Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 28 (1937)

Heft: 22

Artikel: Technische Ausführungsformen statischer Leistungsregler und ihr Einsatz im Verbundbetrieb von Netzen

Autor: Wierer, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059883

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: 08.01.2026

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

Für Stillstand des Drehsystems gilt einfach

$$I_i = I_c$$

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

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

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

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 besitzt, 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.

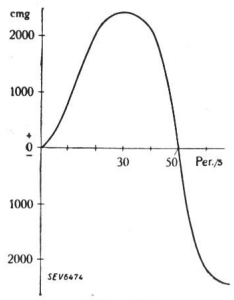


Fig. 13.
Charakteristik des Drehmomentes des Frequenzreglers.

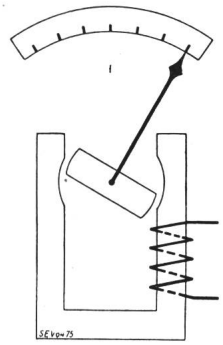


Fig. 14.
Regulierdrossespule.

—

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, anderseits 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 Uebergabeleistungen 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.

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.

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 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 Uebergabeleistungen nach einem Programm festgelegt und müssen daher entsprechend eingeregelt werden. Gleichzeitig ist dabei im Interesse frequenzempfindlicher Verbraucher insbe-

sondere bei Anschluss von Synchronuhren an das Versorgungsnetz auf exakte Einhaltung der Frequenz zu achten. Die elektrischen Zusatzregler müssen daher so angeordnet und eingerichtet werden, dass der Sollzustand, d. h. richtige Austauschleistung und Betriebsfrequenz bei Abweichungen möglichst schnell und pendelfrei eingeregelt wird. Diese Aufgabe kann nur durch statische Leistungsregler in völlig befriedigender Weise gelöst werden. Es ist nun Aufgabe dieser Abhandlung, einige wichtige Elemente zu erläutern, die zur Lösung der auftretenden Regelaufgaben in Anwendung gebracht werden.

Es soll zuerst auf den einfachen astatischen Leistungsregler eingegangen werden, der ohne Rücksichtnahme auf andere Grössen für Einhaltung eines vorgeschriebenen Leistungswertes sorgt. Wenn auch diese Form des Reglers im Verbundbetrieb von Netzen meistens nicht mehr anwendbar erscheint, so bildet er doch ein Grundelement für die anderen Reglerarten. In ganz einfachen Fällen wird auch dieser Regler noch häufig angewandt, z. B. wenn es sich um die Konstanthaltung der Leistung eines Industrieabnehmers mit Bezug und Eigenerzeugung handelt, und derselbe vertraglich an die Einhaltung eines festgelegten Leistungsbezuges gebunden ist. Dieses Industriewerk interessiert also nur die Leistungshaltung. Für die Frequenzhaltung ist es nicht verantwortlich. Es kann gewöhnlich auch gar nicht dafür aufkommen, da meist seine Eigenerzeugung ausserordentlich klein gegenüber der Netzleistung ist. Ein weiteres Anwendungsgebiet dieser Regler ist z. B. auch die Druck-Leistungs-Regelung von Anzapf- oder Gegendruckturbinen. Der Leistungsregler sorgt bei Parallelbetrieb der Eigenerzeugung mit einem Fremdnetz in Verbindung mit einem Dampf-Druckregler für die zweckmässigste Betriebsführung mit Rücksicht auf Dampfverbrauch und Verbrauch an elektrischer Energie.

Fig. 1 zeigt den Leistungsregler. Er ist eine Relaiskombination, die aus lange erprobten Relais und Reglerelementen besteht, so dass die Betriebssicherheit dieses Gerätes sehr gross ist. Der elektrische Regler besteht aus einem zwei- bis dreisystemigen dynamometrischen Indikatorrelais grosser Empfindlichkeit und mit ganz kleinem Eigenverbrauch zur mehrphasigen Erfassung der Leistung, so dass auch bei unsymmetrischer Belastung die Regelaufgabe einwandfrei gelöst wird. Dieses Relais arbeitet zur Kontaktschonung über ein Zwischenrelais mit ganz geringem Eigenverbrauch auf die Steuerrelais, die einmal für die innere Abhängigkeitsschaltung bestimmt sind und dann auf den Drehzahlverstellmotor wirken. Der einfachste Regler, der in Fig. 1 dargestellt ist, ist mit einer sogenannten starren Rückführung ausgestattet, d. h. entsprechend den Regeleigenschaften der Maschine wird bei Gabe eines Verstellbefehls auf eines der dynamometrischen Systeme des Messrelais eine Gegenerregung gegeben, so dass die Befehlsgabe vorzeitig unterbrochen wird, um eine Ueberregelung zu vermeiden. Um nach Wirksamwerden der Rückführung eine sofort folgende erneute Befehlsgabe zu vermeiden, wird durch ein Ferraris-Zeitrelais eine Sperrzeit eingeführt, so dass der geregelten Maschine Zeit gelassen wird, ihren Regelvorgang zu beenden. Erst nach Ablauf dieser Sperrzeit wird ein erneuter Befehl möglich, falls noch eine Abweichung bestehen sollte. Eben dieses Zeitrelais dient noch dazu, eine Mindestimpulszeit einzuführen, die bei Abweichungen innerhalb des Rückführbereiches eine sichere Ausregelung bewirkt. Denn ist das Abweichungsmoment kleiner als das Rückführmoment, so würde ohne Einfügung einer Mindestimpulszeit der Regelkontakt sofort wieder öffnen, ohne dass eine spürbare Verstellung erfolgte. Grössere Abweichungen werden daher bei richtiger Einstellung der Rückführung nicht impulsweise, sondern in einem Zuge ausgeregelt. Nur kleine Abweichungen, soweit sie innerhalb der Rückführzone liegen, werden durch ganz wenige Impulse zum Verschwinden gebracht. Rückführungs-, Mindestimpuls- und Sperrzeit sind in ganz einfacher Weise durch Verändern von Schiebewiderständen einzustellen, so dass man sich leicht an die gegebenen Regelvoraussetzungen anpassen kann. Ebenso kann durch Widerstandsänderung die Empfindlichkeit des Reglers den Erfordernissen entsprechend eingestellt werden. Die Aenderung der Empfindlichkeit geschieht dadurch, dass durch einen kleinen Elektromagneten der Kontakt des Regelrelais in der Mitte festgehalten wird. Je mehr nun dieser Haltemagnet erregt wird, um so mehr Abweichungsmoment muss auftreten, um ein

