenzwert von 3 %.

Die Verzerrung der Prüfspannung steigt ebenfalls mit wachsender Bemessungsleistung und somit wachsendem Leerlaufstrom des Prüflings sowie mit wachsendem Übersetzungsverhältnis des Anpasstransformators. Dieses Verhalten liegt im nicht sinusförmigen Spannungsabfall über den Längsreaktanzen im Kreis begründet, der durch den nicht sinusförmigen Leerlaufstrom hervorgerufen wird und bei steigendem Leerlaufstrom oder Erhöhung der wirksamen Reaktanz größer wird. Zusätzlich nimmt durch die eingesetzte statische Pulsweitenmodulation die Verzerrung der Spannung bei Verringerung des Aussteuergrads des Wechselrichters zu. Gleichzeitig stellt man fest, dass die Bewertung der Verzerrungsfreiheit der Spannung mit unterschiedlichen Bewertungskriterien zu unterschiedlichen Aussagen darüber führt, ob eine akzeptable Schwingungsform der Prüfspannung vorliegt. Ergebnisse, bei denen alle

	400 V	800 V	1250 V	1600 V	Stelltrafo	M.-G.-Satz	800 V (1,1*U _N)
$\left \frac{U - \bar{U}}{\bar{U}} \right $	0,23 %	0,4 %	1,03 %	1,14 %	0,76 %	0,07 %	0,88 %
$\left \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \right $	0,43 %	0,7 %	1,85 %	1,88 %	1,32 %	0,13 %	1,42 %
THD _{max}	1,92 %	2,86 %	3,97 %	4,51 %	1,44 %	0,66 %	3,78 %
d _{max}	0,32 %	0,37 %	0,78 %	0,87 %	0,23 %	0,13 %	0,83 %
$\left \frac{\hat{U} - \sqrt{2}U_{\text{eff}}}{\sqrt{2}U_{\text{eff}}} \right _{\max}$	1,37 %	6,47 %	7,05 %	7,96 %	0,86 %	0,33 %	8,08 %
$\left \frac{ \hat{U}_{\text{pos}} - \hat{U}_{\text{neg}} }{\text{MIN}(\hat{U}_{\text{pos}} , \hat{U}_{\text{neg}})} \right _{\max}$	0,59 %	1,75 %	1,26 %	2,73 %	0,1 %	0,56 %	0,94 %
P ₀	568,48 W	565,83 W	566,6 W	571,1 W	563,19 W	561,34 W	794,58 W
\bar{I}_{eff}	4,38 A	3,06 A	3,03 A	3,28 A	2,77 A	2,78 A	6,97 A

Tabelle 2 Ergebnisse der Leerlaufmessung an TR1

	400 V	800 V	1250 V	1600 V	Stelltrafo	M.-G.-Satz	1250 V (1,1*U _N)
$\left \frac{U - \bar{U}}{\bar{U}} \right $	0,34 %	0,9 %	1,02 %	1,18 %	0,69 %	0,11 %	1,22 %
$\left \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \right $	0,6 %	1,62 %	2,03 %	2,38 %	1,25 %	0,2 %	2,41 %
THD _{max}	1,48 %	6,52 %	4,99 %	9,97 %	1,21 %	0,61 %	6,86 %
d _{max}	0,29 %	0,78 %	1,01 %	1,62 %	0,08 %	0,15 %	1,6 %
$\left \frac{\hat{U} - \sqrt{2}U_{\text{eff}}}{\sqrt{2}U_{\text{eff}}} \right _{\max}$	0,61 %	20,24 %	12,62 %	24,76 %	0,89 %	0,24 %	12,79 %
$\left \frac{ \hat{U}_{\text{pos}} - \hat{U}_{\text{neg}} }{\text{MIN}(\hat{U}_{\text{pos}} , \hat{U}_{\text{neg}})} \right _{\max}$	0,45 %	1,49 %	1,12 %	1,3 %	0,21 %	0,69 %	1,16 %
P ₀	634,48 W	640,94 W	645,48 W	625,55 W	636,92 W	634,52 W	863,49 W
\bar{I}_{eff}	3,49 A	3,67 A	3,49 A	3,71 A	3,29 A	3,29 A	7,28 A

