

E3 TRANSFORMATOR

PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Grundbegriffe: Spule im Wechselstromkreis, magnetische Induktion, Induktionsfluss, Induktionsgesetz, Zeigerdiagramm, Blindstrom, Wirkstrom.

1. Aufbau des Transformators: Der Transformator dient zur verlustarmen Änderung der Amplituden von Wechselspannungen. Die Transformierbarkeit ist ein wesentlicher Vorteil der Wechselspannungen gegenüber Gleichspannungen. Prinzipiell besteht ein Transformator aus zwei räumlich benachbarten Spulen, einer Primärspule (Windungszahl n_p), an der die Eingangs- oder

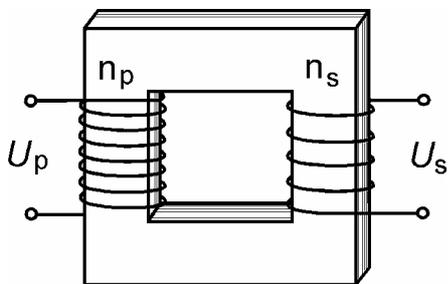


Abb.1 TRANSFORMATOR

Primärspannung U_p liegt und einer Sekundärspule (Windungszahl n_s), an der die veränderte Ausgangs- oder Sekundärspannung U_s abgegriffen wird. In den meisten Fällen sind die Spulen auf einen gemeinsamen Kern aus einem ferromagnetischen Material gewickelt (Abb. 1).

Für Niederfrequenztransformatoren und insbesondere Transformatoren für technische Wechselströme benutzt man als Kernmaterial Weicheisen mit geringer Remanenz zur Minimierung von Hystereseverlusten (Versuch E 11) und

hoher Permeabilität zur Erzielung einer hohen Induktivität. Zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten wird der Kern aus dünnen Blechen geschichtet, zwischen denen sich eine isolierende Papier- oder Lackschicht befindet. Den nicht völlig vermeidbaren Streuverlusten begegnet man, indem der Kern in sich geschlossen ausgeführt wird und einen in Bezug auf die beabsichtigte Leistungsübertragung ausreichend großen Querschnitt erhält. Die Sekundärspule besitzt häufig mehrere Anzapfungen, so dass der Abgriff unterschiedlicher Spannungen möglich ist. Bei Stelltransformatoren erfolgt ein kontinuierlicher Abgriff durch Schleifkontakte. Hochfrequenztransformatoren besitzen anstelle eines Eisenkerns verlustarme Ferritkerne; bei sehr hohen Frequenzen wird auf Kerne ganz verzichtet.

Die weiteren Betrachtungen erfolgen zunächst für einen idealen, d. h. verlustfrei arbeitenden Transformator. Die Auswirkung der am realen Transformator auftretenden Leistungsverluste auf den Wirkungsgrad wird in Abschn. 3 behandelt.

2. Wirkungsprinzip des idealen Transformators: Legt man bei zunächst offener Sekundärspule, d.h. bei einem unbelasteten Transformator, an die Primärspule mit dem induktiven Widerstand ωL (ω = Kreisfrequenz) eine Wechselspannung $U_p = U_m \sin \omega t$, so fließt der gegenüber U_p um den Phasenwinkel $\pi/2$ nacheilende Wechselstrom

$$I_p = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

(Versuch E4). Im Primärkreis fließt ein sog. Blindstrom, welcher das zuführende Leitungssystem umso weniger belastet, je größer die Induktivität L ist. Der Wechselstrom $I_p(t)$ erzeugt im Eisen-

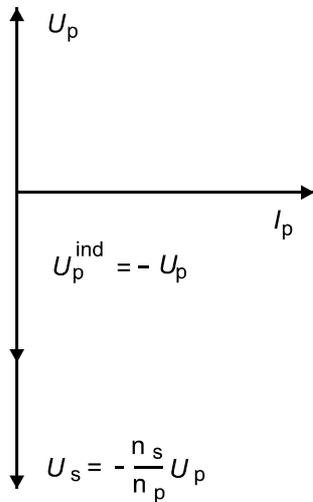


Abb.2 UNBELASTETER TRANSFORMATOR

kern das magnetische Feld $B(t)$ und den magnetischen Kraftfluss $\Phi(t)$, welcher - durch den Eisenkern geführt - sowohl die Primärspule als auch die Sekundärspule in gleicher Weise durchsetzt. Der sich zeitlich ändernde Induktionsfluss führt nach dem Induktionsgesetz an den Spulenklappen zu den induzierten Spannungen

$$U_p^{\text{ind}} = -n_p d\Phi / dt \quad \text{und} \quad U_s^{\text{ind}} = -n_s d\Phi / dt. \quad (1)$$