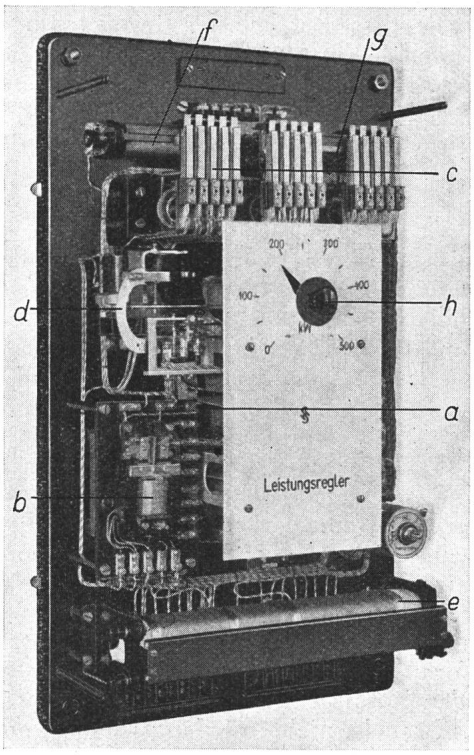


Fig. 1.
Leistungsregler.
a Regelrelais. *b* Zwischenrelais mit geringem Eigenverbrauch. *c* Steuerrelais. *d* Zeitrelais für Mindestimpuls- und Sperrzeiten. *e* Einstellwiderstand für Mindestimpuls- u. Sperrzeiten. *f* Einstellwiderstand für Rückführung. *g* Einstellwiderstand für Empfindlichkeit. *h* Sollwerteinsteller.

Schliessen des Kontaktes zu erreichen. Bleibt der Haltemagnet unerregt, so ergibt sich die grösste Empfindlichkeit von $\pm$ 1 %.

Die Einstellung des Sollwertes geschieht durch Aenderung der Federspannung des Indikatorrelais an Hand der Einstellskala. Bei Verwendung von Programmgebern wird zur Sollwerteinstellung ein weiteres dynamometrisches System herangezogen und entgegen den Istwertsystemen geschaltet.

Erfolgt die Leistungsänderung bei Eingreifen des Reglers sehr träge, sei es, dass es sich um die Steuerung von Wasserkraftniederdruckanlagen mit sehr träger Regelung handelt, oder dass eine Uebergabeleistung eingeregelt werden soll und die Uebergabestation sehr weit, oft einige hundert Kilometer entfernt liegt, so dass sich der Regelvorgang infolge der schwachen Kupplung sehr verzögert bemerkbar macht, so wird zweckmässigerweise zu einer anderen Art der Rückführung gegriffen. An Stelle der starren Rückführung tritt eine proportionale Rückführung. Der Regler erhält einen Rückführwiderstand, der durch einen kleinen Zählermotor verstellbar ist. Die Schaltung wird nun so getroffen, dass bei Gabe eines Verstellbefehls infolge einer Abweichung des Istwertes vom Sollwert das Rückführmoment zuerst Null ist. Neben dem Drehzahlverstellmotor wird nun der Rückführzählermotor in Gang gesetzt, und der Rückführwiderstand solange verstellt, bis das Rückführmoment gleich dem bestehenden Abweichungsmoment ist. In diesem Augenblick öffnet der Regler und unterbricht die Verstellung. Die Verstellgeschwindigkeit des Zählermotors wird nun derart an den Drehzahlverstellmotor angeglichen, dass das Rückführmoment in dem Augenblick gleich dem Abweichungsmoment wird, wenn der Verstellmotor einen der Abweichung entsprechenden Weg zurückgelegt hat. Trotz schwieriger Voraussetzungen kann daher die Ausregelung durch den Zusatzregler rasch in einem Zuge erfolgen. Es braucht nicht zu langsamer Impulssteuerung übergegangen zu werden, die z. B. bei Kaplanturbinen mechanisch als unangenehm empfunden wird, besonders, wenn die Austauschleistung sehr stark schwankt und daher häufig geregelt werden muss. Nach Unterbrechung des Verstellbefehles durch die ansteigende Rückführung wird der Rückführwiderstand wieder langsam in die Ausgangslage (Rückführmoment = 0) zurückgedreht. Die Rückdrehgeschwindigkeit wird an die Trägheit der Regelung angepasst. Ist die Rückführung wieder Null, so kann ein erneuter Befehl gegeben werden. Diese Art der Rückführung kommt einer statischen Regelung, folgend einer Kennlinie «Uebergabeleistung-Verstellweg» mit astatischer Korrektur, da die Rückführung wieder Null gemacht wird, gleich, was zu einer sehr stabilen Regelung auch bei ungünstigen Voraussetzungen führt.

