

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 32 (1941)
Heft: 14

Artikel: Der neue elektrische Drehzahlregler Oerlikon-Escher Wyss
Autor: Hirt, Max / Gantenbein, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060023>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

Der neue elektrische Drehzahlregler Oerlikon-Escher Wyss.

Von Max Hirt und A. Gantenbein, Zürich.

621.316.718.5

Es wird die Entwicklung und Ausführung eines neuen elektrischen Drehzahlreglers mit Frequenzmeßsystem für höchste Stabilität bei grösster Reguliergeschwindigkeit beschrieben und dem bisher üblichen mechanischen Fliehkraftregler gegenübergestellt. Tachogramme von umfangreichen Betriebsversuchen an Wasserturbinen mit schwierigen Regulierverhältnissen beweisen die vorzüglichen Reguliereigenschaften des neuen elektrischen Frequenzreglers.

Les auteurs décrivent le développement et la réalisation d'un nouveau régulateur électrique de vitesse avec système de mesure de la fréquence pour très grande stabilité à vitesse de réglage très élevée et comparent cet appareil avec le régulateur mécanique ordinaire à force centrifuge. Les tachygrammes relevés aux cours de nombreux essais d'exploitation avec des turbines hydrauliques présentant des conditions difficiles de réglage prouvent les excellentes qualités du nouveau régulateur électrique de fréquence.

1. Entwicklung.

Der Vorschlag, an Stelle des mechanischen Fliehkraftreglers einen elektrischen Frequenzregler vorzusehen, ist nach der amerikanischen Patentliteratur bereits ca. 40 Jahre alt. Es zeigte sich auch hier die so oft gemachte Beobachtung, dass bestimmte Ideen im betreffenden Zeitpunkt keinem Bedürfnis entsprechen oder infolge technischer Ausführungsschwierigkeiten wieder in Vergessenheit geraten. Jahrzehnte später werden sie wieder neu «erfunden» und können bei inzwischen veränderten Verhältnissen grundlegende Bedeutung in der Praxis erlangen. Ein typisches Beispiel auf elektrischem Gebiet ist der elektrische Frequenzregler.

Der im Laufe der Zeit normalisierte Fliehkraftregler hatte sich derart gut bewährt, dass vorläufig kein Grund für eine Neukonstruktion vorlag. Erst mit den neuern und grössern Wasserturbinen, bei denen die mechanische Uebertragung der Drehzahl von der Turbine auf das Pendel des Fliehkraftreglers schwieriger wurde, machte sich das Bedürfnis geltend, diese auszuschalten. Der erste Schritt in dieser Richtung war der Antrieb des Pendels durch einen Motor, der von einem kleinen, mit der Turbine gekuppelten «Pendelgenerator», oder direkt vom Hauptgenerator aus gespeist wurde. Dadurch konnte der Antriebs-Mechanismus vermieden werden. Erfolgte nun die Uebertragung der Drehzahl schon unter Zuhilfenahme von elektrischen Grössen, so war es naheliegend, die Drehzahl, bzw. Frequenz, direkt mit einem elektrischen Meßsystem zu messen.

Die Maschinenfabrik Oerlikon und die Escher Wyss, Maschinenfabriken A.-G., haben in gemeinsamer Arbeit einen elektrischen Drehzahlregler für Primärmaschinen gebaut und im praktischen Betrieb mit Wasserturbinen gründlich ausprobiert. Die ersten Vorversuche gehen bereits auf das Jahr 1937 zurück und galten der Abklärung der durch die Einführung des Frequenzmeßsystems aufgeworfenen Regulierprobleme.

An der Schweizerischen Landesausstellung 1939 in Zürich stellte Escher Wyss je einen neuen mechanischen und elektrischen Drehzahlregler (Fig. 1) betriebsmässig zur Schau.

Es sei vorweggenommen, dass die verständnisvolle Zusammenarbeit von Elektriker und Maschinenbauer, bei der jeder unvoreingenommen an das neue Problem des andern herantritt, befruchtend auf beide Teile wirkte.

