



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE
EMDEN•LEER**



Labor

Grundlagen der Elektrotechnik

FB Technik, Abteilung Elektrotechnik und Informatik

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik B

Versuch B-3

Drehstromtransformator

Name, Vorname:

Matrikel-Nr.:

Gruppe:

WS / SS

Vorbereitung:

Durchführung:

Rücksprachen / Nachbesserungen:

Testat:

1 Versuchsanleitung

Ziel dieses Versuches ist es, die Funktionsweise des Transformators am Beispiel eines dreiphasigen Transformators kennenzulernen. Grundlage hierfür bildet das einphasige Ersatzschaltbild. Nachfolgend sollen anhand zweier Betriebszustände (Leerlauf und Kurzschluss) die Parameter des einphasigen Ersatzschaltbildes vollständig bestimmt werden.

Bitte nutzen Sie dazu auch Ihre Vorlesungsunterlagen aus den Vorlesungen Elektrotechnik 3 und Elektrische Energietechnik.

1.1 Grundlagen

Aufgrund des Betriebsverhaltens des Transformators kann die Einspeisung von jeder Seite erfolgen, d.h. die Richtung des Leistungsflusses legt Primär- und Sekundärseite fest. In vielen Fällen nimmt die Oberspannungsseite Energie auf (Primärseite) und gibt sie auf der Unterspannungsseite (Sekundärseite) wieder ab.

Beim Einphasen-Transformator sind prinzipiell zwei Wicklungen mit den Windungszahlen w_1 und w_2 über einen gemeinsamen Eisenkern miteinander magnetisch gekoppelt (Bild 1, links). Die beiden Wicklungen lassen sich auch auf einen der beiden Schenkel konzentrieren (Bild 1, rechts).

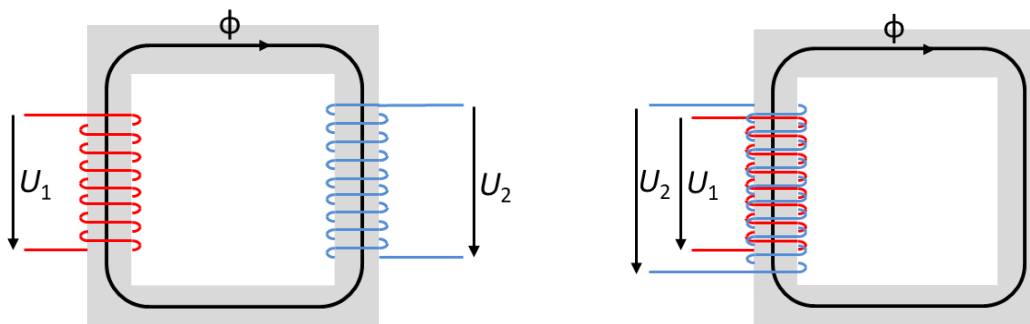


Bild 1: Einphasentransformator

Werden nun drei dieser Transformatoren an ein symmetrisches Drehstromsystem angeschlossen und magnetisch wie in Bild 2 verbunden, so ergibt sich für den magnetischen Fluss in allen Schenkeln i

$$\Phi_i = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \quad (1)$$

Für den gemeinsamen Schenkel bedeutet das, dass der magnetische Fluss bei dieser Anordnung zu Null wird. Würde eine Leiterschleife um den freien Schenkel gelegt, würde sich keine Induktionsspannung in dem Leiter ergeben, so dass der freie Schenkel entfallen kann.

