

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen
Induktionsmotoren und Kommutatormotoren**

Rajz, Alexius

1911

Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen Induktionsmotoren und
Kommutatormotoren

[urn:nbn:de:bsz:31-275799](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-275799)

Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen Induktionsmotoren und Kommutatormotoren.

Von Dipl.-Ing. A. Rajz.

I. Einleitung.

1. Seit einigen Jahren bildet die wirtschaftliche Tourenregelung der Dreiphasenmotoren eine wichtige Aufgabe der Elektrotechnik. Die Einfachheit der Induktionsmotoren (Asynchronmotoren) war für die Abnehmer von elektrischer Energie lange Zeit so ausschlaggebend, daß sie die Unwirtschaftlichkeit der Tourenregelung mittels Rotorwiderständen, in denen ein dem Tourenabfall proportionaler Teil der Leistung vernichtet wird, gerne mit in Kauf nahmen.

Mit steigender Größe der Motoreinheiten tritt in der letzten Zeit die Frage der Wirtschaftlichkeit immer mehr in den Vordergrund. In Förder- und Pumpenanlagen, Walzwerken müßten in den Rotorwiderständen Hunderte von Pferdestärken vernichtet werden, weil der Betrieb eine wechselnde Tourenzahl erfordert. Es wurde hier die Einfachheit geopfert, um den Forderungen der Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden.

Prinzipiell wurde die Frage der regelbaren Dreiphasenmotoren durch die Erfindung der Mehrphasen-Kommutatormotoren schon im Jahre 1891 gelöst. Damals stellte die Firma Siemens & Halske einen solchen in Frankfurt aus und im selben Jahre noch wurde die Theorie dieser Motoren von Görges¹⁾ veröffentlicht. Die Furcht vor dem Kommutator und der gleichzeitige, große Erfolg des Induktionsmotors haben jedoch damals einer weiteren Entwicklung die Bahn verschlossen. Erst als die Einphasen-Kommutatormotoren

¹⁾ ETZ 1891, S. 699.

schon ausgebildet waren und man im Bau von Kommutatormotoren Erfahrungen gesammelt hatte, wandten sich die Elektrotechniker wieder dem mehrphasigen Kommutatormotor zu. Heyland griff die Idee als Erster auf, indem er einen Dreiphasen-Kommutatormotor mit Widerstandsverbindungen zwischen den Lamellen konstruierte, der eine vollständige Kompensation erlaubte. Im Jahre 1901 haben sich Winter und Eichberg (D. R. P. 153730) die Regelung der Nebenschlußmotoren durch einen zwischen Stator und Rotor geschalteten Transformator patentieren lassen. Im Jahre 1903 veröffentlichte Blondel¹⁾ eine Theorie dieser Motoren. Die direkt gespeisten Motoren sind in dem E. P. 13033/01 von Scherbius angegeben worden.

Bei allen Kommutatormotoren wird die Leistung durch die Kommutation begrenzt. Der Kraftfluß pro Pol darf einen gewissen Wert nicht überschreiten, damit die „Transformator-EMK“ der kurzgeschlossenen Lamellen nicht zu groß wird. Nach Eichberg²⁾ kann man Drehfeld-Kommutatormotoren für eine Regelung von 1:3 bis 40 PS pro Pol bauen. Große Motoreinheiten erhalten also viele Pole und laufen, weil sie beim Synchronismus am günstigsten arbeiten, für dieselbe Polzahl langsamer.

Der dreiphasige Kommutatormotor genügt also für Betriebe, die große, schnellaufende und stark regelbare Motoreinheiten erfordern, nicht. In diesen Fällen ist eine andere Lösung vorteilhafter, die im Prinzip darin besteht, daß die infolge der Tourenverminderung auf den Rotor eines Induktionsmotors übertragene elektrische Leistung vom Rotor weggeführt und in anderen elektrischen Maschinen wieder nutzbar gemacht wird. Eine solche Anordnung heißt allgemein: Kaskadenschaltung. Die einfachste Kaskadenschaltung ist die, bei der man den Strom aus dem Rotor des Induktionsmotors einem anderen Induktionsmotor zuführt. Da die Periodenzahl im Rotor von der geschlüpften Tourenzahl der ersten Maschine, die Tourenzahl der zweiten Maschine aber von der Periodenzahl des Stromes abhängt, so ist bei starrer Kupplung nur eine bestimmte Geschwindigkeit möglich, die von den Polzahlen abhängt. Durch Einzelschaltung der Motoren und durch Gegenschaltung nach Danielson erhält man drei weitere Geschwindigkeitsstufen, im ganzen also vier, ohne einen stetigen Übergang. Auch ist der Leistungsfaktor stark verkleinert³⁾.

Die Felten-Guilleaume-Lahmeyerwerke haben sich mehrere Anordnungen patentieren lassen, nach denen die Schlüpfungsenergie

¹⁾ Eclairage électrique 1903.

²⁾ ETZ 1910, S. 794.

³⁾ Arnold: Wechselstromtechnik, Bd. V, I. Teil.

in einem Gleichstrommotor nutzbar gemacht wird unter Vermittlung eines rotierenden Umformers. Auf ähnlichem Prinzip beruhen die Heyland-Getriebe.

2. Den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bilden die Kaskadenschaltungen, bei welchen die Schlüpfungsenergie eines Induktionsmotors, d. h. die Energie, die vom Motor selbst nicht nutzbar gemacht werden kann, durch einen Mehrphasen-Kommutatormotor in mechanische Arbeit umgesetzt wird. Dadurch, daß die Kommutatormotoren von ihrer synchronen Tourenzahl in weiten Grenzen unabhängig sind, können sie von — theoretisch — beliebiger Periodenzahl gespeist, mit einer gewünschten Geschwindigkeit laufen. Folglich können sie mit dem Hauptmotor mechanisch gekuppelt werden, oder von ihm mechanisch getrennt einen mit konstanter Tourenzahl laufenden Dreiphasen-Generator antreiben, der die nicht verarbeitete Leistung des Induktionsmotors dem Netze zurückgibt. Die erste Anordnung ist von den F.-G.-Lahmeyerwerken¹⁾, die zweite von Scherbius²⁾ patentiert worden.

Beide Anordnungen bieten den Vorteil einer Phasenkompensation. Die Mehrphasen-Kommutatormotoren können nämlich einen voreilenden Strom erzeugen, der den Magnetisierungsstrom des Induktionsmotors kompensiert und auch die Phasenverschiebung der Streureaktanzen aufhebt. Zu diesem Zwecke wurde die Kaskadenschaltung von Bragstad und La Cour schon im Jahre 1902 patentiert (D. R. P. 148 305).

Die Schwierigkeiten, die sich dem Bau eines direkt am Netze angeschlossenen Dreiphasen-Kommutatormotors entgegenstellen, sind in der Kaskadenschaltung wesentlich geringer. Erstens steht seine Leistung nur in solchem Verhältnis zur Gesamtleistung der Anlage, wie der Tourenabfall zur synchronen Tourenzahl des Induktionsmotors. Zweitens ist die Periodenzahl im selben Verhältnis kleiner. Drittens ist die Wahl der Spannung für den Kommutatormotor frei, ohne Zwischenschaltung eines Leistungstransformators.

Die Anordnung der F.-G.-Lahmeyerwerke, nach der die beiden Motoren direkt gekuppelt werden, leidet an dem Nachteil, daß bei langsam laufendem Induktionsmotor der Kommutatormotor ebenfalls langsam laufen muß, wodurch seine Dimensionen unnötig groß werden. Durch Riemenübersetzung könnte man allenfalls Ab-

¹⁾ D. R. P. 169 453. Die Phasenkompensation sollte nach dem Zusatzpatente 174 247 durch zwei Einphasenmotoren erreicht werden, die von zwei, um 90° versetzten Rotorphasen wechselseitig gespeist, bzw. erregt sind. Die Kompensation wäre nur für eine reaktanzlose Rotorwicklung erreicht.

²⁾ D. R. P. 179 525.

hilfe schaffen, doch sind Riemen im elektrischen Maschinenbau nicht beliebt.

Aus diesem Gesichtspunkte ist die getrennte Anordnung von Scherbius vorteilhafter, obwohl sie mehr Maschinen erfordert und deshalb einen kleineren Wirkungsgrad besitzt. Allerdings bezieht sich die Verkleinerung des Wirkungsgrades nur auf die geschlüpfte Leistung, denn nur diese wird den Hilfsmaschinen zugeführt. Weiterhin wird auch die Leistung des Hauptmotors (Induktionsmotor) durch die Herabsetzung der Tourenzahl vermindert, weil für die Hauptwelle die geschlüpfte Leistung verloren geht. Bezeichnet nämlich W_1 die maximale Leistung des Hauptmotors bei kurzgeschlossener Rotorwicklung und W die Leistung bei einer niedrigeren Tourenzahl, auf welche es mittels des Hilfsaggregates gebracht wird, ω und ω_1 die betreffenden Winkelgeschwindigkeiten, s die Schlüpfung, so ist das Drehmoment des Hauptmotors

$$\vartheta = \frac{W}{\omega} = \frac{(1-s)W_1}{(1-s)\omega_1} = \frac{W_1}{\omega_1} \dots \dots (1)$$

konstant für alle Geschwindigkeiten, d. h. die Leistung des Hauptmotors nimmt der Tourenzahl proportional ab.

Andererseits bietet die Scherbiussche Anordnung den Vorteil, daß die Hilfsgruppe an beliebiger Stelle der Zentrale aufgestellt werden kann, was wichtig ist für Induktionsmotoren, die nachträglich regelbar gemacht werden.

Als Generator der Hilfsgruppe eignet sich die Induktionsmaschine besser als der Synchrongenerator, denn mit der ersten kann die Hilfsgruppe angelassen und erst bei der verlangten Tourenzahl mit dem Hauptmotor zusammengeschaltet werden. Andernfalls müßte das Hilfsaggregat mit Hilfe des Kommutatormotors angelassen werden, der bei stillstehendem Hauptmotor die volle Netzperiodenzahl bekäme.

Auch das mechanisch gekuppelte Aggregat wird man praktisch mittels Widerständen im Rotorkreis des Hauptmotors anlassen und den Kommutatormotor erst bei der niedrigen sekundären Periodenzahl zuschalten.

3. Durch die Kaskadenschaltung verliert der Induktionsmotor seinen eigenartigen Charakter, daß er nur in der Nähe seiner synchronen Tourenzahl stabil laufen kann, und nimmt dafür den Charakter des Kommutatormotors an. Ist dieser z. B. ein Seriemotor (nach Görges oder nach Scherbius), so fällt bei Belastung seine Tourenzahl und damit bei fester Kupplung auch die des ganzen Aggregates. Ähnlich ist es bei der mechanisch getrennten Schaltung. Hier muß die Hilfsgruppe mit konstanter oder annähernd

konstanter Tourenzahl laufen, damit der synchrone oder asynchrone Generator auf das Netz zurückarbeiten kann. Verlangt nun der Seriomotor bei Belastung einen Tourenabfall, so muß dieser vom Hauptmotor aufgehoben werden durch Ansteigen der Spannung und der Periodenzahl an seinen Schleifringen. Das ist aber nur durch entsprechenden Tourenabfall des Hauptmotors möglich.

Die Nebenschluß-Kommutatormotoren laufen bei annähernd konstanter und für Leerlauf beliebig einstellbarer Tourenzahl. In der Kaskadenschaltung wird bei entsprechender Übersetzung des Regulier-Transformators den Bürsten eine Spannung zugeführt, die der EMK der Schlüpfung des Induktionsmotors das Gleichgewicht hält. Somit kann der letzte bei jeder Schlüpfung leerlaufen. Bei Belastung kann ein Tourenabfall oder Tourenaussgleich durch Kompoundierung geschaffen werden.

Die Kaskadenschaltung ermöglicht auch einen übersynchronen Betrieb des Induktionsmotors, was bei schnelllaufenden, großen Motoren von besonderer Wichtigkeit ist, denn die maximal in einen Motor einzubauende Leistung ist von der Polzahl abhängig. Es bedarf einer besonderen Einrichtung, um das Aggregat, oder bei getrennter Anordnung den Hauptmotor, auf Übersynchronismus zu bringen, da bei dem synchronen Lauf keine EMK im Rotor induziert und folglich dem Kommutatormotor keine Energie zugeführt wird. Bei der mechanisch gekuppelten Schaltung kann man den Kommutatormotor für kurze Zeit direkt an das Netz schließen, um das Aggregat in den übersynchronen Bereich zu bringen. Bei der mechanisch getrennten Anordnung läßt sich dasselbe durch einen Periodenumformer (Patent Scherbius) erreichen.

Bei übersynchronem Lauf kehrt sich das Drehfeld und die Richtung der EMKe im Rotor des Induktionsmotors um. Dementsprechend muß die Richtung des Drehfeldes in dem Kommutatormotor durch Vertauschung zweier Phasen an den Schleifringen auch umgekehrt werden, damit das Drehmoment des Kommutatormotors im alten Sinne wirkt.

In der getrennten Schaltung muß die Hilfsgruppe vom Netz Leistung aufnehmen und sie dem übersynchron laufenden Hauptmotor zuführen.

Im folgenden werden wir das Verhalten der gebräuchlichsten Kommutatormotoren in der mechanisch gekuppelten und getrennten Kaskadenschaltung einzeln betrachten, und zwar sind diese Motoren:

1. der Drehfeld-Seriomotor (Görges-Motor),
2. der Drehfeld-Nebenschlußmotor,

3. die Scherbius-Motoren

- mit a) Serieerregung,
 b) Nebenschlußerregung,
 c) Kompounderregung.

Die experimentelle Untersuchung konnte nur mit den ersten zwei Motorarten durchgeführt werden, da nur Drehfeld-Kommutatormotoren zur Verfügung standen. Die direkt gespeisten Motoren sind zurzeit durch Patente geschützt und auch weniger bekannt, weshalb sie noch kein so allgemeines Interesse beanspruchen dürften.

4. Bezeichnungen.

- p_1 = Polpaarzahl des Hauptmotors (Induktionsmotor),
 p_2 = Polpaarzahl des Kommutatormotors,
 p_3 = Polpaarzahl des Hilfsgenerators,
 c_1 = primäre Periodenzahl,
 c_2 = sekundäre Periodenzahl,
 n_1 = synchrone Tourenzahl des Hauptmotors,
 n_2 = synchrone Tourenzahl des Kommutatormotors,
 n_3 = synchrone Tourenzahl des Hilfsgenerators,
 n = Tourenzahl des Hauptmotors,
 s_1 = Schlüpfung des Rotors des Hauptmotors,
 s_2 = Schlüpfung des Kommutatormotors seinem eigenen Drehfelde gegenüber,
 P_{1s}, E_{1s} = Spannung und EMK der Statorwicklung des Hauptmotors,
 P_{1r}, E_{1r} = Spannung und EMK der Rotorwicklung des Hauptmotors,
 E_{2s} = EMK der Statorwicklung des Kommutatormotors,
 P_{2r}, E_{2r} = Spannung und EMK des Rotors des Kommutatormotors,
 w_{1s}, w_{1r} = Windungszahl der Stator- bzw. Rotorwicklung des Induktionsmotors,
 w_{2s}, w_{2r} = Stator- bzw. Rotorwindungszahl des Kommutatormotors,
 f = mit dem entsprechenden Index der Wicklungsfaktor der betreffenden Wicklung,
 u = das Verhältnis der MMKe des Kommutatormotors,
 u_t = das Übersetzungsverhältnis des Reguliertransformators.

II. Der Drehfeld-Seriemotor in der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung.

5. Es gibt viele Betriebe, die Motoren mit Serie-Tourencharakteristik verlangen, d. h. bei steigender Belastung eine fallende Tourenzahl und so eine automatische Regelung der Leistung. Solche Anlagen sind z. B. die Förder- und Walzwerke. Bei anderen Betrieben, wie z. B. großen Bearbeitungsmaschinen, ist es von Wichtigkeit, daß der eingeschaltet bleibende Motor bei Entlastung nicht durchgeht. Für solche Betriebe und bei großen Einheiten ist die Kaskadenschaltung mit Seriemotor geboten. Der Seriemotor wird auf soviel Prozente der totalen Leistung und der Periodenzahl dimensioniert, wie der prozentuale Tourenabfall von der synchronen Tourenzahl beträgt.

Obwohl sich die Serieigenschaften des Aggregates auch in einem großen Anzugsmomente kundgeben, wird man davon Abstand nehmen, das Aggregat mittels des Seriemotors anzulassen. Bei Stillstand müßte sonst der Seriemotor den vollen Kurzschlußstrom bei der vollen Periodenzahl aufnehmen. Zweckmäßiger ist es, das Aggregat mit dem Induktionsmotor allein mittels Rotorwiderständen anzulassen und den Seriemotor erst bei Synchronismus zuzuschalten.

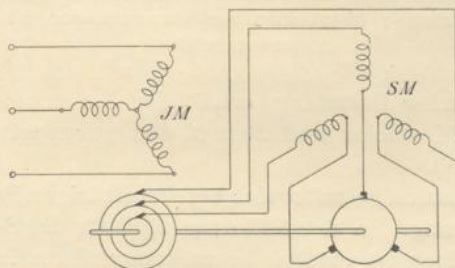


Fig. 1. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch gekuppelten Seriemotor bei offener Statorwicklung des letzteren.

Besitzt der Stator des Seriemotors eine aufgelöste Phasenwicklung, so erfolgt die Schaltung nach Fig. 1. Bei geschlossener Statorwicklung (Dreieck- oder geschlossene Gleichstromwicklung) schaltet man zwischen Stator und Rotor einen Seriortransformator. Dasselbe tut man, wenn man genötigt ist, dem Kommutator mit Rücksicht auf das Funken eine kleinere Spannung zuzuführen (Fig. 2).

Bei Stillstand des Aggregates wird im Rotor des Induktionsmotors eine EMK von der Netzperiodenzahl induziert und diese dem Seriomotor aufgedrückt. Sind die Bürsten aus der neutralen Zone verschoben (die den Zuführungspunkten der Statorwicklung entspricht), so erhält der Seriomotor ein Anlaufmoment. Mit wachsender Geschwindigkeit nehmen Spannung und Periodenzahl an den Schleifringen ab, bis der dem belastenden Drehmoment entsprechende stationäre Zustand oder bei Leerlauf eine nahe an n_1 liegende Tourenzahl erreicht wird. Hierbei sind Spannung und Periodenzahl an den Schleifringen gering, entsprechend der Leerlaufschlüpfung mit vermehrtem Rotorwiderstand.