Die gründliche Erprobung im praktischen Betrieb erfolgte in umfangreichen Versuchen an Pel-

ton-, Francis- und Kaplan-Turbinen mit anerkannt schwierigen Regulierverhältnissen. Nicht weniger als 4 Kraftwerke stellten uns ihre Anlagen in verdankenswerter Weise zu Verfügung, und die Be-

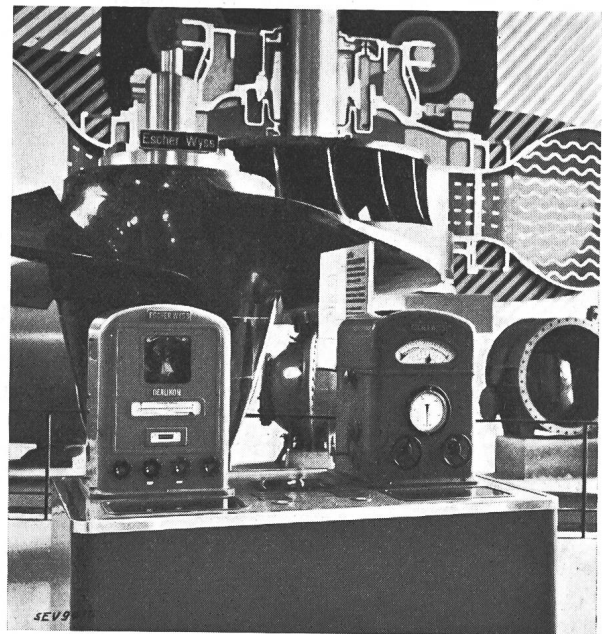


Fig. 1.
Drehzahlregler

an der Schweiz. Landesausstellung 1939 in Zürich; links der elektrische, rechts der mechanische Drehzahlregler.

triebsleute opferten diesen Versuchen manchen schönen Sonntag. Wir möchten hier den Elektrizitätswerken EKZ, EW Bern, NOK und EW Murg, sowie dem Personal der Kraftwerke Dietikon, Felsenau, Eglisau und Murg herzlich danken für ihre Mithilfe, die ihren Teil zum guten Enderfolg beigetragen hat.

Nachstehend soll nun die prinzipielle Funktion dieses elektrischen Frequenzreglers beschrieben werden.

2. Allgemeines.

Ein zweckmässiges Reguliersystem hat besonders die vier folgenden charakteristischen Forderungen zu erfüllen:

1. *Hohe Empfindlichkeit* für genaue Regulierung auf den Sollwert.
2. *Leichte Anpassungsfähigkeit* der Regulierung an die Eigenschaften der Maschinenanlage.
3. *Kurze Regulierzeit* vom Moment der Sollwertabweichung bis zum Ende des Reguliervorganges.
4. *Grosse Stabilität*, d. h. Vermeidung von dauernden Pendelungen.

Die 1. Forderung kann mit dem hochempfindlichen elektrischen Frequenzmeßsystem denkbar gut erfüllt werden.

Die 2. Forderung ist durch die gute Zugänglichkeit und leichte Verstellbarkeit der Steuerorgane erfüllt.

Die 3. und 4. Forderung hängen zusammen. Kurze Regulierzeit und grosse Stabilität widersprechen sich in ihren Grundbedingungen. Um die kleinen Pendelungen, die hauptsächlich in den baulichen Anlagen begründet sind, zu vermeiden, wurden in systematischen Untersuchungen zwei

neuartige Stabilisierungseinrichtungen entwickelt. Beide arbeiten mit vorübergehend verstärkter Rückführung und Dämpfung und zeichnen sich durch eine hervorragende Anpassungsfähigkeit aus. Ihre Wirkungsweise ist nach den Versuchsergebnissen gleich gut, doch ist je nach der baulichen Anordnung und den gestellten Anforderungen die eine oder andere Ausführungsart vorzuziehen.

Im Zusammenwirken der einzelnen Steuerorgane besteht bei den beiden neu entwickelten elektrischen Frequenzreglern eine weitgehende

