

einer bestimmten Geschwindigkeit eine effektive gemessene elektromotorische Kraft von 60 Volt erzeugt, so ist der Streuungsfaktor

$$\frac{90}{60} \cdot \frac{60}{102} = \text{rund } 0,88;$$

es gelangen somit von 1000 im Stator erzeugten Krafflinien 880 in die Rotorwicklung, die anderen schließen sich im Luftraume zwischen Feld- und Ankerwicklung und gehen also verloren.

Die zugeführte Energie eines Drehstrommotors ist

$$(12) \dots \dots \dots W = 3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi,$$

und der Leistungsfaktor des Motors bei voller Belastung ist

$$(13) \dots \dots \dots \cos \varphi = \frac{W}{3 \cdot e_1 \cdot i_1},$$

worin  $e_1$  und  $i_1$  die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke, gemessen in den drei Statorwickelungen, und  $W$  die mit dem Wattmeter gemessene Energie bedeuten.

Bezeichnet  $\omega_{st}$  bzw.  $\omega_r$  die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes im Stator bzw. des Rotors, so besteht die Relation:

$$(14) \dots \dots \dots \frac{\omega_{st} - \omega_r}{\omega_{st}} = s = \text{Schlüpfung des Motors.}$$

Nennen wir das Drehmoment  $D$ , den Widerstand der Statorwicklung pro Phase  $w_1$ , so ist der Wirkungsgrad des Drehstrommotors rechnerisch gegeben durch

$$(15a) \dots \dots \dots \frac{D \cdot \omega_r}{D \cdot \omega_{st} + \frac{3 \cdot i_1^2 \cdot w_1}{9,81}},$$

wobei  $D \cdot \omega_r = W_n$  die vom Motor nutzbar abgegebene Energie, welche durch Bremsung ermittelt werden kann,  $D \cdot \omega_{st}$  die vom Rotor aufgenommene Energie und  $3 \cdot i_1^2 \cdot w_1$  die in der Primärwicklung in Wärme umgesetzte Energie bedeuten. Bei Vernachlässigung dieser letzteren Größe wird

$$(15b) \dots \dots \dots \eta = \frac{\omega_r}{\omega_{st}} = 1 - s,$$

d. h. der Wirkungsgrad des Motors ist eine Funktion der Schlüpfung und zwar fällt derselbe mit Zunahme der Schlüpfung.

Natürgemäß drückt sich der Wirkungsgrad auch durch folgende Relation aus:

$$(16) \dots \dots \dots \eta = \frac{D \cdot \omega_r}{3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi}.$$

### 5. Experimentelle Untersuchungen an Mehrphasengeneratoren.

Ich gebe im folgenden die wichtigsten Faktoren der Prüfungen und den Gang der Untersuchungen bei Ein- und Mehrphasenmaschinen an.

Ein für die Praxis an Wechsel- und Drehstromgeneratoren wichtigster Faktor ist die Feststellung der Leerlaufcharakteristik  $E$  und der Kurzschlußcharakteristik  $J_0$  und des hieraus zu ermittelnden Spannungsabfalles.

Bei geöffnetem äußeren Stromkreise, d. h. unbelasteter Maschine, fällt die mit dem Voltmeter gemessene Klemmenspannung  $E_k$  mit der in den Armaturspulen induzierten elektromotorischen Kraft  $E$  zusammen.

Die EMK ist jedoch proportional  $N \cdot w \cdot \frac{n}{60}$ , woselbst  $N$  die wirksame Zahl der Kraftlinien,  $w$  die Windungszahl der Armatur und  $n$  die Tourenzahl pro Minute bedeuten. Da der Ankerkoeffizient  $c_a$  sowie die Tourenzahl  $n$  Konstante sind, so stellt die Kurve der induzierten Spannung  $E$ , die sich ausdrückt als

$$(17) \dots \dots E = N \cdot w \cdot c_a \cdot \frac{n}{60} = M \cdot c_a \cdot \frac{n}{60},$$

angenähert die Magnetisierungskurve dar. Infolge der Streuung und der auftretenden Wirbelströme, entsprechend einem hohen Werte des Erregerstromes  $i_e$ , können die Werte für  $E$  etwas unterhalb der Magnetisierungskurve liegen; meistens sind diese Abweichungen nur sehr gering, und  $E$  wächst meistens annähernd proportional  $i_e$ .