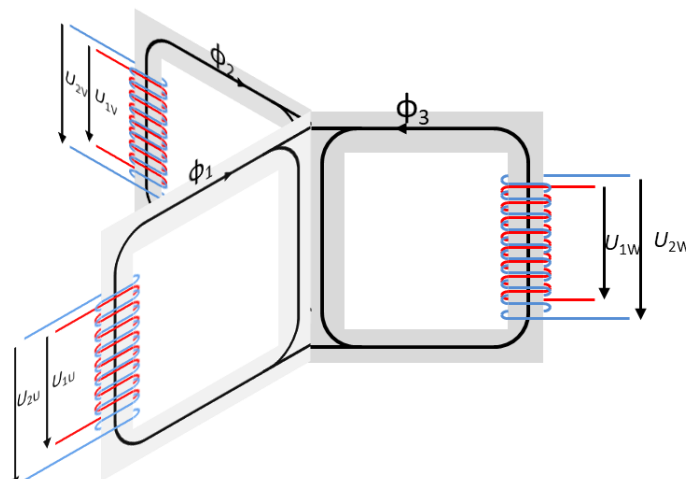


Bild 2: Drei magnetisch gekoppelte Einphasentransformatoren

Diese Bauart ist auch ohne den mittleren Schenkel konstruktiv sehr aufwendig. Daher wird im Allgemeinen ein Kerntransformator, wie in Bild 3 dargestellt, mit drei auf einer Ebene angeordneten Schenkeln verwendet. Jeder Schenkel trägt das Wicklungssystem einer Phase. Aufgrund des Aufbaus sehen die Flüsse Φ_1 und Φ_3 einen größeren magnetischen Widerstand als der Fluss Φ_2 , daher benötigen Sie immer einen höheren Magnetisierungsstrom.

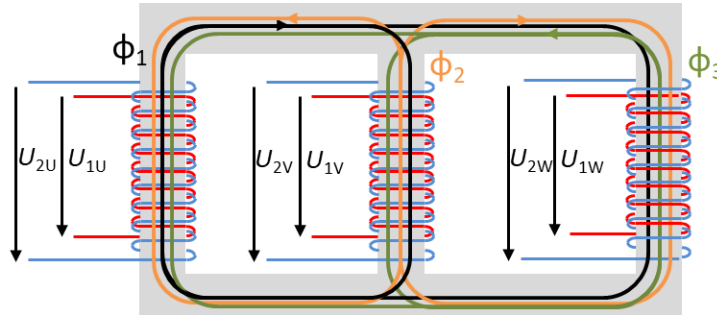


Bild 3: Dreiphasentransformator

Das Ersatzschaltbild des Einphasen-Transformators kann im symmetrischen Fall zur Ermittlung des Betriebsverhaltens des Drehstromtransformators verwendet werden (Bild 4).

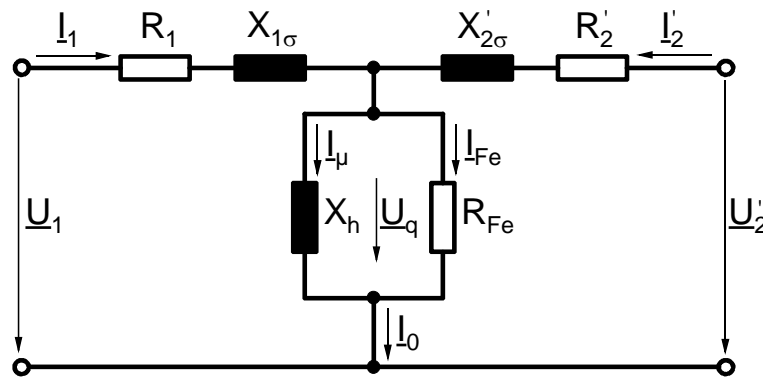


Bild 4: Vollständige Ersatzschaltung eines Einphasen-Transformators

Mit den nachfolgenden Gleichungen können die sekundären Größen auf die Primärseite umgerechnet werden, dabei ist das Übersetzungsverhältnis wie in Gl. 2 definiert.

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} \quad (2)$$

$$U'_2 = U_2 \cdot \ddot{u} \quad (3) \quad I'_2 = I_2 \cdot \frac{1}{\ddot{u}} \quad (4)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot \ddot{u}^2 \quad (5) \quad X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \ddot{u}^2 \quad (6)$$

Im **Leerlauf** dürfen R_1 und $X_{1\sigma}$ gegenüber dem Quersweig vernachlässigt werden.

Der hochohmige Quersweig darf vernachlässigt werden

- bei der Auswertung des **Kurzschlussversuches** und
- zur Untersuchung der Spannungshaltung eines Transformators bei symmetrischer Belastung im Nennbetrieb.

Man erhält das vereinfachte Ersatzschaltbild in Bild 5 mit den auf die Primärseite bezogenen Größen.

