

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 46 (1955)
Heft: 21

Artikel: Die Lastverteilung auf die Regelgruppen bei der Leistungs-Frequenz-Regelung
Autor: Cuénod, M. / Schär, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060956>

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: 03.04.2026

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

Die Lastverteilung auf die Regelgruppen bei der Leistungs-Frequenz-Regelung

Von M. Cuénod, Genf, und F. Schär, Olten

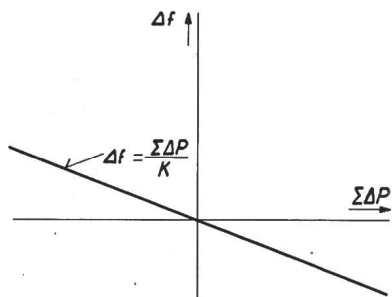
621.316.726 : 621.316.728 : 621.311.161

Die folgende Arbeit behandelt das Problem der Leistungsverteilung zwischen den Erzeugergruppen eines elektrischen Netzes, welches an der Leistungs-Frequenz-Regelung teilnimmt. Die wichtigsten Regelorgan-Kategorien, welche nach ihrem dynamischen Verhalten in proportional wirkende, integral wirkende und differential wirkende Regelorgane eingeteilt sind, werden beschrieben, ferner die Regelarten: Primärregelung, Sekundärregelung und Energie-Phasenregelung. Die verschiedenen Methoden der Lastverteilung zwischen verschiedenen Gruppen werden behandelt: Verteilung durch Führermaschine, Verteilung durch Ausgleich, Verteilung durch Folgesteuerung und Verteilung durch Energie-Phasenregelung. An einem Anwendungsbeispiel werden die Vorteile der Lastverteilung mit Folgesteuerung dargelegt.

L'article traite du problème du contrôle de la répartition de la charge entre les groupes d'un réseau électrique, qui participent simultanément au réglage fréquence-puissance de ce réseau. Les principales catégories dans lesquelles les organes de réglage peuvent être classés selon leurs caractéristiques dynamiques sont rappelées: dispositif de réglage à action proportionnelle, dispositif de réglage intégrateur et dispositif de réglage dérivateur. Ensuite l'auteur donne les trois principaux types de réglage de réseau: réglage primaire, réglage secondaire et réglage phase énergie. Il décrit différents modes de répartition de la charge entre les groupes de réglage, la répartition par machine pilote, la répartition par équilibrage, la répartition par asservissement direct et la répartition par écart de phase. Ainsi que l'illustre un exemple d'application, le mode de réglage qui paraît le plus rationnel actuellement est celui qui prévoit une répartition de la charge entre les groupes de réglage par asservissement direct.

I. Einführung

Die Austauschleistung zwischen zwei Netzen wird heute mehr und mehr nach Frequenz und Leistung geregelt [1]¹⁾, gemäss der durch Fig. 1 dargestellten Netzcharakteristik. Es erschienen darüber schon viele Veröffentlichungen [2...10].



SEV 23606

Fig. 1

Netzcharakteristik einer Leistungs-Frequenz-Regelung

$$\Delta f + K \Sigma \Delta P = 0$$

Δf Frequenzabweichung; $\Sigma \Delta P$ Summe der Abweichung der Übergabeleistung; K Regelkonstante

nung der Turbinen T wird durch die integral wirkenden Steuerorgane I in Funktion der Summe der Frequenz- und der Leistungsabweichungen so gesteuert, dass diese Summe im Dauerzustand gleich Null ist.

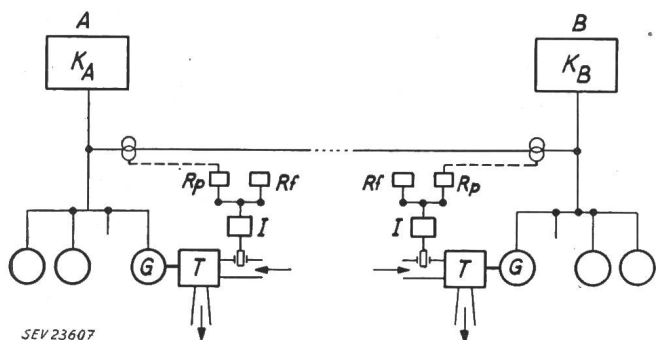
Da die Regelgruppen alle internen Lastschwankungen des Netzes kompensieren müssen, besteht bei grösseren Netzen die Gefahr, dass ihr Regelbereich überstiegen wird. Es ist deshalb wünschenswert, die Regelarbeit auf mehrere Gruppen zu verteilen. Nachfolgend wird beschrieben, wie diese Verteilung am besten erfolgen kann.

II. Dynamische Charakteristiken der Regelorgane

Die Regelgruppen können nach ihren dynamischen Charakteristiken in drei Hauptgruppen unterteilt werden [11...13]:

1. Proportional wirkende Regelorgane;
2. Integral wirkende Regelorgane;
3. Differential wirkende Regelorgane.

Die Eigenschaften dieser Gruppen lassen sich am einfachsten aus ihrem Verhalten bei Änderung der Eingangsgrösse ermitteln. Die Ausgangs- oder Regelgrösse s wird hierbei als Funktion der Eingangs- oder Stellgrösse e betrachtet, wenn sich diese stossförmig ändert. Man nennt dies auch die «Übergangsfunktion».



