

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

B. Tourenregelung des einphasigen kompensierten Nebenschlußmotors

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

B. Tourenregelung des einphasigen kompensierten Nebenschlußmotors.

VI. Theorie der Tourenregelung.

1. Bedingungen und Mittel für die Tourenregelung. — 2. Grundgleichungen. — 3. Einfluß der Streuung auf die Leerlauf-tourenzahl. — 4. Die Kurzschlußströme.

1. Bedingungen und Mittel für die Tourenregelung.

Damit der Arbeitsstrom des Rotors Null wird, d. h. damit der Motor leer läuft, müssen die von den beiden Hauptfeldern in den Arbeitswindungen des Rotors induzierten EMKe sich aufheben, und dies bedingte, daß

$$\Phi_1 c = \Phi_3 c_r \dots \dots \dots (14)$$

ist.

Sind die Erregerwindungen des Rotors kurzgeschlossen, so müssen die von den Hauptfeldern induzierten EMKe sich, abgesehen vom Spannungsabfall, stets aufheben, und dies bedingt, daß

$$\Phi_3 c \simeq \Phi_1 c_r \dots \dots \dots (15)$$

ist.

Diese beiden Bedingungen decken sich nur bei Synchronismus und daher kann der Motor nur bei Synchronismus leer laufen. Da hierbei auch die resultierende EMK im Erregerkreis Null ist, können die Erregerwindungen parallel zum Stator an eine Spannung angeschlossen werden, die nur so groß ist, wie den Verlusten des Erregerstromes entspricht, und der Erregerstrom ist ein Wattstrom.

Soll der Motor bei einer anderen Tourenzahl leer laufen, so muß nach der ersten Bedingung (Gl. 14)

$$\Phi_3 = \frac{\Phi_1}{\left(\frac{c_r}{c}\right)}$$

sein, d. h. bei gegebenem Kraftfluß in der Achse der Arbeitswindungen muß das Querfeld umgekehrt proportional mit der Geschwindigkeit verändert werden, bei Untersynchronismus größer, bei Übersynchronismus kleiner als das Hauptfeld werden.

Hierbei sind aber die von den Feldern in den Erregerwindungen induzierten EMKe sehr verschieden groß, und zwar verhält sich die

EMK der Rotation im Hauptfeld Φ_1 zu der EMK der Pulsation des Querfeldes Φ_3

$$\frac{E_{3r}}{E_{3p}} \approx \left(\frac{c_r}{c}\right)^2.$$

Bei Untersynchronismus ist also die EMK der Pulsation des Querfeldes wesentlich größer, bei Übersynchronismus wesentlich kleiner als die EMK der Rotation, und da beim stabilen Lauf die EMKe sich nur um so viel unterscheiden können wie dem Spannungsabfall des Erregerstromes entspricht, muß bei Untersynchronismus die überschüssige EMK der Pulsation in den Erregerwindungen aufgehoben werden durch eine ihr entgegengerichtete EMK gleicher Phase, während bei Übersynchronismus die zu kleine EMK der Pulsation ergänzt werden muß durch eine gleichgerichtete EMK gleicher Phase.

In Kap. III ist für den Induktionsmotor gezeigt worden, daß mittels einer Drosselspule eine zur EMK der Pulsation der Erregerwindungen nahezu gleichgerichtete EMK erhalten werden kann, so daß der Motor damit übersynchron läuft. Um die entgegengerichtete EMK zu erhalten, hätte ein Kondensator verwendet werden müssen.

E. Arnold und J. L. la Cour erhalten beide EMKe in einfacher Weise nach den D. R. P. Nr. 165 053/54/55 dadurch, daß sie das Querfeld selbst die EMKe induzieren lassen in einer auf dem Stator in der Achse des Querfeldes angebrachten Querwicklung, die entweder im gleichen oder im entgegengesetzten Sinne wie die Rotorwindungen geschaltet wird.

Die vom Querfeld durch die Pulsation in dieser Querwicklung und in den Erregerwindungen des Rotors induzierten EMKe verhalten sich wie die Windungszahlen

$$\frac{E_4}{E_{3p}} = \frac{w_4 f_4}{w_3 f_3} = u.$$

u sei das Verhältnis der effektiven Windungszahlen. Die gesamte EMK der Pulsation in Rotor und Querwicklung zusammen ist daher

$$E_{3p} \pm E_4 = E_{3p} (1 \pm u).$$

Das obere Vorzeichen $+$ bezieht sich auf die gleichsinnig, das untere Vorzeichen $-$ auf die gegengeschaltete Querwicklung.

Daher genügt bei einem Induktionsmotor, dessen Erregerbürsten, wie z. B. Fig. 28 zeigt, über die Querwicklung QW geschlossen sind, das Querfeld, das hier wieder bei der Rotation des Rotors im Statorfeld erzeugt wird, der angenäherten Beziehung:

$$\Phi_3 c(1 \pm u) \cong \Phi_1 c_r, \dots (16)$$

die sich mit der ersten Gleichung

$$\Phi_1 c = \Phi_3 c_r \dots (14)$$

deckt, wenn

$$\frac{c_r}{c} = \sqrt{1 \pm u} \dots (17)$$

ist.

Je mehr Windungen der Querwicklung im Sinne des Rotors geschaltet sind, um so schneller läuft der Motor, je mehr Windungen gegengeschaltet sind, um so langsamer läuft der Motor.

Die der Geschwindigkeit $\frac{c_r}{c} = \sqrt{1 \pm u}$ entsprechende Tourenzahl möge als Grundtoureanzahl bezeichnet werden.

Da hierbei die EMKe des Erregerstromkreises sich wieder aufheben, kann der ganze Erregerstromkreis mittels eines Transformators an das Netz angeschlossen werden, wobei die Spannung wieder nur so groß zu sein braucht wie den Verlusten entspricht.

Denn da sowohl am Rotor wie an der Querwicklung die gesamten Spannungen, abgesehen vom Spannungsabfall, um fast 90° gegen den Erregerstrom phasenverschoben sind, kann der Erregerkreis nur eine Leistung aus dem Netz aufnehmen, die den Verlusten entspricht.