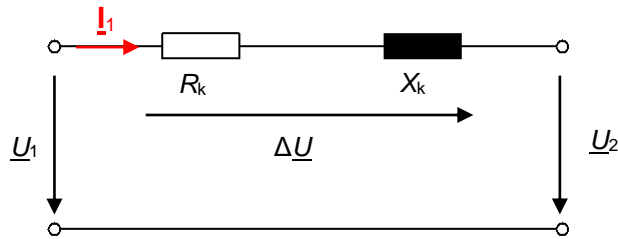


Bild 5: Vereinfachte Ersatzschaltung eines Transformators

Es gilt:

$$R_k = R_1 + R'_2 \quad (7)$$

$$X_k = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \quad (8)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (9)$$

In Bild 6 ist schematisch das Zeigerdiagramm der vereinfachten Ersatzschaltung bei ohmsch-induktiver Belastung wiedergegeben. Der Spannungsabfall $\Delta \underline{U}$ am Transformator ergibt sich aus dem Längs- und Querspannungsabfall. Der Längsspannungsabfall verläuft parallel zur Spannung \underline{U}'_2 , der Querspannungsabfall steht hingegen senkrecht darauf.

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_\ell + j\underline{U}_q \quad (10)$$

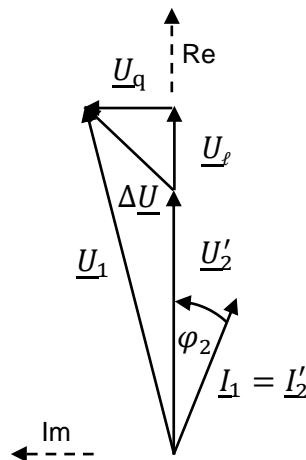


Bild 6: Zeigerdiagramm der vereinfachten Ersatzschaltung

Längs- und Querspannungsabfall lassen sich wie folgt berechnen:

$$\text{Längsspannungsabfall:} \quad U_\ell = R_k \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_k \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 \quad (11)$$

$$\text{Querspannungsabfall:} \quad U_q = -R_k \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2 + X_k \cdot I_1 \cos \varphi_2 \quad (12)$$

Der relative Spannungsfall $\Delta u'_2$ auf der Sekundärseite ergibt sich damit zu:

$$\Delta u'_2 = \frac{U_1 - U'_2}{U_1} = 1 + \frac{U_\ell}{U_1} - \sqrt{1 - \left(\frac{U_q}{U_1}\right)^2} \quad (13)$$

1.2 Bestimmung der Parameter des vollständigen Ersatzschaltbildes

Die Parameter des vollständigen Ersatzschaltbildes lassen sich aus dem Leerlauf- und Kurzschlussversuch ermitteln. Dazu wird im Leerlauf ($I_2 = 0$) der Strom I_0 sowie die (dreiphasige) Wirkleistung P_0 der Primärseite gemessen. Die Wirkleistung ist im Leerlauf primär abhängig von der Spannung. Im Kurzschlussversuch ($U_2 = 0$) hingegen wird die verkettete Kurzschlussspannung U_k auf der Primärseite ermittelt. Dazu wird die Spannung an der Primärseite soweit erhöht, bis der Nennstrom I_{1N} fließt. Üblicherweise wird bei Leistungstransformatoren nicht die Kurzschlussspannung, sondern die relative Kurzschlussspannung u_k angegeben. Sie lässt sich mit Hilfe der Nennspannung U_N wie folgt berechnen:

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} \quad (14)$$

Ferner wird im Kurzschlussversuch die (dreiphasige) Verlustleistung P_k gemessen, welche im Gegensatz zur Leistung P_0 primär vom Strom abhängig ist. Zusammen mit der Nennscheinleistung S_N des Transformators lässt sich nun das Ersatzschaltbild für den symmetrischen Betrieb bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass im Leerlauf die Längsimpedanzen und im Kurzschluss die Quersimpedanzen des Ersatzschaltbildes vernachlässigt werden dürfen.

In Netzberechnungsprogrammen werden die Modelle der Leistungstransformatoren über die genannten Parameter (P_0 , I_0 , P_k , u_k , S_N) parametrisiert (Bild 6).