Ist die Leistungsübergabestelle, die eingeregelt werden soll, sehr weit von den Regelmaschinen entfernt, so kann entweder der Regler an der Uebergabestelle eingebaut und die Verstellbefehle nach dem geregelten Werk übertragen werden, oder der Regler wird im Werk aufgestellt und an eine Fernmessung angeschlossen. Häufig tritt auch der Fall ein, dass der Regler in der Lastverteilerstelle angeordnet wird, die zwischen beiden Punkten liegen kann. Dann muss einerseits Fernmessung und andererseits Fernübertragung der Impulse angewandt werden. Die Fernübertragung der Regelimpulse kann durch eines der bekannten Fernsteuerverfahren geschehen. Wenn auch der Leistungsverbrauch der Meßsysteme des Reglers nur klein ist und daher auch für mittlere Entfernungen eine direkte Messung durchgeführt werden könnte, so wählt man trotzdem, wenn der Abstand der Meßstelle über wenige Kilometer hinausgeht, gewöhnlich infolge der Einfachheit des Uebertragungskanals ein Fernmessverfahren. Der Regler muss daher an die Fernmessung, z. B. nach dem Impulsfrequenz-Fernmessverfahren, angeschlossen werden. Die Anwendung des Impulsfrequenzfernmessverfahrens hat den Vorteil, dass man vollständig frei in der Auswahl des Uebertragungskanals ist. Dieser Kanal kann ebensogut wie durch besondere Verbindungsleitungen durch Hochfrequenzübertragung oder durch Mehrfachausnutzung einer bestehenden Telephon- oder Steuerverbindung geschaffen werden.

Da die Fernmesseinrichtungen nur schwache Ströme liefern, muss ein Verstärker zwischengeschaltet werden. Für diesen Zweck steht ein Messwertverstärker zur Verfügung, den Fig. 2 in prinzipieller Schaltung zeigt [1]). Dies ist ein Gerät, das in seinen verschiedenen Variationen überhaupt zur Lösung von Regelaufgaben sehr wichtig ist. Der Verstärker besteht aus einem hochempfindlichen richtkraftlosen Drehspulsystem D mit zwei Messwicklungen, von denen die eine durch den Fernmeßstrom I_f beeinflusst wird; die zweite Wicklung ist über die Widerstände R_1 und R_2 an den Brückenzweig der durch die Widerstände R_0, R_3, R_4 und R_5 gebildeten Brückenschaltung angeschlossen. Mit dem Drehspulsystem ist die Widerstandseinstellung von R_0 gekuppelt. Dieser Widerstand sei verlustlos verstellbar, so dass dadurch keine Richtkraft auf das Mess-System ausgeübt wird. Es sei angenommen, der Fernmeßstrom I_f ist Null und die Widerstände R_0, R_3, R_4 und R_5 sind so abgeglichen, dass sich kein Brückenstrom ergibt und daher beide Wicklungen des Drehspulsystems *1* und *2* stromlos sind. Tritt nun ein Fernmeßstrom I_f auf, so beginnt sich je nach dessen Richtung das Meßsystem zu drehen. Dadurch wird der Widerstand R_0 verändert und damit das Gleichgewicht der Brücke gestört, so dass ein Brückenstrom I_B auftritt, der am Wi-

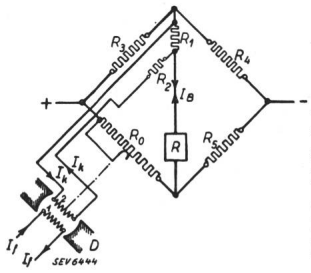


Fig. 2.
Prinzip-Grundschaltbild des Messwertverstärkers.
D Drehspulmeßsystem. I_f Fernmeßstrom. I_B Kompensationsstrom. I_R Brückenstrom. R Regler. R_1 Nebenschlusswiderstand. R_2 Vorwiderstand. R_3, R_4, R_5 Brückenwiderstände. R Verlustlos regelbarer Widerstand.

[1]) Brandenburger: Ein neuer Gleichstromverstärker für Messzwecke, Siemens-Z., Sept. 1935.

derstand R_1 einen Spannungsabfall erzeugt. Dies ergibt in der Wicklung *2* von *D* einen Strom I_k, der dem Einfluss von I_f in Wicklung *1* entgegenwirkt. Das Drehspulsystem wird sich nun solange drehen und R_0 ändern, bis sich durch den Brückenstrom I_B ein Kompensationsstrom I_k ergibt, der gleich gross und I_f entgegengerichtet ist, so dass das Meßsystem *D* in Ruhe bleibt. Der Strom I_k ist gegeben durch die Widerstände R_1 und R_2 und daher bestimmt sich das Verstärkungsverhältnis zu $\frac{R_2}{R_1}$. Der Brückenstrom I_B, den man dem Regler zuführt, ist daher direkt proportional dem Strom I_k und daher dem Fernmeßstrom, unabhängig von der Spannung an der Brücke und unabhängig von der Charakteristik von R_0, denn *D* läuft solange, bis der Kompensationsstrom erreicht ist.