Falls die Tourenzahl nicht ganz konstant bleibt, ist eine entsprechende Korrektur des abgelesenen Wertes für  $E$  einzuführen, gegeben durch das Verhältnis der  $\frac{\text{normalen}}{\text{abgelesenen}}$  Tourenzahl mal dem

beobachteten Wert für  $E$ . — Ist die Kurve  $E$  als Funktion von  $i_e$  bei normalem konstanten  $n$  experimentell bestimmt, so ist die nächste Aufgabe, den Kurzschlußstrom  $J_0$  ebenfalls als Funktion der Erregung  $i_e$  (bei der nämlichen konstanten Tourenzahl  $n$ ) darzustellen. Zunächst schließe man den Generator durch ein geeignetes Amperemeter direkt an den Maschinenklemmen kurz, wobei die Erregung ausgeschaltet ist, und reguliere auf die normale Tourenzahl  $n$ ; dann gebe man vorsichtig kleine Erregung und beobachte die entsprechenden Werte von  $J_0$  am Amperemeter. Man kann  $J_0$  bis etwa 300 Proz. des normalen Belastungsstromes anwachsen lassen, jedoch darf hierbei die Versuchsdauer nur kurz sein. Hat man auf diese Weise die Kurven  $E = f(i_e)$  und  $J_0 = F(i_e)$  gewonnen, so läßt sich auf einfachem konstruktiven Wege die entsprechende Klemmenspannungskurve  $E_k$  für eine beliebige Belastungsstromstärke  $J$ , sowie äußere Phasenverschiebung als Funktion der Erregung  $i_e$  ableiten. Aus der Differenz von  $E$  und  $E_k$  findet man weiterhin für die Praxis sehr wichtigen Wert für den Spannungsabfall unter verschiedenen Belastungen. Durch direkte Vergleichung der so gefundenen Werte von  $E_k$  mit den experimentell gemessenen Werten wird man eine Abweichung finden. Die Konstruktion des Spannungsabfalles bzw. der Größe der Klemmenspannung für einen



dem Strome 400 Amp. entspricht. Soll nun eine Klemmenspannung von z. B. 100 Volt erzeugt werden und zwar bei demselben Strome, so ist diese mit obigem Spannungsabfalle zusammengesetzt, um die erzeugte EMK zu erhalten. Die Zusammensetzung ist geometrisch zu verstehen, da beide Größen nicht die gleiche Phase haben. Die Verschiebung beträgt  $90 + \varphi + \varepsilon$ ;  $\varphi$  ist der Verschiebungswinkel zwischen Klemmenspannung und Ankerstrom,  $\varepsilon$  ein Winkel, der von konstruktiven Verhältnissen abhängt, und den man meist zu  $10^\circ$  annimmt.  $KD$  trägt man unter  $\varphi + \varepsilon$  gegen die Abszisse geneigt an und schlägt um  $K$  einen Kreisbogen mit  $KE'$ , wodurch man  $D$  erhält. Weiter wird  $KP = 100$  Volt gemacht und die Resultante  $DP = OF$  auf der Ordinatenachse angetragen. Der Schnittpunkt der Horizontalen durch  $F$  mit der Kurve  $E$  gibt die zu der EMK  $E$  gehörige Erregung (Größe  $FE$ ). Die Vertikale durch diesen Punkt schneidet die Wagrechte durch  $P$  (100 Volt) in  $E_{ke}$ . Dieses ist ein Punkt der gesuchten Kurve. Für andere Klemmenspannungen ist die Konstruktion in der gleichen Weise auszuführen.

Die Umbiegung der  $E$ -Kurve, d. h. der Sättigungseinfluß, ist bei dieser Konstruktion nicht berücksichtigt. Infolgedessen ist der wahre Spannungsabfall stets kleiner, und liegt die experimentell aufgenommene Kurve der Klemmenspannung immer höher als die konstruierte.