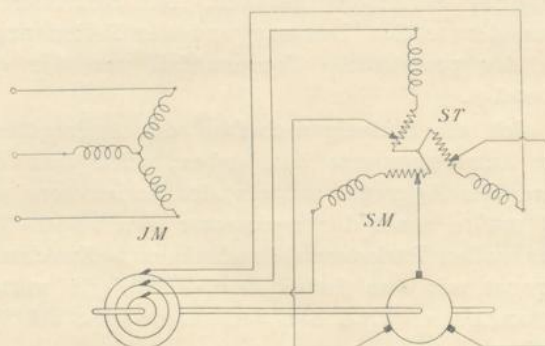


Fig. 2. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch gekoppelten Seriomotor über einen Serietransformator (als Autotransformator ausgeführt).

Mit wachsender Belastung erhält der Seriomotor mehr Strom, seine Gegen-EMK wächst und zwingt den gekoppelten Hauptmotor zum Tourenabfall.

Die Kommutation gestaltet sich bei der niedrigen Periodenzahl des Seriomotors günstig. In der Nähe von n_1 läuft der Seriomotor stark übersynchron, doch ist hierbei der zu kommutierende Strom gering.

Treiben wir die Rotoren übersynchron an, so kehrt sich die Richtung der EMKe aller Phasen im Rotor des Induktionmotors um und somit auch das Drehfeld im Seriomotor. Das Aggregat fängt an zu generieren, weil es gegen sein Drehmoment angetrieben wird.

6. Spannungs- und Stromdiagramm. Die MMKe im Seriomotor setzen sich räumlich unter dem Bürstenverschiebungswinkel ϱ zusammen¹⁾. Durch die Sättigung eines Serietransformators wird

¹⁾ S. Arnold, La Cour, Fraenckel: Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

dieser Winkel im Übersynchronismus etwas verkleinert, untersynchron vergrößert; auf diese Verhältnisse wollen wir später eingehen.

In der Rotorwicklung des Induktionsmotors wächst die EMK proportional der relativen Geschwindigkeit zwischen Drehfeld und Rotorwicklung. Nennen wir E'_{1s} die auf die Rotorwicklung reduzierte Stator-EMK, so ist

$$E_{1r} = s_1 E'_{1s} \dots \dots \dots (2)$$

Die Periodenzahl des Stromes in der Rotorwicklung des ersten und in der Statorwicklung des zweiten Motors ist

$$c_2 = \frac{p_1}{60} (n_1 - n) = s_1 c_1 \dots \dots \dots (3)$$

ebenfalls der primären Schlüpfung proportional.

Bezeichnet x_{2a} die totale Erregerreaktanz des Seriemotors (Reaktanz des Hauptkraftflusses) bei der Periodenzahl c_1 , so ist der Strom im Seriemotor bei Vernachlässigung aller Widerstände und Reaktanzen

$$J_2 = \frac{s_1 E'_{1s}}{s_1 x_{2a}} \dots \dots \dots (4)$$

ebenso groß, wie wenn der Seriemotor direkt an die Netzspannung und Netz-Periodenzahl angeschlossen wäre. Wir können also das bekannte Spannungsdiagramm des Seriemotors¹⁾ für Kaskadenschaltung desselben mit einem Induktionsmotor hier verwenden. In Fig. 3 ist es abgebildet.

$J_2 w_{2s}$ ist die MMK des Stators, $J_2 w_{2r}$ die des Rotors, sie setzen sich unter dem Bürstenwinkel ϱ zusammen und erzeugen den Hauptkraftfluß Φ , der wegen der Hysterese- und Eisenverluste der resultierenden MMK etwas nacheilt. Die Spannung E_{2s} , die zur Überwindung der im Stator induzierten EMK nötig ist, eilt dem Flusse um 90° (eine halbe Polteilung) vor. Die zeitliche

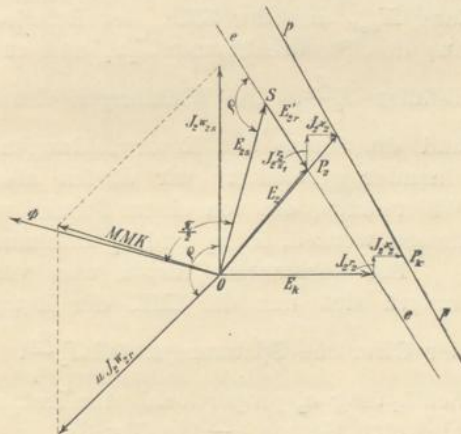


Fig. 3. Spannungsdiagramm der Kaskadenschaltung mit einem mechanisch gekuppelten Seriemotor.

¹⁾ Siehe Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

Phase des Stromes ist in der Stator- und Rotorwicklung natürlich dieselbe und fällt mit $J_2 w_{2s}$ zusammen.

Die in dem Rotor des Kommutatormotors induzierte EMK ist

$$E_{2r} = \frac{n_2 - n}{n_2} \cdot \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \cdot E_{2s} \dots \dots \dots (5)$$

oder auf Statorwindungszahl reduziert:

$$E_{2r}' = s_2 E_{2s} \dots \dots \dots (5')$$

Diese EMK eilt zeitlich der Stator-EMK um den Bürstenverschiebungswinkel ϱ vor; weil nämlich die Rotorphasen durch die Bürstenstellung gegen den Drehsinn des Drehfeldes zurückverschoben sind, erreicht in ihnen die EMK zeitlich früher ihr Maximum. Die Resultierende der EMKe ist E_2 .

Die Berücksichtigung der Spannungsabfälle infolge Widerstand und Streureaktanz erfolgt in analoger Weise wie bei dem Induktionsmotor¹⁾. Die Streureaktanzen sind auch der sekundären Periodenzahl, folglich nach Gl. 3 der primären Schlüpfung proportional. Sie werden also, wie die EMKe der Hauptfeld-Pulsation, durch Division mit s_1 auf die primäre Periodenzahl c_1 reduziert. Die Ohmschen Spannungsabfälle sind dagegen konstant, wenn sie also zwecks Reduktion ebenfalls durch s_1 dividiert werden, so ändern sie ihren Wert mit der Geschwindigkeit des Motors. Bei einer bestimmten Schlüpfung s_1 setzt sich also der Vektorenzug der Spannungen zusammen aus: der EMK der Hauptflußpulsation in der Statorwicklung E_{2s} , aus der EMK der Rotation in der Rotorwicklung E_{2r}' , aus den Streureaktanzen $J_2 x_2$ und aus den Ohmschen Spannungsabfällen $J_2 \frac{r_2}{s_1}$. Die Wicklungen des Rotors des Induktionsmotors und die Stator- und Rotorwicklungen des Seriemosors sind hintereinander geschaltet, wir dürfen also sämtliche Reaktanzen und Widerstände, die von einem Strom von der Periodenzahl c_2 durchflossen werden, in x_2 und r_2 zusammenfassen.

Bei konstantem Strom und veränderlicher Geschwindigkeit ändern sich nur die EMK der Rotation im Seriemosor E_{2r}' und der Ohmsche Spannungsabfall $J_2 \frac{r_2}{s_1}$. Nach Gl. 5' ist die erste der Schlüpfung s_2 proportional, der Endpunkt des Vektors E_2 beschreibt also eine Gerade $e-e$ (s. Fig. 3).

Zwischen der primären und sekundären Schlüpfung besteht die Beziehung

¹⁾ Siehe Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 1. Teil.

$$s_2 = \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{s_1 n_1 \frac{p_1}{p_2} - (1 - s_1) n_1}{s_1 n_1 \frac{p_1}{p_2}} = \frac{p_1 + p_2}{p_1} - \frac{1}{s_1} \cdot \frac{p_2}{p_1} \quad (6)$$

Abgesehen von dem konstanten Glied, ist die sekundäre Schlüpfung der primären umgekehrt proportional, folglich ändern sich beide Variablen: die EMK der Rotation und der Ohmsche Spannungsabfall der sekundären Schlüpfung proportional. Daraus folgt, daß der Endpunkt des Vektors P_2 , der Rotorspannung des Induktionsmotors, sich ebenfalls auf einer Geraden $p-p$ bewegen muß, weil die zwei Variablen des Vektorzuges demselben Parameter s_2 proportional sind.

Beim Stillstand müssen Strom und Spannung um 90° verschoben sein, weil keine Nutzleistung vorhanden ist, die EMK bei Stillstand, E_k muß also senkrecht auf $J_2 w_{2s}$ stehen. Durch geometrische Addition der Spannungsabfälle erhalten wir den „Kurzschlußpunkt“ P_k . Läuft der Rotor des Kommutatormotors synchron mit dem eigenen Drehfelde, dann ist die EMK der Rotation $E'_{2r} = 0$, das ist der Fall bei der Schlüpfung $s_2 = 0$, und der Tourenzahl

$$n = \frac{60 c_1}{p_1 + p_2} \dots \dots \dots (7)$$

die der synchronen Tourenzahl zweier in Kaskade geschalteten Induktionsmotoren (Punkt S in Fig. 3) entspricht.

Ändert sich die Spannung in einem Stromdiagramm bei konstantem Strom nach einer Gerade, so ist die Änderungskurve des Stromvektors bei konstanter Spannung ein Kreis¹⁾.

Unter der Spannung wird hier die EMK E'_{1s} verstanden, die selbst nicht konstant ist, vielmehr um $J'_1 z'_1$ von der Netzspannung verschieden, wobei z_1 die Impedanz der Statorwicklung des Induktionsmotors bedeutet. Die Korrektur wird in derselben Weise vorgenommen, wie es für den Induktionsmotor üblich ist²⁾. Man addiert zunächst geometrisch zum sekundären Strom den Magnetisierungsstrom des Induktionsmotors, inversiert den Kreis in bezug auf das neue Zentrum und addiert dann die primäre Statorimpedanz. Eine nochmalige Inversion ergibt dann den Kreis der Kaskadenschaltung. In Fig. 4 ist dieser Kreis mit K bezeichnet. Der Leerlaufpunkt träte ohne Reibungs- und Eisenverluste bei $s_1 = 0$ auf, tatsächlich aber bei einer größeren Schlüpfung. Der Kurzschluß-

1) Siehe Arnold, La Cour, Bragstad: Wechselstromtechnik, Bd. I.
 2) Siehe Arnold, La Cour, Fraenckel: Wechselstromtechnik, Bd. V, 1. Teil.

punkt ist der inverse Punkt zu P_k der Fig. 3. Durch die beiden geht, wie in allen Kreisdiagrammen¹⁾, die Linie der Nutzleistung $P_0 P_k$.

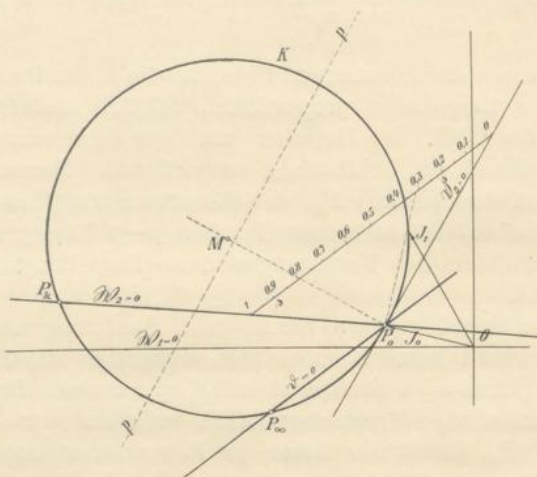


Fig. 4. Theoretisches Kreisdiagramm der mechanisch gekoppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Seriemo-
tor.

Die Ordinaten der Kreispunkte messen die primär zugeführte Leistung. Die Tourenzahl wird aus der Beziehung

$$s_1 = \frac{W_2}{W_1} \dots \dots \dots (8)$$

als Abschnitt auf einer Skala $s-s$ gefunden, die zur Drehmomentlinie parallel zwischen der Linie der Nutzleistung und der Linie der sekundären Verluste gezogen ist. Die Linie $B_2=0$ ist die Tangente im synchronen Punkt, unter der Annahme, daß alle sekundären Verluste dem Quadrate des Stromes proportional sind. Die Drehmomentlinie geht durch den synchronen Punkt und durch P_∞ , der einer unendlich großen Geschwindigkeit des Aggregates entspricht. Für diesen theoretischen Wert der primären Schlüpfung $s_1 = \infty$ wird die sekundäre Schlüpfung nach Gl. 6

$$s_2 = \frac{p_1 + p_2}{p_1} \dots \dots \dots (9)$$

woraus die Lage von P_∞ im Spannungsdiagramm aufgefunden werden kann.

Bei der Ableitung des Kreisdiagramms wurden nur die Stromwärmeverluste berücksichtigt. Die Einführung der Eisenverluste im

¹⁾ Siehe Arnold, La Cour, Bragstad: Wechselstromtechnik, Bd. I.

Stator des Induktionsmotors und der Reibungsverluste beider Maschinen verlangt nur ein Verschieben des Koordinaten-Anfangspunktes um den Wattstrom der Verlustleistung, die konstant angenommen wird. Obwohl bei veränderlicher Geschwindigkeit weder die Reibungs- noch die Eisenverluste konstant sind, dürfen wir diese Vereinfachung eintreten lassen, weil das Diagramm der Änderung der Sättigung sowieso keine Rechnung trägt.

Zwei andere Verluste beeinflussen aber das Verhalten des Aggregates ganz wesentlich, und zwar sind diese die Eisenverluste im Rotor des Kommutatormotors und die Verluste in den kurzgeschlossenen Spulen.

Die Periodenzahl der Ummagnetisierungen im Rotor des Hilfsmotors ist

$$c_3 = s_2 c_2 = s_1 s_2 c_1 = \frac{s_1(p_1 + p_2) - p_2}{p_1} \cdot c_1 \quad \dots (10)$$

die für den Synchronismus $s_1 = 0$ den Grenzwert

$$c_3 = -\frac{p_2}{p_1} \cdot c_1 \quad \dots \dots \dots (10')$$

erhält, also sind die der Periodenzahl ungefähr quadratisch proportionalen Eisenverluste im Gegensatz zum Rotor eines Induktionsmotors beim Synchronismus am größten.

Die Kurzschlußverluste können wir schreiben¹⁾

$$W_k = \frac{\Delta e^2}{R_v} = \frac{\left(s_2 k \cdot \frac{N}{2K} \cdot \Phi\right)^2}{R_v} \quad \dots \dots \dots (11)$$

worin Δe = die in der kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK,
 R_v = den effektiven Widerstand eines kurzgeschlossenen Kreises,

- N = die Zahl der Rotorleiter,
- K = die Zahl der Lamellen,
- Φ = den Kraftfluß des Kommutatormotors,
- k = einen Proportionalitäts-Faktor

bedeuten.

Tragen wir die Schlüpfung des Kommutatormotors s_2 in Funktion der primären Schlüpfung s_1 auf (Fig. 5), so sehen wir, daß in der Nähe des Synchronismus s_2 sehr groß und die mit ihr quadratisch wachsenden Kurzschlußverluste auch am größten sind.

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

Diese zwei Verluste bremsen das Aggregat in der Nähe des Synchronismus, sobald Strom und Feld im Kommutatormotor ge-

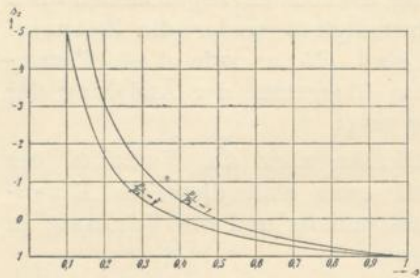


Fig. 5. Zusammenhang zwischen der Schlüpfung des Induktionsmotors (s_1) und der des Kommutators (s_2) bei verschiedenem Polverhältnis und fester Kupplung.

Wenn bei Belastung die Tourenzahl des Aggregates fällt, so nehmen die bremsenden Verluste nach Maßgabe der Gl. 10 u. 11 ab, die EMK des Seriemosors und folglich sein Drehmoment nehmen zu, bis bei einem zweiten stationären Leerlaufzustande die Verluste vom Seriemosor selbst gedeckt werden. Erst von hier ab zeigt das Aggregat Serieigenschaften.

Die Kaskadenschaltung mit mechanisch gekuppeltem Seriemosor besitzt also zwei Leerlauf-tourenzahlen. Die obere ist in der Nähe des Synchronismus des Induktionsmotors ($s_1 \approx 0$), wo das Feld des Seriemosors sehr schwach, folglich seine Verluste gering sind; auf diese Leerlauf-tourenzahl kann es gebracht werden, wenn man zuerst den Induktionsmotor allein mittels Rotorwiderständen anläßt. Entlastet man dagegen ein vorher belastetes Aggregat, so läuft es nur bis zu der unteren Leerlauf-tourenzahl hinauf; dieser entspricht dem wirklichen Leerlaufzustande des Seriemosors.

Im Stromdiagramm zeigt sich dieses Verhalten durch das Zutreten eines zweiten kleinen Kreises, der das zwischen den beiden Leerlaufpunkten liegende Arbeitsgebiet darstellt. Dieser Kreis kann, so wie das bekannte Diagramm des Induktionsmotors durch Inversion der in Serie geschalteten Impedanzen gefunden werden¹⁾. Die Tourenzahl des unteren Leerlaufpunktes kann aus den Verlusten ausgerechnet werden. Der kleine Kreis bildet mit dem vorhin abgeleiteten Kreisdiagramm der Kaskadenschaltung Fig. 4 eine Schleife. Eine solche ist in Fig. 6 dargestellt, die eingezeichneten Punkte sind experimentell durch Bremsung, bzw. in den labilen Gebieten durch gleichzeitiges Bremsen und Antrieb eines im Nachfolgenden beschriebenen Aggregates erhalten.

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 1. Teil.

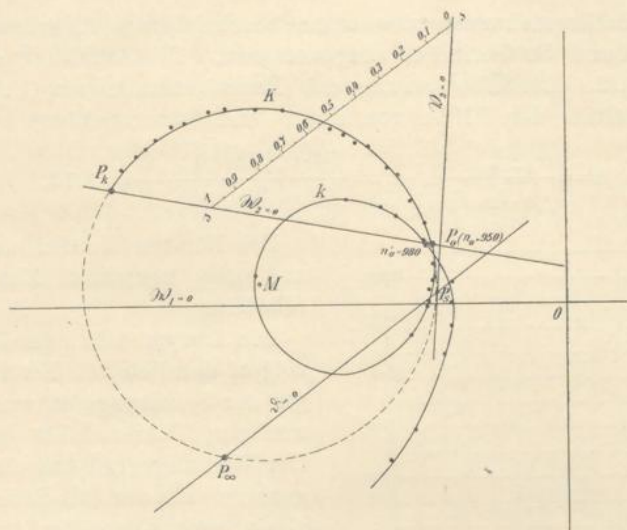


Fig. 6. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit mechanisch gekoppeltem Seriemotor.

