

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

II. Leerlaufzustand

[urn:nbn:de:bsz:31-285100](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-285100)

Die Tourenregulierung eines solchen Motors wurde zuerst ermöglicht durch die auf Stator und Rotor verteilte Erregung nach den deutschen Patenten 165053/54/55 von E. Arnold und J. L. la Cour.

II. Leerlaufzustand. (Rotorerregung.)

1. Die Hauptfelder und ihre Beziehung zueinander. — 2. Einfluß der Oberfelder. — 3. Einfluß der Streuung und Kommutation. — 4. Grundgleichung. — 5. Ersatzstromkreis, Strom und Spannungsdiagramm. — 6. Einfluß der Kurzschlußströme.

1. Die Hauptfelder und ihre Beziehung zueinander.

Der Leerlaufzustand ist in Fig. 3 dargestellt.

Leitet man in die Erregerbürsten einen Wechselstrom ein, so entsteht ein Wechselfeld, dessen magnetische Achse in der Verbindungslinie B_2-B_4 , quer zur Achse der Statorwicklung, liegt. Es werde als Querfeld bezeichnet.

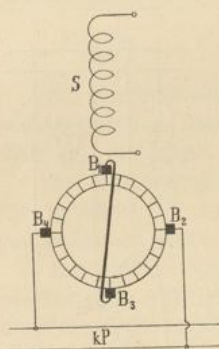


Fig. 3.

Steht der Rotor still, so induziert dieses Feld nur durch seine Pulsationen EMKe, die in den Ankerleitern zu beiden Seiten der Symmetrielinie B_2-B_4 gleichgerichtet sind (Fig. 4a). Sie ergeben also eine resultierende EMK an den Erregerbürsten, zu deren Überwindung dem Rotor eine Spannung zugeführt werden muß, die dem Feld um $\frac{1}{4}$ Periode voreilt und als Magnetisierungsspannung bezeichnet werde.

Wird der Rotor in Drehung versetzt, so bleibt das Querfeld im Raum stehen, und durch die Rotation in diesem Feld werden EMKe induziert, die zu beiden Seiten der neutralen Zone dieses Feldes B_1-B_3 (Fig. 4a) gleichgerichtet sind und sich in bezug auf die Arbeitsbürsten B_1-B_3 addieren. Die Richtung dieser EMKe ist für einen Augenblick, in dem das Querfeld von B_2 nach B_4 gerichtet ist, in Fig. 4b angedeutet, wobei Rechtsdrehung angenommen ist. Diese EMKe sind in Phase mit dem Querfeld, und ihm proportional und der Geschwindigkeit. Die resultierende EMK der Rotation würde z. B. bei geöffneter Kurzschlußverbindung an den Bürsten $B_1 B_3$ gemessen werden können.

Ist die Verbindung geschlossen, so erzeugt die EMK einen Rotorstrom in den Arbeitswindungen, der ein Feld in der Achse der

Arbeitsbürsten und der Statorwicklung erregt, das bei der in Fig. 4 b eingetragenen Stromrichtung von B_3 nach B_1 gerichtet ist.

Dieses Feld werde als Längsfeld des Rotors bezeichnet.

Es erreicht wegen der Selbstinduktion der Wicklung nahezu um $1/4$ Periode später sein Maximum in der Richtung B_3-B_1 als das Querfeld in der Richtung B_2-B_4 sein Maximum hatte. Es entsteht somit durch Zusammenwirken der beiden Felder ein Drehfeld, das im Sinne der angenommenen Drehrichtung rotiert. So lange die Felder verschieden groß sind, ist es elliptisch.

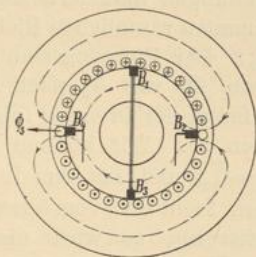


Fig. 4a.

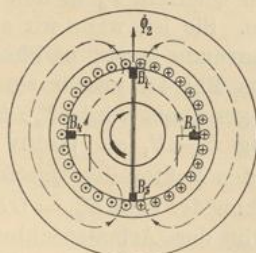


Fig. 4b.

Daher rechnet man besser mit den Wechselfeldern. Die EMKe, die das Längsfeld des Rotors induziert, ergeben wieder je eine resultierende EMK der Pulsation in den gleichachsigen Arbeitswindungen und eine resultierende EMK der Rotation in den dazu senkrechten Erregerwindungen. In jedem Stromkreis bestehen somit zwei EMKe, die sich gegenseitig aufheben.

Es bezeichnet:

$w = \frac{N}{4a}$ die Zahl der in Reihe geschalteten Windungen des

Rotors,

N die Drahtzahl,

a die halbe Anzahl Ankerstromzweige,

f den Wicklungsfaktor,

c die Periodenzahl des Wechselstromes,

$c_r = \frac{pn}{60}$ die Periodenzahl der Rotation bei n Umdrehungen

pro Min. und p Polpaaren.

Ein Feld Φ induziert in der mit ihm gleichachsigen Wicklung durch Pulsation eine EMK

$$E_p = \pi \sqrt{2} c w f \Phi 10^{-8} \text{ Volt}$$

und durch Rotation in der dazu senkrechten Wicklung

$$E_r = 2 \sqrt{2} c_r w \Phi 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Für ein sinusförmiges Feld ist der Wicklungsfaktor der verteilten Gleichstromwicklung $f = \frac{2}{\pi}$, und es besteht daher die Beziehung

$$\frac{E_r}{E_p} = \frac{c_r}{c} \dots \dots \dots (1)$$

Die Grundbeziehung zwischen Quer- und Längsfeld ergibt sich nun wie folgt. Es ist

$$E_{2r} = 2 \sqrt{2} c_r w \Phi_3$$

die vom Querfeld Φ_3 in den Arbeitswindungen induzierte EMK der Rotation. Sie ist, wenn wir einen bestimmten räumlichen Richtungssinn zugrunde legen, in Phase mit Φ_3 . Der Richtungssinn ergibt sich aus Fig. 4 a und b so, daß, wenn Φ_3 von B_2 nach B_4 als positiv gerechnet wird, E_{2r} in der im Sinne der Drehung folgenden Richtung B_3-B_1 als positiv zu denken ist. Wir können also in Fig. 5 den Vektor des Querfeldes $\Phi_3 = OA$ und mit ihm in Phase den Vektor der EMK $E_{2r} = OB$ auftragen. Sieht man vom Spannungsabfall in der Arbeitswicklung zunächst ab, so wird die EMK E_{2r} gerade so groß sein, daß sie die durch Pulsation des Längsfeldes Φ_2 induzierte EMK ($-E_{2p}$) aufhebt.

Es wird also

$$\mathcal{E}_{2r} - \mathcal{E}_{2p} = 0.$$

Da

$$E_{2p} = 2 \sqrt{2} c w \Phi_2$$

ist, wird

$$\Phi_2 = \frac{c_r}{c} \Phi_3 \dots (2)$$

Tragen wir in Fig. 5 $-E_{2p} = OC = -OB$ auf, so eilt der Vektor OD des Feldes Φ_2 der EMK $-E_{2p}$ um 90° vor und dem Vektor Φ_3 um 90° nach.

Die positive Richtung von Φ_2 im räumlichen Diagramm ist nun dieselbe wie die von E_{2r} . Aus Gl. 2 folgt, daß für $\frac{c_r}{c} = 1$ das Drehfeld symmetrisch wird, und daß der Rotor synchron mit ihm rotiert.

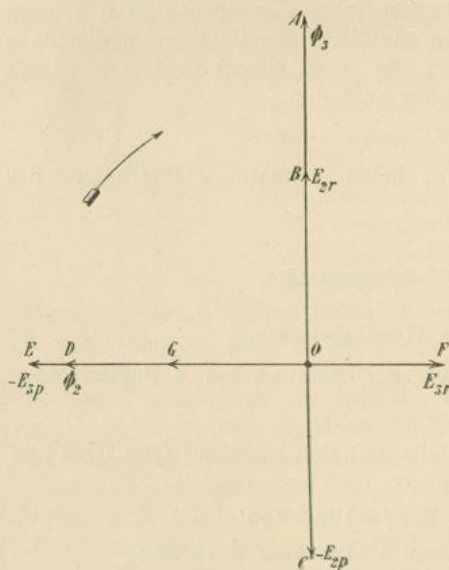


Fig. 5.