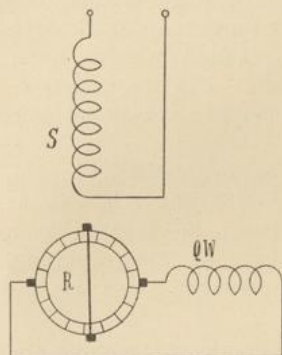


Fig. 28.

Die Regulierung, die auf einer Verstärkung des Querfeldes bei langsamem Lauf, einer Schwächung bei schnellem Lauf beruht, entspricht hierin der Feldregulierung eines Gleichstromnebenschlußmotors und wird bei einem Wechselstrommotor dadurch ermöglicht, daß die wattlose Magnetisierungsspannung (s. Kap. II) durch eine andere EMK aufgehoben wird.

2. Grundgleichungen.

Unter den gleichen Voraussetzungen wie in Kap. II und III sind die Grundgleichungen für den Leerlauf- und Kurzschlußzustand ganz analog den dort erhaltenen gebildet.

In der Gl. 5, Seite 98 für den Strom bei Leerlauf addiert sich

zur Magnetisierungsspannung des Rotors $E_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]$ die in der Querwicklung induzierte EMK

$$E_4 = \pm u E_{3p},$$

und zum Widerstand r_3 des Rotors der Widerstand r_4 , zur Reaktanz x_3 des Rotors die Reaktanz x_4 der Querwicklung.

Es wird daher:

$$k\mathfrak{B} = \mathfrak{G}_{3p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \pm u \right] + \mathfrak{Z}_3 \left\{ r_3 + r_4 - j \left[x_3 + x_4 - x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] \right\} \\ - j \frac{c_r}{c} \mathfrak{Z}_2 [r_2 - j(x_2 - x_N)] \dots \dots \dots (18)$$

Um nun wieder E_{3p} und J_2 durch J_3 auszudrücken, werde mit

Z_{aq} die Erregerimpedanz,

mit

Y_{aq} die Erregeradmittanz

des aus Rotor und Querwicklung zusammengesetzten Erregerkreises bezeichnet. Da dieser Erregerkreis nun $(1 \pm u)$ mal so viele effektive Windungen hat wie der Rotor allein, wird

$$\frac{\mathfrak{G}_{3p} \pm \mathfrak{G}_4}{\mathfrak{Z}_3} = \frac{\mathfrak{G}_{3p} (1 \pm u)}{\mathfrak{Z}_3} = \mathfrak{Z}_{aq} = \mathfrak{Z}_a (1 \pm u)^2$$

$$\mathfrak{Z}_3 = \mathfrak{G}_{3p} (1 \pm u) \mathfrak{Y}_{aq}$$

$$Y_{aq} = \frac{Y_a}{(1 \pm u)^2},$$

für die Felder gilt noch wie früher, daß

$$\Phi_2 = \frac{c_r}{c} \frac{\Phi_3}{C_i},$$

und um $(90^\circ - \gamma_i)$ gegen Φ_3 verzögert ist.

Dagegen verhalten sich die Ströme, da die Windungszahlen verschieden sind, umgekehrt wie diese,

$$\mathfrak{Z}_2 w_2 f_2 = j \frac{c_r}{c} \frac{\mathfrak{Z}_3}{\mathfrak{G}_i} (w_3 f_3 \pm w_4 f_4)$$

$$\mathfrak{Z}_2 = j \frac{c_r}{c} \frac{\mathfrak{Z}_3}{\mathfrak{G}_i} (1 \pm u),$$

so daß Gl. 18 lautet, wenn in dem letzten Glied $C_i \cong 1$ gesetzt wird:

$$k\mathfrak{F} = \mathfrak{F}_3 \left\{ r_{aq} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} \right] + r_3 + r_4 + \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 (1 \pm u) r_2 \right\} \\ - j \mathfrak{F}_3 \left\{ x_{aq} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} \right] + x_3 + x_4 - x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 + (x_2 - x_N) \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 (1 \pm u) \right\} \quad (18a)$$

Hiermit ergibt sich wieder derselbe Ersatzstromkreis wie Fig. 6 und ein Kreis als Stromdiagramm, wenn r_{aq} und x_{aq} als konstant angesehen werden können. Der Geschwindigkeitsmaßstab ist so zu ändern, daß der Abschnitt zwischen den Strahlen nach den Punkten für Stillstand und Grundtounenzahl im Verhältnis $\frac{1}{1 \pm u}$ zu verkürzen bzw. zu verlängern ist, um in 100 Teile geteilt die Quadrate der Geschwindigkeit in Prozenten der synchronen Geschwindigkeit zu ergeben.

Die Abweichungen von dem Kreis, die die Kurzschlußströme bedingen, weil durch sie r_{aq} veränderlich wird, sind nicht sehr groß, denn auch hier kann der Erregerstromkreis nur innerhalb eines sehr engen Geschwindigkeitsgebietes einen großen Strom aufnehmen, und innerhalb dieses engen Gebietes ist r_{aq} nicht sehr

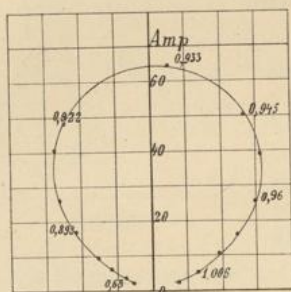


Fig. 29 a.

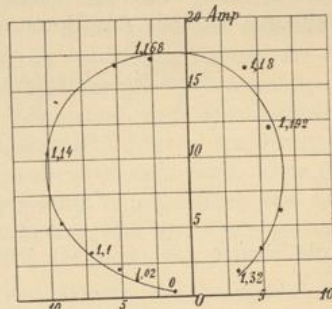


Fig. 29 b.

veränderlich. Die Größe von r_{aq} bestimmt die Lage des Kreises, wie aus der Konstruktion Fig. 8 hervorgeht und wie dies die Fig. 29 a und b zeigen. Diese Stromdiagramme sind aufgenommen bei $u = -0,187$ bzw. $u = +0,375$. Die eingetragenen Zahlen bezeichnen die Rotorgeschwindigkeiten im Verhältnis zum Synchronismus.