7. Arbeitskurven. Für diese und die im folgenden zu beschreibenden Versuche wurde ein Kaskadenaggregat verwendet, das aus folgenden Motoren zusammengestellt war. Als Hauptmotor diente ein sechspoliger Induktionsmotor mit Schleifringen, 5 PS Normalleistung. Die Rotorwindungszahl war im Verhältnis 1 : 0,7 größer als die Statorwindungszahl, damit die Spannung des zweiten Motors bei kleinen Schlüpfungen nicht zu gering wird. Als Hilfsmotor diente ein vierpoliger Dreiphasen-Kommutatormotor der A. E. G. nach den Patenten von Winter und Eichberg. Dieser konnte als Serie- oder Nebenschlußmotor geschaltet werden. Für den ersten Zweck war ein Autotransformator mit Anzapfungen beigegeben, zum Gebrauch als Nebenschlußmotor ist die Statorwicklung (normale Dreiphasen-Sternwicklung) angezapft. Der Stator besitzt 3×72 Windungen in 36 Nuten, von denen 30 Windungen durch 5 Anzapfungen in gleichen Gruppen abschaltbar sind. Der Kollektor hat 111 Lamellen. Der Rotor besitzt 37 Nuten, 2 Windungen pro Lamelle und Reihenwicklung.

Die Schaltung erfolgte nach Fig. 1 für die Aufnahme des Diagramms. Die konstante Periodenzahl war $c_1 = 50$, die primäre Spannung im normalen Arbeitsgebiet 120 Volt. Bei größeren Strömen (in der Nähe des Kurzschlußpunktes) wurde eine kleinere Spannung gewählt, Strom und Leistung auf 120 Volt umgerechnet.

Zur Darstellung der Arbeitsweise der Schaltung sind in der

Fig. 7 die Bremskurven des oben beschriebenen Aggregates bei 120 Volt und 50 Perioden aufgenommen. Die Schaltung erfolgte nach Fig. 2. Die Übersetzung des Transformators war 1:2, also das Verhältnis der MMKe von Rotor- und Statorwicklung

$$u = \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_t = \frac{74 \cdot 0,828}{66 \cdot 0,96} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2}{1} = 1,12.$$

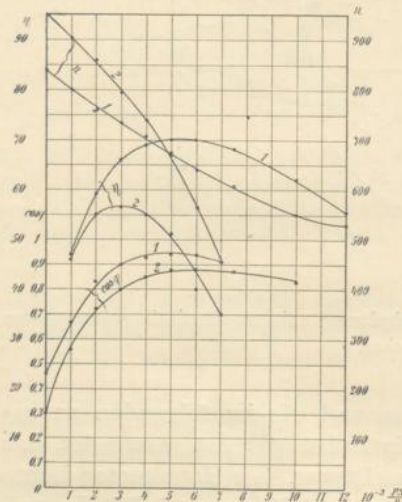


Fig. 7. Arbeitskurven der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Seriomotor (1) und Bremskurven bei Widerstandsregelung mittels Rotorwiderstände (2).

renabfall, die schnelle Abnahme des Wirkungsgrades und ein schlechterer Leistungsfaktor.

8. Einfluß von Bürstenverstellung und Transformatorübersetzung. Das Spannungsdiagramm (Fig. 3) läßt den Einfluß der Bürstenstellung auf Tourenabfall und Leistungsfaktor des Seriomotors erkennen¹⁾, denn je kleiner der Winkel ϱ , desto größer wird der Fluß und folglich der Tourenabfall stärker (dieses Verhalten ist allen Seriomotoren gemeinsam).

Der Leistungsfaktor wird für dieselbe Übersetzung der MMKe, falls sie kleiner ist als die Einheit, mit wachsendem Winkel besser. Will man den Magnetisierungsstrom des Induktionsmotors auch kompensieren, und zwar bei Untersynchronismus, wo die Gegen-EMK

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

Die Bürsten wurden um 165° aus der neutralen Zone verschoben.

Die Kurven mit dem Index 1 zeigen deutlich den Seriecharakter der Schaltung; es wurde ein mäßiger Tourenabfall gewählt. Der Wirkungsgrad war nicht viel geringer als der des Seriomotors allein, wenn dieser direkt am Netz angeschlossen war ($\eta_s = 71\%$). Der Leistungsfaktor kann mit Leichtigkeit und ohne wesentliche Verschlechterung des Wirkungsgrades verbessert werden. Zum Vergleiche der Regelungsmethoden sind in dieselbe Figur die Arbeitskurven für den Fall eingezeichnet (2), wenn der Induktionsmotor mittels Rotorwiderständen geregelt wird. Das Charakteristische ist der starke Tourenabfall, die schnelle Abnahme des Wirkungsgrades und ein schlechterer Leistungsfaktor.

der Rotorspannung beinahe entgegengerichtet ist, so muß der Seriemotor stark überkompensiert werden. Das ist aber nur für $u > 1$ möglich, wie man aus dem Diagramm der MMKe in Fig. 3 unmittelbar einsieht.

In Fig. 8 sind Tourenabfall und Leistungsfaktor desselben Aggregates bei der Übersetzung $u=1,55$ für drei verschiedene Bürstenstellungen gemessen. Bei großen Bürstenverschiebungen, wo

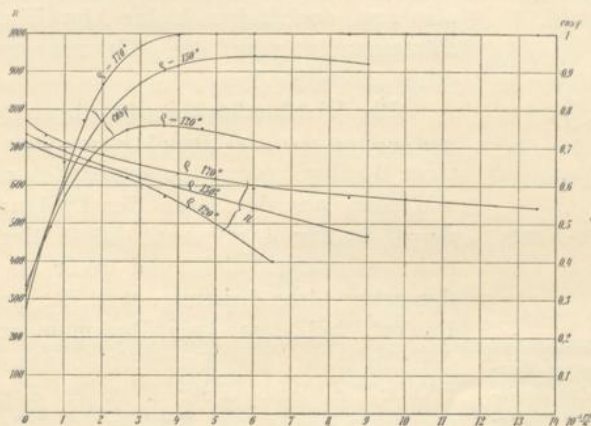


Fig. 8. Einfluß der Bürstenstellung auf Tourenabfall und Leistungsfaktor bei der mechanisch gekuppelten Kaskade mit Seriemotor.

die magnetischen Achsen der Stator- und Rotorwicklung beinahe entgegengerichtet sind, ist der Winkel zwischen Fluß- und Rotor-MMK klein, die EMK im Stator des Seriemotors ist dann hinter dem Strom so stark verspätet, daß der Induktionsmotor mit dem vor-eilenden Strom des Seriemotors magnetisiert wird und nur wenig Magnetisierungsstrom vom Netz aufnimmt. Der Leistungsfaktor ist gut, bei 170° und $1/4$ Last = 1. Der Tourenabfall ist bei diesem schwachen Fluß gering. Bei $\alpha = 120^\circ$ unterstützen sich die MMKe der Wicklungen besser, der Fluß und der von ihm hervorgerufene Tourenabfall sind größer, dagegen der Leistungsfaktor schlecht, weil die EMK des Seriemotors bei diesem Winkel dem Strome nicht voreilen kann.

Der Wirkungsgrad des Seriemotors ist am besten, wenn Fluß und sekundäre MMK um eine halbe Polteilung entfernt aufeinander folgen, da das Drehmoment eines Seriemotors

$$\vartheta = \Phi \cdot J_2 \cdot w_{2r} \cdot \cos \psi_{2r} \dots \dots \dots (12)$$

ist, wobei ψ_{2r} der räumliche Winkel zwischen Feldmaximum und

Strommaximum des Rotors bedeutet¹⁾. Diese Bedingung kann nur für eine Übersetzung der MMKe, die kleiner als die Einheit ist, eingehalten werden, denn aus dem rechtwinkligen Dreieck der MMKe in Fig. 9 ist

$$u = \frac{MMK_2}{MMK_1} = -\cos \varrho \dots \dots (13)$$

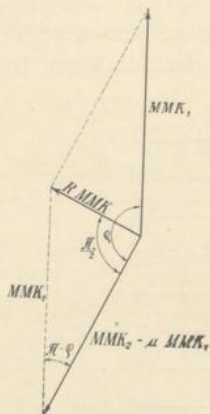


Fig. 9. Diagramm der MMKe für besten Wirkungsgrad des Seriennotors; der Rotorstrom eilt dem Flusse um $\frac{\pi}{2}$ nach.

stets kleiner als 1. Eine gute Kompensation und maximaler Wirkungsgrad schließen sich also aus, doch haben kleine Abweichungen der Bürstenstellung auf den Wirkungsgrad keinen erheblichen Einfluß.

Die Überlastbarkeit des Aggregates wird gegenüber der des Induktionsmotors bei richtiger Wahl von u und ϱ wesentlich vergrößert, wie man aus der Lage der Drehmomentlinie $\vartheta = 0$ in Fig. 4 erkennt. Diese liegt für Induktionsmotoren nicht viel tiefer als die Linie der sekundären Leistung, weil der „unendliche Punkt“, bei dem kein Drehmoment besteht, die Ordinate des Kurzschlußpunktes P_k ungefähr halbiert. Hier liegt er dagegen im negativen Teile des Kreises, da für $s_1 = \infty$ nach Gl. 5' und 6:9

$$E_{2r}' = \frac{p_1 + p_2}{p_1} \cdot E_{2s} \text{ ist} \dots (14)$$

Je größer das Verhältnis $\frac{p_2}{p_1}$ ist, je tiefer also der Punkt P_∞ liegt, desto größer ist die Überlastbarkeit des Aggregates. Dies Verhalten ist leicht erklärlich, denn je tiefer der Synchronismus des Hilfsmotors liegt, desto stärker zieht er den untersynchron laufenden Hauptmotor mit.

9. Übersynchroner Betrieb. Ein solcher ist nur unter den in der Einleitung (S. 5) angegebenen Bedingungen richtig, nämlich durch Umkehrung des Drehfeldes im Kommutatormotor. Andernfalls dreht sich der Hilfsmotor gegen sein Drehmoment, wirkt also als eine Bremse, die das ganze Aggregat verzögert, dadurch eine ebenfalls fallende Tourencharakteristik gibt, verkleinert aber zugleich das Drehmoment und vergrößert die Verluste.

Legt man die Klemmen des Seriennotors, nachdem das Aggregat durch den Induktionsmotor auf Synchronismus gebracht ist, anstatt an die Schleifringe direkt an die Netzklemmen (Fig. 1), so

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

beschleunigt der Seriemotor schnell das Aggregat über den Synchronismus hinaus. Schaltet man den Seriemotor nun wieder an die Schleifringe, nachdem man zwei Kabel vertauscht hat, so beschleunigt sich das Aggregat so weit, als die vermehrten Verluste und die Sättigung des Serietransformators (siehe S. 20) die Tourenzahl begrenzen. Der Induktionsmotor arbeitet teils als Motor, teils als Generator, indem er eine der negativen Schlüpfung $-s_1$ proportionale elektrische Leistung dem Seriemotor abgibt, der sie mechanisch nutzbar macht. Daß der Induktionsmotor übersynchron als Motor arbeiten kann, erklärt sich dadurch, daß wir die Richtung der EMKe durch Vertauschung der Phasen an den Schleifringen im Seriemotor künstlich umgekehrt haben.

Der Synchronismus des Aggregates liegt, wie bei der Danielsonschen Gegenschaltung zweier Induktionsmaschinen, bei einer Tourenzahl

$$n = \frac{60 c_1}{p_1 - p_2} \dots \dots \dots (15)$$

die der Differenz der Polpaarzahlen entspricht¹⁾. Haben z. B. beide Maschinen gleiche Polzahlen, so läuft der Hilfsmotor ständig übersynchron, weil die synchrone Tourenzahl seines Drehfeldes nie erreicht werden kann. Soll das Aggregat auch für untersynchronen Betrieb dienen, so darf die Differenz der Polzahlen nicht zu groß sein, da der Kommutatormotor mit Rücksicht auf die Kommutation tunlichst in der Nähe seines Synchronismus arbeiten soll. In diesem Falle läuft er im Übersynchronismus des Hauptmotors auch stark übersynchron relativ zum eigenen Drehfelde, weil der Synchronismus nach Gl. 15 hoch liegt.

In Fig. 10 ist das Spannungsdiagramm des übersynchron laufenden Aggregates dargestellt, die Richtung der EMK im Rotor des Kommutatormotors ist der des Stators entgegengerichtet, wenn der Seriemotor — normalerweise — übersynchron läuft. Bei Belastung ist ein Abfallen der Tourenzahl mit einer Zunahme der (negativen) sekundären Schlüpfung s_2 verbunden, im Gegensatz zum untersynchronen Betrieb. Der Zusammenhang zwischen den Schlüpfungen beider Maschinen im Übersynchronismus des Hauptmotors ist

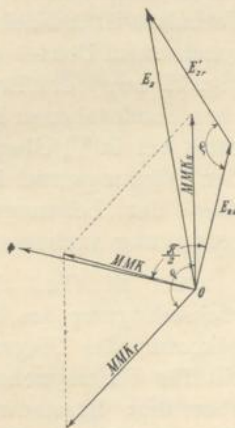


Fig. 10. Vektordiagramm für Übersynchronismus des Hauptmotors in Kaskade mit einem mechanisch gekoppelten Seriemotor.

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 1. Teil.

nach Gl. 6 für negative s_1 ausgerechnet und in Fig. 11 für verschiedene Polverhältnisse aufgetragen.

Das Aggregat darf im allgemeinen mit Rücksicht auf die Verluste nicht stark übersynchron laufen. Aus Fig. 11 ersieht man, daß

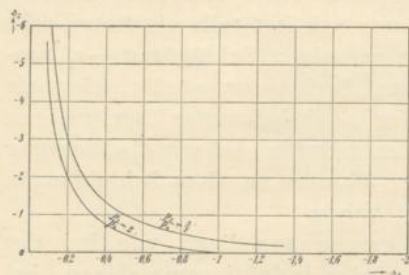


Fig. 11. Zusammenhang der Schlüpfungen des Induktions- und Seriemosors im Übersynchronismus des Hauptmotors bei mechanisch gekuppelter Anordnung.

die sekundäre Schlüpfung mit abnehmender Tourenzahl schnell zunimmt, womit eine Zunahme der Gegen-EMK des Seriemosors verbunden ist. Folglich ist der Tourenabfall steil und die Überlastbarkeit gering. Dieses Verhalten ist ähnlich, wie bei unter-synchronem Betrieb des Seriemosors. Fig. 12 zeigt die Bremskurven des oben beschriebenen Kaskadenaggregates bei 50% Übersynchronismus.

Der Wirkungsgrad ist wegen der großen Kommutationsverluste gering, der Leistungsfaktor könnte durch eine größere Bürstenverstellung verbessert werden.

10. Einfluß der Transformatorsättigung¹⁾. Unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes des Serietransformators bekommt das Diagramm die in Fig. 13 dargestellte Form. Dieses gilt für Untersynchronismus, der Winkel φ' der MMKe wird gegenüber dem Bürstenwinkel φ vergrößert. Da der Winkel zwischen Fluß und Rotorstrom auch vergrößert wird, erhöht die Transformatorsättigung im Untersynchronismus das Drehmoment. Für Übersynchronismus gilt das Gegenteil.

¹⁾ Siehe auch Dreyfus und Hillebrand: Elektrotechnik u. Maschinenbau, Wien 1910, Heft 18.

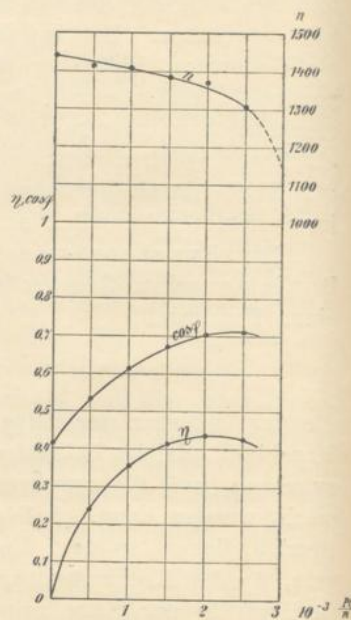


Fig. 12. Arbeitskurven der Kaskadenschaltung mit mechanisch gekuppeltem Seriemosor im Übersynchronismus des Induktionsmotors.

Der

läu
dur
fo
lau
der
lieg
und
Übe
tigt
ges
Än
änd
Ser
We
wir

zah
sätt
Rea
duk

Fig.
Seri
und

In der Nähe der synchronen Tourenzahl des Hauptmotors läuft der Seriemotor stark übersynchron, sein Drehmoment wird durch die Sättigung des Transformators verkleinert und die Leerlauf-tourenzahl kommt bei steigender Sättigung immer niedriger zu liegen. In Fig. 14 sind Tourenzahl und Leistungsfaktor für dieselbe Übersetzung und verschiedene Sättigungen des Transformators dargestellt. Die Sättigung wurde durch Änderung der Windungszahlen geändert. Beim Synchronismus des Seriemotors zeigen die Kurven Wendepunkte; der Bürstenwinkel wird in anderen Sinne beeinflusst.

Bei der oberen Leerlauf-tourenzahl (S. 14) bildet der noch ungesättigte Transformator eine große Reaktanz. Deshalb ist der Kreis, der dem Arbeitsbereiche als Induktionsmotor entspricht, trotz des größeren Tourenunterschiedes zwischen den beiden Leerlauf-tourenzahlen kleiner. Fig. 15 zeigt eine experimentell aufgenommene Schleife bei gesättigtem Stromtransformator.

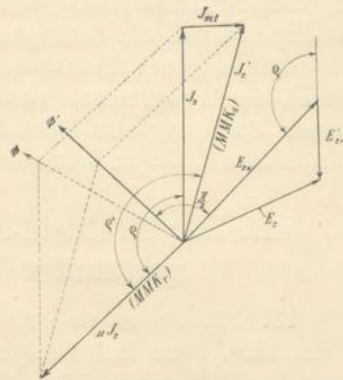


Fig. 13. MMK-Diagramm der Kaskadenschaltung mit Seriemotor unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes des Serietransformators.

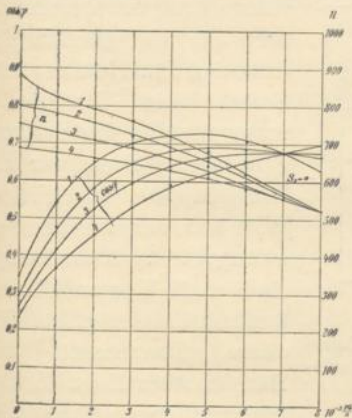


Fig. 14. Einfluß der Sättigung des Serietransformators auf Tourenzahl und Leistungsfaktor der Kaskadenschaltung.

- 1) $u_t = \frac{36}{24}$, 2) $u_t = \frac{24}{16}$,
- 3) $u_t = \frac{18}{12}$, 4) $u_t = \frac{12}{8}$

(stärkste Sättigung.)