Die Spannung an den Erregerbürsten ergibt sich nun wie folgt:

Das Querfeld induziert eine EMK $-E_{3p}$, die um 90° gegen Φ_3 verzögert ist; ihr Vektor liegt in \overline{OE} (Fig. 5), und zwar ist der Richtungssinn für $-E_{3p}$ derselbe wie für Φ_3 . Es ist

$$E_{3p} = 2\sqrt{2}cw\Phi_3.$$

Die durch Drehung im Längsfelde Φ_2 induzierte EMK

$$E_{3r} = 2\sqrt{2}c_r w \Phi_2 = \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 E_{2p} \dots \dots \dots (2a)$$

ist nun der Richtung von $-E_{3p}$ entgegengerichtet; wir tragen sie daher in Fig. 5 um 180° in der Phase gegen \overline{OE} verschoben an nach \overline{OF} . Die resultierende EMK an der Erregerwicklung ist daher

$$-E_{3p} + E_{3r} = -E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 \right] = \overline{OG}$$

und dem Rotor muß vom Netz zur Überwindung dieser EMK eine Spannung $+E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 \right]$ zugeführt werden.

E_{3p} ist die Spannung, die wir als Magnetisierungsspannung bezeichnet hatten. Es folgt nun, daß durch die Entstehung des Rotorlängsfeldes die Magnetisierungsspannung des Rotors so aufgehoben wird, daß sie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit verschwindet. Für $\frac{c_r}{c} = 1$ wäre sie Null, weil der Rotor synchron mit dem Drehfeld rotiert, und die Klemmenspannung braucht nur so groß zu sein, wie zur Überwindung des Spannungsabfalles erforderlich ist.

Solange die Magnetisierungsspannung nicht ganz aufgehoben ist, d. h. wenn $\frac{c_r}{c} < 1$ ist, ist das Querfeld gegen die Klemmenspannung verzögert, ist $\frac{c_r}{c} > 1$, so wird $E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 \right]$ negativ, das Querfeld und der Rotorstrom eilen der Klemmenspannung in der Phase voraus: der Rotor verhält sich wie ein Kondensator.

Durch die Wirkung des Spannungsabfalles und der Kommutation wird die einfache Beziehung Gl. 2 zwischen den Feldern etwas verändert. Ferner trifft die Annahme sinusförmiger Feldverteilung nicht allgemein zu. Diese Einflüsse mögen zunächst untersucht werden.

2. Einfluß der Oberfelder.

Die EMK der Rotation in einer verteilten Gleichstromwicklung ist nur abhängig von dem gesamten Kraftfluß und unabhängig von seiner Verteilung, dagegen ist die EMK der Pulsation davon abhängig, weil sich mit der Feldverteilung die Zahl der Kraftrohrenverkettungen d. h. der Wicklungsfaktor f ändert.

Die durch Gl. 1 ausgedrückte Beziehung lautet daher allgemein:

$$E_r = \frac{2 c_r}{\pi f c} E_p = \frac{c_r E_p}{c \sigma}, \dots \dots \dots (1a)$$

worin nur für ein Sinusfeld der Wicklungsfaktor

$$f = \frac{2}{\pi}$$

und

$$\sigma = \frac{\pi f}{2} = 1$$

ist.

Um den Wicklungsfaktor für die verteilte Gleichstromwicklung allgemein zu berechnen, zerlegt man die beliebige Feldkurve, die bei verteiltem Eisen symmetrisch sein wird, in ihre Harmonischen

$$B_t = B_1 \sin \alpha \pm B_3 \sin 3\alpha \pm B_5 \sin 5\alpha \dots$$

Der Kraftfluß ist somit zusammengesetzt aus den Teilen

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} B_1 \tau l$$

$$\Phi_3 = \pm \frac{2}{\pi} B_3 \frac{\tau}{3} l$$

$$\Phi_5 = \pm \frac{2}{\pi} B_5 \frac{\tau}{5} l$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

und

$$\Phi = \Phi_1 \pm \Phi_3 \pm \Phi_5 \dots$$

Bildet man nun die Summe der Kraftrohrenverkettungen der verteilten Gleichstromwicklung für die einzelnen (ν) Harmonischen, so ergeben sich ν Summen

$$\Sigma(w_x \Phi_{\nu x}),$$

die man ersetzen kann durch die Integrale

$$w \Phi_\nu \frac{1}{\pi} \int_{\alpha = -\frac{\pi}{2}}^{\alpha = +\frac{\pi}{2}} \cos(\nu \alpha) d\alpha.$$

Hierin ist

$$\alpha = +\frac{\pi}{2}$$

$$\frac{1}{\pi} \int_{\alpha = -\frac{\pi}{2}}^{\alpha = +\frac{\pi}{2}} \cos(v\alpha) d\alpha = f_v$$

$$\alpha = -\frac{\pi}{2}$$

der Wicklungsfaktor der verteilten Gleichstromwicklung in bezug auf die v te Harmonische.

Es wird

$$f_1 = \frac{2}{\pi}$$

$$f_3 = -\frac{1}{3} \frac{2}{\pi}$$

$$f_5 = +\frac{1}{5} \frac{2}{\pi}$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

und

$$E_p = \pi \sqrt{2} cw \Sigma (f_v \Phi_v) = \pi \sqrt{2} cw \frac{2}{\pi} \left(\Phi_1 \mp \frac{1}{3} \Phi_3 \pm \frac{1}{5} \Phi_5 \mp \dots \right).$$

Der resultierende Wicklungsfaktor wird daher

$$f = \frac{\Sigma (f_v \Phi_v)}{\Phi} = \frac{2}{\pi} \frac{\Phi_1 \mp \frac{1}{3} \Phi_3 \pm \frac{1}{5} \Phi_5 \mp \dots}{\Phi_1 \pm \Phi_3 \pm \Phi_5 \pm \dots}$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich, daß z. B. ein Feld mit einer negativen dritten Harmonischen (spitzes Feld) einen Wicklungsfaktor hat, der größer als $\frac{2}{\pi}$ ist, es wird daher

$$\sigma = \frac{f\pi}{2} > 1.$$

Für eine positive dritte Harmonische (flaches Feld) ist

$$f < \frac{2}{\pi}$$

$$\sigma < 1.$$

Bezieht sich nun im folgenden σ_2 auf die Arbeitswindungen, σ_3 auf die Erregerwindungen, so ist die Bedingung, daß die EMKe der beiden Rotorfelder in den kurzgeschlossenen Arbeitswindungen sich aufheben, nunmehr

$$\Phi_2 = \frac{c_r}{c} \frac{\Phi_3}{\sigma_2} \dots \dots \dots (2a)$$

und die resultierende EMK in den Erregerwindungen wird

$$E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{\sigma_2 \sigma_3} \right].$$

Sind σ_2 und σ_3 größer als 1, so ist die Magnetisierungsspannung erst bei einer höheren, sind σ_2 und σ_3 kleiner als 1, so ist sie schon bei einer kleineren als der synchronen Geschwindigkeit aufgehoben, nämlich wenn

$$\frac{c_r}{c} = \sqrt{\sigma_2 \sigma_3}$$

ist.

Die verteilte Gleichstromwicklung hat z. B. eine dreieckige MMK-Kurve. Wäre das Feld nicht durch die Sättigung abgeflacht, sondern auch dreieckig, so ist hierfür

$$f = \frac{2}{3}$$

$$\sigma = \frac{\pi}{3},$$

und an Stelle des Synchronismus tritt nun die Geschwindigkeit

$$\frac{c_r}{c} = \frac{\pi}{3} = 1,047,$$

bei der die Magnetisierungsspannung des Rotors Null ist.