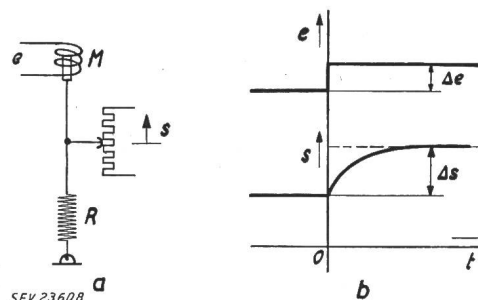
SEV 23607

Fig. 2

Prinzip einer primären Leistungs-Frequenz-Regelung mit einer einzigen Regelgruppe pro Netz

K_A, K_B Eigenlast der Netze A bzw. B; G Regel-Generatoren; T Regel-Turbine; R_f Frequenzmesswerk; R_p Leistungsmesswerk; I Turbinenservomotor ohne Rückführung (integral wirkendes Steuerorgan)

Fig. 2 zeigt das Prinzip der Leistungsfrequenz-Regelung schematisch an zwei über einer einzigen Leitung gekoppelten Netzen A und B. Die Öff-



SEV 23608

Fig. 3

Proportional wirkende Regelorgane (P-Regler)

a) Prinzip eines mechanischen Modells

b) Übergangsfunktion

M Meßsystem; R Gegenfeder; e Stellgrösse; s Regelgrösse; Δe Abweichung der Stellgrösse e ; Δs Abweichung der Regelgrösse s ; t Zeit

gestrichelte Kurve = idealisierte Übergangsfunktion

¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

1. Proportional wirkende Regelorgane

Diese Regelorgane werden auch «statische Regler» genannt, in neuerer Zeit jedoch immer häufiger kurz mit «P-Regler» bezeichnet. Fig. 3a zeigt das Prinzip eines solchen P-Reglers. Fig. 3b stellt die entsprechende Übergangsfunktion dar. Im stationären Zustand ist die Regelgröße s proportional der Stellgröße e .

$$s = k \cdot e$$

k Proportionalitätsfaktor

Die gestrichelte Kurve gibt die idealisierte Übergangsfunktion eines proportional wirkenden Regelorgans an.

2. Integral wirkende Regelorgane

Diese werden auch «astatische Regler» oder kurz «I-Regler» genannt. Fig. 4a stellt das Prinzip eines solchen Reglers dar, der aus dem Meßsystem M und der Dämpfung A besteht. Die Kurve s_1 der

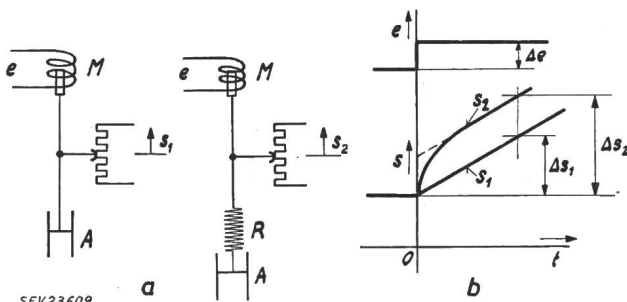


Fig. 4

Integral wirkende Regelorgane (I-Regler)

a Prinzip eines mechanischen Modells
b Übergangsfunktion

A Dämpfungssystem; Δs_1 Abweichung der Regelgröße s_1 des I-Reglers; Δs_2 Abweichung der Regelgröße s_2 des PI-Reglers
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Fig. 4b zeigt die entsprechende Übergangsfunktion. Im Dauerzustand ist die Regelgröße s proportional dem Integral des stossförmigen Ausschlages der Stellgröße e .

$$s = \frac{1}{T} \int_0^t e dt = e \frac{t}{T}$$

T Proportionalitätsfaktor = Stellzeit des Regelorgans.

(Es ist vorteilhaft, diesen Proportionalitätsfaktor im Nenner mit der Dimension einer Zeit vorzusehen, um den Ausdruck der Regelgröße «dimensionslos» zu erhalten.)

Die Verstellgeschwindigkeit der Regelgröße ist also konstant, und zwar proportional zum Ausschlag der Stellgröße. Die Verstellung der Regelgröße dauert so lange an, als die Abweichung der Stellgröße besteht.

Um die Stabilität der Regelung zu verbessern und gleichzeitig die automatische Regelung zu vereinfachen, geht man oft dazu über, die P- und I-Regelorgane zu vereinigen. Fig. 4a stellt auch das mechanische Modell eines solchen PI-Reglers — auch «astatischer Regler mit vorübergehender Statik» genannt — dar. Die Dämpfung A ist mittels einer Feder R mit dem Meßsystem M verbunden. Die Kurve s_2 in Fig. 4b zeigt die entsprechende Übergangsfunktion. Infolge einer stossförmigen

Abweichung der Eingangsgröße e bewegt sich die Ausgangsgröße s zuerst rasch, dann langsamer. Die punktierte Kurve gibt die idealisierte Übergangsfunktion eines PI-Reglers wieder, der durch folgende Gleichung charakterisiert werden kann:

$$s = e \left(k + \frac{t}{T} \right)$$

k Proportionalitätsfaktor
 T Stellzeit

3. Differential wirkende Regelorgane

Diese Regelorgane werden auch «Beschleunigungsregler», «Regler mit Vorbehalt» oder «Regler mit differenzierend wirkendem Einfluss» genannt und mit dem Namen «D-Regler» bezeichnet.

Fig. 5a stellt das Prinzip eines mechanischen Modells dar, welches annähernd die Eigenschaften eines D-Reglers besitzt: Das Meßsystem M wird mittelst der Feder R_1 im Gleichgewicht gehalten und ist mit dem Mittelpunkt der Feder R_2 durch einen Hebel, der um einen Punkt des beweglichen Teiles der Dämpfung A rotieren kann, verbunden. Wie man aus der Übergangsfunktion der Fig. 5b

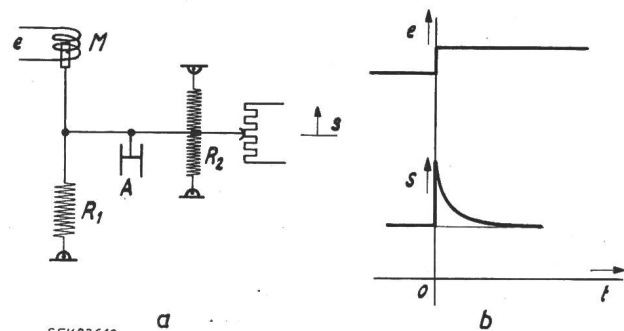


Fig. 5

Differential wirkende Regelorgane (D-Regler)

a Prinzip eines mechanischen Modells
b Übergangsfunktion

R_1 Gegenfeder; R_2 Rückführfeder; e Stellgröße; s Regelgröße
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3 und 4

ersehen kann, entsteht nach einer stossförmigen Abweichung der Stellgröße e ein proportionaler Ausschlag der Regelgröße s . Dadurch ist die Feder R_2 gespannt. Diese Feder entspannt sich anschließend wieder durch eine entsprechende Verschiebung des beweglichen Teiles der Dämpfung A . Die Ausgangsgröße wird auf ihren Anfangswert zurückgeführt. Dieses Regelorgan misst annähernd die erste Ableitung der Eingangsgröße. Die idealisierte Übergangsfunktion eines solchen Organes würde in einem unendlich starken, sehr kurzen Impulse bestehen, was praktisch nicht erreicht werden kann.