Der verlustlos verstellbare Widerstand R_0 ist in Wirklichkeit eine Röhrenschaltung nach Fig. 3. R_0 ist eine Elektronenröhre in Rückkopplungsschaltung, die dauernd schwingt. Die Frequenz der Schwingung ist gegeben durch den Schwingungskreis $L_1 - C_1$ an der Anode; der Rückkopplung dient die Spule L_2, die einerseits über den Kondensator C_2 und den Widerstand R_a an das Gitter und andererseits an die Kathode angeschlossen ist. Sind die Rückkopplungbedingungen erfüllt, so schwingt die Schaltung mit der durch L_1 und C_1 gegebenen Hochfrequenz (HF). Die Intensität der Schwingung ist abhängig vom Rückkopplungsgrad. Es tritt dabei die Erscheinung auf, dass durch die Spule L_1 in L_2 eine HF-Spannung induziert wird, die das Gitter um so mehr negativ aufladet, je stärker die Intensität der Schwingung, d. h. je stärker die Rückkopplung ist. Je mehr die Rückkopplung durch Abschirmung der Gitterspule L_2 gegen die Anodenspule L_1 vermindert wird, um so weniger erhält das Gitter der Elektronenröhre negative Ladung, um so grösser wird der Anodengleichstrom, um so kleiner also der Gleichstromwiderstand von R_0, bzw. umgekehrt, wenn die Rückkopplung verstärkt wird. Diese Röhre wird nun in die Brückenschaltung Fig. 2 eingefügt und das Drehspulmessgerät an Stelle eines Zeigers mit einer Fahne versehen, die so lange zwischen den Spulen L_1 und L_2 verschoben wird und damit die Rückkopplung verändert, bis sich der Kompensationsstrom in der Wicklung *2* von *D* ergibt. Dieser Strom I_k wird unabhängig von der Hilfsspannung und der Röhrencharakteristik erzwungen und damit auch der I_f-proportionale Brückenstrom I_B, von dem der Regler beaufschlagt wird. Fig. 4 zeigt die praktische Ausführung eines solchen Messwertverstärkers, mit dessen Hilfe der Regler *R* nach Fig. 1 an die Fernmessung angeschlossen werden kann. Dabei wird die Schaltung so getroffen, dass der Vergleich des Sollwertes mit dem Istwert (zwei Gleichströme) vor dem Verstärker erfolgt, so dass der Verstärker gleich einen verstärkten abweichungsgleichen Strom liefert. Aus dem normalen Ortsregler ist dadurch ein Fern-Leistungsregler geworden.

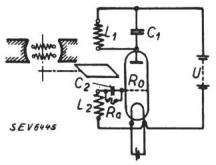


Fig. 3.
Schaltung des verlustlos regelbaren Widerstandes.
R_0 Elektronenröhre. C_1 Anodenkondensator. L_1 Anodenspule. C_2 Kondensator im Gitterkreis. L_2 Gitterspule. R_a Ableitungswiderstand.

Um einen statischen Regler zu erhalten, der einer Leistungsfrequenzkennlinie folgt, müssen die Systeme des Reglers auch dem Frequenzeinfluss unterworfen werden. Dies kann unter Anwendung eines auf die einzuhaltende Frequenz abgestimmten Resonanzkreises erfolgen. Fig. 5 (Schaltung) und Fig. 6 (Vektordiagramm) zeigen die Anordnung. Zur Frequenzmessung sind zwei dynamometrische Systeme gewählt. Die beiden Rähmchen (bewegliche Wicklungen) werden in Reihe geschaltet und über den Resonanzkreis *C—L* an Spannung gelegt. Der Strom I_1 ist bei der Sollfrequenz, also bei Resonanz in Phase mit der Spannung. Der Strom I_2 des oberen Systems setzt sich zusammen aus dem Strom I'_2, gegeben durch die Induktivität der festen Spule des Systems 1 und den Strom I''_2, gegeben durch den ohmschen Widerstand der Spule und den Widerstandswert R_1. Der Strom I_3 im unteren System ist bestimmt durch I'_3, resultierend aus dem Blindwiderstand, gegeben durch die Induktivität der

