



HTL ST. PÖLTEN

Antriebstechnik

Part III - Transformator

V: 0.1.3

Dipl. Ing. Erich Schubert
HTBLuVA St.Pölten
A-3100 St. Pölten, Waldstraße 3

Inhaltsverzeichnis

16 Trafo	16-1
16.1 Grundlagen und Wirkungsweise	16-1
16.1.1 Aufbau des Transformators	16-2
16.1.2 Induktionsgesetz	16-3
16.1.3 Durchflutungsgesetz	16-4
16.1.4 Übersetzungsverhältnisse (Trafogleichungen)	16-4
16.1.4.1 Transformatorhauptgleichung	16-5
16.1.5 Bauformen	16-6
16.2 Ersatzschaltbilder	16-8
16.2.1 ESB des streuungslosen verlustfreien Transformators	16-9
16.2.2 ESB des Transformators mit Streuung	16-12
16.2.3 ESB mit Streuung und Widerständen	16-14
16.2.4 Das vollständige ESB des Transformators	16-15
16.3 Betriebsverhalten	16-18
16.3.1 Der Transformator im Leerlauf	16-18
16.3.1.1 Leerlaufversuch	16-18
16.3.1.2 Tatsächlicher Verlauf des Leerlaufstromes	16-19
16.3.1.3 Rush-Effekt	16-20
16.3.2 Der Transformator im Kurzschluss	16-21
16.3.2.1 Kurzschlussversuch	16-22
16.3.2.2 Kurzschlussvorgang	16-22
16.3.3 Zusammenstellung der Berechnungsgleichung	16-22
16.4 Betriebsverhalten	16-22
16.4.1 Typenschild des Transformators	16-22
16.4.2 Typenschild des Transformators	16-22
16.4.3 Der Transformator im Betrieb	16-22
16.4.4 Spannungsänderung	16-22
16.4.4.1 Das Kapp'sche Dreieck	16-22
16.4.4.2 zeichnerische Ermittlung der Spannungsänderung	16-22
16.4.5 Parallel -und Kettenschaltung von Transformatoren	16-22
16.4.5.1 Parallelschaltung	16-22
16.4.5.2 Kettenschaltung mehrere Transformatoren	16-22
16.4.6 Wirkungsgrad	16-22
17 Drehstromtransformatoren	17-1
17.1 allgemeines	17-2

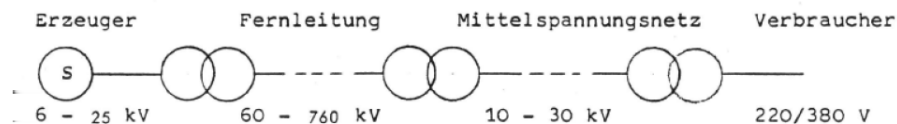
17.2	Aufbau und Transformatortypen	17-2
17.2.1	Tempeltyp	17-2
17.2.2	Kerntyp	17-2
17.3	Überlegungen zum Magnetisierungsstrom	17-2
17.3.1	Sternschaltung mit angeschlossenem Sternpunktleiter (freie Magnetisierung)	17-2
17.3.2	Sternschaltung ohne Sternpunktleiter (erzwungene Magnetisierung)	17-2
17.3.3	Dreieckschaltung	17-2
17.3.4	Anschlussbezeichnungen	17-2
17.4	Schaltungsarten und Schaltgruppen	17-2
17.4.1	Dreieck-Sternschaltung	17-2
17.4.2	Dreieck-Zickzack-Schaltung	17-2
17.5	häufig verwendete Transformatorschaltungen	17-2
17.6	Schiefelastfähigkeit	17-2
17.6.1	Schaltgruppe Yyn0	17-2
17.6.2	Schaltgruppe Yzn5	17-2
17.6.3	Schaltgruppe Yyn0 mit Ausgleichswicklung	17-2
17.6.4	Schaltgruppe Yy0, Einphasige Last zwischen zwei Außenleitern .	17-2
17.7	Sternpunktverlagerung durch Schiefelast	17-2
17.8	Der Drehstromtransformator bei symmetrischer Last	17-2
17.8.1	Besonderheiten bei der Z-Schaltung	17-2
17.8.2	Vorgehensweise bei der Berechnung	17-2
17.8.2.1	Hinweise zu Zählpeilsystemen	17-2
17.9	Sondertransformatoren	17-2
17.9.1	Spartransformatoren	17-2
17.9.2	Messwandler	17-2
	Literaturverzeichnis	17-2
	Stichwortverzeichnis	17-3

16 Trafo

ID: at-ueberblick.tex

Im folgenden Kapitel werden ausschließlich Trafos für den Energietechnikbereich betrachtet. Es wird nicht auf die Besonderheiten von Klein- und Hochfrequenztrafos eingegangen („Elektroniktrafos“).

Transformatoren dienen vielfach zur Spannungswandlung in Energieversorgungsanlagen und in technischen Geräten. Die Energieübertragung über große Entfernungen erfordert im Hinblick auf geringe Verluste hohe Spannungen, allerdings mit den entsprechenden Sicherheitsproblemen. Deshalb wird innerhalb von Siedlungen oder bei kurzen Entfernungen das Mittelspannungsnetz mit geringeren Spannungen eingesetzt. Zwischen Quelle (Kraftwerk) und Verbraucher wird die Energie durchschnittlich 3x umgespannt (siehe Bild 16.1). Somit wird deutlich, dass bei Trafos hohes Augenmerk auf den Wirkungsgrad zu legen ist. Werte von 99,9% sind hier durchaus nicht selten zu finden.



ID: images/versorgungskette

Abbildung 16.1: Versorgungsstrecke Erzeuger - Verbraucher
(Quelle:[])

Eingesetzt wird der Transformator zu Umsetzung und Anpassung von Wechselspannungen (Drehspannungen).

16.1 Grundlagen und Wirkungsweise

ID: at-grundlagen.tex

Der Transformator verbindet Einphasen- und Mehrphasenwechselspannungsnetze gleicher Frequenz, aber mit meist unterschiedlicher Spannung. Die Kopplung der beiden Netze erfolgt mit Hilfe des magnetischen Feldes, so dass mit der Ausnahme von Spartransformatoren auch stets eine galvanische Trennung der Netze vorliegt. Daraus ergeben sich folgende Anwendungsbereiche:

- Spannungsanpassung und Änderung auf dem Wege vom Erzeuger zum Verbraucher
- Lastsymmetrierung im Drehstromnetz
- Galvanische Trennung von Netzen
- Einsatz als Stromwandler oder Spannungswandler

Es wird zunächst der Einphasentransformator behandelt, der Drehstromtransformator wird später auf den Einphasentransformator zurückgeführt. Zur Beschreibung der Funktionsweise benötigt man das Induktionsgesetz und das Durchflutungsgesetz.

typischerweise besteht ein Transformator aus einem magnetischen Kreis, welcher als Transformator Kern bezeichnet wird und mindestens zwei stromdurchflossene Wicklungen hat. Die der elektrischen Energiequelle zugewandte Wicklung wird als Primärseite bezeichnet. Diejenige, an welcher sich die elektrische Last befindet, wird als Sekundärseite bezeichnet.

Die Wirkungsweise lässt sich durch die folgenden Mechanismen beschreiben:

- Eine Wechselspannung auf der Primärseite des Transformators bewirkt entsprechend dem Induktionsgesetz einen wechselnden magnetischen Fluss im Kern. Der wechselnde magnetische Fluss wiederum induziert auf der Sekundärseite des Transformators eine Spannung (Spannungstransformation).
- Ein Wechselstrom in der Sekundärwicklung bewirkt dem Ampere'schen Gesetz entsprechend einen Wechselstrom in der Primärwicklung (Stromtransformation).