Tabelle 3 Ergebnisse der Leerlaufmessung an TR2

Kriterien eine befriedigende Prüfspannung attestieren, konnten wiederum nur bei Speisung mit dem Motor-Generator-Satz, mit dem Stelltransformator oder mit dem statischen Frequenzumrichter erreicht werden, wenn in diesem Fall die niedrigste Anzapfung des Anpasstransformators benutzt wurde. In allen anderen Fällen konnten nur die Anforderungen an die in [2] eingeführte Kenngröße d ausnahmslos eingehalten werden.

Die Analyse der ermittelten korrigierten Leerlaufverluste ergab, dass bei diesen Versuchen beide Korrekturverfahren bis auf vernachlässigbare Abweichungen identische Ergebnisse hervorbringen; die relative Differenz der maximal und minimal ermittelten Werte steigt mit wachsender Bemessungsleistung der untersuchten Verteiltransformatoren. Bei TR1 nimmt die relative Differenz der maximal und minimal ermittelten Leerlaufverluste 1,74 % an, bei TR2 steigt dieser Wert auf 3,19 % und bei TR3 auf 10,99 % an.

	400 V	800 V	1250 V	1600 V	Stelltrafo	M.-G.-Satz	800 V (1,05*U _N)
$\left \frac{U - \bar{U}}{\bar{U}} \right $	0,61 %	1,17 %	1,96 %	1,98 %	0,63 %	0,72 %	0,99 %
$\left \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \right $	0,96 %	2,16 %	3,24 %	3,24 %	1,18 %	1,35 %	1,53 %
THD _{max}	2,29 %	9,27 %	11,52 %	13,27 %	2,76 %	2,79 %	16,29 %
d _{max}	0,59 %	1,97 %	3,49 %	4,16 %	0,91 %	1,01 %	4,91 %
$\left \frac{\hat{U} - \sqrt{2}U_{\text{eff}}}{\sqrt{2}U_{\text{eff}}} \right _{\max}$	0,7 %	2,23 %	11,56 %	20,46 %	2,01 %	2,11 %	13,66 %
$\left \frac{ \hat{U}_{\text{pos}} - \hat{U}_{\text{neg}} }{\text{MIN}(\hat{U}_{\text{pos}} , \hat{U}_{\text{neg}})} \right _{\max}$	0,19 %	1,09 %	3,01 %	2,69 %	0,18 %	0,54 %	0,57 %
P ₀ in W	1395,5 W	1349,77 W	1278,09 W	1295,93 W	1418,27 W	1418,58 W	1946,24 W
\bar{I}_{eff} in A	18,39 A	17,63 A	16,04 A	16,61 A	18,82 A	18,88 A	51,91 A

Tabelle 4 Ergebnisse der Leerlaufmessung an TR3

Bildet man die relative Differenz der korrigierten Leerlaufverluste zwischen der Messung mit der besten Spannungsform bei Speisung mit statischem Frequenzrichter und konventioneller Speisung, resultiert eine Abweichung von 1,27 % bei TR1, 0,63 % bei TR2 und 1,63 % bei TR3. Die Abweichungen der Leerlaufverluste zwischen Stelltransformator und Motor-Generator-Satz liegen jeweils unter 0,5 % und sind somit zu vernachlässigen.

Die Analyse der gemessenen Leerlaufströme zeigt bei den drei Verteiltransformatoren kein einheitliches Verhalten; insbesondere bei TR1 ist jedoch eine starke Abweichung der maximal und minimal gemessenen Werte festzustellen.

3.2 Weitere Ergebnisse

In Tabelle 2, Tabelle 3 und Tabelle 4 werden den Ergebnissen bei Bemessungsspannung zusätzlich die Messwerte bei Betrieb mit 110 % bzw. 105 % der Nennerregung gegenübergestellt. Die Symmetrie des speisenden Spannungssystems sowie die Verzerrung der Spannung liegen auch oberhalb der Nennerregung im Bereich der Werte bei Bemessungsspannung. Bei jedem Prüfling wird jedoch mindestens eine der zuvor gestellten Forderungen an die Spannungsform nicht eingehalten, da hier die durch die nichtlineare Magnetisierungskennlinie bedingte Zunahme des Anteils der ungeradzahigen, insbesondere der fünften, Harmonischen im Leerlaufstrom der Verbesserung der Schwingungsform durch die Erhöhung des Aussteuergrads des Wechselrichters entgegenwirkt.