Eine andere Konstruktion der Klemmenspannung beruht im Gegensatze zur vorigen nicht auf der Zusammensetzung von elektromotorischen Kräften, sondern auf Zusammensetzung von Amperewindungen. Sie sei ebenfalls an Hand der Figur kurz beschrieben (— · — · Linien).  $OK = OG$  ist auf  $OG$  anzutragen. Dies ist die Erregung, die erforderlich ist, um den Kurzschlußstrom 400 zustande zu bringen.  $OH$  ist eine beliebig gewählte höhere Erregung und  $HS$  die zugehörige EMK. Um diese als Klemmenspannung bei 400 Amp. zu erzeugen, ist die geometrische Summe der Erregungen  $OG$  und  $OH (= GH)$  erforderlich. Daher mache man  $OM = GH$ . Die Vertikale durch  $M$  und die Horizontale durch  $S$  liefern den gewünschten Punkt  $E_{ka}$ .

Diese Konstruktion liefert etwas zu hohe Werte für die Klemmenspannung. Der wahre Wert liegt immer zwischen den beiden Kurven  $E_{ke}$  und  $E_{ka}$ .

Eine dritte Konstruktion, die bessere Resultate liefert, wie die Kurve  $E_{ke}$ , indes immer noch unterhalb der wirklichen Kurve bleibt, läßt sich im Anschluß an die zweite Konstruktion ( $E_{ka}$ -Kurve) leicht ausführen. Die Konstruktion ist aus den punktierten Linien zu ersehen. Man verlängere die Vertikale  $ME_{ka}$  bis  $E''$ , ziehe  $E''O$ . Vom Schnittpunkte  $E'''$  von  $OE''$  mit  $SH$  ziehe man eine Horizontale bis zum Schnitt mit der Linie  $ME''$ . Die Konstruktion ergibt den Punkt  $E_{ke}$ ; für mehrere Punkte ausgeführt, liefert die Konstruktion die Kurve  $E'_{ke}$ . Für die Praxis ist ferner von Wichtigkeit die äußere Charakteristik, d. h. die Klemmenspannung  $E_k$  als Funktion der Belastung, sowohl bei induktiver wie bei induktionsfreier Belastung.

In Verträgen mit den Bezugfirmen wird meistens die Einhaltung einer bestimmten Größe des Spannungsabfalles bei konstanter Erregung und Tourenzahl sowohl bei induktionsfreier wie bei induktiver Belastung zwischen unbelastetem und vollbelastetem Generator verlangt. Dieser garantierte Wert kann leicht durch die äußere Charakteristik für jede Belastung ermittelt werden. Bei induktiver äußerer Belastung muß man Stromstärke-, Spannungs- und Energiemessungen vornehmen. Der Kosinus der Phasenverschiebung ergibt sich dann als Verhältniszahl von Watt: Volt  $\times$  Ampere. Mit der Größe der Phasenverschiebung nimmt naturgemäß die Ankerstromrückwirkung und Streuung und somit der Spannungsabfall zu. Diesem Faktor ist besonders bei Motorenbetrieb Beachtung zu schenken.

In Zentralstationen hat man die Aufgabe, die Klemmenspannung bei veränderlicher Belastung konstant zu halten. Es ist somit von besonderem Interesse, die Abhängigkeit des Erregerstromes  $i_e$  von der Belastung bei konstanter Klemmenspannung kennen zu lernen. Ein Diagramm, in welchem die Belastungsstromstärken  $J$  als Abszissen und die erforderlichen Erregungsintensitäten  $i_e$  als Ordinaten bei konstanter Klemmenspannung  $E_k$  aufgetragen sind, gibt über die Beziehung ein klares Bild. Die Steigerung des Wertes  $i_e$  kann an der soeben ausgeführten Konstruktion als horizontaler Abstand der Kurven  $E$  und  $E_k$  voneinander für jede Veränderung der Belastung gefunden werden.