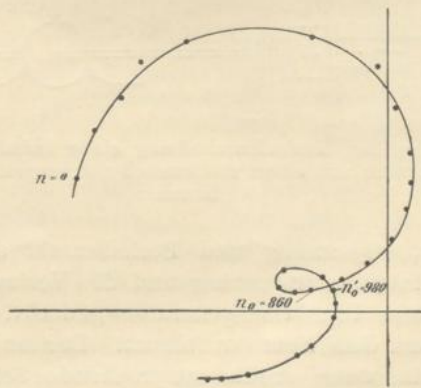


Fig. 15. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit Seriemotor bei gesättigtem Serietransformator.

Im übersynchronen Betrieb kommt die Sättigung des Transformators dem Aggregat insofern zugute, daß sie ein Zurückfallen in den Synchronismus verhütet. Bei abnehmender Tourenzahl wächst nämlich die Schlüpfung s_2 (siehe Fig. 11) und damit auch die Sättigung des Transformators, die totale Reaktanz nimmt ab. Durch die Experimente wurde auch bestätigt, daß unter einer gewissen Sättigung des Transformators das Aggregat im Übersynchronismus nicht zu halten war.

III. Der Drehfeld-Seriemotor in mechanisch getrennter Kaskadenschaltung.

11. Mit einem mechanisch getrennt geschalteten Seriemotor kann man dem Induktionsmotor ebenfalls eine fallende Tourencharakteristik geben. Der Rotorstrom durchfließt die Wicklungen des Seriemotors (siehe Fig. 16). Da das Feld des letzteren bei Belastung stärker wird und die Gegen-EMK wächst, so muß der Hauptmotor dementsprechend stark schlüpfen. Dabei muß der Seriemotor die Hilfsgruppe mit konstanter, sogar mit etwas steigender Tourenzahl antreiben,

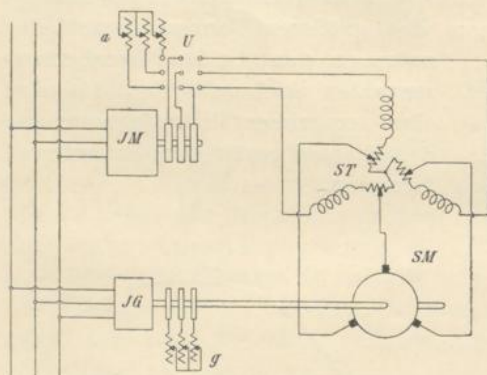


Fig. 16. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch getrennten Seriemotor.

damit der Induktionsgenerator (Asynchrongenerator) JG die geschlüpfte Leistung dem Netz zurückliefern kann. Den Seriemotor und den Induktionsgenerator wollen wir als Hilfsgruppe bezeichnen. Wie bei der mechanisch gekoppelten Anordnung, sind auch hier zwei Leerlaufzustände möglich. Die obere Tourenzahl des Hauptmotors liegt in der unmittelbaren Nähe von n_1 , Spannung und Periodenzahl sind an den Schleifringen des Hauptmotors gering und die Verluste der Hilfsgruppe werden von dem Induktionsgenerator gedeckt, indem dieser Leistung direkt aus dem Netze aufnimmt. Der andere Leerlaufzustand tritt dann ein, wenn durch entsprechende Schlüpfung des Hauptmotors die sekundäre Spannung und das Drehmoment des Seriemotors ausreichen, die Verluste der Hilfsgruppe bis auf die Statorverluste des Induktionsgenerators zu decken.

Fig. 16 zeigt die Schaltung der Anlage. Der Hauptmotor JM und der Induktionsgenerator JG werden mittels der Rotorwiderstände a und g auf Synchronismus gebracht, worauf der Umschalter U umgelegt wird und die Motoren in Kaskade geschaltet werden.

12. Spannungs- und Stromdiagramm, Arbeitskurven. Das Spannungsdiagramm ist qualitativ dasselbe wie für die direkt gekuppelte Schaltung (Fig. 3), der Zusammenhang zwischen den Schlüpfungen ist aber hierbei

$$s_2 = \frac{n_2 - n_3}{n_2} = 1 - \frac{1}{s_1} \frac{p_2}{p_3} \dots \dots \dots (16)$$

folglich die in der Rotorwicklung des Kommutatormotors induzierte EMK

$$E_{2r} = \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \left(1 - \frac{1}{s_1} \frac{p_2}{p_3} \right) E_{2s} \dots \dots (17)$$

Der Verlauf von s_2 nach Gl. 16 ist in Fig. 17 für verschiedene Polzahlen dargestellt. Ein Vergleich mit Fig. 5 zeigt, daß die Schlüpfung des Kommutatormotors bei demselben Polverhältnis der Gruppe langsamer wächst als bei der direkten Kupplung. Aus diesem

Grunde ist die Kompensation der Phasenverschiebung, bei gleichem Tourenabfall, in der mechanisch getrennten Anordnung schlechter, weil die Rotor-EMK E_{2r}' und damit die ganze Gegen-EMK E_2 (s. Fig. 3) kleiner sind, als bei gekoppelten Motoren, der Strom J_2 eilt also weniger vor. Weiter kommt noch der Leerlaufstrom des Induktionsgenerators hinzu, so daß der Leistungsfaktor nur auf Kosten einer großen Rotor-MMK in Verbindung mit einem großen Bürstenwinkel ($\alpha \lesssim 180^\circ$) zu erreichen ist. Der wattlose Strom des Rotors verursacht unter den Bürsten große Verluste, so daß der Wirkungsgrad erheblich sinkt.

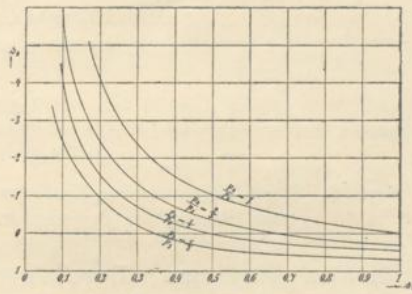


Fig. 17. Zusammenhang der Schlüpfung in dem Induktions- und Kommutatormotor bei mechanisch getrennter Anordnung.

Im Untersynchronismus des Kommutatormotors ist die Kompensation praktisch nicht mehr durchzuführen, weil die EMK E_{2r}' (Fig. 3) ihre Richtung umkehrt und die Phase des sekundären Stromes verzögert.

Für die mechanisch getrennte Schaltung gilt dasselbe Stromdiagramm, Fig. 4, wie für die gekuppelte. Unter Berücksichtigung

der zweierlei Leerlaufzustände, bekommen wir hier auch zwei Kreise, die sich zu einer Schleife zusammensetzen.

Fig. 18 zeigt eine experimentell aufgenommene Schleife. Die Punkte zwischen den beiden Leerlauf Tourenzahlen n_0 und n_0' sind zum größten Teile labil. Als Hauptmotor diente ein vierpoliger 5 PS Induktionsmotor, geregelt mit dem auf S. 15 beschriebenen Kaskadenaggregat. Leistungs- und Drehmomentlinie können nach Fig. 4 ergänzt werden. Die Drehmomentlinie liegt ungünstiger, als bei der mechanisch gekuppelten Anordnung, weil die geschlüpfte Leistung für die Hauptwelle verloren geht (s. S. 4). Aus dem Diagramm geht dies hervor für $s_1 = \infty$, wozu $s_2 = 1$ gehört. Der Punkt P_∞ liegt also unabhängig von den Polzahlen zwischen dem Schnittpunkte A des Stromkreises mit der Abszissenachse und dem Kurzschlußpunkt P_k . Das Verhältnis der Ordinaten von P_∞ und P_k ist $\frac{r_1}{r_2' + r_1}$.

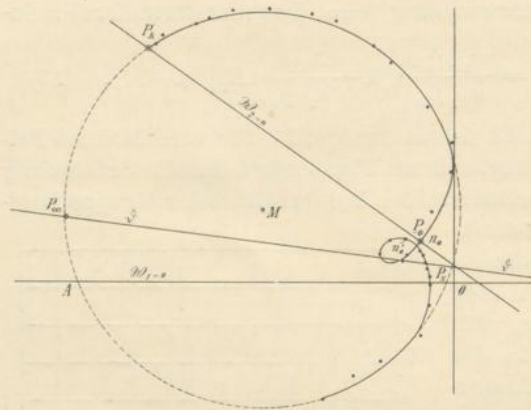


Fig. 18. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit getrenntem Seriemoor.

Das abgeleitete Stromdiagramm gilt nur für den Hauptmotor, ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrades und des Leerlaufstromes des Induktionsgenerators. Durch geometrische Addition des letzten und Verschiebung des Nullpunktes entsprechend den Verlusten des Generators läßt sich das Diagramm annähernd ergänzen. Will man die Ströme genau ermitteln, so muß zu jeder geschlüpfte Leistung aus dem bekannten Kreisdiagramm des Induktionsgenerators der zugehörige Strom und Wirkungsgrad ermittelt werden.

In Fig. 19 sind die Bremskurven eines sechspoligen 20 PS Induktionsmotors bei 125 V. 50 Per. dargestellt. Zur Regelung diente der obenerwähnte 5 PS Kommutatormotor, gekuppelt mit einem 5 PS Induktionsgenerator. Der letzte hatte 6 Pole, folglich ist $n_3 = 1000$. In der Figur sind die Arbeitskurven verglichen mit denen bei Widerstandsregelung; 1 und 2 für Kaskadenschaltung, 1' und 2' für Widerstandsregelung. Die Bürstenstellung und die Transformatorübersetzung wurden so gewählt, daß bei der Bremsung 1 der Tourenabfall klein, die Kompensation gut, bei der Bremsung 2

D
ein
wir
so
sinc
Fig.
getr
Pha
gra
ver
bei
daß
mel
Leis
Mot
stel
Ser
Rot

ein großer Tourenabfall und möglichst guter Wirkungsgrad erzielt wird. Bei den Bremsungen 1' und 2' sind die Rotorwiderstände so bemessen, daß die Tourenzahl bei ungefähr Halblast dieselben sind. Man ersieht zweierlei aus den Kurven:

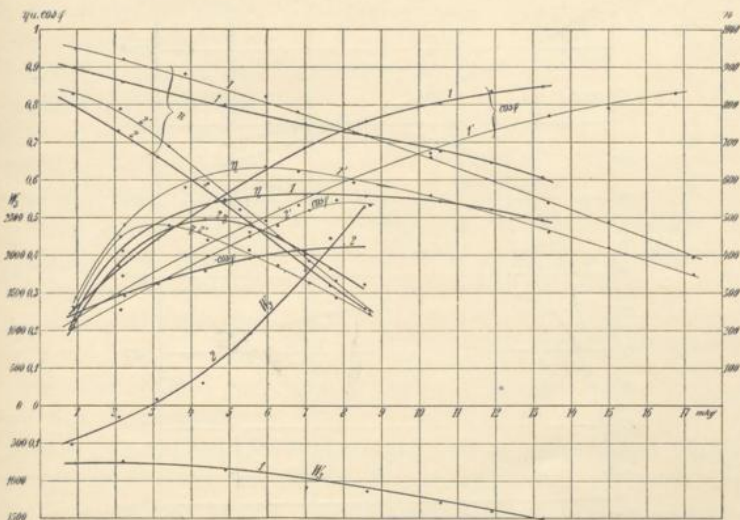


Fig. 19. Bremskurven eines Induktionsmotors, der einmal mittels mechanisch getrennten Seriemotor (1 und 2), einmal mittels Rotorwiderständen geregelt wurde (1' und 2').

1. durch einen mechanisch getrennten Seriemotor kann die Phasenkompensation nur auf Kosten eines verminderten Wirkungsgrades durchgeführt werden,
 2. der Wirkungsgrad kann nur auf Kosten des Leistungsfaktors verbessert werden,
- beides im Vergleich mit der Regelung mittels Rotorwiderstände.

Im ersten Falle ist nämlich die geschlüpfte Leistung so klein, daß sie nicht ausreicht, die durch die wattlosen Rotorströme vermehrten Verluste der Hilfsgruppe zu decken, die zurückgepumpte Leistung W_3 bleibt negativ. Der Induktionsgenerator nimmt als Motor Leistung vom Netz auf. Im zweiten Falle ist die Bürststellung nicht ausreichend, eine gute Kompensation zu erzielen.

Die Regelung eines Induktionsmotors mit mechanisch getrenntem Seriemotor ist also in den meisten Fällen der Regelung mittels Rotorwiderständen kaum überlegen. Mit einem relativ großen Hilfs-

motor gelingt es erst, eine gute Kompensation zu erzielen, wie die Bremsung eines 5 PS Hauptmotors mittels des 5 PS-Kommutatormotors in Fig. 20 zeigt.

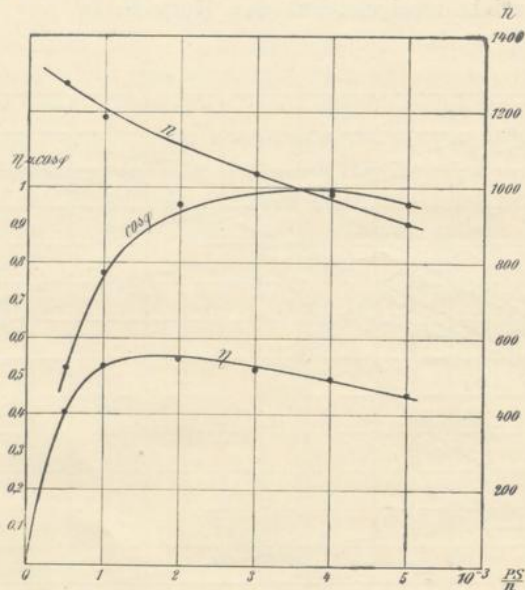


Fig. 20. Arbeitskurven der mechanisch getrennten Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem gleich großen Seriomotor.

IV. Der Drehfeld-Nebenschlußmotor in mechanisch gekuppelter Kaskadenschaltung.

13. Die Industrie verlangt meistens Motoren mit Nebenschlußcharakteristik, d. h. Motoren, die bei jeder Belastung mit annähernd konstanter Tourenzahl laufen. Dabei soll diese konstante Tourenzahl regelbar, d. h. für Leerlauf beliebig einstellbar sein.

Die Induktionsmotoren haben zwar eine Nebenschlußcharakteristik, aber nur in der Nähe ihrer synchronen Geschwindigkeit; bei Leerlauf kann man nicht mittels Rotorwiderstände verschiedene Tourenzahlen herstellen. Für Betriebe, wie z. B. Gruben-Ventilatorantriebe, deren Wettermenge und damit die Tourenzahl nur in großen Zeitintervallen zu verändern ist, ist es von großer Wichtigkeit, eine konstante, jedoch beliebig einstellbare Tourenzahl zu haben. Diese Art von Regelung wird durch die Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem dreiphasigen Nebenschlußmotor sehr vorteilhaft erreicht.

Fig. 21 veranschaulicht die Schaltung der Anlage. Der Stator des Nebenschlußmotors *NM* ist wie der eines gewöhnlichen Induktionsmotors gewickelt, der Rotor besitzt normale Gleichstromwicklung und einen Kommutator.

Als Gegenspannung wird dem Rotor die transformierte Spannung der Schleifringe zugeführt, statt des Transformators *T* kann auch die angezapfte Statorwicklung die Spannung transformieren. Durch entsprechende Einstellung der Gegenspannung des Rotors erreicht man bei irgendeiner Tourenzahl *n*, daß die induzierte EMK im Rotor des Hauptmotors durch die Gegen-EMK des Kommutatormotors aufgehoben wird, das Aggregat läuft dann bei dieser Tourenzahl stabil. Gegenüber der Kaskadenschaltung zweier Induktionsmaschinen besteht, außer der feineren Abstufung der Tourenzahl, der Vorteil einer guten Phasenkompensation.

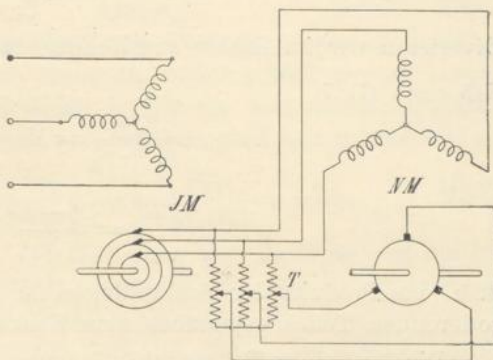


Fig. 21. Schaltungsschema der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem Drehfeld-Nebenschlußmotor.

14. Die Transformator-Übersetzung. Die Größe der Gegenspannung des Rotors des Nebenschlußmotors berechnet man, wie folgt: Bezeichnet *N* die synchrone Tourenzahl der Kaskadenschaltung zweier Induktionsmotoren, die nach Gl. 7

$$N = \frac{60 c_1}{p_1 + p_2} = \frac{n_1 p_1}{p_1 + p_2} \dots \dots \dots (7')$$

ist. Bei einer Tourenzahl *n* ist die im Rotor des Kommutatormotors induzierte EMK

$$E_{2r} = \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \cdot s_2 E_{2s} = \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \cdot s_2 s_1 E_{1s} \dots \dots (18)$$

Den Ausdruck für *s₂ s₁* können wir schreiben

$$s_1 s_2 = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot \frac{\frac{p_1}{p_2} (n_1 - n) - n}{\frac{p_1}{p_2} (n_1 - n)}$$

Vereinfacht und geordnet

$$s_1 s_2 = \frac{n_1 \frac{p_1}{p_2} - n \frac{p_1 + p_2}{p_2}}{n_1 \frac{p_1}{p_2}} \dots \dots \dots (19)$$

Dividieren wir im Zähler und Nenner durch $\frac{p_1 + p_2}{p_2}$ und beachten, daß nach Gl. 7

$$\frac{p_1 n_1}{p_1 + p_2} = N,$$

so ist

$$s_1 s_2 = \frac{N - n}{N} \dots \dots \dots (20)$$

d. h. das Produkt der Schlüpfungen ist gleich der Schlüpfung des rotierenden Teiles gegenüber dem Kaskadensynchronismus.

Die bei einer Tourenzahl n anzuwendende Gegenspannung ist

$$P_{2r} \simeq \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \cdot \frac{N - n}{N} \cdot P_{1r} \dots \dots \dots (21)$$

unabhängig vom Verhältnis der Polzahlen, abhängig nur von ihrer Summe.

Die Übersetzung des Reguliertransformators für die gewünschte Schlüpfung s_1 ist

$$u_t = \frac{P_{2r}}{P_{2s}} \simeq \frac{s_1 s_2 E'_{1s}}{s_1 E'_{1s}} \cdot \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} = s_2 \cdot \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \dots \dots (22)$$

d. h. wie bei dem einfachen Drehfeld-Nebenschlußmotor zahlenmäßig gleich der Schlüpfung des Motors, reduziert auf die Statorwindungszahl. Drücken wir die Übersetzung mit der verlangten Tourenzahl n aus, so ist

$$u_t = \frac{N - n}{n_1 - n} \cdot \frac{p_1 + p_2}{p_1} \cdot \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \dots \dots \dots (23)$$

Aus der letzten Gleichung geht hervor, daß bei gleichen Windungszahlen für Stillstand $u_t = 1$ und für Synchronismus des Hauptmotors $u_t = \infty$ sein müßte. Der Synchronismus des Hauptmotors begrenzt also die Tourenzahl nach oben, falls man das Aggregat nicht künstlich darüber hinweghilft.