Beachtet man die Forderung des Kirchhoffschen Maschensatzes $U_p^{\text{ind}} = -U_p$ und bezeichnet U_s^{ind} im Weiteren abkürzend mit U_s , so folgt aus Gl.(1)

$$U_s / U_p = -n_s / n_p. \quad (2)$$

Das Verhältnis n_s / n_p bezeichnet man als Übersetzungsverhältnis des Transformators. Es wird in der Praxis aus dem Span-

nungsverhältnis im Leerlauf bestimmt.

Die Phasenbeziehungen zwischen U_p , I_p , U_p^{ind} und U_s sind in Abb.2 dargestellt.

Veränderte Verhältnisse ergeben sich für den belasteten Transformator, d.h. bei Anschluss eines Verbrauchers an die Sekundärspule. Der am einfachsten zu behandelnde Fall liegt vor, wenn ein ohmscher Widerstand angeschlossen wird. Der in diesem Fall phasengleich zur Sekundärspannung U_s fließende Sekundärstrom I_s erzeugt einen magnetischen Fluss Φ_s , welcher den ursprünglichen Induktionsfluss nach der Lenzschen Regel schwächen würde. Damit dennoch im Primärkreis der Maschensatz erfüllt bleibt, muss weiterhin $U_p^{\text{ind}} = -U_p$ sein. Deshalb muss in der Primärspule phasengleich mit U_p zusätzlich ein Strom I_p^* (siehe unten Gl.(3)) fließen, so dass der von I_p^* erzeugte magnetische Fluss Φ_p^* den Fluss Φ_s gerade kompensiert (Abb.3). Beim belasteten Transformator setzt sich der fließende Primärstrom I_p^{**} vektoriell aus den Komponenten Blindstrom I_p und Wirkstrom I_p^* zusammen. Zwischen I_p^{**} und U_p besteht die Phasendifferenz φ . Der Energieerhaltungssatz verlangt, dass die am ohmschen Widerstand im Sekundärkreis entzogene Energie durch die Stromquelle im Primärkreis aufgebracht werden muss.

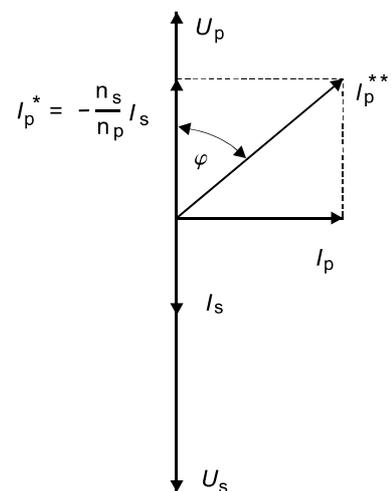


Abb.3 BELASTETER TRANSFORMATOR

Die fundamentale Beziehung Φ (belastet) = Φ (unbelastet) ist zunächst überraschend aber für das Verständnis des Transformators wesentlich. Sie ist auch für den realen Transformator sehr gut erfüllt.

Für den idealen Transformator führt die Leistungsgleichheit in Primär- und Sekundärkreis $U_s I_s = U_p I_p^*$ und Einsetzen von Gl.(2) auf den Primärwirkstrom

$$I_p^* = -\frac{n_s}{n_p} I_s. \quad (3)$$

Die Leistung im Primärkreis

$$P_p = U_p I_p^* = U_p I_p^{**} \cos \varphi \quad (4)$$

ist Null für den unbelasteten idealen Transformator und steigt mit wachsendem Wirkstrom I_p^* und damit abnehmender Phasenverschiebung φ bei steigender Belastung.

3. Wirkungsgrad des realen Transformators: Als Wirkungsgrad η des Transformators definiert man das Verhältnis der Wirkleistungen

$$\eta = P_s / P_p \quad (5)$$

im Primär- und Sekundärkreis. Er ist beim realen (im Unterschied zum idealen) Transformator immer kleiner als 1, weil von der Stromquelle im Primärkreis zusätzlich zur im Sekundärkreis entzogenen Arbeit die eingangs erwähnten Energieverluste sowie die Wärmeverluste an den ohmschen Widerständen der Transformatorspulen aufgebracht werden müssen. Der Wirkungsgrad eines nur mit einem ohmschen Widerstand belasteten Transformators beträgt nach Gl.(7) und Gl.(6)

$$\eta = \frac{U_s I_s}{U_p I_p^{**} \cos \varphi}. \quad (6)$$

Transformatoren für technische Wechselströme erreichen Wirkungsgrade über 95%.