Im Gegensatz hierzu ist ein rechteckiges Feld ein Beispiel für ein Feld mit einer positiven dritten Harmonischen. Hier ist

$$f = \frac{1}{2}$$

$$\sigma = \frac{\pi}{4} = 0,785.$$

Da bei dem dreieckigen Feld die Abweichung nur gering ist und die Felder in Wirklichkeit durch die Sättigung abgeflacht werden und sich der Sinusform mehr nähern, kann man im allgemeinen mit $\sigma = 1$ rechnen.

3. Einfluß der Streufelder und der Kommutation.

In jedem der beiden Rotorstromkreise besteht zunächst ein Ohmscher Spannungsabfall in der Wicklung und an den Bürstenübergangsflächen. Der effektive Widerstand r jedes Stromkreises ist hierbei mit den Übergangswiderständen veränderlich.

Ferner induzieren die Streufelder, die sich um die einzelnen Drähte quer durch die Nuten, um die Zahnköpfe und Stirnverbindungen schließen, EMKe. Diese Streufelder rotieren mit der Wicklung, sie kommen also bei den durch die relative Drehung der Wicklung gegen die Felder induzierten EMKen nicht in Betracht,

sondern sie induzieren nur durch ihre Pulsation EMKe in den Windungen, mit denen sie verkettet sind. Der Strom jeder Windung hat, abgesehen von dem Moment, wo sie kurzgeschlossen, d. h. aus dem Ankerstromzweig ausgeschaltet ist, stets die Grundperiodenzahl, gleichviel ob der Rotor sich dreht oder nicht. Daher haben die von den Streufeldern induzierten EMKe auch stets die Grundperiodenzahl. Weil die Streufelder zum größten Teil in Luft verlaufen, nimmt man an, daß sie proportional mit dem Strom und in Phase mit ihm sind und setzt die von ihnen induzierte EMK gleich dem Produkt aus dem Strom und einer Reaktanz

$$x = 2\pi cS,$$

worin S der Induktionskoeffizient für die Streufelder ist und ebenso wie bei einem Asynchronmotor¹⁾ aus der Leitfähigkeit der Streufüsse berechnet wird.

Ist

$$\lambda_N = \left(\lambda_n + \lambda_k + \frac{l_s}{l} \lambda_s \right)$$

die magnetische Leitfähigkeit einer Nut pro Zentimeter Ankerlänge, so ist für die Gleichstromwicklung, bei der

$$s_n = \frac{N}{Z}$$

Drähte in einer Nut liegen, der Induktionskoeffizient der Drähte einer Nut

$$s_n^2 l \lambda_N.$$

Jeder Ankerstromzweig hat $\frac{Z}{2a}$ Nuten, und $2a$ Ankerstromzweige sind parallel geschaltet. Daher ist

$$S = \frac{1}{2a} \frac{Z}{2a} s_n^2 l \lambda_N = \left(\frac{N}{2a} \right)^2 \frac{1}{Z} l \lambda_N 10^{-8} \text{ Henry}$$

$$x = 2\pi cS = 2\pi c \left(\frac{N}{2a} \right)^2 \frac{l}{Z} \lambda_N 10^{-8} \text{ Ohm.}$$

In dem Augenblick, in dem eine Windung kurzgeschlossen ist, ändert sich ihr Eigenfeld mit einer anderen, nämlich der Kommutierungsperiodenzahl. Es tritt also noch eine EMK auf. Solange nur zwei Bürsten aufliegen und der Rotor nur einen Stromkreis bildet, sind die kurzgeschlossenen Spulen aus dem Stromkreis ausgeschaltet, und die von ihnen in benachbarten Spulen induzierten EMKe heben sich in bezug auf den ganzen Stromkreis heraus. Da-

¹⁾ s. Wechselstromtechnik, Bd. V, 1, von E. Arnold und J. L. la Cour.

her hat die einphasige Kommutatorwicklung eine von den Streufeldern herrührende Reaktanz, die unabhängig von der Rotorgeschwindigkeit ist, wie von E. Arnold und J. L. la Cour¹⁾ auch durch den Versuch gezeigt ist. Sie haben aber auch gezeigt, daß bei einer mehrphasigen Kommutatorwicklung diese Reaktanz zum Teil wieder aufgehoben wird durch die Vorgänge bei der Kommutation. Bei der in Fig. 3 dargestellten Erregeranordnung bilden die Ströme, entsprechend den Feldern, ein unsymmetrisches Zweiphasensystem. Hier kommt die Änderung des Eigenfeldes einer Spule bei der Kommutation in dem zweiten Stromkreis des Rotors zur Geltung.

Durch die Kommutation des Stromes ändert sich das Eigenfeld einer Nut Φ_N in der Zeit T_N von

$$\Phi_N \sin \omega t \text{ nach } -\Phi_N \sin \omega(t + T_N),$$

und da T_N klein ist gegen die Dauer der Periode, ist die mittlere Änderung des Nutzenfeldes pro Sekunde angenähert

$$\frac{2\Phi_N \sin \omega t}{T_N}.$$

Es entsteht hierdurch in den kurzgeschlossenen und in den in denselben Nuten liegenden Spulen eine EMK von der Grundperiodenzahl, die in Phase mit dem kommutierten Strom ist. Nun gehören die Spulen, in denen der Strom des einen Stromkreises kommutiert wird, jeweils dem anderen Stromkreise an. Wird also z. B. der Strom unter den Erregerbürsten kommutiert, so entsteht eine EMK in den Arbeitswindungen und umgekehrt.

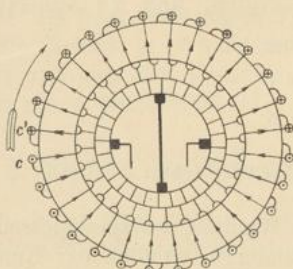


Fig. 6a.

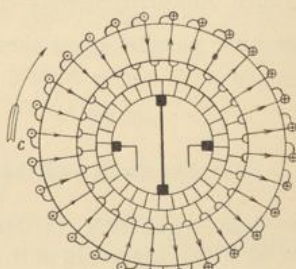


Fig. 6b.

Die Richtung dieser EMKe ergibt sich aus Fig. 6. Es stelle Fig. 6a wieder für einen bestimmten Augenblick die Stromrichtung

¹⁾ Die Kommutation von Gleich- und Wechselstrom, von E. Arnold und J. L. la Cour, Stuttgart (Enke) 1906.

in den Ankerdrähten dar, sofern sie dem Erregerkreis angehören. Ist der Strom in dieser Richtung gerade im Maximum, so wird bei der Drehung im Sinne des Uhrzeigers der Strom in den Arbeitswindungen gerade von Null in der in Fig. 6b angedeuteten Richtung ansteigen, weil dieser Strom um $\frac{1}{4}$ Periode phasenverzögert ist. Gelangt nun in Fig. 6a eine kurzgeschlossene Spule c bei der Kommutation in die Lage c' , so ändern sich hierbei ihr Strom und ihr Eigenfeld gerade in umgekehrtem Sinne, als sie sich nach Fig. 6b ändern. Die während der Kommutation vom Eigenfeld des Stromes der Erregerwicklung induzierte EMK ist also der von dem Streufeld des Stromes in der Arbeitswicklung induzierten EMK entgegengesetzt gerichtet und hebt sie zum Teil auf, oder umgekehrt.

Obwohl diese EMK nur in einzelnen Nuten auftritt, kann sie dennoch groß werden wegen der hohen Änderungsgeschwindigkeit des Eigenfeldes bei der Kommutation.

In den kurzgeschlossenen Spulen selbst ruft sie einen inneren Strom und einen Spannungsabfall unter den Bürsten hervor, so daß nur ein Teil von ihr als Potentialdifferenz im anderen Stromkreis auftritt; in den in denselben Nuten liegenden nicht kurzgeschlossenen Spulen tritt sie aber in voller Stärke auf.

Daher ist die Berechnung nur angenähert möglich.