Zur experimentellen Ermittlung des auf S. 316 u. 317 definierten Wirkungsgrades  $\eta$  von Wechsel- und Drehstromgeneratoren sind zwei Methoden möglich, und zwar die Bestimmung von  $\eta$  als Verhältnis der Nutzleistung zur mechanisch zugeführten Leistung und von Nutzleistung zu Nutzleistung + Effektivverlusten. Falls die Erregerenergie nicht von derselben Welle, welche die mechanische Arbeit leistet, abgegeben wird, so muß dieser Teil der Arbeit zur mechanischen Leistung addiert werden und  $\eta$  ist dann

$$(18) \dots \dots \left\{ \begin{array}{l} \text{Elektrische Nutzleistung} \\ \text{Mechanische Energie + Erregerenergie} \\ \left[ \frac{\text{Elektrische Nutzleistung}}{\text{El. Nutzleistung + Verlustarbeit.}} \right] \end{array} \right.$$

Bei selbstinduktionsfreiem Belastungswiderstande genügen die Messungen von effektiver Spannung und Stromstärke. Tritt Selbstinduktion im äußeren Kreise auf, so ist noch ein Energiemesser erforderlich. Der Leistungsfaktor Kosinus  $\varphi$  findet sich, wie schon erwähnt, als Quotient  $\frac{\text{Energiewert}}{\text{Spannung} \times \text{Strom}}$ . (Über die Behandlung und Schaltung sowie Korrektion des Energiemessers s. S. 251, 253 u. 261 bis 264.) Die Erregerenergie bestimmt sich aus der Beziehung

$$i_e \cdot e_e = i_e^2 \cdot w_e,$$

wo  $e_e$  die Spannung, welcher die Erregerwicklung ausgesetzt ist, und  $w_e$  den Widerstand der Erregerwicklung bedeuten. Ist zu der Erregerwicklung noch ein Regulierwiderstand praktisch erforderlich, so ist derselbe mit in den Wert von  $w_e$  einzurechnen. Die Messung der mechanisch zugeführten Energie wird bei kleinen Maschinen für jede Belastung meist mit Riemendynamometer (s. Kapitel B. 6, S. 45 u. f.) erfolgen. Die übertragene Zugkraft und somit der Wert von  $\eta$  können auf diesem Wege nur mit einer Genauigkeit von etwa 1 bis 3 Proz. ermittelt werden.

Genauer kann  $\eta$  für jede Belastung festgelegt werden, wenn der Wechsel- oder Drehstromgenerator von einem mit ihm gekuppelten Gleichstrommotor angetrieben wird, für welcher letzteren die Nutzeffekte für verschiedene Belastung bekannt sind. Die Bestimmung geschieht durch Messung der elektrischen Gleichstrom- und sekundären Wechsel- oder Drehstromenergie und entsprechende Umrechnung mit den bekannten Werten der Gleichstrommotorwirkungsgradkurve. — Ist ein geeigneter Gleichstrommotor nicht vorhanden, so ermittelt man zunächst aus dem Mittelwerte des Indikatordiagrammes und den weiteren Konstanten der gekuppelten Antriebsmaschine die  $PS_i$  bei unerregtem Leerlaufe des Generators. In diesem so gefundenen Werte ist selbstredend der Leerlaufseffekt der Dampfmaschine mit enthalten, und zwar ist dieser Betrag der größere, weshalb man in praxi den Effekt für den unerregten Leerlauf der Dynamo mit zu dem Leerlaufseffekte der Dampfmaschine rechnet. Der gefundene Wert von  $\eta$  für den Generator wird tatsächlich etwas zu hoch genommen.

Eine genauere Methode zur Ermittlung des  $\eta$  ist jedenfalls die schon bei Gleichstrommaschinen und späterhin bei Transformatoren empfohlene, nämlich die Bestimmung aus den Effektverlusten. Die rechnerische Bestimmung und die Formel für  $\eta$  bei Ein- und Mehrphasengeneratoren habe ich in diesem Kapitel schon gegeben. Ich will hier noch angeben, wie man die verschiedenen Werte der Effektverluste experimentell findet.

