

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Die Kaskadenschaltung von dreiphasigen
Induktionsmotoren und Kommutatormotoren**

Rajz, Alexius

1911

I. Einleitung

[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.