15. Vektordiagramm der Spannungen und der Ströme. Der Verlauf der Ströme in beiden Motoren wird im wesentlichen durch den Nebenschlußmotor bestimmt, weil dieser der Sitz der Gegen-EMK ist. Das Charakteristische eines Motors mit Nebenschlußcharakteristik ist der konstante Kraftfluß. Bei Motoren, die

direkt an das Netz angeschlossen sind, folgt dies aus der Unveränderlichkeit der Spannung und der Periodenzahl. Bei Vernachlässigung des Spannungsabfalles ist der Fluß

$$\Phi = \frac{E_1}{4kc_1w_{1s}} \dots \dots \dots (24)$$

Bei der Kaskadenschaltung bleibt der Fluß des Nebenschlußmotors aus einem anderen Grund konstant, nämlich weil hierbei sowohl Spannung als Periodenzahl dieses Motors ein und derselben Größe: der primären Schlüpfung s_1 proportional sind (Gl. 1 und Gl. 2), so daß

$$\Phi_n = \frac{E_2}{4kc_2w_{2s}} = \frac{s_1 E_1'}{4ks_1c_1w_{2s}} = \text{konst.} \dots (25)$$

Das Vektordiagramm der EMKe ist also dasselbe wie für die Mehrphasen-Nebenschlußmotoren,¹⁾ nur ändern sich die Spannungsabfälle in Widerstand und Reaktanz anders. Die Streureaktanzen im Rotor des Induktionsmotors und im Stator des Nebenschlußmotors ändern sich bei konstantem sekundären Strom auch der Schlüpfung proportional, dagegen bleiben die Widerstände konstant, so daß man diese bei der Reduktion auf die primäre Periodenzahl durch s_1 dividieren muß. Auf die Änderung der Rotorreaktanz des Nebenschlußmotors wollen wir noch zurückkommen.

Die im Rotor des Induktionsmotors induzierte EMK ist so groß, daß es die vom Felde Φ_n induzierte EMK des Nebenschlußmotors und den sekundären Spannungsabfall aufhebt; nach der Reduktion auf primäre Periodenzahl ist diese EMK um den Spannungsabfall in der Statorwicklung kleiner, als die primäre Netzspannung P_{1s} . Demzufolge kann das Vektordiagramm des Nebenschlußmotors so aufgestellt werden, wie wenn der Motor über eine, nach Maßgabe der Schlüpfung veränderliche Drosselspule an das Netz geschlossen wäre. Dieses Vektordiagramm ist für untersynchronen Lauf des Nebenschlußmotors in Fig. 22a dargestellt.

Dem konstanten Fluß Φ_n eilt die Selbstinduktionsspannung im Stator: E_{2s} um $\frac{\pi}{2}$ voraus; $J_{2s} \cdot \frac{r_{2s}}{s_1}$ und $J_{2s} x_{2s}$ sind die Spannungsabfälle in der Statorwicklung. Die EMK im Rotor des Induktionsmotors (E_2)

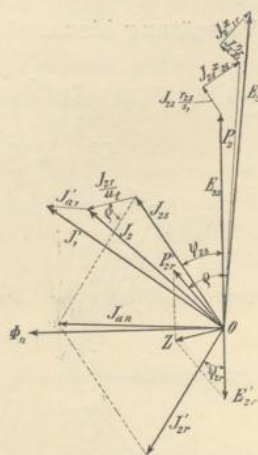


Fig. 22a. Vektordiagramm der Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor für Untersynchronismus des letzteren.

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik V, 2.

ist um die Spannungsabfälle größer als die Spannung an den Klemmen des Nebenschlußmotors P_2 .

Dem Rotor des Nebenschlußmotors wird über den Reguliertransformator die Gegenspannung $P_2'r$ aufgedrückt (reduziert auf Statorwindungszahl). Diese eilt bei einer Verschiebung ϱ der Bürsten gegen den Drehsinn des Feldes um den zeitlichen Phasenwinkel ϱ der Statorspannung voraus. Sie setzt sich mit der EMK $E_2'r$, die durch Schlüpfung im Felde Φ_n in der Rotorwicklung erzeugt wird, zu \vec{OZ} zusammen, die den Rotorstrom J_{2r} erzeugt.

Der Statorstrom J_{2s} kompensiert den Rotorstrom, so daß die geometrische Summe beider den Magnetisierungsstrom des Nebenschlußmotors J_{an} ergibt.

Mit dem Statorstrom setzt sich hinter dem Transformator nach Größe und Phase der im Verhältnis u_t reduzierte Rotorstrom J_{2r} zusammen, der aber nur im bezug auf die Statorwicklung um ϱ voreilt, folglich im Diagramm um ϱ in der Richtung des Feldes gedreht werden muß.

Das Vektordiagramm (Fig. 22a) zeigt, wie die Ströme des Nebenschlußmotors den Leistungsfaktor beeinflussen. Für einen guten Leistungsfaktor muß der Rotor des Nebenschlußmotors stark übererregt werden, damit der Statorstrom J_{2s} voreilt. Zu diesem voreilenden Strom kommt der Transformatorstrom $\frac{J_{2r}}{u_t}$ im Sinne der Verspätung hinzu, ebenso der Magnetisierungsstrom des Induktionsmotors.

Ist also die Polzahl des Aggregates so gewählt, daß der Nebenschlußmotor unter-synchron läuft und dabei die Anlage einen guten Leistungsfaktor haben soll, so muß der Nebenschlußmotor für eine große Volt-amperezahl gebaut werden.

Fig. 22b zeigt das Diagramm für Übersynchronismus des Kommutatormotors. Die Gegenspannung des Rotors $P_2'r$ muß der Statorspannung P_2 beinahe entgegengerichtet sein, d. h. ϱ muß nahezu 180° betragen. Infolgedessen gestaltet sich die Phasenkompensation günstiger. Der Transformatorstrom $\frac{J_{2r}}{u_t}$ addiert sich in solchem Sinne zum Statorstrom, daß der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung verkleinert wird.

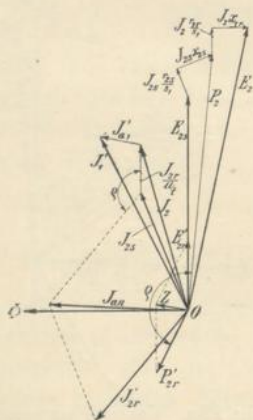


Fig. 22b. Vektordiagramm der Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor für Übersynchronismus des letzten.

Es ist noch auf einen anderen Unterschied von Unter- und Übersynchronismus hinzuweisen. Fig. 22a und 22b sind für die gleiche Übersetzung des Transformators, also für gleiche sekundäre Leerlaufschlüpfung gezeichnet. Im Über- und Untersynchronismus entsprechen jedoch der gleichen Schlüpfung ganz verschiedene Tourenbereiche des Aggregates. Man ersieht dies am besten aus Fig. 5. Wenn z. B. der Induktionsmotor drei und der Nebenschlußmotor zwei Polpaare besitzt, so entspricht bei 50 Perioden der Schlüpfung $s_1 = 0$ die Tourenzahl $n_1 = 1000$, und der Kaskadensynchronismus ist bei

$$N = \frac{60 \cdot 50}{3 + 2} = 600.$$

Für dieselben Schlüpfungen, z. B. für $s_2 = \pm 0,5$, entspricht dem untersynchronen Wert die primäre Schlüpfung $s_1 = 0,575$ oder $n = 425$, dem übersynchronen Wert aber $s_1 = 0,3$ oder $n = 700$, also nach unten ein Tourenunterschied von 175 Touren, nach oben 100 Touren.

Diese Beziehung ist für die Kommutation sehr wichtig, denn die Drehfeld-Kommutatormotoren können über einer gewissen Grenze der Schlüpfung nicht funkenfrei kommutieren, weil die Transformator-EMK in den kurzgeschlossenen Spulen zu groß wird. Als Grenzen ohne künstliche Kommutation sind etwa die Werte $s_2 = 0,5$ bis $s_2 = -1,5$ zu setzen. Bei den angegebenen Polzahlen ist also nur eine Regelung von 400 bis 800 Touren, oder 1:2 zulässig. Hierbei ist die Wirkung der Stromwendespannung noch außer acht gelassen, die aber mit höherer Geschwindigkeit abnimmt, weil der Kommutatormotor weniger Strom erhält.

16. Stromdiagramm. Zur Ableitung des Diagramms gehen wir aus dem Rotorstrom des Nebenschlußmotors aus. Dieser wird erzeugt durch das Zusammenwirken einerseits der aufgedrückten Transformatorspannung P_{2r} , andererseits der vom Drehfeld induzierten EMK E_{2r} (s. Fig. 22a und 22b). Die Vektorsumme der beiden nennen wir \overline{OZ} , so ist vektoriell geschrieben

$$\mathfrak{Z}_{2r} = \frac{\overline{OZ}}{\mathfrak{Z}_{2r}} \dots \dots \dots (26)$$

\mathfrak{Z}_{2r} ist die Impedanz der Rotorwicklung bei der betrachteten Geschwindigkeit.

Den Strom J_{2r} muß der Statorstrom J_{2s} kompensieren, die geometrische Summe beider ergibt den Magnetisierungsstrom J_{an} der Maschine:

$$\mathfrak{Z}_{2s} = \mathfrak{Z}_{an} + \mathfrak{Z}'_{2r} \dots \dots \dots (27)$$

Die Spannung an den Schleifringen des Induktionsmotors ist

$$\mathfrak{P}_{2s} = \mathfrak{C}_{2s} + \mathfrak{Z}_{2s} \mathfrak{I}_{2s} \dots \dots \dots (28)$$

und an den Bürsten

$$u \mathfrak{P}_{2s} \cdot e^{je} = s_2 \mathfrak{C}'_{2s} - \mathfrak{Z}_{2r} \mathfrak{I}_{2r} \dots \dots \dots (29)$$

wobei e^{je} die Drehung des Vektors durch die Bürstenstellung bedeutet. Aus Gl. 28 und 29 ist

$$\mathfrak{C}'_{2s} = \frac{u e^{je} \mathfrak{P}_{2s} + \mathfrak{Z}_{2r} \mathfrak{I}_{2r}}{s_2} = \frac{\mathfrak{P}_{2s} - \mathfrak{Z}_{2s} \mathfrak{I}_{2s}}{\mathfrak{C}} \dots \dots \dots (30)$$

somit ist

$$\mathfrak{I}'_{2r} = \frac{\mathfrak{P}_{2s} - \mathfrak{C} \cdot u e^{je} \frac{\mathfrak{P}_{2s}}{s_2}}{\mathfrak{Z}_{2s} - \mathfrak{C} \frac{\mathfrak{Z}'_{2r}}{s_2}} \dots \dots \dots (31)$$

\mathfrak{C} ist dabei das Verhältnis der EMK zur Klemmenspannung¹⁾. Wir machen eine Vereinfachung, indem wir uns den ganzen Spannungsabfall im Rotor des Hauptmotors als nur von dem Statorstrom herrührend denken, was gleichviel bedeutet, daß wir unter \mathfrak{Z}_{2s} die Impedanz $\mathfrak{Z}_{1r} + \mathfrak{Z}_{2s}$ verstehen wollen. Somit wird

$$\mathfrak{I}'_{2r} = \frac{s_1 E'_{1s} - \mathfrak{C} u e^{je} \frac{s_1}{s_2} E'_{1s}}{\mathfrak{Z}_{2s} - \mathfrak{C} \frac{\mathfrak{Z}'_{2r}}{s_2}} \dots \dots \dots (32)$$

und der ganze Strom im Rotor des Hauptmotors

$$\mathfrak{I}_2 = \mathfrak{I}_{an} + \mathfrak{I}'_{2r} \left(\frac{1}{\mathfrak{C}} - \frac{1}{u} \cdot e^{-je} \right) \dots \dots \dots (33)$$

Das letzte Glied der Gleichung bedeutet den transformierten Rotorstrom, der nur in bezug auf die Statorwicklung um ϱ nach-eilt. Durch Division des Bruches in der Gl. 32 mit s_1 bzw. $\frac{s_1}{s_2}$ bekommen wir die konstante Netzspannung E'_{1s} , abgesehen vom Spannungsabfall im Stator des Induktionsmotors; so daß wir dadurch das Diagramm auf die primäre Wicklung reduziert haben.

Der bequemeren Darstellung wegen teilen wir den Rotorstrom in der Gl. 32 in zwei Teile:

$$\mathfrak{I}_{2r}^{(1)} = \frac{E'_{1s}}{\frac{\mathfrak{Z}_{2s}}{s_1} - \mathfrak{C} \frac{\mathfrak{Z}'_{2r}}{s_1 s_2}} \dots \dots \dots (34)$$

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. I.

und
$$\mathfrak{Z}_{2r}^{(2)} = \mathfrak{C} \cdot u \cdot e^{je} \frac{E'_{1s}}{s_2 \mathfrak{Z}_{2s} - \mathfrak{C} \frac{\mathfrak{Z}_{2r}}{s_1}} \dots \dots (35)$$

Der erste Teil stellt den Strom dar, der bei kurzgeschlossenen Kollektorbürsten fließt. Das Aggregat läuft, wie zwei in Kaskade geschaltete Induktionsmotoren in der Nähe der Tourenzahl N . Hierfür ist das Stromdiagramm bekannt¹⁾. Es ist eine Doppelschleife, entsprechend dem doppeltem Arbeitsbereich des Aggregates in der Nähe des Kaskadensynchronismus und bei dem Synchronismus des Vordermotors. Der Unterschied besteht nur darin, daß die Rotorreaktanz x_{2r} aus einem der Periodenzahl $s_1 c_1$ und einem der Schlüpfungsperiodenzahl $s_1 s_2 c_1$ proportionalen Betrag besteht:

$$x_{2r} = s_1 x_{2r0} + s_1 s_2 x_{2rv} \dots \dots (36)$$

Diese Reaktanz kann experimentell aufgenommen werden, wenn man dem Rotor bei verschiedenen Geschwindigkeiten und bei kurzgeschlossenem Stator Strom zuführt. Fig. 23 stellt die Reaktanz als Funktion der Schlüpfung dar. In der Nähe des Synchronismus wird das Bild durch die höheren Harmonischen verzerrt, was man durch Durchziehen einer Geraden eliminieren kann²⁾.

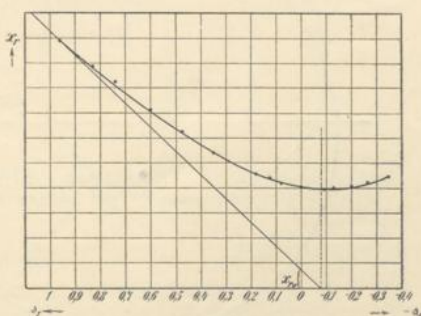


Fig. 23. Die Rotorreaktanz des Nebenschlußmotors.

Die Impedanz $\mathfrak{C} \frac{\mathfrak{Z}'_{2r}}{s_1 s_2}$ wird durch eine schräge Gerade dargestellt, die geometrische Addition mit der ebenfalls geradlinigen Impedanzlinie $\frac{\mathfrak{Z}_{2s}}{s_1}$ ergibt eine hyperbolische Kurve, als Impedanzlinie. Nach der Inversion erhält man das Diagramm der sekundären Ströme $J_{2r}^{(1)}$. Dieses ist ähnlich dem der gewöhnlichen Kaskadenschaltung (Kurve I in Fig. 24).

Schließt man den Stator kurz und führt den Bürsten die Spannung $u \cdot E'_{1s}$ zu, so entsteht der Strom $J_{2r}^{(2)}$; er wird durch die Kurve II in Fig. 24 dargestellt, die durch Inversion der punktweise konstruierten parabolischen Impedanzlinie

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 1.

²⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2.

$$\frac{s_2}{s_1} \cdot \mathfrak{B}_{2r} - \mathfrak{C} \frac{\mathfrak{B}_{2r}}{s_1}$$

erhalten wurde.

Die Lage und Größe der Kurve II gibt dem Motor den Nebenschlußcharakter. Die Übersetzung u bestimmt in der Hauptsache die Leerlauf-tourenzahl, die Bürstenstellung ϱ die Kompensation.

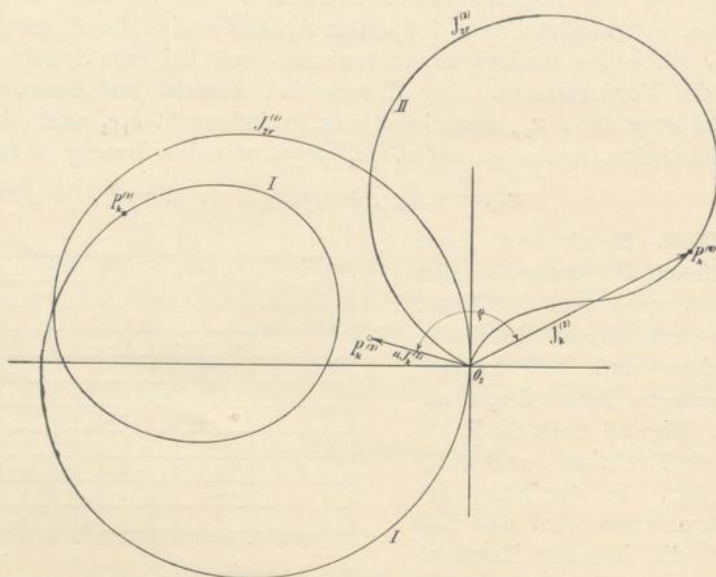


Fig. 24. Diagramm der Ströme eines Nebenschlußmotors in der Kaskadenschaltung mit einem Induktionsmotor.

Die Vektoren der Kurven I und II werden geometrisch addiert. Dazu kommt noch der Leerlaufstrom J_{an} des Kommutatormotors und der im Verhältnis der Transformatorübersetzung verkleinerte Rotorstrom J_{2r} . Addieren wir den primären Magnetisierungsstrom und (nach einer Inversion) den Spannungsabfall des Hauptmotors, so erhalten wir das in Fig. 25 dargestellte Stromdiagramm. Dieses Stromdiagramm ist eine Schleife, ähnlich der der gewöhnlichen Kaskadenschaltung. Der Charakter des Kommutatormotors ist durch die Kurve II ausgeprägt, die Schleife kann durch entsprechende Wahl von u und ϱ in weiten Grenzen verändert werden. Es gibt hier, wie bei der gewöhnlichen Kaskadenschaltung, zwei motorische und zwei generatorische Arbeitsbereiche, die motorischen liegen oberhalb der Abszissenachse (positive Wattströme), die generatorischen unterhalb derselben (negative Wattströme).

Die in der Fig. 25 eingezeichneten Punkte sind experimentell aufgenommen. Das Aggregat war überkompensiert.