Es ist leicht zu beweisen [11], dass die überlagerte Wirkung eines P- und D-Reglers auf einen I-Regler dieselbe Übergangsfunktion wie diejenige eines PI-Reglers ergibt (siehe Kurve s_2 der Fig. 4b). Daraus kann auf die Identität der beiden Stabilisierereinrichtungen — Beschleunigungsregler oder vorübergehende Statik — geschlossen werden.

Es ist bekannt, dass ein I-Regler mit Hilfe einer starren Rückführung in einen P-Regler umgewandelt werden kann. Die beiden hauptsächlichsten

Vorteile der gegengekoppelten Regelsysteme bestehen in den wesentlich kleineren Anforderungen an die Genauigkeit der Regelorgane.

Bezeichnen wir beispielsweise bei einer Folgesteuerung die Eingangsgrösse mit e und die Ausgangsgrösse mit s , so besteht zwischen diesen beiden die Beziehung

$$\frac{s}{e} = V$$

Die Grösse V wird als Verstärkungsgrad bezeichnet. Wie die Gleichung ohne weiteres zeigt, gehen die prozentualen Fehler des Verstärkers in gleicher Grössenordnung auf den geregelten Wert s über, d. h. das Altern einer Röhre, Ungenauigkeiten im Übertragungskanal usw. gehen mit ihrem prozentualen Fehler direkt in das Endresultat ein.

Für ein System mit Gegenkopplung besteht die Gleichung:

$$\frac{s}{e} = \frac{V_1}{1 + V_1}$$

In dieser Gleichung bezeichnet V_1 wiederum den Verstärkungsgrad des Systems. Es ist daraus nun leicht ersichtlich, dass ein Fehler des Verstärkers einen um so kleineren Einfluss hat, je grösser der Verstärkungsgrad V_1 ist. Bei einem Verstärkungsgrad von nur 1 : 10 wird der Fehler im System nur mit einem Zehntel seiner Grösse Einfluss auf die Regelgrösse haben. Aus diesem Grunde sind alle Systeme mit Gegenkopplung viel unempfindlicher auf normale Abnützungen, normale Alterungen oder Ungenauigkeiten in der Herstellung. Sie sind deshalb auch viel betriebssicherer und sind überall dort zu empfehlen, wo diese Eigenschaft von grosser Bedeutung ist, z. B. in Regelkreisen.

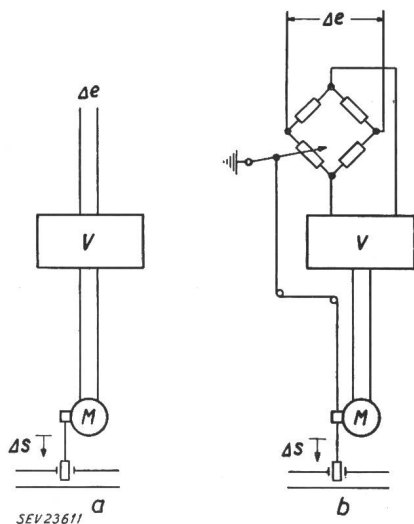


Fig. 6

Verstärker mit Steuermotoren

- a Integralverstärker
- b Proportionalverstärker

V Verstärker; M Steuermotor; Δe Änderung der Stellgrösse; Δs Änderung der Regelgrösse

Fig. 6 zeigt Verstärker mit Motoren. Fig. 6a stellt einen I-Regler dar. Der Motor M wird von einem magnetischen oder von einem Röhrenverstärker V gesteuert. Die Disposition wird vorteilhafterweise

so getroffen, dass die Drehgeschwindigkeit des Motors proportional zur Stellgrösse ist.

Fig. 6b zeigt das Prinzip eines P-Regelorganes. Vor dem Verstärker V liegt ein Differenzpunkt in Form einer Brücke. Wirkt eine Änderung Δe der Stellgrösse über die Brücke auf den Eingang des Verstärkers, dann beginnt der Motor zu drehen, und zwar mit einer Geschwindigkeit proportional zur Änderung Δe . Über die Rückführung R wird jedoch jetzt der Widerstand eines Brückenzeiges derart verändert, dass die am Eingang des Verstärkers liegende Spannung gegen Null abnimmt. Gleichzeitig nimmt auch die Drehgeschwindigkeit des Ventilmotors ab, und zwar so, dass sie stets der am Eingang des Verstärkers noch vorhandenen Spannung proportional ist. Die Änderung der Regelgrösse (Ventilstellung) ist somit dem Ausschlag der Stellgrösse proportional.