Tabelle 5 zeigt die Auswirkung der Variation der Schaltfrequenz des Wechselrichters auf die Kennwerte der Symmetrie und der Verzerrung der Prüfspannung sowie

auf die Leerlaufverluste und den Leerlaufstrom des Verteiltransformators TR1 bei Nennerregung. Mit zunehmender Schaltfrequenz zeigt das Drehspannungssystem eine höhere Symmetrie und einen geringeren Verzerrungsgrad der Schwingungsform, was in einer besseren Nachbildung

	3 kHz	4 kHz	5 kHz
$\left \frac{U - \bar{U}}{\bar{U}} \right _{\max}$	0,62 %	0,2 %	0,23 %
$\left \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}} \right _{\max}$	1,07 %	0,38 %	0,43 %
THD _{max}	3,06 %	1,98 %	1,92 %
d _{max}	0,35 %	0,31 %	0,32 %
$\left \frac{\hat{U} - \sqrt{2}U_{\text{eff}}}{\sqrt{2}U_{\text{eff}}} \right _{\max}$	3,63 %	1,65 %	1,37 %
$\left \frac{ \hat{U}_{\text{pos}} - \hat{U}_{\text{neg}} }{\text{MIN}(\hat{U}_{\text{pos}} , \hat{U}_{\text{neg}})} \right _{\max}$	2,01 %	0,69 %	0,59 %
P ₀ in W	566,76	567,48	568,48
\bar{I}_{eff} in A	3,5	3,65	4,38

Tabelle 5 Variation der maximalen Schaltfrequenz

eines sinusförmigen Spannungsverlaufs bei höherer Schaltfrequenz durch das verwendete Verfahren der

Pulsweitenmodulation begründet liegt. Wie aus den Oszillogrammen in Abbildung 2 und Abbildung 3 zu erkennen ist, steigt die Amplitude der schaltfrequenten Anteile im Leerlaufstrom mit der Schaltfrequenz an und verursacht den in Tabelle 5 dokumentierten Anstieg der korrigierten Leerlaufverluste und des gemessenen Leerlaufstroms.