AUFGABEN

1. Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses eines Transformators aus der grafischen Darstellung $U_s = f(U_p)$ für den unbelasteten Fall.
2. Bestimmung des Leerlaufstromes und der Leerlaufleistung eines unbelasteten Transformators für ca. 40 V Primärspannung.
3. Messung der Leistungen im Primär- und Sekundärkreis in Abhängigkeit von der ohmschen Belastung.
4. Grafische Darstellungen des Primärstromes I_p^{**} , des Wirkungsgrades η und der Phasenverschiebung φ als Funktion des Sekundärstroms.

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Für Aufgabe 1, die Messung des Übersetzungsverhältnisses, wird die in Abb. 4 angegebene Schaltung benutzt. Über ein Potentiometer im Primärkreis kann die Spannung im Bereich von 0 V bis ca. 40 V variiert werden. Das Übersetzungsverhältnis wird aus dem Anstieg der grafischen Darstellung $U_S = f(U_P)$ entnommen (Gl. (2)).

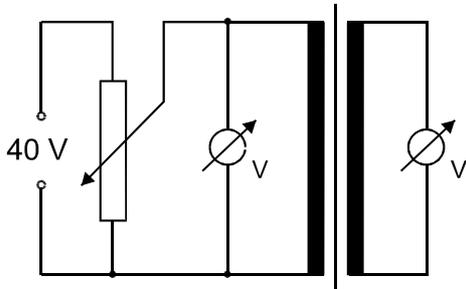


Abb.4 ÜBERSETZUNGSVERHÄLTNIS

Für die Aufgaben 2 und 3 wird die Schaltung nach Abb. 5 verwendet. Die Leistung P_P im Primärkreis wird mit dem Wattmeter W gemessen, außerdem wird im Primärkreis der Strom I_P^{**} und die Spannung U_P mit separaten Instrumenten gemessen. Damit kann aus P_P unmittelbar die Phasenverschiebung berechnet werden (Gl. (4)). Bei der Messung von I_P^{**} (das ist der

Effektivwert des Primärstromes!) ist zu beachten, dass ein so genannter „wahrer“ Effektivwertmesser (True RMS) benutzt werden muss. Messgeräte ohne diese ausdrückliche Kennzeichnung sind in der Regel für harmonische Spannungen bzw. Ströme geeicht. Diese Voraussetzung ist für den Primärstrom wegen der Hystereseverluste im Eisenkern des Trafos nicht erfüllt. Diese Verluste sind der nicht widerstandslosen Umagnetisierung der vormagnetisierten Bereiche (Weißsche Bezirke) im ferromagnetischen Material geschuldet (siehe Versuch E 11 Magnetische Hysterese).

Im Sekundärkreis wird die Leistung $P_S = U_S I_S$ ermittelt und anschließend der

Wirkungsgrad (Gl. (6)) bestimmt. Zur Messung der Leerlaufparameter wird der Sekundärkreis am Transformator unterbrochen.

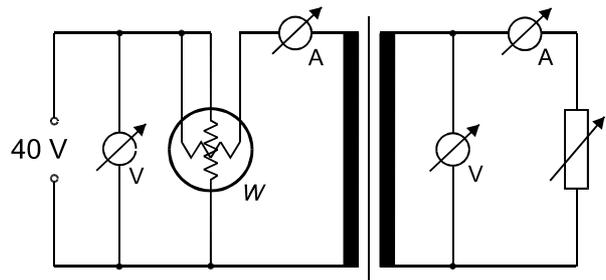


Abb.5 BELASTETER TRANSFORMATOR

FRAGEN

1. Wie lautet das Faradaysche Induktionsgesetz?
2. Welche Verluste treten beim Transformator auf?
3. Unter welcher Voraussetzung ist beim Transformator das Verhältnis U_S / U_P (siehe Gl.(2)) unabhängig von der Belastung?
4. Welche Anwendungsbeispiele für Transformatoren kennen Sie?