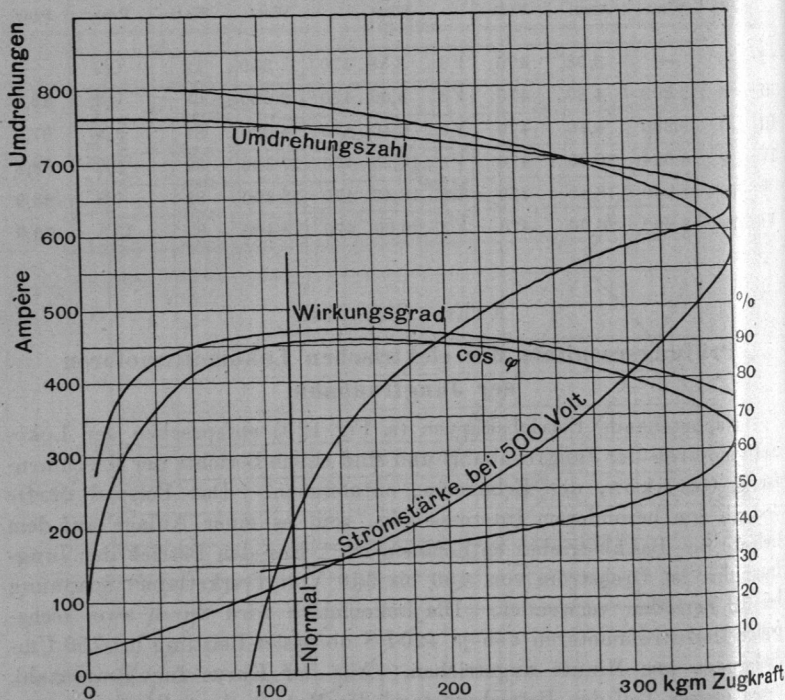


und ein Leistungsfaktor von

$$\cos \varphi = \frac{95\,200}{\sqrt{3} \cdot 121\,500} = \sim 0,91$$

ergeben.

Fig. 129.



Die Schlüpfung bei normaler Belastung betrug 1,5 Proz., der Energieverlust in der Primärwicklung 2,5 Proz. von der zugeführten Energie. (Weitere Beispiele s. unter Kapitel T.)

N. Transformatoren.

1. Allgemeines über den Transformator.

Der Transformator dient zur Umsetzung von Wechselstromenergie auf die jeweils erforderliche Spannungshöhe. Er besteht aus einem in der Regel geschlossenen Eisenkerne und zwei getrennten Wicklungen, die den ersteren umschließen. Diese beiden Wicklungen, die primäre und sekundäre, dienen zur Aufnahme der umzuwandelnden bzw. zur Abgabe der umgesetzten elektrischen Energie. Bezeichnet man die vor kommenden magnetischen, elektrischen und konstruktiven Größen mit:

B die maximale magnetische Induktion im Eisenkerne pro Quadrat-zentimeter,

N die Anzahl der eingeschlossenen Kraftlinien,

c die Periodenzahl des pulsierenden Stromes bzw. des Feldes,

n die Windungszahl der Spule (n_1 für die Primär-, n_2 für die Sekundärspule),

E den effektiven Mittelwert der elektromotorischen Kraft, die durch das pulsierende Feld in einer Wicklung induziert wird, in Volt,

dann besteht folgende Relation:

$$(1) \dots \dots \dots E = 4,44 \cdot c \cdot n \cdot N \cdot 10^{-8}.$$

Die periodisch sich ändernde EMK ist in jedem Augenblicke proportional der Geschwindigkeit der Kraftlinienänderung; dieselbe erreicht somit im Augenblick des Polwechsels den höchsten Wert, und beträgt die Verschiebung zwischen dem Maximum des Feldes und dem Maximum der EMK $\frac{1}{4}$ Periode. — Jeder Wechselstrom läßt sich in drei Teilströme ¹⁾ zerlegen und zwar:

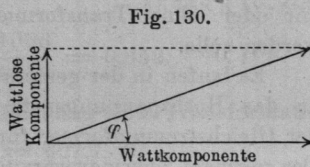
1. den Erreger- oder wattlosen Strom,
2. den Wattstrom,
3. den Ladestrom.

Dieser letztere hat keine Bedeutung in der Praxis, es sei denn, daß durch hohe Potentialdifferenzen der Einfluß der elektrostatischen Kapazität bzw. des elektrostatischen Feldes so groß würde, daß der Ladestrom nicht zu vernachlässigen wäre.