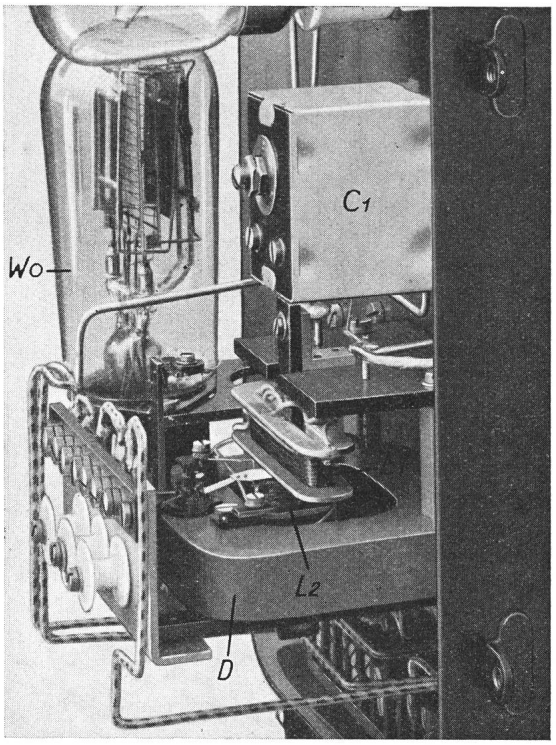


Fig. 4.
Messwertverstärker.
D Drehspulgerät. W_0 Elektronenröhre (in Fig. 2 und 3 R_0 genannt). L_1 Anodenspule. C_1 Anodenkondensator. L_2 Gitterspule.

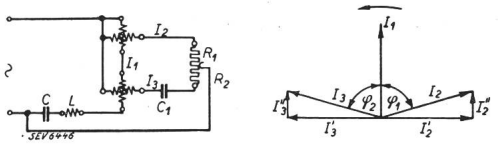


Fig. 5. Fig. 6.
Schaltung (Fig. 5) und Stromdiagramm (Fig. 6) der Frequenzmessung.

Meßspule und den Kondensator C_1 und den Strom I''_3, sich ergebend aus dem ohmschen Widerstand von Spule und R_2. Die Widerstände sind so abgeglichen, dass die Absolutwerte $I_2 = I_3$ sind und ausserdem bei Sollfrequenz $\varphi_1 = \varphi_2$ ist. Die beiden Systeme, die als Wattmeter geschaltet sind, messen daher $I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_1$, bzw. $I_1 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_2$. Da im Sollzustand

$$I_1 \cdot I_2 \cos \varphi_1 = I_1 I_3 \cos \varphi_2$$

und beide Systeme gegeneinander geschaltet sind, ergibt sich kein resultierendes Moment, das im Sinne einer Kontaktgabe wirkt. Tritt eine Abweichung ein, so ändert entsprechend deren Sinn I_1 seine Phase, da nicht mehr der Resonanzfall gegeben ist. Daher werden $I_1 I_2 \cos \varphi_1$ und $I_1 I_3 \cos \varphi_2$ ungleich, so dass ein resultierendes Drehmoment zur Kontaktgabe führt. Durch Veränderung von R_1 und R_2 durch Verschieben des Widerstandsabgriffs kann der Frequenzsollwert geändert werden. Die Systeme sind dann nicht mehr in Resonanz, sondern bei entsprechender Abweichung im Gleichgewicht.

Diese angegebene Lösung ist anwendbar, wenn es sich um reine Frequenzregelung in Verbindung mit einer Richtvektorsteuerung (Uhrzeitkontrolle) handelt. Für die statische Regelung ist diese jedoch nicht mehr brauchbar, da es sich hier oftmals um Statiken von geringen Bruchteilen eines Prozentes handeln kann, wenn man die oft relativ sehr kleine Uebergabeleistung entsprechend der Netzkennlinie statisieren will. Die Genauigkeit ist nicht mehr ausreichend; es muss daher auch hier zur Verstärkung gegriffen werden. Auch dafür kann man den Messwertverstärker in abgeänderter Form verwenden.

Der Messwertverstärker stellt, wie erläutert wurde, einen Gleichstromkompensator unter Zuhilfenahme einer Röhrenschaltung dar. Man kann nun diesen Kompensator so ausbilden, dass daraus ein Drehmomentkompensator wird. Ordnet man ausser dem Drehspul-Kompensationssystem 2 dynamometrische Systeme an und wird durch diese in gleicher Weise wie in Fig. 5 die Frequenz gemessen, so ergibt dieses Verstärkergerät einen der Frequenzabweichung proportionalen Gleichstrom. Aus dem Messwertverstärker wird daher ein Messwertumformer, mit dem übrigens jede beliebige messbare Grösse in einen proportionalen Gleichstrom umgewandelt werden kann. Die Grösse des proportionalen Gleichstroms ist dabei nach wie vor gegeben durch das Verhältnis $\frac{R_2}{R_1}$ (Fig. 2). Auf diese Weise kann man auch einen Ortsleistungswert, um ihn bei Bedarf besser in die Regelung einfügen zu können, in einen Gleichstrom verwandeln.

Dem Leistungsregler nach Fig. 1 wird die Leistung direkt oder über den Messwertverstärker im Anschluss an die Fernmessung zugeführt. Die Einführung des Frequenzeinflusses geschieht über den einen Messwertumformer, der durch eine einfache Zusatzschaltung auch noch eine tote Zone erhalten kann, so dass der Frequenzeinfluss innerhalb eines einstellbaren Frequenzbandes Null bleibt. Es können daher folgende in Fig. 7 dargestellte Kennlinien gefahren werden. Das Diagramm *a* stellt eine reine astatische Leistungsregelung dar, *b* eine reine astatische Frequenzregulierung, *c* ist eine statische Regelung mit stetiger Statik und *d* eine statische Regelung mit geknickter Statik. Mit Hilfe von Umschaltern ist es leicht möglich, von der einen auf die andere Regelart überzugehen. Durch Drehwiderstände kann der Sollwert von Leistung und Frequenz stetig eingestellt und die Neigung der Statik, sowie wenn nötig, die tote Zone bei geknickter Statik in beliebigen Grenzen geändert werden, so dass dadurch ein Universalregler zur Beherrschung der im Verbundbetrieb der Netze auftretenden Regelaufgaben gewonnen ist. Dabei ist es jederzeit möglich, eine Uhrzeitkorrektur einzuführen.