Bei niedriger Wechselstromfrequenz wird ein Eisenkern aus einem ferromagnetischen Material hoher Permeabilität verwendet. Damit können gegenüber Transformatoren ohne Eisenkern hohe magnetische Wechselflussdichten und damit eine wesentlich höhere Windungsspannung erzielt werden, was gewährleistet, dass die übertragbare Leistung groß ist im Vergleich zur Verlustleistung, die durch den ohmschen Widerstand in den Wicklungen entsteht. Einfach ausgedrückt, benötigt ein Transformator mit Eisenkern wesentlich weniger Windungen auf den Wicklungen als ein Trafo ohne Eisenkern. Der zum Aufbau des magnetischen Feldes benötigte Strom heißt Magnetisierungsstrom.

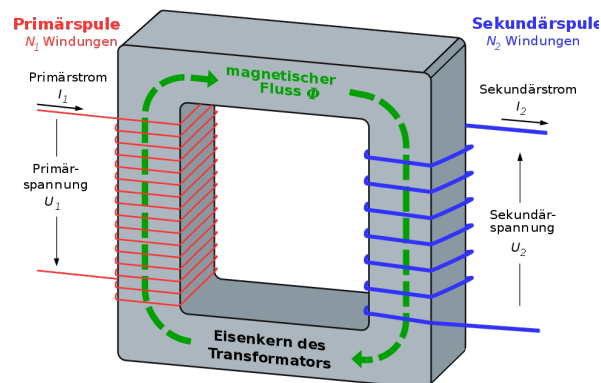
16.1.1 Aufbau des Transformators

ID: at-aufbau.tex

Aufgebaut wird ein Trafo mit zwei Spulen mit den Windungszahlen N_1 und N_2 und deren Induktivitäten L_1 und L_2 werden durch ein Eisenjoch miteinander verbunden. (siehe Abb.16.2)

→ **gegenseitige Induktion.**

Wegen des hohen magnetischen Permeabilität des Eisen durchläuft fast der gesamte magnet. Fluss durch beide Spulen.



ID: images/transformator.png

Abbildung 16.2: Prinzipskizze eines Transformators
(Quelle:[1])

16.1.2 Induktionsgesetz

ID: at-induktionsgesetz.tex

Durchsetzt ein sich zeitlich ändernder Fluss $\Phi(t)$ eine Leiterschleife mit N Windungen, so wird in dieser eine Spannung induziert. Wird der Fluss einem Strom in der Leiterschleife im Sinne einer Rechtsschraube zugeordnet und verwendet man dann das Erzeugerpeilsystem (EPS), so ist die erzeugte Spannung die induzierte Spannung.

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \dots \text{induzierte Spannung} \quad (16.1)$$

Für den Trafo nach Bild 16.2 ergeben sich somit die induzierten Spannungen:

$$U_{1,ind} = -L_1 \frac{dI_1}{dt} - L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (16.2)$$

$$U_{2,ind} = -L_2 \frac{dI_2}{dt} - L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (16.3)$$

Für den unbelasteten (idealen, streuflusslosen) Trafo erhält man somit

Spannungsübersetzungsverhältnis

$$\dot{u} = \frac{U_1}{U_2} = -\frac{N_1}{N_2}$$

bzw. mit umgekehrtem Vorzeichen, wenn die Spulen gegensinnig gewickelt wurden

Für sinusförmige Größen lassen sich die Spannungsgleichungen auch in komplexer Schreibweise darstellen:

$$\underline{U}_1 = j\omega N_1 \underline{\Phi} \quad (16.4)$$

$$\underline{U}_2 = j\omega N_2 \underline{\Phi} \quad (16.5)$$

16.1.3 Durchflutungsgesetz

ID: at-durchflutungsgesetz.tex

Zur Erzeugung von $\Phi(t)$ bedarf es einer Durchflutung $\Theta_\mu(t)$, die der in Abb. 16.2 eingezeichneten Kern-Kontur und dem gewählten Umlaufsinn rechtsgängig zuzuordnen ist.

$$\Theta_\mu = I_1 \cdot N_1 - I_2 \cdot N_2 \quad (16.6)$$

Die Größe von $\Theta_\mu(t)$ wird durch den von der Spannung vorgegebenen Fluss und dem magnetischen Widerstand des magnetischen Kreises vorgegeben. Setzt man näherungsweise den magnetischen Widerstand des Eisenkreises als konstant an, so darf man auch als Zeiger schreiben:

Durchflutungssatz

$$\underline{\Theta}_\mu = \underline{I}_1 \cdot N_1 - \underline{I}_2 \cdot N_2 \quad (16.7)$$

Die gewählten Bezugssinne in Verbindung mit den Wickelsinnen ergeben bei einem Eisenkreis mit $\mu_{Fe} \rightarrow \infty$ und damit $\Theta_1 \mu \rightarrow 0$ gleichphasige Ströme. In der Praxis weichen die Phasenlagen jedoch wegen der benötigten Durchflutung geringfügig voneinander ab. Bei Nennstrom ist $\Theta_1 \mu \approx (1..3)\%$ von $N_1 I_1$, mit kleineren Werten bei wachsender Nennleistung.

16.1.4 Übersetzungsverhältnisse (Trafogleichungen)

ID: at-uebersetzung.tex

Aus den Spannungsgleichungen ergibt sich das Spannungsübersetzungsverhältnis \ddot{u} , auch einfach Übersetzungsverhältnis genannt:

Spannungsübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Das Windungsverhältnis (turns ratio) ergibt sich aus dem Verhältnis der Windungszahl N_1 auf der Primärseite und der Windungszahl N_2 auf der Sekundärseite.

Bei einem realen Transformator ist dieses im Leerlauf, also bei $I_2 \approx 0$ hinreichend exakt erfüllt. Im Betrieb können Abweichungen von typischerweise bis zu 6% auftreten.

Aus der Durchflutung erhält man für $\Theta_\mu \rightarrow 0$ das Stromübersetzungsverhältnis

Stromübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u}_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Dieses Gesetz ist im Kurzschluss hinreichend genau erfüllt. Bei Nennstrom gibt es Abweichungen bis zu 3%. Im Leerlauf ist es ungültig. Für die weiteren Betrachtungen wird ausschließlich das Spannungsübersetzungsverhältnis verwendet.

Entsprechend dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik erhält man

Impedanzübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u}_Z = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_2^2}{N_1^2}$$

Bei einem idealen Transformator verhalten sich die auf die Primärseite transformierte sekundäre Belastung und die sekundäre Belastung wie die Quadrate der Windungszahlen.

16.1.4.1 Transformatorenhauptgleichung

ID: at-hauptgleichung.tex

Aus dem Induktionsgesetz folgt für sinusförmige Spannungen die als Transformatorenhauptgleichung bezeichnete Beziehung:

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_{\text{max}} \cdot A \cdot f \cdot N \approx 4,44 \cdot B_{\text{max}} \cdot A \cdot f \cdot N \quad (16.8)$$

Dabei ist U_{eff} der Effektivwert der Spannung, B_{max} die maximale magnetische Flussdichte im Kern, A die Querschnittsfläche des Transformatorkernelns f die Frequenz und N die Windungszahl.