Die Ströme unter 1. und 2. können als rechtwinkelig zueinander stehende Komponentenströme zu einer Resultierenden vereinigt werden, wie Fig. 130 erläutert.

Der Winkel φ gibt die Phasenverschiebung des resultierenden Stromes gegen die EMK, welche mit dem Wattkomponentenstrom in Richtung zusammenfällt. Durch Belastung des Transformators mit Glühlampen (induktionslose Belastung) nimmt die Wattkomponente zu; der $\cos \varphi$ nähert sich dem Werte 1 und somit der Unterschied der scheinbaren Stromstärke und der berechneten dem Werte Null.

In der Praxis kommt hauptsächlich das Verhalten eines an das Netz einer Zentrale angeschlossenen Transformators in Frage, und ist der Wirkungsgrad eines konstant betriebenen Transformators wesentlich verschieden von dem Wirkungsgrade des Transformators in der Versuchstation bzw. der Fabrik. Der erstere, d. h. der Jahresnutzeffekt ist bedeutend ungünstiger. Man muß hier mit Faktoren rechnen, welche



¹⁾ Siehe auch v. Dolivo-Dobrowolsky, E. T. Z. 1892, Heft 17.

von außerhalb des Transformators liegenden Verhältnissen — jährliche Brennstunden der installierten Lampen usw. — abhängig sind. Nachstehend sei zur Erläuterung des Gesagten ein einfaches Beispiel aus der Praxis angeführt.

Ein Transformator mit einer maximalen Nutzleistung von 60 KW war im Jahre etwa 400 Stunden zum Betriebe eines Motors mit im Mittel 80 Proz. belastet. Die Ohmschen oder Stromwärme- sowie die Eisenverluste waren je etwa 1,5 Proz. Dann ist:

die nutzbare Jahresenergie

$$400 \cdot (60 \cdot 0,8) = 400 \cdot 48 = 19200 \text{ KW-Stdn.}$$

die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand

$$400 \cdot 48 \cdot 0,015 = 400 \cdot 0,72 = 288 \quad "$$

durch Magnetisierungsarbeit¹⁾ — die während des ganzen Jahres, d. h. 24.365 = 8760 Stdn.

$$\text{zu leisten ist — } 8760 \cdot 60 \cdot 0,015 \quad \dots \quad = 7884 \quad "$$

$$\text{die Gesamtjahresenergie demnach} \quad \dots \quad \underline{\quad 27372 \text{ KW-Stdn.}} \quad "$$

Der Gesamtnutzeffekt (Jahresnutzeffekt) ist:

$$\frac{19200}{27372} = 0,701 \text{ oder } 70,1 \text{ Proz.}$$

Der momentane Nutzeffekt bei 80 Proz. Belastung ist dagegen

$$\frac{48}{48(1 + 0,015) + 60 \cdot 0,015} = 0,967 \text{ oder } 96,7 \text{ Proz.}$$

Aus dem Beispiele erhellt, von welcher Bedeutung es ist, wenn der Aufwand für Magnetisierungsarbeit möglichst reduziert wird.

Ein dem obigen Beispiele ähnlicher Fall lag bei der Projektierung der Palmengartenzentrale (Frankfurt a. M.) vor, bei welcher der Verf. seinerzeit als Sachverständiger und Bauoberleiter tätig war; es war die Frage zu entscheiden, ob der vorhandene hochgespannte Wechselstrom mit oder ohne Transformierung für motorische Zwecke verwendet werden solle.

Es laufen in der genannten Zentrale zwei Einphasenmotoren, direkt an das Hochspannungsnetz angeschlossen; sie dienen zum Antriebe der Gleichstromumformer für die Ladung einer Akkumulatorenbatterie. Der normale Energieverbrauch jedes Motors ist 47 KW.

Falls die Motoren mit Niederspannung gespeist würden, wären zwei Transformatoren mit je 47 KW-Leistung erforderlich. Der

¹⁾ Es tritt noch ein weiterer Verlust während der Betriebspausen auf, nämlich der Ohmsche Verlust des Leerlaufstromes. Derselbe ist jedoch meist so unbedeutend, daß er gegenüber den anderen Verlusten vernachlässigt werden kann. Zu seiner Ermittlung ist die Kenntnis des Leerlaufstromes erforderlich.