Auch hier ist der Strom wegen der Streufelder erst bei etwas höherer als der Grundtounenzahl in Phase mit der EMK. Es wird

$$J_3 \sum x = 0,$$

wenn

$$\begin{aligned} \frac{c_r}{c} &= \sqrt{\frac{x_{aq} + x_3 + x_4}{\frac{x_{aq}}{1 \pm u} + x_N - (x_2 - x_N)(1 \pm u)}} \\ &= \sqrt{1 \pm u} \sqrt{1 + \frac{x_3 - x_N(1 \pm u) + x_4 - (x_2 - x_N)(1 \pm u)^2}{x_{aq} + x_N(1 \pm u) - (x_2 - x_N)(1 \pm u)^2}} \\ &\cong \sqrt{1 \pm u} \sqrt{1 + \frac{x_3 + x_4}{x_{aq}}} \end{aligned}$$

Das Korrektionsglied wird hier einerseits vergrößert durch die Streureaktanz der Querwicklung, andererseits wird im Nenner x_{aq} bei Gegenschaltung kleiner, bei Hilfsschaltung größer, denn es ist für gleichbleibende Sättigung

$$x_{aq} = x_a (1 \pm u)^2.$$

Daher wird das Korrektionsglied bei Gegenschaltung größer, bei Hilfsschaltung kleiner als ohne Querwicklung. Da aber bei Gegenschaltung der Querwicklung das Feld stärker wird und die Sättigung größer, wird x_{aq} auch noch etwas vergrößert. Bei Gegenschaltung ist also die prozentuale Abweichung im allgemeinen größer als bei Hilfsschaltung.

Beim Kurzschlußzustand (Induktionsmotor mit Querwicklung) ist der Strom für $\frac{c_r}{c} = 0$ und $\frac{c_r}{c} = \infty$ derselbe wie ohne Querwicklung, weil hier das Querfeld Null ist. Es ändert sich der Leerlaufstrom etwas.

Gl. 7, S. 111 wird jetzt:

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_{3r} - \mathfrak{I}_2 x_N \frac{c_r}{c} &= \mathfrak{E}_{3p} (1 \pm u) + \mathfrak{I}_3 (\mathfrak{B}_3 + \mathfrak{B}_4) \\ &= \mathfrak{I}_3 (\mathfrak{B}_{aq} + \mathfrak{B}_3 + \mathfrak{B}_4) \dots \dots (19) \end{aligned}$$

während Gl. 8 für den Arbeitsstromkreis bleibt:

$$\mathfrak{E}_{2p} + \mathfrak{E}_{2r} + \mathfrak{I}_3 x_N \frac{c_r}{c} = \mathfrak{I}_2 \mathfrak{B}_2 \dots \dots (8)$$

Hierin ist wieder

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

und nach Gl. 19

$$\begin{aligned} \mathfrak{E}_{2r} &= j \frac{c_r}{c} \mathfrak{E}_{3p} = j \frac{c_r}{c} \left[\frac{\mathfrak{E}_{3r} - \mathfrak{I}_2 x_N \frac{c_r}{c} - \mathfrak{I}_3 (\mathfrak{B}_3 + \mathfrak{B}_4)}{1 \pm u} \right] \\ &= - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{\mathfrak{E}_{2p}}{1 \pm u} - j \frac{\mathfrak{I}_2 x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2}{1 \pm u} - j \frac{c_r \mathfrak{I}_3 (\mathfrak{B}_3 + \mathfrak{B}_4)}{1 \pm u}, \end{aligned}$$

Daher wird aus Gl. 8

$$\mathfrak{E}_{2p} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} \right] = \mathfrak{Z}_2 \left\{ r_2 - j \left[x_2 - x_N \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} \right] \right\} + j \left(\frac{c_r}{c} \right) \mathfrak{Z}_3 \left(\frac{\mathfrak{Z}_3 + \mathfrak{Z}_4}{1 \pm u} + j x_N \right) \dots \dots \dots (20)$$

worin aus Gl. 19

$$\mathfrak{Z}_3 = j \frac{c_r}{c} \frac{\mathfrak{E}_{2p} + j \mathfrak{Z}_2 x_N}{\mathfrak{Z}_{aq} + \mathfrak{Z}_3 + \mathfrak{Z}_4} = j \frac{c_r}{c} \frac{(\mathfrak{E}_{2p} + j \mathfrak{Z}_2 x_N)}{\mathfrak{Z}_e} \dots (21)$$

ist. Reduziert man wieder auf den Stator und formt Gl. 20 nach Einsetzung von 21 um, so ergibt sich analog Gl. 11

$$\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{Z}_2' \left[-j x_N' + \frac{1}{1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} + \frac{\varepsilon \left(\frac{c_r}{c} \right)^2}{r_2' - j(x_2' - x_N')} + \frac{1}{1 \pm u} \mathfrak{Y}_e' \right] \dots (22)$$

Es ändert sich hiernach der Ersatzstromkreis Fig. 12 erstens dadurch, daß an Stelle von $\left(\frac{c_r}{c} \right)^2$ jetzt $\left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u}$ tritt, d. h. daß der Stromzweig, der den eigentlichen Arbeitsstrom des Rotors darstellt, die Admittanz Null hat, wenn

$$\frac{c_r}{c} = \sqrt{1 \pm u}$$

ist, und zweitens, daß der Leerlaufstrom des Rotors jetzt die Admittanz

$$\varepsilon \mathfrak{Y}_e' \frac{\left(\frac{c_r}{c} \right)^2}{1 \pm u}$$

hat. Sie ist bei der Grundtounenzahl $\varepsilon \mathfrak{Y}_e'$, wobei ε dieselbe Bedeutung hat, wie in Kap. III, Abschn. 3, und davon herrührt, daß durch die Querwicklung Widerstände und Reaktanzen im Arbeits- und Erregerkreis etwas verschieden sind. Es ergibt sich hier

$$\varepsilon = \frac{(r_3' + r_4') - j[x_3' - x_N'(1 \pm u) + x_4']}{r_2' - j(x_2' - x_N')} \dots (23)$$

Abgesehen hiervon bleibt die Lage und Größe des Arbeitskreises fast unverändert, es ist aber wieder der Geschwindigkeitsmaßstab ebenso, wie beim Leerlaufdiagramm (S. 146) erwähnt worden ist, zu verändern.