Bei nicht-sinusförmigen Wechselspannungen ist die Konstante $\sqrt{2} \cdot \pi$ durch andere Werte zu ersetzen; etwa für Rechteckspannung durch 4 und für Dreieckspannung durch 4,62

16.1.5 Bauformen

ID: at-bauformen.tex

Der Trafo besteht aus zwei Hauptbauteilen:

- Wicklungen zur Stromführung
- Eisen zur Flussführung

Die Oberspannungswicklung (OS) ist die Wicklung mit der höheren Spannung, die mit der niedrigeren Spannung heißt Unterspannungswicklung (US). Die Begriffe Primärwicklung und Sekundärwicklung kennzeichnen die Energieflussrichtung (Primär → Sekundär). Das Kettenpfeilsystem wird so angewendet, dass die OS-Wicklung im Verbraucherpfeilsystem, die US-Wicklung im Erzeugerpfeilsystem dargestellt wird. Bei Drehstromtransformatoren gibt es auch Ausgleichwicklungen zur Lastsymmetrierung.

Im Energiebereich gibt es Öltransformatoren und Trockentransformatoren:

- Bei den Öltransformatoren sind Spulen und Eisen in einer Wanne, vollständig in Öl getaucht. Das Öl dient gleichzeitig als Isolier- und Kühlmittel. Nur ölverträgliche Stoffe dürfen verwendet werden, z.B. Papier und Pressspan als Isolierung und getrocknetes Buchenholz als Konstruktionsmaterial
- Bei Trockentransformatoren wird die Isolation wie bei einer rotierenden Maschine aus festen Isolierstoffen und Tränkharz aufgebaut

Die Wicklungen sind in der Regel aus Kupfer als Zylinderspulen hergestellt. Die kreisförmige Anordnung ergibt geringe Wicklungslängen (→ Verluste, Wirkungsgrad) bei größter umfasster Eisenfläche. Außerdem können kreisförmige Spulen besser die im Kurzschluss auftretenden großen Kräfte aufnehmen ohne die Isolation zu beschädigen. Rechteckspulen gibt es nur bei Transformatoren kleiner Leistung. Die Spulen können als Scheibenspulen (große Spannungen) (Abb. 16.3) oder als Röhrenspulen (niedrigere Spannungen) (Abb. 16.4) ausgeführt sein. Die Aufteilung auf einzelne Scheiben bedingt geringere Spannungen zwischen benachbarten Windungen und damit geringere Leiterisolation. Bei Röhrenspulen muss die Lagenisolation in Spulenhöhe der stei-

genden Lagenspannung in ihrer Stärke angepasst werden, bei der Scheibenspule wird dieses durch die Distanzierung der Spulen untereinander übernommen.

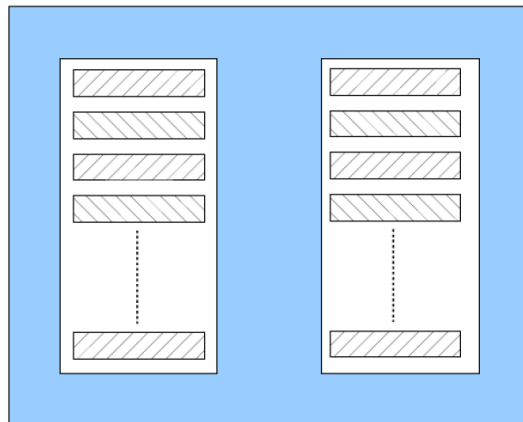


Abbildung 16.3: Prinzip Scheibenspulen
(Quelle:[])

ID: images/scheibenspulen

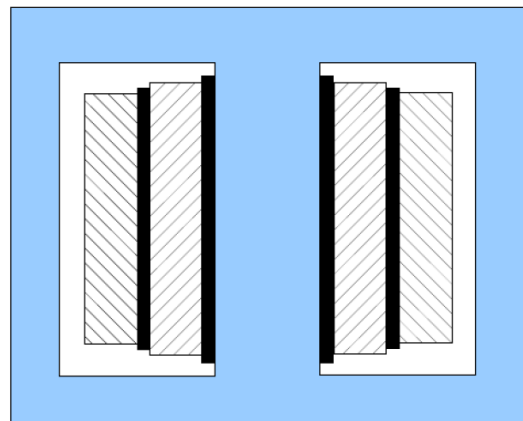


Abbildung 16.4: Prinzip Röhrenspulen
(Quelle:[])

ID: images/roehrenspulen

Sind Ober- und Unterspannungswicklung beide als Scheibenspulen ausgeführt, so wird abwechselnd eine Ober- und eine Unterspannungsspule gesetzt, wobei die dem Joch am nächsten liegenden oberen und unteren Spulen jeweils Unterspannungsspulen (geringere jochseitige Hauptisolation) sind. Bei Röhrenspulen liegt aus demselben Grund die Unterspannungswicklung innen. Das flussführende Eisen wird zur Vermeidung von Wirbelströmen aus max. 0,35 mm starken, gegeneinander isolierten Blechen aufgebaut. Zur besseren Nutzung des kreisförmigen Querschnitts innerhalb der Spulen werden verschiedene Blechbreiten eingesetzt. Um den Magnetisierungsstrom klein zu halten, darf im magnetischen Kreis kein Luftspalt entstehen. Die Bleche werden deshalb überlappt geschichtet. Der Fluss weicht an der Übergangsstelle lieber auf das benachbarte Blech aus (große Fläche!), als über den Spalt zu gehen. So gelingt es, ein praktisch luftspaltfreies Blechpaket zu erzeugen. Bei Großtrafos kommen heute praktisch nur noch kornorientierte Bleche zum Einsatz, die durch einen Kaltwalzvorgang eine magnetische Vorzugsrichtung in Walzrichtung besitzen. Diese Maßnahme reduziert den Magnetisierungsstrom und die Hystereseverluste erheblich solange ge-

währleistet ist, dass das Magnetfeld nur in Vorzugsrichtung das Eisen durchsetzt. An den Ecken werden deshalb Schrägschnitte verwendet.

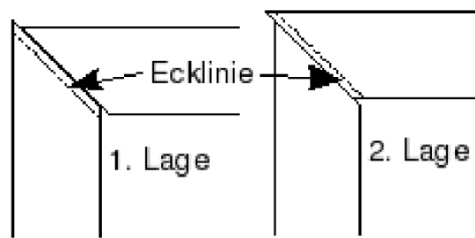


Abbildung 16.5: Schrägschnitte (Trafoblech)
(Quelle:[])

ID: images/schraegschnitt

Kleinere Transformatoren werden auch mit Schnittbandkernen hergestellt. Kornorientiertes Blech wird zu einer Spule aufgewickelt und dann aufgeschnitten. Die Schnittfläche muss hier besonders sorgfältig behandelt werden, da sie einerseits nach dem Zusammenfügen einen möglichst geringen Luftspalt haben soll, andererseits aber leitende Verbindungen (Grate an der Schnittstelle) zwischen den Blechen vermieden werden müssen, um die Wirbelstromverluste möglichst gering zu halten. Der Teil des Blechpakets, der die Wicklung trägt, heißt Schenkel, der Teil, der den magnetischen Rückschluss darstellt, Joch. Den Zwischenraum, durch den die Wicklungen hindurchtreten, nennt man das Fenster. Man unterscheidet **Manteltransformatoren**, bei denen der Fluss auf zwei Joche mit halbem Querschnitt aufgeteilt wird, und **Kerntransformatoren** (abb. 16.6), bei denen Schenkel und Joch gleichen Querschnitt besitzen. Bei den Kerntransformatoren wird in der Ausführung als Einphasentransformator zur Kupferersparnis die Wicklung jeweils zur Hälfte auf zwei Schenkel aufgeteilt.