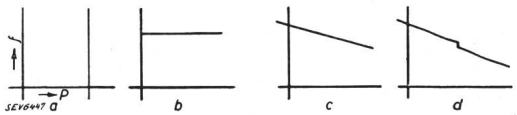


Fig. 7.
a Astatische Leistungsregelung.
b Astatische Frequenzregelung.
c Statische Regelung.
d Regelung mit geknickter Statik.

Bei Zusammenschluss mehrerer Netze kann nun die Einregelung von Frequenz und Uebergabeleistung so erfolgen, dass ein Netz die Frequenzregelung und die anderen die Leistungsregelung übernehmen. Dies führt jedoch zu Pendelungen, da sich Leistungs- und Frequenzregelung teilweise entgegenwirken. Dies tritt dann ein, wenn die Aenderung der Uebergabeleistung nicht auf eine Laständerung im leistungshaltenden, sondern im frequenzhaltenden Netz zurückzuführen ist oder umgekehrt. Besonders unklar werden die Verhältnisse, wenn viele Netze sich im Verbundbetrieb befinden. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, in jedem der zusammengeschlossenen Netze einen Frequenzleistungsregler nach Fig. 7 c aufzustellen und der Kennlinie Uebergabeleistung abhängig von der Frequenz eine Neigung zu geben, die der Neigung der Netzstatik entspricht. Die Neigung der Kennlinie ist bestimmt durch den Ausdruck

$$\frac{\Delta f \cdot P}{\Sigma P_t}$$

wobei Δf den Frequenzabfall zwischen Leerlauf und Vollast entsprechend der Netzstatik bedeutet. P ist die einzuhaltende Uebergabeleistung und ΣP_t die gesamte in Betrieb befindliche Maschinenleistung des betreffenden Netzes. Arbeiten nun in allen Netzen Regler nach diesen Kennlinien, so greift bei irgendeiner Laständerung an einer beliebigen Stelle des Netzverbandes nur der Regler ein, in dessen Gebiet diese Lastverschiebung aufgetreten ist und stellt dadurch den Sollzustand wieder her [2]). Dies soll noch an einem ganz einfachen Beispiel erläutert werden. Fig. 8 stellt zwei Netze $A - B$ mit einer Maschinenleistung von z. B. je 100 MW dar. Das Netz A soll ausser Belieferung seiner

[2]) H. Graner, Vorschläge für den Betrieb von Netzverbänden, ETZ, 1. Nov. 1934.

eigenen Abnehmer auch noch 10 MW Leistung ans Netz *B* abgeben. Die Netzstatik sei 4 %, entsprechend einem Frequenzabfall von 2 Per./s zwischen Leerlauf und Vollast. Die Regler-Kennlinien beider Netze müssen daher eine Neigung

$$\frac{2 \cdot 10}{100} = 0{,}2 \text{ Per./s}$$

aufweisen, d. h. bei einem Frequenzanstieg von 0,2 muss die Uebergabeleistung Null sein oder bei einem Frequenzabfall von 0,2 Per./s doppelt so gross sein, damit der Regler in *A* sich im Gleichgewicht befindet, bzw. umgekehrt im Netz B, da es sich dort nicht um eine abgegebene, sondern um eine bezogene Leistung handelt.

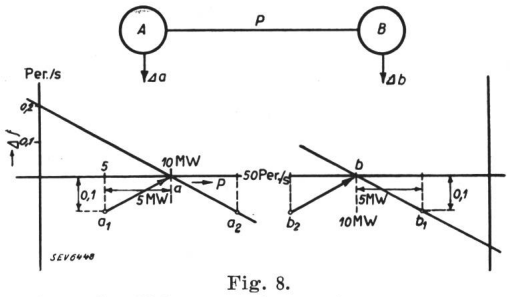


Fig. 8.
Regelung der Uebergabeleistung im Verbundbetrieb zweier Netze.
P Uebergabeleistung. *Δa* Laständerung im Netzsystem *A*. *Δb* Laständerung im Netzsystem B. *ΔP* Leistungsabweichung. *Δf* Frequenzabweichung.

