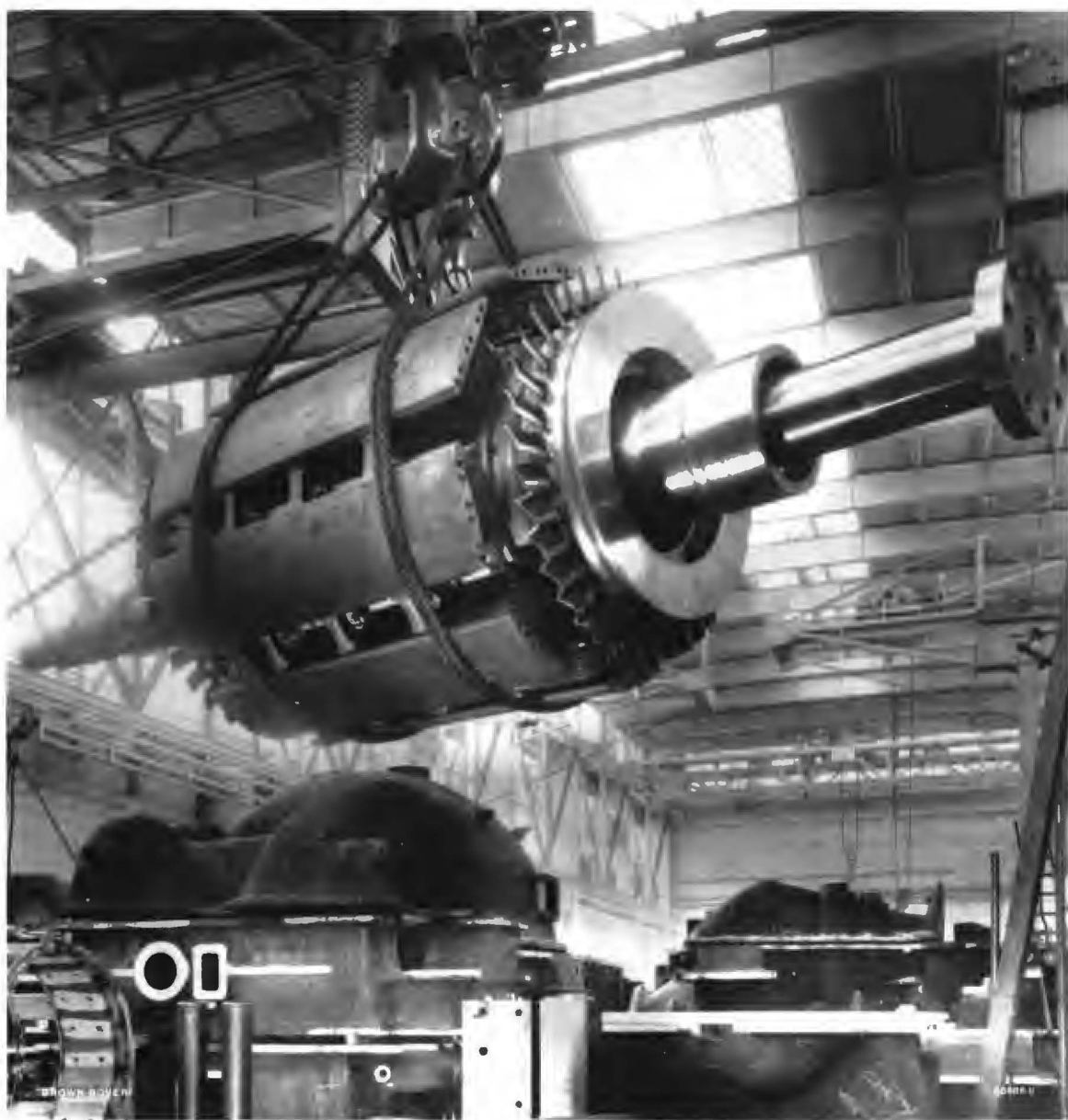


BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

Grosse Wasserkraftgeneratoren

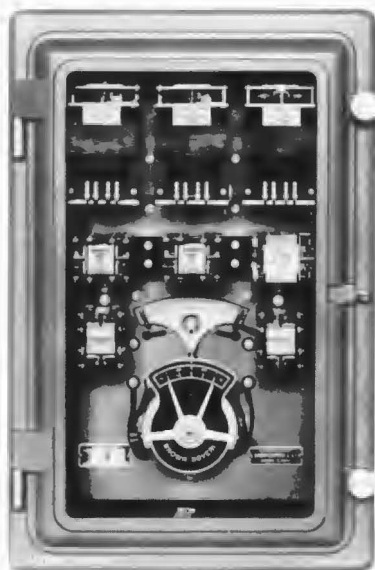


Polrad eines Dreiphasengenerators von 30 000 kVA bei 750 U/min

Massive, leicht abnehmbare Pole
charakterisieren diese einfache und im Betrieb bewährte Konstruktion.

Für Ihr Kraftwerk

Synchronisier-, Regulier-, Schutz-Einrichtungen



Schnellsynchronisier-Einrichtungen

für Kraftwerke und Unterstationen; sie brauchen wenig Platz, wenig Leistung, keine Wartung, keine Einstellung.

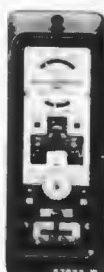
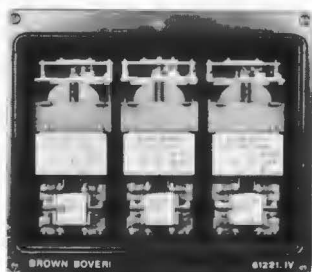
Rasch und sicher!



Schnellregler

Ein geeignetes Modell für jede Maschinengrösse und für jede Regulieraufgabe.

Präzise und solide!



Generatorschutz-Einrichtungen

bestehen aus bewährten Apparaten. Verwenden Sie diese Ausrüstungen zum Schutz von neuen als auch alten Maschinen.

Anpassungsfähig und zuverlässig!

Seit 1907 kamen über 50 000 Brown Boveri Schnellregler in Betrieb. Maschinen von mehreren Millionen kVA Leistung werden von Brown Boveri Apparaturen synchronisiert und geschützt. — Unsere Erfahrungen stützen sich auf zielbewusstes Forschen sowie auf eingehende Versuche im Prüffeld und im Betrieb. Sie geben Ihnen die Gewähr für die Lieferung moderner und zweckmässiger Apparate.

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER A.-G. BROWN, BOVERI & C^{IE} IN BADEN

XXXVI. JAHRG.

JULI/AUGUST 1949

Nr. 7, 8

Die Brown Boveri Mitteilungen erscheinen in monatlichen Heften.
Der Nachdruck von Aufsätzen und die Wiedergabe von Abbildungen sind unter Quellenangabe gestattet.

Inhalt:

	Seite		Seite
Einleitung	231	Die Erregung von Grossgeneratoren	258
Die Bemessung grosser Wasserkraftgeneratoren	232	Die Stabilität von Synchrongeneratoren	264
Zusammenbau und Kühlung von Grossgeneratoren für Wasserturbinenantrieb	239	Generatorschutz	271
Konstruktionsprobleme bei grossen Wasserkraftgeneratoren	246	Interessantes in Kürze:	
Pendelgenerator und Turbinenregulierung	256	Unser 50 000. Schnellregler	273

Einleitung

Der Mangel an elektrischer Energie hat es mit sich gebracht, dass in den letzten Jahren fast alle Länder mehr oder weniger drastische Massnahmen zur Einschränkung des Energieverbrauches einführen mussten. Dass bei einer solchen Situation, trotz mancherlei Hindernissen politischer und wirtschaftlicher Art, viele neue Kraftwerke projektiert und gebaut werden, ist besonders erfreulich.

Wir haben uns nun dieser Situation insbesondere auf dem Gebiete der grossen Wasserkraftgeneratoren angepasst, und da wir an dieser Stelle schon lange nicht mehr zusammenfassend über das betreffende technische Gebiet berichtet haben, schien uns der Moment gekommen, dies im vorliegenden Sonderheft nachzuholen.

Die Probleme, die sich bei der Konstruktion von Wechselstromgeneratoren stellen, sind sehr mannigfaltig. Neben denjenigen, die mit der Dimensionierung der Maschinen und der Einhaltung der elektrischen Garantien im Zusammenhang stehen, beschäftigen den Konstrukteur vor allem solche mechanischer und konstruktiver Art, bedingt einerseits durch die verlangten Drehzahlen und Schwungmomente, andererseits durch Kurzschlussfestigkeit, Betriebssicherheit, Transport- und Montagefragen.

Der Bau von Wechselstromgeneratoren stellt aber nicht nur grosse Anforderungen an den Berechnungsingenieur und den Konstrukteur, sondern auch an die Fabrikation und nicht zuletzt an die Monteure, die die grossen Maschinen oft unter schwierigen Verhältnissen zu montieren haben. In direktem Zusammenhang mit der Betriebsführung stehende Fragen, wie diejenigen der Erregung und Regulierung, der Stabilität

und des Generatorschutzes, werden im vorliegenden Heft ebenfalls erörtert.

Es sei uns erlaubt, zwei wichtige Aspekte der Generatordimensionierung herauszugreifen: Beim Entwerfen neuer Kraftwerke taucht immer wieder das Problem des Kurzschlussverhältnisses, der synchronen und der transienten Reaktanz der Maschinen auf. Man stösst oft noch auf die Meinung, dass im Hinblick auf die Stabilität des Betriebes für diese Grössen äusserst strenge Vorschriften notwendig seien, was grössere Maschinen bedinge. Es wird aber allzuleicht übersehen, dass heute rasch wirkende Regler zur Verfügung stehen, die mit der notwendigen Präzision und Sicherheit die Erregung beeinflussen und die Aufrechterhaltung der Stabilität des Generators gewährleisten. Diese Regler erlauben es, mit einem harmonisch dimensionierten Generator eine technisch zumindest gleichwertige Lösung mit kleineren Kosten zu erreichen.

Die Unterbringung eines anormal grossen Schwungmomentes bietet selbstverständlich für den Konstrukteur keinerlei grundsätzliche Schwierigkeiten. Wenn wir aber auf die Frage der Schwungmomentbemessung eingehen, so geschieht dies lediglich aus wirtschaftlichen Gründen. Theorie und Versuche haben nämlich gezeigt, dass ein Schwungmoment, das sich dem „natürlichen“ Schwungmoment nähert, im allgemeinen für die Stabilität der Drehzahlregulierung genügt. Ferner sind wir der Ansicht, dass die Begrenzung der Drehzahl-erhöhung bei Vollastabschaltung mit einem vergrösserten Schwungmoment, besonders bei raschlaufenden Maschinen, oft zu teuer bezahlt wird.

(MS 933a)

J. Schmutz

Die Bemessung grosser Wasserkraftgeneratoren

621.313.322 82

Bei der Mannigfaltigkeit der Bauformen grosser Wasserkraftgeneratoren ist es für Projektbearbeiter besonders erwünscht, die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Baugrössen sowie Gewicht und Preis der Maschinen zu kennen, um die wirtschaftlichste Lösung vorsehen zu können. Der Verfasser beantwortet diese Frage eingehend, nachdem er zuvor die Grenzleistungen angegeben hat, die heute mit solchen Maschinen überhaupt erreichbar sind.

Es gibt wohl kaum eine Art elektrischer Maschinen, deren Dimensionierung und Bauform von so vielen Faktoren beeinflusst wird, wie der Synchron-Generator mit Wasserturbinenantrieb. Während Turbogeneratoren sozusagen über den ganzen Leistungsbereich eine Drehzahl von 3000 U/min bei 50 Hz, bzw. 3600 U/min bei 60 Hz aufweisen, erstreckt sich der Drehzahlbereich bei Wasserturbinengeneratoren von ca. 60 bis 1000 U/min. Bei gleicher Betriebsdrehzahl und Leistung kann die Durchgangsdrehzahl, für welche das Polrad mechanisch zu bemessen ist, in weiten Grenzen variieren. Dazu kommen die Verschiedenheiten des Schwungmomentes und manchmal noch besondere Anforderungen in bezug auf kapazitive Belastbarkeit, Kurzschlussverhältnis usw. Es ist daher nur selten möglich, für verschiedene Anlagen auch bei gleichen Maschinenleistungen gleiche Generatoren zu verwenden.

Im Zuge der Projektierung eines grossen Wasserkraftwerkes stellt sich bei der Bearbeitung des maschinellen Teils sehr rasch die Frage nach der maximalen Leistung, die eine Turbinengeneratorgruppe bewältigen kann. Man hat sich daran gewöhnt, dass diese Grenzleistungen mit den Fortschritten der Technik sprunghaft höher wurden. Generatorleistungen von 100 000 kVA sind schon erreicht und übertroffen worden. Bei den verschiedenen Drehzahlen sind auch die erreichbaren Grenzleistungen verschieden; auf die Zusammenhänge soll in dieser Arbeit hingewiesen werden.

1. Heute erreichbare Grenzleistungen von Wasserkraftgeneratoren

Aus der bekannten Leistungsgleichung für Synchronmaschinen

$$P_s = c \cdot B_{\delta} \cdot A \cdot D^2 \cdot l \cdot n \quad \text{kVA}$$

mit

D = Statorblechbohrung

l = Eisenlänge

n = Drehzahl in U/min

B_{δ} = maximale Luftspaltinduktion im Leerlauf und bei Nennspannung

A = sog. Strombelag des Stators (Ampère-Leiter pro cm Umfang)

c = Konstante

erhält man beim Einsetzen von Werten für B_{δ} und A , wie sie bei modernen Grossmaschinen üblich sind, für Drehstrommaschinen die einfache Gleichung

$$P_s \approx 5 \cdot D^2 \cdot l \cdot n \quad \text{kVA}$$

Die Grenzleistung ist damit bei gegebener Drehzahl festgelegt durch die grössten zulässigen Werte von D und l . Der Durchmesser D ist bestimmt durch die grösste zulässige Umfangsgeschwindigkeit v_{max} , die Eisenlänge l einerseits durch mechanische Bedingungen (kritische Drehzahl), andererseits durch die Möglichkeit einer genügenden Kühlung der Maschine.

Führt man in die Gleichung an Stelle von D die maximale Umfangsgeschwindigkeit ein, so wird

$$P_s \approx 5 \left(\frac{60}{\pi} \cdot \frac{v_{max}}{n_{max}} \right)^2 \cdot l \cdot n \quad \text{kVA}$$

oder mit $k = \frac{n_{max}}{n} = \frac{\text{max. Durchgangsdrehzahl}}{\text{Betriebsdrehzahl}}$

$$P_s \approx 5 \left(\frac{60}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{v_{max}^2 \cdot l}{k^2 \cdot n} \quad \text{kVA}$$

Verwendet man für Pole und Kränze Material, wie es heute ohne Schwierigkeiten in einwandfreier Qualität erhältlich ist, so ist bei Polrädern mit ungeteilten Kranzringen eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 160 m/s zulässig.

Als maximale Eisenlänge darf bei gut ausgebildeter Ventilation ca. 4 m angenommen werden. Damit ergibt sich als Grenzleistung

$$P_{s_{max}} \approx \frac{1,86 \cdot 10^8}{k^2 \cdot n} \quad \text{kVA}$$

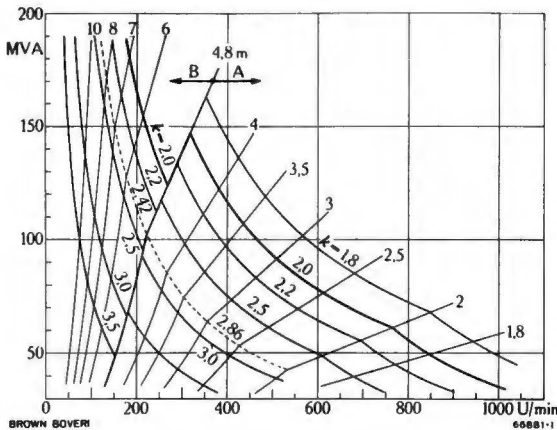


Abb. 1 — Maximale erreichbare Leistungen in Abhängigkeit der Betriebs- und Durchgangsdrehzahl

Abszisse = Betriebsdrehzahl.

Bereich A = einteilige Radkräne, $v_{max} = 160$ m/s

Bereich B = mehrteilige Radkräne, $v_{max} = 135$ m/s

Zu beachten ist die Leistungsreduktion an der Übergangsstelle (Statorbohrung 4,8 m) der im Umfang einteiligen zu den mehrteiligen Radkränen. Ebenso ist die grosse Leistungssenkung mit zunehmendem Verhältnis k (Durchgangsdrehzahl) bemerkenswert.

Die Maximalleistung bei konstantem Faktor k ist also umgekehrt proportional der Drehzahl n . Bei verschiedenen Faktoren k ergibt sich somit eine Schar gleichseitiger Hyperbeln. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt, ebenso die zugehörigen Durchmesser D der Statorbohrungen, die in Form von Linien erscheinen, die durch den Nullpunkt gehen.

Die Möglichkeit des Transportes setzt dem Rotordurchmesser D bei ungeteilten Radkränen eine obere Grenze. Übersteigt dieser ca. 4,8 m, so erfordert die Bahngängigkeit eine Unterteilung im Umfang. Für solche unterteilte Kräne dürfte bei Verwendung von normalen Materialien die maximal zulässige Umfangsgeschwindigkeit bei ungefähr 135 m/s liegen. Mit diesem Wert und bei einer maximalen Eisenlänge von 4 m erhält man

$$P_{s,max} \approx \frac{1,33 \cdot 10^8}{k^3 \cdot n} \quad \text{kVA}$$

Für ein konstantes Verhältnis der Durchgangsdrehzahl zur Betriebsdrehzahl ergeben sich somit als Kurven für die Grenzleistungen in Abhängigkeit der Drehzahl zwei Hyperbeln, verbunden durch eine Gerade. Die Linienzüge lassen deutlich den Einfluss der unterteilten Radkräne auf die Grenzleistung erkennen. Ebenso ist der grosse Einfluss von k auf die Höhe der Leistung ersichtlich.

Überschreitet der Faktor k einen gewissen Wert, so darf wegen der Kühlung der Maschine nicht mehr mit einer maximalen Eisenlänge von 4 m gerechnet werden; sie ist entsprechend zu reduzieren.

Auch bei Statorbohrungen von weniger als 2 m wurde eine Reduktion der maximalen Eisenlänge vorgenommen, wodurch sich bei den höheren Drehzahlen ein etwas rascherer Abfall der Leistungen einstellt.

Von Interesse ist die Frage, ob Turbine oder Generator die erreichbare Höchstleistung einer Gruppe begrenzen. Heute ist es noch sozusagen über dem ganzen Drehzahlbereich die Turbine, die den Höchstwert festlegt. Der Generatorbauer erhält also keine Möglichkeit, die heute möglichen Maximalleistungen zu realisieren. Einzig im Bereich von ungefähr 200 bis 300 U/min kann die Turbinenleistung die Grenzleistung des Generators übersteigen.

Hat der Projektbearbeiter die Einheitsleistung von Turbine und Generator gewählt, so bleiben noch verschiedene andere Grössen zu bestimmen, um den Generator festzulegen. Der Einfluss der einzelnen Betriebsgrössen auf die Generatordimensionierung soll nun im folgenden Abschnitt besonders im Hinblick auf ihre wirtschaftlichen Auswirkungen untersucht werden.

2. Einfluss verschiedener Betriebsgrössen auf Gewicht und Preis grosser Wasserkraftgeneratoren

Diese Untersuchung geht von der Annahme aus, dass alle jeweils nicht erwähnten Grössen normale Verhältnisse aufweisen.

Die Betriebsdrehzahl

Die Turbinenbauer bestimmen die Betriebsdrehzahl der Turbine auf Grund der gegebenen hydraulischen Verhältnisse. Dabei können die Angaben der einzelnen Turbinenfabrikanten ziemlich stark voneinander abweichen. Es ergibt sich auch oft der Fall, dass der gleiche Turbinenfabrikant Turbinen gleicher Bauart und verschiedener Drehzahl für die gleichen Einheitsleistungen und sogar alternativ Turbinen verschiedener Bauart offeriert. Bei Turbinen gleicher Bauart verhalten sich die in dem Generator unterzubringenden Schwungmomente umgekehrt proportional dem Quadrat der Betriebsdrehzahl, da es für die Regulierung der Turbine lediglich auf die im Rotor aufgespeicherte Energie ankommt. Wenn wir in einem solchen Fall die beiden Drehzahlen mit n_1 und n_2 bezeichnen und die zugehörigen Schwungmomente mit S_1 und S_2 , so ist

$$S_1 \cdot n_1^2 = S_2 \cdot n_2^2$$

Das Gewicht eines normal dimensionierten Generators ist annähernd

$$G = c \cdot P_s^{\frac{1}{3}} \cdot S^{\frac{1}{4}} \quad c = \text{Konstante}$$

Daraus ergibt sich folgendes Verhältnis zwischen Gewichten und Betriebsdrehzahlen:

$$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Die Gewichte, und damit auch ungefähr die Preise, verhalten sich also umgekehrt proportional der Wurzel aus den Drehzahlen. An Hand dieser einfachen Beziehungen kann der Turbinenlieferant abschätzen, welche der verschiedenen Drehzahlen zur günstigsten Lösung für die ganze Gruppe führt. Damit kann er sich und dem Generatorbauer die Ausarbeitung uninteressanter Varianten ersparen.

Die Durchgangsdrehzahl

Wird eine Turbine entlastet, ohne dass ihre Regulierorgane eingreifen, so steigt die Drehzahl bis zu einem Höchstwert an, der Durchgangsdrehzahl. Das Verhältnis k von maximaler Durchgangsdrehzahl zur Betriebsdrehzahl beeinflusst nicht nur die Grenzleistungen, sondern bei gegebener Nennleistung in hohem Masse auch die Bemessung der Maschine. Es beträgt bei normalen Verhältnissen

$$k = \begin{cases} 1,8-1,9 & \text{für Freistrahlturbinen,} \\ 2-2,2 & \text{für Francisturbinen und} \\ 2,5-2,8 & \text{für Kaplansturbinen.} \end{cases}$$

Der Wert von k hängt aber nicht nur von der Bauart der Turbine ab; er kann z. B. bei stark variablem Gefälle weiter zunehmen; denn die Durchgangsdrehzahl wird im Gegensatz zur Betriebsdrehzahl nur für das grösste vorkommende Gefälle bestimmt. So treten bei Kaplansturbinen Drehzahlen bis zum 3,5fachen der normalen auf. Solche extreme Verhältnisse erschweren selbstverständlich dem Generatorbauer seine Aufgabe sehr.

Die Durchbrenndrehzahl ist jedoch unabhängig vom Wert des Schwungmomentes, das lediglich die Raschheit des Drehzahlanstieges beeinflusst.

Die vom Turbinenlieferanten angegebene Durchgangsdrehzahl wird nur beim gleichzeitigen Auftreten aller sie im ungünstigen Sinn beeinflussenden Faktoren erreicht. Für die Kaplan turbine bedeutet dies, dass beim höchsten Gefälle gleichzeitig Leit- und Laufradregulierung versagen und ausserdem die Leit- und Laufradschaufeln in der ungünstigsten Stellung blockiert sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass tatsächlich solche Bedingungen und die maximale Durchgangsdrehzahl eintreten, wird damit äusserst klein.

In Anbetracht der katastrophalen Auswirkungen, die eine Explosion eines Polrades zur Folge haben kann, muss es bei dieser höchsten Drehzahl aber

unbedingt eine genügende mechanische Sicherheit aufweisen. Doch darf man vom Turbinenbauer verlangen, dass er bei der Festlegung der Durchgangsdrehzahl, die bei grossen Einheiten normalerweise aus Modellversuchen bestimmt wird, im Interesse der Wirtschaftlichkeit keine weiteren Sicherheitszuschläge mache.

Um den Beweis der genügenden Festigkeit zu haben, verlangen viele Kunden, dass das Polrad im Werk mit Durchgangsdrehzahl geschleudert werde. Diese Forderung ist bei Polrädern mit hoher Drehzahl berechtigt. Obgleich wir auf Grund zahlreicher Versuche und Erfahrungen¹⁾ über die zulässige Höhe der Beanspruchungen durchaus im klaren sind, ist doch bei diesen Rotoren eine Materialprüfung, die auch die innersten Teile erfasst, schwierig durchzuführen und eine Schleuderprobe deshalb erwünscht.

Bei vielpoligen Rädern mit kleinen Drehzahlen und entsprechend grossem Durchmesser hingegen liegen die Verhältnisse bedeutend günstiger, ganz besonders, wenn die Polräder als sogenannte Kettenrotoren²⁾ ausgeführt werden. Bei dieser Konstruktion werden die Radkränze aus Stahlblechsegmenten aufgebaut. Das verwendete Blech lässt sich in seinen mechanischen Eigenschaften genau kontrollieren und damit auch das Vorhandensein der nötigen Festigkeit über dem ganzen Kranzquerschnitt feststellen. Die Beanspruchung der Pole und ihrer Befestigung im Polrad kann auf so niedrigen Werten gehalten werden, dass selbst bei Ausführung der Pole aus Stahlguss eine absolute Sicherheit gewährleistet ist. Das Schleudern solcher Räder in der Werkstatt ist deshalb nicht notwendig. Diese Auffassung hat sich in Amerika schon seit Jahren durchgesetzt; aber auch in Europa ist diese Praxis heute anerkannt.

Das Schwungmoment

Eine weitere vom Turbinenbauer dem Elektriker vorgeschriebene Grösse ist das Schwungmoment. Zusammen mit den andern Betriebsgrössen legt es den Polraddurchmesser und damit die Statorbohrung fest. Das Schwungmoment hat deshalb einen beträchtlichen Einfluss auf Gewicht und Preis der Maschine. Sein absoluter Wert sagt aber ohne zugehörige Vergleichsmöglichkeit wenig. Als Vergleichsbasis könnte der in der Literatur oft gebrauchte Begriff „natürliches Schwungmoment“ dienen. Diese Grösse lässt sich etwa wie folgt um-

¹⁾ Vgl. H. Zschokke: Das Verhalten einer Polbefestigung bei Überbeanspruchungen. Brown Boveri Mitt. 1945, Nr. 6, S. 195-206.

²⁾ Näheres siehe Seite 246 dieses Heftes.

schreiben: Nehmen wir an, dass für eine elektrische Maschine die kVA-Leistung, die Drehzahl sowie die Durchgangsdrehzahl, ausserdem Spannung und Frequenz gegeben seien, dass aber das Schwungmoment frei gewählt werden dürfe. Der Konstrukteur dimensioniert nun die elektrische Maschine so, dass sich sowohl elektrisch, als auch mechanisch die günstigsten Verhältnisse und die wirtschaftlichste Lösung ergeben. Das Schwungmoment dieser Maschine ist für die vorliegende Leistung und Drehzahl als das „natürliche Schwungmoment“ anzusprechen.

Nun zeigt sich aber, dass auch der Begriff „natürliches Schwungmoment“ nicht befriedigt, da man über seinen Wert bei verschiedenen Leistungen und Drehzahlen nicht von vornherein orientiert ist. Viel bessere Dienste leistet der Begriff der „Anlaufzeit“ T_a , der den Zusammenhang zwischen Schwungmoment, Leistung und Drehzahl erfasst.

Die Anlaufzeit T_a ist die Zeit in Sekunden, welche erforderlich ist, um das Polrad vom Stillstand aus auf die Nennzahl zu bringen, wenn das Antriebsmoment dem Moment bei Nennbetrieb entspricht. Es ist

$$T_a = \frac{S \cdot \omega^2}{4 P_s \cos \varphi}$$

S = Schwungmoment in tm^2

P_s = Leistung in kVA

ω = Winkelgeschwindigkeit entsprechend der Nennzahl.

Die Anlaufzeit ist ein in der Reguliertechnik altbekannter Begriff, der auch eine Beurteilung der Reglerstabilität erlaubt.

Die Grösse $\omega : T_a$ ist nichts anderes als die im ersten Moment einer Belastungsänderung, d. h. wenn der Regler noch nicht eingegriffen hat, pro Zeiteinheit auftretende Winkelgeschwindigkeitsänderung.

Wird für S das natürliche Schwungmoment zu Grunde gelegt, so ergibt sich z. B. für einen 10 000-kVA-Generator bei $\cos \varphi = 0,8$ und einer Nennzahl von $n = 500$ U/min ein T_a von rund 3 s, für einen 50 000-kVA-Generator bei $\cos \varphi = 0,8$ und $n = 100$ aber ein T_a von rund 7 s. Die Anlaufzeit nimmt mit zunehmender Leistung und abnehmender Drehzahl zu.

Es wäre wünschenswert, wenn dieser für die Reguliertechnik so grundlegende Begriff der Anlaufzeit allgemein verwendet würde, da er zufolge der verhältnismässig geringen Änderungen von T_a über dem ganzen Leistungs- und Drehzahlbereich rasch zu beurteilen erlaubt, ob das verlangte Schwungmoment sich dem natürlichen Werte nähert oder stark davon abweicht.

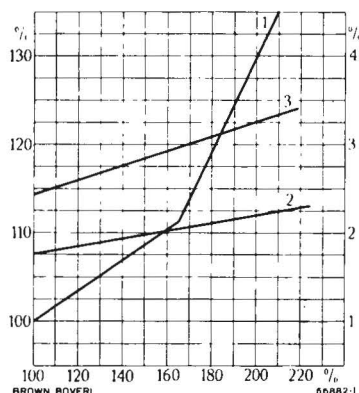


Abb. 2 — Vergrösserung des Gewichtes (Ordinate links) und der Verluste (Ordinate rechts) bei Erhöhung des Schwungmomentes (Abszisse) über den „natürlichen“ Wert

- 1 = Gewichte
- 2 = Verluste bei Vollast $\cos \varphi = 0,8$
- 3 = Verluste bei Halblast $\cos \varphi = 0,8$

Schwungmoment 100 % = natürliches Schwungmoment.

Die Kurven gelten für einen Dreiphasengenerator von 70 000 kVA bei 500 U/min. An der Knickstelle der Kurve 1 ist die maximal zulässige Statorbohrung erreicht. Bei weiterer Erhöhung des Schwungmomentes muss der Generator elektrisch entlastet werden. Dies erklärt den nachfolgenden rascheren Gewichtsanstieg.

Eine elektrische Maschine fällt im allgemeinen um so wirtschaftlicher aus, je grösser das Verhältnis von Eisenlänge zu Statorbohrung gewählt werden kann. Je höher nun das verlangte Schwungmoment über dem natürlichen liegt, um so grösser muss der Durchmesser des Polrades gewählt werden. Seine obere Grenze ist durch die aus mechanischen Gründen zulässige maximale Umfangsgeschwindigkeit bei der Durchgangsdrehzahl gegeben. In Abb. 2 ist dargestellt, in welcher Weise das Gewicht eines Dreiphasengenerators von 70 000 kVA bei 500 U/min und einer Durchgangsdrehzahl von 900 U/min bei steigendem Schwungmoment zunimmt. Das Gewicht nimmt mit steigendem Schwungmoment zunächst verhältnismässig langsam zu, um dann plötzlich stark anzusteigen. Der Knick in der Kurve erfolgt an der Stelle, wo der maximal zulässige Polraddurchmesser erreicht ist. Bei weiterer Erhöhung des Schwungmomentes muss die Eisenbreite über die Erfordernisse der elektrischen Dimensionierung hinaus vergrössert werden, wodurch sich die rasche Gewichtszunahme erklärt. Mit grösser werdendem Durchmesser nehmen auch die Verluste, vor allem die Ventilationsverluste zu, sodass sich die Verschlechterung des Wirkungsgrades besonders stark bei Teillasten fühlbar macht. (Vgl. die in der Abb. 2 eingezeichneten Verluste für Voll- und Halblast.)

Halten wir also fest, dass eine Erhöhung des Schwungmomentes nicht nur Mehrkosten beim Generator, sondern auch eine Verminderung seines Wirkungsgrades mit sich bringt.

Bei der Erhöhung des Schwungmoments kann auch an die Anwendung von zusätzlichen, in die Maschine eingebauten Schwungkränzen oder Schwungrädern gedacht werden. Bei hochtourigen Grossgeneratoren scheidet eine solche Lösung jedoch in den meisten Fällen aus, da die gedrängte Bauart dieser Maschine die Unterbringung zusätzlicher Schwungmassen nicht zulässt. Bei mitteltourigen Maschinen kommen eingebaute Schwungräder eher in Frage, wobei aber zu beachten ist, dass diese die Zugänglichkeit ins Innere der Maschine behindern können. Günstiger liegen die Verhältnisse bei niedrigen Drehzahlen. Hier kann durch Verstärkung der Radkränze das Schwungmoment wesentlich über das natürliche Schwungmoment erhöht werden, ohne dass die übrigen Dimensionen beeinflusst werden.

Die von den Turbinenbauern verlangten Schwungmomente basieren auf den beiden Forderungen, dass

1. die max. Überdrehzahl nach einer plötzlichen Abschaltung der vollen Generatorleistung einen bestimmten Betrag nicht überschreiten soll, und
2. die Stabilität der Drehzahlregulierung unter allen Betriebsverhältnissen zu gewährleisten ist.

Die wiederholte Feststellung merklicher Unterschiede zwischen den Schwungmomentforderungen verschiedener turbinenbauender Firmen hat uns veranlasst, selber eine Klärung des Fragenkomplexes mit Hilfe moderner mathematischer Methoden zu versuchen. Unter Mitberücksichtigung generatorseitiger Reguliermöglichkeiten sind wir dabei zu folgenden Schlüssen gekommen:

a) Schwungmoment und Abschalt-Überdrehzahl. Für die maximale Überdrehzahl bei einer Vollastabschaltung ist die Schliessgeschwindigkeit des Turbinenleitapparates massgebend. Diese wird durch die Erscheinung des Druckstosses in der Wasserzuführung, d. h. durch die Gegebenheiten der hydraulischen Anlage, begrenzt.

Eine rasche Verminderung der Turbinenleistung ohne gefährliche Rückwirkungen auf die Wasserzuführung lässt sich bei Peltonturbinen durch Strahlableiter und bei gewissen Francisturbinen durch druckgesteuerte Nebenauslässe erzielen. In solchen Fällen ist die Überdrehzahlbegrenzung für die Bemessung des Schwungmomentes bedeutungslos.

Dagegen kann die übliche Begrenzung der maximalen Überdrehzahl bei Vollastabschaltung auf 130 % der Nenndrehzahl eine übermässige Erhöhung des Generatorschwungmomentes bedingen. Es stellt sich deshalb die Frage, ob trotz angemessener Berücksichtigung des Problems der Teillastabschaltungen die maximal zulässige Überdrehzahl

nicht über die jetzige Norm erhöht werden dürfe. Nach unserer Auffassung könnte für die genannten Fälle die zulässige Überdrehzahl oft auf 140 bis 150 % der Nenndrehzahl erhöht und damit das geforderte Schwungmoment unter dem Gesichtspunkt der Überdrehzahlbegrenzung reduziert werden.

Als Mittel zur Begrenzung der Überdrehzahl ist in letzter Zeit auch die automatische Zuschaltung eines Wasserwiderstandes im Anschluss an Vollastabschaltungen diskutiert worden. Ausser für Sonderfälle (Vermeidung der Schwallbildung bei Kanalwerken) dürfte diese komplizierte Massnahme jedoch kaum Bedeutung erlangen.

b) Schwungmoment und Stabilität der Drehzahlregulierung. Im Betrieb von Generatorgruppen sind die Stabilitätsbedingungen je nach den Betriebsverhältnissen ganz verschieden, insbesondere ist das Generatorschwungmoment von ausschlaggebender Bedeutung oder fast ohne Wirkung.

Diese Beziehungen wurden für typische Verhältnisse untersucht, wobei als Grenzfälle der Alleinlauf eines Generators und sein Parallellauf mit einem unendlich starken Netz in Betracht fielen.

1. Generatoren im Alleinlauf: Dem Praktiker ist bekannt, dass sich Stabilitätsschwierigkeiten mit der Drehzahlregulierung eines Generators am ehesten bei frequenzunabhängiger Belastung, und zwar besonders dann einstellen, wenn die Spannung und damit die Leistung automatisch konstant gehalten werden. Dies wird verständlich, wenn man beachtet, dass bei jeder Stellung des Leitapparates das Drehmoment der Turbinen mit steigender Drehzahl sinkt und das Gegenmoment der Generatoren ebenfalls eine fallende Drehzahlabhängigkeit aufweist, während es konstant bleibt oder sogar ansteigt, sobald die abgegebene elektrische Leistung mit der Frequenz genügend steigt. Die durch die Drehzahl-Drehmoment-Charakteristiken von Turbinen und Generatoren bedingte Selbstregelungstendenz der Gruppen ist daher bei frequenzunabhängiger Belastung schwach; eine genügende Stabilität der Drehzahlregulierung lässt sich ohne zusätzliche Massnahmen nur mit Hilfe grosser Schwungmomente der Gruppen erreichen. Führt man jedoch eine vorübergehende frequenz- oder leistungsstossabhängige Beeinflussung der Spannungsregulierung¹⁾ ein, d. h. sorgt man während der Regulierungsvorgänge durch vorübergehende Spannungsänderungen für eine gleichsinnige Änderung der Generatorbelastung mit der Frequenz, so kommt man auch für solche Fälle mit einem kleineren Schwungmoment der Generatoren aus. Dieses ge-

¹⁾ Siehe R. Keller: Die Beherrschung der stabilen Drehzahlregulierung bei frequenzunabhängiger Last. Brown Boveri Mitt. 1947, Nr. 6/7, S. 99-104.

nügt meistens ohne die erwähnten Zusatzmassnahmen, sobald die Generatorbelastung vorwiegend motorisch ist, d. h. von sich aus auf jede Frequenzänderung mit einer gleichsinnigen Leistungsänderung reagiert.

2. Generatoren im Parallellauf mit einem unendlich starken Netz: Die nähere Untersuchung zeigt, dass die Grösse des Generatorschwungmomentes für die Stabilität der Energieübertragung auch über lange oder schwache Kuppelleitungen nur ganz untergeordnete Bedeutung hat. Bei der Schwungmomentbemessung verlangt dieser Betriebsfall daher keine Berücksichtigung.

Zusammenfassend ergibt sich, dass es in vielen Fällen vom wirtschaftlichen Standpunkt aus angezeigt wäre, eine erhöhte Umdrehzahl bei Vollastabschaltungen zuzulassen, um das Schwungmoment, soweit es davon abhängt, reduzieren zu können. Ebenso besteht mit Rücksicht auf die Stabilität der Drehzahlregulierung die Möglichkeit, mit kleinen Generatorschwungmomenten auszukommen, wenn für den stabilitätsmässig kritischen Fall frequenzunabhängiger Generatorbelastung eine vorübergehend frequenzabhängige Spannungsregulierung eingeführt wird, was im allgemeinen zulässig und viel wirtschaftlicher ist.

Generator-Spannung

Grossgeneratoren in Wasserkraftwerken arbeiten meistens in Blockschtaltung, d. h. jeder Generator arbeitet unmittelbar auf einen Transformator gleicher Leistung. In solchen Fällen sollte die Spannung unbedingt vom Konstrukteur frei gewählt werden dürfen, um für den Generator die günstigsten Verhältnisse zu erreichen. Es handelt sich dabei in der Hauptsache darum, eine günstige Leiterzahl für die Statorwicklung zu erhalten, d. h. eine

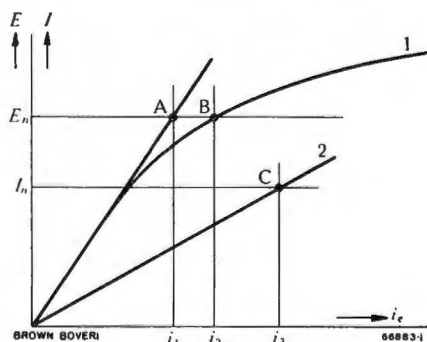


Abb. 3 — Leerlaufspannungskurve und sog. Kurzschlussgerade in Abhängigkeit der Erregung

E_n = Nennspannung
 I_n = Nennwert des Statorstromes
 i_e = Erregerstrom
 1 = Leerlaufspannungskurve
 2 = Kurzschlussgerade

Wicklungsart mit zwei Leitern pro Nut, die, wie noch eingehender dargelegt wird, eine äusserst betriebssichere Konstruktion ermöglicht.

Es ist ferner empfehlenswert, bei Blockschtaltung die Spannungsregulierung nicht in den Transformator, sondern in den Generator zu verlegen. Dies erfordert allerdings eine leichte Vergrösserung des Generators und des Transformators. Dafür kann aber der Stufenschalter weggelassen werden, so dass sich die einfachste und wirtschaftlichste Lösung ergibt.

Synchrone Reaktanz und Kurzschluss-Verhältnis

Die synchrone Reaktanz X_l ist abhängig vom Verhältnis des Erregerstromes i_3 , der im Kurzschluss den Nennwert des Statorstromes I_n erzeugt, zum Erregerstrom i_1 , der im Leerlauf die Nennspannung E_n für den Luftspalt ergibt (siehe Abb. 3).

$$X_l = \frac{i_n}{i_1} \cdot \frac{E_p}{I_n} \quad \Omega$$

E_p = Phasenspannung

I_n = Normalstrom

Das Kurzschlussverhältnis K dagegen ist definiert als das Verhältnis der Erregerströme, die im Leerlauf die Nennspannung E_n , im Kurzschluss den normalen Statorstrom I_n erzeugen.

$$K = \frac{i_2}{i_3}$$

Bei einer ungesättigten Maschine werden die Erregerströme i_1 und i_2 gleich und daher das Kurzschlussverhältnis

$$K = \frac{1}{X_l} \cdot \frac{E_p}{I_n}$$

Je grösser bei gleichbleibendem Luftspalt der Statorstrombelag A der Synchronmaschine gemacht wird, um so grösser wird X_l , bzw. um so kleiner wird K . Umgekehrt wird bei gleichem Strombelag A mit zunehmendem Luftspalt X_l kleiner und K grösser. Je grösser der Strombelag A und je kleiner der Luftspalt gewählt werden kann, um so kleinere Abmessungen ergeben sich für die elektrische Maschine, um so kleiner wird dann aber auch das Kurzschlussverhältnis. Die Grösse von A wird in der Hauptsache durch die Erwärmung festgelegt, währenddem diejenige des Luftspaltes auch durch die Forderung nach einer möglichst sinusförmigen Spannungskurve, das zulässige Mass von zusätzlichen Verlusten auf den Polschuhen und zum Teil noch durch rein mechanische Anforderungen bedingt ist.

Das Kurzschlussverhältnis wird häufig zu Unrecht zur Beurteilung der statischen Stabilität der Synchronmaschine herangezogen. Es ist richtig, dass bei konstanter Erregung ein Generator mit grösserem Kurzschlussverhältnis auch eine statisch

grössere Überlastungsfähigkeit aufweist. Unter den heute vorherrschenden Betriebsverhältnissen trifft aber die Voraussetzung der konstanten Erregung keineswegs mehr zu, denn sofort greifen Regler ein, die die Maschine rasch nachregulieren. Damit ist das Stabilitätsproblem nicht mehr eine Frage des Kurzschlussverhältnisses, sondern in der Hauptsache ein Regulierproblem.

Oft werden mit Rücksicht auf das Unterspannungssetzen einer längeren Freileitung bestimmte, hohe Kurzschlussverhältnisse vorgeschrieben. In vielen Fällen aber kann eine geeignete Regulierung helfen, ohne dass hohe Kurzschlussverhältnisse und eine entsprechende Vergrößerung und Verteuerung der Maschine nötig werden. Nähere Angaben enthält der Artikel über die Stabilität von Synchrongeneratoren in diesem Heft.

Es ist daher im Interesse unserer Kunden, wenn sie, vor Festlegung eines bestimmten Kurzschlussverhältnisses, uns ihre Stabilitätsprobleme und -sorgen eingehend darlegen, damit wir ihnen eine zweckmässige und wirtschaftliche Lösung vorschlagen können.

Transiente Reaktanz

Diese fiktive Reaktanz dient zur Beurteilung der dynamischen Stabilität der Synchronmaschine, d. h. zur Beurteilung des Verhaltens der Maschine bei plötzlichen Belastungsänderungen. Sie wird am einfachsten aus dem Verlauf des Statorstromes bei einem plötzlichen Kurzschluss abgeleitet. Mit Ausnahme einiger weniger Perioden nach dem Moment des Kurzschlusses nimmt der symmetrische plötzliche Kurzschlussstrom nach einem Exponentialgesetz ab. Wird der Strom in logarithmischem Massstab über der Zeit abgetragen, so ergibt sich eine Gerade (Abb. 4), deren Verlängerung die Ordinatenaxe im Punkt I' schneidet. Die transiente Reaktanz X'_i ist nun definiert als

$$X'_i = \frac{E}{I'} \quad \Omega$$

An ihrer Stelle liesse sich auch die Statorstreu-reaktanz zur Beurteilung der dynamischen Stabilität heranziehen, da die Verhältniswerte der beiden Grössen bei normal dimensionierten Maschinen praktisch gleich sind. In diesem Zusammenhang würde aber besser eine andere fiktive Reaktanz, die sogenannte Pendelreaktanz benützt¹⁾.

Die dynamische Stabilität nimmt bei Abnahme dieser Streureaktanzen zu. Eine wirksame Herabsetzung derselben kann nur durch eine entsprechende Reduktion des Statorstrombelags A erreicht werden, die aber zu einer raschen Vergrößerung der Maschinenabmessungen führt.

¹⁾ Vgl. Dr. W. Wanger: Die Stabilität von Drehstromnetzen mit Aufklärungsversuchen an kleineren und mittleren Maschinen. Brown Boveri Mitt. 1937, Nr. 4, S. 99-111.

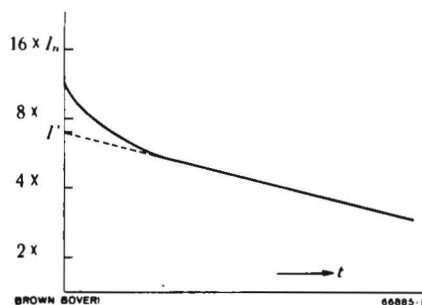


Abb. 4 -- Definition der transienten Reaktanz X'_i

Die Kurve stellt den zeitlichen Verlauf der Komponente des symmetrischen Statorstromes bei einem plötzlichen Klemmenkurzschluss dar. (Stromstärke in logarithmischem Maßstab.)

Wie die eben erwähnte Arbeit¹⁾ auf Grund eingehender Versuche darlegt, haben Synchronmaschinen mit massiven Polschuhen oder solche mit einer Dämpferwicklung an und für sich schon eine sehr hohe dynamische Stabilität, sodass in den meisten Fällen keine besonderen Massnahmen bezüglich der transienten Reaktanz getroffen werden müssen. In den wenigen Fällen aber, wo solche angezeigt erscheinen, werden sie besser von der Regulierseite aus ergriffen.

Eine Herabsetzung der transienten Reaktanz hat nämlich nicht nur eine Erhöhung des Gewichts des Generators zur Folge, sondern auch eine entsprechende Zunahme des plötzlichen Kurzschlussstroms. Dabei tritt eine quadratische Erhöhung der durch die elektrodynamischen Wirkungen erzeugten Kräfte ein, denen die Wicklung des Generators, die Schalter, die Transformatoren und die Verbindungsleitungen standhalten müssen. Auch werden Schalter mit grösseren Abschaltvermögen erforderlich. Da für die dynamische Stabilität nicht mit der transienten Reaktanz des Generators allein, sondern mit der Summe der transienten Reaktanz des Generators und der Streureaktanz des vorgeschalteten Transformators zu rechnen ist, müsste die transiente Reaktanz des Generators schon ganz erheblich gesenkt werden, um eine auch nur einigermaßen spürbare Verminderung der totalen Reaktanz zu erhalten. Die Herabsetzung der transienten Reaktanz des Generators zur Verbesserung seiner dynamischen Stabilität entpuppt sich daher als ein wenig taugliches Mittel. Eine rasche Regulierung der Erregung meistert dieses Problem viel besser und ohne die erwähnten Nachteile, was wir mit Versuchen an Grossgeneratoren im praktischen Betrieb und unter ungünstigen Bedingungen bewiesen haben²⁾.

(MS 928a)

E. Günthardt

²⁾ Siehe Brown Boveri Mitt. 1949, Nr. 1/2, S. 27/28.

Zusammenbau und Kühlung von Grossgeneratoren für Wasserturbinenantrieb

621.313.322-82

Für den Generator ergeben sich aus den verschiedenen Typen und Aufstellungsmöglichkeiten der Turbinen sehr mannigfaltige Zusammenbauprobleme, die die Anordnung der Lager und Erreger und sogar die Wahl der Kühlungsart beeinflussen. Der Artikel geht eingehend auf diese, auch mit der baaseitigen Ausbildung der Zentrale zusammenhängenden Fragen ein.

Auch diese Arbeit behandelt Fragen, die beim Entwurf eines Wasserkraftwerkes eine wichtige Rolle spielen. Deren Lösung hängt noch enger mit den örtlichen Bedingungen zusammen als die Bemessungsfragen. Auch hier lassen sich gewisse Entwicklungstendenzen deutlich erkennen.

Am einfachsten wird ein Zusammenbau der Generatoren mit horizontalachsigen Turbinen. Das Laufrad der Pelton turbine sitzt gewöhnlich fliegend auf der verlängerten Generatorwelle. Bei grossen Leistungen wird dabei oft auf jeder Seite des Generators eine Turbine angebaut. Die ganze Gruppe hat dann nur zwei Lager, sodass die axiale Länge auf ein Minimum reduziert wird. Der Erreger mit Hilfserreger wird am besten über eine Hilfswelle und eine elastische Kupplung von einem der Turbinenlaufräder aus angetrieben. Die hin und wieder ausgeführte Anordnung, den Haupt- oder sogar noch den Hilfserreger in den Generator einzubauen, um damit die Baulänge weiter zu reduzieren, hat verschiedene Nachteile. Die im Generator gegebenen Raumverhältnisse zwingen zu einer elektrisch ungünstigen Dimensionierung des Erregers, weil der Durchmesser im Verhältnis zur Eisenbreite viel zu gross wird. Der grosse Kollektordurchmesser behindert eine gute Zugänglichkeit zu den untern Bürsten. Der eingebaute Erreger kann nicht unabhängig vom Generator demontiert werden und erschwert auch die Zugänglichkeit zum Maschineninneren. Die bei dieser Anordnung erzielte Reduktion der Baulänge ist verhältnismässig gering; in manchen Fällen gelingt es, mit angebauten Erregern die gleiche Totallänge einzuhalten.

Auch bei Francis turbinen wird das Laufrad vielfach fliegend angeordnet, wobei das eine Generatorlager dann den axialen Schub der Turbine auf-

zunehmen hat. Häufiger trifft man aber die Ausführung als Dreilagergruppe (Generator zwei, Turbine ein Lager), wobei dann das Turbinenlager als Axiallager zur Aufnahme des Schubes ausgebildet ist.

Für grosse Leistungen tritt bei hydraulischen Gruppen immer mehr die vertikale Anordnung in den Vordergrund, sowohl bei Francis- und Kaplan turbinen, wie auch bei Pelton turbinen. Dabei finden wir die nachfolgenden prinzipiellen Lageranordnungen (Abb. 6).

Anordnung 1 stellt die klassische Bauweise dar. Sie wurde früher ausschliesslich angewendet, da das Traglager als der meistgefährdete Teil der Gruppe angesehen wurde und demzufolge vor allem seine schnelle Demontage im Vordergrund stand. Sie eignet sich heute noch hauptsächlich für hochtourige Gruppen. Bei diesen sind die Raumverhältnisse zwischen Generator und Turbine so beschränkt, dass der Einbau des Traglagers unterhalb des Generators nicht in Betracht kommt. Eine



Abb. 1 — Vertikalachsiger Drehstromgenerator von 17 500 kVA, 600 U/min, 6000 V, 50 Hz in der Zentrale Lindoso der Soc. Electra del Lima (Portugal)



Abb. 2 — Oberer Teil eines vertikalachsigen Drehstromgenerators von 17 500 kVA, 600 U/min, 6 kV in der Zentrale Lindoso der Soc. Electra del Lima (Portugal)

Das Bild zeigt die Erregermaschine und am Wellenende den Hilfsgenerator von 2 kVA, 110 V, 50 Hz, zur Speisung des Pendelmotors des Turbinenreglers.

Am Erregergehäuse angebaut ist ein Ölbehälter für die Schmierung der Lager beim Anlauf der Gruppe sowie bei Versagen der Ölpumpe. Bei Selbstschmierlagern, wie sie von uns nun überall angewendet werden, fallen der Ölbehälter, die zugehörigen Rohrleitungen und die Ventile weg.



Abb. 3 — Zwei Drehstromgeneratoren mit Umlaufwasserkühlung von 5200 kVA, 3300 V, 1000 U/min in der Zentrale Cedros (Brasilien), welche ausschliesslich mit elektrischem Material von Brown Boveri ausgerüstet ist

Der am Generatorgehäuse angebaute Kasten ist für den Einbau der Kabelendverschlüsse und der Stromwandler für den Generatorschutz bestimmt.



Abb. 4 — Einer der beiden 15 500-kVA-Generatoren, 750 U/min, der Zentrale Las Conchas der „Fenosa“ (Spanien)



Abb. 5 — Zwei Dreiphasen-Phasenkompensatoren von je 18 000 kVA, 15 000 V, 1000 U/min, 50 Hz in der Unterstation Cero de La Plata der Unión Eléctrica Madrileña (Spanien)

Abart dieser Bauart ist die Anordnung 2, bei der das Führungslager unterhalb des Polrads und mit ihm auch der untere Lagerstern weggelassen wird. Sie wird bei beschränkter Bauhöhe gewählt, hat aber den Nachteil, dass der Lauf des Generators mit abgekuppelter Turbine, z. B. zu Messzwecken, nicht möglich ist.

Da heute ein Traglager die gleiche Betriebssicherheit wie irgend ein anderer Konstruktionsteil aufweist, kann es auch unter den Generator verlegt werden.

Anordnung 3 mit dem Traglager auf dem untern Lagerstern wird vielfach bei verhältnismässig langsamlaufenden Aggregaten mit grösseren Durchmessern bevorzugt, d. h. dort, wo die Raumverhältnisse noch eine gute Zugänglichkeit des Traglagers sichern. Der obere Lagerstern, in dem dann nur noch das obere Führungslager eingebaut ist, kann bedeutend leichter gehalten werden, während der untere Lagerstern, der sowieso für die Aufnahme des Gewichtes der rotierenden Teile von Generator

und Turbine bei einer Demontage bemessen wird, verhältnismässig wenig verstärkt werden muss, um noch den Schub der Turbine zu übernehmen.

Gewöhnlich ist die Spannweite des untern Lagersterns kleiner als diejenige des oberen, was sich ebenfalls günstig auswirkt. Da zudem das Statorgehäuse etwas leichter gebaut werden kann, ergibt sich eine wenn auch nicht grosse Verminderung des Generatorgewichtes.

Anordnung 4 ist als sogenannte Schirmbauart bekannt. Diese führt, sofern sich ein direkt aufgebauter Erreger erübrigt und kein Öleinführungsbock einer Kaplanturbine aufgebaut werden muss, zu einer bedeutenden Reduktion der Bauhöhe. Da der obere Lagerstern gänzlich weggelassen und der Generator nur durch eine leichte Verschalung abgedeckt werden kann, ergibt sich eine wesentliche Einsparung an Gewicht. Wird aber der direkte Aufbau eines Erregers oder eines Öleinführungsbockes verlangt, so müssen diese Teile wieder auf einen Tragstern gesetzt werden. Dann kann mit ganz

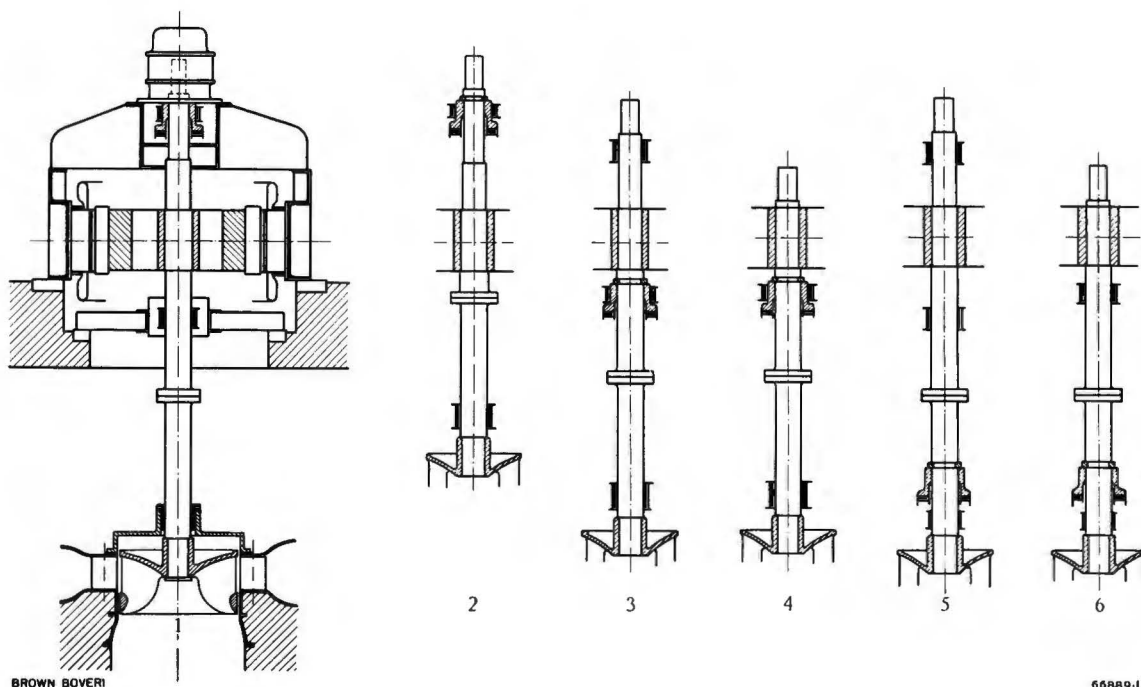


Abb. 6 — Anordnung der Lagerung bei vertikalachsigen Gruppen

- Anordnung 1 = Drei Führungslager, Traglager im oberen Lagerstern
 Anordnung 2 = Zwei Führungslager, Traglager wie bei 1
 Anordnung 3 = Drei Führungslager, Traglager im untern Lagerstern
 Anordnung 4 = Zwei Führungslager, Traglager im untern Lagerstern (Schirmbauart)
 Anordnung 5 = Drei Führungslager, Traglager auf Turbinendeckel
 Anordnung 6 = Zwei Führungslager, Traglager wie bei 5 (Schirmbauart)

geringen Mehrkosten ein oberes Führungslager eingebaut werden. Dadurch wird, ohne Vergrößerung der Bauhöhe, eine stabile Lagerung auch bei anormalen Verhältnissen, wie sie bei Kurzschlüssen auftreten können, gesichert, was in Anbetracht des verhältnismässig kleinen Luftspaltes am Erreger, besonders aber an einem eventuellen Hilfserreger, recht erwünscht ist.

Die Anordnung 5 mit auf dem Turbinendeckel abgestütztem Traglager wird in neuerer Zeit für langsamlaufende Gruppen immer mehr ausgeführt. Sie stellt für die Maschineneinheit eine besonders günstige Lösung dar. Der an und für sich schon kräftige Turbinendeckel muss zur Aufnahme der Belastung des Traglagers nur wenig verstärkt werden. Beim Generator können die beiden Lagersterne mit Führungslagern und das Statorgehäuse in leichter Ausführung konstruiert werden, sodass das Gewicht für die ganze Gruppe äusserst günstig ausfällt. Eine wesentliche Einsparung ergibt sich noch für die Maschinenfundamente, da der Hauptteil der Belastung da abgestützt wird, wo er erzeugt wird, d. h. in der Turbine.

Für die Anordnung 6, bei der es sich wieder um die Schirmbauweise des Generators handelt, gelten die gleichen Bemerkungen wie für die Anordnung 4. Die Vorteile bezüglich des Gewichtes der Maschinengruppe und der Fundamente sind natürlich die gleichen wie für Anordnung 5.

Der Vollständigkeit halber wäre noch eine Bauweise zu erwähnen, wie sie manchmal bei Kaplan-turbinen angewendet wird, und bei welcher der Steuerzylinder der Laufradregulierung unmittelbar in die Nabe des Polrads eingebaut ist. Das Traglager kann dabei im untern Lagerstern eingebaut oder auf den Turbinendeckel gesetzt werden, und der Generator erhält ein oder zwei Führungslager.

Bei Einbau des Traglagers in den obern oder untern Lagerstern wird dieses mit dem entsprechenden Führungslager als konstruktive Einheit zusammengebaut, wobei sich die Vorteile der von uns auch für die grössten Einheiten bei höchsten Drehzahlen verwendeten Selbstschmierlager besonders günstig auswirken. Bei dieser Bauart muss das Traglager unbedingt mit dem Generator geliefert werden, da sich nur so die günstigsten Verhältnisse erzielen lassen.

Es mag von Interesse sein, dass die ersten von Brown Boveri im Jahr 1892 ausgeführten Vertikalgeneratoren schon als Schirmtypen gebaut waren, wobei dann das Traglager als eigentliches Spur-lager unter der Turbine angeordnet war. Die Anordnung mit dem Traglager auf dem Generator wurde von uns erstmals im Jahre 1902 ausgeführt.

Ob die Generatoren in einem Kraftwerk versenkt oder nicht versenkt eingebaut werden sollen, wird meistens durch die topographische Lage der Zentrale entschieden, durch welche die Höhenlage der Zufahrtswege und damit des Maschinenhausbodens über der Turbine festgelegt wird. In neuerer Zeit macht sich immerhin eher die Tendenz zum versenkten Einbau geltend. Dabei kann die Versenkung in verschiedener Weise vorgenommen werden (Abb. 9). Der Maschinenhausboden kann auf die Höhe der Oberkante des oberen Lagersterns verlegt werden, sodass lediglich die Erreger in den Maschinsaal hineinragen, oder es kann der Maschinenhausboden bündig mit der Oberkante des Statorgehäuses gemacht werden, wobei im Maschinsaal die obere Tragkonstruktion des Generators sichtbar ist. Diese letztere Ausführung weist den Vorteil auf, dass sich für Generator und Turbine die kleinste Auszugshöhe ergibt, d. h. das Maschinenhaus kann mit der kleinsten Bauhöhe ausgeführt werden. Durch die sichtbaren oberen Teile der Generatoren dürfte das ästhetische Aussehen des ganzen Maschinsaals nur gewinnen.

Auch bei Wasserkraftwerken werden, wenigstens für grosse Einheiten, immer mehr die Vorteile der geschlossenen Kreislaufkühlung anerkannt. Obwohl im allgemeinen mit reiner Luft gerechnet werden kann, so wird doch bei Entnahme der Kühlluft aus dem Freien, zufolge der gewaltigen Menge der geförderten Luft, nach kürzerer oder längerer Zeit eine erhebliche Menge von Unreinigkeiten im Generator abgelagert, was die Kühlung der Maschinen merklich beeinträchtigt, d. h. die Wicklungstemperaturen erhöht und damit die Lebensdauer der Maschine reduziert. In gewissen Fällen haben Blütenstaub und Mücken die Ventilationskanäle vollständig verstopft, sodass Erhöhungen der Übertemperaturen bis zu 20° C konstatiert wurden.



Abb. 7 — Einer der beiden Dreiphasengeneratoren von 9500 kVA, 500 U/min, $6600\text{ V} \pm 9\%$ in der Zentrale Peña de Bejo der Sociedad Saltos del Nansa (Spanien)

Für diese Zentrale haben wir auch die 60-kV-Haupttransformatoren sowie die gesamte Schaltanlage mit ölfreien Apparaten geliefert.

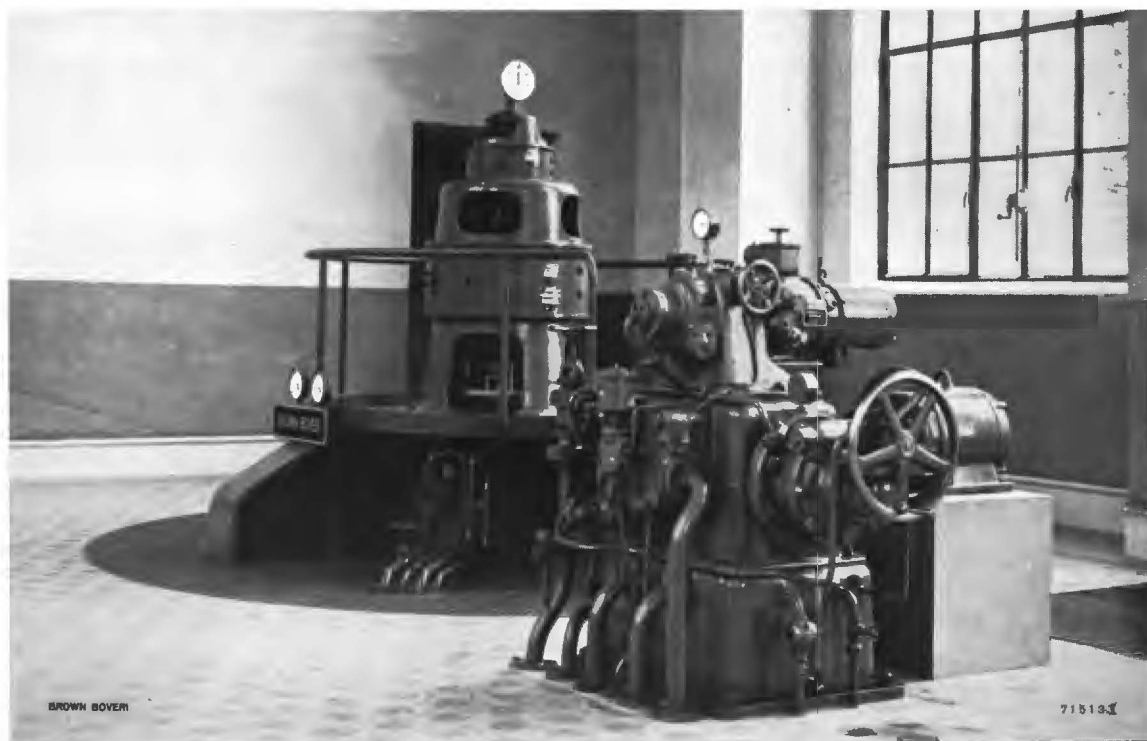


Abb. 8 — Vertikalachsiger Dreiphasengenerator von 9000 kVA, 6000 V, 600 U/min, 50 Hz mit Haupt- und Hilfsrerger im Kraftwerk Puente Argoné der Cía Fluida Eléctrico, Barcelona (Spanien)

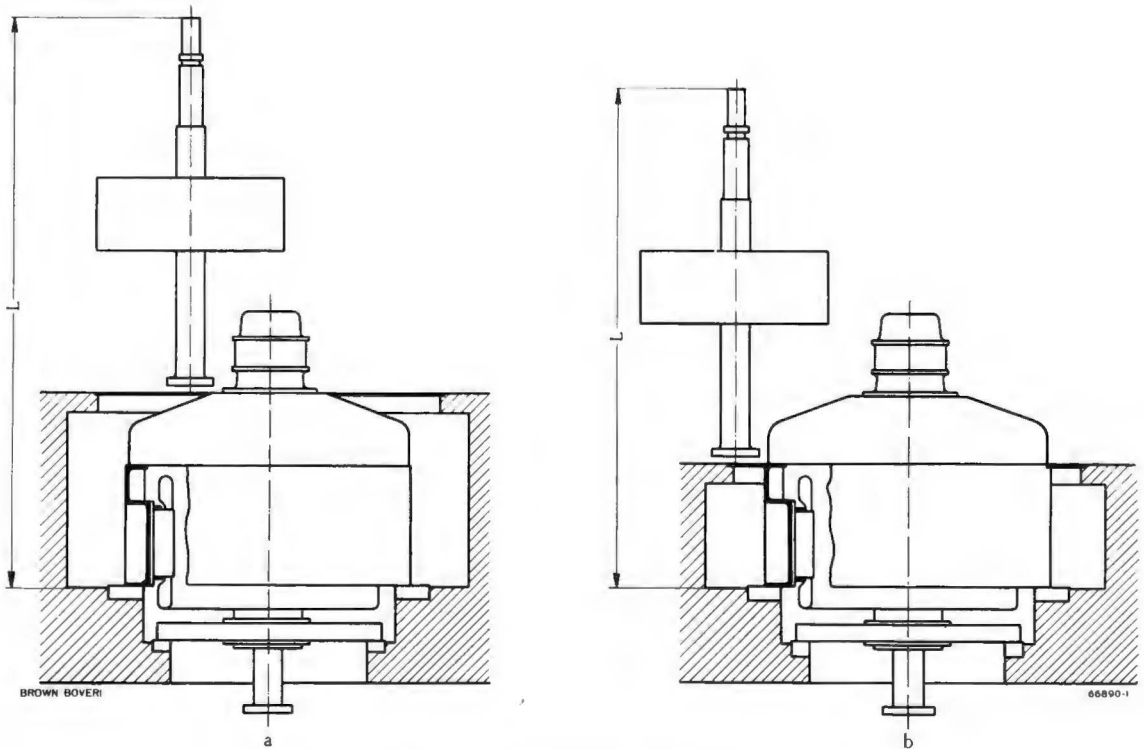


Abb. 9 — Versenkte Anordnung der Generatoren

a = Maschinenhausboden auf Höhe Oberkante Lagerstern.

b = Maschinenhausboden auf Höhe Oberkante Statorgehäuse.

Durch Senken des Maschinenhausbodens auf die Höhe der Oberkante des Statorgehäuses wird die Auszugshöhe verkleinert.

Alle diese Gefahren werden durch die Kreislaufkühlung behoben. Bedenkt man ferner, dass der Unterschied der Temperatur des Kühlwassers zwischen Sommer und Winter viel kleiner ist als derjenige der Aussenluft, eine Änderung der Temperatur beim Kühlwasser viel langsamer eintritt und die Temperatur bei Tag- und Nachtzeit praktisch konstant bleibt, so sieht man, dass bei Kreislaufkühlung die Temperatur im Generator selbst weit kleineren Schwankungen unterworfen ist, was eine Verlängerung der Lebensdauer des Generators bewirkt. Der Wegfall der Frisch- und Warmluftkanäle im Maschinenhaus erlaubt oft eine Reduktion der Grundrissabmessungen; zudem ist eine übersichtliche Anordnung der elektrischen Leitungen viel leichter möglich. Für eine CO₂-Brandschutzanlage ergeben sich günstigere Verhältnisse, besonders dann, wenn die Kühler direkt an das Statorgehäuse angebaut werden. Dadurch wird das Luftvolumen des Generators auf ein Minimum gebracht, sodass auch die Kosten der CO₂-Anlage minimal werden.



Abb. 10 — Maschinensaal des neuen Kraftwerkes Wassen (Schweiz)
Die beiden Dreiphasengeneratoren von 30 000 kVA, 12 000 V, 50 Hz, 750 U/min sind versenkt aufgestellt, einzig Haupt- und Hilfsregler ragen in den Maschinensaal hinein.



Abb. 11 — Zentrale Airolo des Kraftwerkes Lucendro mit zwei Dreiphasengeneratoren von 30 000 kVA, 11 000 V, 50 Hz, 500 U/min

Das freie Wellenende (durch Gitter geschützt) ist für den späteren Anbau einer Spelcherpumpe bestimmt.

Die Vorteile der Kreislaufkühlung sind so mannigfaltig, dass sie bei grösseren Einheiten in Wasserkraftanlagen unbedingt zu empfehlen ist.

Auch die Frage der inneren Kühlung des Generators ist von grosser Bedeutung und muss gründlich überlegt werden. Dies verlangt von seiten des

Konstrukteurs viel Geschicklichkeit, damit nicht nur die Wicklung, sondern auch die übrigen Teile eine möglichst gleichmässige Erwärmung aufweisen und an keiner Stelle zu hohe Temperaturen entstehen.

(MS 9286)

E. Günthardt

Konstruktionsprobleme bei grossen Wasserkraftgeneratoren

621.313.322-82

Dieser Artikel gibt einen Überblick über die wichtigsten Konstruktionselemente grosser Wasserkraftgeneratoren. Unter anderem sind die bei Langsamläufern verwendete Kettenrotorkonstruktion, die Ausbildung der Pole, das Traglager und seine Kombination mit dem Führagslager sowie die Statorwicklung und ihre Isolation eingehend behandelt.

Geht man den konstruktiven Änderungen nach, die im Grossgeneratorenbau im Verlaufe der Jahre vorgenommen wurden, so wird man eine stetige Entwicklung feststellen, die nachträglich fast als selbstverständlich erscheint. So ist die geschweisste Ausführung von Statorgehäusen und anderen Maschinenteilen heute allgemein anerkannt, und nach den guten Erfahrungen, die damit gemacht wurden, sind die anfänglich dagegen geäusserten Bedenken

schwer zu verstehen. Die bei den früheren Graugussausführungen geschätzten schönen Formen sind den Brown Boveri Maschinen weitgehend erhalten geblieben. Dass zweckmässige konstruktive Lösungen darin ihren Ausdruck finden, gibt ihnen erst recht etwas Ansprechendes.

Unter den Konstruktionselementen, deren heutiger Entwicklungsstand hier kurz skizziert werden soll, sei als erstes das Polrad grosser Langsamläufer erwähnt, dessen neue Bauweise schon früher an dieser Stelle¹⁾ erwähnt wurde:

¹⁾ Siehe Brown Boveri Mitt. 1949, Nr. 1/2, S. 19.

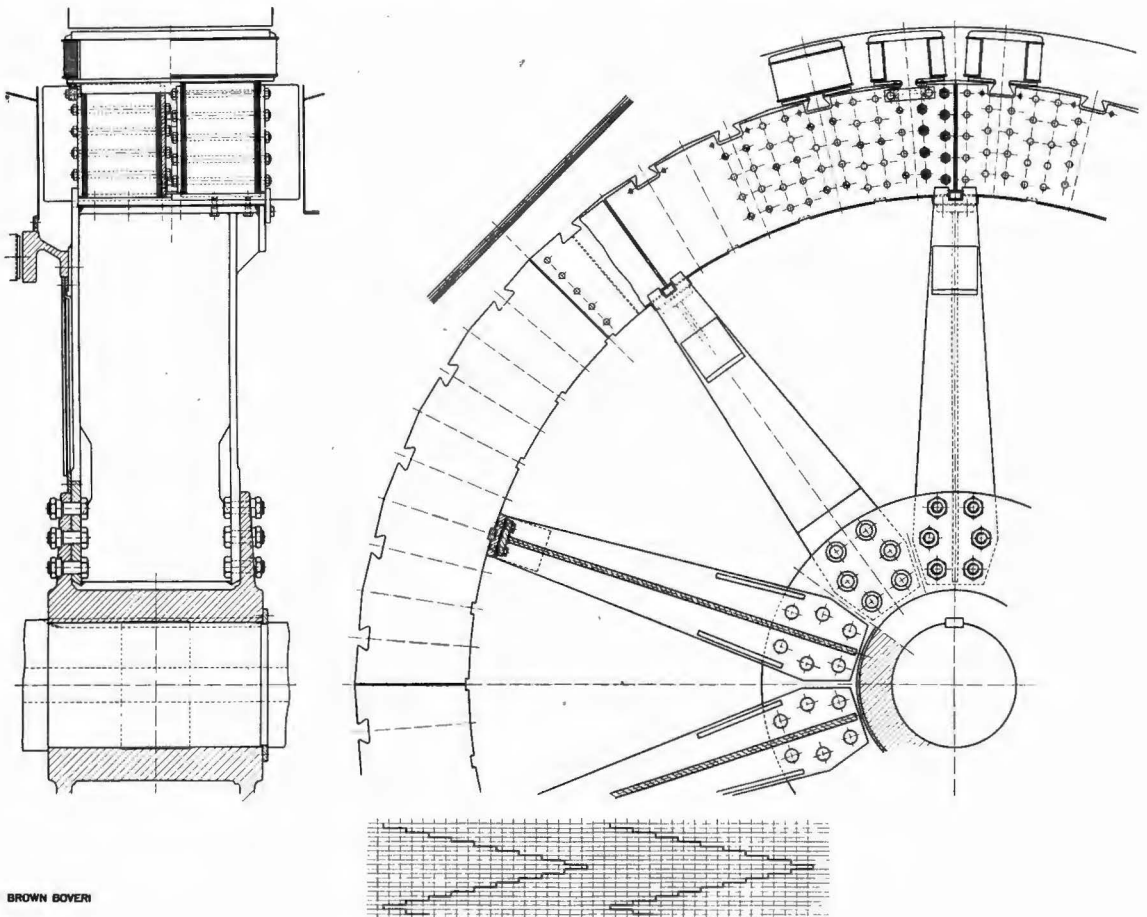


Abb. 1 — Aufbau eines Kettenrotors

Aus dem unteren Schnitt geht die Art der Verschachtelung der Bleche der Radkränze deutlich hervor. Die zwischen Kränzen und Armen eingepassten Rechtecke leisten auch nach einem allfälligen Abheben der Kränze von den Armen eine einwandfreie Zentrierung der Kränze.



Abb. 2 — Kettenrotor des 107 torigen Vertikal-Generators von 15 MVA während der Montage im Kraftwerk Kymmene (Finnland)

Der Radkranz besteht aus Ringen, die aus Blechsegmenten zusammengesetzt sind. Die Pole sind mit Schrauben befestigt, die zwischen den Ringen hindurchgehen. Die einfache Bauweise, verbunden mit einwandfreier Kontrollmöglichkeit der meistbeanspruchten Teile, gewährleistet höchste Sicherheit und erübrigt die mechanische Schleuderprobe.

Der Kettenrotor

Sehr ähnliche Vorläufer haben wir schon vor 40 Jahren gebaut, dann aber wieder fallen gelassen; doch hat sich der Kettenrotor seit mehr als 20 Jahren in Amerika eingebürgert. Beim Kettenrotor werden die Radkränze statt aus Stahlgussringen oder solchen aus geschmiedetem Stahl aus gestanzten Stahlblechsegmenten zusammengesetzt (vgl. Abb. 1 und 2). Die einzelnen Blechlagen werden beim Aufschichten eines Kranzes um eine bestimmte, für die Beanspruchung günstige Teilung versetzt und kräftige Endplatten verstärken die Aussenseiten. Querbolzen verketteten die einzelnen Bleche und übertragen an den Segmenttrennungen die Zugkräfte von einem Blech auf das benachbarte. Sie verleihen dem Kranz die nötige Pressung und entlasten infolge der zwischen den Blechen auftretenden Reibungskräfte ihre Querschnitte

von Schubkräften. Rechteckförmige Keile übertragen das Drehmoment vom Radstern auf die Kränze, die nach dem Zusammenbau durch Wärmen auf den Radstern geschrumpft werden.

Es ist leicht zu erkennen, dass ein solcher Rotor in der Zentrale aufgebaut werden muss, da an ein Auftrennen der Kränze in einzelne transportfähige Kranzteile wegen ihrer starken Verschachtelung kaum zu denken ist. Eine besondere Vorrichtung ermöglicht eine rasche und präzise Montage.

Die Kettenrotor-Konstruktion birgt in der Hauptsache folgende Vorteile in sich:

Die Kontrolle des Werkstoffes der Bleche für die Radkränze lässt sich leicht und sicher durchführen. Wenn auch kleinere Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften vorkommen, kann infolge der äusserst guten Mischung der Bleche in den Kränzen mit einer Festigkeit gerechnet werden, die dem Mittelwert der Festigkeitswerte entspricht.



Abb. 3 Polrad eines horizontalachsigen Drehstromgenerators von 6000 kVA, $\cos \varphi = 0,8$, 375 U/min, 50 Hz, $6600 \text{ V} \pm 9\%$ der Zentrale Rozadio der Sociedad Saltos del Nansa (Spanien)

Die Beanspruchungen sind am ganzen Umfang des Kranzes gleichmässig, da praktisch keine Biegemomente auftreten. Die Berechnung der Beanspruchungen ist übersichtlich und einfach.

Die Gefahr des Ausschusses eines grösseren Gußstückes und die damit verbundene Lieferzeitverzögerung ist eliminiert. Der Transport grosser, sperriger Stücke fällt weg. Dank der sehr gleichmässigen Gewichtsverteilung im Kranz und der am Polrad bereits vorgesehenen Löcher für die Befestigung von Balanciergewichten können die Balancierarbeiten an Ort und Stelle in kürzester Zeit durchgeführt werden. Für kleine und mittlere Generatoren wird jedoch zweckmässigerweise das Polrad in der klassischen Bauweise aus Stahlguss oder Schmiedeisen hergestellt (Abb. 3).

Die Pole bestehen in der Regel aus Stahlguss. Ihr Querschnitt und die auf die Längeneinheit bezogene Fliehkraft werden bei vielpoligen Maschinen, für welche sich die Kettenrotorkonstruktion besonders eignet, verhältnismässig klein. Die Polklauen können deshalb so reichlich dimensioniert werden, dass die in ihnen auftretenden Beanspruchungen niedrig ausfallen. Die Berechnungsart der üblichen Klauenbefestigung ist durch Modell- und Zerreißversuche einwandfrei belegt worden, so dass sich die Sicherheit zum voraus genau übersehen lässt. Da zudem die Kontrolle des Materials in bezug auf die verlangte Qualität und allfällige Lunkerbildung im Innern auf der ganzen Länge des Poles mit grösster Sorgfalt durchgeführt wird,

ist für diese auch ohne Schleuderprobe absolute Sicherheit vorhanden.

Radial-Polspulen

Die Längsseiten der Polspulen sind, da sie nicht in der Polachse selbst liegen, Fliehkraftkomponenten ausgesetzt, welche quer zur Polachse wirken und die Spulen auszuweiten versuchen. Diese Querkkräfte

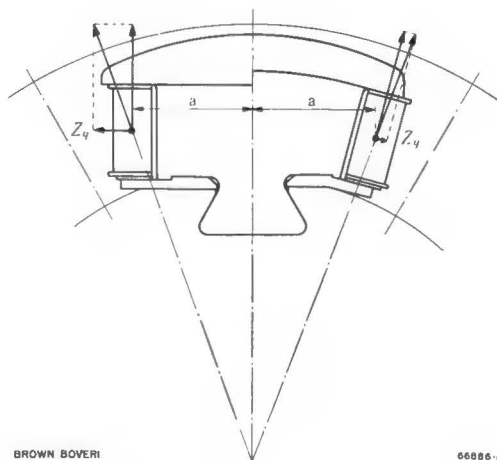


Abb. 4 — Parallel- und Radial-Polspulen

Linke Seite: Parallel-Polspule,
Rechte Seite: Radial-Polspule.

Durch angenäherte Radialstellung der Spulenschenkel wird die Komponente Z_q der Zentrifugalkraft stark reduziert.

Z_q (Abb. 4) sind direkt proportional dem Abstand a des Schwerpunktes des Kupfers von der Polachse und dem Quadrat der Drehzahl. Bei den wenigpoligen Maschinen sind diese Kräfte demnach am grössten. Um eine Deformation der Spulen zu verhindern, werden in die Polücken Abstützungen eingebaut. Diese haben jedoch den Nachteil, dass sie der axial durch die Lücken strömenden Kühlluft einen beträchtlichen Widerstand entgegensetzen und zudem einen Teil der für die Abkühlung wirksamen Oberfläche abdecken. Bei wenigpoligen Maschinen grosser Leistung und Eisenlänge muss deshalb versucht werden, die Zahl der Abstützungen auf ein Minimum zu reduzieren. Dies erreicht man durch eine Spulenform, bei welcher die Längsseiten annähernd radial stehen (siehe rechte Seite der Abbildung 4). Die Querkräfte Z_q werden dadurch auf einen Bruchteil reduziert. Zugleich wird eine bedeutend intensivere und in der ganzen Maschinenlänge gleichmässige Kühlung erreicht. Die Betriebssicherheit wird damit wesentlich grösser. Zudem lässt sich die übliche Klauenkonstruktion beibehalten, welche die Vorteile des raschen Ausbaues der Pole und der Polspulen aufweist. Diese Konstruktion wurde von uns erstmals vor ca. 10 Jahren ausgeführt, und sie hat sich seither gut bewährt.

Massive Pole und elektrische Stabilität

Zur Erreichung einer guten Stabilität wird von den Synchronmaschinen eine hohe elektrische Dämpfung verlangt. Meistens wird dafür in die Polschuhe eine Dämpferwicklung eingebaut. Bei der von uns normalerweise ausgeführten Konstruktion der Pole als Stahlgußstücke erzeugt der massive Polschuh bereits eine äusserst wirksame Dämpfung, sodass eine besondere Dämpferwicklung nicht notwendig ist. Ausgedehnte Versuche, auch solche an einem 30-MVA-Generator im praktischen Betrieb, haben gezeigt, dass diese durch die massiven Polschuhe bewirkte Dämpfung für alle Betriebsbedingungen reichlich genügt und eine besondere Dämpferwicklung überflüssig ist. Dadurch ergibt sich eine äusserst einfache Konstruktion der Pole, die vor allem von den Betriebsleuten geschätzt wird, denn sie wissen, dass Einfachheit der Konstruktion gleichbedeutend mit grosser Betriebssicherheit ist.

Es gibt natürlich Fälle, wo eine Dämpferwicklung unbedingt nötig ist, wie beispielsweise für Einphasengeneratoren. Die von uns durchgebildete Konstruktion hat sich bei den Einphasengeneratoren der Schweizerischen Bundesbahnen, welche zum weitaus grössten Teil von uns geliefert wurden, im jahrelangen schweren Bahnbetrieb mit sei-



Abb. 5 — Polrad mit Radialpolspulen

Trotz der grossen Länge der Maschine werden in jeder Polücke nur zwei Spulenabstützungen benötigt. Die massiven Polschuhe ergeben bei einfachster Konstruktion eine gute Dämpfung.



Abb. 6 — Polrad eines 18 000-kVA-Einphasengenerators beim Einfahren in den Stator

Die kräftig ausgebildete Dämpferwicklung dient in diesem Fall zur Kompensierung des inversen Teils des Statorfeldes.

nen rasch wechselnden Belastungen vorzüglich bewährt (Abb. 6).

Aufbau des Stators

Das Statorgehäuse wird heute allgemein in geschweisster Konstruktion mit kastenförmigem Querschnitt ausgeführt. Diese Form hat sich bezüglich Festigkeit und Deformation bei Kurzschlüssen wie auch für die Ventilation bewährt. Besondere Sorgfalt wird der Pressung der Statorbleche gewidmet, damit diese auch nach langer Betriebszeit nicht nachlässt. Die Distanzierung der einzelnen Blechpakete im Bereich der Luftschlitze erfolgt durch eigens dafür hergestellte Distanzstege mit verbreiterter Auflagefläche, zur Herabsetzung der örtlichen spezifischen Pressung.

Die Transportmöglichkeit erfordert bei grossen Durchmessern Mehrteiligkeit des Stators. Die Trennstellen der Gehäuseteile werden mit besonderer Sorgfalt ausgebildet, um ein gegenseitiges Arbeiten der Bleche zu verhindern.

Anhängebügel an geeigneten Stellen erleichtern bei der Fabrikation, bei Transport und Montage das Anheben und gefahrlose Wenden der Gehäuseteile. Sie bewahren Statorteile und Anhängeseile vor Beschädigungen.



Abb. 7 Statorgehäuse eines Vertikalgenerators beim Anschweißen der Tragleisten für die trapezförmigen Statorblechkeile

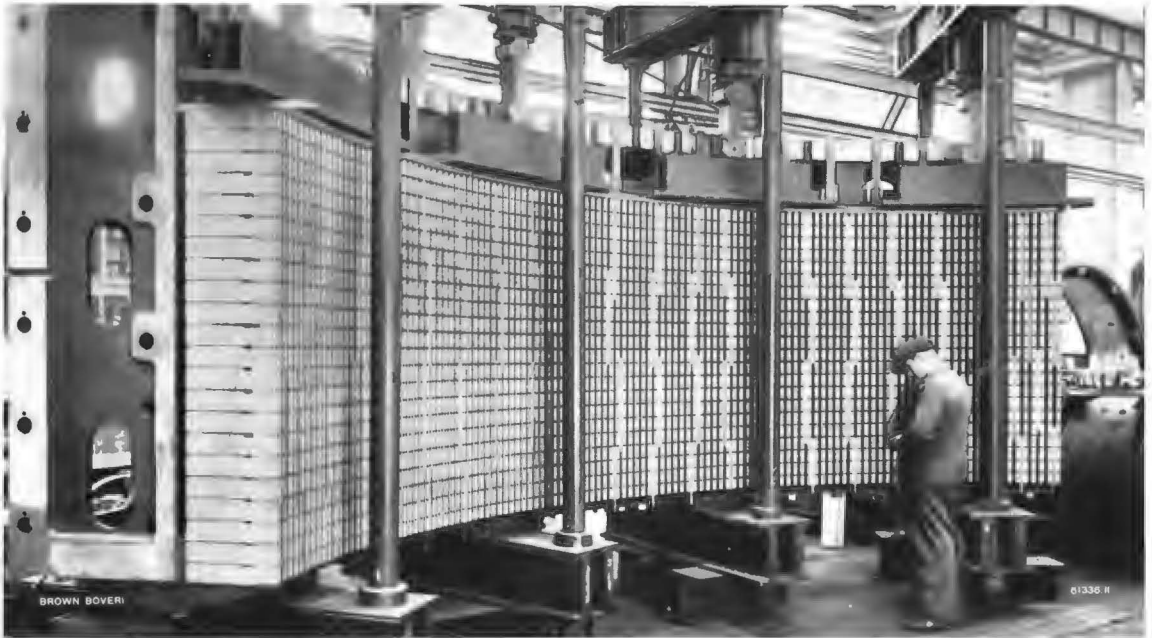


Abb. 8 — Blechen eines grossen Statorviertels

Durch hydraulische Druckzylinder wird dem Blechkörper die nötige Pressung gegeben.



Abb. 9 — Stator eines Dreiphasengenerators von 24 500 kVA bei 300 U/min und 25 Hz mit angebauten Verschaltungen

Die Statorwicklung

Die Statorwicklung ist der weitaus am meisten beanspruchte Teil der Maschinen, und zwar sowohl elektrisch durch Überspannungen als auch mechanisch durch Kurzschlüsse. Die Herstellung einer betriebssicheren Wicklung stellt daher an Konstruktion und Fabrikation sehr grosse Anforderungen und verlangt reiche Erfahrungen.

Die günstigsten Verhältnisse für Grossgeneratoren werden dann erzielt, wenn die Wahl der Generatorspannung in gewissen Grenzen dem Generatorbauer überlassen bleibt. In den meisten Fällen kann er Leiter- und Nutenzahl so abstimmen, dass eine Nut ein oder zwei Stäbe enthält. Diese Wicklung darf als die betriebssicherste angesprochen werden, weil jeder Leiter für die volle Spannung isoliert ist. Meistens werden die Stäbe in offenen Nuten untergebracht, was ihre leichte Auswechslung ermöglicht. Die Stäbe sind aus einzelnen Teileleitern aufgebaut, welche in bekannter Weise miteinander verseilt sind. Diese von uns seit 1912 ausgeführte Konstruktion, die in jüngster Zeit von zahlreichen andern Firmen nachgeahmt wird, bildet noch immer die ideale Lösung zur Unterdrückung der zusätzlichen Wirbelströme. Die aus dem Statoreisen heraustretenden Teile der Stäbe sind in zwei Lagen gleichförmig gebogen. Die äussere Lage stützt sich auf an den Statorpressplatten befestigte isolierte Ringe ab. Distanzstücke zwischen den einzelnen Leitern mit entsprechenden Schnurbandagen verflechten die ganze Wicklung zu einem soliden Korb, sodass auch die bei einem plötzlichen Kurzschluss auftretenden grossen Kräfte keine Verlagerung der Wicklung hervorrufen können (Abb. 10).

Diese Art Wicklung führen wir für Spannungen bis ca. 17 kV aus. Für höhere Spannungen verwenden wir Leiter mit Kreisquerschnitt, ebenfalls in Teileleitern unterteilt und verdreht (vgl. Abb. 12). Infolge der Kreisform ist die dielektrische Beanspruchung der Isolation über den Umfang völlig gleichmässig, was eine spezifisch etwas höhere Beanspruchung der Isolation bei gleicher Sicherheit erlaubt. Mit dieser Wicklungsart haben wir bereits vor Jahren Generatoren bis zu einer Spannung von 36 kV gebaut.

Bei den höheren Spannungen erfordert natürlich die Wahl und Ausführung der Isolation besondere Sorgfalt. Volle Betriebssicherheit kann nur erreicht werden, wenn eine Isolation verwendet wird, die selbst nach langer Betriebszeit eine ge-



Abb. 10 — Statorhälfte mit eingebauter Zweistabwicklung
Die Spulenköpfe sind auf zwei kräftige Ringe abgestützt.

nügende Elastizität beibehält. Wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben¹⁾, hängt das elektrische Verhalten des zur Umpressung der Stäbe verwendeten Mikafoliums ausser von der Qualität der zum Aufbau benützten Materialien: Glimmer, Papier und Lack, in weitgehendem Masse auch von dem

¹⁾ Vgl. F. Beldi: Verbesserung der Isolation von Hochspannungsmaschinen. Brown Boveri Mitt. 1930, Nr. 10, S. 304 bis 310.

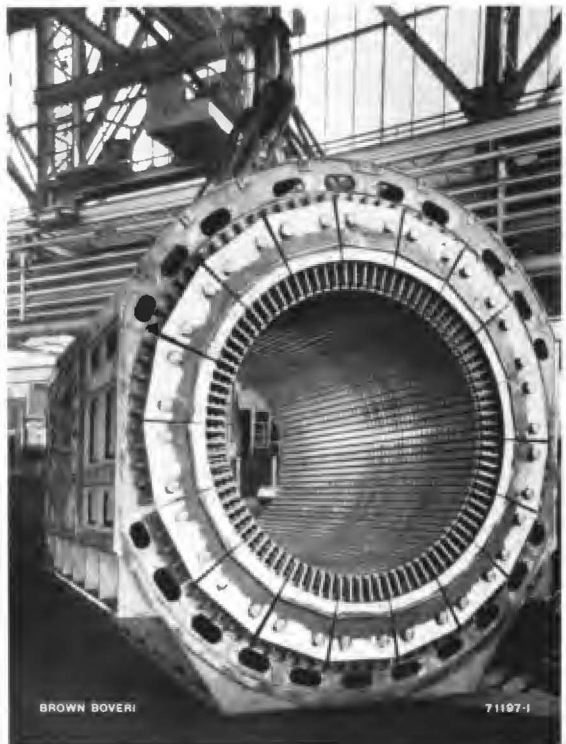


Abb. 11 — Geblechter Stator einer Synchronmaschine für 22 kV Spannung
In die kreisförmigen Öffnungen der Nuten werden die bei dieser hohen Spannung rund ausgeführten Wicklungsstäbe eingeschlossen.

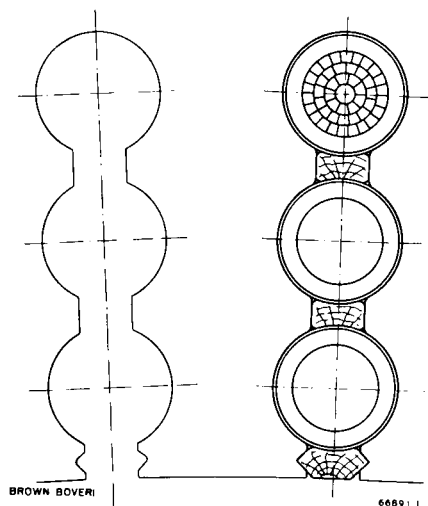


Abb. 12 — Schnitt durch die Statornute einer 22-kV-Wicklung

Die Zylinderform der Umpressungsisolation ergibt über den Umfang eine gleichmässige elektrische Beanspruchung.

prozentualen Anteil der drei Komponenten ab. Zum Beispiel senkt ein kleiner Lackgehalt wohl die dielektrischen Verluste, vermindert aber die Klebfähigkeit der Folien, sodass sich die Gefahr der Bildung von Luftsinschlüssen in der Isolation erhöht. Nur eine sorgfältige Beachtung der verschiedenen Einflüsse bürgt für ein gutes Resultat.

Bei Grossgeneratoren dient heute sozusagen allgemein als Bindemittel für das Folium ein Lack auf bituminöser Basis. Gegenüber dem früher verwendeten Schellack ergibt sich nicht nur eine Verminderung der dielektrischen Verluste; der Hauptvorteil liegt vielmehr darin, dass ein Verspröden und Brüchigwerden der Isolation auch nach langem Betrieb nicht eintritt. Sie bleibt vielmehr etwas plastisch und ist damit fähig, mechanischen Beanspruchungen ohne Bruchgefahr standzuhalten.

In hohem Masse ist natürlich die Güte der Umpressung vom Arbeitsverfahren auf der Umpressungsmaschine abhängig. Genaue Einhaltung einer bestimmten Temperatur, die Heizdauer, die Art und Dauer der Abkühlung spielen eine ausschlaggebende Rolle. Nur sorgfältigste Fabrikation unter Verwertung der jahrelangen Erfahrungen garantiert für ein einwandfreies, gleichmässiges Fabrikat.

Als Isolation für die Spulenköpfe wird je nach den Temperaturverhältnissen Mikaleinen oder Lackband oder eine Kombination von beiden verwendet, wobei direkt auf dem Leiter, entsprechend der

höheren Temperatur, Mikaleinen, darüber das Lackband angeordnet wird.

Grosse Wichtigkeit wird im allgemeinen von seiten der Kunden der Frage des Glimmens beigemessen und öfters werden recht hohe Anforderungen an die Glimmfreiheit der Wicklung gestellt. Übertriebene Forderungen zwingen oft zur Anwendung von Mitteln, die sich anderweitig wieder nachteilig auswirken. Betriebserfahrungen über 30 bis 40 Jahre an Generatoren, die keinerlei besonderen Glimmschutz aufwiesen, haben gezeigt, dass die Gefahren des Glimmens meistens überschätzt werden. Trotzdem treffen wir die nötigen Massnahmen, um ein solches bis ca. 20 % über der Betriebsspannung zu vermeiden. Dabei wird für höhere Spannungen die Oberfläche der Stäbe im Statoreisen mit einem leitenden Belag überzogen, der mit dem Eisen in leitender Verbindung steht und einen allfälligen Luftspalt zwischen Isolation und Nutenwand elektrisch überbrückt. An den Austrittsstellen der Stäbe aus dem Eisen wird das elektrische Potential so gesteuert, dass eine Überbeanspruchung der Luft vermieden wird.

Da Grossgeneratoren im allgemeinen in Blockschaltung auf das Netz oder Freileitungen arbeiten, übernimmt der Transformator den Schutz gegen einfallende atmosphärische Überspannungen. Direkt an Freileitungen angeschlossene Generatoren sollten durch entsprechend koordinierte Ableiter gegen das Eindringen dieser Überspannungen in die Wicklung geschützt werden¹⁾.

Die Tragsterne

Als Tragkonstruktion zur Aufnahme der Traglagerbelastung hat sich bei grossen Vertikalgeneratoren der Tragstern mit radial angeordneten Armen durchgesetzt. Er ist dem Tragbalken überlegen, da die am Umfang regelmässige Anordnung der Arme eine symmetrische Verteilung der Belastung auf das Statorgehäuse und das Fundament ergibt.

Der Tragstern hat in allen radialen Richtungen gleiche Steifigkeit in bezug auf Übertragung von senkrecht zur Welle wirkenden Kräften, wie sie z. B. bei einem Kurzschluss im Polrad auftreten.

Der Mittelkörper, der als Tragkörper für das Traglager ausgebildet ist, wird gleichmässiger de-

¹⁾ Vgl. Dr. W. Wanger: Vorschläge zur wirtschaftlichen Koordination der Isolationen in Anlagen mit rotierenden Maschinen, Brown Boveri Mitt. 1943, Nr. 9/10, S. 286-289.

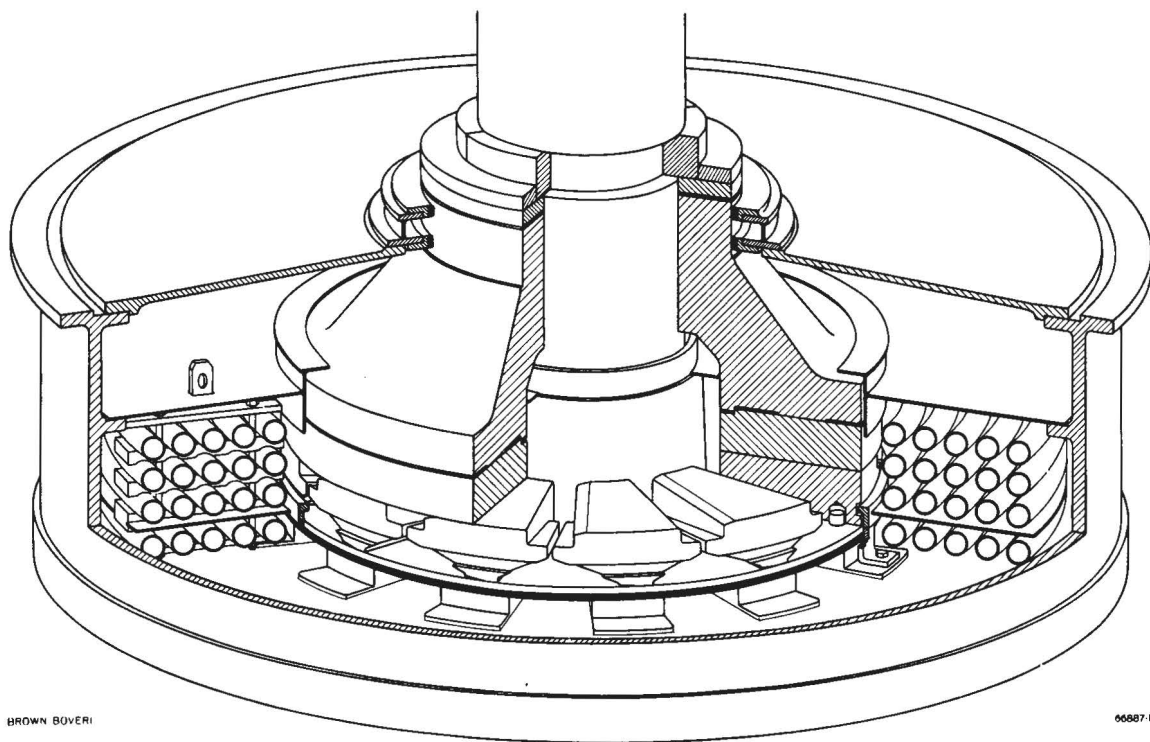


Abb. 13 — Segment-Traglager mit Wasserkühlung

Die Segmente sind auf ihrer Unterlage frei beweglich, sodass sich an den Laufflächen automatisch über jedem Segment ein keilförmiger Ölfilm ausbildet. Die grossen Zwischenräume zwischen den Segmenten sorgen für reichliche Ölzufuhr und gute Kühlung der Laufflächen.

formiert als bei Tragbalken mit Querträgern und ist der Berechnung zugänglicher. Die Belastung verteilt sich regelmässiger auf die Traglagersegmente, und damit erhöht sich die Betriebssicherheit der Lager. Die Dimensionierung der Tragsterne erfolgt lediglich mit Rücksicht auf kleine Durchbiegung. Die Beanspruchungen werden damit unbedeutend.

Der untere Lagerstern dient, sofern nicht das Traglager darauf montiert wird, nur der Führung der Welle, der Befestigung der Bremsvorrichtung und zum Anheben und Abstützen des Rotors auf den Hebeböcken bei Revisionen und Demontagen.

Das Traglager

Das Traglager ist ein Bauelement, das an den Konstrukteur die höchsten Anforderungen stellt. Dank unserer grossen, jahrzehntelangen Erfahrung auf dem Gebiete der Segmentlager beherrschen wir die auftretenden Probleme vollständig.

Das Brown Boveri Traglager (Abb. 13) ist ein Segmentlager mit ruhenden, nach allen Richtungen

frei beweglichen Tragsegmenten, über welche ein Laufring gleitet. Die Segmente sind so gelagert, dass sich beim Lauf der für die Aufnahme der Belastung nötige, keilförmige Ölfilm automatisch ausbildet. Als Werkstoff für Tragsegmente und Laufring verwenden wir meistens ein Spezialguss-eisen, das sich auch beim Anfahren und Abstellen der Gruppe, wo sich eine teilweise metallische Berührung der Gleitflächen nicht verhindern lässt, bestens bewährt.

Wesentlich für die gute Betriebssicherheit des Lagers ist die richtige Wahl der Segmentzahl. Eine zu kleine Anzahl Segmente ergibt hohe Temperaturen im Ölfilm, während eine zu grosse Zahl eine Herabsetzung der Belastbarkeit des Lagers zur Folge hat.

Zur Erreichung einer gleichmässigen Druckverteilung auf alle Segmente und eines allfälligen Ausgleichs kleinerer Ungenauigkeiten sind unter den Segmenten Unterlagen eingebaut, die eine kleine Federung erlauben.

Die hin und wieder von Kunden verlangte Hochdruckschmierung zum Anfahren der Gruppe ist auf

Grund langjähriger Erfahrungen nicht erforderlich und nicht zu empfehlen. Die Bohrungen in den Segmenten zur Einführung des Drucköls stören im normalen Betrieb die selbsttätige Ölfilmbildung. Sie verursachen grössere Verluste und können durch ungleichmässige Segmentabnutzung zu Störungen Anlass geben.

Auf gute Rückkühlung des Lageröls wird besonderes Gewicht gelegt, da die Schmierschichtstärke in starkem Mass von der Viskosität des Öles abhängt. Normalerweise erfolgt die Kühlung durch eine in den Ölbehälter des Traglagers eingebaute Kühlschlange aus Kupferrohr, welche vom Kühlwasser durchflossen wird. Diese Kühlungsart ist einfach, übersichtlich und erfordert keine Wartung. Nur in Fällen, wo die Platzverhältnisse nicht gestatten, eine genügend grosse Kühlfläche vorzusehen oder kein reines Kühlwasser zur Verfügung steht, wird das Lageröl ausserhalb der Maschine in besonderen Ölkühlern gekühlt. Eine Pumpe, welche entweder von der Generatorwelle selbst oder durch einen Elektromotor angetrieben wird, sorgt dabei für die Zirkulation des Öles. Wir bevorzugen und empfehlen Antrieb durch Motor, da der direkte Antrieb durch die Generatorwelle infolge der Notwendigkeit von Getrieben meistens mit konstruktiven Schwierigkeiten verbunden ist, teurer wird und zu Lärmbildung Anlass geben kann. Als Reserve dient eine Pumpengruppe, welche den Strom von einer unabhängigen Hilfsquelle bezieht und automatisch einspringt, wenn die Ölförderung durch die reguläre Pumpe ausbleibt. Die separat aufgestellten Ölkühler können leicht und rasch gereinigt werden.

Besondere Aufmerksamkeit widmen wir der Ölführung im Traglager. Die Kanäle sind reichlich bemessen und so angelegt, dass das aus den Segmenten austretende Öl erst nach zwangsläufiger Strömung durch die Kühlschlange oder die Ölkühler wieder zu den Segmenten gelangt. Beruhigungsbleche verringern das Mitrotieren des Öles im Ölbehälter und verhindern die unerwünschte Ölschaumbildung. Die früher oft vorgekommenen Ölverluste an Traglagern können heute als überwunden betrachtet werden. Um ein Ansaugen von Öldunst in den Generator oder Erreger zu verhindern, sind über und unter dem Lager Sperrluftkammern angebracht.

Ausgezeichnete, über viele Jahre sich erstreckende Betriebserfahrungen mit einer grossen Zahl von Traglagern mit Belastungen bis zu mehreren hundert Tonnen geben die Gewissheit, dass in der Konstruktion der Lager der richtige Weg eingeschlagen wurde.

Kürzlich gelieferte Traglager mit 750 U/min wurden dem Betrieb übergeben, ohne sie vorher in der Werkstätte einem Probelauf zu unterziehen. Trotz der extremen Umfangsgeschwindigkeit des Laufrings von ca. 34 m/s laufen sie ohne die geringste Schaumbildung und ohne jegliche Ölverluste.

Die Führungslager

Alle Führungslager, selbst für die grössten Drehzahlen und Durchmesser, werden als Selbstschmierlager ausgebildet. Diese wurden von uns bereits vor 40 Jahren eingeführt.

Die Lagerschalen tauchen mit ihrem Unterteil in das Öl des Ölbehälters. Schrägverlaufende Schmiernuten fördern dieses nach oben und versorgen so die ganze Lagerschale reichlich mit Öl.

Eine durch Versuche ermittelte Form des oberen Teiles der Lagerschale ergibt einen vollständig schaumfreien Austritt des Öles aus der Schale. Durch geeignete Gestaltung der Schmiernuten bilden sich einige am Umfang gleichmässig verteilte Ölkeile, welche zwangsläufig einen zentrischen Lauf der Welle im Lager bewirken. Das Lagerspiel kann dadurch grösser gehalten werden, was sich vorteilhaft auf die im Lager auftretenden Verluste und die Betriebssicherheit auswirkt.

Das Lageröl wird auf verschiedene Weise gekühlt. Beim Führungslager, das im Traglagerraum eingebaut ist, wird das Öl gemeinsam mit demjenigen des Traglagers gekühlt. Ist das Lager mit einem eigenen Ölbehälter ausgerüstet, erfolgt die Kühlung wo immer möglich durch Luft.

Für grössere Umfangsgeschwindigkeiten wird die Wasserkühlung zugezogen. Die Wärmeableitung erfolgt durch eine in das Lagermetall eingegossene Kühlschlange.

Mit der Verwendung der Selbstschmierlager fallen Ölzirkulationspumpe und Ölleitungen am Generator weg. Da schon bei sehr kleinen Umfangsgeschwindigkeiten die automatische Schmierung einsetzt, kann von besonderen Vorrichtungen für den Anlauf der Maschine abgesehen werden. Dies ist vor allem bei nichtbedienten Zentralen wichtig. Durch die Vergrösserung des Lagerspiels sind die Lager betriebssicherer. Die Bauhöhe der Maschine wird kleiner, da die Lager axial weniger Raum beanspruchen.

Die seit einigen Jahren auch für Grossgeneratoren gelieferten Selbstschmierlager haben sich im Betrieb durchaus bewährt, und es wurde besonders der ruhige Lauf der damit ausgerüsteten Maschinen beachtet.

(MS 928 c)

E. Günthardt
E. Meyer

Pendelgenerator und Turbinenregulierung

621.316.728:621.24

Bei Ausrüstung eines Wasserturbinenreglers mit einem elektrischen Drehzahlreglerkopf an Stelle eines mechanischen Pendels mit Motorantrieb lässt sich der Pendelgenerator stark verkleinern oder ganz umgehen. Dem Turbinenkonstrukteur werden ausserdem interessante Vorteile geboten.

Der heute gebräuchlichste Antrieb für das Pendel grosser Wasserturbinenregler besteht aus einem kleinen Dreiphasenmotor, der die Pendelwelle mit der gewünschten hohen Drehzahl antreibt. Dieser Motor wird meistens von einem Pendelgenerator gespeist, der auf der Turbinengeneratorwelle sitzt oder auch über ein Getriebe von ihr angetrieben wird, sodass zwischen seiner Frequenz, die die Motordrehzahl bestimmt, und der Turbinendrehzahl Proportionalität herrscht, während seine Span-

nung von derjenigen des Hauptgenerators unabhängig ist.

Verglichen mit dem heute nur noch bei kleineren Einheiten üblichen direkten mechanischen Antrieb des Reglerpendels durch Riemen oder Getriebe bedeutet diese Lösung mit Pendelgenerator und -motor eine grosse Verbesserung. Sie ist betriebssicherer, vermeidet Lärm und Verschleiss und gewährt absolute Freiheit in der Platzwahl für den Turbinenregler.

Doch vermag auch sie nicht, den Elektriker ganz zu befriedigen, und zwar weder generatorseitig noch reglerseitig. Ein direkt aufgebauter selbständiger Pendelgenerator ist trotz seiner Leistung von wenigen kVA besonders bei langsamlaufenden Kaplan-Turbinen-Gruppen wegen der Wellenbohrung und der benötigten grossen Polzahl eine relativ teure und platzraubende Maschine. Ihr Aufbau nebst den Erregern und die Ausführung ihrer Pole mit Permanentmagneten ergeben konstruktive Komplikationen, die ihre guten Betriebseigenschaften nicht unbeeinträchtigt lassen. Ein Pendelgenerator von wenigen kVA wird aber auch bei beispielsweise 500 U/min zu gross, um ohne Schwierigkeit wie eine Getriebeölpumpe der Turbine placiert und von einem schnellaufenden Ritzel angetrieben werden zu können.

Die Kombination des Pendelgenerators mit dem Hilfserreger in Form einer selbsterregten Gleichstrommaschine mit Schleifringen ist eine von uns oft befürwortete andere Möglichkeit. Ihre Einfachheit wird aber dadurch gemindert, dass diese Maschine im Hinblick auf raschen Spannungsaufbau und frühes Anlaufen des Pendelmotors bei der Inbetriebsetzung der Turbine meistens Fremderregung und dazu eine automatische Feldumschaltapparatur benötigt.

Die Speisung des Pendelmotors mit der herabtransformierten Hauptgeneratorspannung hat als wichtigsten Nachteil, dass bei Wegfall oder starkem Rückgang der Spannung, sei es wegen einer Netzstörung oder Durchbrennens einer Spannungswandlersicherung, der Turbinenregler sofort auf Offnen reagiert, wenn nicht ein Spannungsüberwachungsrelais eingreift. Es ist aber schwierig, eine wirklich zufriedenstellende Einstellung für ein solches Relais zu finden, denn bei verschiedenartigen und verschieden weit entfernten Netzkurzschlüssen



Abb. 1 — Turbinenregler mit elektrischem Drehzahlreglerkopf zu einer Kaplan turbine von 2250 PS bei 107 U/min

Die Speisung erfolgt durch einen Dreiphasen-Spannungswandler an den Generatorklemmen.

Das Elektrizitätswerk der Stadt Aarau schätzt die Genauigkeit, Stabilität und Einfachheit dieser ausserordentlich betriebssicheren Regulierung sehr; sechs Gruppen seiner Zentrale sind damit ausgerüstet.

ergeben sich alle möglichen Spannungsverläufe am Generator und daher widerspruchsvolle Anforderungen an die Werte für Anzug- und Abfallspannung. Selbst im günstigen Falle bedeutet das Eingreifen dieses Relais aber eine Störung im kontinuierlichen Verlauf des Reguliervorganges. Man übersehe auch nicht, dass dieses Relais, damit ihm voll vertraut werden kann, regelmässig kontrolliert werden muss.

Reglerseitig ist die scheinbar selbstverständliche Umsetzung einer Frequenz in eine Drehzahl und einer Drehzahl in eine entsprechende Pendelstellung eigentlich unnötig. Mit einem geeigneten elektrischen, statischen Meßsystem ist es nämlich ohne weiteres und mit grösster Genauigkeit möglich, die Generatorfrequenz direkt in eine ihr entsprechende und mit starkem Drehmoment behaftete Reglerstellung umzuwandeln. Das gerade bei Frequenzänderungen wichtige Problem des synchronen Laufes des relativ zu seinem Drehmoment stark massebehafteten Motors wird so umgangen, d. h. jegliche Ungenauigkeit und Phasenverschiebung der Frequenzdrehzahlübersetzung des Motors vermieden; auch sind etwaige Schwingungsmöglichkeiten leichter zu beheben als beim Pendelmotor. Der Wegfall dauernd rotierender und der Abnutzung unterworfenen Teile gewährleistet obendrein am sichersten die Aufrechterhaltung der hohen Empfindlichkeit.

Der elektrische Drehzahlreglerkopf von Brown Boveri¹⁾ mit statischem Meßsystem ist nun noch dadurch charakterisiert, dass er bei Spannungswegfall von sich aus, ohne Relais, eine Schliessbewegung herbeiführt. Er ersetzt somit zugleich Motor, mechanisches Pendel und Spannungsüberwachungsrelais und kann, dank seiner statischen Charakteristik, die derjenigen eines mechanischen Pendels entspricht, im Prinzip einfach an dessen Stelle ge-

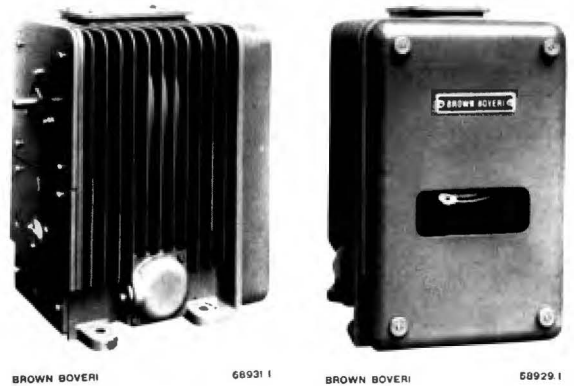


Abb. 2 — Elektrischer Drehzahlreglerkopf von Brown Boveri

Seine Leistungsaufnahme bei 100 V, 50 Hz beträgt 130 VA, seine Dimensionen zirka 240 × 300 × 380 mm. Dieses betriebssichere und eine grosse Ansprechempfindlichkeit mit hohem Drehmoment paarende statische Steuerorgan ist elektrisch und mechanisch sehr einfach anzuschliessen.

setzt werden. Am funktionellen Aufbau des Turbinenreglers sind keine Änderungen vorzunehmen; doch kann es in gewissen Fällen zur Ausnützung der von Natur aus grösseren Empfindlichkeit des elektrischen Reglers empfehlenswert sein, ein empfindlicheres Vorsteuerventil zu wählen.

Der elektrische Drehzahlreglerkopf darf ohne Bedenken direkt von einem Dreiphasen-Spannungswandler an den Generatorklemmen gespeist werden. Dies ist z. B. dann zu empfehlen, wenn im Hinblick auf besonders schwierige Betriebsbedingungen der Rotor der Gruppe zu Schwingungen neigen könnte. Wo aber ein Pendelgenerator vorgezogen wird, kann dieser dank der vom elektrischen Drehzahlreglerkopf benötigten kleinen Leistung von nur 130 VA bei 100 V auch bei Ausführung mit Permanentmagneten sehr klein gehalten werden, sodass er sich bei langsamlaufenden Gruppen ohne weiteres von einem Ritzel auf der Turbinenwelle antreiben lässt. Der gleiche kleine zwölfpolige Pendelgenerator kann bei Gruppen von 250–600 U/min direkt aufgebaut werden, weil der elektrische Drehzahlreglerkopf jeder Frequenz zwischen 25 und 60 Hz angepasst werden kann.

(MS 931)

L. Burckhardt

¹⁾ R. Keller: Ein neuer elektrischer Regler für Primärmaschinen. Brown Boveri Mitt. 1939, Nr. 6, S. 141–148.

R. Wild: Der elektrische Primärregler Bauart Brown Boveri in hydraulischen Zentralen. Brown Boveri Mitt. 1942, Nr. 8, S. 198–201.

H. Müller: Praktische Erfahrungen mit elektrischen Drehzahlreglern für Primärmaschinen im Elektrizitätswerk der Stadt Aarau 1937–1941. Bull. schweiz. elektrotech. Ver. 1941, Nr. 25, S. 723–725.

Die Erregung von Grossgeneratoren

621.313.322-82
621.3.013.8

Die Anforderungen, die man an die Erregung eines Generators stellen muss, können nur in Kenntnis und unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen des zu erregenden Generators festgelegt werden. Für Grossgeneratoren erweist sich die bekannte Schaltung mit fremderregter Erregermaschine als die vorteilhafteste. Dies ist besonders darum der Fall, weil dazu Regler zur Verfügung stehen, die allen Ansprüchen an Leistung, Genauigkeit und Schnelligkeit vollauf genügen.

I. Die Anforderungen an die Erregung

Unter dem Begriff „Erregung“ fassen wir im folgenden alle Apparate und Maschinen zusammen, deren Aufgabe es ist, dem Generator die benötigte Erregungsleistung zur Verfügung zu stellen. Der Begriff umfasst also sowohl die Erregermaschinen („Erreger“), als auch die Reguliereinrichtung („Regler“).

Um die Anforderungen an die Erregung zu erfassen, muss man sich bewusst sein, dass deren Aufgabe nicht nur darin besteht, einfach eine einmal eingestellte Leistung dauernd zu liefern, die gelieferte Leistung muss vielmehr nach bestimmten Gesichtspunkten variiert werden können, und zwar möglichst rasch. Eine Erregung wäre ideal, wenn sie imstande wäre, die Klemmenspannung des Generators oder die Spannung an einer bestimmten Netzstelle unter allen Umständen konstant zu halten. Dieser Zustand ist bei beiden hauptsächlich vorkommenden Betriebsarten der Generatoren erwünscht, nämlich im Alleinbetrieb und im Verbundbetrieb.

Es dürfte allgemein bekannt sein, dass die absolute Konstanzhaltung der Klemmenspannung ein kaum erreichbares Ziel ist; bei Störungen oder auch nur bei Laständerungen können Spannungsschwankungen nicht vermieden werden. Man kann daher eine Erregung darnach beurteilen, wie rasch sie fähig ist, eine einmal eingetretene Spannungsänderung zu korrigieren.

Im Artikel über die Stabilität von Synchrongeneratoren, S. 264 dieses Heftes, sowie in früheren Veröffentlichungen der Brown Boveri Mitteilungen wurde auf die grosse Bedeutung der durch das Luftspaltfeld induzierten Luftspaltspannung aufmerksam gemacht. Während eine absolute Konstanz der Klemmenspannung nicht erhofft werden darf, liegen die Verhältnisse bei der Luftspaltspannung prinzipiell ganz anders. Eine unregelmässige Erregung vermag auch das Luftspaltfeld nicht konstant zu halten; es sind jedoch Erregerschaltungen denkbar, die eine absolute Konstanz dieser Spannung gewährleisten.

An Hand eines Beispiels sollen die physikalischen Vorgänge, die dies ermöglichen, erläutert werden (Abb. 1).

Es sei angenommen, dass der Generator mit $\cos \varphi = 0$ induktiv belastet sei. Der Hauptfluss der Maschine wird von der algebraischen Summe aus Stator- und Rotorampèrewindungen erzeugt. Im betrachteten Beispiel wirken die Stator-AW entgegengesetzt.

Wenn nun der Statorstrom z. B. infolge eines Kurzschlusses plötzlich ansteigt, so vergrössern sich damit die entgegengesetzten AW des Stators. Da jedoch Rotor- und Statorwicklung magnetisch verkoppelt sind, verhalten sich die beiden Wicklungen wie ein Transformator, d. h. der Zuwachs der Stator-AW hat einen Zuwachs der Rotor-AW zur Folge, sodass die entgegengesetzte Wirkung der zusätzlichen Stator-AW teilweise neutralisiert wird. (Nur teilweise wegen der Streuung.) Der Rotorstrom steigt also *gleichzeitig* mit dem Statorstrom an. Dieser Vorgang im Störungszeitpunkte hängt in keiner Weise von der Erregung ab, um so mehr der weitere Verlauf der Dinge. Bei einer ungeregelten Erregung klingt der Rotorstrom nach Massgabe der wirksamen Zeitkonstanten wieder auf den ursprünglichen Wert ab.

Es ist zu beachten, dass die selbständig erfolgte Änderung des Rotorstromes immer im Sinne einer *Erhaltung der Klemmenspannung* und, was vielleicht noch wichtiger ist, immer im Sinne der *Erhaltung der Stabilität* wirkt. Man hat also alles Interesse daran, dass der Rotorstrom mindestens auf dem im Störungsmomente erreichten Wert bleibt (Abb. 3). Dies ist nur möglich, indem die Erregerspannung dem veränderten Rotorstrom angepasst wird, also in unserem Beispiel entsprechend erhöht wird.

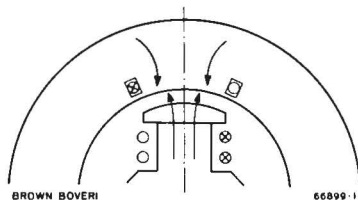


Abb. 1 — Schematische Darstellung der Flussverhältnisse bei Belastung eines Generators mit rein induktiver Last.

Stator- und Rotorstromkreise sind wie bei einem Transformator magnetisch verkoppelt.

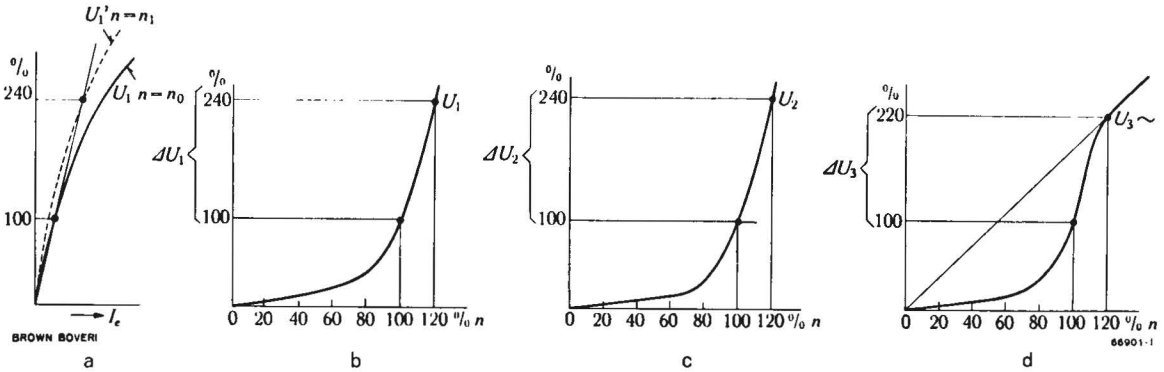


Abb. 2 — Verlauf der verschiedenen Spannungen in Funktion der Drehzahl n bzw. des Erregerstromes I_e in einem Generator mit fremderregter Erregermaschine (vgl. Abb. 6)

a = Charakteristik der Hilfs-erregemaschine bei einer Abschaltung, für zwei verschiedene Drehzahlen. n_0 = Normaldrehzahl, n_1 = erhöhte Drehzahl $1,2 n_0$. Die Spannung des Hilfs-erregers steigt bei einer Drehzahlerhöhung von 20 % sehr kräftig an.
 b = Spannung U_1 des Hilfs-erregers c = Spannung U_2 des Haupt-erregers d = Spannung U_3 an den Generatorklemmen

Die Aufgabe der Erregung zerfällt gewissermaßen in zwei Stufen. Erste Stufe: Erhaltung des Polradstromes auf dem während der Störung (oder Laständerung) erreichten Wert. Zweite Stufe: Möglichst rasches Zurückführen der Klemmenspannung auf den Sollwert, sobald sich eine Abweichung zeigt. Die erste Stufe kann mit dem Stichwort „Erhaltung der Luftspaltspannung“ gekennzeichnet werden, während die zweite Stufe als die der „Erhaltung der Klemmenspannung“ bezeichnet werden kann. Es ist in verschiedener Hinsicht wichtig, dass diese Einteilung gemacht wird.

Schliesslich sei noch auf ein wenig beachtetes Problem hingewiesen, nämlich die Spannungshaltung nach der Abschaltung von Wirklast. In diesem Falle erfolgt immer ein gewisser Drehzahlanstieg des Generators. Allein aus diesem resultiert ein bedeutender Spannungsanstieg. In Abb. 2

sind die Verhältnisse für die fremderregte Maschine dargestellt. Aus Abb. 2a und b ersieht man, dass die Spannung U_1 der Hilfs-erregemaschine, die ja im allgemeinen selbsterregt ist, bei einer Drehzahlerhöhung von 20 % um mehr als 100 % ansteigen kann. Dieser Anstieg hat einen Anstieg der Spannung U_2 der Erregermaschine zur Folge; der erhöhten Spannung U_2 entspricht eine erhöhte Klemmenspannung U_3 des Generators. Im angegebenen Beispiel beträgt diese über 100 %.

II. Die klassischen Erregungen

a) Grundsätzliche Vorbemerkungen

Um eine Gleichstrommaschine auf ihre Eignung als Erreger zu beurteilen, muss man wissen, wie rasch die Maschine auf einen Regulierimpuls reagiert und wie gross die von ihr benötigte Regulierleistung ist.

Nach den amerikanischen Normen wird die *Erregergeschwindigkeit* nach Abb. 4 definiert. Als „quick-response exciters“ werden Erreger bezeichnet, die, z. B. mit einer Netzspannung von 200 V arbeitend, Spannungsaufbaugeschwindigkeiten von mindestens 600 V/s ergeben, das heisst also auf die Nennspannung bezogen rund 300 % pro Sekunde.

Die Regulierleistung hängt direkt vom Verstärkungsgrad, d. h. vom Verhältnis der Ausgangsleistung des Erregers zum Leistungsbedarf seiner Feldwicklung und evtl. Vorschaltwiderstände ab. Je grösser er ist, um so kleiner ist die für eine bestimmte Ausgangsleistung erforderliche Regulierleistung.

Bei grundsätzlichen Überlegungen ist es oft bequem, wenn man mit den Zeitkonstanten der ein-

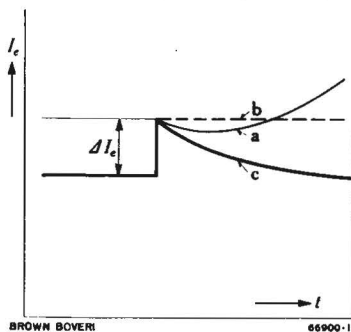


Abb. 3 — Zeitlicher Verlauf des Rotorstromes nach plötzlichem Zuschalten induktiver Last

a = Maschine mit einem gewöhnlichen Erreger mit Regulierung
 b = Maschine mit einem serieerregten Erreger ohne Regulierung
 c = Maschine mit einer gewöhnlichen Erregermaschine ohne Regulierung
 Bei grossen Generatoren, wo die Zeitkonstante des Polrades gross ist, wird die vorübergehende Spannungssenkung im Falle a praktisch belanglos. Vgl. auch Abschnitt III.

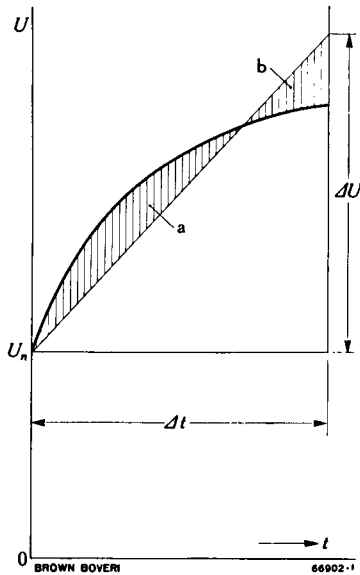


Abb. 4 — Definition der „Erregergeschwindigkeit“ nach den amerikanischen Normen

Die Kurve stellt die Klemmenspannung U eines Generators in Funktion der Zeit t dar. Der Generator arbeitet im Leerlauf und wird auf Normalspannung U_n und Normaldrehzahl reguliert. Nun wird der Reglerwiderstand plötzlich kurzgeschlossen und man bestimmt die Kurve $U = f(t)$. Man wählt $\Delta t = 0,5$ s und ersetzt die Kurve durch eine Gerade, derart, dass die Fläche a gleich der Fläche b wird. Das Verhältnis $\frac{\Delta U}{\Delta t}$ entspricht dann der „Erregergeschwindigkeit“ in Volt pro Sekunde.

zelen Glieder einer Reglerkaskade argumentieren kann. Leider lassen sich die wenigsten dieser Glieder durch eine einzige Zeitkonstante genau umschreiben. Wir behelfen uns daher, indem wir uns die Ausgleichsvorgänge nach einer stossartigen Erregung durch eine einzige Exponentialfunktion so gut wie möglich ersetzt denken und dem betreffenden Element deren Zeitkonstante zuschreiben. Man muss sich dieser unter Umständen recht rohen Approximation jedoch immer bewusst bleiben.

Die angestrebte Konstanthaltung der Klemmenspannung erfordert von der Erregung eine Beeinflussung des Erregerstromes. Man verlangt dazu einen möglichst raschen Stromanstieg im Polrad. Wenn E die am Polrad angelegte, von der Erregung gelieferte Spannung bedeutet, ferner L und R die Induktivität und den Widerstand des Polradkreises darstellen, so ist bei Ausgleichsvorgängen die Anstiegsgeschwindigkeit des Polradstromes gegeben durch die Beziehung

$$\frac{di}{dt} = \frac{E}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad \dots \dots (1)$$

Am Beginn des Ausgleichsvorganges ist

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E}{L} \quad \dots \dots (2)$$

Die anfängliche Anstiegsgeschwindigkeit hängt also von der Grösse der angelegten Spannung und der Induktivität, *nicht aber von der Zeitkonstante* des Polrades ab. Die Zeitkonstante ist somit kein geeignetes Mass zur Beurteilung der Reaktionsgeschwindigkeit der Maschine. Da hier vielfach noch unklare Auffassungen bestehen, gehen wir etwas näher auf diese Dinge ein.

Wir setzen einmal voraus, dass der Polradstrom durch die Erregung möglichst rasch verdoppelt werden muss. Wenn man von der Sättigung absieht, so verlangt dies eine Verdoppelung der von der Erregung gelieferten Spannung. Könnte diese plötzlich geliefert werden, so würde der Polradstrom nach der bekannten Exponentialfunktion ansteigen. Der erste Anstieg, der in vielen Fällen entscheidend ist, bestimmt sich nach der Formel 2.

Wenn dieser Anstieg zu langsam erfolgt, so kann man dem nur durch Erhöhung der angelegten Spannung abhelfen. Dabei führen zwei Arten zum Ziel.

1. Man erhöht den Widerstand des Polradstromkreises und die Erregerspannung proportional; damit verkleinert man die Zeitkonstante des betrachteten Stromkreises und erhöht die Erregerleistung. Man sieht aus diesem Beispiel, dass man die Zeitkonstante auf Kosten der Erregerleistung verkleinern kann. Gleiche Überlegungen gelten sinngemäss auch für die Erregermaschine und in gewissem Sinne auch für die Regler.
2. Man kann die Polradspannung vorübergehend über den für den Endzustand erforderlichen Wert hinaus erhöhen. Gemäss (1) und (2) erhöht sich dann die Anstiegsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Zeitkonstante ebenfalls. Diese Methode bedarf einer entwickelten Reglertechnik und wird heute durchwegs angewandt, wenn die Leistungen ins Gewicht fallen.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich überdies, dass für die Qualität eines Erregers noch eine weitere Grösse bestimmend ist, nämlich die maximale Spannung, die er wenigstens vorübergehend abgeben kann.

Die Bedeutung der Zeitkonstanten erhellt aus folgender Überlegung. Wenn die in einer Reglerkaskade hintereinander geschalteten Regulierorgane Zeitkonstanten verschiedener Grössenordnungen haben, so kommt bei Ausgleichsvorgängen das Glied mit der grössten Zeitkonstante überwiegend zur Geltung. Diese Bemerkung bezieht sich auf den Verlauf des Ausgleichsvorganges im ganzen

und darf bei gewissen heikeln Stabilitätsproblemen nicht unbesehen hingenommen werden.

Die Bedeutung der in einer Reglerkaskade wirkenden Zeitkonstanten muss also immer im Hinblick auf die grösste unter ihnen beurteilt werden. Für genauere Untersuchungen sind jedoch die Gangkurven der einzelnen Regulierorgane aufzuzeichnen¹⁾.

b) Die Erreger

Die Zeitkonstanten und der Bedarf an Regulierleistung der Erregermaschine sind heute allen Konstrukteuren von Wechselstromgeneratoren bekannt. Es bestehen hauptsächlich zwei verschiedene Schaltungen für die Erreger: die selbsterregte (Nebenschluss-)Erregermaschine (Abb. 5) und die fremderregte Erregermaschine (Abb. 6). Die Zeitkonstante der selbsterregten Maschine ist 5–8mal grösser als die einer fremderregten Maschine. Sie hängt überdies von der magnetischen Charakteristik ab (Abb. 5). Sie ist für die Charakteristik b um rund 25 % geringer als für die Charakteristik a. Da die selbsterregte Maschine für Grossgeneratoren nicht mehr in Frage kommt, gehen wir nicht näher auf diese Probleme ein. Alle Angaben beziehen sich im folgenden immer auf fremderregte Maschinen. Die vollständige Lamellierung des magnetischen Kreises verringert die magnetische Trägheit der Erregermaschine; der Gewinn ist jedoch klein und der Mehraufwand gegenüber Maschinen, bei denen lediglich die Polschenkel lamelliert sind, lohnt sich im allgemeinen nicht.

Nach dem oben aufgestellten Prinzip ist die Zeitkonstante der Erregermaschine mit derjenigen des Polrades zu vergleichen. Die Erfahrung zeigt, dass das Verhältnis für Maschinen des gleichen Konstruktionstyps nahezu konstant ist. Für Turbomaschinen beträgt das Verhältnis von Generatorzeitkonstanten zu Erregerzeitkonstanten 15 : 1. Für langsamlaufende Gruppen ist es kleiner, weil die Zeitkonstante der Gleichstrommaschine mit sinkender Tourenzahl stärker wächst als diejenige des Wechselstromgenerators.

So beträgt die Zeitkonstante einer Erregermaschine für Turbogruppen 0,3–0,6 s gegenüber 1,5–3 s bei langsamlaufenden Maschinen. Man sieht

¹⁾ Über die in den letzten Jahren entwickelte Methode der Gangkurven vgl. etwa:

W. Frey: Beweis einer Verallgemeinerung des Stabilitätskriteriums von Nyquist sowie desjenigen von Leonhard. Brown Boveri Mitt. 1946, Nr. 3, S. 59–65.

M. Cuénod: Etude des propriétés d'un réglage automatique. Bull. tech. Suisse rom. 1947, S. 105, 121, 317, 329.

Dr. P. Waldvogel: Theorie der Spannungshaltung einer auf eine lange leerlaufende Leitung arbeitenden Drehstrommaschine. Brown Boveri Mitt. 1945, S. 251–263.

H. Meyer: Verwendung von Frequenzgangkurven zur Beurteilung von Regelungen. Brown Boveri Mitt. 1948, Nr. 5/6, S. 151–157.

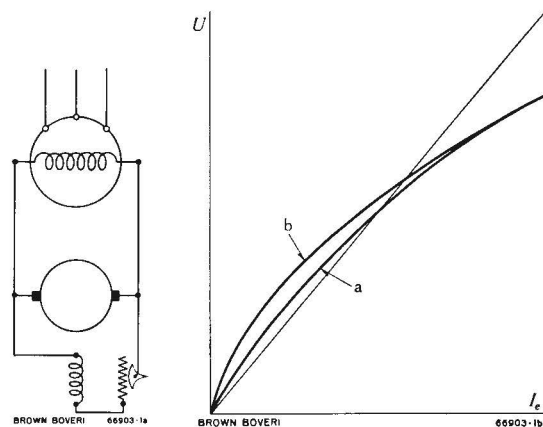


Abb. 5 — Schema und magnetische Charakteristik einer selbsterregten Erregermaschine

Diese Schaltung ist für Schnellerregung nicht geeignet. Eine Maschine mit einer Kennlinie nach b reagiert etwas rascher als eine solche mit einer Kennlinie nach a.

daraus, dass die Kombination einer separat aufgestellten, schnelllaufenden Erregermaschine mit einem langsamlaufenden Generator interessant sein kann. Wir kommen noch auf diese Frage zurück.

c) Die Regler

Für die Regulierung der Erreger stehen heute die folgenden drei Typen zur Verfügung:

- a) die trägheitslosen Regler,
- b) die mechanischen, direkt wirkenden Regler,
- c) die mechanischen, indirekt wirkenden Regler.

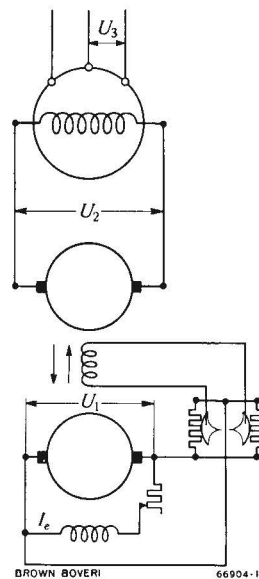


Abb. 6 — Schema einer fremderregten Erregermaschine

Diese Anordnung weist viel bessere Reguliereigenschaften auf als die Anordnung nach Abb. 5

Unter den trägheitslosen Reglern haben besonders die mit Elektronenröhren arbeitenden Regler praktische Bedeutung erlangt. Diese kommen für Grossmaschinen, wie noch dargelegt wird, nicht in Frage.

In die Gruppe der mechanischen, direkt wirkenden Regler fallen die Brown Boveri Wälzsektorregler.

Zur Gruppe der mechanischen, indirekt wirkenden Regler gehören die mit elektro- oder hydro-mechanischen Zwischenverstärkern arbeitenden Regler, wobei die mit Öl-Servomotoren arbeitenden Ausführungen wohl die Hauptgruppe bilden. Zu ihr gehört der Brown Boveri Hochleistungsregler.

Entscheidend für die Qualität eines Reglers sind die drei folgenden physikalischen Eigenschaften:

1. Genauigkeit,
2. Schnelligkeit,
3. Leistungsfähigkeit.

1. *Genauigkeit*: Beim Röhrenregler kann diese auf praktisch beliebig hohe Werte gehoben werden. Im allgemeinen ist die regulierte Spannung an eine Bezugsspannung gebunden. Bei den beiden erwähnten Brown Boveri Reglern, dem Wälzsektorregler und dem Hochleistungsregler, wird eine Genauigkeit von $\pm 0,3\%$ erreicht; sie sind unabhängig von einer Bezugsspannung.

2. *Schnelligkeit*: Charakterisiert man die Schnelligkeit durch eine Zeitkonstante, so lassen sich folgende Richtwerte bestimmen: Beim Röhrenregler kann die Zeitkonstante praktisch beliebig klein gemacht werden. Beim Wälzsektorregler beträgt sie rund 0,1 s, beim Hochleistungsregler ungefähr 0,2 s.

Diese Zahlen sind aber im Zusammenhang mit der Zeitkonstante der zu regulierenden Maschine zu beurteilen. Bei grossen Generatoren mit Zeitkonstanten von 1–10 s spielt die Zeitkonstante von 0,1–0,2 s der mechanischen Regler keine Rolle. Daher ist für solche Maschinen der Röhrenregler nicht interessant, besonders angesichts der ihm innewohnenden Nachteile, wie Unterhalt und mechanische Empfindlichkeit. Dagegen kann er unter Umständen interessant werden bei kleinen raschlaufenden Maschinen mit Rotorzeitkonstanten von 0,1–0,4 s (Eichgruppen).

Die gegenüber dem Wälzsektorregler erhöhte Zeitkonstante des Hochleistungsreglers fällt nicht ins Gewicht, weil diese Regler nur für sehr grosse Generatoren gebraucht werden, die ihrerseits eine höhere Zeitkonstante aufweisen. Um diese Regler nicht nur durch eine Zeitkonstante zu charakterisieren, seien noch die folgenden Zahlenangaben gemacht:

Die minimale Laufzeit für die Verstellung der Kontaktapparatur zwischen Leerlauf- und Vollaststellung beträgt ca. 0,25 s. Seine Leistungsfähigkeit erreicht den respektable Wert von 27 kW/s.

III. Die Serie-Erregung

Diese nach Abb. 7 aufgebaute Erregeranordnung ist in letzter Zeit viel diskutiert worden. Die Serie-wicklung W_1 ist so dimensioniert, dass sie allein die benötigten Erreger-AW aufbringt. Wie eine einfache Überlegung zeigt, erledigt eine solche Erregung, wenn sie richtig ausgelegt ist, vollständig automatisch die erste Stufe der Regulieraufgabe, nämlich die Konstanthaltung der Luftspaltspannung. Für die zweite Stufe, die Konstanthaltung der Klemmenspannung, ist dagegen die Mitwirkung eines Reglers erforderlich, der über die Regulierwicklung W_2 die zur Korrektur nötigen AW liefert. Die Regulierwicklung und damit der Regler treten jedoch nur vorübergehend und so lange in Aktion, bis die Klemmenspannung ihren Sollwert wieder erreicht hat. In diesem Sinne erfährt also der Regler eine maximale Entlastung. Es ist jedoch zur Beurteilung der Serie-Erregung wichtig, sich über die Anforderungen an die Regulierwicklung W_2 und den Regler klar zu werden. Die Wicklung W_2 muss die Erledigung der zweiten Stufe der Regulierung auf sich nehmen; damit dies ebenso rasch geschieht wie bei der gewöhnlichen Erregung, darf sie nicht zu knapp bemessen sein. Man kommt daher zum Schluss, dass ein Serie-

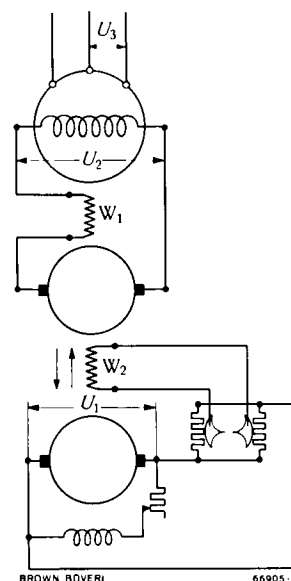


Abb. 7 — Schema der sog. Serie-erregung

Die Wicklung W_1 bringt im stationären Zustande die gesamten benötigten AW auf. Die Wicklung W_2 ist nur während Ausgleichsvorgängen stromdurchflossen.

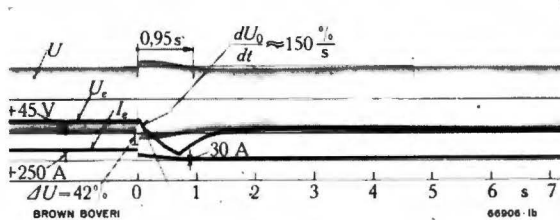
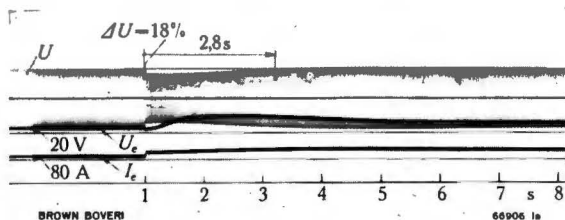


Abb. 8 a und b — Oszillogramme von Schaltmanövern an einem 30 000-kVA-Wasserkraftgenerator

Abschaltung von 7500 kVA kapazitiver Belastung. Dieser Schaltvorgang ist im Prinzip gleichbedeutend mit der plötzlichen Zuschaltung einer induktiven Last im gleichen Betrage. Man beachte den Sprung des Rotorstromes im Schaltmomente. Von einem vorübergehenden Sinken des Rotorstromes, wie in Abb. 3, Kurve a, ist nichts zu bemerken, da die Zeitkonstante des Generators sehr viel grösser ist als diejenige des Reglers und des Erregers.

Einschaltung von 9000 kVA kapazitiv. Diesem Vorgang entspricht die plötzliche Entlastung von induktiver Blindlast. Auch hier kann man im Oszillogramm des Rotorstromes kein Anzeichen einer vorübergehenden Rückbildung auf den Ausgangswert erkennen.

Erreger grösser ausgelegt werden muss als eine gewöhnliche fremderregte Erregermaschine. Denn bei dieser Maschine ist der ganze Wicklungsraum von einer einzigen Wicklung erfüllt, und auf diese Wicklung wirkt der Regler bei seiner Aktion zur Konstanzhaltung der Klemmenspannung. Bei der serieerregten Erregermaschine dagegen braucht man dazu eine spezielle Wicklung, die einen Teil des verfügbaren Wicklungsraumes beansprucht.

Die idealen Verhältnisse bei der Serie-Erregung sind praktisch nicht völlig realisierbar, weil die vollkommene Selbstregulierung nur bei ganz genauer Abstimmung der Seriwicklung vorhanden ist. Geringe Abweichungen von der idealen Charakteristik bringen bereits wesentliche Abweichungen. Freilich besteht immerhin die Möglichkeit, diese Mängel durch zusätzliche Mittel zu beheben.

Die Annahme, dass nur die Serie-Erregung imstande sei, bei Laständerungen das Luftspaltfeld zu erhalten, ist nur bedingt richtig. Um dies zu erkennen, verweisen wir nochmals auf die Abb. 3. Bei einem mit einem klassischen Erreger erregten Generator zeigt sich nach Kurve a dieser Abbildung, nach Eintritt der Störung, ein vorübergehendes Sinken des Polradstromes. Man sieht leicht ein, dass diese „Tasche“ um so kleiner ist, je grösser der Unterschied zwischen der Zeitkonstante des Generators einerseits und derjenigen der Erregung andererseits ist. Bei grösseren Maschinen ist dieser Unterschied so gross, dass von der „Tasche“ praktisch nichts mehr zu sehen ist. Die Oszillogramme Abb. 8, aufgenommen an einer 30 000-kVA-Maschine, bestätigen dies.

IV. Der mechanische Antrieb des Erregers

Die mit schnelllaufenden Erregern erreichbare geringere Zeitkonstante bildet in gewissen Fällen ein Argument für ihre separate Aufstellung, namentlich bei sehr langsam laufenden Maschinen.

Die in der separaten Erregergruppe aufgespeicherte kinetische Energie muss natürlich so gross sein, dass die Erregerleistung auch während kurzzeitigen Spannungszusammenbrüchen geliefert wird. Die Fortschritte im selektiven Distanzschutz während der letzten 20 Jahre machen dies ohne weiteres möglich, weil heute der Grossteil aller Störungen in weniger als 0,5 s abgeschaltet werden kann.

V. Schlussfolgerungen

Es gelten die folgenden allgemeinen Zusammenhänge: Die Zeitkonstante des Reglers darf immer nur im Zusammenhang mit der Zeitkonstante der Erregermaschine und derjenigen der Synchronmaschine beurteilt werden. Diese Zeitkonstanten wachsen im allgemeinen mit der Maschinengrösse, und mit ihnen wachsen auch die Anforderungen an die Regler bezüglich ihrer Leistung, hingegen sinken, gemäss dem oben erwähnten Zusammenhang, die Anforderungen bezüglich der Zeitkonstanten etwas.

Die beiden Haupttypen der Brown Boveri Reglerreihen entsprechen diesen Anforderungen; der Wälzsektorregler weist eine sehr kleine Zeitkonstante auf, während der Hochleistungsregler für sehr grosse Leistungen eine etwas grössere Zeitkonstante aufweist, ohne dass dies seiner Qualität irgend einen Abbruch tut.

Die Serie-Erregung ist im Prinzip richtig; es haften ihr jedoch Nachteile, hauptsächlich bezüglich der genauen Abstimmung, an. Unsere langjährigen praktischen Erfahrungen haben in Übereinstimmung mit obigen Betrachtungen gezeigt, dass die klassische Erregerschaltung mit fremderregtem Erreger allen Anforderungen genügt, sofern sie mit einem raschen und leistungsfähigen Regler ausgerüstet ist.

Die Stabilität von Synchrongeneratoren

621.313.322-82
621.3.016 35

Es werden die Bedingungen zusammengefasst, die die Regulierung von Synchrongeneratoren zu erfüllen hat, damit die künstliche Stabilität in den beiden folgenden Fällen gewährleistet ist:

a) Der Generator soll eine lange Leitung unter Spannung setzen;

b) die Maschine muss an einem starken Netz synchron laufen.

Für beide Fälle werden die Grenzen der Reguliermöglichkeiten angegeben, und es wird ausdrücklich auf die Notwendigkeit hingewiesen, dass eine genügend rasch wirkende Regulierung vorzusehen ist.

1. Einleitung

Die Entwicklung der elektrischen Übertragungsnetze machte gleichzeitig das Studium vieler Regulierprobleme nötig, um dem Einfluss, den Hochspannungsleitungen auf das Verhalten angeschlossener Synchrongeneratoren sowohl im normalen als auch im gestörten Betrieb ausüben, Rechnung zu tragen. Wir gehen hier auf zwei dieser Probleme etwas näher ein und besprechen ihren Einfluss auf die Wahl der Eigenschaften der zu verwendenden Generatoren.

Das erste Problem stellt sich beim Unterspannungsetzen einer langen Leitung. Es ist ein rein elektrisches Stabilitätsproblem. Das zweite ist jenes des Gleichlaufes eines Generators mit einem starken Netz. Es stellt ein Problem elektromechanischen Charakters dar. Wir werden sehen, wie sich diese beiden Aufgaben in glücklicher Weise durch Regulierung der Erregung des Generators mit Hilfe des Brown Boveri Wälzsektorreglers lösen lassen. Dieser gewährleistet bei Betriebsbedingungen, unter denen die natürliche Stabilität unmöglich ist, eine künstliche Stabilität.

2. Künstliche Stabilisierung der Klemmenspannung eines Generators, der eine lange offene Leitung unter Spannung zu setzen hat

Der Generator ist bei einer Kreisfrequenz ω , die eine Funktion seiner Drehzahl ist, gekennzeichnet durch seine Längs- und Querreaktanz X_l und X_q , seine totale Streureaktanz σX_l , seinen Satorwiderstand R und endlich durch seine Leerlaufzeitkonstante T . Die an ihrem Ende offene Leitung sei ersetzt durch eine Kapazität C , der eine auf Generatorspannung umgerechnete Reaktanz X_C entspricht.

Die allgemeine Behandlung der Selbsterregung des an der Leitung liegenden Generators würde bei Berücksichtigung von Dämpferwicklungen auf eine charakteristische Gleichung 6. Grades in p ($p = \frac{d}{dt}$)

führen¹⁾. Wenn man aber voraussetzt, dass keine Dämpfer vorhanden sind und man überdies nur die kleinste Lösung der dann verbleibenden Gleichung beibehält, sodass also die Glieder in p^2 , p^3 usw. vernachlässigt werden können, erscheint die derart vereinfachte Gleichung in der Form²⁾:

$$a_0 p + a_1 = 0 \quad \dots \dots (1)$$

$$\text{mit } a_0 = \left[\left(\sigma - \frac{X_C}{X_l} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_C}{X_q} \right) + \frac{R^2}{X_l X_q} \right] T;$$

$$a_1 = \left(1 - \frac{X_C}{X_l} \right) \cdot \left(1 - \frac{X_C}{X_q} \right) + \frac{R^2}{X_l X_q} \quad \dots \dots (2)$$

Die diese Vereinfachungen begründenden Überlegungen finden sich in der unter ¹⁾ erwähnten Arbeit. Wenn man zudem die Glieder, die den Widerstand R enthalten, unberücksichtigt lassen kann, tritt Selbsterregung nur für Werte von X_C auf, die zwischen σX_l und X_l liegen. Ist der Widerstand dagegen nicht vernachlässigbar, dann kann man, wie dies in Abb. 1 geschehen ist, für zusammengehörige Wertepaare von $\frac{X_C}{X_l}$ (Abszisse) und $\frac{R}{X_l}$ (Ordinate) zwei Gebiete A und B angeben, in denen Selbsterregung auftritt. Der Halbkreis A bezieht sich auf Werte $\frac{X_C}{X_l}$, die zwischen $\frac{X_q}{X_l}$ und 1, der Halbkreis B auf Werte $\frac{X_C}{X_l}$, die zwischen σ und $\frac{X_q}{X_l}$ liegen.

Eine erste Lösung, um die Instabilitätszonen zu meiden, würde darin bestehen, den Widerstand R über den Wert $\frac{R}{X_l} = \frac{X_l - X_q}{2 X_l}$ hinaus zu vergrössern, was mit einer äusseren ohmschen Belastung erreicht werden könnte. Eine zweite Lösung besteht darin, die Kapazität C mit Reaktanzspulen, die an verschiedenen Punkten der Leitung parallel zu dieser anzuschliessen wären, teilweise zu kompensieren. Dadurch wird eine Vergrösserung von $\frac{X_C}{X_l}$ erzielt, die jede Selbsterregung unmöglich macht, wenn die

¹⁾ J. Herlitz: Problèmes relatifs au fonctionnement des réseaux de transport d'énergie à haute tension et à grande distance. Rapport No. 406 an der C.I.G.R.E. 1948.

²⁾ S. B. Crary: Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. Elect. Engng. Bd. 56, 1937, S. 27.

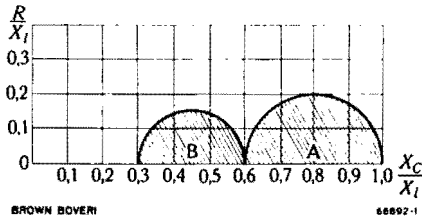


Abb. 1 — Gebiete A und B, in denen für zusammengehörige Werte von $\frac{X_C}{X_I}$ und $\frac{R}{X_I}$ bei kapazitiver Last ohne Regulierung Selbsterregung eintritt

Bedingung $\frac{X_C}{X_I} = 1$ erfüllt ist. Eine andere, wie die Erfahrung bestätigt, wirksame Lösung, auf die wir hier näher eingehen wollen, besteht darin, die Stabilität innerhalb der von Natur aus unstabilen Zone A der Abb. 1 mit Hilfe einer automatischen Regelung der Erregerspannung des Generators künstlich zu verwirklichen. Um dieses Ziel zu erreichen, genügt es, diese Erregerspannung derart zu beeinflussen, dass sie in entgegengesetztem Sinn zu den Abweichungen der Generatorklemmenspannung vom Sollwert ändert. Die regulierte Spannung muss natürlich kleiner sein als diejenige, welche man am offenen Leitungsende zu erhalten wünscht.

Wenn mit K_c ein Proportionalitätsfaktor und mit T_r eine Zeitkonstante, die in erster Näherung die Verzögerung des vollständigen Reglerkreises — Regler und Erreger — darstellt, bezeichnet wird, ergibt sich an Stelle der charakteristischen Gleichung (1) die folgende:

$$c_0 p^2 + c_1 p + c_2 = 0 \quad \dots \dots (3)$$

mit $c_0 = a_0 T_r$; $c_1 = a_0 + a_1 T_r$; $c_2 = a_1 + K_c \dots (4)$

Zur Vereinfachung wollen wir in a_0 und a_1 die Glieder, die R^2 enthalten, vernachlässigen. Man wird die Klemmenspannung des Generators stabilisieren können, wenn die Regulierung so eingerichtet wird, dass:

$$c_2 > 0; \quad c_1 > 0 \quad \dots \dots (5)$$

Wenn $X_q < X_C < X_I$ ist, ist a_0 und also auch c_0 positiv. Für genügend grosses K_c wird auch $c_2 > 0$; um dies zu erreichen, muss

$$K_c > a_1 \quad (\text{Absolutwert}) \quad \text{und} \quad \frac{T_r}{T} = - \frac{\sigma X_I - X_C}{X_I - X_C} \quad (6)$$

gemacht werden.

Das Aufsuchen der Stabilitätsbedingungen in der Zone B der Abb. 1, also für Werte von X_C zwischen X_q und σX_I , hat nur geringen praktischen Wert, weil der Maschinenstrom in diesem Gebiet

seinen Nennwert weit übersteigen würde¹⁾. In der Abb. 2 haben wir den durch (6) festgelegten Verhältniswert $\frac{T_r}{T}$ in Funktion von $\frac{X_C}{X_I}$ dargestellt.

Die Kurve zeigt, dass ein normaler Regler immer rasch genug arbeitet, um im Gebiet $X_q < X_C < X_I$ die künstliche Stabilität zu gewährleisten.

Die vorübergehende Überspannung, die man beim Einschalten der Leitung auf den vorher auf Nenndrehzahl und Nennspannung gebrachten Generator erhalten würde, lässt sich vermeiden, wenn man bei angeschlossener Leitung Spannung und Frequenz von kleinen Werten ausgehend langsam steigert. Auf diese Art wird die normale Drehzahl erreicht, ohne dass der Regler je die Beherrschung der Spannung aufgibt.

Die Abb. 3 und 4 geben oszillographische Aufnahmen der Klemmenspannung der Maschine während des Reguliervorganges, der auf das Einschalten einer offenen Leitung folgt, wieder. Das Oszillogramm der Abb. 3 entspricht dem Fall, wo die Selbsterregungsbedingung $X_C < X_I$ erfüllt ist. Das Eingreifen des Reglers bringt die Generatorspannung, die sich im Einschaltmoment plötzlich auf 365 Volt erhöht hat, mit einer einzigen Regulierschwingung rasch wieder auf ihren Ausgangswert von 290 V zurück. Mit kaum sichtbaren Abweichungen des Erregerstromes von seinem dieser Spannung entsprechenden mittleren negativen Wert hält der Regler nachher die Spannung konstant auf ihrem Sollwert.

Das Oszillogramm der Abb. 4 entspricht dem Einschalten der Leitung, bevor die Maschine ihre volle Drehzahl erreicht hat, wodurch Selbsterregung vermieden wird. Die Einschalt-Überspannung

¹⁾ Dr. P. Waldvogel: Theorie der Spannungshaltung einer auf eine lange leerlaufende Leitung arbeitenden Drehstrommaschine. Brown Boveri Mitt. 1945, Nr. 8, S. 251.

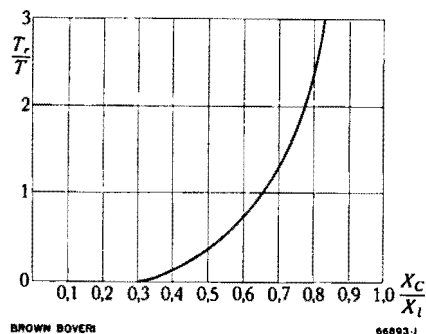


Abb. 2 — Höchstens zulässiger relativer Regelverzögerung $\frac{T_r}{T}$ in Funktion des Verhältnisses $\frac{X_C}{X_I}$
 T_r = Zeitkonstante des Reglerkreises
 T = Leerlaufzeitkonstante des Generators

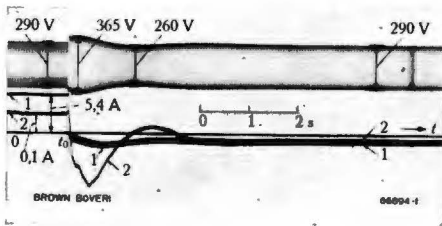


Abb. 3 — Oszillogramm des Ausgleichvorganges, der beim Einschalten eines Generators auf eine Kapazität bei voller Drehzahl (1060 U/min) auftritt

Änderung der Klemmenspannung in Funktion des Erregerstromes 1 und des Regulierstromes 2. Wie das Oszillogramm zeigt, wird die Klemmenspannung während einer einzigen Reglerschwingung auf ihren Sollwert zurückgeführt.

ist viel kleiner als im vorhergehenden Fall. Nachträglich wurde die Frequenz der Maschine langsam gesteigert, ohne dass dabei, dank der Wirkung des Reglers, Selbsterregungserscheinungen auftreten konnten. Der Regler hat die Sollspannung von 290 V mit bemerkenswerter Konstanz aufrecht erhalten, bis auch hier die gleiche EndEinstellung wie im Oszillogramm der Abb. 3 erreicht war.

Die kapazitive Reaktanz X_C lässt sich in Abhängigkeit der Länge der Leitung (die durch die Fortpflanzungskonstante a gekennzeichnet ist) und ihres Wellenwiderstandes Z_w ausdrücken durch:

$$X_C = Z_w \cotg a \quad \dots \dots (7)$$

Nachdem X_C und Z_w auf die Generatorspannung reduziert sind, kann man den Ausdruck $\frac{X_C}{X_l}$ für verschiedene Werte von $\frac{Z_w}{X_l}$ in Abhängigkeit von dieser Länge graphisch darstellen. Man erhält dann die Kurvenschar der Abb. 5, in welcher für die Werte von $\frac{X_C}{X_l}$ drei Bereiche unterschieden werden können: Im Bereich 1 kann keine Selbsterregung auftreten, weil entweder die Leitung zu kurz (a klein) oder die Generatordrehzahl zu klein ($\frac{X_C}{X_l}$

gross) ist; im Bereich 2, in dem $\frac{X_C}{X_l}$ zwischen 1 und $\frac{X_g}{X_l}$ liegt, wird die Selbsterregung durch die Wirkung des Reglers verunmöglicht; im Bereich 3 endlich, in welchem $\frac{X_C}{X_l} < \frac{X_g}{X_l}$ ist, kann die Selbsterregung mit einer einfachen Regulierung nicht verhindert werden.

Wenn z. B. $\frac{Z_w}{X_l} = 1$ ist, tritt mit einer offenen

Leitung, die kürzer als 750 km ist, nie Selbsterregung auf; bei Leitungslängen zwischen 750 und 1000 km können alle Selbsterregungserscheinungen mit einem einfachen Regler unterdrückt werden. Diese wenigen Zahlen zeigen, welch grosses Interesse diese Reguliermethode beanspruchen darf, gestattet sie doch die Umgehung der früher angegebenen, viel kostspieligeren Lösungen.

3. Künstliche Stabilität eines Synchrongenerators, der an ein starkes Netz angeschlossen ist

Das Problem der Energieübertragung wird wesentlich vereinfacht, wenn man nur eine einzige Maschine betrachtet, die ihre Energie über eine einzige Leitung an ein starres Netz abgibt. Um unsere Betrachtungen weiter zu vereinfachen, lassen wir zunächst die Leitung ganz weg. Ihren Einfluss auf die Übertragung werden wir später besprechen. Der Generator ist durch Längs-, Quer- und Streureaktanz X_l , X_g und σX_l gekennzeichnet. Die Ströme in Stator und Rotor bezeichnen wir mit I und i . U sei die konstante Spannung des Netzes, dessen Frequenz unveränderlich ω_0 ist. Der Vektor der Leerlauf-EMK (elektromotorische Kraft) bildet mit dem Netzspannungsvektor den Winkel θ . Mit diesen Grössen ist der Betriebszustand der Maschine eindeutig festgelegt.

Die natürliche Stabilität ist dann gesichert, wenn das Polrad von sich aus ohne Eingreifen eines Reg-

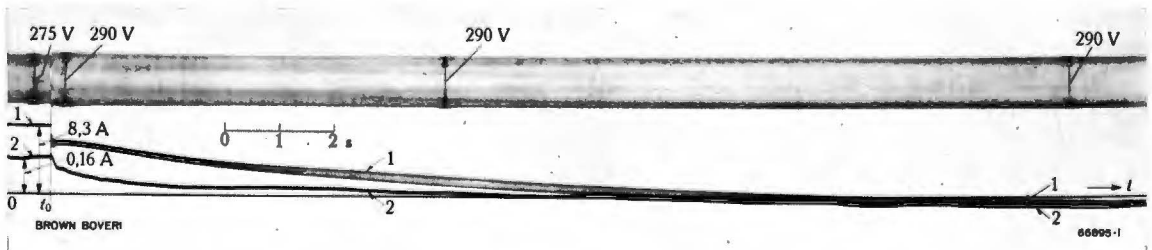


Abb. 4 — Oszillogramm des Ausgleichvorganges, der beim Einschalten desselben Generators auf die gleiche Kapazität bei herabgesetzter Drehzahl (700 U/min) und anschliessendem Hochfahren auf volle Drehzahl (1060 U/min) auftritt

Unter der Einwirkung des Reglers ändern der Erregerstrom 1 und der Regulierstrom 2, um die Klemmenspannung trotz der Drehzahländerung genau konstant zu halten (290 V). Das Verhältnis $\frac{X_C}{X_l}$ hatte folgende Werte: 1,8 bei 700 U/min und 0,8 bei 1060 U/min. Der zweite Wert entspricht einem Punkt, der im kritischen Gebiet A der Abb. 1 liegt.

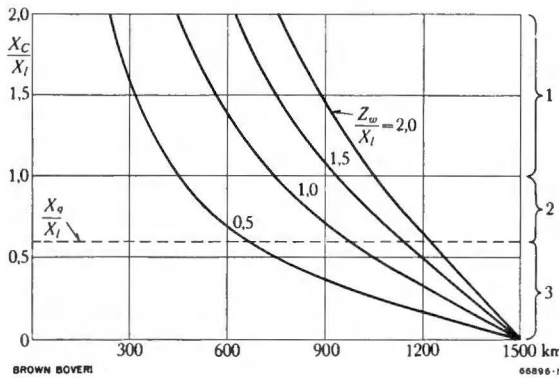


Abb. 5 — Verhältnisse $\frac{X_c}{X_l}$ in Funktion der Leitungslänge mit dem Verhältnis $\frac{Z_0}{X_l}$ als Parameter, wobei Z_0 die charakteristische Impedanz der Leitung und X_l die Synchronreaktanz des Generators ist

Im Bereich 1 ($\frac{X_c}{X_l} > 1$) stabilisiert sich die Spannung der Leitung ohne Regulierung von selbst; im Bereich 2 ($\frac{X_q}{X_l} < \frac{X_c}{X_l} < 1$) lässt sich die Spannung mit einer Regulierung leicht stabilisieren; im Bereich 3 lässt sich die Stabilisierung mit einer einfachen Regulierung nicht erreichen.

lers wieder in seine ursprüngliche Lage ϑ_0 zurückkehrt, nachdem es durch irgend einen Zufall um den gegenüber ϑ_0 kleinen Winkel $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$ aus seiner Mittellage abgelenkt worden war. Als Rückführkräfte wirken hier die synchronisierenden Kräfte. Die Stabilität wird um so besser sein, je grösser die auf die Einheit des Auslenkwinkels $\Delta\vartheta$ bezogene rückführende Leistung ist.

Für Betriebsbedingungen, die ursprünglich unstabil sind, wird dagegen das Eingreifen einer Regulierung *künstliche Stabilität* zu verwirklichen gestatten. Wir betrachten eine Maschine ohne Dämpferwicklungen, die eine Leerlaufzeitkonstante T und ein auf eine Phase und auf eine äquivalente zweiphasige Maschine bezogenes Trägheitsmoment J_1 besitzt. Bei Vernachlässigung des Rotorwiderstandes ergibt sich aus der Differentialgleichung, die das Verhalten der nicht regulierten Maschine bei kleinen Bewegungen um ihre Mittellage ϑ_0 herum beschreibt, folgende charakteristische Gleichung¹⁾:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad \dots (8)$$

mit $a_0 = \sigma T \omega_0 J_1$; $a_1 = \omega_0 J_1$;

$$a_2 = \sigma T \left[1 - \frac{\sigma}{\omega_0} \frac{U^2}{X_l} \sin^2 \vartheta_0 + \frac{E_0 U}{X_l} \cos \vartheta_0 + \frac{U^2}{X_l} \left(\frac{X_l}{X_q} - 1 \right) \cos 2\vartheta_0 \right] \quad \dots (9)$$

$$a_3 = \frac{E_0 U}{X_l} \cos \vartheta_0 + \frac{U^2}{X_l} \left(\frac{X_l}{X_q} - 1 \right) \cos 2\vartheta_0$$

¹⁾ W. Frey: Stabilisierung von Synchrongeneratoren durch rasche Regelung der Erregung bei der Energieübertragung auf grosse Entfernung. Brown Boveri Mitt. 1946, Nr. 11, S. 335. Unsere Gleichungen (8) und (9) stellen eine Verallgemeine-

Der Koeffizient a_3 ist ein Mass für diejenigen synchronisierenden Kräfte, die von $\Delta\vartheta$ selbst, der Koeffizient a_2 dagegen für jene, welche von der zeitlichen Änderung von $\Delta\vartheta$ abhängen. Damit der Zustand stabil ist, müssen bekanntlich die folgenden Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein:

$$\frac{a_1}{a_0} > 0; \quad \frac{a_2}{a_0} > 0; \quad \frac{a_3}{a_0} > 0; \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (10)$$

Wir ziehen es vor, die Stabilitätsgrenzen aus graphischen Darstellungen zu gewinnen, anstatt die algebraische Diskussion obiger Bedingungen fortzusetzen, deren Entwicklung in der zitierten Veröffentlichung zu finden ist. Zu diesem Zweck gehen wir vom allgemeinen Diagramm einer Synchronmaschine aus, deren Ankerrückwirkung in der Längsachse von der in der Querachse verschieden ist. Dabei vernachlässigen wir zur Vereinfachung den Statorwiderstand R . Dieses Diagramm ist in Abb. 6 aufgezeichnet; es bedeuten dort: OA die Sternspannung U des Netzes, die gleichzeitig als Phasennullage angenommen wird; AC den Vektor $jX_q I$, ($j = \sqrt{-1}$); AD den Vektor $jX_l I$; AB den Vektor $j\sigma X_l I$.

Projiziert man A, B und D auf die Gerade OC, dann ist OD' die von der Erregung hervorgerufene EMK; OB' die EMK, die einem konstanten resultierenden Fluss im Polrad entsprechen würde. Der Vektor OC stellt eine fiktive EMK dar, die von Blondel, der deren Vorteile für die Diskussion der Stabilität aufgezeigt hat, als Joubertsche EMK bezeichnet wurde.

Bei konstantem Erregerstrom beschreibt der Punkt C eine Pascalschnecke, deren Form sich um so mehr einem Kreis mit dem Mittelpunkt 0 nähert, je weniger die Reaktanzen X_l und X_q voneinander abweichen. Für jede fest gegebene Erregerspannung erhält man eine Kurve. In der Abb. 7 sind einige *Schneckenkurven für konstanten Strom* dargestellt (ausgezogene Linien), wobei als Erregerstrom- oder Erregerspannungseinheit der ent-

zung der in der zitierten Arbeit angegebenen Gleichungen dar. In dieser wird der Fall, in welchem die Ankerrückwirkung nach zwei Achsen verschieden ist, nicht behandelt.

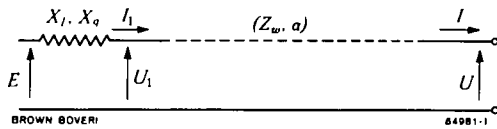


Abb. 8 — Prinzipschema für den Anschluss eines Generators an ein Netz über eine Leitung

gezogene Linien) und anderseits für konstanten Fluss (gestrichelte Linien) ergeben, wobei als Spannungsbasis $0A_2 = \frac{U}{\cos \alpha}$ gewählt wurde. Es

handelt sich hierbei um eine 1000 km lange Leitung, die ihre durch den Punkt C_0 wiedergegebene natürliche Leistung überträgt. Da dieser Punkt zwischen den Grenzkurven $0z$ und $0z'$ liegt, ist stabiler Betrieb nur mit Regulierung gesichert. Zu erwähnen ist noch, dass der bei den Schneckenkurven angegebene Parameterwert sich auf den Erregerstrom bzw. den Fluss bezieht, der dieser speziellen Leistung entspricht. Bei einer sehr langen Übertragungsleitung wird man natürlich die Regulierart wählen, bei welcher die Klemmenspannung U_1 in Abhängigkeit von der Belastung möglichst wenig variiert. Man kann zeigen, dass diese Spannung U_1 im Diagramm Abb. 9 dem Vektor OM entspricht, der den Ursprung O mit dem auf A_2C gelegenen Punkt M verbindet, wobei M durch die Beziehung $A_2M = MC \frac{Z_w \tan \alpha}{X_q}$

festgelegt ist. OM_0 stellt jenen Vektor OM dar, der der natürlichen Leistung zugeordnet ist, wobei der Winkel zwischen OM_0 und $0A_2$ gleich α ist.

Unter Verwendung eines Generators mit ausgeprägten Polen und eines einer 866 km langen

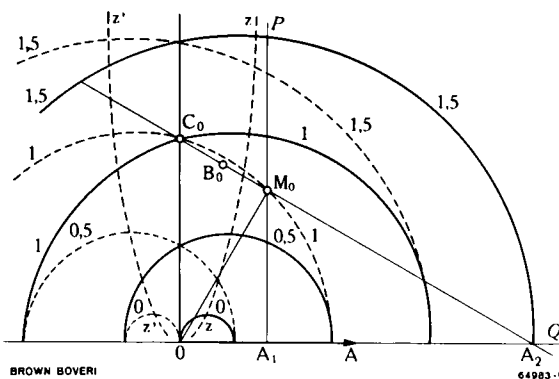


Abb. 9 — Pascalsche Schneckenkurvenschar bei konstantem Erregerstrom (ausgezogene Linien) und bei konstantem Fluss (gestrichelte Linien)

Die Maschine ist über eine Leitung ans Netz angeschlossen.

Leitung entsprechenden Leitungsmodells haben wir viele vergleichende Versuche durchgeführt. Ein Brown Boveri Schnellregler mit starker vorübergehender Statik steuerte den Erregerkreis der Haupterregemaschine wahlweise in Abhängigkeit von einem der folgenden Parameter: der skalaren Spannungsänderung, der vektoriellen Spannungsänderung oder der Blindleistungsänderung. Die vollständig lamellierte Erregemaschine wies einen grossen Spannungsüberschuss und eine hohe Ansprechgeschwindigkeit auf; überdies konnte sie bis zur Erreichung vollständigen Seriecharakters mehr oder weniger compounding werden. Wenn dieser vollkommen erreicht werden könnte, würde der Punkt C in unserem Diagramm gezwungen, ganz genau den Kurven für konstanten Fluss zu folgen. Nur die wichtigsten Ergebnisse dieser vergleichenden Versuche, die mit und ohne Leitung zwischen Maschine und Netz ausgeführt wurden, seien hier kurz zusammengefasst.

Ohne Anwendung eines Reglers, also überhaupt ohne Regulierung, konnte die Grenze für natürliche Stabilität in keinem einzigen Versuch überschritten werden.

Durch Einsatz eines Reglers gelang es uns, unabhängig vom gewählten Parameter, die Maschine innerhalb der durch die Erwärmung festgelegten Grenzen in der Zone zwischen den Grenzkurven $0z$ und $0z'$ zu stabilisieren. Höchstens bei den Versuchen, die ohne Leitung ausgeführt wurden, konnte man mit der Compounding der Erregemaschine Betriebszustände verwirklichen, die etwas näher bei der theoretischen Grenze $0z'$ für konstanten Fluss liegen, als bei anderen Regulierarten. Dieser kleine Unterschied — ungefähr 10 Grad — verschwand, sobald die Maschine über die Leitung ans Netz angeschlossen war.

Alle diese Versuche wurden sehr sorgfältig ausgeführt; sie wurden durch den Umstand begünstigt, dass die Frequenz der Schwingungen in der Nähe der Grenze $0z'$ gegen Null strebt, sodass die Maschine bis in unmittelbare Nähe des Kippunktes bemerkenswert stabil ist. Nur für die speziellen Betriebsverhältnisse, wie sie bei sehr kleiner abgegebener Leistung und bei keiner oder negativer Erregung herrschen, konnte ein wesentlicher Unterschied zwischen den verschiedenen Reguliermethoden festgestellt werden. Einzig die auf der Änderung des Winkels θ fussende Regulierung erlaubte es, die Stabilität für diese Verhältnisse bis zur Grenze $0z'$ aufrechtzuerhalten.

4. Einfluss einer raschen Regulierung der Erregung der Generatoren auf die Wahl ihrer Eigenschaften

Die beiden im vorhergehenden kurz behandelten Probleme zeigten die Vorteile auf, die eine schnelle Regulierung der Erregung einer Synchronmaschine mit sich bringt, gleichgültig ob letztere unabhängig auf eine lange offene Leitung arbeitet oder ob sie an einem starren Netz synchron läuft.

Im ersten Fall erlaubt diese Regulierart die Stabilisierung der Spannung der offenen Leitung für

Werte von $\frac{X_C}{X_L}$, für welche ohne Regulierung ein stabiler Zustand unmöglich ist.

Im zweiten Fall ermöglicht die Anwendung der Regulierung einen künstlich stabilen synchronen Betrieb für Leistungen, die grösser sind als die, die der natürlichen Stabilitätsgrenze ohne Regulierung entsprechen.

In beiden Fällen können also dank der Regulierung verhältnismässig kleine Kurzschlussverhältnisse zugelassen werden, ohne dass deshalb das gute Arbeiten der Maschinen gefährdet ist.

In unserer Studie haben wir die Grössenordnung der für den gesamten Regulierkreis höchstens zulässigen Zeitkonstanten angegeben und überdies ausdrücklich darauf aufmerksam gemacht, dass eine rasche Regulierung erforderlich ist.

(MS 932)

Dr. C. Lavanchy (C.W.)

Generatorschutz

621.316.92:621.313.322

Die Notwendigkeit eines guten Generatorschutzes und die Leitgedanken bei der Zusammenstellung der wichtigsten Schutzeinrichtungen werden kurz begründet.

„Als fester Grundsatz hat uns zunächst immer gegolten, dass die Konstruktion eines Generators an sich vollkommen betriebssicher sein muss, d. h. sie muss ohne irgendwelche Kunstgriffe die nötige elektrische und mechanische Festigkeit aufweisen, damit sie allen normalen Beanspruchungen gewachsen ist. Wir lassen demzufolge bei unseren Konstruktionen nie und nirgends eine Schwäche zu, in der Absicht, sie durch ein Schutzrelais nachträglich zu neutralisieren.

Selbst wenn die Güte der Konstruktion ausser Diskussion steht, so ist nach unserem Dafürhalten ein guter Schutz trotzdem unentbehrlich, denn im Betrieb muss in Störungsfällen mit anormalen Beanspruchungen gerechnet werden, für die die Maschine unmöglich bemessen werden kann. So kann man von keiner Maschine verlangen, dass sie den thermischen Beanspruchungen einer grösseren Dauerüberlastung gewachsen sei. Hier muss der Überlastschutz einsetzen, um die Maschine vor einer sonst unvermeidlichen Zerstörung zu schützen. Schutzeinrichtungen zur Vermeidung anormaler Beanspruchungen sind also unbedingt gerechtfertigt.

Andere Schutzeinrichtungen haben den Zweck, den Schadenumfang nach Eintreten einer Störung auf das äusserste Minimum zu beschränken. So z. B. wird ein Generator bei einem Überschlagn zwischen Wicklung und Eisen durch ein empfindliches

Erdschluss-Schutzrelais so rasch abgeschaltet und entregt, dass kein Eisenschaden entstehen und die Störung nicht zu einem Spulenschluss führen kann. Dadurch werden die Wiederinstandstellungsarbeiten ganz wesentlich vereinfacht, ihre Kosten verringert und damit auch die Dauer des Betriebsausfalls stark verkürzt.

Eine ganz besondere Bedeutung kommt unseres Erachtens dem Schutze von älteren Anlagen zu, die seinerzeit oft fast ohne Schutz dem Betrieb übergeben wurden. Denn gerade hier ist die Wahrscheinlichkeit einer Störung infolge des Alterns der Maschinen am grössten.“

Diese als Einleitung zum Sonderheft über Generatorschutz¹⁾ dienenden grundsätzlichen Überlegungen haben nichts von ihrer Gültigkeit verloren. Es wurde ihnen im Gegenteil zunehmende Anerkennung auch dort zuteil, wo die Generatorschutzfrage früher wenig Beachtung fand.

Es ist heute so gut wie überall selbstverständlich, dass neue grosse Generatoren nur mit den geeigneten Schutzeinrichtungen in Betrieb genommen werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der automatische Schutz gerade in der ersten Betriebszeit der Maschinen besonders wertvoll ist, wo etwaige kleine Montagefehler usw. zum Vorschein kommen und das Personal mit der Maschinenbedienung noch nicht so vertraut ist wie später.

Bei älteren Generatoren wird sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass die Wicklungsisolation wegen

¹⁾ Siehe Brown Boveri Mitt. 1945, Nr. 5.

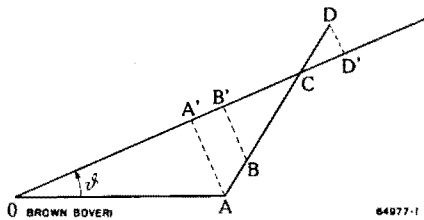


Abb. 6 — Allgemeines Diagramm einer Synchronmaschine bei Zerlegung der Ankerrückwirkung nach Längs- und Quersache

sprechende Wert der leerlaufenden Maschine angenommen wurde. Dieses Diagramm hat den Vorteil, dass folgende Größen direkt abgelesen werden können: die Wirkleistung P und die Blindleistung Q durch Projektion von OC auf die P -Achse und Q -Achse; der abgegebene Strom, der proportional zu AC ist, sowie seine Phasenverschiebung φ gegenüber U , die durch den zwischen AC und der P -Achse liegenden Winkel gegeben ist. Für eine gegebene Erregung kann man die Stabilitätsgrenze des Generators direkt auf der entsprechenden Pascalschnecke ablesen. Der geometrische Ort der Punkte mit horizontaler Tangente, also die Kurve Oz , stellt die natürliche statische Stabilitätsgrenze des Generators dar. Man kann zeigen, dass sie in Polarkoordinaten durch die Gleichung:

$$\bar{\rho} = U \left(1 - \frac{X_q}{X_l} \right) \frac{\sin^2 \vartheta}{\cos \vartheta} / \vartheta \quad \dots (11)$$

dargestellt wird, worin der Radiusvektor mit $\bar{\rho}$ und der Richtungswinkel mit ϑ bezeichnet sind. Diese Grenze liegt also rechts der durch O gehenden vertikalen Achse, wenn $X_q < X_l$ ist, was bei Maschinen mit ausgeprägten Polen der Fall ist; sie fällt in die Achse, wenn $X_q = X_l$ ist, was praktisch für Turbogeneratoren erfüllt ist; sie würde links dieser Achse liegen, wenn X_q grösser als X_l werden würde. Das Diagramm gestattet also ohne weiteres, die Erregung abzulesen, die mindestens nötig ist, um bei gegebener Leistung die natürliche statische Stabilität zu verwirklichen.

Wenn man auch ausserhalb der Grenze Oz stabile Betriebszustände erhalten will, dann ist eine Regulierung so vorzusehen, dass die Punkte mit horizontaler Tangente im Diagramm Abb. 7 von der Grenze Oz aus nach links verschoben werden. Die neuen Kurven, die also nicht mehr einer konstanten Erregerspannung entsprechen können, müssen links von Oz noch ansteigen, sodass auch in

diesem Gebiet einem zunehmenden Winkel ϑ eine grösser werdende regulierte Spannung zugeordnet ist. Je nach Zweck und Umständen wird man die Regulierung von einem der folgenden Parameter, die uns von der Maschine oder vom Netz zur Verfügung gestellt werden, abhängig machen: Skalare Änderung der fiktiven Spannung, die im Diagramm zwischen OA und OC liegt (kompensiertes Voltmeter); Änderung des zwischen zwei Spannungsvektoren liegenden Winkels; Änderung der Wirk- oder der Blindleistung usw.

Algebraisch betrachtet wirkt sich die Regulierung so aus, dass in den Formeln (9) bei a_3 ein Glied von der Form $\frac{K}{1 + pT_r}$ einzuführen ist, worin K ein von der Regulierung abhängiger Koeffizient und T_r die Zeitkonstante des gesamten Reglerkreises (Regler und Erregermaschine) ist.

Man könnte versucht sein, anzunehmen, dass die Regulierung eine beliebige Linksverschiebung der Stabilitätsgrenze Oz erlauben würde. Dem ist aber nicht so, denn der Generator reagiert während einer nicht unendlich langsamen Belastungsänderung derart, dass er den resultierenden Polradfluss konstant zu halten trachtet. Während seiner Bewegung deformiert er die zu konstanter Erregung gehörenden Schneckenkurven. Unter der rein theoretischen Annahme, dass die Maschine in der Lage sei, ihren Fluss dauernd absolut konstant zu halten, bewegt sich der Punkt C auf einer zweiten, in der Abb. 7 punktiert eingezeichneten Schneckenkurvenschar. Die Kurven sind mit relativen Flusswerten angeschrieben, wobei als Einheit der dem Leerlauf entsprechende, nur vom Rotorstrom allein erzeugte Fluss gewählt wurde. Man kann noch den geometrischen Ort Oz' der Maxima dieser zweiten Schar einzeichnen, der der folgenden vektoriellen Gleichung entspricht:

$$\bar{\rho}' = U \left(1 - \frac{X_q}{\sigma X_l} \right) \frac{\sin^2 \vartheta}{\cos \vartheta} / \vartheta \quad \dots (12)$$

Hierin ist $\bar{\rho}'$ der Radiusvektor eines laufenden Punktes und ϑ der zugehörige Richtungswinkel. Die Kurve Oz' die eine zweite Stabilitätsgrenze darstellt, befindet sich links ($\cos \vartheta$ negativ) der durch O gehenden senkrechten Achse und verschiebt sich um so mehr nach links, je kleiner die Streureaktanz ist. Man kann also auch im Gebiet zwischen Oz und Oz' stabile Betriebszustände erhalten, und man wird sich der Grenze Oz' um so mehr nähern, je besser die durch die spontane Re-

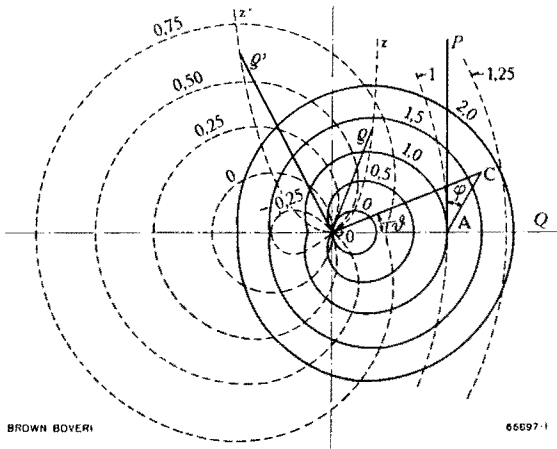


Abb. 7 — Pascalsche Schneckenkurvenschar bei konstantem Erregerstrom (ausgezogene Linien) und bei konstantem Fluss (gestrichelte Linien)

Die Maschine ist direkt ans Netz angeschlossen.

aktion der Maschine unterstützte Regulierung den resultierenden Fluss konstant zu halten vermag.

Algebraisch betrachtet entspricht die Grenzkurve $0z'$ in den Formeln (9) dem Grenzfall $a_2 = 0$. Um die Stabilität auch noch im links von $0z'$ liegenden Gebiet verwirklichen zu können, ist die Regulierung, wie dies schon anderweitig gezeigt wurde, auch noch vom Schlupf abhängig zu machen. Hier wollen wir uns aber nicht damit befassen. Wir wollten vor allem die graphische Darstellung der Stabilitätsgrenzen für eine nicht regulierte und eine in üblicher Weise regulierte Maschine beschreiben. Die beiden in der gleichen Figur dargestellten Schneckenkurvenscharen zeigen die Leistungsreserve, die sich erzielen lässt, wenn man den Punkt C zwingt, sich statt auf einer Kurve konstanten Stromes auf einer solchen konstanten Flusses zu bewegen.

Wir wollen noch kurz den Einfluss untersuchen, den ein auf eine Zeitkonstante T_r reduzierter Regelverzug auf die künstliche Stabilität ausübt. Die Gleichungen (8) und (9) sind dann durch die folgenden zu ersetzen:

$$c_0 p^4 + c_1 p^3 + c_2 p^2 + c_3 p + c_4 = 0 \quad \dots (8 \text{ bis})$$

$$\text{mit } \begin{cases} c_0 = a_0 T_r ; & c_1 = a_0 + a_1 T_r ; & c_2 = a_1 + a_2 T_r ; \\ c_3 = a_2 + a_3 T_r ; & c_4 = a_3 + K \end{cases} \quad \dots (9 \text{ bis})$$

Wenn man, analog wie dies in einem früheren Abschnitt geschehen ist, nur die kleinen Lösungen für p berücksichtigt, ergibt sich, dass T_r die Grösse

c_4 , welche einer unendlich langsamen Verschiebung des Rotors entspricht, nicht beeinflusst. Hingegen hängt c_3 von T_r ab, sodass das grösste, für stabilen Betrieb noch mögliche Verhältnis T_r/T festgelegt ist durch:

$$\frac{T_r}{T} = \frac{1}{T} \frac{a_2}{a_3} = \dots (13)$$

$$- \sigma \left[\frac{1 - \sigma U}{\sigma E_0} \sin^2 \vartheta_0 + \cos \vartheta_0 + \frac{U}{E_0} \left(\frac{X_l}{X_q} - 1 \right) \cos 2 \vartheta_0 \right] \\ \cos \vartheta_0 + \frac{U}{E_0} \left(\frac{X_l}{X_q} - 1 \right) \cos 2 \vartheta_0$$

Da der relative Regelverzug T_r/T nie Null ist, kann auch der Zähler des letzten Gliedes dieser Gleichung nie verschwinden. Man kann also die Grenze $0z'$, der $a_2 = 0$ entspricht, theoretisch nie erreichen.

Von diesem Standpunkt aus betrachtet, ist eine Vergrösserung von T_r , wie sie durch Compoundierung der Erregermaschine erzielt werden kann, vorteilhaft. Man kann dann der theoretischen Grenze $0z'$ etwas näher kommen, was wir auch experimentell bestätigt fanden.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass sich die Grenze $0z'$ im allgemeinen in einem Gebiet befindet, das mit Rücksicht auf die Erwärmung der Maschine nicht ausgenützt werden kann. Für alle Betriebszustände, die innerhalb der zulässigen Erwärmungsgrenze liegen, ist also die statische Stabilität mit der angegebenen Regulierart gesichert.

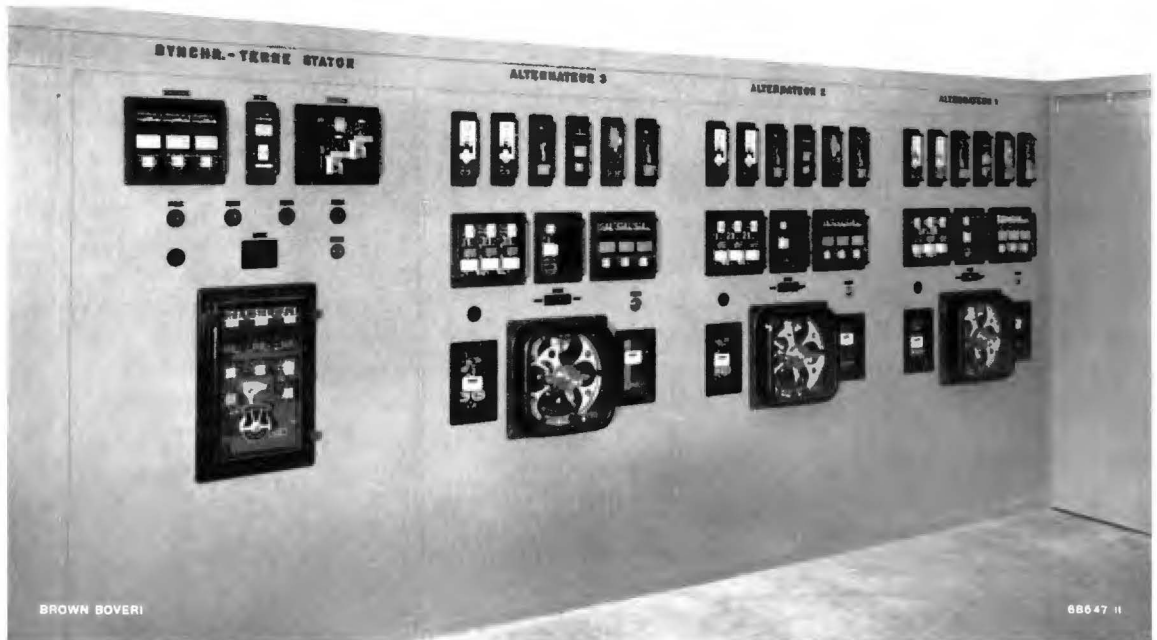
Die bisherigen Betrachtungen beziehen sich auf einen direkt an ein Netz angeschlossenen Generator. Wenn der Anschluss, wie dies in Abb. 8 dargestellt ist, über eine Leitung mit dem Wellenwiderstand Z_w und der elektrischen Länge a erfolgt, dann erhält man das Diagramm der ganzen Übertragung aus dem früheren einfach dadurch, dass man die Netzspannung U durch eine Spannung

$\cos a$ und die Reaktanzen X_l und X_q und den Streukoeffizienten σ durch X_l^* , X_q^* und σ^* ersetzt. Es gelten dann die folgenden Beziehungen:

$$X_l^* = X_l + Z_w \operatorname{tg} a ; \quad X_q^* = X_q + Z_w \operatorname{tg} a ;$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma X_l + Z_w \operatorname{tg} a}{X_l + Z_w \operatorname{tg} a} \quad \dots (14)$$

In der Abb. 9 haben wir einige Kurven der beiden Pascalschnecken aufgezeichnet, wie sie sich einerseits für konstanten Erregerstrom (aus-



Komplette Generatorschutzeinrichtung für drei Maschinen von je 10 MVA, mit den Spannungsschnellreglern und einem Schnellsynchronisierapparat
 Ausser den auf den Feldern sichtbaren Relais für Überspannungs-, Überlast-, Erdschluss- und Differentialschutz gehören auch die Magnetfeldschalter zu jeder kompletten Generatorschutzeinrichtung.

ihrer Alterung einen Durchschlag erleidet, wie diejenige, dass bei einem Isolationsdefekt die Wicklung total ersetzt werden muss, weil eine lokale Reparatur nicht mehr ausführbar ist, mit der Zeit immer grösser. Ein guter Schutz macht sich deshalb selbst für die letzten Betriebsjahre noch bezahlt.

Weil es besser ist, einen Maschinenschaden zu vermeiden, als ihn, selbst wenn er lokalisiert bleibt, zu beheben, sind die *vorbeugenden Schutzmassnahmen* grundsätzlich am nützlichsten. Zu diesen gehören das Maximalspannungszeitrelais und, ausser bei Generatoren in reiner Blockschaltung mit einem Dreieck-Stern-Transformator, drei Überspannungsableiter vor dem Generator und einer am Nullpunkt. Diese Apparate haben betriebsbedingte bzw. atmosphärische Überspannungen unschädlich zu machen. Vorbeugender Natur ist auch der Überlastschutz und derjenige gegen äussere Kurzschlüsse (Sammelschienenkurzschlüsse). Beide Schutzeinrichtungen zusammen benötigen bei Wasserkraftgeneratoren drei Thermorelais und ein Zeitrelais. Im gleichen Zusammenhang seien auch die Überwachungseinrichtungen für die Lager und die Ventilation erwähnt, die die Temperatur und die Strömung von Luft, Öl und Wasser erfassen und bei anormalen Werten alarmieren und eventuell auch die Maschine abschalten.

In der Kategorie der *Vorrichtungen zur Lokalisierung innerer Defekte* kommen diejenigen in erster

Linie in Frage, die statistisch gesehen am häufigsten eingreifen müssen. Als häufigster Wicklungsdefekt ist der Statorerdschluss zu nennen. Es kommen hier verschiedene Schutzschaltungen zur Anwendung, je nachdem der Generator auf einen Transformator, mit oder ohne Zwischenabzweig, oder auf Sammelschienen arbeitet. In jedem Fall ist der Schutz selektiv und empfindlich und sorgt durch Begrenzung des Erdschlussstromes dafür, dass der Schaden von vornherein sehr begrenzt wird. Phasenkurzschlüsse im Generator oder an seinen Klemmen und Ableitungen werden durch den bekannten Differentialschutz erfasst, der bei Blockschaltung der Maschine mit dem Transformator auch diesen schützt und in diesem Fall mit dem Prozentdifferentialrelais ausgeführt wird. Bei Grossgeneratoren mit zwei Parallelwicklungen pro Phase ist auch der dann sehr einfach auszuführende Windungsschlusschutz zu empfehlen.

Eine besondere Schutzeinrichtung dient dazu, einen etwaigen Rotorerdschluss zu melden, sodass der Maschinist nicht erst das Poltern der mit Doppelerschluss im Rotor laufenden Maschine abwarten muss, um auf den Defekt aufmerksam zu werden.

Überspannungs-, Statorerdschluss-, Differential- und Windungsschlusschutzrelais würden ihre Aufgabe nicht erfüllen, wenn sie bei ihrem Ansprechen nur den Generatorschalter auslösen und den Genera-

tor nicht gleichzeitig in kürzester Frist spannungslos machen würden. Dazu dienen Haupt- und Nebenschlussmagnetfeldschalter mit den entsprechenden Entladewiderständen. Bei inneren Defekten wird zudem die immer häufiger vorhandene Brandschutzeinrichtung in Funktion gesetzt, gleichzeitig die Turbine abgestellt und die Gruppe stillgesetzt, eventuell unter Benützung der Generatorbremsen, ganz besonders in automatischen Zentralen. Zusammenfassend darf heute bei grossen Wasserkraftgeneratoren das Vorhandensein von Haupt- und Nebenschluss-Magnetfeldschaltern, von Überstrom- und Überspannungsrelais, von Stator-Erdschluss- und/oder Differentialschutzrelais und im Falle direkter Freileitungsspeisung von einem nullpunktseitigen und drei leitungssseitigen Ableitern als Minimalschutz vorausgesetzt werden, wozu die Lager- und Luftkühlungskontrolleinrichtungen kommen.

In grösseren Zentralen werden meistens sämtliche Schutz- und Überwachungseinrichtungen mit Signalapparaten verbunden, die auf besonderen Störungsmeldefeldern zusammengefasst sind, so dass leicht ersichtlich ist, welche Schutzvorrichtung angesprochen hat.

Eine regelmässige Kontrolle der Arbeitsbereitschaft und der genauen Einhaltung der Einstell- und Ansprechwerte der Schutzrelais, die nur ganz selten arbeiten, ist unbedingt erforderlich. Zu diesem Zwecke werden die meisten Sekundärrelais mit Prüfklemmen geliefert, die ihre Kontrolle mit besonderen Prüfapparaten auch während des Normalbetriebes gestatten, ohne dass Verbindungen gelöst werden müssen, oder die Schutzeinrichtungen werden durch fest eingebaute Prüfeinrichtungen ergänzt.

(MS 930)

L. Burckhardt

INTERESSANTES IN KÜRZE

Unser 50 000. Schnellregler

621.316.72

Zu den typischen Produkten unserer Firma darf gewiss auch der klassische, weltbekannte *Schnellregler* gezählt werden, der von Heinrich Güttinger im Frühjahr 1907 erfunden wurde. Die

Tatsache, dass kürzlich der 50 000. dieser Schnellregler unsere Werkstätte verliess, um in Übersee seinen Dienst anzutreten, beweist, dass es sich bei diesem Apparat um etwas Besonderes han-



Abb. 1 — Der 50 000. Schnellregler inmitten einer Serie gleicher Apparate in unserem Prüfstand



BROWN BOVERI

69838-1

Abb. 2 — Der erste Wälzsektorregler der Welt aus dem Jahre 1907

delt. Die Abbildung 1 zeigt den festlich bekränzten „Jubilar“, einen normalen 4-Sektor-Schnellregler, inmitten seiner Artgenossen.

Man vergleiche damit das erste Modell eines Wälzsektorreglers (Abb. 2), das im Herbst 1907 als Zugbeleuchtungsregler in einem Erst- und Zweitklasswagen der Schweizerischen Bundesbahnen in Betrieb kam und gleich ohne Störung den ganzen Winter 1907/08 auf der Strecke München–Ventimiglia den harten Bedingungen vollauf genügt hat. Wie wenig hat sich sein Aussehen geändert! Das Drehsystem auf der Mittelachse, Anord-

nung und Form der Wälzsektoren, die Kontaktbahnen und die Dämpfungseinrichtung sind die gleichen geblieben. Das Fundament war gut; sehr bald führte es zu weiteren Anwendungen.

Schon im Frühling 1908 wurde der erste Spannungsschnellregler für eine stationäre Wechselstrommaschine geliefert, und fast jedes Jahr folgten weitere Anwendungen und Ausführungsarten. Heute stehen rund 50 Reglertypen zur Lösung der verschiedensten Regulieraufgaben zur Verfügung:

Eine lückenlose Reihe Spannungs- und Zugbeleuchtungsregler, Stromregler, Leistungsregler, Nulleistungsregler, Frequenzregler, Steuerregler, Parallelschaltregler, Drehzahlregler, $\cos \varphi$ -Regler, Zugregler, Transformatorregler usw. (vgl. Abb. 3).

Viele dieser Apparate versehen ihren Dienst seit der Inbetriebsetzung, d. h. seit 30 und mehr Jahren praktisch ohne Wartung, in zuverlässiger und anspruchsloser Weise, zur vollen Zufriedenheit ihrer Besitzer.

Die Güte und Zweckmässigkeit des Brown Boveri Wälzsektorreglers wird durch Nachahmungsversuche, die da und dort gemacht worden sind, nur besser unterstrichen.

Doch die Entwicklung der Schnellregler blieb bei uns nicht stehen. Die langjährigen Erfahrungen mit den verschiedensten Maschinen, Klima- und Betriebsverhältnissen, immer neue Untersuchungen und Versuche führten zu wertvollen Verbesserungen und Verfeinerungen. Konstruktion und Fabrikation wurden kritisch durchgesehen, eine immer strengere Auslese aller in Frage kommenden Materialien und Konstruktionselemente durchgeführt und die Prüfungen verschärft. Fachmännische, liebevolle Hände betreuen die Regler vom Beginn bis zum Ende der Fabrikation. Spezialisten, die in „ihre“ Regler direkt verliebt sind, sorgen dafür, dass jedes Stück, das die Werkstatt verlässt, seinem Rufe Ehre macht. Jeder einzelne Regler wird so sorgfältig geprüft, protokolliert und verpackt wie ein Chronometer. Daher die vieltausendfache Feststellung unserer Kunden, dass der Brown Boveri Schnellregler auf die Dauer nicht nur mehr hält als er verspricht, sondern auch der preiswerteste aller Regler ist.

(MS 925)

K. Kupper



BROWN BOVERI

59705-1

Abb. 3 — Die modernen Brown Boveri Wälzkontakt-Schnellregler

Je nach der Grösse der Maschine, der zu leistenden Regulierarbeit und der gewünschten Genauigkeit kann das bestgeeignete der heute verfügbaren Modelle verwendet werden.