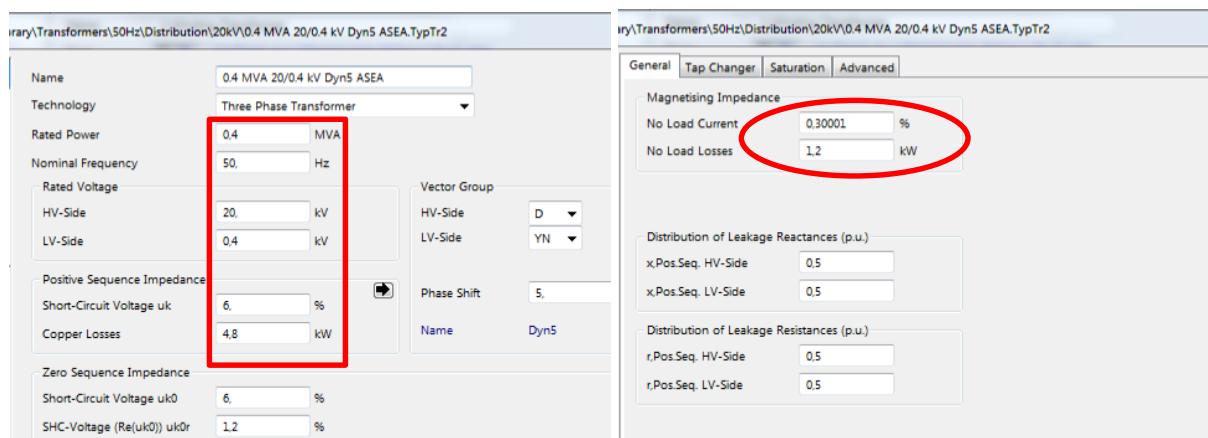


Bild 6: Basisdaten eines Transformators (Netzberechnungssoftware PowerFactory)

1.3 Allgemeine Hinweise

Bei Transformatoren werden die Wicklungsenden 1U mit L1, 1V mit L2 und 1W mit L3 des primärseitigen Drehspannungssystems und die Wicklungsenden 2U mit L1, 2V mit L2 und 2W mit L3 des sekundärseitigen Drehspannungssystems verbunden. Bild 7 zeigt das Typenschild des Transformators, dessen Ersatzschaltung im Versuch zu bestimmen ist. Der Transformator soll in der Schaltgruppe Yy0 betrieben werden.

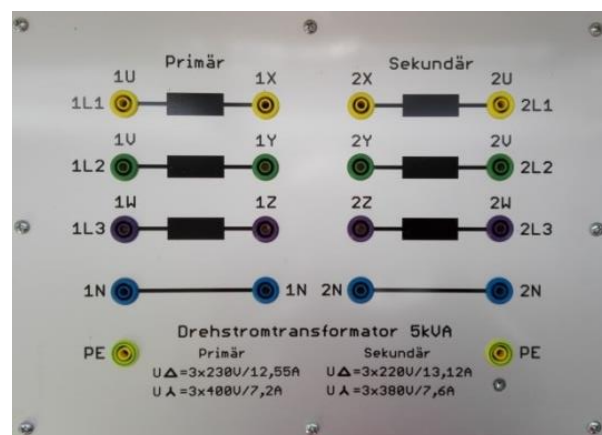


Bild 7: Typenschild des Drehstromtransformators

1.4 Aronschaltung

Mit der Aronschaltung lassen sich Leistungen in Dreiphasensystemen messen. Anstelle von drei Leistungsmessungen sind bei der Aronschaltung (Bild 8) nur zwei Messungen erforderlich.