3. Legende für die schematischen Darstellungen.

Fliehkraftpendelregler mit direkt wirkender hydraulischer Stabilisierung Fig. 2	Elektrischer Frequenzregler	
	mit elektromagnetischer Stabilisierung Fig. 3 und 4	mit elektrohydraulischer Stabilisierung Fig. 8 und 9
1 Maschinengruppe 11 Regulierorgan der Turbine 12 Abgehende Leitungen des Generators 13 Pendelantriebsmechanismus 2 Fliehkraftpendelregler 20 <i>Drehzahlmeßsystem</i> 21 Schwunggewicht des Fliehkraftpendels 22 Pendelfeder 24 Steuernocke 30 Stabilisierung 31 Einstellhebel 31a Uebertragungshebel 32 Pumpenkolben 34 Durchlassblende für die Dämpfung 35 Federteller 36 Dämpfungskolben 37 Schlitze für Oeldurchlass 38 Rückführfedern 40 Statik und Drehzahlverstellung 41 Einstellhebel für die Statik 43 Drehzahlverstellmotor 45 Handrad für Drehzahlverstellung 50 Hydraulische Steuerung 51 Vorsteuerventil 52 Steuerstift 53 Differentialkolben 54 Hauptsteuerventil 55 Hauptservomotor	1 Maschinengruppe 11 Regulierorgan der Turbine 12 Abgehende Leitungen des Generators 13 Spannungswandler 2 Elektrischer Frequenzregler 20 <i>Frequenzmeßsystem</i> 21 Statorwicklung 22 Drosselpule 23 Kondensatoren 24 Drehtrommel mit Steuerhebel 30 Stabilisierung 31 Uebersetzungsgetriebe 32 Polrad 33 Dämpfungswicklung 34 Regulierwiderstand für die Dämpfungswicklung 35 Hebel, fest auf der Welle 36 Dämpfungstrommel 37 Kontakte für Betätigung des Schützes 37a 37a Schütz für das Vorschalten eines Widerstandes zum Schwächen der Dämpfung 38 Rückführfedern 39 Rückführsektor 40 Statik und Drehzahlverstellung 41 Einstellhebel für die Statik 42 Drehkern für die Statik 43 Drehzahlverstellmotor 44 Drehkern für Drehzahlverstellung 45 Handrad für Drehzahlverstellung 50 Hydraulische Steuerung 51 Vorsteuerventil 52 Steuerhülse 53 Differentialkolben 54 Hauptsteuerventil 55 Hauptservomotor	1 Maschinengruppe 11 Regulierorgan der Turbine 12 Abgehende Leitungen des Generators 13 Spannungswandler 2 Elektrischer Frequenzregler 20 <i>Frequenzmeßsystem mit gewöhnlicher Rückführung und Dämpfung</i> 21 Statorwicklung 22 Drosselpule 23 Kondensatoren 24 Drehtrommel mit Steuerhebel 30 Stabilisierung 31 Einstellhebel 310 Uebersetzungsgetriebe 32 Pumpenkolben 34 Durchlassblende für die Dämpfung 35 Steuerkolben für den Drehkern 42 36 Steuerbüchse 360 Dämpfungsscheibe 361 Dämpfungsmagnet 37 Schlitze für Oeldurchlass 370 Rutschkupplung 38 Rückführfedern 380 Rückführfedern 390 Rückführsektor 40 Statik und Drehzahlverstellung 41 Einstellhebel für die Statik 42 Drehkern für die Statik und die verstärkte Zusatz-Rückführung 43 Drehzahlverstellmotor 44 Drehkern für Drehzahlverstellung 45 Handrad für Drehzahlverstellung 50 Hydraulische Steuerung 51 Vorsteuerventil 52 Steuerhülse 53 Differentialkolben 54 Hauptsteuerventil 55 Hauptservomotor

Uebereinstimmung mit dem mechanischen Fliehkraftpendelregler Bauart Escher Wyss. Als Gedankenbrücke für das bessere Verstehen wird daher zuerst der mechanische Regler kurz beschrieben. Teile, die sowohl bei den Frequenzreglern, als auch bei dem Pendelregler ähnliche Funktionen erfüllen, sind mit den gleichen Zahlen bezeichnet.

4. Fliehkraft-Pendelregler mit direktwirkender hydraulischer Stabilisierung (Fig. 2).

a) Aufbau.

Das Fliehkraftpendel 20 misst die Drehzahl der Turbine. Mittels Riemen und Schraubenradgetriebe 13 erhält es seinen Antrieb von der Turbinenwelle aus. Dem Schwunggewicht 21 des Fliehkraftpendels wirkt die auf die Betriebsdrehzahl