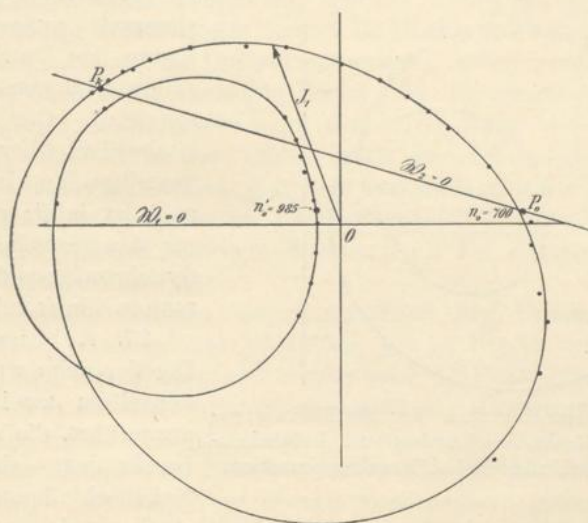


Fig. 25. Stromdiagramm der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor bei Überkompensationen.

Da das Stromdiagramm kein Kreis ist, so gibt es keine Leistungs- und Verlustgeraden. Der praktisch wichtigste Teil der Kurve, in der Nähe der eingestellten Leerlaufdrehzahl, ähnelt jedoch einem Kreise, wie es aus dem Kreisdiagramm des Drehfeld-Nebenschlußmotors¹⁾ gefolgert werden kann. Unter Vernachlässigung der Ohmschen Spannungsabfälle sind nämlich alle EMKe der Schlüpfung s_1 proportional. Durch Division durch s_1 könnte also das vereinfachte Diagramm des Nebenschlußmotors auf die primäre Periodenzahl reduziert und mit dem Kreis des Induktionsmotors zu einer Schleife geometrisch zusammengesetzt werden. Obwohl die Widerstände in der Gleichung in der Form $\frac{r}{s_1}$ und $\frac{r}{s_1^2}$ vorkommen und das Bild verzerren, dürfen wir dennoch die Abstände der Punkte des Diagramms von der Linie $P_k - P_0$ als Maß für die Nutzleistung betrachten. Die zugeführte Leistung und Phasenverschiebung können direkt abgelesen werden.

Den wichtigen Einfluß der aufgedrückten Rotorspannung auf die Überlastbarkeit des Aggregates ersieht man aus Fig. 24. Je größer $P_{2r}(u)$ ist, desto größer die Kurve II und desto größer das Arbeits-

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2.

diagramm in dem uns hauptsächlich interessierenden Gebiet: in der Nähe der eingestellten Leerlauf-tourenzahl.

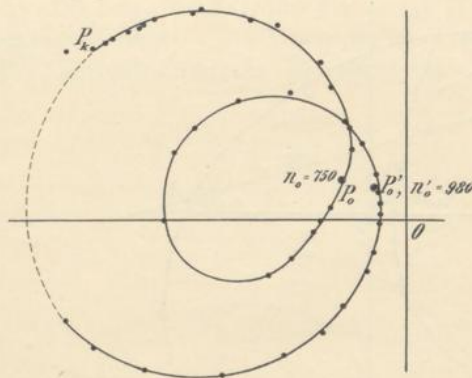


Fig. 26. Stromdiagramm der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor bei Unterkompensation.

zwar Anzapfungen in der Statorwicklung, doch wurde der feineren Regulierung halber ein dreiphasiger Autotransformator vorgezogen, der zwischen Stator- und Rotorwicklung geschaltet wurde (Fig. 21).

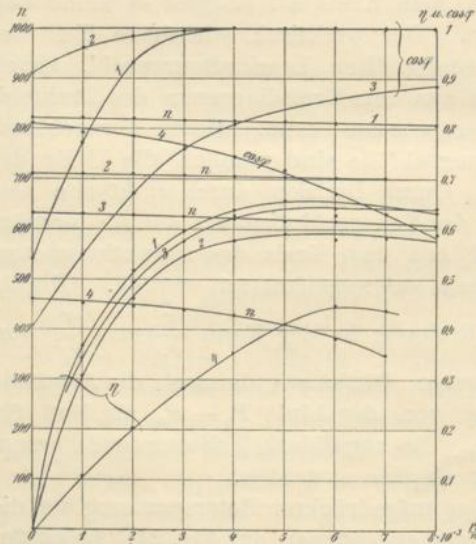


Fig. 27. Arbeitskurven eines mechanisch gekuppelten Kaskadenaggregates bestehend aus Induktions- und Nebenschlußmotor.

Fig. 26 zeigt eine experimentell aufgenommene Kurve bei Unterkompensation und starkem Tourenabfall. Der generatorische Teil über der eingestellten Leerlauf-tourenzahl ist labil; der Motor hat das Bestreben, in den Synchronismus des Hauptmotors hineinzulaufen.

17. Arbeitskurven. Die Versuche wurden mit denselben zwei Motoren ausgeführt, die auf S. 15 beschrieben sind. Der Nebenschlußmotor besitzt

zwar Anzapfungen in der Statorwicklung, doch wurde der feineren Regulierung halber ein dreiphasiger Autotransformator vorgezogen, der zwischen Stator- und Rotorwicklung geschaltet wurde (Fig. 21). Fig. 27 zeigt die Bremskurven des Aggregates in verschiedenen Tourenbereichen, für die Leerlauf-tourenzahlen 820, 710, 630 und 460. Die Tourenzahlen wurden mittels des Transformators eingestellt und die Bürsten so weit verschoben, bis ein guter Wirkungsgrad erreicht war. Die Tourenkurven (n) zeigen überall den Nebenschlußcharakter des Aggregates, sie fallen von Leerlauf bis Vollast nur einige Prozente. Der Tourenabfall ist bei den niedrigeren Leerlauf-tourenzahlen, besonders unterhalb Kaskadensynchronismus

stärker, als bei denen, wo der Nebenschlußmotor noch übersynchron läuft. Der Grund dieser Erscheinung hängt einerseits mit der Eigenschaft der Nebenschluß-Kommutatormotoren zusammen, bei denen sich bekanntlich die Leistung des Rotors im Übersynchronismus zu der des Stators addiert, im Untersynchronismus diese vermindert; im ersten Teil also einen kleineren Strom und Tourenabfall erfordert als im zweiten. Andererseits liegt dies in der Natur der Kaskadenschaltung, nämlich in der Abhängigkeit der Schlüpfungen beider Maschinen. Aus Fig. 5 ersieht man, daß eine Änderung der Schlüpfung s_2 des Kommutatormotors im übersynchronen Lauf viel weniger Tourenabfall (s_1) vom Aggregat erfordert, als bei ebensoviel Untersynchronismus.

Die Leistungsfaktoren zeigen für Über- und Untersynchronismus auch ein verschiedenes Verhalten, wie es bereits auf S. 30 erläutert wurde. Im Übersynchronismus wird die Phasenverschiebung mit wachsendem Strome kleiner, weil sich der Rotorstrom im Sinne der Voreilung mit dem Statorstrom zusammensetzt (Fig. 22 b). Im Untersynchronismus (Fig. 22 a) vergrößert dagegen dieser Strom den Phasenwinkel. Bei den zwei oberen Tourenzahlen gelang es, das Aggregat vollständig zu kompensieren.

Der etwas niedrige Wirkungsgrad erklärt sich aus dem an und für sich schlechten Wirkungsgrad des Kommutatormotors, der im Maximum 71% war. Der Wirkungsgrad ist natürlich am besten, wenn der größte Teil der Leistung vom Induktionsmotor selbst abgegeben wird (Kurve I). Es ist aber bei mäßigem Übersynchronismus der Wirkungsgrad besser, als in der Nähe des Kaskadensynchronismus, was man dem geringeren wattlosen Strom zuschreiben muß. Bei untersynchronem Lauf des Nebenschlußmotors sind die Kommutations- und Eisenverluste stark vergrößert, außerdem führt der Rotor des Nebenschlußmotors einen großen wattlosen Strom, der in der Wicklung und unter den Bürsten große Verluste hervorruft.

Die Kurven zweier Bremsungen in Fig. 28 dienen zum Vergleich der gewöhnlichen Kaskadenschaltung zweier Induktionsmotoren mit der Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor. Als zweiter Induktionsmotor diente im ersten Fall der Kommutatormotor mit kurzgeschlossenen Bürsten. Der Unterschied ist selbst in der Nähe des Kaskadensynchronismus, wo der Nebenschlußcharakter am schwächsten ist, sehr deutlich zu sehen. Mit dem Nebenschlußmotor bringt man den Leistungsfaktor für alle Belastungen gleich der Einheit, während er bei den Induktionsmotoren nur allmählich verbessert wird. Der Tourenabfall ist bei der Schaltung mit Kommutatormotor geringer.

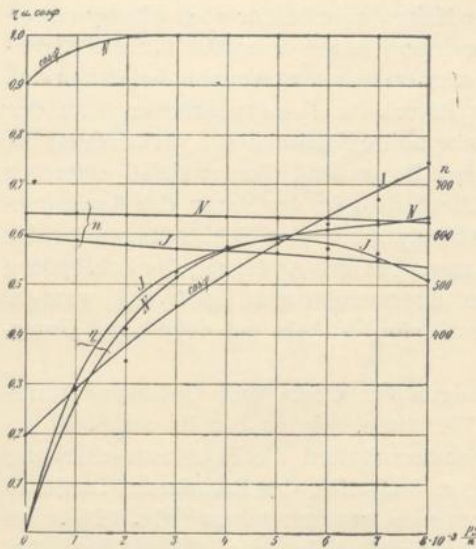


Fig. 28. Vergleich der Arbeitskurven der Kaskadenschaltung zweier Induktionsmotoren (J) mit denen der Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor (N).

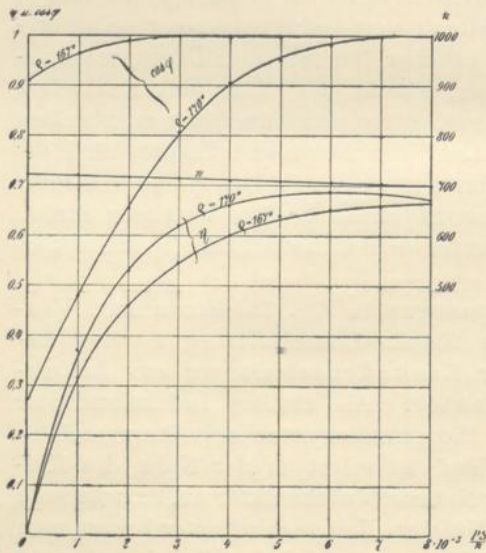


Fig. 29. Einfluß einer fehlerhaften Bürstenstellung auf die Arbeitsweise der Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor.

Der Wirkungsgrad ist anfangs bei der Schaltung mit Induktionsmotor größer, weil aber der Nebenschlußmotor die Überlastbarkeit des Aggregates vergrößert, so wird auch der Wirkungsgrad besser.

Die Phasenkomensation wurde bei allen Versuchen durch Verstellung der Bürsten am Kommutator geregelt. Diese Methode eignet sich für die Praxis nicht, weil die Nebenschlußmotoren gegen fehlerhafte Einstellung des Bürstenwinkels sehr empfindlich sind. In Fig. 29 sind zwei Arbeitskurven aufgenommen, die eine für die richtige Einstellung der Bürsten auf $\varphi = 167^\circ$ (elektrisch), die andere für $\varphi = 170^\circ$, also für einen Fehler von drei elektrischen Graden, was bei dem vierpoligen Kommutatormotor einem geometrischen Winkel von nur $1\frac{1}{2}^\circ$ entspricht. Die großen Abweichungen in der Kompensation und in dem Wirkungsgrad sind auffallend, auf die Tourenzahl hat es keinen erheblichen Einfluß.

In der Praxis ersetzt man die Bürstenverstellung durch die Verschiebung der zeitlichen Phase des Rotorstromes, was dasselbe Resultat ergibt

Der

(s. Mécanisme régulateur pour

die men sind Kna über ist Tra Ind

des für sein

nicht klein Sch sch spre

einfa Wid Netz Über perie

wob

ist u

die befes ist 3 werd

(s. Fig. 22a und 22b). Die Société Alsacienne de Constructions Mécaniques, Belfort, gebraucht zu diesem Zwecke einen Induktionsregulator, die A. E.-G. eine schiefe Verlegung des Potential-Nullpunktes der Statorwicklung¹⁾.

Als eine störende Erscheinung machte sich bei den Versuchen die Fähigkeit des Nebenschlußmotors, sich selbst zu erregen, bemerkbar. Die Umstände, unter denen diese Erscheinung auftritt, sind zurzeit noch nicht genügend geklärt; es erfolgt mit heftigem Knallen und Funken, sobald der Rotor des Nebenschlußmotors stark übererregt wird. Die Periodenzahl des generierten Wechselstromes ist gering, schließt sich also leicht über die Wicklungen und den Transformator und verursacht große Verluste. Gewöhnlich wird der Induktionsmotor stark überlastet, bis das Aggregat stehen bleibt.

18. Übersynchroner Betrieb. Für den Betrieb oberhalb des Synchronismus des Induktionsmotors gilt dieselbe Regel wie für den Untersynchronismus: der Kommutatormotor darf sich von seinem eigenen Synchronismus

$$n = \frac{60 c_1}{p_1 - p_2}$$

nicht sehr entfernen. Doch ist hier die Regelbarkeit nach unten kleiner, weil — wie man aus Fig. 11 ersieht — die sekundäre Schlüpfung und die mit ihr wachsenden Kommutationsverluste schneller zunehmen. Diesem Umstande kann man durch entsprechende Wahl der Polzahlen Rechnung tragen.

Der Anlauf auf die übersynchrone Tourenzahl geschieht am einfachsten dadurch, daß man zunächst den Induktionsmotor mittels Widerständen anläßt, dann den Nebenschlußmotor direkt mit dem Netz verbindet. Dem Reguliertransformator gibt man dabei eine Übersetzung, die die gewünschte Leerlauf-tourenzahl bei der Netz-periodenzahl ergibt:

$$u_1 = s_2 = \frac{n - n_2'}{n_2'} \dots \dots \dots (37)$$

wobei

$$n_2' = \frac{60 c_1}{p_2}$$

ist und gleiche Windungszahl vorausgesetzt ist.

Der zu den Versuchen benutzte Induktionsmotor hat 6 Pole, die Rotorwicklung ist also bei 50 Perioden nur für 1000 Touren befestigt. Die synchrone Tourenzahl bei den Polzahlen 3 und 2 ist 3000, so daß keine zufriedenstellende Bremsung vorgenommen werden konnte. Bei 1400 Touren ($s_2 = -1,33$) konnte das Aggregat

¹⁾ ETZ 1910, S. 751.

nur mit 1,5 kg (30% des normalen Drehmomentes) belastet werden. Der Wirkungsgrad war 44%, der Leistungsfaktor 0,83.

19. Wahl der Polzahl, Kommutation¹⁾. Die Kurven der Fig. 27 zeigen, daß der Wirkungsgrad und Leistungsfaktor bei mäßigem Übersynchronismus des Kommutatormotors am günstigsten sind, etwa bei $s_2 = -1$. Die Kommutation eines Drehfeld-Kommutatormotors ist dagegen beim Synchronismus am günstigsten, weil hierbei die in den kurzgeschlossenen Spulen induzierte Transformator-EMK gleich Null ist. Bei Übererregung, wegen guter Kompensation, wird der Rotor des Kommutatormotors mit dem wattenlosen Strom überlastet. Die EMK der Stromwendung veranlaßt dann die Bürsten zum Funken.

Man verteilt die Polzahlen in der Weise, daß das Aggregat bei der normalen Tourenzahl etwas über dem Synchronismus des Hilfsmotors läuft. Die Polzahl des Hauptmotors soll so gewählt sein, daß bei der höchsten Tourenzahl $s_2 = -1,5$ nicht überschritten wird, bei $\frac{p_1}{p_2} = \frac{2}{3}$ entspricht beispielsweise dieser Schlüpfung 20% Tourenabfall (s. Fig. 5). Über dieser Geschwindigkeit empfiehlt sich eine Regelung des Hauptmotors mittels Rotorwiderständen besser.

V. Der Drehfeld-Nebenschlußmotor in mechanisch getrennter Kaskadenschaltung.

20. Bei der festen Kupplung wird die gewünschte Leerlauf-tourenzahl mittels des Nebenschlußmotors entsprechend Gl. 23 eingestellt, und der Induktionsmotor wird mechanisch gezwungen, bei dieser Tourenzahl zu laufen. Bei der mechanisch unabhängigen Anordnung läuft dagegen der Nebenschlußmotor mit einer konstanten, nur von der Polzahl des mit ihm gekuppelten Dreiphasengenerators und von der Netzperiodenzahl abhängigen Tourenzahl und bringt den Hauptmotor rein elektrisch, d. h. mit Hilfe seiner Gegen-EMK, auf die verlangte Geschwindigkeit. Schon hieraus geht hervor, daß das Anlassen der getrennten Anlage mehr Sorgfalt erfordert, als das der gekuppelten Schaltung. Sobald die Gegen-EMK des Kommutatormotors der im Rotor des Hauptmotors induzierten EMK nicht entgegengesetzt gleich ist, wird der Lauf des Hauptmotors labil, er läuft dann in seinen Synchronismus hinauf; der Kommutatormotor wird spannungslos und wird nun von dem Induktionsgenerator als Motor angetrieben.

¹⁾ Dr. S. Fleischmann, ETZ 1910, S. 191.

Das Schaltungsschema ist in Fig. 30 dargestellt. Beim Anlassen wird zunächst der Induktionsgenerator mittels der Rotorwiderstände g auf die synchrone Tourenzahl n_3 gebracht. Der Reguliertransformator T wird auf die weiter unten anzugebende Übersetzung eingestellt. Dann wird der Hauptmotor JM mittels der Widerstände a bis zu der verlangten Tourenzahl n angelassen und dann der Umschalter U umgelegt. Für die Praxis empfiehlt sich das Zusammenschalten der Maschinen statt des Umschalters mittels eines Automaten zu bewirken, das als Zentrifugalschalter oder als Minimalstromschalter ausgebildet sein kann.

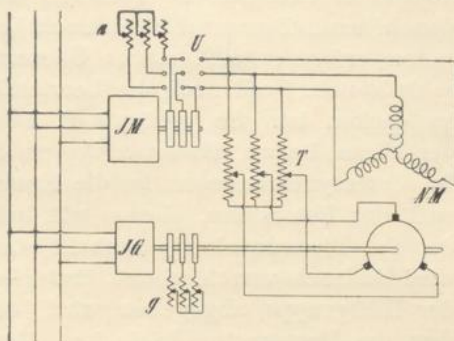


Fig. 30. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors (JM) mit einem mechanisch getrennten Nebenschlußmotor (NM), der einen Induktionsgenerator (JG) antreibt.