Hieraus folgt, daß die Wirkungsweise der Maschine, sei es mit, sei es ohne eine dem Rotor zugeführte Spannung, als Motor und

als Generator sich nicht ändert, es ist nur der stabile Arbeitsbereich auf eine andere Geschwindigkeit verlegt.

Da in dem Diagramm sich nur der Leerlaufpunkt etwas ändert, bleibt auch die maximale Leistung bei Verwendung der Querwicklung nahezu dieselbe, da sie aber jetzt in der Nähe der Grund-tourenzahl $\sqrt{1 \pm u}$ auftritt, ist das maximale Drehmoment im Verhältnis $\frac{1}{\sqrt{1 \pm u}}$ vergrößert bzw. verkleinert, was auch daraus folgt, daß ja das Querfeld umgekehrt proportional mit der Geschwindigkeit verändert wird.

Man erhält hiermit bei kleinen Geschwindigkeiten eine höhere Überlastungsfähigkeit, bei hohen Geschwindigkeiten eine geringere.

Bei demselben Drehmoment wächst der Arbeitsstrom nahezu proportional mit der Geschwindigkeit, ebenso wie bei einem Gleichstrom-Nebenschlußmotor, so daß man hier sehr bald an die Funken-grenze gelangt. Vergrößert man die Klemmenspannung proportional mit der Geschwindigkeit, so bleibt das Querfeld und der Arbeitsstrom für ein bestimmtes Drehmoment konstant. Wir werden aber weiter unten sehen, daß auch bei Erhöhung der Klemmenspannung bei Übersynchronismus sich Kommutations-schwierigkeiten bieten.

Bei konstanter Klemmenspannung nimmt ferner der gesamte Erregerstrom des Querfeldes umgekehrt proportional mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit zu. Denn das Querfeld wächst umgekehrt proportional mit $\frac{c_r}{c}$, die Windungszahl des Erregerkreises ist proportional mit $(1 \pm u) = \left(\frac{c_r}{c}\right)^2$. Durch die Sättigung wächst bei niedrigen Tourenzahlen der Erregerstrom noch schneller.

Bei Untersynchronismus würde daher eine Verminderung der Klemmenspannung zweckmäßig sein, um so mehr, als hier die Überlastungsfähigkeit bei konstanter Klemmenspannung steigt, was im allgemeinen nicht erforderlich ist.

3. Einfluß der Streuung auf die Leerlauf-tourenzahl.

Es ist schon in Kap. III Abschn. 3 gezeigt worden, daß Verschiedenheiten der Widerstände und Reaktanzen im Arbeits- und Erregerkreis den Leerlaufstrom beeinflussen. Durch eine Reaktanz im Erregerkreis, die im Arbeitskreis nicht vorhanden ist, wird eine Änderung der Leerlauf-tourenzahl hervorgerufen, und zwar zunächst bei kurzgeschlossenem Erregerkreis, und da die Erregung die Geschwindigkeit nicht ändert, auch bei der Nebenschlußschaltung.

Bei Verwendung der Querwicklung stellt ja die Streureaktanz x_4 der Querwicklung hauptsächlich diese zusätzliche Reaktanz im Erregerkreis dar, und die Größe ε , welche das Verhältnis der Impedanz des Erregerkreises zu der Impedanz des Arbeitskreises ist, ist in Gl. 23 Seite 148 berechnet.

Zerlegt man nun ähnlich wie in Kap. III Seite 125 und 126 die Admittanz $\varepsilon Y_e \left(\frac{c_r}{c}\right)^2 \frac{1}{1 \pm u}$ aus Gl. 22, so ergibt sich hier die Leerlaufourenzahl

$$\frac{c_r}{c} \simeq \sqrt{1 \pm u} \sqrt{\frac{1}{1 - [(x_3 + x_4) - (x_2 - x_N) - x_N(1 \pm u)] b_e}}$$

oder mit der Annäherung

$$b_e \simeq \frac{1}{x_e} = \frac{1}{x_{aq} + x_3 + x_4}$$

$$\frac{c_r}{c} \simeq \sqrt{1 \pm u} \sqrt{1 + \frac{x_3 + x_4 - x_2 + u x_N}{x_{aq} + x_2 + x_N u}} \simeq \sqrt{1 \pm u} \sqrt{1 + \frac{x_4}{x_{aq}}}$$

Das Korrektionsglied ist nahezu dasselbe wie auf Seite 147 für die Phasengleichheit zwischen Erregerstrom und Spannung beim Leerlaufversuch. Es wird bei Gegenschaltung immer größer, weil x_{aq} im Nenner mit dem Quadrat der effektiven Windungszahl des Erregerkreises abnimmt.

Hierdurch läßt sich ermitteln, bis zu welcher Grenze die Gegenschaltung überhaupt noch wirksam ist. Nimmt man in dem ange-näherten Korrektionsglied, das nur die Reaktanz x_4 der Querwicklung berücksichtigt, an, daß x_4 der Windungszahl proportional ist, was etwa zutrifft, wenn mit der Windungszahl auch die Nutenzahl zunimmt, in der die Querwicklung verteilt ist, und daß ferner ohne Berücksichtigung der Sättigung $x_{aq} = x_a(1 - u)^2$ wird, so kann

$$\frac{x_4}{x_{aq}} = \frac{x_4}{x_a(1 - u)^2} = k \frac{u}{(1 - u)^2}$$

gesetzt werden, worin k eine Konstante ist. Es wird dann

$$\frac{d\left(\frac{c_r}{c}\right)}{du} = 0,$$

d. h. die Geschwindigkeit ändert sich bei Vergrößerung der Windungszahl der Querwicklung nicht mehr, wenn

$$k = (1 - u)^2$$

$$\frac{x_4}{x_{aq}} = u$$

ist, d. h. wenn die Streureaktanz der Querwicklung sich zur gesamten Magnetisierungsreaktanz des Erregerkreises verhält wie die Windungszahlen von Querwicklung und Rotor, oder da

$$J_3 x_{a,q} \simeq E_{3p} - E_4$$

ist, wenn

$$\frac{J_3 x_4}{E_{3p} - E_4} = \frac{E_4}{E_{3p}}$$

ist.