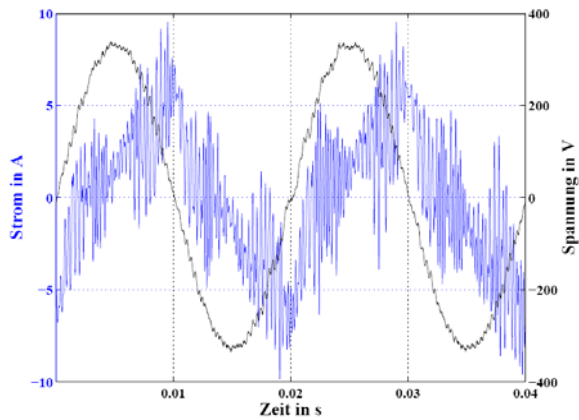


Abbildung 2 Leerlaufmessung an TR1, $f_s = 3 \text{ kHz}$

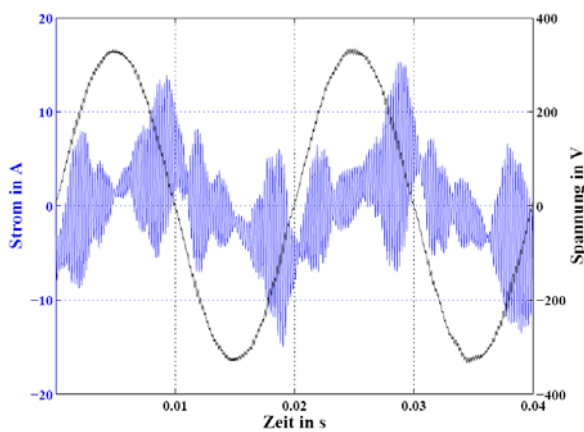


Abbildung 3 Leerlaufmessung an TR1, $f_s = 5 \text{ kHz}$

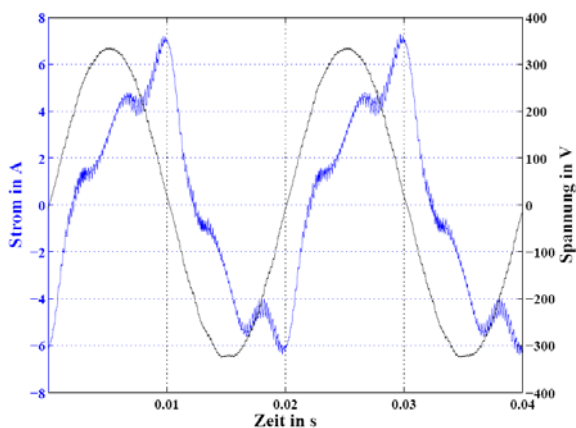


Abbildung 4 Leerlaufmessung an TR2, $f_s = 5 \text{ kHz}$

Abbildung 4 zeigt zusätzlich, dass die Amplitude der schaltfrequenten Anteile im Leerlaufstrom bei unterschiedlichen Verteilstransformatoren mit vergleichbarem Leerlaufstroms variieren kann.

4 Zusammenfassung

Bei allen durchgeführten Leerlaufmessungen zeigte das am Prüfling anliegende Drehspannungssystem eine akzeptable Symmetrie: Die Auswertung der vorgestellten Bewertungskriterien weist bis auf zwei Ausnahmen eine relative Abweichung des Scheitelwerts, des Effektivwerts und des Gleichrichtwerts der drei Phasen von unter 3 % nach. Fordert man die Einhaltung der Grenzwerte aller vorgestellten Kriterien zur Beurteilung der Verzerrungsfreiheit, so muss das Übersetzungsverhältnis des Anpasstransformators bei Leerlaufmessungen mit Speisung durch den statischen Frequenzumrichter so gering wie möglich gewählt werden; optimale Ergebnisse lassen sich bei maximaler Schaltfrequenz mit derjenigen Anzapfung des Anpasstransformators erzielen, die gerade der Nennspannung des Prüflings entspricht. Während sich die korrigierten Werte der Leerlaufverluste und die ermittelten Leerlaufströme bei konventioneller Speisung mit rotierendem Umformer und Stelltransformator nur in sehr geringem Ausmaß unterscheiden, so weichen die mit statischem Frequenzumrichter gemessenen Leistungen und Ströme von diesen Ergebnissen ab und variieren mit der Übersetzung des Anpasstransformators und der eingestellten Schaltfrequenz unterschiedlich stark. Am vorgestellten Beispiel TR1 lässt sich erkennen, dass bei Speisung mit statischem Frequenzumrichter die Abweichung der Messwerte zu den bei konventioneller Speisung gemessenen Verlusten und Leerlaufströmen mit einer Reduktion der Schaltfrequenz abnimmt, die Unsymmetrie des erzeugten Drehspannungssystems und die Verzerrung der Spannungsform jedoch ansteigt. Somit muss bei der Verwendung eines statischen Frequenzumrichters ohne Regelung der Ausgangsspannung bei der Einstellung der Schaltfrequenz ein Kompromiss zwischen der Qualität der Spannungsform und einer Abweichung der gemessenen Leerlaufverluste eingegangen werden.

5 Literatur

- [1] Arseneau, R., So, E., Hanique, E: Measurements and Correction of No-Load Losses of Power Transformers, IEEE Transactions in Instrumentation and Measurement, Vol. 54, NO. 2, April 2005
- [2] IEC 60076-1, Power transformers, Part 1: General, 1993
- [3] IEC 60060-1, High-voltage test techniques, Part 1: General definitions and test requirements, 1989
- [4] IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulation Transformers, IEEE Std C57.12.90, 2006
- [5] IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulation Transformers, IEEE Std C57.12.90, 2006