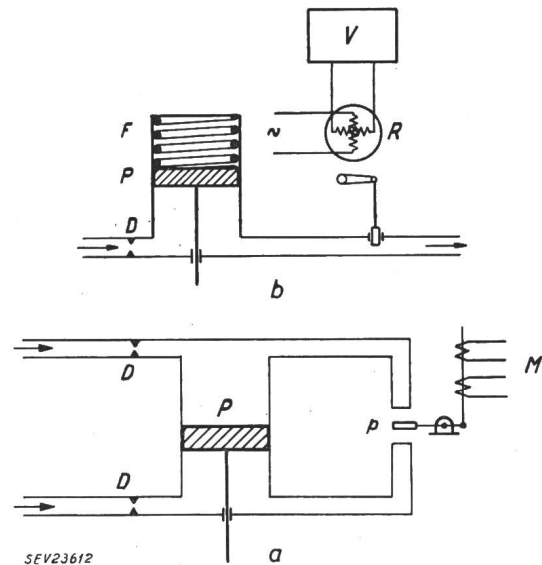


Fig. 7

Verstärkung mit Drucköl-Servomotor

- a Integralverstärker
- b Proportionalverstärker
- M Meßsystem; p Prallplatte; P Steuerkolben; D Ölblende; V Verstärker; R Ventilregler; F Gegenfeder

Fig. 7a zeigt das Beispiel eines integral wirkenden Öl-Servo-Motors. Die Verstellgeschwindigkeit des Kolbens P ist proportional zur Verschiebung der Prallplatte p von ihrer Mittellage; diese Verschiebung wird durch die Messwicklung M gesteuert. Um einen proportional wirkenden Servomotor zu erhalten, genügt es, den Rotor eines Induktionsreglers mit dem Kolben P zu kuppeln und mit der Sekundärspannung des Induktionsreglers eine zweite Messwicklung zu speisen, welche der ersten Wicklung entgegenwirkt.

In Fig. 7b ist ein proportional wirkender Öl-Servo-Motor wiedergegeben. Der Steueröldruck, d. h. der Weg des Kolbens, ist proportional zum Ausschlag des Ventilreglers R , welcher vom magnetischen Verstärker oder vom Röhrenverstärker V gesteuert wird.

III. Kennzeichen der Netzregelung

Das Prinzip einer Leistungs-Frequenz-Regelung (L-F-Regelung) erfordert das Vorhandensein eines

I-Regelgliedes in der Regelkette. Je nach der Art der Stellung dieses Gliedes können zwei Typen von Netzregelungen unterschieden werden: die primäre und die sekundäre L-F-Regelung.

1. Die Primärregelung

Das I-Regelorgan kann, wie dies die Fig. 2 zeigt, aus einem Turbinen-Servo-Motor bestehen, dessen Rückführung entfernt wurde. Dieselbe Wirkung könnte auch durch Steuerung der Öffnungsbegrenzungseinrichtung mit Hilfe eines I-Regelgliedes erreicht werden. Die Drehzahlverstellrichtung müsste aber dann um eine um die maximal möglichen Abweichungen höhere Sollfrequenz eingestellt werden. Der Turbinenregler würde so nur noch als Drehzahlbegrenzer wirken, falls die eingestellte Sollfrequenz erreicht wird. Dies wäre z. B. immer dann der Fall, wenn irgend ein Glied der Übertragungseinrichtung für die Leistungs-Frequenz-Regelung gestört ist.

2. Die Sekundärregelung

Wirkt das I-Regelorgan derart auf die Drehzahlverstellrichtung, wie dies prinzipiell durch Fig. 8 dargestellt wird, so erhält man eine «Sekundärregelung». Die Frequenz- und Leistungsabweichungen sind hier überlagert und wirken auf das I-Regelorgan I, welches die Drehzahlverstellrichtung steuert. Es ist mit dem Turbinenfrequenzmesswerk Rf_2 verbunden und steuert mit Hilfe des proportional wirkenden Servo-Motors P die Öffnung der Turbine.

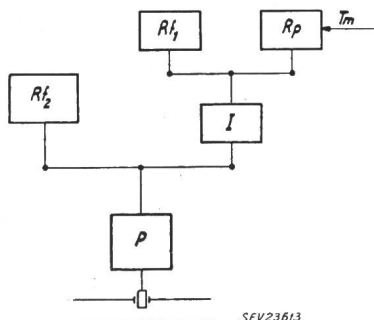


Fig. 8
Prinzipisches Schema einer sekundären L-F-Regelung
 R_p Leistungsmesswerk;
 Rf_1 Frequenzmesswerk des Netzreglers
 Rf_2 Frequenzmesswerk des Turbinenreglers
 I Integral wirkende Regelorgane
 P Proportional wirkende Regelorgane
 T_m Fernmessung

Ist ein elektrisches Turbinenfrequenzmesswerk vorhanden [13], so kann die Einstellung der Sollfrequenz in eleganter Weise durch eine passende Vormagnetisierung der Steuerdrosselspule erfolgen [10].

Das Prinzip einer Sekundärregelung besteht also darin, dass die Frequenz zweimal gemessen wird, einerseits durch das Netzfrequenzmesswerk Rf_1 und andererseits durch den Turbinenregler Rf_2 . Auf diese Art werden zwei Regelvorgänge überlagert. Zuerst erfolgt die normale Turbinendrehzahlregelung, welche die Turbinenleistung gemäss ihrer eigenen Regelcharakteristik regelt; anschliessend greift der Netzregler ein, welcher diese Regelcharakteristik so verstellt, dass die Übergabeleistung ihren Sollwert erreicht. Diese beiden Regelvorgänge müssen natürlich koordiniert werden, und zwar muss der sekundäre Frequenzeinfluss langsamer wirken als der primäre.

Aus praktischen Gründen ist man oft gezwungen, den Spielraum der L-F-Regelung zu begren-

zen [10]. Diese Begrenzung hat aber keinen Einfluss auf das eigentliche Prinzip der Netzregelung.

3. Energie-Phasen-Regelung

In Bezug auf das Endresultat besteht kein Unterschied, ob man die Frequenz- und die Leistungsabweichung getrennt oder die überlagerten Werte gemeinsam integriert.