Wirkungsgrad der in Betracht kommenden Transformatoren beträgt etwa 97 Proz., nämlich je 1,5 Proz. auf Magnetisierungsarbeit und auf Verluste im Kupfer. Das Elektrizitätswerk müßte die Magnetisierungsarbeit während des ganzen Jahres, die Verlustarbeit durch Stromwärme während der Zeit des Betriebes der Motoren aufwenden.

Der Motor I lief nach dem Betriebsprotokolle während eines Jahres 1245 Stunden, der Motor II 1182 Stunden. Die Motoren waren im Mittel mit etwa 70 Proz. ihrer Normalleistung belastet, d. h. mit rund 33 KW.

Bei Motor I betragen:

die nutzbare Jahresenergie 1245.33 = 41085 KW-Stdn.

die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand . 1245.33.0,015 = 616 „

durch Magnetisierungsenergie 365.24.47.0,015 = 6176 „

Gesamtjahresenergie 47877 KW-Stdn.

$$\text{Gesamtjahresnutzeffekt: } \frac{41085}{47877} = 0,858.$$

Bei einem Preise von 9 $\frac{3}{4}$ pro Kilowattstunde als Selbsterzeugungskosten durch Aufwand an Wasser, Heiz- und Schmiermaterial hätte das Elektrizitätswerk

$$(47877 - 41085).0,09 = 611,3 \mathcal{M}$$

bei Transformatorenbetrieb für diesen Motor mehr aufwenden müssen. Hiervon ist der Aufwand an Kosten durch Stromwärme mit 55,4 \mathcal{M} und durch Magnetisierungsarbeit mit 555,9 \mathcal{M} beteiligt:

Bei Motor II betragen:

die nutzbare Jahresenergie 1182.33 = 39006 KW-Stdn.

die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand . . 1182.33.0,015 = 585 „

durch Magnetisierungsarbeit . 356.24.47.0,015 = 6167 „

Gesamtjahresenergie 45758 KW-Stdn.

$$\text{Gesamtjahresnutzeffekt: } \frac{39006}{45758} = 0,852.$$

Daher kostet die Verlustarbeit bei Aufstellung eines Transformators

$$(45758 - 39006).0,09 = 607,7 \mathcal{M}.$$

Daran ist der Aufwand an Kosten durch Ohmschen Widerstand mit 52,6 \mathcal{M} und durch Magnetisierungsarbeit mit 555,1 \mathcal{M} beteiligt.

Man sieht, daß in diesem Beispiele, trotzdem wegen der hohen Betriebsstundenzahl und einer der normalen ziemlich nahekommenden Belastung die Verhältnisse für Transformatorbetrieb günstig liegen, die Verluste durch Magnetisierungsarbeit doch immerhin noch etwa das Zehnfache der Verluste durch Ohmschen Widerstand betragen.

Aus vorstehendem resultiert, daß man bei dauernd eingeschaltetem Transformator bestrebt sein muß, den Durchschnitts-Jahresnutzeffekt des Transformators möglichst hoch zu erhalten und auf den Nutzeffekt bei maximaler Belastung nicht den Hauptwert legen soll; natürlich ist letzterer mit Rücksicht auf die Spannungsschwankungen, die zwischen hoher und niedriger Belastung auftreten, auch auf das zulässige Maß zu beschränken.

Da die Eisenverluste eine so große Rolle spielen, so soll an diesem Platze auf dieselben etwas näher eingegangen werden. Die Eisenverluste setzen sich aus den Hysteresis- und Wirbelstromverlusten zusammen. Die Wirbelströme sind dadurch bedingt, daß die Kraftliniendichte in einem Eisenkerne, der von einer Wickelung umgeben ist, in welcher ein pulsierender Strom fließt, am Umfange größer als im Innern ist; dadurch entstehen elektrische Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Punkten des Querschnittes und infolgedessen elektrische Ausgleichsströme, sog. Wirbelströme, die ihre Energie in Form von Wärme betätigen. Diese Ströme selbst können durch Unterteilung des Eisenkernes und Trennung der verschiedenen Schichten desselben voneinander durch Papierlagen, Oxydschichten oder Anstrich bei Wahl dünner Bleche auf ein geringes Maß reduziert werden.

Die Wirbelstromverluste sind nicht nur von der Unterteilung des Eisens, sondern auch von der Periodenzahl c und der Induktion B abhängig. Es sei z. B. bei einer Periodenzahl $c = 60$ und einer maximalen Induktion $B = 5000$ die Blechdicke 0,6 mm; bei $c = 30$ und $B = 4000$ und gleicher Blechdicke sind die im Eisen auftretenden EMK, welche die Wirbelströme verursachen, nur $\frac{4000 \cdot 30}{5000 \cdot 60} = 0,4$ fach so groß. Die Verluste sind nur dem Quadrate der EMK proportional und betragen somit nur das 0,16fache des obigen Wertes.