Es bezeichnet:

Φ_N = das Eigenfeld einer Nut,

$AS = \frac{NJ}{\pi D \cdot 2a}$ die Anzahl Amperedrähte pro Zentimeter Ankerumfang,

t_1 die Nutenteilung,

b_D die auf den Ankerumfang projizierte Bürstenbreite,

β_D die auf den Ankerumfang projizierte Lamellenbreite,

v die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers in m/sec,

T_N die Dauer des Kurzschlusses der Drähte einer Nut.

Es ist

$$\Phi_N = t_1 AS \lambda_N l$$

$$T_N = \frac{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}{100v} \text{, 1)}$$

daher ist die maximale Änderung des Nutenfeldes bei der Kommutation pro Sekunde

$$\frac{2\sqrt{2}\Phi_N}{T_N} = \frac{2\sqrt{2}t_1 AS \lambda_N l}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 100v 10^{-8}.$$

1) s. Die Gleichstrommaschine, Bd. I, von E. Arnold (2. Aufl.), S. 363.

Da die Kommutation gleichzeitig in mindestens $2p$ Nuten stattfindet, ist die Zahl der dabei induzierten Drähte in Reihe $2p \left(\frac{N}{2aZ} \right)$, und da angenommen werden kann, daß sämtliche Drähte einer Nut vom ganzen Streufeld umschlungen sind, ist die effektive induzierte EMK im ganzen Stromkreis

$$\frac{2pN}{2aZ} \frac{2t_1 AS \lambda_N l}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 100v 10^{-8} = 4J \left(\frac{N}{2a} \right)^2 \frac{l \lambda_N}{Z} c_r \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-8}$$

oder, wenn wir den früher (S. 93) berechneten Wert x der Reaktanz der Streuflüsse einsetzen

$$= \frac{2}{\pi} J x \frac{c_r}{c} \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Subtrahiert man hiervon die Spannung AP , die durch die inneren Ströme in den kurzgeschlossenen Spulen an den Bürstenübergängen verbraucht wird, so bleibt die effektive EMK

$$\frac{2}{\pi} J x \frac{c_r}{c} \frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}} 10^{-8} - AP.$$

Der Ausdruck $\frac{t_1}{t_1 + b_D - \beta_D \frac{a}{p}}$ ist etwas kleiner als 1, AP be-

trägt etwa 1—2 Volt. Wenn das letzte Glied nicht groß ist, nähert sich die EMK dem Wert

$$J \frac{2}{\pi} x \frac{c_r}{c}.$$

Da aber die in Rechnung gesetzte Nutenzahl ein Minimum ist, kann sie auch größer werden, insbesondere auch dann, wenn die Kommutierungszeit des Stromes kürzer ist als die Kurzschlußzeit,¹⁾ die in Rechnung gesetzt ist.

Da die EMK dem kommutierten Strom proportional ist, setzen wir sie

$$J x_N \frac{c_r}{c},$$

worin der Index N darauf hindeutet, daß sie vom Nutenfeld herührt. x_N ist im allgemeinen nicht ganz konstant und kleiner als

¹⁾ Nach neueren Versuchen von Prof. E. Arnold ist dies bei Gleichstrommaschinen häufig der Fall; s. Experimentelle Untersuchung der Kommutation von E. Arnold.

die Reaktanz der Streufüsse, kann aber, wie erwähnt, ebenso groß oder größer werden.

4. Grundgleichungen.

Es bezeichnen

$E_{2p}, E_{2r}, E_{3p}, E_{3r}$, die von den Hauptfeldern durch Pulsation (p) bzw. Rotation (r) induzierten EMKe in den Arbeitswindungen (2) bzw. Erregerwindungen (3),

J_2 den Strom der Arbeitswindungen,

J_3 den Strom der Erregerwindungen,

$Z_2 = (r_2 - jx_2)$ die Impedanz der Arbeitswindungen,

$Z_3 = (r_3 - jx_3)$ die Impedanz der Erregerwindungen,

x_N die von der Kommutation des Nutenfeldes herrührende Reaktanz,

$Z_a = r_a - jx_a$ die Erregerimpedanz } die durch Gl. 3a
 $Y_a = \frac{1}{Z_a} = g_a + jb_a$ die Erregeradmittanz } definiert sind.

Unter Berücksichtigung des bisher Betrachteten ist die Spannungsgleichung für den in sich geschlossenen Stromkreis der Arbeitswindungen

$$\mathfrak{E}_{2r} + Z_3 x_N \frac{c_r}{c} - \mathfrak{E}_{2p} - Z_2 Z_2 = 0 \dots (3)$$

worin

$$\left. \begin{aligned} Z_2 &= \mathfrak{E}_{2p} Y_a \\ \mathfrak{E}_{2p} &= Z_2 Z_a \text{ ist.} \end{aligned} \right\} \dots (3a)$$

Für die Erregerwindungen wird

$$k\mathfrak{P} = \mathfrak{E}_{3p} - \mathfrak{E}_{3r} + Z_2 x_N \frac{c_r}{c} + Z_3 Z_3 \dots (4)$$

Hierin ist nach Gl. 1 und Fig. 5

$$\mathfrak{E}_{2r} = j \frac{c_r}{c} \mathfrak{E}_{3p}$$

$$- \mathfrak{E}_{3r} = j \frac{c_r}{c} \mathfrak{E}_{2p}$$

Aus Gl. 3 wird

$$\begin{aligned} j \frac{c_r}{c} \mathfrak{E}_{2p} &= j \frac{c_r}{c} \mathfrak{E}_{2r} + j Z_3 x_N \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 - j \frac{c_r}{c} Z_2 Z_2 \\ &= - \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 \mathfrak{E}_{3p} + j Z_3 x_N \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 - j \frac{c_r}{c} Z_2 Z_2 = - \mathfrak{E}_{3r} \end{aligned}$$

und in Gl. 4 eingeführt

$$k\mathfrak{B} = \mathfrak{E}_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + \mathfrak{I}_3 \left[r_3 - j(x_3 - x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2) \right] - j \frac{c_r}{c} \mathfrak{I}_2 [r_2 - j(x_2 - x_N)] \quad (5)$$

Das erste Glied rechts zeigt, daß die Magnetisierungsspannung mit dem Quadrat der Geschwindigkeit abnimmt, wie schon früher gezeigt ist. Da aber der Spannungsabfall in den Arbeitswindungen das Längsfeld etwas verkleinert und in der Phase verschiebt, so daß nicht mehr genau $\Phi_2 = \frac{c_r}{c} \Phi_3$ gilt und auch die Phasenverschiebung nicht genau 90° ist, ist die Kompensation der Magnetisierungsspannung nicht vollständig. Der Betrag des ersten Gliedes der Gl. 5 wird vermindert um einen Betrag, der wie das dritte Glied rechts zeigt, proportional dem Spannungsabfall des Stromes J_2 und der Geschwindigkeit ist, und erscheint als eine Spannung, die im Erregerkreis um 90° in der Phase verschoben ist.

Die von der Kommutation herrührenden mit x_N proportionalen EMKe erscheinen als Verminderung der Streureaktanzen wie auch aus früherem hervorgeht.

Setzt man ebenfalls

$$\mathfrak{I}_3 = \mathfrak{E}_{3p} \mathfrak{I}_a, \quad \text{bzw.} \quad \mathfrak{E}_{3p} = \mathfrak{I}_3 \mathfrak{I}_a$$

so läßt sich Gl. (3) schreiben

$$\begin{aligned} j \frac{c_r}{c} \mathfrak{I}_3 (\mathfrak{I}_a - j x_N) &= \mathfrak{I}_2 (\mathfrak{I}_a + \mathfrak{I}_2) \\ \mathfrak{I}_2 &= j \frac{c_r}{c} \mathfrak{I}_3 \frac{r_a - j(x_a + x_N)}{(r_a + r_2) - j(x_a + x_2)} \\ &= j \frac{c_r}{c} \frac{\mathfrak{I}_3}{\mathfrak{E}_i} \end{aligned}$$

worin $\mathfrak{E}_i = C_i e^{-j\gamma_i}$ eine komplexe Zahl ist, deren Betrag C_i nur wenig größer als 1 ist, und deren Argument γ_i ein sehr kleiner Winkel ist, wenn r_2 klein ist.