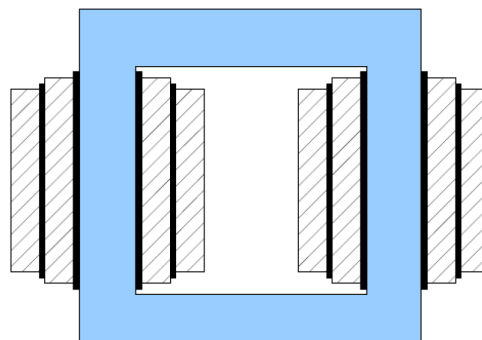
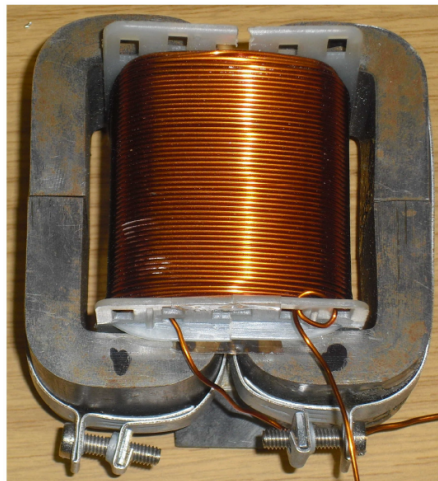


Abbildung 16.6: Prinzipbild Kerntransformator
(Quelle:[])

ID: images/kerntransformator

16.2 Ersatzschaltbilder

ID: at-ersatzschaltbild.tex



ID: images/schnittbandkern

Abbildung 16.7: Schnittbandkerntransformator
(Quelle:[1])

Der reale Transformator ist ein in der Regel linearisiertes Modell eines Transformators, das den idealen Transformator um Streufelder, ohmsche Verluste, Hystereseverluste und ggf. kapazitive Effekte erweitert.

In einem realen Transformator fließt nicht der gesamte magnetische Fluss, den eine der Spulen hervorruft auch durch die andere Spule. Dieses Phänomen heißt Streuung. In vielen Anwendungsfällen ist Streuung unerwünscht, in anderen wiederum (z. B. resonante Wandler) wichtiger Bestandteil der Topologie, da mit gezielt gewählten Streufaktoren zusätzliche Spulen eingespart werden können.

Folgend soll von einfachen Grundüberlegungen ausgehend ein lineares Modell eines realen Trafos („Ersatzschaltbild“) entwickelt werden. Die Ersatzschaltbilder gelten genau genommen nur für sinusförmige Größen.

16.2.1 ESB des streuungslosen verlustfreien Transformators

ID: at-esb-verlustlos.tex

Wegen der fehlenden Streuung sind beide Spulen vom gleichen Fluss durchsetzt. Wenn in die Gleichung 16.7 das ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises

$$\underline{\Theta} = \underline{\Phi} \cdot R_m$$

eingesetzt und nach dem Fluss umgestellt wird, erhält man

$$\underline{\Phi} = \frac{N_1}{R_m} \underline{I}_1 - \frac{N_2}{R_m} \underline{I}_2$$

einsetzen in die beiden Spannungsgleichungen 16.2 liefert

$$\underline{U}_1 = j\omega \left(\frac{N_1^2}{R_m} I_1 - \frac{N_1 \cdot N_2}{R_m} I_2 \right) \quad (16.9)$$

$$\underline{U}_2 = j\omega \left(\frac{N_1 \cdot N_2}{R_m} I_1 - \frac{N_2^2}{R_m} I_2 \right) \quad (16.10)$$

Darin sind

$$L_1 = \frac{N_1^2}{R_m} \quad \text{Selbstinduktivität der OS-Seite}$$

$$L_2 = \frac{N_2^2}{R_m} \quad \text{Selbstinduktivität der US-Seite}$$

$$M = \frac{N_1 \cdot N_2}{R_m} \quad \text{Gegeninduktivität beider Wicklungen zueinander.}$$

Damit lauten die beiden Spannungsgleichungen:

$$\underline{U}_1 = j\omega(L_1 \cdot \underline{I}_1 - M \cdot \underline{I}_2) \quad (16.11)$$

$$\underline{U}_2 = j\omega(M \cdot \underline{I}_1 - L_2 \cdot \underline{I}_2) \quad (16.12)$$

Bei üblicherweise großem Übersetzungsverhältnis haben die beiden Spannungen U_1 und U_2 sehr unterschiedliche Größenordnungen, so dass sich die Spannungszeiger nicht vernünftig gemeinsam darstellen lassen. Deshalb ist es sinnvoll, einen der Zeiger mit Hilfe des Übersetzungsverhältnisses in die Größenordnung des anderen umzurechnen. Meist werden die Werte der US-Seite auf die OS-Seite umgerechnet. Diese Umrechnung wird durch einen \dot{u} gekennzeichnet.

$$\underline{U}'_2 = \dot{u} \cdot \underline{U}_2$$

Dasselbe Problem tritt bei der gemeinsamen Darstellung der Stromzeiger auf. Hier muss der US-seitige Strom mit dem Stromübersetzungsverhältnis $\dot{u}_I = \frac{1}{\dot{u}}$ umgerechnet werden.

$$\underline{I}'_2 = \dot{u}_I \cdot \underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_2}{\dot{u}}$$

Das Einsetzen in die Spannungsgleichungen liefert

$$\underline{U}_1 = j\omega(L_1 \cdot \underline{I}_1 - \dot{u}M \cdot \underline{I}'_2) \quad (16.13)$$

$$\underline{U}_2 = j\omega(M \cdot \underline{I}_1 - \dot{u}^2 L_2 \cdot \underline{I}'_2) \quad (16.14)$$

Die Berücksichtigung der Ausdrücke

$$\dot{u} \cdot M = \frac{N_1 N_2}{R_m} \frac{N_1}{N_2} = L_1 \quad (16.15)$$

$$\dot{u}^2 \cdot L_2 = \frac{N_2^2}{R_m} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = L_1 \quad (16.16)$$

vereinfacht die Spannungsgleichung zu

$$\underline{U}_1 = j\omega L_1 \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) \quad (16.17)$$

$$\underline{U}_2 = j\omega L_1 \cdot (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) \quad (16.18)$$

Gleichung 16.7 wird durch N_1 dividiert:

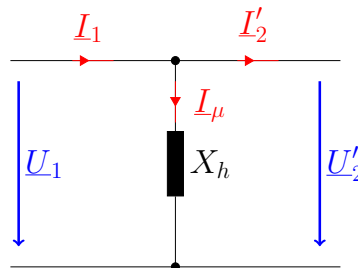
$$I_\mu = \frac{\Theta}{N_1} = I_1 - \frac{N_2}{N_1} I_2 = \underline{I}_1 - M \cdot \underline{I}'_2 \quad (16.19)$$

Dieser Ausdruck ist der auf die OS-Seite bezogene Magnetisierungsstrom. Er ergibt sich, wenn der US-seitige Strom I_2 null ist und der OS-seitige Strom alleine die Magnetisierungsdurchflutung bereitstellt. Ferner wird die Hauptreaktanz $X_h = \omega \cdot L_1$ eingeführt. Damit werden die Spannungsgleichungen

$$\underline{U}_1 = j \cdot X_h (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) = j \cdot X_h \cdot I_\mu \quad (16.20)$$