Zunächst wird die Leerlaufsarbeit durch Leerlaufsversuche festgestellt. Dieselbe ist einerseits bestimmt durch die Reibungsarbeit  $l_u$  bei unerregten Feldmagneten und andererseits durch die Arbeit  $l_e$  bei erregten Feldmagneten. Unter der Annahme, daß die Erregermaschine auf der Generatorwelle sitzt, erhält man nach Abzug des Erregereffektes  $i_e^2 \cdot w_e$  von der Leerlaufsarbeit  $l_e$  die Reibungs-, Hysteresis- und Wirbelstromarbeit. Der Wert  $l_e - l_u - i_e^2 \cdot w_e$  stellt alsdann die Hysteresis- und Wirbelstromarbeit allein dar. Sitzt die Erregermaschine nicht auf der Generatorwelle, so ist die Erregerarbeit  $i_e^2 \cdot w_e$  naturgemäß nicht erst vom Werte  $l_e$  in Abzug zu bringen. — Die Leerlaufsarbeit läßt sich entweder durch das Riemendynamometer<sup>1)</sup> oder genauer durch Antrieb

<sup>1)</sup> Siehe Kittler, Bd. I, Messung mechanischer Arbeit.

des Generators mittels eines Elektromotors (Gleichstrom) bestimmen, dessen Leistung nicht größer als die Effektverlustgröße des Generators zu sein braucht. Am besten wird der Generator — wenn möglich — direkt mit dem Gleichstrommotor gekuppelt, da bei Riemenübertragung, wie schon erwähnt, eine variable Verlustgröße, nämlich die Riemenleitungsarbeit, mit in Frage kommt. Meistens werden die Verluste und die Wirkungsgrade des Gleichstrommotors bei verschiedenen Belastungen bekannt sein, und sind somit die Effekte, welche dem Generator zugeführt werden, gleich dem Effekte des Motors mal dem Wirkungsgrade des letzteren. Ist der Wirkungsgrad nicht bekannt, so bestimmt man den dem Motoranker zugeführten elektrischen Effekt  $J \cdot e$  (Ankerstrom mal Klemmenspannung) bzw.  $J_1 \cdot e_1$ , d. h. den Effekt, bevor bzw. während die zu messende Leistung auf den Generator übertragen wird. Nach Abzug der jeweiligen Verluste durch Ankerstromwärme von den genannten beiden Effekten des Motors ist die Differenz derselben gleich dem an den Generator übertragenen Effekte.

Bei obigen Versuchen ist natürlich die normale Tourenzahl zu wählen, da die Leerlaufsarbeit direkt eine Funktion der Tourenzahl ist.

Der zweite Teil der Leerlaufsarbeit des Generators (für Hysterisis und Wirbelströme) ist außer von der Tourenzahl auch abhängig von der Erregungsstromstärke  $i_e$ . Es fragt sich nun, ob der bei Leerlauf ermittelte Eisenverlust ohne weiteres auch für Belastung Geltung hat. Das ist nicht der Fall. Die Eisenverluste  $E_{H+W}$  sind, soweit sie die Verluste durch Hysterisis betreffen, nahezu der 1,6. Potenz der Induktion  $B$  im Eisen proportional und somit mittelbar eine Funktion der Erregung  $i_e$ . Es wäre nun von Interesse, die Eisenverluste in Abhängigkeit von der Erregung genau kennen zu lernen. Da jedoch bei Belastung mit konstanter Tourenzahl die Induktion  $B$  nicht nur von  $i_e$ , sondern auch von der Ankerstromstärke  $J$  abhängig ist, und man andererseits in der induzierten EMK  $E$  im Anker eine Größe hat, die  $B$  direkt proportional ist, so stellt man zweckmäßig die Eisenverluste als Funktion der Größe  $E$  in einer Kurve dar. ( $E$  läßt sich meist durch Anbringung einer Hilfsspule messen.) Die Kurve selbst kann bei Leerlauf ermittelt werden, bei dem das jeweilige  $E = E_k$  ist. Man mißt die verschiedenen Spannungen des Generators bei variabler Erregung und die dem treibenden Gleichstrommotor zugeführten Effekte. Nach Abzug der Stromwärme im Anker des Motors ergibt die Differenz der Effekte bei erregtem und unerregtem Leerlaufe die Eisenverluste  $E_{H+W_L}$  für Leerlauf. Diese sind als Ordinaten zu den Spannungen als Abszissen aufzutragen. Der so gefundene Verlust  $E_{H+W_L}$  für den Leerlauf trifft nun, wie schon angedeutet, für belasteten Anker nicht mehr genau zu und bedarf, streng genommen, einer Korrektur. Denn da infolge der Ankerrückwirkung eine Verzerrung der Spannungskurve eintritt, so wird das Maximum der EMK und somit in demselben Maße die maximale Induktion  $B$  eine Veränderung erleiden. Der aus genannter Kurve, ent-