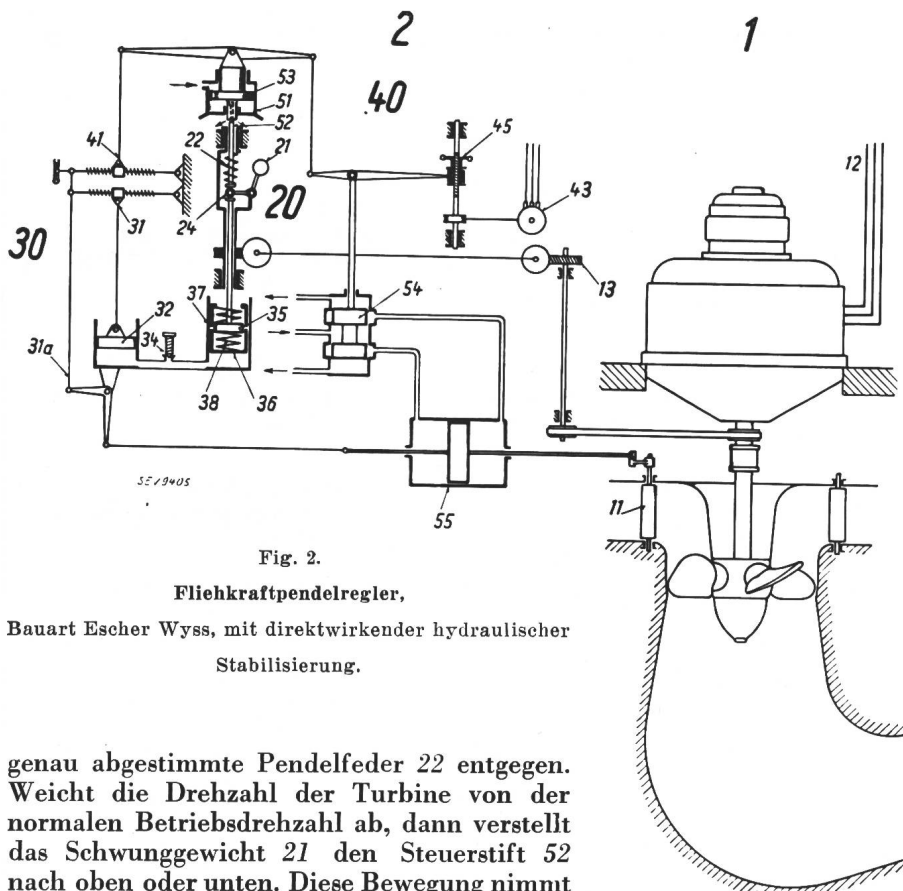


Fig. 2.

Fliehkraftpendelregler,

Bauart Escher Wyss, mit direktwirkender hydraulischer Stabilisierung.

genau abgestimmte Pendelfeder 22 entgegen. Weicht die Drehzahl der Turbine von der normalen Betriebsdrehzahl ab, dann verstellt das Schwunggewicht 21 den Steuerstift 52 nach oben oder unten. Diese Bewegung nimmt ein mit Drucköl gesteuerter Differentialkolben 53 ab und überträgt sie über ein Gestänge auf das Hauptsteuerventil 54 des Hauptservomotors 55. Dieser betätigt über Stangen, Lenker und Hebel die Leitschaukeln 11 und dosiert genau die dem Laufrad zuströmende Wassermenge entsprechend der Drehzahl.

b) Hydraulische Stabilisierung.

Der Steuerstift 52 des Fliehkraftpendels trägt über zwei Rückführfedern 38 den Dämpfungskolben 36. Der Raum unter dem Dämpfungskolben steht durch einen Kanal mit dem Zylinderraum des Pumpenkolbens 32 in Verbindung. Der Pumpen-

kolben selbst ist starr über ein Gestänge 31 und 31a an den Hauptservomotor 55 angeschlossen. Die Gestängeanordnung ist derart, dass bei einem Regulierungsvorgang der Pumpenkolben 32 sich in derselben Richtung bewegt wie der Steuerstift 52 mit dem Dämpfungskolben 36. Tritt also beispielsweise eine Drehzahlerhöhung ein, dann zieht der Steuerstift 52 den Dämpfungskolben 36 in die Höhe. Zugleich wird über den Differentialkolben 53 und das Hauptsteuerventil 54 der Hauptservomotor 55 gesteuert. Dieser zieht über den Übertragungshebel 31a und den Einstellhebel 31 den Pumpenkolben 32 ebenfalls in die Höhe. Unter diesen beiden Kolben sowie im Verbindungskanal bildet sich ein Vakuum, dem der am Steuerstift nur über Federn angeschlossene Dämpfungskolben 36 nachgeben muss. Dadurch übt die zusammengepresste obere Feder 38 eine zusätzliche Belastung in rückführendem Sinne auf den Steuerstiften aus. Diese Abwärtsbewegung des Pumpenkolbens 32 ist aber nur vorübergehend, denn die regulierbare Durchlassblende 34 lässt entsprechend ihrer Einstellung mehr oder weniger Öl durchströmen, so dass die obere Rückführfeder 38 sich langsam wieder entspannt. Der Steuerstift wird von seiner zusätzlichen Belastung befreit, und das Pendel reguliert die Turbine wieder auf die ursprüngliche Drehzahl ein.