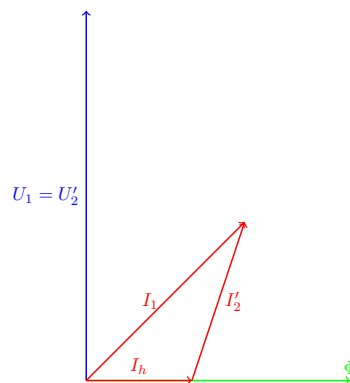
$$\underline{U}_2 = j \cdot X_h (\underline{I}_1 - \underline{I}'_2) = j \cdot X_h \cdot I_\mu \quad (16.21)$$

Obige Gleichungen (16.20, 16.19 lassen folgendes Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm zu:



ID: images/trafo-esb1.pdf

Abbildung 16.8: Ersatzschaltbild des idealen Trafos
(Quelle:[2])



ID: images/zd-esb1.pdf

Abbildung 16.9: Ersatzschaltbild des idealen Trafos
(Quelle:[2])

Der Vorteil dieses Ersatzschaltbildes ist sein einfacher Aufbau. alle Größen sind in der gleichen Größenordnung und deshalb gut im Zeigerbild darzustellen. Die galvanische

Trennung von OS- und US-Seite ist allerdings nicht mehr sichtbar. Aus dem Ersatzschaltbild ermittelte US-Größen müssen umgerechnet werden.

Die durchgeführte Umrechnung ist leistungsinvariant (Energieerhaltungssatz), es gilt z. B. für

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U_2'}{\ddot{u}} I_2' \cdot \ddot{u} = U_2' \cdot I_2'$$

Mit geeigneter Wahl des Spannungsmaßstabes und des Strommaßstabes erhält man das zugehörige Zeigerdiagramm:

16.2.2 ESB des Transformators mit Streuung

ID: at-esb-mit-streuung.tex

Jede Wicklung trägt nicht nur zur Erzeugung des Hauptflusses bei, sondern erzeugt noch einen zusätzlichen Streufluss, der nicht die andere Spule durchsetzt. Dieser Streufluss schließt sich außerhalb des Eisens über den sogenannten Streuraum. Er beträgt zwar bei großen Transformatoren nur ca. 3-6 % vom Hauptfluss, beeinflusst aber entscheidend das Verhalten bei Last bzw. im Kurzschlussfall.

Die OS-Wicklung umfasst die Summe von Hauptfluss und dem von ihr selbst erzeugten Streufluss $\Phi_h + \Phi_{1\sigma}$, die US-Wicklung hingegen die Differenz $\Phi_h - \Phi_{2\sigma}$. Dabei ist weiterhin Φ_h dem Strom i_1 im Sinne einer Rechtsschraube zugeordnet.

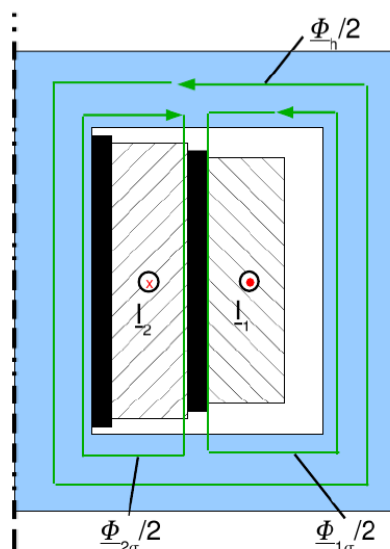


Abbildung 16.10: Trafo mit Streufluss
(Quelle:[])

ID: images/trafo-mit-streufuss

Unter Beachtung der Vorzeichen aus dem vorigen Kapitel ergibt sich für die Spannungen:

$$U_1 = j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_h + j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_{1\sigma} \quad (16.22)$$

$$U_2 = j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \Phi_h + j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \Phi_{2\sigma} \quad (16.23)$$

Die Gleichungen unterscheiden sich nur dadurch, dass hier der Fluss, der mit beiden Spulen verkettet ist, Φ_h gekennzeichnet wurde und jeweils ein Spannungsterm, der durch den eigenen Streufluss, also durch Selbstinduktion hervorgerufen ist, vorzeichenrichtig zugefügt wurde. Diese Streuspannungsabfälle lassen sich folglich auch mit Hilfe einer Streuinduktivität beschreiben.

$$U_{1\sigma} = j \cdot \omega \cdot N_1 \cdot \Phi_{1\sigma} = j\omega L_1 L_1 \quad \text{mit} \quad L_{1\sigma} = \frac{N_1^2}{R_{m1\sigma}} \quad (16.24)$$

$$U_{2\sigma} = j \cdot \omega \cdot N_2 \cdot \Phi_{2\sigma} = j\omega L_2 L_2 \quad \text{mit} \quad L_{2\sigma} = \frac{N_2^2}{R_{m2\sigma}} \quad (16.25)$$

$R_{m1\sigma}$ und $R_{m2\sigma}$ sind die magnetischen Widerstände der Flussröhren bzw. Flusswege der jeweiligen Streuflüsse. Da diese größtenteils durch nichtmagnetisches Material verlaufen (Luft), sind sie praktisch sättigungsunabhängig und damit konstant.

Der Streuspannungsabfall $U_{2\sigma}$ muss ebenfalls auf die Größen der OS-Seite umgerechnet werden,

$$U'_{2\sigma} = \ddot{u} \cdot U_{2\sigma} = j \cdot \omega \cdot L_{2\sigma} I'_2 \cdot \ddot{u}^2$$

woraus folgt

$$U'_{2\sigma} = j \cdot \omega \cdot L'_{2\sigma} I'_2 \quad \text{mit} \quad L'_{2\sigma} = L_{2\sigma} \cdot \ddot{u}^2$$

Das für den streuungslosen Transformator hergeleitete Ersatzschaltbild muss jetzt nur noch um diese Streuspannungsabfälle ergänzt werden. Das Ersatzschaltbild enthält folgende neue Parameter:

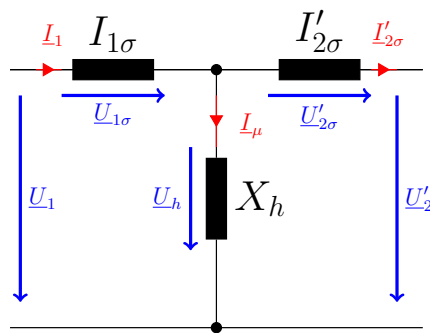
$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ Streureaktanz der OS-Seite

$X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma}$ Streureaktanz der US-Seite

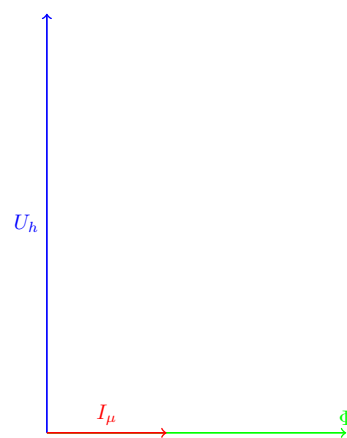
$U_h = j \cdot X_h \cdot I_\mu$ Hauptfeldspannung (90° voreilend gegenüber I_μ)

H

inweis: Beim Zeigerdiagramm werden zunächst die am Verbraucher liegenden Größen U'_2 und I'_2 gezeichnet. Die weiteren Größen ergeben sich dann an Hand des Ersatzschaltbildes Abb. 16.11



ID: images/trafo-esb2

 Abbildung 16.11: Ersatzschaltbild des Trafos mit Streuung
 (Quelle:[2])


ID: images/zd-esb2.pdf

 Abbildung 16.12: Zeigerdiagramm des Trafos mit Streuung
 (Quelle:[2])

