

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen  
Induktionsmotoren und Kommutatormotoren**

**Rajz, Alexius**

**1911**

V. Der Drehfeld-Nebenschlußmotor in mechanisch getrennter  
Kaskadenschaltung

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

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

19. Wahl der Polzahl, Kommutation<sup>1)</sup>. 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.

<sup>1)</sup> 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.

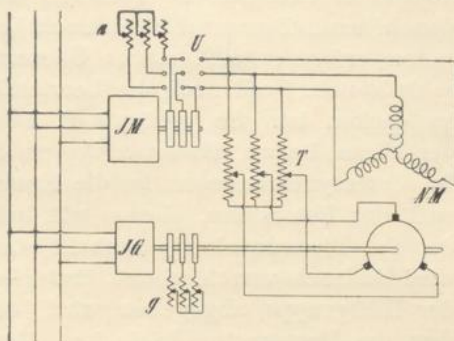


Fig. 30. Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors ( $JM$ ) mit einem mechanisch getrennten Nebenschlußmotor ( $NM$ ), der einen Induktionsgenerator ( $JG$ ) antreibt.

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 Leerlauftourenzahl  $n$  (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-Nebenschlußmotor<sup>1)</sup>. Im Untersynchronismus ist die Kompensation besonders schwierig, weil der Rotorstrom, ebenso wie bei der gekuppelten Anordnung, um den Phasenwinkel  $\varrho$  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  $s_2 = -4$

<sup>1)</sup> 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 herabgesetzt 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.

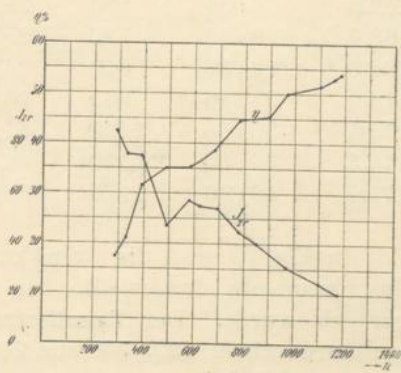


Fig. 31. Regulierung eines Induktionsmotors bei konst. Drehmoment und  $\cos \varphi = 1$  mittels mechanisch getrennten Nebenschlußmotors. Kurve des totalen Wirkungsgrades und des Rotorstromes des Nebenschlußmotors.

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\*

$\varrho$	$u_e$	$n$	$J_1$	$W_1$	$\sqrt{3}J_{2r}$	$W_3$
117,0	2:36	490	24,8	4100	47	1245 <sup>1)</sup>
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 <sup>2)</sup>
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 Leerlauf-tourenzahlen 520, 700 und 900 eingestellt, jedoch war die letzte Tourenzahl bei Leerlauf labil aus dem auf Seite 40 angegebenen Grunde; der Hauptmotor lief bei Entlastung bis 1000 Touren hinauf.

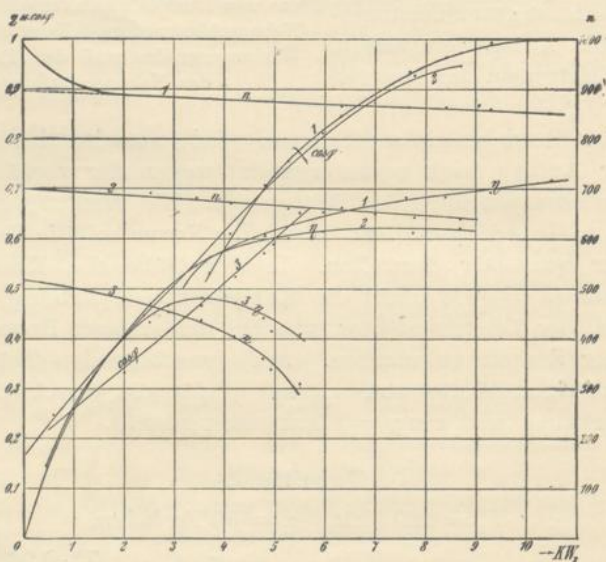


Fig. 32. Arbeitskurven der mechanisch getrennten Kaskadenschaltung eines Induktionsmotors und eines mit Induktionsgenerator gekuppelten Nebenschlußmotors.

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

<sup>2)</sup> 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-

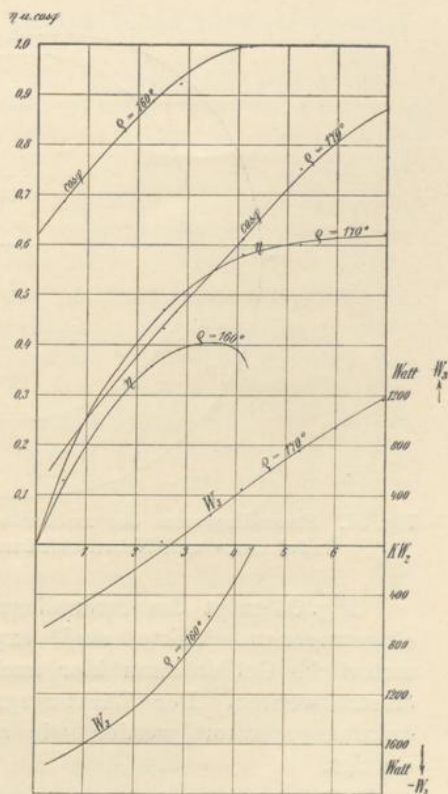


Fig. 33. Einfluß der Phasenkompensation auf den Wirkungsgrad bei der mechanisch getrennten Kaskade von Induktions- und Nebenschlußmotor.

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).

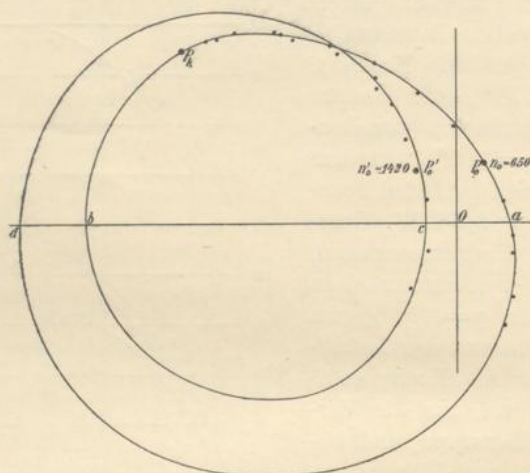


Fig. 34. Stromdiagramm der mechanisch getrennten Kaskadenschaltung von Induktions- und Nebenschlußmotor (Strom des Hauptmotors.)

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.<sup>1)</sup> 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

<sup>1)</sup> Siehe Scherbius, 'Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, Jahrg. VIII, Seite 130.