Die gleiche Beziehung gilt dann auch für die Felder, da wir Z_a als Konstante betrachten, d. h. von dem Einfluß der Sättigung in der Rechnung absehen.

In Gl. 5 kann daher das letzte Glied geschrieben werden

$$\begin{aligned} -j \frac{c_r}{c} \mathfrak{I}_2 [r_2 - j(x_2 - x_N)] &= \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{\mathfrak{I}_3}{\mathfrak{E}_i} [r_2 - j(x_2 - x_N)] \\ &\simeq \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \mathfrak{I}_3 [r_2 - j(x_2 - x_N)] \end{aligned}$$

und Gl. 5 lautet

$$k\mathfrak{P} = \mathfrak{S}_3 \left\{ r_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + r_3 + r_2 \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 - j \left(x_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + \left[x_3 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 x_N \right] + \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 [x_2 - x_N] \right) \right\} \dots \dots \dots (5a)$$

Bei Stillstand $\left(\frac{c_r}{c} = 0 \right)$ wird

$$k\mathfrak{P} = \mathfrak{S}_3 [(r_a + r_3) - j(x_a + x_3)]$$

und bei Synchronismus $\left(\frac{c_r}{c} = 1 \right)$

$$k\mathfrak{P} = \mathfrak{S}_3 [(r_3 + r_2) - j(x_3 - x_N) + (x_2 - x_N)] \dots \dots (5b)$$

Die Wattkomponente der Spannung ist hierbei etwa doppelt so groß wie dem Spannungsabfall des Stromes entspricht.

Der Strom ist in Phase mit der Spannung, wenn

$$x_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + \left[x_3 - x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + (x_2 - x_N) \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 = 0$$

ist, d. h. wenn

$$\frac{c_r}{c} = \sqrt{\frac{x_a + x_3}{(x_a + x_N) - (x_2 - x_N)}} = \sqrt{1 + \frac{(x_3 - x_N) + (x_2 - x_N)}{(x_a + x_N) - (x_2 - x_N)}}$$

ist, also, wenn die negative Reaktanz $x_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$ bei Übersynchronismus die verbleibenden Streureaktanzen aufgehoben hat.

Da x_a sehr groß gegenüber x_2 und x_3 ist, ist dies nur wenig oberhalb Synchronismus der Fall.

Hat man nicht sinusförmige Verteilung der Felder, so tritt in Gl. 5a an Stelle von $\left(\frac{c_r}{c} \right)^2$ überall $\left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{\sigma_2 \sigma_3}$, und die Geschwindigkeit für Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung ist mit $\sqrt{\sigma_2 \sigma_3}$ zu multiplizieren.

Die im Stator induzierte EMK ist

$$E_{s0} = \pi \sqrt{2} c w_1 f_1 \Phi_2 10^{-8} = \frac{w_1 f_1}{w_2 f_2} E_{2p} = u_e E_{2p},$$

$$E_{s0} = u_e \mathfrak{S}_2 \mathfrak{S}_a = u_e j \frac{c_r}{c} \frac{\mathfrak{S}_3}{C_i} \mathfrak{S}_a =$$

$$= \frac{j u_e k \frac{c_r}{c} \mathfrak{P} \frac{\mathfrak{S}_a}{C_i}}{\left\{ r_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + r_3 + \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 r_2 \right\} - j \left\{ x_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] + \left[x_3 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 x_N \right] + \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 (x_2 - x_N) \right\}} \dots \dots (6)$$

E_{s0} ist bei Stillstand Null, bei Synchronismus ist

$$\mathcal{E}_{s0} \left(\frac{c_r}{c} = 1 \right) = \frac{j u_e k \frac{3a}{C_i}}{(r_3 + r_2) - j(x_3 + x_2 - 2x_N)}$$

Damit E_{s0} bei Synchronismus gleich der Netzspannung P wird, muß

$$u_e k = \left\{ \frac{(r_3 + r_2) - j(x_3 + x_2 - 2x_N)}{r_a - jx_a} \right\} C_i$$

oder angenähert

$$u_e k \approx \frac{2r_3}{Z_a}$$

sein, ein Betrag, der etwa die Größe 0,03 hat.

5. Ersatzstromkreis und Stromdiagramm.

Der Verlauf der Ströme und EMKe ist am einfachsten aus dem Stromdiagramm zu ersehen. Es soll mit Hilfe eines Ersatzstromkreises konstruiert werden, der die in Gl. 5 a ausgedrückte Beziehung für den Strom darstellt und in Fig. 7 aufgestellt ist.

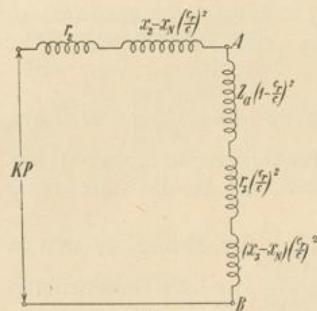


Fig. 7.

Die Impedanzen zwischen den Punkten AB entsprechen den von Quer- und Längsfeld induzierten EMKen, die übrigen dem Ohmschen und induktiven Spannungsabfall.

Trägt man in Fig. 8 auf der Abszissenachse $\overline{OA} = x_3$, senkrecht hierzu $\overline{AB} = r_3$ auf, ferner parallel zur Abszissenachse $\overline{BC} = x_a$ und

hierzu senkrecht $\overline{CQ'} = r_a$ auf, so ist $\overline{OQ'}$ die Impedanz bei Stillstand

$$\overline{OQ'} = (r_a + r_3) - j(x_a + x_3).$$

Trägt man ferner $\overline{BD} = (x_2 - 2x_N)$ (hier negativ angenommen) und $\overline{DS'} = r_2$ auf, so ist

$$\overline{OS'} = (r_2 + r_3) - j(x_3 + x_2 - 2x_N)$$

die Impedanz bei Synchronismus.

Auf der Verbindungslinie Z der Punkte Q' und S' teile ein Punkt P' den Abschnitt $\overline{Q'S'}$ im Verhältnis

$$\frac{\overline{Q'P'}}{\overline{Q'S'}} = a.$$

Zieht man $\overline{P'F} \parallel \overline{BS'}$, so wird auch

$$\frac{\overline{Q'F}}{\overline{Q'B}} = a$$

und

$$\frac{\overline{P'F}}{\overline{BS'}} = a.$$

Es hat also Punkt P' die Abszisse

$$-j[x_3 + x_a(1-a) + a(x_2 - 2x_N)]$$

und die Ordinate

$$r_3 + r_a(1-a) + ar_2,$$

und es stellt $\overline{OP'}$ die totale Impedanz des Ersatzstromkreises Fig. 7 dar, wenn das Verhältnis a gleich ist dem Quadrat einer Geschwindigkeit $\left(\frac{c_r}{c}\right)^2 = a = \frac{\overline{Q'P'}}{\overline{Q'S'}}$.

Die Gerade Z ist also der Ort des Vektors der resultierenden Impedanz und heie Impedanzgerade, sie ist zugleich der Geschwindigkeitsmastab, der hier quadratisch ist.

Teilt man $\overline{Q'S'}$ in 100 Teile, so gibt P' auf der Teilung das Quadrat der Geschwindigkeit in Prozenten des Synchronismus an. Man kann die Teilung ber S' hinaus verlängern und erhält hier die bersynchronen Geschwindigkeiten.

Durch Inversion¹⁾ der Impedanzgeraden Z in bezug auf den Koordinatenanfangspunkt O ergibt sich als Admittanzdiagramm ein

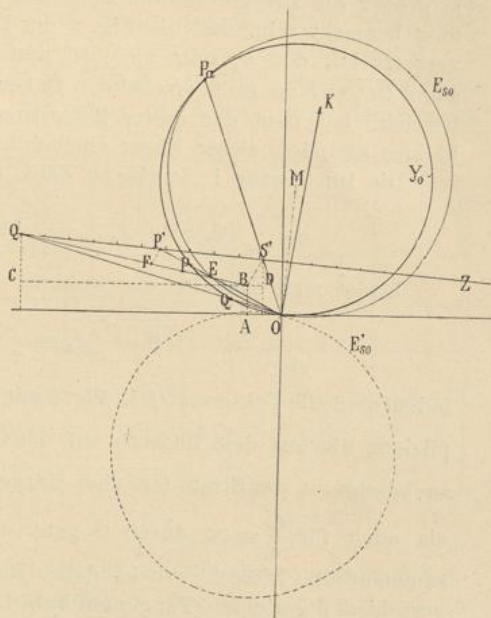


Fig. 8.