16.2.3 ESB mit Streuung und Widerständen

ID: at-esb-mit-streuung-widerstande.tex

Bisher sind die ohmschen Widerstände der Wicklungen unberücksichtigt geblieben. Die Spannungsabfälle an diesen Widerständen müssen daher noch vorzeichenrichtig zu den Spannungen U_1 und U_2 hinzugefügt werden.

$$\underline{U}_{R1} = R_1 \cdot \underline{I}_1 \quad (16.26)$$

$$\underline{U}_{R2} = R_2 \cdot \underline{I}_2 \quad (16.27)$$

Die Umrechnung der US-Seite auf die OS-Seite ergibt:

$$\underline{U}'_{2R} = \ddot{u} \cdot \underline{U}_{2R} = \ddot{u} \cdot R_2 \cdot \underline{I}_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \cdot \underline{I}'_2$$

woraus folgt

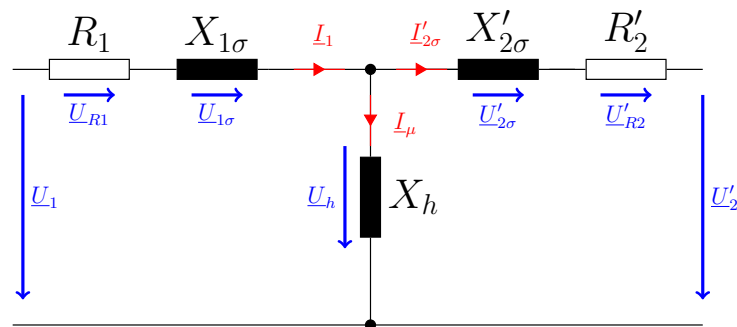
$$\underline{U}'_{2R} = R'_2 \cdot \underline{I}'_2 \quad \text{mit} \quad R'_2 = \ddot{u}^2 \cdot R_2$$

Als Ergebnis lauten die beiden Spannungsgleichungen jetzt

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{1\sigma} + \underline{U}_h \quad (16.28)$$

$$\underline{U}_h = \underline{U}'_{2R} + \underline{U}'_{2\sigma} + \underline{U}'_2 \quad (16.29)$$

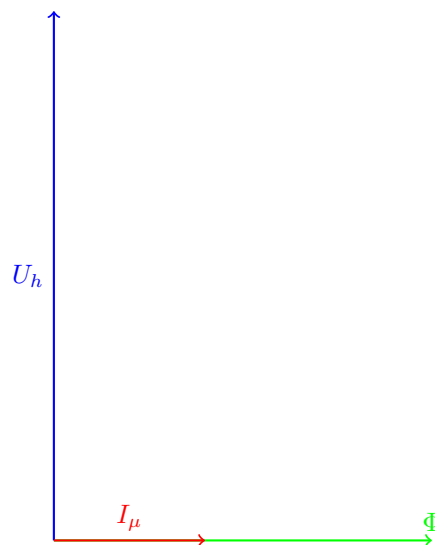
Abb. 16.13 zeigt das Ersatzschaltbild und Abb. 16.14 das dazugehörige Zeigerdiagramm.



ID: images/trafo-esb3.pdf

Abbildung 16.13: Ersatzschaltbild eines Transformators mit Streuung und Wicklungswiderständen

(Quelle:[2])



ID: images/zd-esb3.pdf

Abbildung 16.14: Zeigerdiagramm eines Transformators mit Streuung und Wicklungswiderständen

(Quelle:[2])

16.2.4 Das vollständige ESB des Transformators

ID: at-esb-vollstaendig.tex

Das Ersatzschaltbild wird noch ergänzt um einen Widerstand, der die Eisenverluste repräsentiert. Sie bestehen aus den Anteilen Wirbelstromverluste und Hystereseverluste.

Wirbelstromverluste: sie werden durch die Blechung des magnetischen Kreises klein gehalten.

Sie sind: $V_{\text{Wirbel}} \sim f^2 \cdot B^2$

Hystereseverluste: sie entstehen beim Durchlaufen der Hysterese der Magnetisierungskennlinie und proportional zum Flächeninhalt der Hystereseschleife.

$V_{\text{Hyst}} \sim f \cdot B^x$ mit $x = 1,6 \dots 2,4$ je nach verwendeter Eisensorte. Man kann sie näherungsweise durch $V_{\text{Hyst}} \sim f \cdot B^2$ beschreiben.

Da die Frequenz eines Transformators immer konstant ist, braucht die Frequenzabhängigkeit der Verluste hier nicht näher betrachtet zu werden. Mit der verwendeten Näherung gilt für die

Eisenverluste insgesamt: $V_{Fe} \sim B^2$.

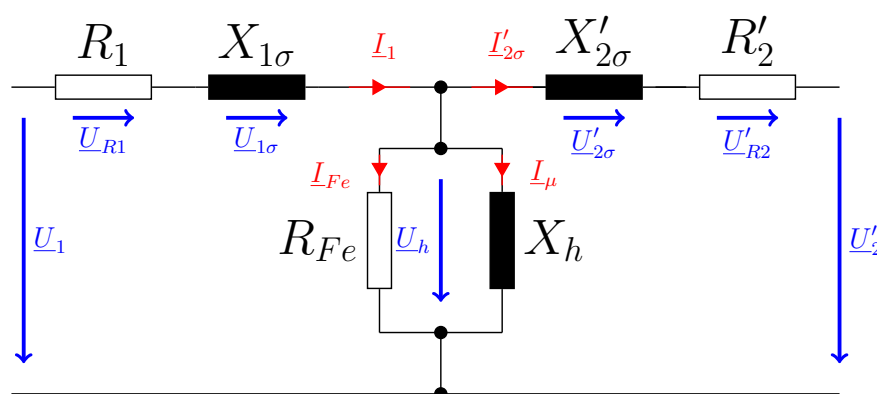
Die Induktion B ist proportional zum Hauptfluss, der nach Trafoformel proportional zu U_h ist. Es ist deshalb sinnvoll, zur Berücksichtigung der Eisenverluste einen Eisenverlustwiderstand genannt, parallel zu X_h zu setzen. Es gilt dann:

$$V_{Fe} = \frac{U_h^2}{R_{Fe}} = \frac{U_h'^2}{R_{Fe}'} \quad (16.30)$$

Es darf außerdem nicht vergessen werden, auch die US-seitige Lastimpedanz in gleicher Weise wie die US-seitigen Parameter auf die OS-Seite umzurechnen:

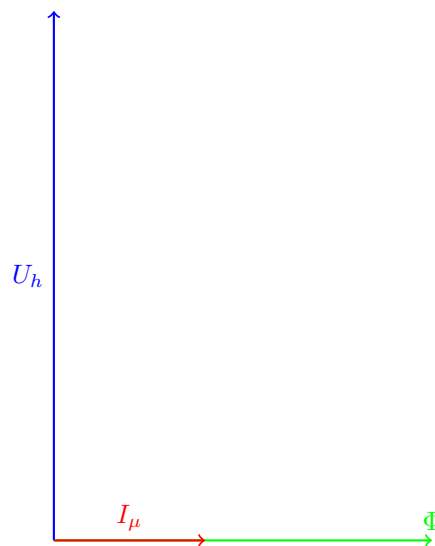
$$Z'_L = Z_L \cdot \dot{u}^2 \quad (16.31)$$

Abb. 16.15 zeigt das vollständige Ersatzschaltbild des Transformators und Abb. 16.16 das dazugehörige



ID: images/trafo-esb4.pdf

Abbildung 16.15: Vollständiges Ersatzschaltbild eines Transformators
(Quelle:[2])



ID: images/zd-esb3.pdf

Abbildung 16.16: Vollständiges Zeigerdiagramm eines Transformators
(Quelle:[2])

Konstruktionsreihenfolge:

- U'_2 senkrecht nach oben eintragen (reelle Achse)
- I'_2 entsprechend Z'_L eintragen
- Mit U'_{2R} , $U'_{2\sigma}$ und U'_2 den Zeiger U_h konstruieren
- I_μ senkrecht zu U_h und I_{Fe} parallel zu U_h auftragen
- Mit I_μ , I_{Fe} und I'_2 den Zeiger I_1 konstruieren
- U_h mit den Spannungsabfällen U_{1R} und $U_{1\sigma}$ zu U_1 ergänzen

Achtung: es gibt keine voreilenden Ströme in Induktivitäten!!!

