

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen  
Induktionsmotoren und Kommutatormotoren**

**Rajz, Alexius**

**1911**

II. Der Drehfeld-Serienmotor in der mechanisch gekuppelten  
Kaskadenschaltung

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

## 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.

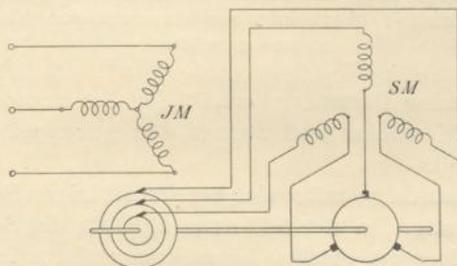


Fig. 1. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch gekuppelten Seriemotor bei offener Statorwicklung des letzteren.

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 Leerlaufschlupfung mit vermehrtem Rotorwiderstand.

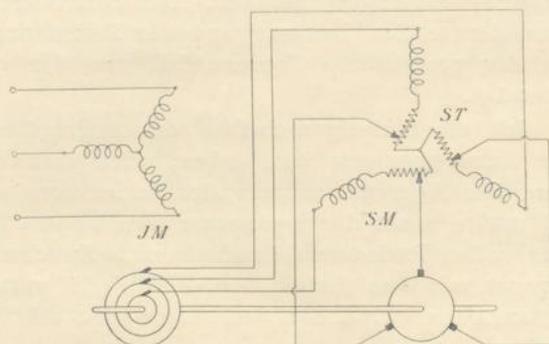


Fig. 2. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch gekoppelten Seriomotor über einen Serientransformator (als Autotransformator ausgeführt).

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  $\varrho$  zusammen<sup>1)</sup>. Durch die Sättigung eines Serientransformators wird

<sup>1)</sup> 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 Seriemotors<sup>1)</sup> 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  $\varrho$  zusammen und erzeugen den Hauptkraftfluß  $\Phi$ , 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  $90^\circ$  (eine halbe Polteilung) vor. Die zeitliche

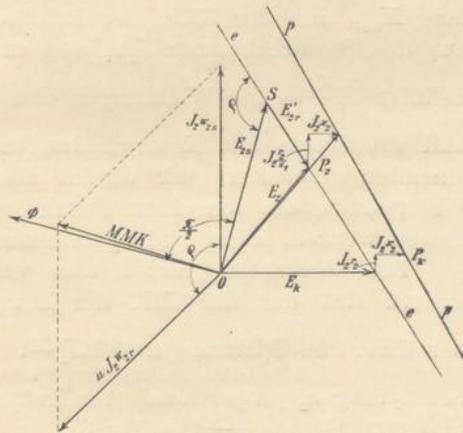


Fig. 3. Spannungsdiagramm der Kaskadenschaltung mit einem mechanisch gekuppelten Seriemotor.

<sup>1)</sup> 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  $\varrho$  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 Induktionsmotor<sup>1)</sup>. 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

<sup>1)</sup> 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  $90^\circ$  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 Kreis<sup>1)</sup>.

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 ist<sup>2)</sup>. 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 Kreisdiagrammen<sup>1)</sup>, die Linie der Nutzleistung  $P_0 P_k$ .

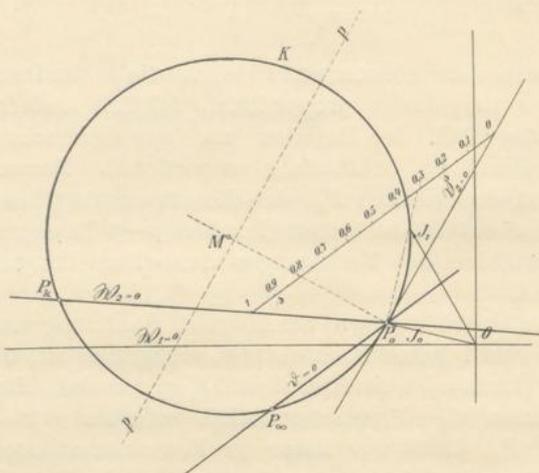


Fig. 4. Theoretisches Kreisdiagramm der mechanisch gekoppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Seriemoor.

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  $P_\infty$ , 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  $P_\infty$  im Spannungsdiagramm aufgefunden werden kann.

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

<sup>1)</sup> 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 schreiben<sup>1)</sup>

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

worin  $\Delta e$  = 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,
- $\Phi$  = 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.

<sup>1)</sup> Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

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

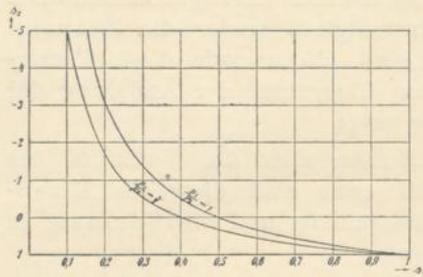


Fig. 5. Zusammenhang zwischen der Schlüpfung des Induktionsmotors ( $s_1$ ) und der des Kommutators ( $s_2$ ) bei verschiedenem Polverhältnis und fester Kupplung.