¹⁾ s. Wechselstromtechnik Bd. I, S. 51.

Kreis Y_0 , der durch O geht und dessen Radius \overline{OM} senkrecht auf der Geraden Z steht. Die Vektoren von O nach dem Kreis stellen die Rotorströme nach Größe und Phase bei konstanter Klemmenspannung dar. Die Abszissen sind die wattlosen Komponenten, die Ordinaten die Wattkomponenten.

Entsprechende Punkte auf dem Kreis und auf der Geraden findet man durch den Schnittpunkt P eines Strahles $\overline{OP'}$ mit dem Kreis. \overline{OQ} ist somit der Strom bei Stillstand, $\overline{OP_a}$ der Strom bei Synchronismus, der Geschwindigkeit $\frac{c_r}{c} = \infty$ entspricht der unendlich ferne Punkt der Geraden Z , auf dem Kreis also der Koordinatenanfangspunkt O .

Es ist hieraus ersichtlich, daß die Erregeranordnung bei konstanter Klemmenspannung nur ganz dicht oberhalb und unterhalb Synchronismus einen großen Strom aufnehmen kann. Nahe oberhalb Synchronismus ist er ein Wattstrom, unterhalb Synchronismus ist er verzögert, oberhalb Synchronismus voreilend gegen die Klemmenspannung, wobei er um so schneller wieder verschwindet, je größer die Erregerreaktanz x_a gegen den Widerstand r_s ist. Es mag bemerkt sein, daß die Fig. 8 der Deutlichkeit halber dadurch verzerrt ist, daß x_a sehr klein ist und daher der Strom bei Stillstand \overline{OQ} viel zu groß erscheint. Daher ist der Geschwindigkeitsbereich, bei dem der ganze Rotorstrom groß ist, in Wirklichkeit kleiner als nach dieser Figur erscheint.

Die im Stator induzierte EMK E_{s_0} war (s. Gl. 6)

$$\mathcal{E}_{s_0} = u_e \mathfrak{S}_2 \mathfrak{S}_a = j \frac{c_r}{c} u_e \mathfrak{S}_3 \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{E}_i}.$$

Bildet man zunächst das Produkt

$$\overline{OE} = \frac{c_r}{c} J_3 = \frac{c_r}{c} \overline{OP},$$

indem man alle Vektoren \overline{OP} in Fig. 8 mit der Geschwindigkeit $\frac{c_r}{c}$ multipliziert, die aus dem Maßstab auf der Geraden Z entnommen wird, so beschreibt der Strahl \overline{OE} eine Kurve E_{s_0} , die sowohl für $\frac{c_r}{c} = 0$, als auch für $\frac{c_r}{c} = \infty$ durch O geht und für $\frac{c_r}{c} = 1$ mit $\overline{OP_a}$ zusammenfällt. Diese Kurve ist daher kein Kreis, weil sie in O zwei verschieden gerichtete Tangenten hat. Die Multiplikation der Strahlen $\overline{OE} = \frac{c_r}{c} J_3$ mit $j u_e \frac{\mathfrak{S}_a}{\mathfrak{E}_i}$ bedeutet, daß der Maßstab in einen Spannungsmaßstab zu ändern ist, so daß die Strecke, die im Strommaßstab

1 Amp. darstellt, im Spannungsmaßstab $u_e \frac{Z_a}{C_i}$ Volt darstellt, wobei alle Vektoren um $\frac{\pi}{2} - (\psi_a - \gamma_i)$ im Sinne der Verzögerung zu drehen sind. Hierbei ist $\psi_a = \arctg \frac{x_a}{r_a}$ der Winkel zwischen E_{s_0} und J_2 , während γ_i der Winkel zwischen J_2 und $j \frac{c_r}{c} J_3$ ist. Um E_{s_0} in der richtigen Lage gegen die Klemmenspannung zu erhalten, dreht man den Vektor der Klemmenspannung aus der Ordinatenachse im Sinne der Voreilung um den Winkel $\frac{\pi}{2} - (\psi_a - \gamma_i)$, der, weil ψ_a fast 90° beträgt und γ_i sehr klein ist, ebenfalls nur ein kleiner Winkel ist. In Fig. 8 stellt im Spannungsmaßstab OK die Netzspannung P nach der Drehung dar.

Da einer Umkehrung der Drehrichtung des Rotors eine Umkehrung des Drehfeldes entspricht, bei der die zeitliche Reihenfolge der beiden Felder in einer bestimmten räumlichen Lage die umgekehrte ist als zuvor, ändert sich bei Umkehr der Drehrichtung die Phase des Längsfeldes und damit der im Stator induzierten EMK um 180° . Man erhält also einen zweiten genau symmetrischen Zweig der Kurve E_{s_0}' , der in Fig. 8 punktiert eingezeichnet ist.

Die ganze Kurve E_{s_0} hat daher die Gestalt einer Lemniskate.

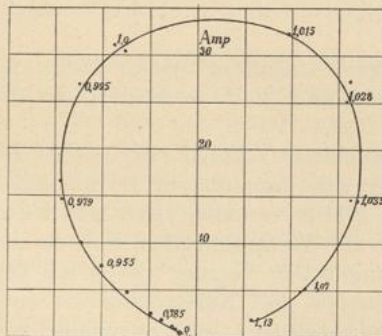


Fig. 9a.

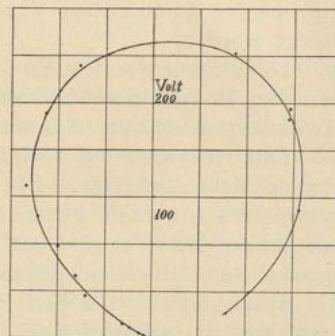


Fig. 9b.

In Fig. 9a und 9b ist ein experimentell aufgenommenes Strom- und Spannungsdiagramm aufgetragen, zur Orientierung sind an einigen Punkten die Rotorgeschwindigkeiten eingezeichnet. In diesem Falle war schon bei 5% oberhalb und unterhalb Synchronismus der Strom kaum noch ein Drittel des maximalen.

Die Klemmenspannung am Rotor war hierbei 5 Volt.

Die Stromkurve (Fig. 9a) weicht etwas vom Kreis ab, und zwar ist sie nach oben hin etwas länglicher. Dies ist erklärlich, weil gerade der maximale Strom fast nur durch die Widerstände begrenzt ist, von denen die Bürstenübergangswiderstände den größten Teil ausmachen. Da sie mit zunehmender Stromdichte abnehmen, erscheinen die größten Ströme größer als die Rechnung mit konstanten Widerständen ergibt.

Um den größten Strom des Diagrammes Fig. 9a als Gleichstrom durch die Armatur zu schicken, war nur eine Spannung von 2,0 Volt erforderlich, also weniger als die Hälfte wie mit Wechselstrom. Obwohl die Widerstände bei Wechselstrom an sich größer sind als bei Gleichstrom, wäre ein so großer Unterschied doch nicht zu erwarten. Er erklärt sich nach Gl. 5b damit, daß durch die geringe Unsymmetrie des Drehfeldes noch ein Betrag von der Wattkomponente der Magnetisierungsspannung unkompensiert bleibt, der gleich dem Spannungsabfall des Stromes in den Arbeitswindungen und an den Bürsten ist. Dies wirkt so, als ob bei Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung der Strom J_3 den doppelten Widerstand findet.

6. Einfluß der Kurzschlußströme.

Die magnetische Rückwirkung der inneren Ströme in den Spulen, die bei der Kommutation kurzgeschlossen sind, ist bisher vernachlässigt worden.