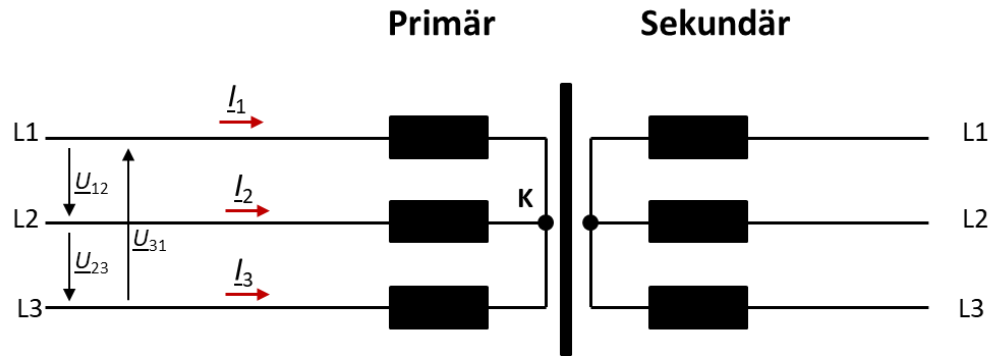


Bild 8: Aronschaltung

Für die Scheinleistung gilt allgemein

$$\underline{S} = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* \quad (15)$$

und bei Verwendung der Aronschaltung

$$\underline{S} = \underline{U}_{12} \cdot \underline{I}_1^* + \underline{U}_{32} \cdot \underline{I}_3^* \quad (16)$$

2 Vorbereitung

Die Versuchsvorbereitung ist Bestandteil des Versuchs. Sie erhalten dafür ein gesondertes Testat. Ohne testierte Vorbereitung können Sie den Versuch nicht durchführen.

2.1 Ersatzschaltbild Transformator

- Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild (Sternschaltung) des Transformators und geben Sie an, wie die einzelnen Werte und das Übersetzungsverhältnis \bar{u} aus dem Leerlauf- und dem Kurzschlussversuch berechnet werden können.
- Machen Sie sich die Bedeutung der einzelnen Bauelemente des vollständigen Ersatzschaltbildes klar (wird abgefragt). Welche Bedeutung haben die „gestrichenen“ Größen?
- Wie groß darf der Strom im Kurzschlussversuch maximal werden? Begründen Sie Ihre Aussage.
- Leiten Sie her, wie die Verlustleistung des Transformators in einem beliebigen Betriebspunkt (vorgegeben durch den Strom \underline{I}_1) aus den Verlusten der Leerlauf- und Kurzschlussmessung ermittelt werden kann.
- Leiten Sie anhand des Zeigerdiagramms (Bild 6) die Formeln für den Längs- und Querspannungsabfall her.
- Leiten Sie anhand des Zeigerdiagramms (Bild 6) und den Formeln für den Längs- und Querspannungsabfall die Formel (12) für den relativen Spannungsfall auf der Sekundärseite her.
- Welche Aussagekraft hat die relative Kurzschlussspannung für den Betrieb des Transformators?

2.2 Aronschaltung zur Leistungsmessung

- Leiten Sie her, warum Sie mit der Aronschaltung (Bild 8) die gesamte Scheinleistung im Dreiphasensystem messen können, sofern der Summenstrom im Knoten K zu Null angenommen werden kann.
- Skizzieren Sie das Ersatzschaltbild für den Transformator im Leerlauf. Zeichnen Sie das zugehörige qualitative Zeigerdiagramm für den Leerlauf.
- Zeigen Sie anhand dieses Zeigerdiagramms, warum Sie im Leerlaufversuch (Bild 9) mit der Aronschaltung eine negative Wirkleistung P_1 messen.

2.3 Symmetrische Drehstromlast

- Geben Sie an, wie Sie aus den Messwerten nach 3.2 (a) und (b) die gemittelten Größen U_m , I_m (siehe Versuch E2-4), den Leistungsfaktor $\lambda = \cos(\varphi)$, die Leistungen S , P und Q jeweils für die Primär- und die Sekundärseite berechnen können.
- Mit welcher Leistung können Sie den Transformator (Yy0) maximal belasten?

3 Aufgabenstellung

ACHTUNG: Für den Schaltungsaufbau bitte nur Sicherheitsleitungen und Messgeräte mit Sicherheitsbuchsen verwenden! Die Gehäuse sind über Schutzleiter (grün/gelbe Leitung) an PE erden! Das Oszilloskop ist nur über Trennteiler bzw. Wandler anzuschließen!

Der Transformator soll in der Baugruppe Yy0 geschaltet werden! Bitte überprüfen Sie das!

Nach jeder Messung ist die Versorgungsspannung des Transformators wieder auf 0 runterzufahren!