21. Die Übersetzung des Regulier-Transformators. Bei Leerlauf muß die EMK im Rotor des Nebenschlußmotors die transformierte Spannung des Rotors des Hauptmotors aufheben. Dies erfordert, abgesehen vom Spannungsabfall des Leerlaufstromes, eine Rotorspannung

$$u_i P_{2s} \approx E_{2r} = s_2 \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} E_{2s} \dots \dots \dots (38)$$

somit eine Übersetzung u_i für die Leerlaufftourenzahl n (s. auch Gl. 16)

$$u_i \approx \frac{w_{2r} f_{2r}}{w_{2s} f_{2s}} \left(1 - \frac{n_1}{n_1 - n} \cdot \frac{p_2}{p_3} \right) \dots \dots \dots (39)$$

Bei Belastung des Hauptmotors wachsen Spannung und Periodenzahl an den Schleifringen an. Es tritt infolgedessen eine Erhöhung der Tourenzahl des Nebenschlußmotors ein; der mit ihm gekuppelte Asynchrongenerator kann sich belasten. Im allgemeinen wird diese Erhöhung der Tourenzahl der Hilfsgruppe klein bleiben, denn ein Induktionsgenerator erfordert nur wenige Prozente negativer Schlüpfung. Bei der Betrachtung der Wirkungsweise der Schaltung dürfen wir annehmen, daß die Hilfsgruppe mit der konstanten Tourenzahl n_3 läuft.

Der wesentlichste Unterschied gegenüber der direkten Kuppelung des Kommutatormotors ist die Verminderung der Leistung

des Hauptmotors bei verminderter Tourenzahl. Die Anordnung ist also nur angebracht, wenn der Betrieb konstantes oder annähernd konstantes Drehmoment verlangt, sonst wird der Hauptmotor bei den höheren Tourenzahlen schlecht ausgenützt. Die Phasenkompensation erfordert eine starke Übererregung des Rotors des Nebenschlußmotors, weil noch der Leerlaufstrom des Induktionsgenerators zu decken ist. So gehört z. B. zu einem 85 KW-Hilfsgenerator der Firma Brown, Boveri & Co. ein 200 KVA-Nebenschlußmotor¹⁾. Im Untersynchronismus ist die Kompensation besonders schwierig, weil der Rotorstrom, ebenso wie bei der gekuppelten Anordnung, um den Phasenwinkel ϱ nacheilt (s. Fig. 22a). Der Wirkungsgrad wird dadurch verschlechtert, daß eine größere geschlüpfte Leistung der Hilfsgruppe abgegeben wird, deren Wirkungsgrad gegenüber dem des Hauptmotors klein ist. Man wird also die Polzahlen des Hilfsgenerators und die des Nebenschlußmotors so verteilen, daß der letzte meistens übersynchron läuft.

Die Grenzen der Tourenregelung werden hier auch durch die Kommutationsverluste bzw. durch die Größe der Schlüpfung s_2 gezogen, wie auch bei der gekuppelten Schaltung, doch ist der zulässige Tourenbereich bei der getrennten Anordnung laut Gl. 16 nur von den Polzahlen der Hilfsgruppe abhängig. Der Zusammenhang zwischen den Schlüpfungen ist für mehrere Polverhältnisse in Fig. 17 dargestellt. Die Kurven verlaufen bei größerem Verhältnis von $\frac{p_2}{p_3}$ flacher, sie lassen also einen größeren Regulierbereich des Hauptmotors zu. Nehmen wir wieder die zulässigen Schlüpfungswerte von $s_2 = 0,5$ bis $s_2 = -1,5$ an, so erstreckt sich der Regulierbereich für gleiche Polzahl der Hilfsgruppe ($p_2 = p_3$) von $s_1 = 0,4$ bis $s_1 = 0,675$, d. h. bei einem sechspoligen Hauptmotor und 50 Perioden von 600 herunter bis 325 Touren. Bei $\frac{p_2}{p_3} = \frac{1}{2}$ ist der Bereich zwischen $s_1 = 0,2$ und $0,34$ eingeschlossen, also bei dem selben Motor zwischen 800 und 660 Touren. Wir ersehen aus diesem Beispiel, daß mit größerem Polverhältnis der Hilfsgruppe zwar der Regulierbereich größer wird, entfernt sich aber von dem Synchronismus des Hauptmotors (1000), in dessen Nähe man dann entweder mit Rotorwiderständen reguliert, oder mit Rücksicht auf die kleine Leistung des Hilfsmotors eine etwas ungünstigere Kommutation zuläßt. In unmittelbarer Nähe des Synchronismus des Hauptmotors, etwa bei dem Wert $s_2 = -4$

¹⁾ Siehe Scherbius, Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, Jahrg. VIII, S. 133.

wird der Betrieb labil, der entlastete Hauptmotor bleibt nicht in der eingestellten Leerlaufdrehzahl, sondern läuft bei Entlastung in seinen Synchronismus hinein.

22. Arbeitskurven. Fig. 31 zeigt die Wirkungsgradkurve eines vierpoligen 5 PS-Hauptmotors (und den Rotorstrom des Nebenschlußmotors) der mittels mechanisch getrennter Hilfsgruppe geregelt wurde. Diese Hilfsgruppe bestand aus dem schon erwähnten Dreiphasen-Nebenschlußmotor mit Reguliertransformator und einem sechspoligen 5 PS Induktionsmotor, der hier als Induktionsgenerator diente. Die Regelung war bei konstantem Moment und verschiedenen Tourenzahlen des Hauptmotors durchgeführt; die Bürsten des Nebenschlußmotors wurden auf einen möglichst guten Leistungsfaktor der Anlage eingestellt. Da die Leistungen der Motoren ungefähr gleich sind (was im praktischen Betrieb nicht vorkommen wird), so wird der Wirkungsgrad der Anlage stark heruntersetzt wegen der verhältnismäßig niedrigen Beanspruchung der Hilfsgruppe. Die Wirkungsgrade sind aus diesem Grunde auffallend klein, die Kurve soll die Verhältnisse auch nur qualitativ darstellen. In der Nähe des Kaskadensynchronismus ($n = 500$) reicht die Kompensationsspannung P_{2r} nicht mehr aus, den Leistungsfaktor, wie bei den anderen Bremspunkten, gleich der Einheit zu machen. Auf der folgenden Tabelle sind die zugehörigen Werte von u_t und q für die verschiedenen Geschwindigkeiten und $\cos \varphi = 1$ zusammengestellt.

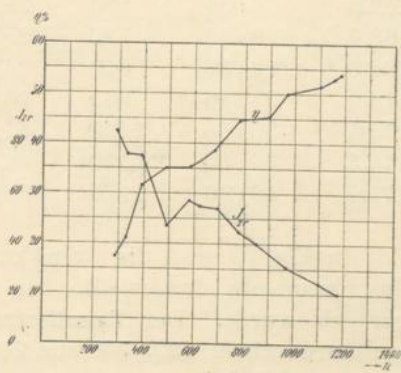


Fig. 31. Regulierung eines Induktionsmotors bei konst. Drehmoment und $\cos \varphi = 1$ mittels mechanisch getrennten Nebenschlußmotors. Kurve des totalen Wirkungsgrades und des Rotorstromes des Nebenschlußmotors.

Tabelle I.

$P_1 = 120$ Volt, $c_1 = 50$ Perioden.

$$\cos \varphi = 1; \quad \vartheta = \text{konst.} = 2,86 \text{ mkg}; \quad \frac{w_{2s} f_{2s}}{w_{2r} f_{2r}} = \frac{72 \cdot 0,96}{74 \cdot 0,828} = 1,13.$$

q	u_t	n	J_1	W_1	$\sqrt{3} J_{2r}$	W_3
34,0	5 : 36	290	24,25	4920	85	495
42,0	4 : 36	328	22,9	4620	74	840
53,0	3 : 36	390	23,25	4670	75	900

4*

ϱ	u_e	n	J_1	W_1	$\sqrt{3}J_{2r}$	W_3
117,0	2:36	490	24,8	4100	47	1245 ¹⁾
133,5	3:36	582	24,8	4880	57	750
142,0	4:36	625	25,3	5020	55	615
150,0	5:36	680	25,7	5200	54	480
152,5	6:36	690	25,7	5170	49	570
163,0	9:36	780	25,7	5180	44	465
164,0	12:36	850	24,7	5520	40	210
173,0	24:36	965	28,5	5680	31	75
173,5	30:36	1100	31,25	6320	24	— 360 ²⁾
174,5	36:36	1150	31,75	6380	21	— 390
171,0	42:36	1170	33,0	6400	20	— 570

In Fig. 32 sind die Bremskurven eines sechspoligen 20 PS Induktionsmotors dargestellt, der mit dem vorigen Hilfsaggregat geregelt wurde. Der Reguliertransformator wurde für die Leerlaufdrehzahlen 520, 700 und 900 eingestellt, jedoch war die letzte Drehzahl bei Leerlauf labil aus dem auf Seite 40 angegebenen Grunde; der Hauptmotor lief bei Entlastung bis 1000 Touren hinauf.

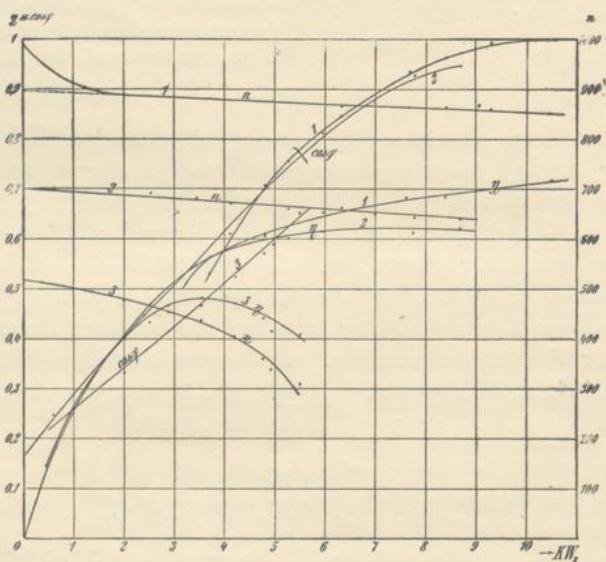


Fig. 32. Arbeitskurven der mechanisch getrennten Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors und eines mit Induktionsgenerator gekuppelten Nebenschlußmotors.

¹⁾ $\cos \varphi = 0,82$, die Kompensationsspannung reicht nicht aus.

²⁾ Die Induktionsmaschine wird zum Motor.

Der Hauptmotor besitzt einen abnormal großen Magnetisierungsstrom (60% des Vollaststromes). Es gelang, mit der Kaskadenschaltung den wattlosen Netzstrom so stark zu verringern, daß der totale Wirkungsgrad der Anlage infolge der Abnahme der Kupferverluste gegenüber dem Betrieb mit kurzgeschlossenem Rotor nur wenig vermindert wurde.

Der Wirkungsgrad des Kommutatormotors ändert sich mit der Übererregung des Rotors, weil der voreilende wattlose Strom große Verluste unter den Bürsten hervorruft. Diese Verluste können so groß werden, daß der Induktionsgenerator zum Motor wird und statt Leistung dem Netz zurückzupumpen, solche von ihm empfängt. Dadurch wird natürlich der Wirkungsgrad der Anlage stark vermindert. In Fig. 33 sind zwei Bremsungen dargestellt, beide für dieselbe Stellung des Reguliertransformators, folglich ungefähr bei derselben Tourenzahl; die eine für mäßige Kompensation ($\varrho = 170^\circ$), die andere für Überkompensation (voreilenden Strom, $\varrho = 160^\circ$). In dem ersten Fall fängt der Induktionsgenerator bei 2,6 KW Nutzleistung des Hauptmotors an, auf das Netz zurückzuarbeiten (Kurve W_3 für $\varrho = 170^\circ$), im zweiten Fall nimmt der Induktionsgenerator als Motor ständig Leistung auf, um die Verluste der Hilfsgruppe und besonders die Bürsten-Übergangsverluste des Nebenschlußmotors zu decken. Dementsprechend sind die Wirkungsgrade bei mäßiger Kompensation wesentlich höher, als bei Überkompensation.

23. Das Stromdiagramm. Der Verlauf der Ströme im Hauptmotor ist qualitativ derselbe wie bei dem mechanisch gekuppelten Aggregat (siehe Fig. 22a und 22b). Nur gehören die EMKe zu anderen Touren-

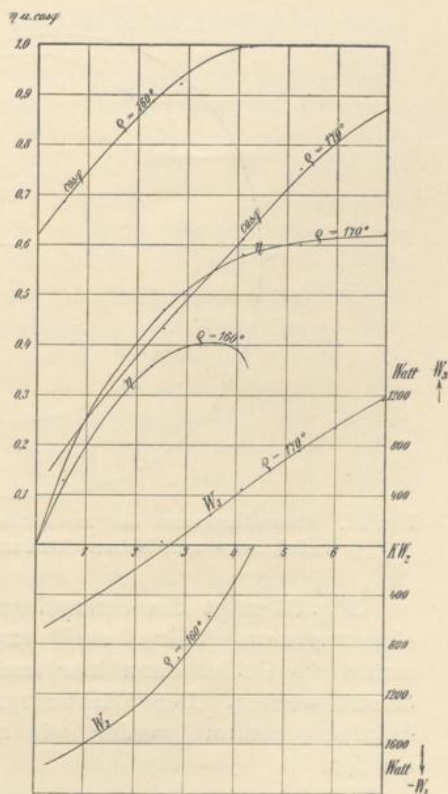


Fig. 33. Einfluß der Phasenkompensation auf den Wirkungsgrad bei der mechanisch getrennten Kaskade von Induktions- und Nebenschlußmotor.

zahlen des Hauptmotors, weil zwischen den Schlüpfungen jetzt die Beziehung (nach Gl. 16)

$$s_2 = 1 - \frac{1}{s_1} \cdot \frac{p_2}{p_3}$$

unabhängig von der Polzahl des Hauptmotors besteht.

Das Stromdiagramm ist also hierbei auch eine Schleife (Fig. 34), wie für das mechanisch gekuppelte Aggregat; sie enthält zwei motorische Arbeitsgebiete $a-b$ und $c-d$ und zwei generatorische Arbeitsgebiete $b-c$ und $d-a$. Der zwischen den beiden Leerlauf-tourenzahlen $n_0 = 650$ und $n_0' = 1420$ liegende Teil ist zum größten Teil labil, weil sich die EMK des Nebenschlußmotors der Spannung an den Schleifringen des Hauptmotors nicht das Gleichgewicht zu halten vermag (siehe S. 40).

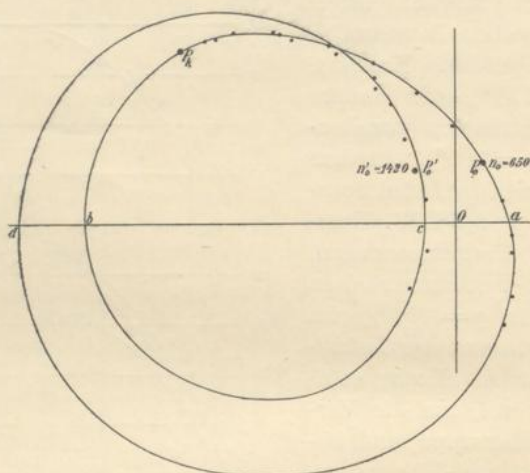


Fig. 34. Stromdiagramm der mechanisch getrennten Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor (Strom des Hauptmotors.)

Fig. 34 zeigt das Stromdiagramm bei Überkompensation, die eingetragenen Punkte sind experimentell aufgenommen. Das motorische Gebiet kann hier auch annähernd durch einen Kreis ersetzt werden. Der Wirkungsgrad und Leerlaufstrom des Induktionsgenerators werden, wie auf Seite 24 angegeben, berücksichtigt.

24. Übersynchroner Betrieb des Hauptmotors. Die Hilfsgruppe muß beim Übersynchronismus des Hauptmotors Leistung vom Netz aufnehmen und der Nebenschlußmotor muß als Generator Strom dem Hauptmotor zuführen. Die Verhältnisse sind analog

denen des einfachen Nebenschlußmotors; bei diesem nimmt auch der Rotor im Übersynchronismus Leistung vom Netz auf.

Es bedarf einer besonderen Vorrichtung, den Hauptmotor auf Übersynchronismus zu bringen, etwa durch einen Periodenumformer (Patent Scherbius) oder dadurch, daß der Hauptmotor von der selbsterregten Kommutatormaschine mit höherer Periodenzahl gespeist wird.

Die untersuchten Motoren waren im Übersynchronismus labil und fielen bei Belastung in ihren Synchronismus zurück. Die Ursache hiervon sind die hohen Verluste der Kommutatormaschine, die es verhindern, daß die Hilfsgruppe Leistung dem Hauptmotor abgeben kann.

VI. Die Scherbius-Motoren in der Kaskadenschaltung.

25. Die Drehfeld-Kommutatormotoren haben alle den Nachteil, daß ihre Tourenzahl sich vom Synchronismus nicht zu weit entfernen darf. Für den direkten Netzanschluß bei normalen Regulierbereichen gelingt es noch, die Kurzschlußspannung in den zulässigen Grenzen zu halten. In der Kaskade läuft aber der Hilfsmotor mit 4—5fachem, theoretisch sogar mit unendlichem Übersynchronismus. Ohne künstliche Mittel ist dabei keine befriedigende Kommutation zu erwarten. Bei den Drehfeld-Kommutatormotoren ist die Aufhebung der Kurzschluß-EMKE durch Wendefelder nicht möglich, man müßte dazu das Drehfeld aufheben, wodurch das Drehmoment vernichtet wäre. Es bleiben nur Kommutierungslöcher (Verringern des Flusses an der Kommutierungsstelle) und Widerstandsverbindungen zur Bekämpfung der Kurzschlußströme übrig.

Im Gegensatz zu den Drehfeld-Kommutatormotoren, in denen der Arbeitsstrom teilweise durch Induktion vom Drehfelde übertragen, teilweise dem Rotor direkt zugeführt wird, wird die Leistung bei den Scherbius-Motoren vom Netze dem Rotor zugeführt, wie bei den Gleichstrommotoren.¹⁾ Der Stator dient lediglich zur Erregung des Feldes. Um eine direkte Speisung zu ermöglichen, muß das Rotorfeld durch eine Kompensationswicklung aufgehoben werden.

Die Erregung des Feldes kann, wie bei den Gleichstrommotoren in Serie, in Nebenschluß oder gemischt erfolgen. Die Motoren sind in ihrem Verhalten den Gleichstrommotoren ähnlich.