sprechend dem gemessenen Effektivwert  $E$ , entnommene Wert  $E_{H+W_L}$  für die Eisenverluste vergrößert sich im Verhältnis  $\left(\frac{B}{B_L}\right)^2$  und ergibt:

$$E_{H+W} = E_{H+W_L} \cdot \left(\frac{B}{B_L}\right)^2 = E_{H+W_L} \cdot \left(\frac{E_{max}}{E_{max_L}}\right)^2,$$

wenn  $B$  bzw.  $B_L$  die maximale Induktion im Ankereisen beim Belastungsstrom  $J$  bzw. bei offenem Ankerstromkreise,  $E_{max}$  bzw.  $E_{max_L}$  die entsprechenden Maximalwerte der im Anker induzierten EMK bedeuten. Letztere Werte können durch Aufnahme der Spannungskurven<sup>1)</sup> bei Belastung und Leerlauf ermittelt werden.

Der so ermittelte Eisenverlust, zusammen mit den Verlusten des unerregten Leerlaufes und weiterhin den schon obenerwähnten Verlusten im Anker des Generators und in der Erregermaschine, ergibt den Gesamtverlust bei belasteter Maschine. Bezüglich des Ohmschen Verlustes  $p \cdot J^2 \cdot w_a$  im Anker sei noch bemerkt, daß der Ankerwiderstand pro Phase  $w_a$  in bekannter Weise durch indirekte Widerstandsmessung mit Gleichstrom bei warmer Wicklung bestimmt wird; unter Berücksichtigung der Wirbelstromverluste im Kupfer und des etwaigen Einflusses der Eigenimpedanz<sup>2)</sup> ist der gefundene Wert von  $w_a$  mit etwa 1,5 zu multiplizieren, um den tatsächlich wirksamen Wert des Widerstandes zu erhalten.

## 6. Experimentelle Untersuchungen an asynchronen Mehrphasenmotoren.

Ich gehe jetzt über zu der Bestimmung der gleichen Größen bei Ein- und Mehrphasenmotoren. Die Leerlaufsarbeit wird ermittelt, indem man dem unbelasteten Motor einen Strom von normaler Spannung bei konstanter normaler Periodenzahl zuführt. Wird die Spannung vom Werte Null an allmählich gesteigert, so erhält man durch Auftragen der Spannungen als Abszisse und der dazugehörigen primären Stromstärken bzw. der durch Wattmetermessung bestimmten zugeführten Energie als Ordinaten die sogenannte Magnetisierungskurve bzw. die Kurve der Verluste; dieselben bestehen der Hauptsache nach aus den Eisen- und den Reibungsverlusten sowie zum kleinen Teile aus dem Kupferverluste, welcher durch den Primärstrom bedingt ist. Für die normale Spannung findet man aus der Stromkurve den entsprechenden Wert für den Leerlaufstrom. Da ferner durch den Belastungsversuch die Stromstärke für die Normalleistung des Motors bestimmt ist, so ist der prozentuale Wert des Leerlaufstromes von dem Vollaststrom auch gegeben. (Der Leerlaufstrom beträgt etwa 20 bis 35 Proz. des Vollast-

<sup>1)</sup> Näheres hierüber siehe: C. Heinke, Wechselstrommessungen und magnetische Messungen.

<sup>2)</sup> Siehe hierzu: Vorstehend genanntes Werk von Heinke.