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 gekoppeltem 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 werden<sup>1)</sup>. 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.

<sup>1)</sup> Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 1. Teil.

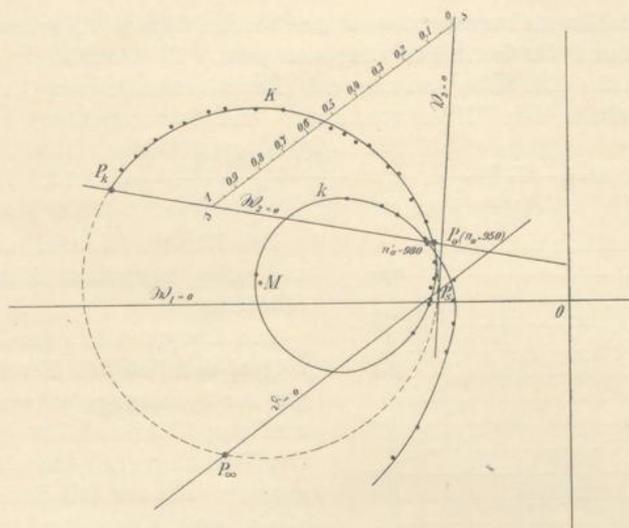


Fig. 6. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit mechanisch gekoppeltem Seriemotor.

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  $3 \times 72$  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

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

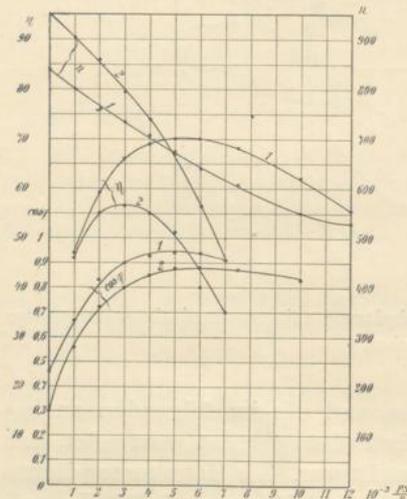


Fig. 7. Arbeitskurven der mechanisch gekuppelten Kaskadenschaltung von Induktions- und Seriomotor (1) und Bremskurven bei Widerstandsregelung mittels Rotorwiderstände (2).

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 erkennen<sup>1)</sup>, denn je kleiner der Winkel  $\varrho$ , 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

<sup>1)</sup> Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. V, 2. Teil.

Die Bürsten wurden um  $165^\circ$  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 Touren-

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

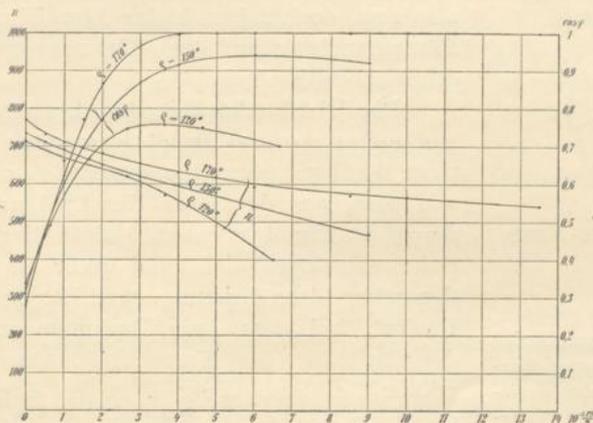


Fig. 8. Einfluß der Bürstenstellung auf Tourenabfall und Leistungsfaktor bei der mechanisch gekuppelten Kaskade mit Seriemotor.

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 voreilenden 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  $\psi_{2r}$  der räumliche Winkel zwischen Feldmaximum und

Strommaximum des Rotors bedeutet<sup>1)</sup>. 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

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

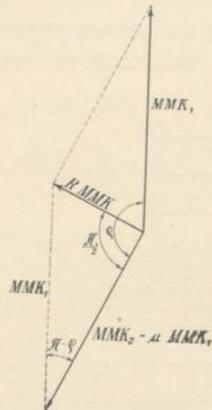


Fig. 9. Diagramm der MMKe für besten Wirkungsgrad des Seriennotors; der Rotorstrom eilt dem Flusse um  $\frac{\pi}{2}$  nach.

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  $\varrho$  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  $P_\infty$  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

<sup>1)</sup> 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 entspricht<sup>1)</sup>. 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

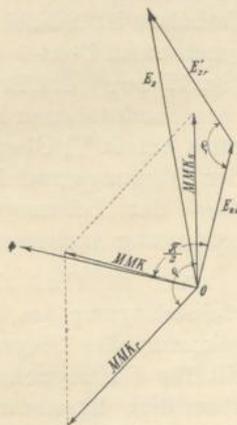


Fig. 10. Vektordiagramm für Übersynchronismus des Hauptmotors in Kaskade mit einem mechanisch gekoppelten Seriemotor.