Weitere Abweichungen ergeben sich für die Leerlauf Tourenzahl durch die Oberfelder, die hier auch berücksichtigt werden müssen, da bei Einschaltung der Querwicklung das Querfeld deformiert wird, wenn Querwicklung und Rotorwindungen verschiedene Teile des Polbogens bedecken.

Das Korrektionsglied durch Oberfelder ist wieder wie in Kap. II und III

$$\sqrt{\sigma_2 \sigma_3},$$

worin

$$\sigma_2 = \frac{\pi}{2} f_2$$

$$\sigma_3 = \frac{\pi}{2} f_3 \text{ ist.}$$

Hierin kann sich nur σ_3 ändern, wenn die Querwicklung eingeschaltet ist.

Ist z. B. die Statorhauptwicklung, wie es bei einphasigen Induktionsmotoren üblich ist, auf $\frac{2}{3}$ der Polteilung verteilt, und wird die Querwicklung in dem übrigen Drittel untergebracht, so ist die MMK-Kurve der Querwicklung ein flaches Trapez, I (Fig. 30).

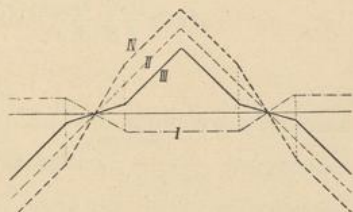


Fig. 30.

Ist die Querwicklung gegen den Rotor geschaltet, dessen MMK-Kurve durch das Dreieck II dargestellt ist, so bleibt eine resultierende MMK III übrig, die noch eine größere negative dritte Harmonische hat als die MMK-Kurve des Rotors allein, und dieses spitze Feld bedingt, wie in Kap. II gezeigt ist, eine Abweichung von der Grundtourszahl nach oben.

Ist die Querwicklung im Sinne des Rotors geschaltet, so nähert sich die MMK-Kurve IV mehr der Sinusform. Nun werden die Felder besonders bei Gegenschaltung durch die Sättigung abgeflacht, die richtige Feldform und damit die Wicklungsfaktoren können nur

durch Aufzeichnung der Feldkurve mittels der Magnetisierungskurve¹⁾ gefunden werden.

Es folgt hieraus, daß bei der erwähnten Verteilung der Querrwicklung das Korrektionsglied bei Gegenschaltung eine mit der Windungszahl wachsende Abweichung nach oben gegenüber der ohne Berücksichtigung der Oberfelder ermittelten Grundtourenzahl ergibt, bei Hilfsschaltung der Querrwicklung ist das Korrektionsglied dagegen klein.

4. Die Kurzschlußströme.

Bei der Tourenregulierung wächst die Spannung am ganzen Rotor, je mehr man sich vom Synchronismus entfernt, und damit auch die Kurzschlußspannung der von den Arbeitsbürsten kurzgeschlossenen Windungen.

Da hierbei $\Phi_1 \simeq \frac{c_r}{c} \Phi_3$ ist, schließt eine Bürste eine Spannung

$$\Delta e \simeq \frac{N}{2K} \frac{b_1 p}{\beta a} \pi \sqrt{2} c \Phi_3 \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] 10^{-8} \text{ Volt kurz.} \quad (24)$$

Bleibt die Klemmenspannung am Stator und damit Φ_1 bei der Regulierung konstant, so kann man setzen

$$\begin{aligned} \Delta e &\simeq \frac{N}{2K} \frac{b_1 p}{\beta a} \pi \sqrt{2} c \Phi_1 \frac{1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2}{\frac{c_r}{c}} 10^{-8} \text{ Volt} \quad (24a) \\ &= \text{konst.} \frac{1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2}{\frac{c_r}{c}}. \end{aligned}$$

Die Kurzschlußspannung wächst also bei konstanter Klemmenspannung schneller, wenn man um einen bestimmten Prozentsatz nach unten reguliert, als bei Regulierung im gleichen Maße nach oben. Würde man dagegen, wie es (S. 149) die Überlastungsfähigkeit verlangt, die Klemmenspannung mit der Tourenzahl steigern, d. h. Φ_3 konstant halten, so würde die Kurzschlußspannung bei Regulierung nach oben schneller steigen. Man wird daher bei der Regulierung nach oben von der Veränderung der Klemmenspannung absehen und erforderlichenfalls die Überlastungsfähigkeit durch Überkompensation steigern. Dagegen folgt

¹⁾ s. Wechselstromtechnik Bd. III v. E. Arnold S. 331/333.

auch, daß die Verminderung der Klemmenspannung für kleine Geschwindigkeiten vorteilhaft ist. Da man bei kleinen Geschwindigkeiten größere Kurzschlußströme zulassen kann, ehe die Bürsten feuern, wird man eine Regulierung im Verhältnis 1:2 (ohne Veränderung der Klemmenspannung) etwa von $0,65 \frac{c_r}{c}$ bis $1,3 \frac{c_r}{c}$ verlegen.

Dann verhalten sich die von den Hauptfeldern herrührenden EMKe Δe bei kleinster und größter Tourenzahl wie

$$\frac{1 - 0,65^2}{0,65} \quad \frac{1,3}{1 - 1,3^2} = \frac{1,66}{1}$$

Ferner ist noch zu berücksichtigen, daß sich zu diesen EMKen noch die Stromwendespannung rechtwinklig addiert, die bei Übersynchronismus viel größer ist als bei Untersynchronismus.

Abgesehen von der Begrenzung der Regulierfähigkeit durch Funkenbildung und von der Vergrößerung der Verluste haben die Kurzschlußströme durch ihre magnetische Rückwirkung einen Einfluß auf die Wirkungsweise der Maschine, der sich besonders in der Kompensation bemerkbar macht.