Diese Ströme entstehen aus zwei Ursachen, erstens durch die von den Hauptfeldern induzierten EMKe, und zweitens durch die Kommutation des Stromes selbst.

Beide konnten bei dem besprochenen Versuch nur in sehr geringem Maße auftreten. Die von den Hauptfeldern in den kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMKe verhalten sich zu denen am ganzen Rotor angenähert wie die Windungszahlen, und da am ganzen Rotor die Klemmenspannung 5 Volt betrug, wovon ein Teil als Spannungsabfall zwischen Bürsten und Kommutator zu subtrahieren ist, schließt jede Bürste höchstens eine Spannung von 0,5 Volt kurz.

Ebenso sind die von der Kommutation des Stromes herrührenden EMKe klein, weil der kommutierte Strom der Magnetisierungsstrom ist, und nur etwa $\frac{1}{3}$ des Belastungsstromes der Maschine beträgt, und bei höheren Geschwindigkeiten sofort abnimmt.

Die von der Kommutation des Stromes herrührenden Kurzschlußströme können magnetisierend, entmagnetisierend sein oder

gar keine magnetische Wirkung haben, je nachdem die Kommutierung eine Über- oder eine Unterkommutierung ist oder geradlinig verläuft. Ihr Einfluß wird in Kapitel V bei Besprechung des Wirkungsgrades erläutert.

Hier mögen zunächst die von den Hauptfeldern erzeugten Kurzschlußströme betrachtet werden, die z. B. dann bemerkbar werden, wenn die Spannung am ganzen Rotor groß ist.

Die von den Arbeitsbürsten kurzgeschlossenen Spulen gehören den Erregerwindungen an. Die Spannung Δe , die eine der Arbeitsbürsten kurzschließt, ist bei sinusförmiger Feldverteilung proportional der am Rotor auftretenden Spannung, abgesehen vom Spannungsabfall, und zwar ist sie im Verhältnis der Windungszahlen verkleinert.

Schließt eine Bürste $\frac{b_1 p}{\beta a}$ Windungen kurz, so ist daher angenähert

$$\Delta e \simeq \frac{\pi}{2} \frac{b_1 p}{\beta a} E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right].$$

Die von den Erregerbürsten kurzgeschlossenen Spulen gehören dem Arbeitsstromkreis an, in dem die EMKe der beiden Hauptfelder sich bei jeder Geschwindigkeit aufheben, daher ist bei sinusförmiger Feldverteilung für die Erregerbürsten bei jeder Geschwindigkeit

$$\Delta e \simeq 0.$$

Die resultierende EMK der Spulen, die von den Arbeitsbürsten kurzgeschlossen sind, erzeugt zusätzliche innere Ströme, die in der Achse des Querfeldes magnetisieren und innerhalb der Kommutierungszeit von Null auf ihren maximalen Wert ansteigen und wieder verschwinden. Die Summe dieser Stromwellen der einzelnen Kommutierungsperioden ergibt wieder eine resultierende Stromwelle von der Grundperiodenzahl, die ihr Maximum gleichzeitig mit der resultierenden EMK Δe erreicht und mit ihr Null wird, d. h. in Phase mit der EMK ist. Die Kurzschlußströme sind daher als Wattströme in bezug auf die EMK Δe anzusehen, die Verzögerung durch die Selbstinduktion liegt innerhalb der Kommutierungszeit und bedingt den zeitlichen Verlauf des zusätzlichen Stromes.

Für die magnetische Rückwirkung der kurzgeschlossenen Spulen ist die gesamte Anzahl der Amperewindungen maßgebend. Zu ihrer Kompensation nimmt der Rotor einen Strom auf, dessen Amperewindungen entgegengesetzt gleich denen der Kurzschlußströme ist. Dieser Strom ist in Phase mit der Magnetisierungs-

spannung und vergrößert daher die Wattkomponente des Rotorstromes J_3 . In der Gleichung

$$\mathfrak{S}_3 = \mathfrak{G}_{3p}(g_a + j b_a)$$

kann daher die Konduktanz g_a aus zwei Teilen bestehend gedacht werden, einem Teil g_{ei} , der den Eisenverlusten entspricht, und einem zweiten, der auf die Rotorwindungszahl reduziert die Konduktanz der kurzgeschlossenen Spulen darstellt. Sind die Widerstände des Kurzschlußstromkreises konstant, so ist diese Konduktanz $g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$,

weil die EMK Ae proportional $E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$ ist. Es ist dann

$$g_a \simeq g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right].$$

Oberhalb Synchronismus wird $g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$ negativ, dies bedeutet, daß hier die Kurzschlußströme durch Rotation im Längsfeld induziert und durch das Querfeld nur zum Teil wieder aufgehoben werden, weil hier $\Phi_2 > \Phi_3$ ist. Unterhalb Synchronismus, wo $\Phi_3 > \Phi_2$ ist, werden die Ströme durch Pulsation vom Querfeld erzeugt und durch die Rotation im Längsfeld nur zum Teil kompensiert.

Daher ändern die Kurzschlußströme bei Synchronismus ihr Vorzeichen gegenüber dem Querfeld.

Dies läßt sich nachweisen, wenn man die Erregerbürsten in die Achse der Statorwicklung stellt und die Kurzschlußbürsten senkrecht dazu. Dann ist die in der Statorwicklung induzierte EMK proportional E_{3p} ; reguliert man nun den Rotorstrom so ein, daß diese Spannung und daher das Feld bei allen Geschwindigkeiten konstant bleibt, und bestimmt mittels Wattmeter die Phasenverschiebung zwischen E_{3p} und dem Strom J_3 , so läßt sich dieser zerlegen in die Wattkomponente

$$J_{3w} = E_{3p} \left\{ g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] \right\}$$

und die wattlose Komponente

$$J_{3wt} = E_{3p} b_a.$$

Fig. 10 zeigt diese Zerlegung. J_{3wt} bleibt nahezu konstant, während J_{3w} ungefähr nach einer Parabel abnimmt und bei Übersynchronismus negativ wird. Freilich ist g_k keine Konstante und hängt sehr stark von den Übergangswiderständen ab. Die kleine Unstetigkeit bei Synchronismus dürfte von Hystereserscheinungen herrühren.

Die dem Rotor zugeführte Leistung ist dagegen stets positiv, denn wir haben gesehen, daß das Querfeld bei Synchronismus seine Phase gegenüber der Rotorspannung umkehrt.

Die Verluste in den kurzgeschlossenen Spulen werden daher vom Rotorstrom geliefert, auch oberhalb Synchronismus, wo die Kurzschlußströme durch Rotation im Längsfeld entstehen, und nicht durch eine mechanisch dem Rotor zugeführte Leistung gedeckt. Denn die Kurzschlußströme können nur ein Drehmoment bilden mit dem Längsfeld, zu dessen Achse ihre Windungsfläche senkrecht steht und mit dem sie nahezu in Phase sind. Der Rotorstrom, der sie kompensiert, hat aber die gleiche MMK von entgegengesetzter Richtung, so daß er mit dem Längsfeld das entgegengesetzte Drehmoment bildet und das resultierende Drehmoment stets Null ist.

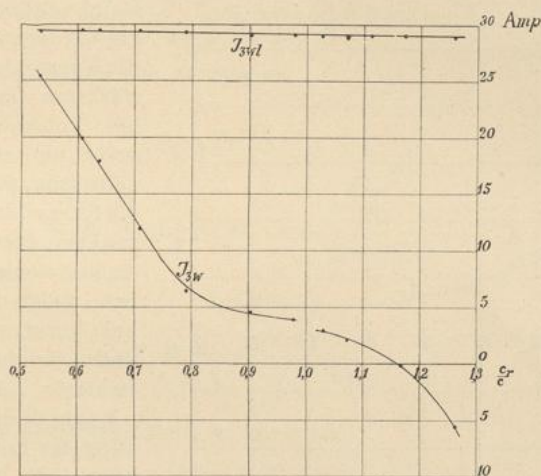


Fig. 10.