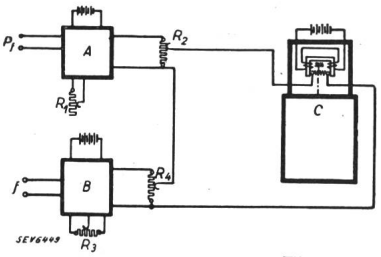
Tritt z. B. im Netz *A* eine Zusatzbelastung von $\Delta a = 10$ MW ein, so beteiligen sich die beiden Netze hälftig daran. Das hat einmal zur Folge, dass die Frequenz um $\frac{5 \cdot 2}{100} = 0{,}1$ Per./s sinkt; ausserdem geht die Austauschleistung um 5 MW zurück. Der neue Betriebspunkt ist beim Regler in *A* von *a* nach a_1 und in *B* von *b* nach b_1 gewandert. Während im Netz *B* der Punkt b_1 auf der Kennlinie liegt und daher trotz der Aenderung der Regler im Gleichgewicht bleibt, liegt a_1 ausserhalb der Kennlinie, so dass nur der Regler in *A*, wo ja die Laständerung eingetreten ist, eingreift und den Sollzustand Uebergabeleistung 10 MW und Frequenz 50 Per./s wieder herstellt. Tritt hingegen in *B* eine Mehrlast $\Delta b = 10$ MW auf, so beteiligen sich wiederum beide Netze mit je 5 MW; die Frequenz sinkt um 0,1 Per./s, die Uebergabeleistung steigt auf 15 MW. Dabei ergeben sich die Reglerbezugspunkte a_2 und b_2. Da nun aber a_2 auf der Kennlinie liegt, kommt nicht der Regler in *A*, sondern der in *B* entsprechend Δb zum Eingreifen. Aus diesem einfachen Beispiel geht hervor, dass nur der Regler desjenigen Gebietes eingreift, das die Ursache der Störung des Sollzustandes bringt. Wichtig ist nur, dass der Regler an die Netzstatik seines Netzes angepasst wird.

Einen Regler, der nach Fig. 7d arbeitet, wird man dann in Ansatz bringen, wenn zum Beispiel entsprechend Fig. 8 in *B* kein Regler vorhanden ist, sondern nur von Hand dort für Frequenzhaltung gesorgt wird und dem Regler in *A* die Einhaltung der Uebergabeleistung zur Aufgabe gemacht wird. Innerhalb der toten Zone arbeitet der Regler nur als reiner astatischer Leistungsregler; sobald jedoch grössere Frequenzabweichungen auftreten, wirkt er im Sinne der Frequenzhaltung nach der wirksam werdenden Frequenzleistungskennlinie.

Wie der astatische Frequenzregler entsprechend Fig. 7 b kann auch der statische Leistungsregler nach Diagramm 7 c mit einer Uhrzeitkontrolle in Verbindung gebracht werden. Die Regler können so ausgestattet werden, dass, wenn in einem Netz die Uhrzeitkontrolle wirksam wird und die Kennlinie sich etwas verschiebt, um den Zeitfehler zum Verschwinden zu bringen, die übrigen Regler sich diesem Zustand angleichen, so dass die Austauschleistungen erhalten bleiben.

Mit Hilfe der Messwertumformer, bzw. Messwertverstärker, ist es auch möglich, an Stelle auf den vorhin in Fig. 1 gezeigten elektrischen Zusatzregler auf ein hydraulisches Regelelement zu wirken, das unter Umgehung des Drehzahlverstellmotors direkt in die Turbinenregelung eingreift. Dieser hydraulische Regler muss dann lediglich mit einer Gleichstromsteuerspule versehen werden, auf die nun über die Messwertumformer beliebig viele Einflussgrössen geleitet werden können. Diese Art der hydraulischen Regelung hat den Vorteil, dass sie sehr schnell wirkt. Bei Frequenzregelung tritt eine besondere Beschleunigung noch dadurch auf, dass der Messwertumformer eine ausserordentlich hohe Empfindlichkeit besitzt, so dass er bei einer Störung des Gleichgewichts früher in den Regelvorgang eingreift, als dies durch die mechanischen Regler geschieht. Bei Anordnung solcher hydraulischer, elektrisch beeinflusster Regler wird der mechanische Regler zum Sicherheitsorgan, das bei einem Versagen der elektrischen Einrichtungen eingreift und die Maschine vor unzulässigen Drehzahländerungen bewahrt.

Fig. 9 zeigt das prinzipielle Schema eines derartigen Reglers. *A* ist der Messwertverstärker zum



A Fernleistungseinfluss. *B* Frequenzeinfluss. *C* Hydraulischer Zusatzregler. R_1 Sollwerteinstellung der Leistung. R_2 Einstellung des Leistungseinflusses. R_3 Sollwerteinstellung der Frequenz. R_4 Einstellung des Frequenzeinflusses. P_f Fernmessung der Leistung. *f* Frequenzmessung.

Fig. 9.
Kombinierter Fernleistungs-Frequenzregler unter Anwendung eines hydraulischen Zusatzreglers.

Anschluss an die Fernmessung. Mit R_1 wird der Sollwert der Austauschleistung eingestellt, während der Einfluss der Leistungsgrösse durch den Widerstand R_2 regelbar ist. *B* ist der Messwertumformer für den Frequenzeinfluss, der durch den Widerstand R_4 einstellbar ist. Der Frequenzsollwerteinstellung dient der Widerstand R_3. Die Neigung der Kennlinie kann daher mit R_2 und R_4 in beliebigen Grenzen verändert werden. Der hydraulische Regler *C*, der für praktisch beliebige Verstellkräfte eingerichtet werden kann, ist mit einer hydraulischen

Rückführeinrichtung zur Vermeidung von Pendelungen versehen. Sehr wichtig ist diese Regelart, wenn sehr grosse und rasch folgende Laständerungen ausgeregelt werden sollen, damit nicht der übrige Netzbetrieb dadurch beeinträchtigt wird.