Die Kurzschlußströme bedingen, wie in Kap. II gezeigt ist, eine Vergrößerung der Wattkomponente des Erregerstromes

$$\mathfrak{S}_{3w} = \mathfrak{E}_{3p} (1 \pm u) g_{aq}$$

Zerlegt man, wie in Kap. II, S. 106, die Konduktanz g_{aq} in einen Teil g_{ei} , der den Eisenverlusten, und einen Teil

$$g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right],$$

der den Kurzschlußströmen entspricht, so sind diese Konduktanzen bei gleichen Verlusten wieder im Verhältnis $\frac{1}{(1 \pm u)^2}$ vergrößert. Bei Gegenschaltung ist also ein viel größerer Strom erforderlich, um eine bestimmte MMK der Kurzschlußströme zu kompensieren als bei der Hilfsschaltung. Bei Gegenschaltung äußert sich also die Rückwirkung stärker.

a) Leerlaufzustand. In der Gl. 18a des Erregerstromes enthält das Glied mit dem effektiven Widerstand r_{aq} die Kurzschlußströme. Es ist

$$r_{aq} = \frac{g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right]}{\left\{ g_{ei} + g_k \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \right] \right\}^2 + b_{aq}^2}$$

eine veränderliche Größe.

Die dem Rotor und der Querwicklung zugeführte Leistung ist nach Gl. 18a

$$kPJ_3 \cos \varphi_3 = J_3^2 \left\{ r_{aq} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 \pm u} \right] + r_3 + r_4 + \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 (1 \pm u) r_2 \right\}.$$

Für die Grundtorenzahl

$$\frac{c_r}{c} = \sqrt{1 \pm u}$$

ist diese Leistung $= J_3^2 [r_3 + r_4 + (1 \pm u)^2 r_2]$.

Bei Gegenschaltung ist das letzte Glied $(1 - u)^2 r_2$ sehr klein. Nun ist aber wegen der Streufelder der Strom erst bei einer höheren als der Grundtorenzahl in Phase mit der Klemmenspannung. Hierbei ist das erste Glied $r_{aq} \left[1 - \left(\frac{c_r}{c} \right)^2 \frac{1}{1 - u} \right]$ negativ, und dies bedeutet, daß die Leistung, die dem Rotor und der Querwicklung zusammen zugeführt werden muß, kleiner ist als der Stromwärmeverlust und daß bei Phasengleichheit die Klemmenspannung kleiner ist, als dem Ohmschen Spannungsabfall entspricht.

Obwohl man also bei der Gegenschaltung für das gleiche Feld einen viel stärkeren Strom braucht, braucht die Erregerspannung nicht ebensoviel verstärkt zu werden. Ein Teil der Verluste wird mechanisch auf den Rotor übertragen. Dies rührt daher, daß das Drehmoment der Kurzschlußströme mit dem Feld in der Statorachse nicht mehr durch den Rotorstrom, der sie kompensiert, aufgehoben wird.

Denn der Rotorstrom, der die Kurzschlußströme kompensiert, kann mit diesem Feld nur ein Drehmoment bilden, insofern er die Rotorwindungen, nicht aber insofern er die Querwicklung durchfließt.

Die Größe des kompensierenden Stromes ist abhängig von der Gesamtzahl der Windungen von Rotor und Querwicklung, das Drehmoment nur von der MMK der Rotorwindungen allein, daher ist das Drehmoment des Rotorstromes im Verhältnis $\frac{1}{1 \pm u}$ größer bzw. kleiner als das der Kurzschlußströme. Bei Untersynchronismus ist das Drehmoment der Kurzschlußströme motorisch, das des Rotorstromes im Verhältnis $\frac{1}{1 - u}$ größer und generatorisch, es bleibt also ein generatorisches Moment übrig.

Bei Übersynchronismus ist das Drehmoment der Kurzschlußströme generatorisch, das entgegengerichtete des Rotors kleiner, es bleibt also auch ein generatorisches Moment, da der Rotor und die Querwicklung zusammen nicht den ganzen Verlust, der in den

kurzgeschlossenen Spulen auftritt, auf diese übertragen können, sondern nur einen Teil.

Bei der Grundtorenzahl wird bei Übersynchronismus eine Leistung

$$J_3^2 [r_3 + r_4 + (1 + u)^2 r_2]$$

dem Netz entnommen, die größer ist als der Stromwärmeverlust in Rotor und Querwicklung, weil $(1 + u)^2$ groß wird. Trotz des kleineren Erregerstromes für ein bestimmtes Feld kann also die zugeführte Spannung nicht entsprechend verkleinert werden.

b) Kurzschlußzustand. Die Wirkung der Kurzschlußströme auf den Induktionsmotor, dessen Erregerbürsten über die Querwicklung geschlossen sind, ist ganz analog, wie man erkennt, wenn man den wattlosen Leerlaufstrom unter Berücksichtigung der Größe ϵ in Gl. 22 und 23 in derselben Weise wie in Kap. III, Abschn. 3, S. 126 ermittelt. Es ergab sich dort, daß die Wattkomponente des Erregerstromes den wattlosen Strom in den Arbeitswindungen verkleinert, wenn im Erregerkreis eine Reaktanz vorhanden ist, die in den Arbeitswindungen nicht enthalten ist.

Die Verkleinerung wird hier

$$1 - \frac{g_e x_4}{b_e r_2}$$

Andererseits wird der wattlose Strom in den Arbeitswindungen vergrößert durch die Wirkung der Differenz der Widerstände in beiden Stromkreisen und zwar im Verhältnis $1 + \frac{r_3 + r_4 - r_2}{r_2}$.

Bei Gegenschaltung hat man bei dem starken Quersfeld und Erregerstrom eine große Stromdichte an den Erregerbürsten und daher einen kleinen Widerstand r_3 , so daß $r_3 + r_4 - r_2$ unter Umständen Null oder sehr klein werden kann. Ist x_4 groß, so überwiegt die Verkleinerung nach Maßgabe von $1 - \frac{g_e x_4}{b_e r_2}$ und bei starken Kurzschlußströmen (g_e) kann die Verkleinerung des wattlosen Leerlaufstromes bei Gegenschaltung so groß werden, daß er kleiner wird als er ohne Querwicklung ist, obwohl der Erregerstrom des Quersfeldes viel größer ist.

Diese Wirkung hängt nun sehr von der Temperatur ab, da bei steigender Temperatur die Kurzschlußströme zunehmen. Es konnte in einem Falle bei gegengeschalteter Querwicklung beobachtet werden, daß der Motor, nachdem er längere Zeit gelaufen war, und der Kommutator sich erhitzt hatte, bei Leerlauf nahezu kompensiert war, obwohl der Erregerstromkreis kurzgeschlossen war.