Bei gegebenem I'_2 und I_1 sind die dazugehörigen Spannungsabfälle U'_2 und U_1 voreilend gegenüber dem Strom aufzutragen. Beim Magnetisierungsstrom ist es umgekehrt: hier ist U_h gegeben, I_μ ist nachteilig einzutragen.

Ist anstelle von U_2 die Größe von U_1 gegeben, so wird zunächst mit $U'_2 = U_1$ obige Konstruktion durchgeführt. Es ergibt sich ein falsches U_1 . Das Zeigerdiagramm gibt die Winkellagen aber korrekt wieder, lediglich die Maßstäbe stimmen nicht. Durch lineares Umrechnen oder Maßstabsänderung können die auf das gegebene U_1 bezogenen Werte ermittelt werden.

In obiger Herleitung wurden alle US-Größen auf die OS-Seite umgerechnet. Es kann jedoch nach demselben Verfahren auch das Ersatzschaltbild mit auf die US-Seite

umgerechneten OS-Größen dargestellt werden. Die auf die US-Seite umgerechneten Größen sind mit einem " gekennzeichnet.

Das Größenverhältnis der einzelnen Ersatzkreisdaten ist stark von der Nennleistung des Transformators abhängig. Es gilt etwa $R_1 \approx R'_2$ und $X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma}$, wobei die Streureaktanzen bei mittleren Leistungen etwa den doppelten Wert der Widerstände besitzen. Bei großen Einheiten übertrifft die induktive Streuspannung den ohmschen Spannungsabfall um das 20 bis 30fache. Die Werte für X_h und R_{Fe} liegen etwa drei bis vier Zehnerpotenzen über denen der Streureaktanzen.

16.3 Betriebsverhalten

ID: at-betriebsverhalten.tex

Folgend soll nun das Betriebsverhalten eines Trafos mit den beiden Extremfällen

- Leerlauf
- Kurzschluss

näher betrachtet werden.

16.3.1 Der Transformator im Leerlauf

ID: at-leerlauf.tex

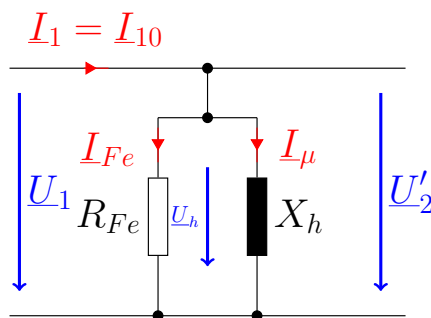
Im Leerlauf ist $I_2 = 0$. Damit entfallen die Spannungsabfälle auf der US-Seite und es gilt $U'_2 = U_h$. Die Spannungsabfälle auf der OS-Seite werden durch den kleinen Leerlaufstrom I_{10} , der sich aus dem Magnetisierungsstrom und dem Eisenverluststrom zusammensetzt, erzeugt. Bei Nennstrom beträgt der Spannungsabfall an $R_1 + j \cdot X_{1\sigma}$ etwa 3% der Nennspannung. Da der Leerlaufstrom etwa (1...3)% des Nennstromes ist, können die Spannungsabfälle an $R_1 + j \cdot X_{1\sigma}$ vernachlässigt werden. Damit ergibt sich das folgende vereinfachte Ersatzschaltbild für den Leerlauf.

Allerdings ist nur die Grundschiwingung des Leerlaufstromes berücksichtigt.

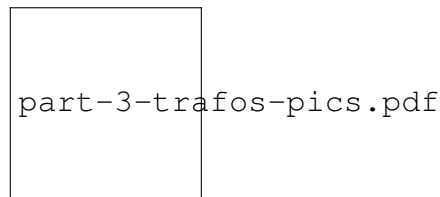
16.3.1.1 Leerlaufversuch

ID: at-leerlaufversuch.tex

Die Größen des Leerlaufersatzschaltbildes lassen sich aus dem Leerlaufversuch bestimmen. Man misst OS- und US-Spannung, den OS-Strom und die OS-Wirkleistung.



ID: images/trafo-esb-ll

 Abbildung 16.17: Leerlaufersatzschaltbild
(Quelle:[2])


ID: images/zd-ll

 Abbildung 16.18: Leerlaufzeigerdiagramm
(Quelle:[2])

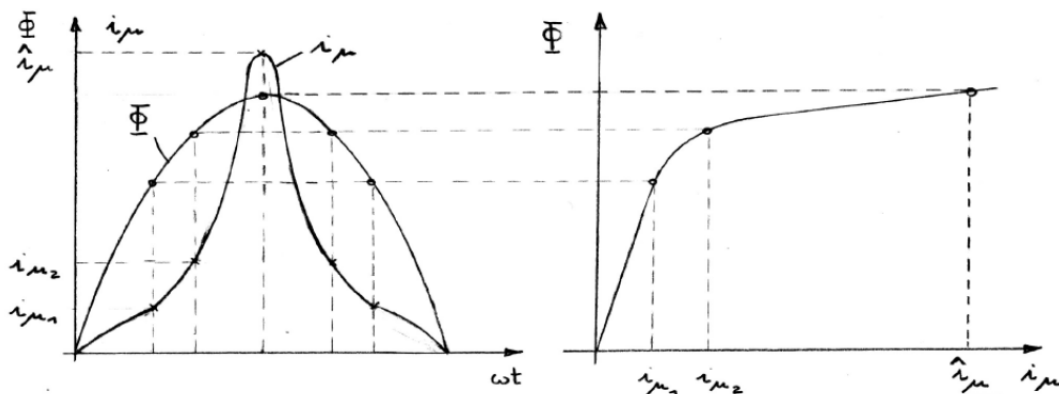
Der Index 0 gilt für Leerlauf! Der Versuch wird bei Nennspannung durchgeführt, da R_{Fe} und X_h sättigungsabhängig sind ($U_{10} = U_{1N}$, $U_{20} = U_{2N}$). Um mit kleineren Spannungen arbeiten zu können, wird oft auf der US-Seite eingespeist. Die Gleichungen gelten dann analog. Allerdings darf dann ggf. die Umrechnung der Größen auf die OS-Seite nicht vergessen werden. Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= \frac{U_{1N}}{U_{2N}} & S_{10} &= U_{1N} \cdot I_{10} & Q_{10} &= \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} \\ P_{10} &= \frac{U_{1N}^2}{R_{Fe}} = \frac{U_{2N}^2}{R_{Fe}''} \implies R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} & R_{Fe}'' &= \frac{U_{2N}^2}{P_{10}^2} \\ Q_{10} &= \frac{U_{1N}^2}{X_h} = \frac{U_{2N}^2}{X_h''} \implies X_h = \frac{U_{1N}^2}{Q_{10}} & X_h'' &= \frac{U_{2N}^2}{Q_{10}} \end{aligned}$$