<sup>1)</sup> 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

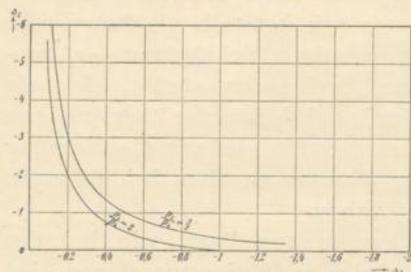


Fig. 11. Zusammenhang der Schlüpfungen des Induktions- und Seriemosors im Übersynchronismus des Hauptmotors bei mechanisch gekuppelter Anordnung.

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 Transformatorsättigung<sup>1)</sup>. Unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes des Serietransformators bekommt das Diagramm die in Fig. 13 dargestellte Form. Dieses gilt für Untersynchronismus, der Winkel  $\varphi'$  der MMKe wird gegenüber dem Bürstenwinkel  $\varphi$  vergrößert. Da der Winkel zwischen Fluß und Rotorstrom auch vergrößert wird, erhöht die Transformatorsättigung im Untersynchronismus das Drehmoment. Für Übersynchronismus gilt das Gegenteil.

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

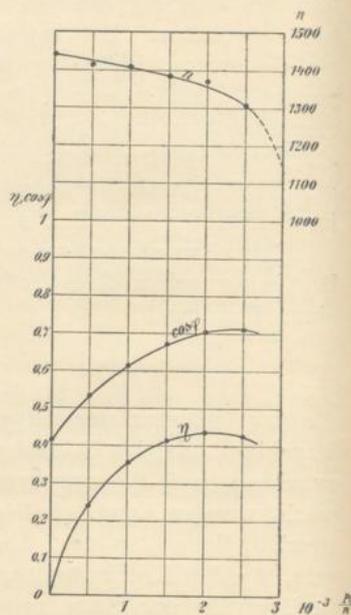


Fig. 12. Arbeitskurven der Kaskadenschaltung mit mechanisch gekuppeltem Seriemosor im Übersynchronismus des Induktionsmotors.

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 im 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.

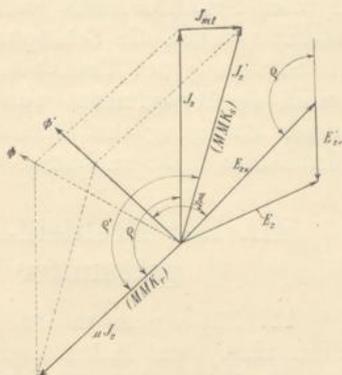


Fig. 13. MMK-Diagramm der Kaskadenschaltung mit Seriemotor unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes des Serietransformators.

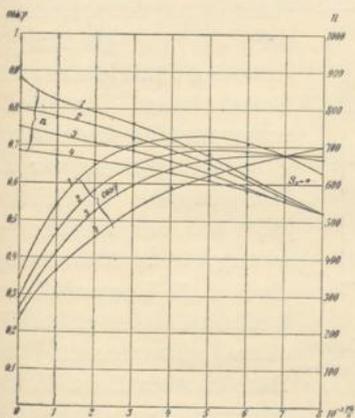


Fig. 14. Einfluß der Sättigung des Serietransformators auf Tourenzahl und Leistungsfaktor der Kaskadenschaltung.

- 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.)

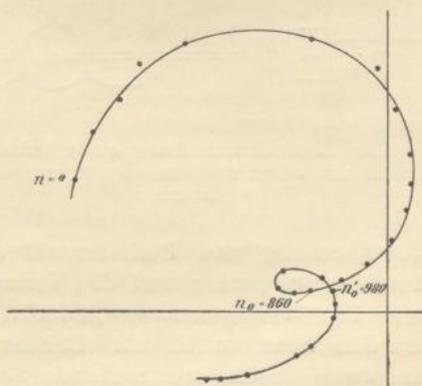


Fig. 15. Stromdiagramm der Kaskadenschaltung mit Seriemotor bei gesättigtem Serietransformator.

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,

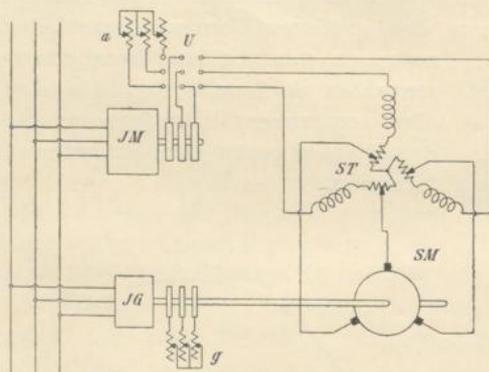


Fig. 16. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors mit einem mechanisch getrennten Seriemotor.

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.