Bei Übersynchronismus werden die Kurzschlußströme durch Rotation im Statorfeld erzeugt, und ihre Phase gegenüber dem Querfeld ist umgekehrt wie bei Untersynchronismus, wie in Kap. II gezeigt ist. Dann ist g_e negativ und an Stelle einer Verkleinerung des wattlosen Leerlaufstromes erhalten wir nun eine Vergrößerung im Verhältnis

$$1 + \frac{g_e}{b_e} \frac{x_4}{r_2}.$$

Hierzu tritt nun die Vergrößerung durch die Widerstände, weil der Erregerstrom des Querfeldes bei Hilfsschaltung sehr klein ist, die Stromdichte gering und r_3 groß.

Daher wird der wattlose Leerlaufstrom vergrößert. Es folgt hieraus, daß die Erregerspannung des Nebenschlußmotors bei der Tourenregulierung nicht viel geändert zu werden braucht, obwohl bei kleinen Geschwindigkeiten der Erregerstrom viel größer wird als bei hohen (s. S. 149).

Zusammenfassend ist die Wirkung der Kurzschlußströme bei Untersynchronismus eine Verbesserung des Leistungsfaktors, bei Übersynchronismus eine Verschlechterung, und sie entspricht hierin ganz der Rückwirkung der Kurzschlußströme bei einem Repulsionsmotor.

VII. Untersuchung der Tourenregelung.

1. Leerlauftourenzahl. — 2. Leerlaufströme und Leerlaufverluste. — 3. Regulierungskurven bei Belastung.

Der in Kapitel V beschriebene Motor besitzt eine Querwicklung von 24 Windungen, die in die 12 freigebliebenen Statornuten (3 pro Pol) verteilt ist und mehrere Abzweigstellen besitzt. Er wurde hiermit in verschiedenen Schaltungen untersucht.

1. Leerlauftourenzahl.

Es möge zunächst die wirkliche Leerlauftourenzahl verglichen werden mit der Grundtourenzahl, die sich ohne Berücksichtigung der Streufelder und Oberfelder ergibt, also unter Zugrundelegung der Wicklungsfaktoren für sinusförmige Felder.

Die Rotorwindungszahl im Erregerkreis ist bei der Dreibürstenschaltung nach Fig. 21 für ein sinusförmiges Feld

$$w_3 f_3 = \frac{K}{2a} \frac{2}{\pi} \cos^2 \varrho \frac{\pi}{4},$$

worin $\varrho\pi$ der von den Arbeitsbürsten eingeschlossene Winkel ist.

Hier ist

$$K = 143 \quad a = 1 \quad \varrho = \frac{3}{4},$$

daher

$$w_3 f_3 = \frac{143}{2} \frac{2}{\pi} \cos^2 33^\circ 45' = 31.$$

Da die Querwicklung in 3 von 11 Nuten pro Pol verteilt ist, wird

$$f_4 = \frac{2}{\pi} \frac{\sin \frac{3}{11} \frac{\pi}{2}}{\frac{3}{11}} = 0,97.$$

Untersucht wurden Schaltungen mit

$$w_4 = +20, \quad +16, \quad +12, \quad +6 \text{ Windungen.}$$

In der folgenden Tabelle sind die berechneten und gemessenen Leerlaufourenzahlen zusammengestellt.

w_4	u	$\sqrt{1+u}$	$\frac{c_r}{c}$ gemessen	Abweichungen in %
+24	0,75	1,32	1,325	+ 0,38%
+20	0,625	1,273	1,273	0
+16	0,50	1,224	1,23	+ 0,49 "
+12	0,375	1,17	1,175	+ 0,43 "
+ 6	0,187	1,089	1,1	+ 1 "
- 6	0,187	0,901	0,926	+ 2,78 "
-12	0,375	0,79	0,845	+ 6,9 "
-16	0,50	0,707	0,805	+ 13,8 "

Bei Übersynchronismus sind die Abweichungen verschwindend. Eine nähere Untersuchung zeigt, daß bei der Feldform der Dreibrüstenschaltung die Wirkungen der Streufelder und Oberfelder sich zum Teil aufheben. Dagegen wird die Abweichung bei Gegen-schaltung ziemlich groß, um so mehr, je mehr Windungen gegen-geschaltet sind. Da hier die Querwicklung nur in ganz wenigen Nuten verteilt ist, sind die Streufelder ziemlich groß und die Feld-deformation ist ähnlich wie in Fig. 30 III. Eine stärkere Gegen-schaltung war daher kaum noch wirksam.

2. Leerlaufströme und Leerlaufverluste.

In Fig. 31 stellt *I* die gesamten Leerlaufverluste W_0 , *II* die Er-regerströme des Rotors J_r , *III* die Leerlaufströme des Stators J_0 als Funktion der Geschwindigkeit $\frac{c_r}{c}$ dar.

Die Spannung am Erregerstromkreis war 4 Volt, und es zeigte sich, daß die Maschine hiermit bei Belastung nahezu bei allen Geschwindigkeiten kompensiert war. Nur bei der höchsten Tourenzahl betrug die Erregerspannung 6 Volt; die Punkte für den Stator

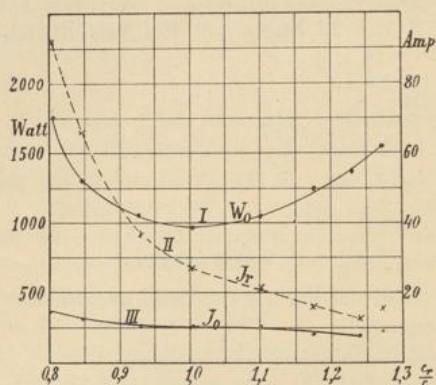


Fig. 31.

und Rotorstrom zeigen dies. Die Statorspannung war konstant 200 Volt. Die Rotorerregerströme nehmen von Synchronismus anfangend nahezu mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit bei Übersynchronismus ab, solange die Erregerspannung konstant ist, bei Untersynchronismus nehmen sie dagegen viel schneller zu, was nicht nur auf die Sättigung, sondern auch auf die Felddeformation zurückzuführen ist. Daher erklärt sich auch der sehr schnell ansteigende Leerlaufverlust bei Untersynchronismus. Die Verteilung der Querswicklung in wenigen Nuten ist daher auch für die Verluste ungünstig.¹⁾