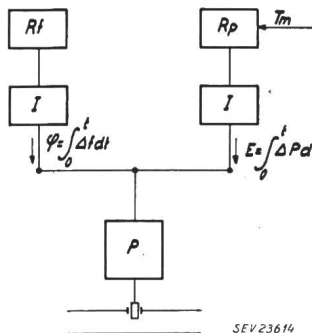


Fig. 9
Prinzipisches Schema einer Energie-Phasen-Regelung
 $\varphi = \int_0^t \Delta f dt$ Phasenabweichung
 $E = \int_0^t \Delta P dt$ Energieabweichung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 8

Die Integration der Leistung führt zu einer Energie und die Integration der Frequenz zu einer Phase, daher die Bezeichnung Energie-Phasen-Regelung, deren Prinzip in Fig. 9 wiedergegeben ist. Die Leistungs- und Frequenzmesswerke R_p und R_f wirken derart auf die I-Regelorgane I, dass diese die Energie- und Phasen-Abweichungen angeben. Diese beiden Integralwerte werden überlagert und steuern die Öffnung der Turbine mit Hilfe des P-Regelgliedes P. Der Vorteil der Energie-Phasen-Regelung, welche von der Electricité de France bevorzugt wird [15, 16], besteht darin, dass die Phasennessung in jedem Regelwerk unabhängig erfolgen kann unter der Voraussetzung, dass man über ein äusserst genaues Zeitmesswerk verfügt.

Ein weiterer Vorteil der Phasen-Regelung ist der, dass die Frequenz nicht direkt, sondern erst deren Integralmesswert gemessen werden muss, was meist einfacher ist. Die Regelung reagiert auf Frequenzabweichungen etwas langsamer als dies beim direkten Frequenzeinfluss der Fall ist, was einen sanfteren Regelbetrieb zur Folge hat.

Die Energie-Phasen-Regelung kann entweder nach dem Prinzip der Primär-Regelung oder nach dem Prinzip der Sekundärregelung erfolgen.

IV. Die Lastverteilung zwischen Regelgruppen

Die Verteilung der Regelungsarbeit kann prinzipiell auf vier verschiedene Arten erfolgen; und zwar durch:

1. eine Führergruppe;
2. Ausgleich;
3. Folgesteuerung;
4. Phasenregelung.

1. Verteilung durch eine Führergruppe

Die Steuerbefehle werden auf eine Gruppe, die sog. «Führergruppe» übertragen. Die Leistung der übrigen Gruppen wird proportional der Last der Führergruppe angepasst. Dies hat aber den Nachteil, dass die Führergruppen stark beansprucht werden; da die Anpassung der geführten Gruppen nicht augenblicklich erfolgt, können Lastschwankungen zwischen der Führergruppe und den an-

dern Gruppen entstehen. Aus diesem Grunde wird diese Art von Verteilung im allgemeinen heute nicht mehr benützt.

2. Verteilung durch Ausgleich

Fig. 10 stellt das Prinzipschema einer primären L-F-Regelung mit Ausgleich dar. Die Summe der Lastabweichungen wird auf das Leistungsmesswerk R_p jeder einzelnen Regelgruppe übertragen. Ihre Wirkung ist derjenigen des Frequenzmesswerkes überlagert und steuert mit Hilfe des I-Regelorgans I die Öffnung der Turbine. Es ist sehr schwierig, für alle I-Regelorgane dieselbe Stellzeit zu er-

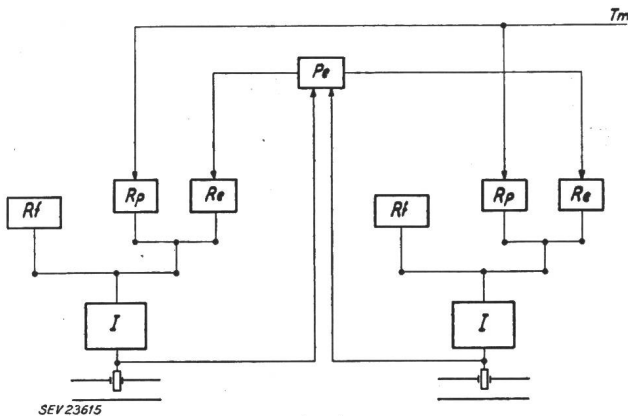


Fig. 10

Prinzipschema einer primären L-F-Regelung mit Ausgleich
 R_f Frequenzmesswerk; P_e Ausgleichseinrichtung in Polygon-schaltung; R_e Ausgleichsregelorgan
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 8

reichen, woraus sich ungleichmässige Lastverteilungen ergeben. Die Verteilung muss deshalb ständig überwacht werden. Die Leistung der einzelnen Gruppen wird mit Hilfe einer in Polygon geschalteten Ausgleichseinrichtung P_e gemessen, welche mittelst der Regelorgane R_e eine gleichmässige Lastverteilung gewährleistet. Die Polygon-Schaltungen sind jedoch kompliziert und daher nicht sehr beliebt, so dass diese Art von Verteilung nicht gerne angewendet wird.

3. Verteilung durch Folgesteuerung

Fig. 11 zeigt das Prinzip einer primären L-F-Regelung mit Folgesteuerung. Die Frequenz- und Übergabeleistungsabweichungen werden mit Hilfe der Messwerke R_f und R_p gemessen, welche ihrer-

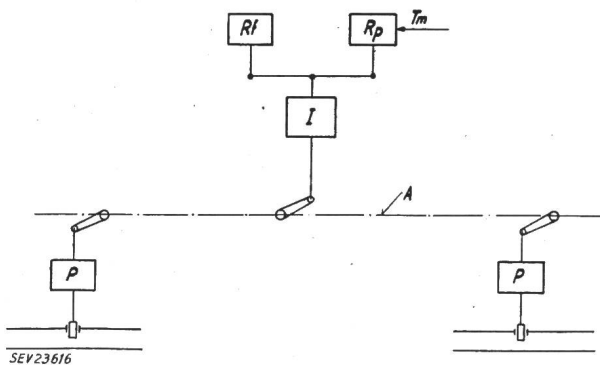


Fig. 11

Prinzipschema einer primären L-F-Regelung mit Folgesteuerung und einem Regelwerk
 A Steuerwelle
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 8 und 10

seits das I-Regelorgan I steuern. Die Steuerbefehle werden mittels der Regelwelle A und den P-Regelorganen P auf die einzelnen Regelgruppen übertragen. Die Lastverteilung ist automatisch — ohne Ausgleichseinrichtung — gesichert. Die Fernmess- und Fernsteuerkanäle sind auf ein Minimum reduziert.