Hieraus folgt auch, daß, wenn man das Impedanzdiagramm, das in Fig. 7 durch die Gerade Z dargestellt ist, aufnehmen will, sich bei starker Rückwirkung der Kurzschlußströme Abweichungen bei kleinen und hohen Geschwindigkeiten ergeben.

Zerlegt man die Rotorspannung bei konstantem Strom J_3 in ihre Wattkomponente Jr und ihre wattlose Komponente Jx so würden beide nach Gl. 5a als Funktion der Geschwindigkeit $\frac{c_r}{c}$ aufgetragen nach einer Parabel abnehmen müssen, wenn r_a und x_a konstant wären. Bei starker Rückwirkung der Kurzschlußströme ist aber

$$r_a \approx \frac{g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]}{\left\{ g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] \right\}^2 + b_a^2}$$

$$x_a \approx \frac{b_a}{\left\{ g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] \right\}^2 + b_a^2}$$

r_a wird bei kleinen Geschwindigkeiten vergrößert, x_a verkleinert; r_a wird bei Übersynchronismus negativ und $r_a \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$ wieder positiv.

Fig. 11 zeigt die bei konstantem Strom experimentell aufgenommenen Werte. Die wattlose Komponente Jx nimmt von Stillstand ausgehend nicht ab, sondern zu, weil hier die Kurzschlußströme am stärksten sind und weil bei konstantem Rotorstrom nur ein Teil Magnetisierungsstrom ist. Da die Kurzschlußströme mit zunehmender Geschwindigkeit kompensiert werden, steigt das Querfeld bei konstantem Strom, und obwohl das entstehende Längsfeld die

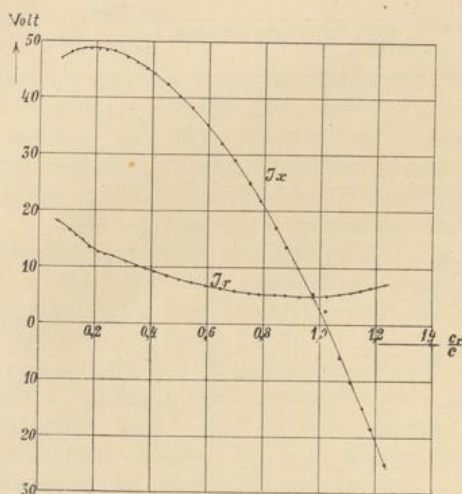


Fig. 11.

Magnetisierungsspannung des Rotors aufhebt, überwiegt dennoch die Feldverstärkung; erst wenn die Kurzschlußströme wesentlich aufgehoben sind, nimmt die wattlose Spannung ab.

Die Rückwirkung der Kurzschlußströme ist noch kein Maß für die Funkenbildung, die Größe der Rückwirkung hängt von dem Verhältnis der Zahl der kurzgeschlossenen Windungen zu der gesamten Windungszahl des Rotors ab.

Bei dem Versuch Fig. 10 war dieses Verhältnis groß, der Motor lief hierbei funkenfrei, doch wurde bei kleineren Geschwindigkeiten als $\frac{c_r}{c} = 0,5$ der Kommutator heiß, so daß die Ablesungen unsicher

wurden; bei $\frac{c_r}{c} = 0,5$ war Δe (aus der gemessenen Spannung E_{3p} berechnet) 7 Volt. Oberhalb $\frac{c_r}{c} = 1,3$ funkten die Bürsten, hier ist Δe 6,5 Volt.

Sind die Felder nicht sinusförmig verteilt, so sind die Kurzschlußströme wieder bei einer anderen als der synchronen Geschwindigkeit kompensiert.

Die von dem Querfeld durch Pulsation induzierte EMK wird für den Kurzschlußstromkreis

$$\Delta e_p = \frac{N}{2K} \frac{b_1 p}{\beta a} \pi \sqrt{2} c \Phi_3,$$

während durch Rotation im Längsfelde induziert wird

$$\Delta e_r = \frac{N}{2K} \frac{b_1 p}{\beta a} \frac{2}{\sqrt{2}} B_2 l v = \frac{b_1 p}{\beta a} 2 \sqrt{2} c_r \frac{\Phi_2}{\alpha_{i_2}}.$$

α_{i_2} ist der Füllfaktor der Feldkurve.

Da nun

$$\Phi_2 \cong \frac{c_r}{c} \frac{\Phi_3}{\sigma_2}$$

ist (s. Gl. 2a), wird

$$\Delta e = \Delta e_p - \Delta e_r \cong \Delta e_p \left[1 - \frac{2}{\pi} \frac{1}{\alpha_{i_2} \sigma_2} \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right].$$

Daher ist

$$\Delta e = 0,$$

wenn

$$\frac{c_r}{c} \cong \sqrt{\frac{\pi \alpha_{i_2} \sigma_2}{2}} \text{ ist.}$$

Für das dreieckige Feld ist $\alpha_i = 0,5$

$$\sigma_2 = \frac{\pi}{3},$$

d. h.

$$\frac{c_r}{c} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,905.$$

Wie aus den Fig. 9 und 11 hervorgeht, läßt sich der Punkt der Phasengleichheit zwischen Strom und Klemmenspannung experimentell überhaupt nicht genau bestimmen. Dies rührt her von den höheren Harmonischen der Spannung, die insbesondere bei der Kommutation erzeugt werden. Unter Berücksichtigung der höheren Harmonischen ist die Rotorspannung

$$kP = \sqrt{J^2 r^2 + J^2 x^2 + \Sigma (e_n)^2}.$$

Sind die Reaktanzen $Jx = 0$, so erscheinen die höheren Harmonischen Σe_n als eine Reaktanzspannung, so daß sich $\cos \varphi = 1$ am Wattmeter meist nicht ergibt. Sobald eine andere Reaktanz im Stromkreis vorhanden ist, wird ihr Einfluß gering, weil sie sich nach obiger Gleichung quadratisch addieren.

III. Kurzschlußzustand.

1. Grundgleichungen. — 2. Das Stromdiagramm. — 3. Der Leerlaufstrom und die Leerlauf Tourenzahl.

1. Grundgleichungen.

Der Kurzschlußzustand ist in Fig. 12 dargestellt. Der Stator ist an das Netz angeschlossen, und sowohl die Arbeitsbürsten als die Erregerbürsten sind widerstandslos verbunden.

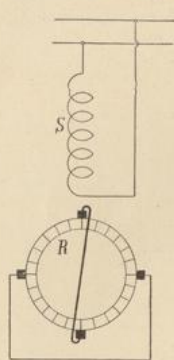


Fig. 12.

Die Maschine stellt jetzt einen einphasigen Induktionsmotor dar, dessen Rotor mittels Kommutator und Bürsten kurzgeschlossen ist, und verhält sich ähnlich wie ein gewöhnlicher Induktionsmotor.

Das Wechselfeld in der Achse der Statorwicklung ist jetzt vom Stator erregt, es werde mit Φ_1 bezeichnet, während das Querfeld Φ_3 bei der Rotation der Erregerwindungen im Statorfeld entsteht.

Da die beiden Felder in den Erregerwindungen EMKe induzieren, die sich abgesehen vom Spannungsabfall des Erregerstromes aufheben, ist in erster Annäherung wieder die Beziehung zwischen den beiden Feldern ähnlich wie in Kapitel II

$$\Phi_3 \simeq \frac{c_r}{c} \Phi_1,$$

und Φ_3 ist um 90° in der Phase gegen Φ_1 verzögert, so daß wieder ein unsymmetrisches Drehfeld entsteht.

Der Strom J_2 in den Arbeitswindungen entsteht durch die beiden von den Hauptfeldern induzierten EMKe

$$E_{2p} = 2\sqrt{2} cw_2 \Phi_1$$

und

$$E_{2r} = 2\sqrt{2} c_r w_2 \Phi_3.$$

Ist $\frac{c_r}{c} < 1$, so ist $\Phi_3 < \Phi_1$ und $E_{2r} < E_{2p}$. Die vom Statorfeld induzierte EMK E_{2p} erzeugt also den Strom, während das Quer-