3. Regulierungskurven bei Belastung.

Fig. 32 zeigt die Regulierungskurven bei Belastung, die Tourenzahlen sind als Funktion des Drehmomentes aufgetragen. Die eingetragenen Zahlen bezeichnen die Windungszahlen der Querswicklung, und zwar lief der Motor bei allen hier untersuchten Belastungen funkenfrei, abgesehen von der höchsten Stufe +20, wo bei mehr als normalem Drehmoment, 3,9 mkg, die Funkenbildung schon stark wurde und auch beim vollen Drehmoment schon bemerkbar war. Bei der in der Tabelle S. 157 erwähnten Stufe +24 funkte der Motor schon bei Leerlauf ($n \cong 2000$), sie ist daher hier wie in Fig. 31 ausgeschieden. Die Kurzschlußspannung war dabei $A_e \cong 4,8$ Volt, die Kommutatorgeschwindigkeit $v_k \cong 20$ m/sec.

¹⁾ Auf die Mittel, welche die Erfinder der Querswicklung, E. Arnold und J. L. La Cour angegeben haben, um diese Nachteile zu beseitigen, kann hier noch nicht eingegangen werden, da Versuche hierüber z. Z. noch nicht vorliegen.

Der Tourenabfall von Leerlauf bis Vollast ist sehr gering, er steigt aber bei Übersynchronismus. Bei den kleinsten Tourenzahlen ist er $1,9\%$, bei Synchronismus $2,2\%$ und am größten bei $+16$ $3,1\%$. Bei $+20$ ist er wiederum nur $1,9\%$, weil die Erregerspannung am Rotor hierbei auf 6 Volt verstärkt wurde.

Es ist hieraus ersichtlich, daß die Überlastungsfähigkeit durch Verstärkung der Erregung bei Übersynchronismus leicht vergrößert werden kann. Bei kleinen Geschwindigkeiten kann die Klemmenspannung ohne Nachteil für die Überlastungsfähigkeit herabgesetzt werden, um die durch die starke Sättigung entstehenden Verluste zu vermindern.

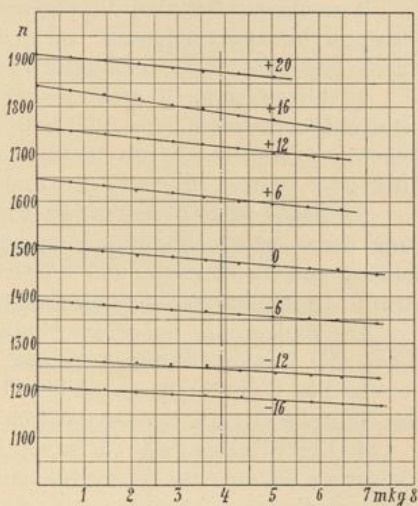


Fig. 32.

Fig. 33a bis c stellen die durch Bremsung erhaltenen Ströme, Wirkungsgrade und Leistungsfaktoren als Funktion der Tourenzahl

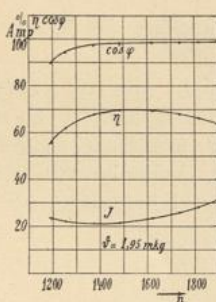


Fig. 33 a.

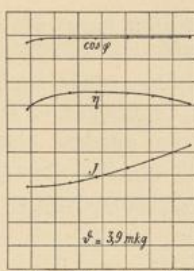


Fig. 33 b.

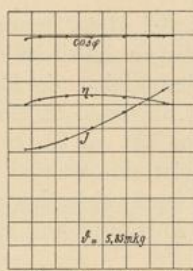


Fig. 33 c.

dar, und zwar bezieht sich Fig. 33a auf das halbe normale Drehmoment, Fig. 33b auf das volle und Fig. 33c auf das $1\frac{1}{2}$ fache Drehmoment bei konstanter Klemmenspannung.

VIII. Zusammenfassung.

Zusammengefaßt sind die Eigenschaften eines regulierbaren einphasigen Nebenschlußmotors nach dem System Arnold-la Cour durch folgende Punkte charakterisiert:

1. Abstufung. Jede Stufe der Querwicklung ergibt zwei Geschwindigkeitsstufen, eine oberhalb, eine unterhalb Synchronismus; beliebig feine Abstufungen lassen sich durch einen Induktionsregulator oder mittels Drosselspulen erzielen.

2. Begrenzung der Regelungsfähigkeit. Die Verminderung der Geschwindigkeit ist begrenzt durch die Wirkung von Streufeldern und Oberfeldern, und die Grenze hängt daher von der konstruktiven Anordnung der Querwicklung ab.

Die Steigerung der Geschwindigkeit ist im allgemeinen nur durch die Funkenbildung begrenzt.

3. Die Überlastungsfähigkeit kann bei allen Stufen groß, der Tourenabfall von Leerlauf bis Vollast klein gehalten werden.

4. Der Wirkungsgrad ist wie bei allen Kommutatormaschinen kleiner als bei anderen Wechselstrommaschinen, er nimmt bei kleinen Geschwindigkeiten ab durch große Sättigung, bei hohen durch Kommutationsverluste. Bei kleiner Geschwindigkeit kann er durch Verminderung der Klemmenspannung verbessert werden, bei großer nur durch Mittel zur Verbesserung der Kommutation.

5. Der Leistungsfaktor ist bei allen Stufen in der Nähe von 1.

6. Bei allen Tourenstufen kann die Maschine als Motor oder Generator arbeiten.

Wenngleich die Maschine somit noch nicht alle Anforderungen erfüllt, die man an einen regulierbaren Gleichstrommotor zu stellen gewohnt ist, so ist sie die einzige bisher praktisch ausgeführte Wechselstrommaschine mit gleichbleibender, beliebig fein einstellbarer Geschwindigkeit und dürfte daher für viele Zwecke ein wertvoller Antriebsmotor sein.