Ist das Netz gross, so muss die Regelarbeit auf mehrere Kraftwerke verteilt werden. Die Regelarbeit der einzelnen Gruppen wird dann entsprechend reduziert. Die Lastverteilung erfolgt in diesem Falle am einfachsten in zwei Stufen gemäss Fig. 12: Das durch das Frequenzmesswerk R_f und

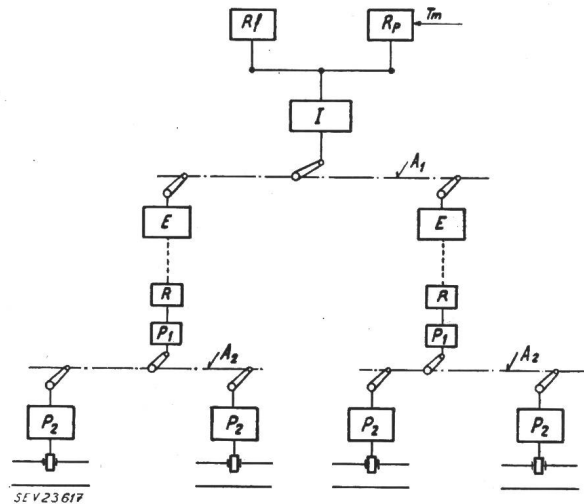


Fig. 12

Prinzipschema einer primären L-F-Regelung mit Folgesteuerung und mehreren Regelwerken
 E Sender; R Empfänger; A_1 Steuerwelle des Netzreglers; A_2 Steuerwelle der Regelwerke; P_1 Steuer-P-Regler der Regelwerke; P_2 Steuer-P-Regler der Regelgruppe
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 8 und 10

das Leistungsmesswerk R_p gesteuerte I-Regelorgan I treibt die Verteilwelle A_1 an. Mit Hilfe des Senders E und des Empfängers R werden die Steuerbefehle auf die einzelnen Kraftwerke übertragen. Die Lastverteilung zwischen den Regelgruppen der einzelnen Werke erfolgt nach demselben Prinzip.

Eine Lastverteilung mit Folgesteuerung eignet sich speziell gut für diejenigen Kraftwerke, die in Kaskaden gemäss Fig. 13, mit relativ kleinen Ausgleichsbecken, aufgestellt sind [17]. Will man jeden unerwünschten Wasserablauf vermeiden, so ist es erforderlich, dass die vom Oberwerk verbrauchten Wassermengen unverzüglich vom Unterwerk verschluckt werden. Die Leistung der beiden Werke muss aber zur selben Zeit im Verhältnis ihrer Gefälle geändert werden. Dies kann durch gleichzeitige Übertragung der Steuerbefehle der Netzregler auf die beiden Werke geschehen. Werden diese Bedingungen strikte erfüllt, so bleibt die Höhe des Wasserspiegels des Ausgleichsbeckens automatisch konstant. In vielen Fällen erhält aber das Ausgleichsbecken einen zusätzlichen Wasserzufluss, so dass die L-F-Regelung demzufolge mit einer Wasserstands-Regelung kombiniert werden muss. Diese Regelung kann entweder auf das Ober- oder Unterwerk wirken, noch besser aber auf den Netzregler R gemäss Fig. 13, so dass die Leistungs-

verteilung zwischen dem Ober- und Unterwerk an die zur Verfügung stehende Wassermenge ständig angepasst werden kann.

Da es einige Zeit dauert, bis das vom Oberwerk verbrauchte Wasser zum Unterwerk fliesst, muss die Regelung diesen Zeitverzug mittels einer passenden Verzögerung der Steuerbefehle an das Unterwerk berücksichtigen.

Phasen-Regelung mit einem gemeinsamen Netzregler zu versehen. Diese Art von Verteilung entspricht dann derjenigen mit Folgesteuerung.

Da die Stellung des I-Regelorganes in der Regelkette massgebend für die Art der Verteilung der Reglerbefehle ist, muss ihr eine grosse Bedeutung zugemessen werden. Es ist daher empfehlenswert,

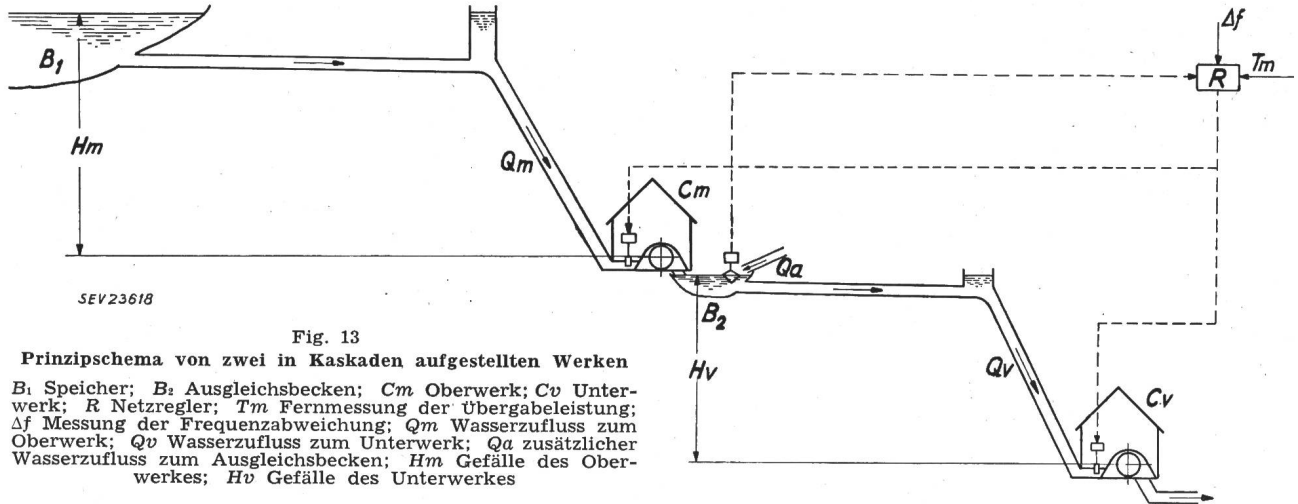


Fig. 13

Prinzipschema von zwei in Kaskaden aufgestellten Werken
 B₁ Speicher; B₂ Ausgleichsbecken; C_m Oberwerk; C_v Unterwerk; R Netzregler; T_m Fernmessung der Übergabeleistung; Δf Messung der Frequenzabweichung; Q_m Wasserzufluss zum Oberwerk; Q_v Wasserzufluss zum Unterwerk; Q_a zusätzlicher Wasserzufluss zum Ausgleichsbecken; H_m Gefälle des Oberwerkes; H_v Gefälle des Unterwerkes