3.1 Messungen zur Ermittlung des vollständigen Ersatzschaltbildes des Drehstromtransformators

Bitte nutzen Sie für den Aufbau 6 digitale Multimeter zur Spannungsmessung und 3 analoge Multimeter zur Strommessung. Für die Messung mit dem Oszilloskop verwenden Sie für die Spannung potentialfreie Tastköpfe und die Stromwandler zur Messung des Stromes.

Leerlaufversuch: ($U_N \leq U_0 \leq 1,05 U_N$)

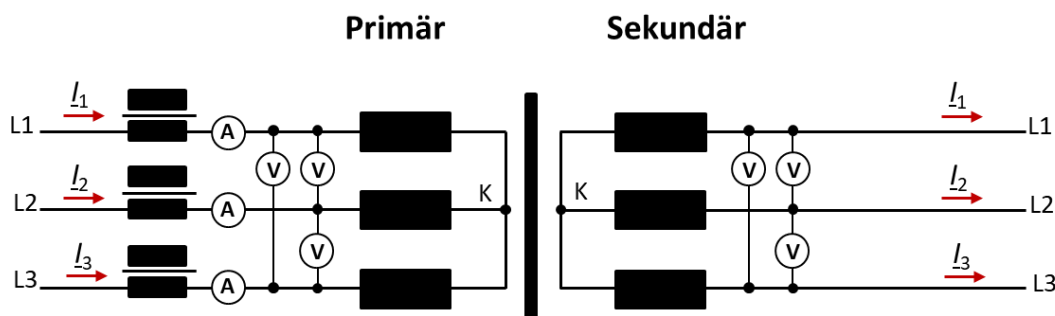


Bild 9: Leerlaufversuch

- (a) Messen Sie die Leerlaufspannung U_0 sowie den Leerlaufstrom I_0 auf der Primärseite und die Leerlaufspannung U_{20} auf der Sekundärseite für alle drei Phasen. Messen Sie ebenfalls alle zugehörigen Phasenwinkel der Primärseite. Beziehen Sie die Winkel auf \underline{U}_{12} der Primärseite.

Kurzschlussversuch: ($I_k = I_N$, Spannung beachten!)

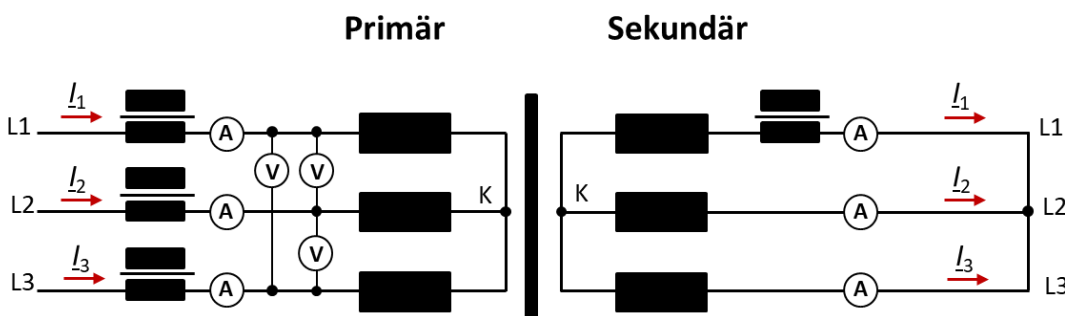


Bild 10: Kurzschlussversuch

- (b) Bestimmen Sie den Nennstrom des Transformators.
- (c) Messen Sie bei primärseitigem Nennstrom (Kurzschlussstrom) die Kurzschlussspannung U_K und den sekundären Kurzschlussstrom I_{2k} aller drei Phasen sowie die zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf \underline{U}_{12} der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen \underline{U}_{12} und \underline{I}_1 bezogen auf \underline{U}_{12} .

3.2 Messungen bei symmetrischer Drehstromlast auf der Sekundärseite

Belasten Sie den Transformator mit der ohmsch-induktiven Last nach Bild 11.

Bitte achten Sie auf den Nennstrom! ($U_{12} = 400 \text{ V}$ primärseitig).

Verwenden Sie zur Strommessung analoge und zur Spannungsmessung digitale Messgeräte.