Die Scherbius-Motoren besitzen drei oder mehrmals drei Pole und abgekürzten Wicklungsschritt (Fig. 35). Durch Kombination

¹⁾ Siehe Scherbius, 'Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, Jahrg. VIII, Seite 130.

der Erregerwicklung lassen sich verschiedene Phasenverschiebungen zwischen Strom und induzierter EMK des Rotors einstellen. Da bei drei Polen kein eigentliches Drehfeld, sondern ein dreifaches Wechselfeld besteht, ist es möglich, die Kommutation durch Wendepole zu verbessern¹⁾.

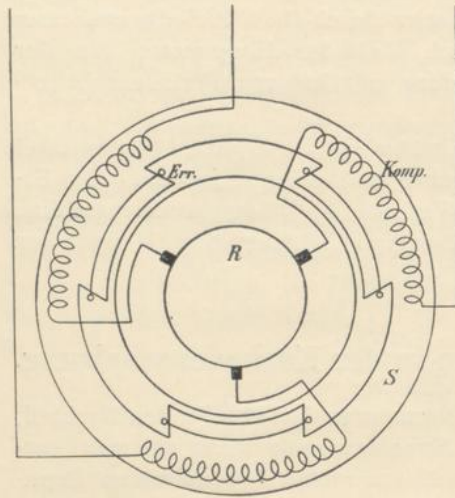


Fig. 35. Der Scherbius-Motor.

Für die Kaskadenschaltung kommt hauptsächlich die Unabhängigkeit der Motoren vom Synchronismus zugute. Die Kommutation hängt nur von der Periodenzahl der Feldpulsation und von der Rotorgeschwindigkeit ab, nicht aber von der Schlüpfung des Rotors gegenüber einem Drehfelde.

a) Seriomotor.

26. Die Wirkungsweise dieses Motors weicht nur insofern von der des Drehfeld-Kommutatormotors ab, als die Statorwicklung keine Arbeit auf den rotierenden Teil überträgt. Im Diagramm (Fig. 36) kommt dies

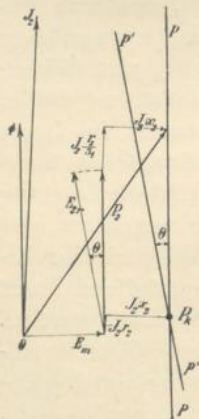


Fig. 36. Vektordiagramm der Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem Scherbius-Seriomotor.

dadurch zum Ausdruck, daß die Statorspannung E_m dem Strome um beinahe 90° voreilt (wegen der Eisenverluste etwas weniger). In der Kaskadenschaltung ist der Fluß bei derselben Geschwindigkeit ebenso groß wie bei der Netzperiodenzahl, da sekundäre Spannung und Periodenzahl beide der Schlüpfung s_1 proportional sind. Das Vektordiagramm gilt also für primäre Periodenzahl, nur müssen die Ohmschen Spannungsabfälle durch s_1 dividiert werden. Der geometrische Ort der Endpunkte von P_2 ist bei veränderlicher Geschwindigkeit die Gerade $p-p$. Ihre Neigung kann durch Kombination der Erregerphasen um den beliebigen Winkel θ geändert werden (s. Fig. 36). Durch

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2.

eine
Strö
Span
met
das
beit
Verl
schw
anal
scha
mut

ters
mut
daß
pun
von
zwei
EMK
Bei
im L
EMK
Mitt
und
gek
selb
auc
sich
Leis
theo
We
ze
wir
feld
dur
und
des

gun
wer
ben
zur
die

eine Inversion der Geraden $p-p$ erhalten wir den Kreis der Ströme des Seriennotors. Hierzu werden der Leerlaufstrom und Spannungsabfall in der Statorwicklung des Induktionsmotors geometrisch addiert, man erhält das in Fig. 37 dargestellte Arbeitsdiagramm. Die Leistungs-, Verlust-, Drehmoment- und Geschwindigkeitslinien werden analog, wie bei der Kaskadenschaltung des Drehfeld-Kommutatormotors, konstruiert.

Ein bemerkenswerter Unterschied zum Drehfeld-Kommutatormotor besteht darin, daß die Lage des Kurzschlußpunktes P_k von Θ , das heißt von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Gegen-EMK des Rotors nicht abhängt. Bei Stillstand wird nämlich im Rotor des Hilfsmotors keine

EMK induziert. Mit veränderlichem Winkel Θ verschiebt sich der Mittelpunkt des Kreises auf der Mittelsenkrechten zwischen P_0 und P_k . Der Radius des Kreises wächst ungefähr zu $\cos \Theta$ umgekehrt proportional. Im selben Verhältnis wächst auch, wie aus Fig. 37 ersichtlich, die maximale Leistung und könnte theoretisch beliebig hohe Werte erreichen. Die Grenze der Überlastbarkeit wird, wie bei dem Drehfeld-Nebenschlußmotor, durch die Übererregung und durch die Verluste des Rotors gezogen.

Der Einfluß der Sättigung des Seriennotors kann durch eine Korrektur berücksichtigt werden, indem man die Magnetisierungskurve als Vektordiagramm benützt (Fig. 38). OA ist der Magnetisierungsstrom, AR der Wattstrom zur Deckung der Eisen- und Kommutierungsverluste, $AC = E$ ist die EMK, die man auf die betreffende Geschwindigkeit des zu-

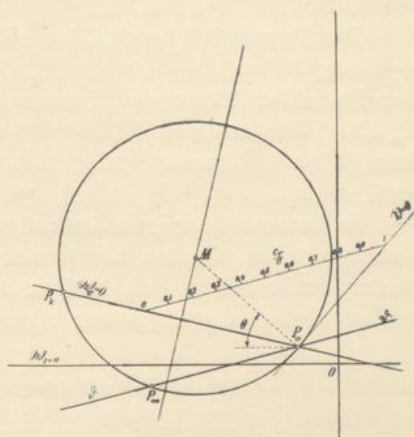


Fig. 37. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem Scherbius-Seriennotor.

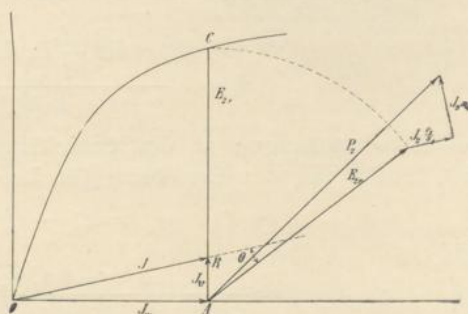


Fig. 38. Korrektur des Diagramms der Kaskadenschaltung von Induktions- und Scherbius-Seriennotor mittels der Magnetisierungskurve.

gehörigen Diagrammpunktes umrechnen muß. Die EMK ist um Θ gegen J verschoben, die Spannungsabfälle werden geometrisch addiert. Aus der abgegriffenen EMK läßt sich der Wert der Geschwindigkeit korrigieren.

Der Tourenabfall wird im Diagramm (Fig. 37) auf der Skala $s-s$ abgelesen. $s-s$ ist zu $P_\infty P_0$ parallel. Außer dem Verhältnis der Polzahlen hängt der Tourenabfall von der Lage des Punktes P_∞ ab. Wie aus Fig. 36 und 37 ersichtlich, liegt P_∞ bei wachsendem Winkel Θ immer näher zum Leerlaufpunkt; der Tourenabfall wird steiler.

In der unabhängigen Kaskadenschaltung muß der Rotor stärker erregt werden, um die Leerlaufströme beider Induktionsmaschinen decken zu können. Im übrigen ist das Verhalten der Schaltung analog dem des gekoppelten Aggregates.

b) Der Nebenschlußmotor.

27. Bei konstanter Spannung besitzt der Scherbius-Nebenschlußmotor konstantes Feld, weshalb die Tourenzahl vom Leerlauf bis Vollast nur wenig fällt. Ähnlich verhält er sich auch in der Kaskadenschaltung, weil sein Feld konstant bleibt:

$$\Phi_n = \frac{E_2}{k c_2 w_n} = \frac{s_1 E'_{1s}}{k s_1 c w_n} = \text{konst.} \dots (40)$$

Die Leerlauftourenzahl eines Scherbius-Nebenschlußmotors ist¹⁾

$$n_0 = \frac{P_2 \cos \Theta + P_2 \sin \Theta \cdot \left(\frac{x_2}{r_2}\right)}{k \cdot \Phi_n} \dots (41)$$

die Arbeitsspannung an den Schleifringen ist $P_2 = s P'_{1s}$, demnach mit Einführung der Beziehung für Leerlauf

$$n_{0k} = (1 - s_0) n_1 \dots (42)$$

wird

$$s_0 = \frac{k n_1 \Phi_n}{k n_1 \Phi_n + E'_{1s} \left[\cos \Theta + \sin \Theta \cdot \left(\frac{x_2}{r_2}\right) \right]} \dots (43)$$

Wir setzen die Gegen-EMK des Rotors bei der synchronen Tourenzahl

$$E_n = k n_1 \Phi_n \dots (44)$$

obwohl der Synchronismus keine ausgezeichnete Geschwindigkeit des Scherbius-Motors ist. Somit wird

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

$$n_{0k} = \frac{E'_{1s} \left[\cos \Theta + \sin \Theta \left(\frac{x_2}{r_2} \right) \right]}{k \Phi_n + \frac{E'_{1s}}{n_1} \left[\cos \Theta + \sin \Theta \left(\frac{x_2}{r_2} \right) \right]} \dots (45)$$

z. B. für $\Theta = 0$

$$n_{0k} = \frac{E'_{1s}}{k \Phi_n + \frac{E'_{1s}}{n_1}} \dots (46)$$

Bedeutet \mathfrak{Z}_2 die Summe der Impedanzen der Rotorwicklung des Hauptmotors und der Kompensations- und Rotorwicklung des Nebenschlußmotors, so ist der sekundäre Arbeitsstrom¹⁾

$$\mathfrak{I}_{a2} = \frac{\mathfrak{E}'_{1s}}{\mathfrak{Z}_2} - \frac{E_n e^{j\Theta}}{\mathfrak{Z}_2} \dots (47)$$

Dies gilt nur unter Vernachlässigung des Spannungsabfalles, den der Magnetisierungsstrom des Hilfsmotors im Rotor des Hauptmotors hervorruft; dieser Einfluß ist geringfügig. Der erste Teil des Stromes in der Gl. 47 entsteht, wenn die Hauptpole des Nebenschlußmotors unerreget sind. Das Aggregat liefe dabei als Induktionsmotor mit vermehrter Rotorimpedanz. Der Strom wird durch einen Kreis J'_2 dargestellt (siehe Fig. 39).

Der zweite Teil des Stromes ist der Kompensationsstrom, analog zu demjenigen des Drehfeld-Kommutatormotors. Dieser wird auch durch einen Kreis dargestellt, dessen Durchmesser den Winkel

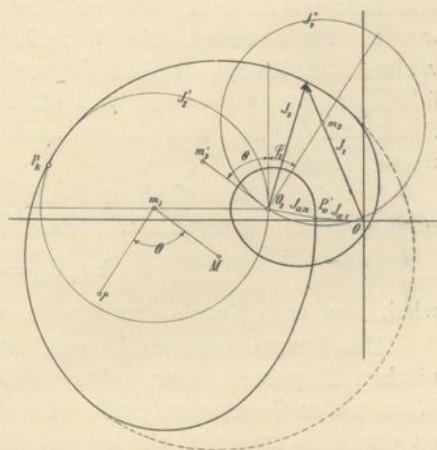


Fig. 39. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung von Induktions- und Scherbius-Nebenschlußmotor.

$$\varphi_2 = \text{arc tg} \frac{r_2}{2x_2} \dots (48)$$

mit der Ordinatenachse bildet, wie man das durch Aufzeichnung der Impedanzlinie $\frac{\mathfrak{Z}_2}{1-s_1}$ findet. Dieser Kreis wird durch $\frac{E'_{1s}}{E_n}$

¹⁾ Aus Superposition der Spannung und der Rotations-EMK.

multipliziert und um den Winkel Θ gedreht, dann zu dem ersten Kreis geometrisch addiert. Die Addition zweier Kreise ergibt ebenfalls einen Kreis¹⁾, es genügt, die Mittelpunktsvektoren geometrisch zu addieren. Der Kurzschlußpunkt bleibt der des ersten Kreises, weil der Strom J_2'' bei Stillstand Null ist. Hieraus ist der Radius bestimmt (Fig. 39).

Das Kreisdiagramm gilt nur solange, als der Fluß des Kommutatormotors konstant ist. Beim Synchronismus des Hauptmotors ist die sekundäre Spannung Null, deshalb kann auch kein Feld bestehen, falls der Hilfsmotor nicht direkt vom Netz erregt wird, was bei den Scherbius-Motoren möglich ist. Ist dies nicht der Fall, so verhält sich das Aggregat in der Nähe des Synchronismus des Hauptmotors, wie ein Induktionsmotor mit vermehrter Rotorimpedanz. Folglich muß das Aggregat, wie bei der Schaltung mit dem Drehfeld-Nebenschlußmotor, zwei Leerlaufpunkte haben und das Diagramm ist, wie dort auch, eine Schleife.

Für den übersynchronen Betrieb müssen zwei Phasen an den Schleifringen vertauscht werden, damit das Drehmoment des Nebenschlußmotors in dem früheren Sinne wirkt. Die Arbeitsverhältnisse werden zwar durch die vermehrten Eisen- und Kommutationsverluste ungünstig, dürften dennoch besser sein, als bei den Drehfeld-Kommutatormotoren, weil die Schlüpfung ohne Einfluß auf die Kommutation ist und diese auch durch Wendepole verbessert werden kann.

Bei der mechanisch getrennten Anordnung muß das Nebenschlußfeld so eingestellt werden, daß

$$kn_s \Phi_n = s_1 E_{1's} \dots \dots \dots (49)$$

wird, was man durch den Erregerstrom bewerkstelligen kann.

Das Stromdiagramm ist qualitativ dasselbe, wie bei der mechanischen Kupplung, nur gehören die einzelnen Punkte zu anderen Werten der Geschwindigkeit. Die Kompensation scheint einfacher zu erreichen zu sein, als bei den Drehfeld-Kommutatormotoren, indem man verschieden große Widerstände in den Erregerwicklungen der drei Phasen vorschaltet.

c) Der Compoundmotor.

28. Die zwei Erregerwicklungen der Hauptschluß- und Nebenschlußerregung sind auf zwei getrennte Pole, die achsial oder am Umfange nebeneinander angeordnet sind, angebracht. Jedes der Felder induziert in den Rotorwindungen eine der Geschwindigkeit

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. I.

proportionale EMK, und da das Hauptfeld bis auf die Sättigung dem Arbeitsstrom proportional ist, kann ein Tourenabfall oder Erhöhung bei Belastung erzielt werden, wie bei den Gleichstrom-Kompoundmotoren¹⁾.

Sei E_s die von dem Hauptschlußfelde, E_n die von dem Nebenschlußfelde induzierte EMK; die Zusammensetzung der EMKe ist aus Fig. 40 ohne weiteres ersichtlich. Der Fluß der Seriwicklung ist mit dem Arbeitsstrom ungefähr in Phase, der der Nebenschlußwicklung eilt der Spannung der Schleifringe um 90° nach. Die EMKe sind gegenüber den zusammengehörigen Flüssen um die Winkel θ_1 und θ_2 verschoben.

Bei Belastung nimmt die EMK E_s zu und erfordert eine Erhöhung der Spannung P_2 . Folglich muß die Tourenzahl des Hauptmotors fallen. Die Größe des Tourenabfalles regelt man durch Shuntierung der Hauptschlußwicklung mittels Widerständen oder besser mit Drosselspulen, die die Phase des Feldes nicht verschieben. Die Leerlauf-tourenzahl wird durch Φ_n (Erregerstrom), die Kompensation durch θ_1 (Kombination der Erregerphasen) eingestellt. Die Seriwicklung eignet sich für feine Einstellung des Phasenwinkels nicht.

Das Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit Compoundmotor kann aus Superposition der beiden Fälle (Serie- und Nebenschlußmotor) abgeleitet werden. Der sekundäre Arbeitsstrom ist unter Vernachlässigung des Spannungsabfalles, den der Nebenschluß-Erregerstrom im Rotor des Hauptmotors hervorruft:

$$\mathfrak{I}_{2a} = \frac{s_1 \mathfrak{E}'_{1s} - \mathfrak{E}_s - \mathfrak{E}_n}{\mathfrak{Z}_2} \dots \dots \dots (50)$$

Nach Fig. 40 können wir schreiben

$$\mathfrak{I}_{2a} = \frac{s_1 E'_{1s} - k_1 n \cdot \mathfrak{I}_{2a} \mathfrak{Z}_s e^{-j\theta_1} - k_2 n \cdot \Phi_n e^{-j\theta_2}}{\mathfrak{Z}_2} \dots (51)$$

wobei \mathfrak{Z}_s die Erregerreaktanz der Seriwicklung ist. Daraus

¹⁾ Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

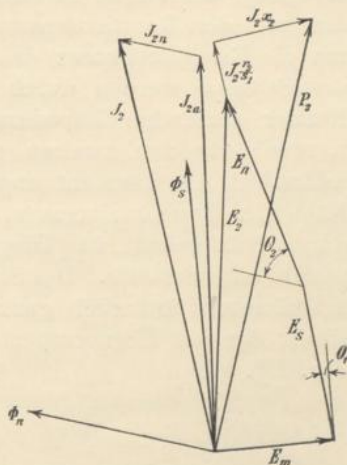


Fig. 40. Vektordiagramm der Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem Scherbius-Kompoundmotor.

$$\mathfrak{I}_{2a} = \frac{E'_{1s}}{\frac{\mathfrak{Z}_2}{1-s_1} - \frac{1-s_1}{s_1} \mathfrak{Z}_s e^{-j\theta_1}} - \frac{E_n e^{-j\theta_2}}{\frac{\mathfrak{Z}_2}{1-s_1} + \mathfrak{Z}_s e^{-j\theta_1}} \quad (52)$$

Die zwei Glieder der Gl. 52 wollen wir als zwei superponierte Ströme ansehen. Der erste Teil ist derselbe wie bei reiner Serieerregung, der zweite ist analog dem Strome des Nebenschlußmotors, der von der Rotationsspannung erzeugt wird. Die Reaktanz ist um die Erregerreaktanz des Hauptfeldes vergrößert. Beide Teile des Stromes werden durch je einen Kreis dargestellt, da die im Nenner stehenden Impedanzen durch gerade Linien abgebildet werden; für den zweiten gilt dies nur solange, als das Nebenschlußfeld als konstant angesehen werden kann, also bis in die Nähe des Synchronismus n_1 . Hierbei muß der sekundäre Strom durch Null gehen, das Diagramm hat, wie bei dem Nebenschlußmotor, eine Schleife. Das Stromdiagramm ist also dem des Nebenschlußmotors äußerlich ganz ähnlich, im idealen Falle ist es ein Kreis, der bei Überkompensation den Nullpunkt umschließt (siehe Fig. 39).

mil
die
am
die
ich
der
Gra
nisc
Geh
und

We
ma