Sollen die Verluste den gleichen Betrag erreichen wie im ersten Falle, so kann die Blechdicke im Verhältnis $1 : \sqrt[3]{0,16} = \sim 1,84$ größer gewählt werden, da die Verluste mit der dritten Potenz der Blechdicke wachsen. Die Blechstärke wird daher $0,6 \cdot 1,84 = \sim 1,10$ mm. Bei den üblichen geringen Blechstärken sind die Wirbelstromverluste im Verhältnisse zu den Hysteresisverlusten sehr klein, so daß eine gesonderte Behandlung derselben nicht erforderlich ist.

Der Hysteresis(Ummagnetisierungs-)verlust ist in erster Linie von der Induktion, welche das pulsierende Feld während einer Periode aufweist, sodann aber auch von der Periodenzahl c abhängig. Nach Steinmetz drückt sich der Hysteresisverlust in Watt pro Kubikzentimeter durch die Formel

$$(2) \dots \dots \dots \alpha \cdot c \cdot B^{1,6} \cdot 10^{-7}$$

aus; α bedeutet einen Koeffizienten, der von der Beschaffenheit des verwendeten Eisens abhängt. Derselbe ist mit der Eisensorte sehr

variabel und kann für bestes Schmiedeeisen gleich 0,0020 bis 0,0025 gesetzt werden.

Die Form der Kurve, welche B bzw. N als Funktion der Zeit darstellt, ist nicht von Einfluß auf den Hysterisisverlust¹⁾. Es gibt sehr viele Kurvenformen, welche alle das gleiche Maximum erreichen. In bezug auf Hysterisisverlust sind dieselben alle gleichwertig, nicht aber in bezug auf die induzierte EMK. Es ist daher wichtig zu wissen, welche Kurvenform der von der Wechselstrommaschine erzeugten EMK das kleinste B bzw. N im Transformator bei gleicher effektiver EMK hervorbringt. Eine Untersuchung in dieser Richtung liefert folgendes Resultat:

Für sinusförmigen Verlauf der EMK gilt bekanntlich die unter (1) schon gegebene Beziehung

$$E = 4,44 \cdot c \cdot n \cdot N \cdot 10^{-8},$$

welche den Zusammenhang zwischen E und N darstellt. Ist die Kurve der EMK spitzer wie die Sinuskurve, so ist der Zahlenfaktor in obiger Gleichung größer als 4,44; bei flacherem Verlaufe der Kurve ist er kleiner. Für die Induktion B bzw. N sind diese Verhältnisse notwendig umgekehrt, und geben somit spitze Kurven der EMK zu geringeren Verlusten im Transformator Anlaß wie abgeflachte.

2. Bestimmung des Wirkungsgrades und der Effektverluste.

Die soeben besprochenen im Transformator auftretenden Effektverluste sowie die durch Ohmschen Widerstand bedingten Verluste lassen sich auf folgende Weise bestimmen:

Der Gesamteffektverlust ergibt sich aus der Differenz der Wattmetermessung des primär zugeführten (E_1) und des sekundär verbrauchten Effektes (E_2). Zieht man von diesem Differenzwerte den berechneten Stromwärmeeffekt der Primärwicklung $i_1^2 \cdot r_1$ und der Sekundärwicklung $i_2^2 \cdot r_2$ ab, so erhält man den Hysterisis- und Wirbelstromverlust.

Der Wirkungsgrad η ist gleich dem Verhältnisse des sekundär verbrauchten zu dem primär zugeführten Effekte, d. h.

$$(3a) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1}.$$

Bei sekundärer induktionsfreier Belastung kann man an Stelle einer Wattmetermessung sekundär auch mittels Volt- und Amperemeter die Spannung e_2 und die Stromstärke i_2 feststellen. Es besteht sodann die Relation für den Wirkungsgrad:

$$(3b) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{i_1 \cdot e_1 \cdot \cos \varphi}.$$

Hierin bedeuten i_1 bzw. e_1 den primären Strom bzw. die primäre Spannung und φ den Winkel der Phasenverschiebung des primären Stromes gegen die primäre Klemmenspannung. Der scheinbar zu-

¹⁾ Siehe Kapp, Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom.