

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 28 (1937)
Heft: 22

Artikel: Frequenz und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden
Autor: Keller, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058768>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

auch weiterhin den intensiven Bemühungen von Wissenschaft und Technik bedarf.

Der Vorsitzende verdankt das Referat bestens. Die Ausführungen des Herrn Hug werden besonders interessant, wenn man die von Herrn Darrieus dargelegten Prinzipien dahinterstellt. Es ist möglich, dass bei deren Anwendung sich besonders bei der letzten von Herrn Hug gezeigten Figur 21 wunderbare Lösungsmöglichkeiten ergeben. Der Satz

von Herrn Hug, dass angesichts der Massenwirkungen die Steuerung über den Fliehkraftregulator verlassen werden könnte, um direkt von elektrischen Grössen abgeleitet zu werden, ist besonders geeignet, die Diskussion zu beleben; der Sprechende hat nämlich das Gefühl, dass dies der Schwanengesang des Pendelreglers ist.

Zum letzten Satz von Herrn Hug wäre noch zu sagen, dass alle diese Probleme gar nicht mehr gefährlich und leicht zu lösen sind, wenn es einmal gelingt, die Störquellen in ganz kurzer Zeit aus dem Netz herauszuschneiden.

3. Referate von Fabrikanten.

Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden.

Von Rob. Keller, Baden.

Es wird zunächst das Grundsätzliche der Programmregulierung und der Frequenzhaltung besprochen, wobei auf die hierzu zur Verfügung stehenden Mittel hingewiesen wird, ferner auf die Schwierigkeiten, die in der Regulierfähigkeit der Turbine liegen. Dann wird die Regulier-Methode und -Einrichtung des Kraftwerkes Kembs beschrieben, wobei besonders die Apparatur für die Programmsteuerung zur Geltung kommt. Zum Schluss wird auf Mängel der Konstruktion und der Wirkungsweise der heutigen Turbinenregler hingewiesen und ein elektrischer, direkt die Frequenz erfassender Frequenzregler beschrieben.

L'auteur expose le principe du réglage selon un programme et du maintien de la fréquence en signalant les moyens dont on dispose à cet effet et les difficultés inhérentes au réglage des turbines. Il décrit ensuite la méthode et l'installation de réglage de l'usine de Kembs en s'arrêtant spécialement à l'équipement de réglage selon programme. Pour terminer, l'auteur expose les défauts de la construction et du fonctionnement des régulateurs actuels et décrit un régulateur de fréquence réagissant directement sur la fréquence.

Die einleitenden Referate dürften gezeigt haben, dass die Verwendung von zweckmässig ausgebildeten und automatisch funktionierenden Einrichtungen für die Erfüllung der gestellten Netzregulierungsbedingungen heute eine Notwendigkeit geworden ist. Trotzdem die modernen mechanischen Turbinenregler auf eine ausserordentlich hohe Stufe entwickelt sind, namentlich bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Stabilität, können sie den im Zusammenhang mit dem gesamten Netzbetrieb gestellten Ansprüchen als reine Drehzahlregler nicht mehr

werk selbst gedeckt werden. Wird nun unter diesen Bedingungen ein weiteres Kraftwerk in irgendeinem Moment zugeschaltet, so nimmt dieses am Energieaustausch keinen Anteil; ein Eingreifen desselben mit Energielieferung erfolgt erst bei auftretenden Frequenzabweichungen. Uebergibt man dieser Maschine, bzw. dem Kraftwerk die Aufgabe der Frequenzhaltung, so hängt deren Wirksamkeit von seiner Leistungsfähigkeit und vom Verhältnis seiner Statik gegenüber derjenigen der Netzstatik, bzw. derjenigen der übrigen Werke ab. Anhand der

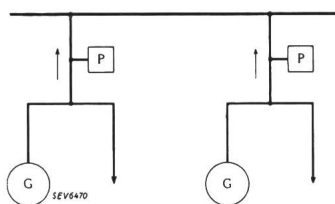


Fig. 1.
Parallel geschaltete
Kraftwerke mit
Separatabnehmern.

genügen. Aus den vorangegangenen Referaten ging hervor, dass die gestellten Bedingungen durch kombinierte Frequenz- und Leistungsregler erfüllt werden können. Die Einführung, bzw. die Kombination des Leistungsreglers mit den vorhandenen Turbinenreglern ist immer nötig, sobald die zu regulierende Leistung nicht mehr eindeutig durch die Turbinenöffnungen gegeben ist. Dies ist der Fall, wenn ein Generator, bzw. ein Kraftwerk ausser der an das Netz abgegebenen Energie noch separate Konsumentennetze speist (Fig. 1).

Wenn in jedem Kraftwerk durch irgendwelche Mittel dafür gesorgt wird, dass die Programmleistung konstant gehalten wird, so hat das zur Folge, dass die Leistungsvariationen der Konsumentennetze jeder Netzgruppe von dem zugehörigen Kraft-

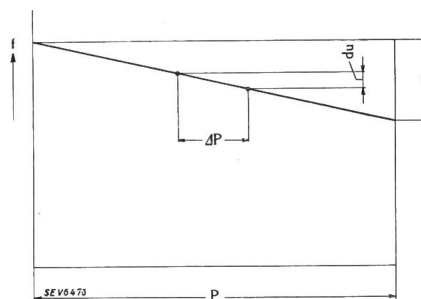


Fig. 2.
Diagramm der
Lastverteilung.

Fig. 2 seien diese Verhältnisse kurz erläutert.

P stellt die gesamte Netzleistung dar, ΔP die vom frequenzhaltenden Werk lieferbare Energie.

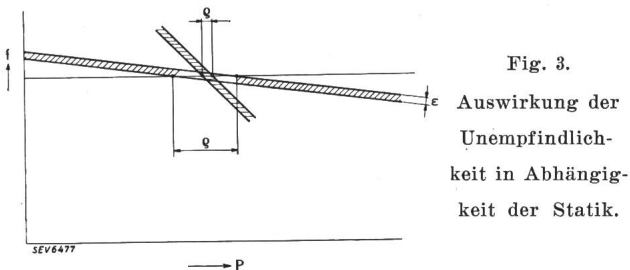
Dann ergibt sich folgende Beziehung:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{du}{u}; d\omega = \Delta P \cdot \frac{u}{P}; \Delta P = du \cdot \frac{P}{u}$$

Nimmt man z. B. an, dass das frequenzhaltende Werk eine auftretende Frequenzabweichung von 0,2 % auszuregulieren habe und die Netzstatik $u = 3\%$ betrage, so ergibt sich $\Delta P = \frac{P}{15}$, d. h. die Netz-

leistung darf in diesem Falle 15mal grösser sein als diejenige des Frequenzführerwerkes.

Die Erfüllung einer Programmregulierung erfolgt heute fast ausschliesslich durch zusätzliche Beeinflussung eines normalen mechanischen Turbinenreglers, und zwar gewöhnlich durch Verschiebung der Statikkurve zwecks Veränderung des Schnittpunktes dieser Kurve mit der als konstant angenommenen Netzfrequenz. In andern Fällen wird die Leistungsänderung auch durch Verstellung der Öffnungsbegrenzung erreicht. Dem eigentlichen Drehzahlregler fällt dann nur noch die Aufgabe zu, bei auftretenden Abschaltungen oder Netzstörungen einen unzulässigen Drehzahlanstieg zu vermeiden oder bei ausserordentlich grossen Frequenzabweichungen einzugreifen. Die reine Frequenzhaltung dagegen kann grundsätzlich von dem mechanischen Turbinenregler übernommen werden. Es treten aber gewisse Schwierigkeiten auf, sobald mehrere Maschinen oder sogar Werke dafür nötig sind. Anhand der Fig. 3 ist leicht zu erkennen, dass die Eindeutigkeit der Lastverteilung bei einem gegebenen Unempfindlichkeitsgrad bei hoher Statik höher ist als



bei kleinen Werten. Im Grenzfall, d. h. bei astatischer Frequenzregulierung (z. B. mit Isodrom-Reglern) ist die Lastverteilung labil. Es scheint darum naheliegend, bei Frequenzhaltung, wo mehrere Maschinen oder Werke parallel arbeiten, mit höheren Statikwerten die sichere Lastverteilung zu erzwingen und mit Zusatzeinrichtungen dafür zu sorgen, dass die durch die höhere Statik bedingte Frequenzabweichung kompensiert wird.

Diese Zusatzeinrichtungen können nun als rein astatische Frequenzregler oder als sogenannte Frequenz-Integral-Reguliereinrichtungen ausgebildet sein zur Speisung von elektrischen Uhren durch das Netz. Im ersten Fall werden die parallel arbeitenden Aggregate von einem gemeinsamen astatischen Frequenzregler beeinflusst, sei es direkt oder über Leistungsmesser, welche gleichzeitig die Leistungsverteilung besorgen. Bei Frequenz-Integral-Regulierung werden die Spannungsvektoren der parallel arbeitenden Generatoren mit einem mit konstanter Frequenz umlaufenden Vektor verglichen. Der Verlust in elektrischen Winkelgraden kann an diesen Frequenzdifferentialen jederzeit abgelesen und von Hand oder automatisch nachgeholt werden.

Wenn mehrere Werke parallel arbeiten, so kann der nötige Normalvektor in jedem Werk selbst durch mit Uhrwerken kombinierte Einrichtungen erzeugt werden. Anstatt die Frequenz im Verhältnis zu der Normalfrequenz genau zu regulieren, kann die Regulierung so gestaltet werden, dass die

Spannungsvektoren des parallel laufenden Werkes gegenüber dem mit konstanter Kreisfrequenz umlaufenden Normalvektor nur mit einem verhältnismässig gleichen Betrag nacheilen. Man erreicht also auf diese Weise eine gewisse Differenz zwischen der Lage des Netzvektors gegenüber dem Normalvektor. Diese Differenz beträgt:

$$\varrho = k \cdot \int \Delta\omega \cdot dt$$

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$$

ω_1 = Kreisfrequenz des Normalvektors.

ω_2 = Kreisfrequenz des Netzvektors.

Wenn nach diesem Grundsatz reguliert wird, erhält man einen statischen Charakter aller auf Vergleich mit dem normalen Vektor parallel arbeitenden Werke. Durch diesen statischen Charakter ergibt sich eine günstige Grundlage, namentlich in dem Fall, wo für die Frequenzhaltung mehrere entfernte Kraftwerke nötig sind. Die Elektrotechnik besitzt verschiedene einfache und erprobte Mittel, um den Vektor, d. h. die Frequenzdifferenz zu bilden, sei es durch elektrische Frequenzdifferentiale, gebildet durch Synchronmotoren, doppelgespeiste Asynchronmotoren, Schwebungsfrequenzmesser, kleine Hilfsnetzakupplungsgruppen usw.

Wie gross der Gangunterschied bei mit Uhr kontrollierter Frequenzregulierung ausfällt, zeigt folgende einfache Rechnung:

Annahme: Die Frequenzgenauigkeit betrage 1 ‰; bei $f = 50/s$ beträgt die Kreisfrequenz $50 \cdot 360 = 18\,000$ el. °.

$$\Delta f = 1 \text{ ‰} = 0,05 \text{ Per./s} = 18^\circ/s = 18 \cdot 60 = 1080^\circ/\text{min} = 3 \text{ Per./min}$$

Praktisch muss nun noch viel weniger nachreguliert werden, weil die Frequenzgenauigkeit des Reglers besser ist als angenommen und zudem beständig um den absoluten Normalwert leicht pendelt.

Dieser kurze Hinweis auf die heute üblichen elektrischen Zusatzreguliereinrichtungen zeigt, dass diese verhältnismässig sehr einfacher Natur sind und die Erreichung irgendeiner Netz-Reguliercharakteristik, z. B. nach Vorschlag Darrius oder ähnlichen grundsätzlich gar keine Schwierigkeiten bereiten, vor allem nicht in konstruktiver Hinsicht. Bei der Einführung einer solchen Einrichtung in einem Grosskraftwerk, bestimmt für Programm- und Frequenzregulierung, zeigten sich aber andere Schwierigkeiten, auf die im nachstehenden etwas näher eingegangen werden soll, da es sich ferner gezeigt hat, dass diese nicht etwa vereinzelt, sondern zum mindesten in jedem Niederdruckwerk auftreten. Ferner treten ganz ähnliche Erscheinungen auf bei Netzfernregulierung. Die Schwierigkeiten zeigten sich nicht etwa in der Durchführung eines Regulierprinzips, d. h. in der Erfüllung einer z. B. nach Darrius gegebenen Netzcharakteristik, sondern sie lagen viel näher, nämlich im sehr ungünstigen Verhalten der Regulierfähigkeit der Turbinenleistung selbst. Es war selbstverständlich zu erwarten, dass die Leistungssteuerung einer Nieder-

druck-Kaplan- oder Propeller-Turbine nicht so bequem und eindeutig sein kann, wie z. B. diejenige der Hochdruck- oder gar einer Dampfturbine. Es ist andererseits ebenfalls klar, dass zwecks Erfüllung irgendeiner beliebigen Netzreguliercharakteristik die einwandfreie Beherrschung aller am Parallelbetrieb beteiligten Maschinengruppen Hauptbedingung ist.

Mittels der Fig. 4 soll versucht werden, die Schwierigkeiten darzustellen, welche sich bei der Leistungsregulierung von ca. 25 000-kW-Niederdruck-Propeller-Turboaggregaten gezeigt haben. Die von einem Wechselstrom-Turboaggregat im stationären Betrieb an ein Netz abgegebene Leistung ist gegeben durch die Oeffnung, bzw. Beaufschlagung der Turbine, konstantes Nutzgefälle, bzw. Druck vorausgesetzt. Die in Funktion der Oeffnung abgegebene Leistung weist daher einen statischen Charakter auf. Wegen den auftretenden Verlusten weist die Statik die konstante Krümmung auf. Beim Uebergang von einem Oeffnungswert 0.1 auf 0.2 stellt sich selbstverständlich die entsprechende ab-

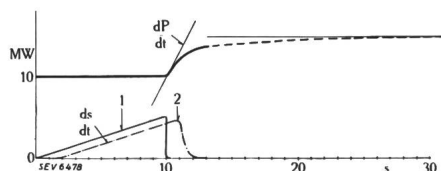


Fig. 4.
Diagramm der
Lastaufnahme
einer Propeller-
Turbine.

gegebene Leistung mit einer gewissen Verzögerung ein, denn einmal muss das Treibmedium der Primärmaschine, bzw. das Wasser beschleunigt werden, ferner muss das Generatorpolrad ebenfalls um einen Winkel gegenüber der Lage des Netzvektors weiter vorverschoben werden, wozu wieder eine gewisse Beschleunigungszeit nötig ist. Geht man vom Primärorgan des Reglers aus, so kommt zu diesen Zeiten noch die Eigenzeit des Servomotors dazu. Es sei nun angenommen, dass im Zeitpunkt $t=0$ das Vorsteuerventil betätigt werde, z. B. durch Einschalten des Drehzahlverstellmotors. Nach Ablauf der Zeit, welche vom Servomotor zur Beschleunigung des Oeles der Zwischenkolben usw. benötigt wurde, beginnt der Hauptkolben und, wenn kein toter Gang in den Uebertragungsorganen vorhanden wäre, auch der Leitapparat zu laufen. Wir nehmen weiter an, der Drehzahlverstellmotor werde so lange betätigt, bis eine Leistungsänderung am Wattmeter sichtbar wird. Mit Vernachlässigung der Beschleunigungszeit des kleinen Drehzahlverstellmotors ist der von diesem, bzw. der Vorsteuerspindel zurückgelegte Weg durch das Δl dargestellt. Zufolge einer gewissen Trägheit der Hauptsteuerorgane läuft der Servomotor noch etwas länger. Das

Diagramm zeigt, dass der Leistungsanstieg $\frac{dP}{dt}$ gegenüber der Oeffnungsänderung $\frac{ds}{dt}$ verschieden ist.

Die Verschiedenheit ist um so ausgeprägter, je grösser eine vorgenommene Oeffnungsänderung ist; weiter hängt die Verschiedenheit von der Verstellgeschwindigkeit, bzw. von der Uebersetzung der Vorsteuerung ab usw. Die Tatsache, dass eine der-

art grosse und dazu variable Diskontinuität zwischen Servomotorverstellung und Leistungsänderung besteht, ist es, was die Erfüllung irgendeiner Regleraufgabe sehr erschwert. Dabei ist zu beachten, dass die Verhältnisse wieder ändern, wenn unter diesen Umständen an Stelle auf Leistung auf Frequenz reguliert werden soll. Die Theorie hat längst erkannt, dass jede zeitliche Verschiebung zwischen einem Reglereingriff und dessen Auswirkung auf die geregelte Grösse zu Ueberregulierung und damit zu Pendelungen führt. Es ist darum leicht einzusehen, dass eine Handregulierung unter derartigen Bedingungen nicht leicht und nur von besonders für die jeweilige Maschine eingeebtem Personal möglich ist.

In den folgenden Schemata ist nun dargestellt, wie die Einrichtung im Kraftwerk Kembs funktioniert. Es wurde die Einhaltung eines vorgeschriebenen Tagesprogrammes mit von Tag zu Tag variablem Charakter vorgeschrieben, jedoch mit der Bedingung, dass die Einhaltung der Programmleistung bei Auftreten von gewissen Frequenzabweichungen

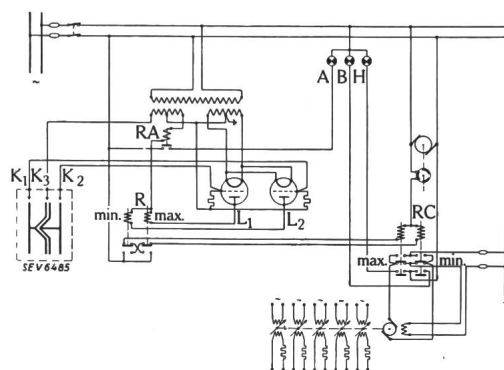


Fig. 5.

Schema der Leistungs-Programmsteuerung.

aufzugeben und die betreffenden Maschinen sofort zur Frequenzhaltung heranzuziehen seien. Für alle Fälle war ferner eine einwandfreie Lastverteilung der parallellaufenden Gruppen sicherzustellen. Anhand der Fig. 5 sei zunächst das Prinzip der eigentlichen Programmsteuerung erwähnt. Diese Einrichtung arbeitet in Kombination mit einem von der Trüb, Täuber & Cie. A.-G. sinnreich entwickelten Geberapparat¹⁾. Dieser Apparat stellt im Prinzip ein Registrierinstrument dar, auf dessen Papierstreifen das einzuhaltende Leistungsdiagramm aufgezeichnet ist. Das Diagramm ist gegeben durch die Form des Kanals zwischen zwei parallelen Graphitbahnen von einer Breite von ca. 3...5 mm (Fig. 5a). Ferner werden an den beiden Rändern des Papierstreifens zwei Graphitbahnen aufgetragen, welche durch quer verlaufende Verbindungsstege mit den inneren Bahnen verbunden sind. Der Querwiderstand des Papiers zwischen den beiden Programmpapieren, bzw. des Kanals wird so hoch als möglich gehalten. Zudem müssen die Längsbahnen von Zeit zu Zeit je nach Form des Diagramms in einer Länge von ca. 3 mm unterbrochen werden. Die Unterbrechung ist immerhin so, dass eine vollständige Störung der

¹⁾ Siehe Bull. SEV 1933, Nr. 2, S. 29.

Programmsteuerung unmöglich ist. Auf den beiden Randbahnen schleift je ein Kontakt. Der Zeiger des Instrumentes besitzt an seinem Ende einen elastischen Kontakt aus hochwertigem Metall, welcher sich leicht auf das Papier abstützt und der beim Berühren der über und unter ihm liegenden Programmbahn die Regulierung in Gang setzt. Der Vorschub des Papiers erfolgt in üblicher Weise durch ein Uhrwerk, welches bei Bedarf gestattet, die Geschwindigkeit zu verändern.

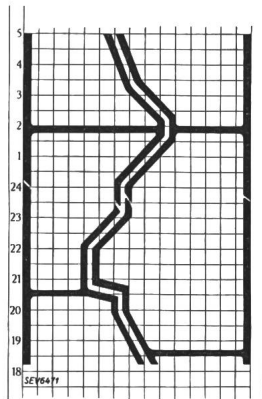


Fig. 5a.
Leistungsprogramm.

(Tungsram) verwendet. Die Spulen der beiden Relais R min. und R max. sind in den Anodenstromkreis der beiden Lampen geschaltet; ein Störungsrelais dagegen ist im gemeinsamen Röhrenstromkreis eingebaut. Die Gitter der Verstärkerlampen stehen mit den Längsbahnen des Programmbereichs in elektrischer Verbindung. Der Transformator liefert die Spannung für die Anoden, die Gitter und den Heizfadenstrom. Die eigentlichen Steuerrelais RC max. und RC min. dienen zur Weiterleitung der Reglerimpulse an die Turbinensteuerung. Ihre Erregerspulen werden gespeist durch die Kontakte der Relais R min. und R max. und über einen Schalter. Die Apparatur funktioniert folgendermassen: Bei der Uebereinstimmung des Leistungs-Ist-Wertes mit dem Soll-Wert des Programms spielt der Zeiger des Wattmeters im Zwischenkanal der beiden Graphitbahnen. Die Gitter der beiden Lampen befinden sich in diesem Falle auf gleichem Potential wie die Kathoden wegen des Vorhandenseins von hochohmigen Vorwiderständen (10 Megohm). Der Anodenstrom kann zirkulieren und beide Hauptrelais R max. und R min. sowie das Störungsrelais RA sind erregt und deshalb angezogen. Wenn nun z. B. der Kontakt $K 3$ mit der Graphitbahn in Berührung kommt, so wird das Gitter der zugehörigen Lampe in bezug auf die Kathode negativ polarisiert. Der Anodenstrom wird unterbrochen und das entsprechende Relais fällt ab, dadurch den Regulierungsvorgang einleitend. Die Hilfskontakte dieses Relais schliessen nun den Stromkreis für die Hauptsteuerrelais RC max. oder RC min. Die beiden Relais RC min. und RC max. betätigen bei ihrem Abfallen gleichzeitig die Lampen B und H , welche das Funktionieren der Apparatur jederzeit anzeigen. Für den Fall, dass eine Tungsram-Lampe defekt geht, wird zunächst eine Befehlsgabe des Programmapparates fälschlicherweise vorgetäuscht, weil die beiden Relais R max. und R min. mit Ruhestrom arbeiten. In

diesem Falle wird aber der Anoden-Summenstrom, welcher in der Spule des Alarmrelais RA zirkuliert, Null, was das Abfallen des Relais zur Folge hat und dadurch die Störungslampe A zum Aufleuchten bringt. Die Lampe spricht ebenfalls an in dem Fall, wo der Querwiderstand im Kanal des Querstreifens Null wird. Bei solchen Störungen wird immer die Programmsteuerung automatisch unterbrochen.

Es wurde eingangs der Beschreibung dieser Einrichtung gesagt, dass der Programmgeberapparat als Registrierwattmeter aufgebaut ist. Es war ursprünglich vorgesehen, dasselbe direkt mit den Spannungs- und Stromwandlern der zu regulierenden Netzleistung zu speisen. Das Wattmeter hätte also dauernd die Ist-Leistung mit der Soll-Leistung, gegeben durch den Programmkanal, kontrolliert und bei Nicht-Uebereinstimmung der beiden Werte die Regulierung durch irgendein Verfahren in Gang gesetzt. Es ist nun leicht einzusehen, dass mit Rücksicht auf die sehr ungünstige Regulierfähigkeit, wie weiter oben gezeigt wurde, die Regulierung unmöglich funktionieren konnte. Weil sich die Leistung mit ausserordentlich grosser Verspätung einstellt, wäre der Zeiger eines Ist-Wattmeters bei jedem Vorgang unfehlbar ausserhalb der Befehlszone geraten. Um dies zu vermeiden, hätte also zum mindesten das ganze Papierband des Wattmeters leitend gemacht werden müssen. Die genaue Rücksteuerung des Wattmeters in den Zwischenkanal hätte aber bedeutende Konzessionen an Reguliergenauigkeit erfordert. Mit Rücksicht auf den Gesamtregulierungsvorgang wurde schliesslich die in Fig. 6 angegebene Regulierschaltung entwickelt, wodurch die aufgezählten Mängel grundsätzlich eliminiert sind. Das Registrierwattmeter wird nicht mehr vom Leistungs-Ist-Wert betätigt, sondern es ist ein reines Soll-Wattmeter, und zwar ist es als Fiktiv-Wattmeter angeschlossen. Die Kontrolle, bzw. der Vergleich des Soll- mit dem Ist-Wattmeter ist einem beson-

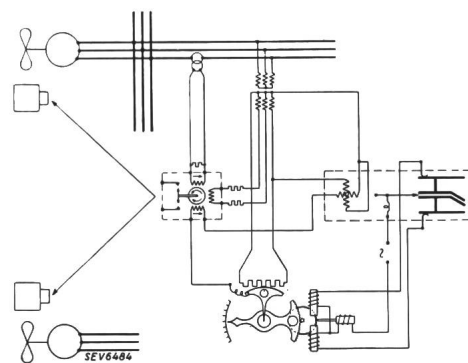


Fig. 6.
Schema der Ist- und Sollwertsteuerung.

deren Vergleichsregler übertragen. Die Erfüllung der Regulierungsaufgabe erfolgt demnach durch zwei Hauptorgane: Der gesetzgebende Programmapparat und die ausführende Regulierapparatur, gegeben durch Vergleichsregler und Lastverteilapparatur. Das Fiktivwattmeter weist wohl eine Spannungs- und eine Stromspule auf mit einer das Dreh-

moment bestimmenden Gegenfeder; es werden aber beide Stromkreise von derselben Spannung gespeist. Der Vergleichsregler weist zwei Stromspulen auf, von denen die eine vom tatsächlichen Wirkstrom der Netzleistung durchflossen ist, die andere dagegen ist in Serie mit der Stromspule des Fiktivwattmeters und zudem über einen variablen Widerstand geschaltet. Dieser ist gebildet durch einen Sektorregler, der je nach Bedarf vom Programmgeberapparat aus betätigt wird. Spricht dieser an,

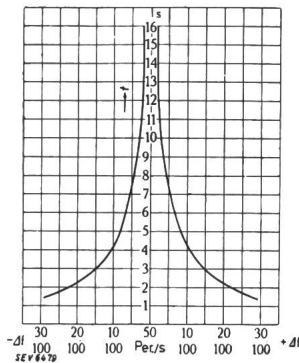


Fig. 7.

Regulier-Charakteristik
der Impulsregulierung.

so betätigt er den Ferrarismotor des Sektorreglers, welcher die Sektorverstellung einleitet und damit eine Stromänderung im Stromkreis des Fiktiv-Wattmeters hervorruft. Diese Stromänderung erfolgt momentan mit einer Zeitkonstante praktisch Null. Der Zeiger des Fiktiv-Wattmeters steuert sich daher immer sofort in den Kanal zurück, ganz unabhängig davon, ob die Ist-Leistung tatsächlich schon der Soll-Leistung entspricht oder nicht. Auf diese Art wird erreicht, dass der Programmgeber ganz einfach seine Befehle dem Vergleichsregler von Ist- und Soll-Leistung überträgt und das einwandfreie Ausregulieren mit der Turbinensteuerung diesem allein überlässt. Ein Herausfallen aus der Kontaktbahn des Geberapparates wird dadurch verunmöglicht und zudem eine einwandfreie, von allen andern Vorgängen unabhängige Sollwert-Steuerung

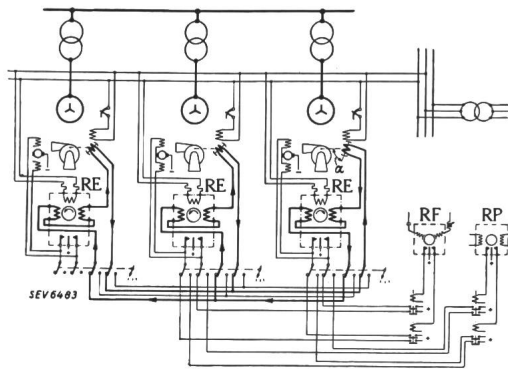


Fig. 8.

Schema der Lastverteilereinrichtung.

erreicht. Der verwendete Vergleichsregler überträgt seine Impulse direkt auf alle parallel arbeitenden Gruppen. Die Uebertragung erfolgt durch ein sinn-gemäss arbeitendes Impuls-Reguliersystem, welches der erwähnten ungünstigen Regulierfähigkeit der Turbinen angepasst ist. Die Impulszahl und -dauer (Fig. 7) sind über ein bestimmtes Verhältnis zu der Abweichung gebracht, so dass Ueberregulierungen

nicht auftreten und unnütze Reguliereingriffe mittels einer gewissen Tendenz-Charakteristik vermieden werden. Dieses Verfahren benötigt vor allem eine ganz besonders entwickelte Kontaktapparatur, denn es kommen sehr kurz dauernde Impulse zur Geltung, die trotzdem einwandfrei zur Auswirkung gebracht werden müssen, wobei ein absolut sicheres Arbeiten der Kontaktgeber gewährleistet sein muss. Die Lastverteilung der parallel arbeitenden Gruppen ist ebenfalls gewährleistet durch an der Tur-

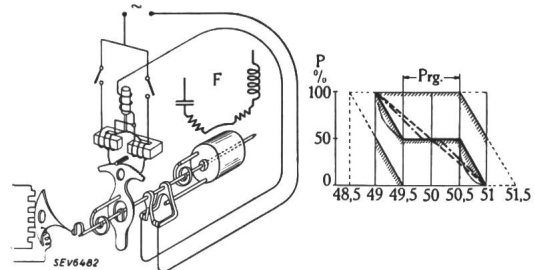


Fig. 9.

Leistungs-Sollwert-Steuerapparat mit Frequenzüberwachung.

bine direkt angebaute Stabilisatoren; diese sorgen dafür, dass die parallel arbeitenden Gruppen auf gleiche Totallast, d. h. auf gleiche Oeffnung gesteuert werden. Die Stabilisatoren bestehen im Prinzip aus kleinen einphasigen Induktionsreglern, welche in Polygon zusammengeschaltet sind. Deren Rotorstromkreise speisen nun wattmetrisch geschaltete Ausgleichsregler, welche bei Nicht-Uebereinstimmung der Turbinenöffnung zum Ansprechen kommen und den Ausgleich herbeiführen (Fig. 8). Dieses System hat den grossen Vorteil, dass auch bei kleiner Last eine gute Verteilung erreicht wird, weil das Drehmoment der Ausgleichsregler nicht auf Null fällt; es genügt, dem Stromverlauf eine gewisse Statik zu geben, die die Eindeutigkeit in Funktion der Oeffnung gewährleistet. Der eigentliche Soll-Wert-Verstellapparat, dargestellt durch den Sektorregler, enthält nun eine weitere Kombination, die in einer besonderen Fig. 9 dargestellt ist. Ausser dem Ferrarismotor, welcher auf die Verstellwelle des Sektorreglers einwirkt, ist die Welle auf sinn-gemässe Art mit einem Ferraisssystem gekuppelt, welches unter Frequenzkontrolle steht. Bei Nennfrequenz, z. B. 50/s, ist das Ferraisssystem so eingestellt, dass das von seiner Erregerwicklung ausgeübte Drehmoment Null ist. Ändert sich die Frequenz, so tritt dank seiner ausserordentlich hohen Empfindlichkeit sofort ein Drehmoment auf, welches über eine Feder auf die Hauptwelle übergeht. Nach Zurücklegung eines gewissen toten Ganges wird die Hauptwelle mitgenommen und dadurch der Sektor verstellt, welcher damit dem Vergleichsregler einen andern Leistungswert diktiert. Durch eine weitere einstellbare Feder kann nun die Progression der Leistungen in Funktion der Frequenz in beliebigen Grenzen erreicht werden. Der verstellbare tote Gang hat den Zweck, eine gewisse tote Zone in bezug auf die Frequenz herauszubilden, innerhalb welcher eine Fälschung des Programms nicht auftritt. Diese Zone kann weitgehend, z. B.

von 2...3/10 bis mehrere Perioden geändert werden, ebenso der Winkel der Steilheit der Leistungsänderung. Es ist sogar möglich, die tote Zone auf Null zu reduzieren, wobei man genau erreicht, was Herr Darrius in seinem einleitenden Referat vorgeschlagen hat, nämlich die Einhaltung einer nach den Netzkonstanten berechneten Charakteristik.

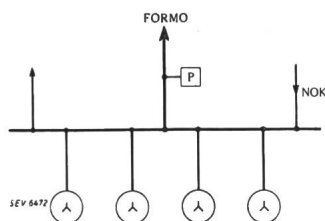


Fig. 10.

Die gesamte Einrichtung weist noch einige interessante Details auf; es würde aber zu weit führen, diese hier genau aufzuzählen. Es seien noch kurz einige praktische Betriebsergebnisse an Hand von Regulierkurven in der Anlage dargestellt. Bei der Betrachtung der Leistungs-Programmkurven ist, wie Fig. 10 bis 10c zeigt, auf die Netzkonstellation Rücksicht zu nehmen. Das nach Programm regulierte Netz wird durch einen weiteren Abnehmer (Vincey)

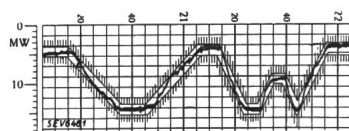


Fig. 10a.
Registrierstreifen des
Leistungs-Istwertes bei
Programmsteuerung.

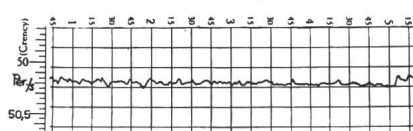


Fig. 10b.
Registrierstreifen der
Frequenzregulierung.

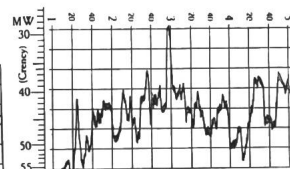


Fig. 10c.
Leistungs-Variation bei
Frequenzregulierung.

und durch einen weiteren Lieferanten (NOK) beeinträchtigt. Es ist klar, dass die Fluktuationen in diesen beiden Netzsträngen die Programmleistung beeinflussen und die Regulierung weiter erschweren. Bei reiner Frequenzregulierung ist die Einrichtung vereinfacht; der Frequenzregler arbeitet direkt auf die Turbinenverstellmotoren. Die Lastverteilungseinrichtung funktioniert dabei gleich wie bei Programmsteuerung. Einige damit erhaltene Resultate seien ebenfalls an Hand aufgenommener Kurven dargestellt. Vergleichskurven mit Handsteuerung im gleichen und in andern Werken zeigen, dass das Ergebnis für ein Niederdruckwerk, welches hier zu Frequenzhaltung herangezogen wird, sich durchaus sehen lässt und sogar mit Dampfkraftwerken verglichen werden kann. Bei der Frequenzhaltung wird das ungünstige Verhalten der Turbinensteuerung teilweise kompensiert durch die grossen Schwungmassen der Gruppen, bzw. die günstige Anlaufzeitkonstante. Die in den grossen Schwungmassen aufgespeicherte Energie widersetzt sich momentanen Frequenzänderungen beim Auf- und Absenken und man gewinnt damit etwas Zeit für die Regulierung.

Zum Schlusse sei noch eine Frage berührt, welche nur indirekt im Zusammenhang mit dem zur Diskussion gestellten Problem steht; sie betrifft die konstruktiven Unvollkommenheiten der heutigen

Turbinenregler, namentlich die Antriebsweise der Pendelregler.

Ein schwacher Punkt der Regler bildete von Anfang an der Riemenantrieb des Pendels. Die Pendel erfuhren im Laufe der Jahre sehr feinsinnige Vervollkommnungen; es wurde der denkbar höchste Genauigkeitsgrad erreicht. In neuester Zeit werden sogar Regler gebaut, welche nicht nur rein auf die Geschwindigkeit, sondern auch auf die Beschleunigung reagieren. Alle diese Fortschritte konnten sich aber wegen der Unvollkommenheit der Riemenübertragung praktisch nicht voll auswirken. Trotzdem auch durch Herstellung von Spezialriemen bedeutende Verbesserungen erreicht wurden, zeichnet sich immer mehr die Tendenz heraus, vom Riemenantrieb wegzukommen und zum elektrischen Pendelantrieb überzugehen.

Beim Antrieb der Zentrifugalpendel durch Elektromotoren müssen verhältnismässig kräftige Asynchron - Kurzschlussankermotoren verwendet werden, damit sie mit möglichst kleinem Schlupf arbeiten. Die Verwendung von Synchronmotoren hat sich nicht durchgesetzt, weil diese eventuell vorhandene Winkelschwingungen der Hauptwelle auf

den Regler übertragen, sogar verstärkt. Dieser elektrische Antrieb hat noch Mängel namentlich dann, wenn der Motor direkt durch die Generatorspannung gespeist wird. Da diese bei Störung ganz zusammenbrechen kann, sind Sicherheitsapparate nötig, welche vor dem Abfallen des Motors ansprechen und die Turbinen durch ein Relais zum Schliessen bringen.

Das unzulässige Funktionieren dieser Sicherheitseinrichtung kann sehr unangenehme Störungen zur Folge haben. Wenn z. B. bei einem Zusammenbruch der Netzspannung zufolge Kurzschluss zwischen zwei Werken der Antriebsmotor zum Zentrifugalpendel abfällt, so wird die Turbine voll geöffnet, was unter Umständen das Aussertrittfallen des Rotors des Synchron-Generators bewirkt.

Funktioniert die Einrichtung richtig, so stellt doch auch die auf diese empirische Art erzwungene Schliessung der Turbine und die damit verbundene Unterbrechung der Energielieferung einen störenden Vorgang dar, denn nach Wiederherstellung der Netzspannung muss auf ähnliche unkontrollierte Art die betriebsmässige Drehzahlregulierung und Energielieferung wieder aufgenommen werden.

Wird bei einem Netzkurzschluss zwischen zwei Werken, wie angedeutet, dieser nach wenigen Sekunden abgeschaltet, ohne dass die Sicherheitseinrichtung funktioniert, der Pendelmotor aber abgefallen ist, so entsteht ein beträchtlicher, etwa gleich

grosser Drehzahlanstieg, wie wenn kein Drehzahlregler vorhanden wäre, weil der Wiederanlauf des Pendelmotors erstens eine gewisse Zeit benötigt und andererseits erst mit dem Moment einsetzt, wo die Spannung des Generators wieder auf einen gewissen Wert angestiegen ist. Abgesehen von der starken Drehzahlerhöhung, welche in mechanischer Beziehung keine Gefahr bieten soll, hat dieser Vorgang eine ganz beträchtliche Spannungserhöhung zur Folge, weil die Wiedererregung mit vollem Magnetfeld und sehr raschem Drehzahlanstieg erfolgt.

Der Spannungsanstieg kann selbstverständlich durch geeignete Spannungsreguliereinrichtungen wirksam bekämpft werden.

Abgesehen von der Gefahr des hohen Spannungsanstieges hat ein Versagen der Drehzahlregulierung im Moment von schweren Lastabschaltungen sehr leicht das Aussertrittfallen der parallellaufenden Generatoren zur Folge.

Es sind vor allem die ungleichen Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte der Maschineneinheiten, welche deren Synchronismus gefährden, weil im ersten Moment der Lastabschaltung der Drehzahlanstieg durch die Daten der Maschine selbst gegeben ist. Wie sich das Versagen der Drehzahlregelung im Moment der Lastabschaltung auswirkt, zeigt folgende einfache Ueberlegung.

Zwei Generatorgruppen mit den Daten:

Gen. I: $GD^2 = 10\,000 \text{ tm}^2$; $n = 75/\text{min}$;
 $P_n = 20\,000 \text{ kW}$

Gen. II: $GD^2 = 100 \text{ tm}^2$; $n = 500/\text{min}$;
 $P_n = 15\,000 \text{ kW}$

mit Vollast parallel arbeitend, werden vom Netz abgetrennt.

$$M = \Theta \frac{d\omega}{dt}; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{\Theta}$$

Weil also das Schwungmoment allein kein eindeutiges Bild über die in Frage stehenden Vorgänge ergibt, erfolgt in neuer Zeit die Bewertung eines

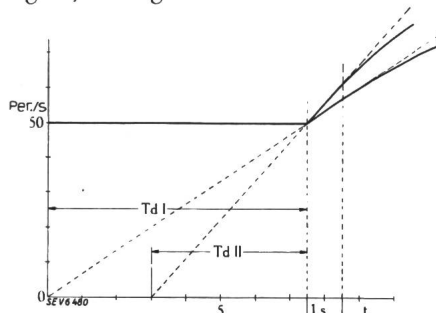


Fig. 11.

Schematische
Darstellung der
Anlaufzeit-
konstante.

Generator-Aggregates in dieser Hinsicht durch die Grösse der sogenannten Anlaufzeitkonstante, das ist die Zeit, welche nötig ist, die Gruppe mit normalem Drehmoment vom Stillstand auf die normale Drehzahl zu beschleunigen und welche gegeben ist durch

$$T_a = \frac{GD^2}{4} \cdot \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{1}{P_n}$$

GD^2 Schwungmoment in tm^2

n Drehzahl pro Minute

P_n Nennleistung in kW

Entsprechend den verschiedenen Anlaufzeitkonstanten, welche für Generator I $= 7,7 \text{ s}$ und für Generator II $= 4,5 \text{ s}$ betragen, würde die Frequenz von Generator II mit der kleinen Anlaufkonstante in 1 s von 50 auf ca. 60 Per./s, Generator I in derselben Zeit von 50 auf 56,5 Per./s ansteigen. Würde zwischen beiden Maschinen keine Ausgleichleistung zirkulieren, so wären die Spannungsvektoren der beiden Maschinen schon nach ca. 0,35 s um 90° el. verschoben (Fig. 11). Das Beispiel zeigt, wie wichtig die sofort eingreifende Wirkung des Turbinenreglers ist, denn bei zu stark verschiedenen Drehzahlbeschleunigungen übersteigt die Ausgleichleistung sehr leicht den mit Rücksicht auf die dynamische Stabilität zulässigen Wert.

Bei modernen Generatorgruppen, welche mit Haupt- und Hilfserreger ausgerüstet sind, kann auf einfache Art ein sicherer elektrischer Pendelantrieb erhalten werden. Mit Rücksicht auf die Spannungsregulierung arbeitet der Hilfserreger mit konstanter Spannung. Durch Anschluss von drei Schleifringen an die Rotorwicklung erhält man ohne weiteres eine von den Netzvorgängen unabhängige Dreh-

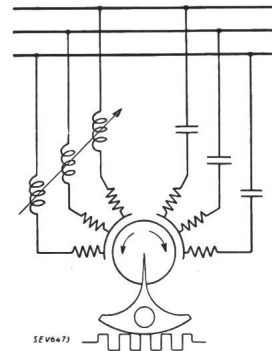


Fig. 12.

Schema eines dreiphasigen
Frequenzreglers.

stromquelle, welche die Generatorfrequenz direkt oder doch in einem starren Verhältnis wiedergibt. Diese Lösung ist aber wegen der Polzahl des Erregers nicht immer möglich.

Gewisse Schwierigkeiten bereitet hier bisweilen noch das rechtzeitige Anlaufen des Pendelmotors, weil der Hilfserreger Eigenerregung besitzt.

In Erkenntnis dieser Verhältnisse und im Zusammenhang mit den erwähnten Mängeln bei der Netzfrequenzregelung entstand das Bedürfnis nach einem rein wirkenden Frequenzregler.

Es sind aus der Literatur schon sehr viele Schaltungen bekannt; sie wurden hauptsächlich zur Frequenzmessung oder als Frequenzrelais entwickelt. Die meisten sind Resonanz- oder Brückenschaltungen. In Fig. 12 ist das Prinzip eines von Brown, Boveri & Cie. entwickelten Reglers wiedergegeben. Der Regler besitzt zwei Wicklungen, die bezüglich Drehfeldrichtung gegeneinander geschaltet sind. Bei gleichem Strom in den beiden Wicklungen heben sich daher die Drehmomente auf. Der einen Wicklung ist eine Reaktanz und der andern eine Kapazität vorgeschaltet, welche gegenüber der Reglerwicklung einen vielfachen Teil der Spannung beanspruchen, so dass praktisch der Stromkreis der einen Wicklung rein induktiv, derjenige der andern dagegen rein kapazitiv ist.

Für Stillstand des Drehsystems gilt einfach

$$I_i = I_c$$

$$I_i = \frac{U}{L\omega}; I_c = CU\omega$$

$$\frac{1}{L\omega} = C\omega$$

$$C = \frac{1}{L\omega^2} \cdot \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

d. h. das gleiche Resultat wie bei Resonanzschaltung. Weil das von jeder Wicklung erzeugte Drehmoment quadratisch mit dem Strom verläuft, ergibt sich ein äusserst günstiger Verlauf des resultierenden Drehmomentes an der Reglerwelle; dieses ist in Fig. 13 wiedergegeben. Man sieht, dass bei der geringsten Abweichung der Frequenz vom eingestellten Nennwert das resultierende Drehmoment stark ansteigt; auch der vollkommen stetige Verlauf des Drehmomentes ist ersichtlich.

Zur Einstellung des gewünschten Nennwertes der Frequenz dient eine regulierbare Drosselspule (Fig. 14). Jeder Stellung des Ankers entspricht ein bestimmter Frequenzwert. Diese Einrichtung hat den Vorteil vollkommener Stufenlosigkeit und enthält vor allem keine beweglichen Kontakte. Der Regler arbeitet bis zu sehr tiefen Spannungen von ca. 10 % noch sicher selbstverständlich ungenauer, was aber kein Nachteil ist. Die Hauptsache

ist, dass er immer auf denselben Mittelwert reguliert, im Gegensatz zu den mechanischen Reglern, welche meistens beim Fallen des Riemens die Turbine rapid öffnen. Weil er keine Hauptfeder be-

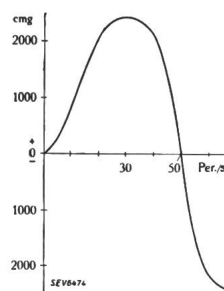


Fig. 13.
Charakteristik des
Drehmomentes des
Frequenzreglers.

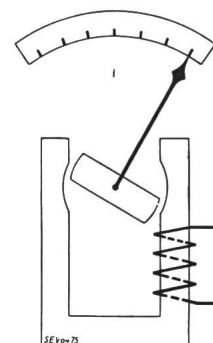


Fig. 14.
Regulierdrosselspule.

sitzt, hat er von Natur aus vollkommen astatischen Charakter und keine dauernd rotierenden Teile, wodurch er sich grundsätzlich von den bisher bekannten Turbinenreglern unterscheidet. Der Regler kann aber ebenfalls für jeden beliebigen Statikwert eingestellt werden. Er kann selbstverständlich auch mit Isodrom-Rückführung ausgerüstet werden mit genau gleicher Charakteristik wie die mechanischen Regler.

Der Vorsitzende verdankt auch dieses Referat aufs beste.

Technische Ausführungsformen statischer Leistungsregler und ihr Einsatz im Verbundbetrieb von Netzen.

Von H. Wierer, Berlin.

Im Verbundbetrieb von Netzen muss einerseits für Einhaltung der Frequenz, andererseits für Einhaltung der Austauschleistungen zwischen einzelnen Betrieben gesorgt werden. Die hier entstehenden Aufgaben können durch die normalen Turbinenregler nicht mehr in befriedigender Weise beherrscht werden, sondern es muss zum Einsatz von elektrischen Zusatzreglern gegriffen werden. Es werden nachstehend eine Reihe von Elementen, die für diesen Zweck entwickelt worden sind, beschrieben, die die auftretenden Forderungen des modernen Netzverbundbetriebes einwandfrei zu erfüllen imstande sind. Berücksichtigung finden hierbei insbesondere Elemente zum Anschluss der Regeleinrichtungen an Fernmessanlagen und Geräte zur Erfassung der Frequenz mit ausserordentlich hoher Empfindlichkeit, wie sie bei der statischen Regelung von Ubergabeleistungen notwendig wird. Neben den wichtigsten Gesichtspunkten für den Einsatz von Leistungs-, Frequenz- und statischen Reglern wird auch noch kurz auf die Lastverteilung nach bestem Wirkungsgrad bei Parallelregelung von Maschinen und Kraftwerken eingegangen.

Bei dem Zusammenschluss von zwei oder mehreren Netzverbänden treten Regelaufgaben auf, die von den an sich hochentwickelten Kraftmaschinenreglern nicht mehr in befriedigender Weise beherrscht werden können, da ihnen als Indikator nur die Drehzahl und der Füllungsgrad der geregelten Maschine zugeführt werden kann. Es muss daher in diesen Fällen zu elektrischen Zusatzreglern gegriffen werden, über die die nötige Grösse zur

Dans les réseaux interconnectés, il faut veiller d'une part à maintenir constante la fréquence et, d'autre part, à observer les puissances prescrites pour les échanges d'énergie entre réseaux. Les problèmes qui se posent de ce fait ne peuvent plus être résolus d'une façon satisfaisante par les régulateurs des turbines, de sorte qu'il faut recourir à des régulateurs électriques d'appoint. L'auteur décrit une série d'éléments créés dans ce but et susceptibles de satisfaire aux exigences des interconnexions modernes. Il traite plus particulièrement des éléments pour le raccordement des dispositifs de réglage aux installations de mesure à distance ainsi que des détecteurs de fréquence à haute sensibilité tels qu'ils sont nécessaires pour le réglage statique des puissances d'échange. Après avoir indiqué les principaux points à observer lors du choix des régulateurs de puissance, de fréquence ou statiques, l'auteur examine brièvement la répartition de la charge selon le meilleur rendement, lors du réglage en parallèle de machines ou d'usines.

Einregelung des gewünschten Sollzustandes eingeführt wird.

Im Verbundbetrieb der Netze spielt der Energieaustausch zwischen den einzelnen Partnern regeltechnisch eine wichtige Rolle. In den meisten Fällen sind die Ubergabeleistungen nach einem Programm festgelegt und müssen daher entsprechend eingeregelt werden. Gleichzeitig ist dabei im Interesse frequenzempfindlicher Verbraucher insbe-