16.3.1.2 Tatsächlicher Verlauf des Leerlaufstromes

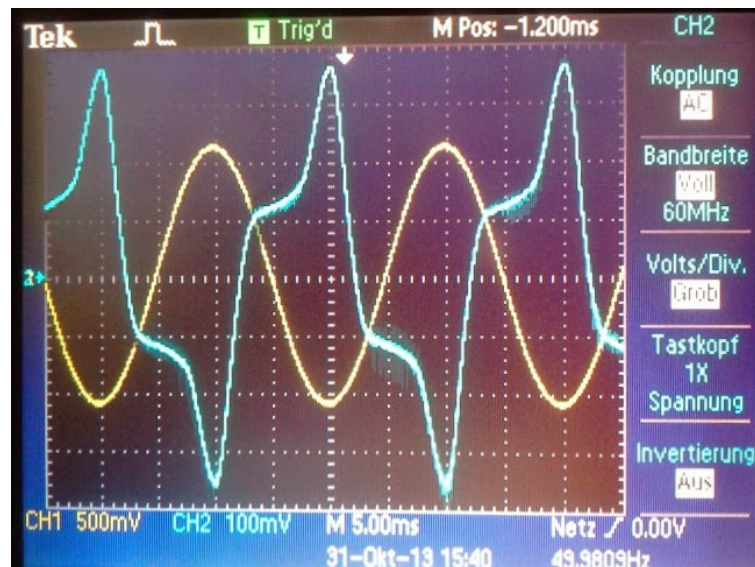
ID: at-leerlaufstrom.tex

Vernachlässigt man den um etwa den Faktor 10 kleineren Eisenverluststrom, so kann man $I_{10} \approx I_{\mu}$ setzen. Der Magnetisierungsstrom kann dann bei bekanntem Verlauf des Flusses punktweise aus der Magnetisierungskennlinie ermittelt werden (Bild 16.19). Wegen der stets vorhandenen Hysterese der Magnetisierungskennlinie ist der wahre Stromverlauf nicht symmetrisch (Bild: 16.20).



ID: images/trafostrom-konstruktion

Abbildung 16.19: Konstruktion des Leerlaufstromes(punktweise)
(Quelle:[1])



ID: images/trafo-leerlauf1.png

Abbildung 16.20: Leerlaufstrom bei sinusförmiger Erregung (Messung)
(Quelle:[2])

16.3.1.3 Rush-Effekt

ID: at-rusheffekt.tex

Beim Einschalten eines Transformators im Leerlauf kommt es, je nach Einschalt Augenblick, immer wieder zum Auslösen des Kurzschlusschutzes. Für $R_1 = 0$ und $X_{1\sigma} = 0$ gilt $u_1 = u_h$. Aus $u_1 = N_1 \frac{d\Phi_h}{dt}$ ergibt sich allgemein:

$$\Phi_h = \frac{1}{N_1} \int u_1 \cdot dt + C$$

Für $u_1 = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ folgt $\Phi_h = -\Phi_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) + C$ mit $\Phi_{\max} = \frac{\hat{u}}{N_1 \cdot \omega}$

Die Integrationskonstante ergibt sich aus den Anfangsbedingungen. Da der Fluss ein Maß für die magnetische Energie ist und deshalb nicht springen kann, muss zum Einschaltzeitpunkt $\Phi_h = 0$ gelten. Wird z.B. im Spannungsnulldurchgang, also bei $t=0$ eingeschaltet, so ergibt sich:

$$\Phi_h(t=0) = -\Phi_{\max} \cdot \cos(0) + C \quad \Rightarrow \quad C = \Phi_{\max}$$

Bei diesem Einschaltzeitpunkt lautet die Gleichung für den Fluss

$$\Phi_h = \Phi_{\max} \cdot [1 - \cos(\omega \cdot t)]$$

Zum Zeitpunkt $\omega \cdot t = \pi$ tritt eine Flussüberhöhung um den Faktor 2 auf. Da der magnetische Kreis für Φ_{\max} ausgelegt wurde, steigt der Magnetisierungsstrom sehr stark an und kann durchaus das 50-fache des Nennstromes, also das 1500...5000-fache des normalen Magnetisierungsstromes erreichen. Schaltet man hingegen im natürlichen Nulldurchgang des Flusses, also bei $\omega \cdot t = \pi/2$ ein, so ist die Integrationskonstante $C = 0$, es tritt keine Flussüberhöhung ein. Wenn der in obiger Betrachtung vernachlässigte Widerstandes R_1 berücksichtigt wird, klingt die Flussüberhöhung jedoch innerhalb weniger Perioden nach einer e-Funktion ab. Während beim Einschalten des Einphasentransformators mit Glück ein günstiger Zeitpunkt getroffen werden kann, ist dies beim Drehstromtransformator unmöglich, da dort immer ein Strang in der Nähe des ungünstigen Einschaltaugenblickes liegt.

16.3.2 Der Transformator im Kurzschluss

ID: at-kurzschluss.tex

Der Index K wird für den Kurzschluss verwendet, für den Nennbetrieb der Index N. Beim Kurzschluss fließt ein sehr großer Kurzschlussstrom. Beträgt der sogenannte Längsspannungsabfall

$$\underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_{1\sigma}) + \underline{I}_2 \cdot (R'_2 + j \cdot X'_{2\sigma})$$

im Nennbetrieb etwa 6 % der Nennspannung, so muss er im Kurzschlussfall wegen $U_{2K} = 0$ auf 100 % anwachsen. Dies bedeutet, dass im Kurzschluss der Strom I_{1K} bzw. I'_{2K} gegenüber dem Nennbetrieb etwa um den Faktor 20 steigen muss.

16.3.2.1 Kurzschlussversuch

16.3.2.2 Kurzschlussvorgang

16.3.3 Zusammenstellung der Berechnungsgleichung

16.4 Betriebsverhalten

16.4.1 Typenschild des Transformators

16.4.2 Typenschild des Transformators

16.4.3 Der Transformator im Betrieb

16.4.4 Spannungsänderung

16.4.4.1 Das Kapp'sche Dreieck

16.4.4.2 zeichnerische Ermittlung der Spannungsänderung

16.4.5 Parallel -und Kettenschaltung von Transformatoren

16.4.5.1 Parallelschaltung

16.4.5.2 Kettenschaltung mehrere Transformatoren

16.4.6 Wirkungsgrad

17 Drehstromtransformatoren

17.1 allgemeines

17.2 Aufbau und Transformatortypen

17.2.1 Tempeltyp

17.2.2 Kerntyp

17.3 Überlegungen zum Magnetisierungsstrom

17.3.1 Sternschaltung mit angeschlossenem Sternpunktleiter (freie Magnetisierung)

17.3.2 Sternschaltung ohne Sternpunktleiter (erzwungene Magnetisierung)

17.3.3 Dreieckschaltung

17.3.4 Anschlussbezeichnungen

17.4 Schaltungsarten und Schaltgruppen

17.4.1 Dreieck-Sternschaltung

17.4.2 Dreieck-Zickzack-Schaltung

17.5 häufig verwendete Transformatorschaltungen

17.6 Schiefastfähigkeit

Literaturverzeichnis

- [1] Wikimedia Commons. Wikimedia Commons, the free media repository, 2017. [Online; accessed 26-October-2019].
- [2] E. Schubert. Eigenverlag HTL/SCA. 2012..2019.

Generierdatum: 12. Jänner 2020