4. Verteilung durch Phasenregelung

Aus den vorhergehenden Erörterungen konnte man ersehen, dass die Phasen-Energie-Regelung der Leistungs-Frequenz-Regelung entspricht, mit dem einzigen Unterschied, dass eine Überlagerung der Regelgrösse nach ihrer Integration erfolgt. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass man im Falle einer reinen Frequenzregelung (mit einer unendlich grossen Regelkonstante) von jeder Fernmessung absehen kann, was sich im Rahmen eines grossen Netzes sehr vorteilhaft auswirkt [15, 16].

dieses Regelglied am Anfang der Regelkette vorzusehen, um eine Lastverteilung mit proportional wirkendem Regelglied nach dem Prinzip der Folgesteuerung zu erhalten. Die Ungenauigkeiten, die sich aus der Übertragung der Steuerbefehle ergeben, spielen dann in Bezug auf die Leistungsverteilung eine untergeordnete Rolle. Von den relativ teuren Apparaten, welche die erste Verstärkerstufe bilden, wird nur ein einziger in Funktion gesetzt.

Die dynamische Charakteristik der I-Regelorgane spielt in Bezug auf die Stabilität der Re-

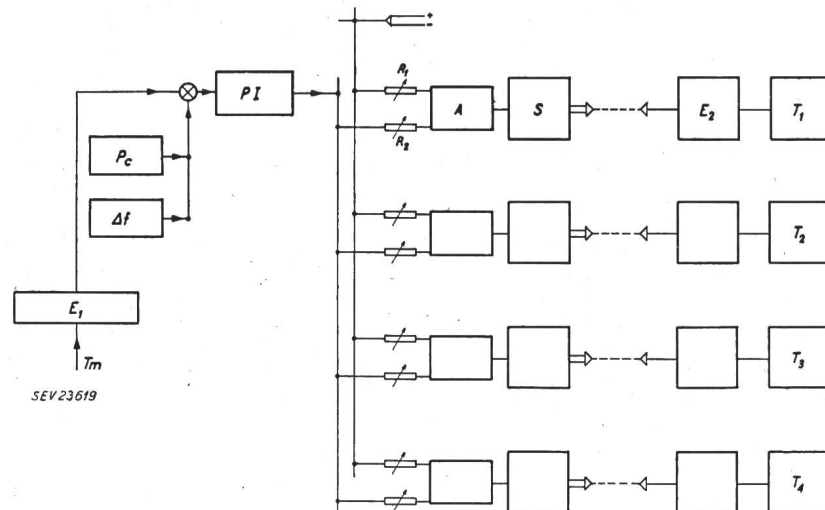


Fig. 14

Prinzipausführung einer L-F-Regelung
 T_m Fernmessung der Übergabeleistung; E₁ Empfänger des Netzreglers; P_c Sollwert Einfluss; Δf Frequenzeinfluss; PI Proportional-Integral-Regelorgan des Netzreglers; R₁ Potentiometer für die Grundlasteinstellung; R₂ Potentiometer für die Regellasteinstellung; A Anpassglied; S Fernmesssender; E₂ Empfänger des Turbinenreglers; T₁...T₄ Regelturbinen

Dieser Vorteil fällt jedoch dahin, wenn eine Übergabeleistung geregelt werden soll. In diesem Falle muss die Phasen-Regelung mit einer Energie-Regelung kombiniert und die Energie-Abweichung mittels Fernmessung auf die einzelnen Regelwerke übertragen werden. Um jede Lastverschiebung zu vermeiden, ist es empfehlenswert, die Energie-

regelung eine grosse Rolle und muss genügend gedämpft oder mit Stabilisierereinrichtungen, unter Berücksichtigung der gewählten Regelkonstante, ergänzt werden.

Die Umschaltung von Hand- auf Parallelbetrieb oder umgekehrt muss auf einfache Weise ohne Stoss erfolgen können. Im Falle von Störungen in

den Regeleinrichtungen oder in den Kuppelleitungen muss die Tätigkeit im einzelnen Betrieb aufrechterhalten werden.

Die Sollwerte müssen auf einfache Art ermittelt werden können (Frequenz, Leistung, Regelkonstante, Lastverteilung usw.).

V. Beispiel für die Ausführung einer Leistungsfrequenz-Regelanlage

Fig. 14 zeigt schematisch das Prinzip einer Leistungsfrequenz-Regelanlage mit P-I-Verstärker und Folgesteuerung. Der Fernmessempegänger, der Sollwert- und der Frequenzeinflussgeber wirken am Eingang des P-I-Reglers. Die Zeitkonstante des Integralgliedes kann eingestellt werden. Die Steuerbefehle werden an eine kleine Sammelschiene weitergegeben. Da man jede Turbine individuell steuern können muss, passiert der Regelbefehl einen Einstellwiderstand zur Wahl des Anteils an der Regellast. Parallel dazu liegt ein Regelwiderstand für die Grundlasteinstellung. Ein Anpassglied gestattet, die Regelbefehle so auf Turbinenregelwerte weiterzuleiten, wie es deren individuelles Verhalten erfordert.

Da bei den kommenden grösseren Lastregelanlagen wohl selten nur die Maschinen eines Kraftwerkes angesteuert werden, so wird meistens zwischen Netzregler und Turbine ein Fernmesskanal nötig sein, wie er in Fig. 14 ebenfalls angedeutet ist. Diese enthält nur die anschliessend an die behandelten Fragen wesentlichen Elemente. Bei der praktischen Ausführung kommen noch andere nützliche Elemente hinzu, z. B. die wahlweise akustische oder optische Anzeige der minimalen oder maximalen Last einer Turbine usw.

VI. Schlussfolgerungen

Um eine optimale Regelung der Austauschleistungen zu erhalten, ist es vorteilhaft, die Regelerarbeit auf verschiedene Regelgruppen zu verteilen. Aus den gemachten Erklärungen ging hervor, dass für die heutigen Verhältnisse diese Verteilung am einfachsten nach dem Prinzip der Folgesteuerung vorgenommen werden kann: das integral wirkende Regelorgan ist im Netzregler vorzusehen und die Steuerbefehle sind mit Hilfe von proportional wirkenden Stellgliedern auf die einzelnen Regelgruppen zu übertragen.

Die Gesellschaft «Les Télétransmissions» in Paris verfügt über ein System, welches in 1,2 s 60 Befehle auf einer Bandbreite von 0,6 kHz überträgt, was die Beanspruchung des Frequenzbandes der HF-Übertragung sehr stark reduziert. Das Prinzip dieses Systems besteht darin, dass nicht mehr eine stetige Grösse, sondern Zahlen übertragen werden. Es ist möglich, dass in Zukunft, um die Fernmessung zu erleichtern und um eine grössere Genauigkeit und Anpassungsfähigkeit der Netzregelung zu erhalten, eine elektronische Rechenmaschine die Funktion des Netzreglers übernehmen wird. Eine solche Maschine würde alle Mess- und Steuerwerte in Form von Zahlen erhalten, sie

kombinieren und wieder übertragen. Die stetigen Werte für die eigentliche Messung und Steuerung würden nur am Ende der Regelkette erscheinen. Die Verwirklichung liegt jedoch noch in weiter Ferne.

Die Netzregelung befindet sich in konstanter Entwicklung. Die ersten un stetigen Regelsysteme mit Steuerimpulsen entsprachen der ersten Entwicklungsstufe der Netzregelung. Die heutigen Verhältnisse tendieren mehr auf eine Anwendung von Regelsystemen mit stetiger Wirkung.

Die Leistungs-Frequenz-Regelung erlaubt bei vernünftigem, nicht unnötig weit getriebenem Zusammenschluss der Netze eine Beherrschung des Energieflusses entsprechend den Bedürfnissen der einzelnen Gesellschaften. Dadurch lassen sich die Vorteile des Verbundbetriebes ausnützen und mit denjenigen einer mehr regionalen Betriebsführung kombinieren.

Literatur

- [1] *Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique (UNIFEDE)*. Rapport de l'Assemblée générale ordinaire du 18 septembre 1952.
- [2] *Gaden, D. und R. Keller*: Le réglage fréquence-puissance des interconnexions. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 13, S. 333...349.
- [3] *Keller, R.*: Nouveaux procédés de réglage fréquence-puissance en service d'exploitation. Rev. Brown Boveri Bd. 32(1945), Nr. 7, S. 223...238.
- [4] *Cuénod, M.*: Répartition automatique de la charge entre réseaux électriques interconnectés. Bull. techn. Suisse rom. Bd. 74(1948), Nr. 21, S. 257...261.
- [5] *Cahen, F.*: Le réglage de la fréquence et des échanges de puissance dans le cadre de l'interconnexion. Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique (UNIFEDE), 9^e Congrès, Rom 1952, Bd. II, Nr. IV, 3; 16 S.
- [6] *Keller, R.*: Regulierung von Frequenz und Wirklast im grossen Netzverband. Bull. SEV Bd. 43(1952), Nr. 13, S. 552...560.
- [7] *Hauser, W.*: Die heutigen Mittel der Regulieretechnik und die Bedürfnisse der Praxis. Bull. SEV Bd. 43(1952), Nr. 13, S. 537...544.
- [8] *Graner, H.*: Die Regelung der Energieströmung in grossen Wechsel- und Drehstromnetzen. ETZ-A Bd. 73(1952), Nr. 7, S. 223...226.
- [9] *Cahen, F.*: Quelques considérations sur le réglage automatique de la fréquence et des échanges de puissance dans les réseaux. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Serie, Bd. 3(1953), Nr. 26, S. 59...72.
- [10] *Keller, R. und W. Frey*: Contribution au réglage de la fréquence et de la puissance des grands réseaux. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 3, Rapp. 318, 22 S.
- [11] *Stein, T.*: Wasserturbinen-Regler mit identischer Integral- und Differential-Wirkung. Schweiz. Bauztg. Bd. 72(1954), Nr. 11, S. 137...141; Nr. 12, S. 151...154.
- [12] *DIN-Norm 19 226*: Regelungstechnik, Benennungen, Begriffe. Ausg. 1. 54.
- [13] *Vafiadis, G.*: Einige allgemeine Grundlagen der Regelungstechnik. Brown Boveri Mitt. Bd. 41(1954), Nr. 6, S. 209...217.
- [14] *Cuénod, M.*: Un régleur électrique de vitesse. Houille blanche Bd. 5(1950), Nr. 2, S. 125...130.
- [15] *Cahen, F. und A. Chevallier*: Le réglage puissance-phase. Nouvelle méthode pour le réglage automatique de la fréquence d'un réseau comportant de multiples usines génératrices. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Serie, Bd. 3(1953), Nr. 34, S. 614...637.
- [16] *Cahen, F. und A. Chevallier*: Le réglage automatique de la fréquence dans les grands réseaux: Le réglage intégral. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 3, Rapp. 339, 24 S.
- [17] *Cuénod, M. und A. Terrisse*: Le réglage des centrales hydro-électriques disposées en cascade. Schweiz. Bauztg. Bd. 72(1954), Nr. 31, S. 445...451.

Adressen der Autoren:

M. Cuénod, Dr ès sc. techn., Société Générale pour l'Industrie, 17, rue Bovy-Lysberg, Genf, und
F. Schär, Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität, Olten (SO).