Mit Hilfe der über die Messwertumformer gewonnenen Gleichströme, bzw. Gleichspannungen, kann auch das Gitter eines Gleichrichters beeinflusst werden, so dass über diesen gittergesteuerten Gleichrichter die Drehzahlverstellmotoren ohne Zwischenschaltung von irgendwelchen Kontakten beeinflusst werden. Die Drehzahlverstellmotoren erhalten dann eine abweichungsproportionale Spannung und laufen daher mit abweichungsabhängiger Drehzahl, was eine sehr gute Einregelung des Sollzustandes zur Folge hat. Allerdings stellt dies keine Schnell-Regelung, sondern eine träge Regelung dar.

Vielfach müssen durch den Regler mehrere Maschinen parallel beeinflusst werden, um die Frequenzhaltung, bzw. die Einhaltung einer gewissen Austauschleistung, übernehmen zu können. Mit dem Regler muss daher eine Einrichtung verbunden werden, die dafür sorgt, dass sich die Maschinen gleichmässig belasten. Dies kann bei der Regelung über den Drehzahlverstellmotor dadurch geschehen, dass über Leistungs-Differential-Relais die Maschinenleistung mit der gesamten geregelten Leistung verglichen wird, und bei grösseren Abweichungen von der gewünschten anteilmässigen Leistung Regelbefehle z. B. im Sinne Höher bevorzugt der Maschine zugeleitet werden, die relativ zu geringe Leistung aufweist, und die Maschinen übergangen werden, die bereits schon zu viel belastet sind, oder umgekehrt im Falle von Tiefer-Befehlen. Bei dieser Anteilregelung beteiligen sich sämtliche Maschinen dann anteilig ihrer Leistung an dem Regelvorgang.

Eine zweite Möglichkeit der Lastverteilung besteht darin, dass man die Leistung nicht gleichmässig aufteilt, sondern die Aufteilung nach anderen Gesichtspunkten, z. B. nach bestem Wirkungsgrad durchführt. Der beste Wirkungsgrad wird dann erzielt, wenn *die* Maschine vorzugsweise belastet wird, die die höchste relative Verlustabnahme zeigt, bzw. *die* Maschine zuerst entlastet wird, die dadurch die geringste Verlustabnahme erfährt. Die Leistung muss daher so aufgeteilt werden, dass das $\frac{dQ}{dV}$ (die Verluständerung) bei allen Maschinen dasselbe ist; V bedeutet die Verluste, Q die Maschinenleistung. Mit dem Füllungsanzeiger der Maschinen müssen daher über Verlustkurven-Scheiben Widerstände gekuppelt werden, die in die Lastverteilungsschaltung entsprechend obigem Gesetz eingefügt werden.

Besonders wichtig wird diese Wirkungsgradregelung, wenn es sich um Maschinensätze ganz verschiedener Wirkungsgradcharakteristik handelt. Dies trifft insbesondere bei Wasserkraftwerken zu, die mit Francis- und Kaplanturbinen ausgestattet sind. Die Fig. 10 und 11 zeigen die Wirkungsgrad- und Verlustkurven einer Francis- und einer Kaplanturbine. Fig. 12 stellt die Verluste schlechter Lastverteilung den Verlusten bei günstiger Lastverteilung, wie sie nur durch selbsttätige Steuerung erreicht werden können, gegenüber. Man ersieht daraus, dass der Betriebswirkungsgrad wesentlich gehoben werden kann, wenn man bei Anordnung von Reglern zur Frequenz- und Leistungshaltung auch für zweckmässigste Lastverteilung sorgt.

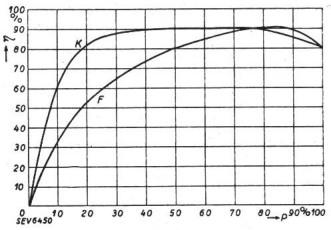


Fig. 10.
Wirkungsgradkurven einer Kaplan (K)- und einer Francis (F)-Turbine.
P abgegebene Leistung.

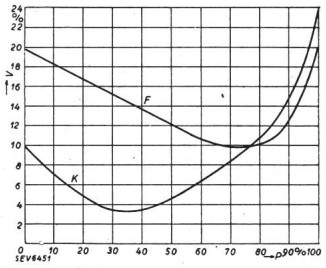


Fig. 11.
Verlustkurven einer Kaplan (K)- und einer Francis (F)-Turbine.
P Belastung.

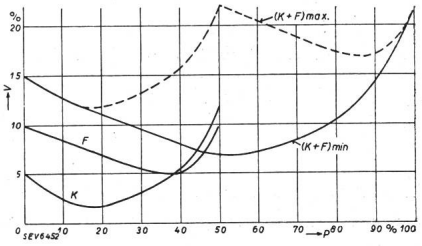


Fig. 12.
Maximale und minimale Verluste (V) bei parallel fahrenden Turbinen.
P Belastung. $(K+F)_{min}$ minimale Verluste einer Kaplan- und Francis-Turbine zusammen.

Der **Vorsitzende** spricht Herrn Wierer seinen besten Dank aus. Es war für uns sehr wertvoll, von anderer Seite über ähnliche Lösungen dieser Aufgabe zu hören.