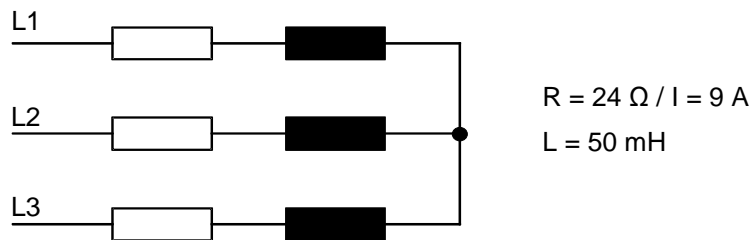


Bild 11: ohmsch-induktive Last

(a) Dürfen Sie diese Last mit dem Transformator betreiben? Begründen Sie!

Schaltgruppe Yy0

(b) Messen Sie alle Effektivwerte der Außenleiterspannungen und der Außenleiterströme auf der Primär- und Sekundärseite sowie alle zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf \underline{U}_{12} der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen \underline{U}_{12} und \underline{I}_1 bezogen auf \underline{U}_{12} . Messen Sie ebenfalls den Winkel zwischen den beiden Spannungen \underline{U}_{12} auf der Primär- und der Sekundärseite.

Schaltgruppe Dy5

Verschalten Sie nun die Primärseite in Dreieck. Die Last auf der Sekundärseite bleibt wie unter (a). Begrenzen Sie die verkettete primärseitige Spannung auf $U_{12} = 230 \text{ V}$ (maximal Nennstrom!).

(c) Messen Sie alle Effektivwerte der Außenleiterspannungen und der Außenleiterströme auf der Primär- und Sekundärseite sowie alle zugehörigen Phasenwinkel. Beziehen Sie die Winkel auf der Primärseite auf \underline{U}_{12} der Primärseite. Auf der Sekundärseite messen Sie den Winkel zwischen \underline{U}_{12} und \underline{I}_1 bezogen auf \underline{U}_{12} . Messen Sie ebenfalls den Winkel zwischen den beiden Spannungen \underline{U}_{12} auf der Primär- und der Sekundärseite.

Die Primärseite bitte am Ende der Messung wieder in Stern verschalten!

4 Auswertungen

4.1 Ersatzschaltbild Transformator

- (a) Zeichnen Sie das vollständige einphasige Ersatzschaltbild (Sternschaltung) des Transformators.
- (b) Bestimmen Sie die Leistung im Leerlauf auf der Primärseite nach Gleichung (16).
- (c) Bestimmen Sie die Wirkleistung im Kurzschlussfall auf der Sekundärseite nach Gleichung (16).
Gehen Sie dabei von einem symmetrischen System aus.
- (b) Ermitteln Sie die Daten des vollständigen Ersatzschaltbildes des Transformators mit der Annahme $X_{1\sigma} = X'_{2\sigma}$ sowie $R_1 = R_2$.
- (c) Berechnen Sie anhand des Kurzschlussversuches die relative Kurzschlussspannung des Transformators.

4.2 Symmetrische Drehstromlast

- (a) Berechnen Sie aus den Messwerten nach 3.2(b) die gemittelten Größen U_m , I_m und φ_m (siehe Versuch E2-4), den Leistungsfaktor $\lambda = \cos(\varphi_m)$, die Leistungen S , P und Q jeweils für die Primär- und die Sekundärseite.
- (b) Berechnen Sie die Verlustleistung des Transformators sowie den Wirkungsgrad mit den Ergebnissen aus 4.2(a).
- (c) Bestimmen Sie die Verlustleistung für 3.2(b) nach 2.1(d) und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Wert aus 4.2(b). Begründen Sie Ihre Beobachtungen.
- (d) Berechnen Sie aus den Messwerten nach 3.2(b) und dem Übersetzungsverhältnis u den relativen Spannungsfall $\Delta u'_2$!
- (e) Bestimmen Sie anhand der Formeln (11) - (13) den relativen Spannungsabfall für 3.2(b).
- (f) Vergleichen Sie die primär- und sekundärseitigen Spannungen und Ströme aus 3.2(b) und 3.2(c) miteinander.