Damit aber bei grossen Laständerungen das Fliehkraftpendel in seinen Steuerbewegungen nicht gehemmt ist durch die Rückzugbewegung des Dämpfungskolbens, ist dieser mit speziellen Öldurchlaßschlitzen 37 versehen. Sobald die Rückzugbewegung des Dämpfungskolbens gegenüber der auf der Pendelspindel sitzenden Gleitbüchse ein gewisses Mass überschreitet, wird

automatisch die Saug- und Druckwirkung des Dämpfungssystems aufgehoben.

c) Drehzahlverstellung.

An das Übertragungsgestänge vom Fliehkraftpendel zum Steuerventil greift die Drehzahlverstelleinrichtung an. Die Drehzahl der Turbine wird also nicht nur vom Pendel dirigiert, sondern kann auch von Hand beeinflusst werden durch das Handrad 45 oder elektrisch über einen Motor 43 vom Schaltstand aus. Je nach der Höhenlage des Handrades nimmt die Turbine eine höhere oder tiefere Drehzahl an, wie dies zum Parallelschalten verschiedener Gruppen und zum Verteilen der Belastung auf die einzelnen Gruppen notwendig ist.

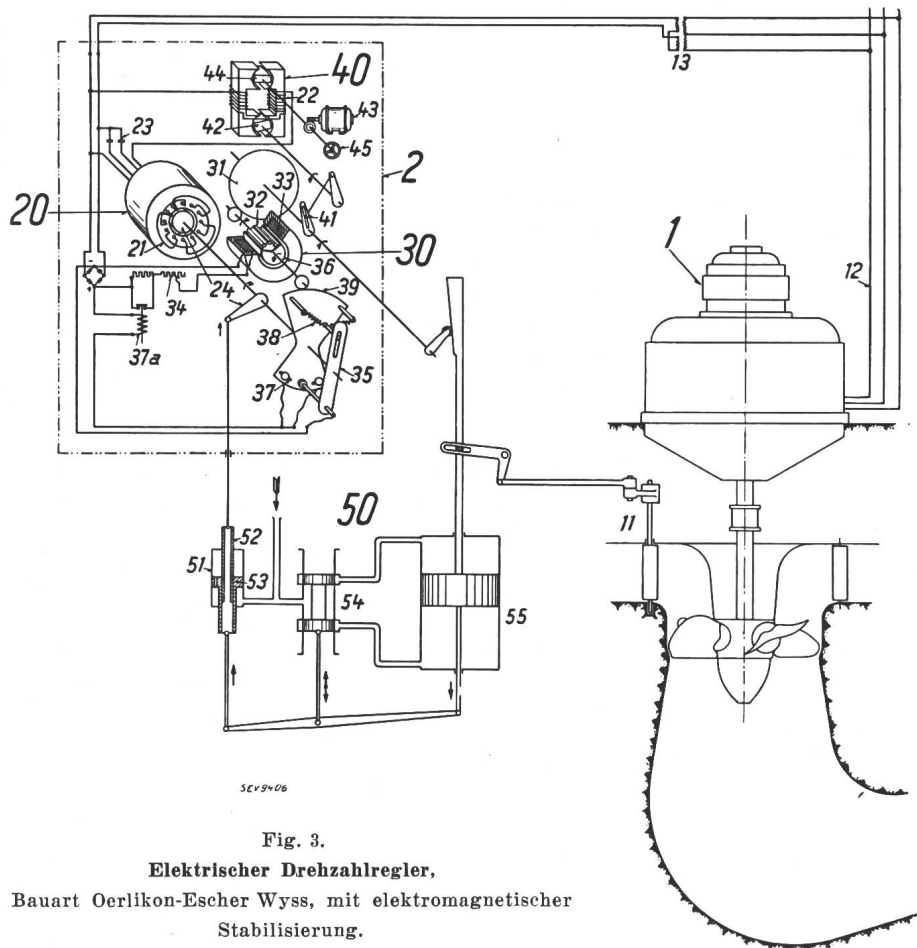
d) Statikeinstellung.

Ebenfalls vom Hauptservomotor aus wird das Statikeinstellgestänge betätigt. Es besteht aus einer Gewindespindel, die durch Drehung den Gelenkpunkt des Hebels 41 in beliebige Entfernung vom Drehpunkt bringt, und dadurch jede vom Pendel eingeleitete Steuerbewegung mehr oder weniger stark rückführt. Dank dieser Rückführung entspricht bei Parallelbetrieb auf das elektrische Netz, d. h. bei konstanter Drehzahl, jeder Stellung des Handrades 45 eine bestimmte Stellung des Servomotors 55 und damit der Turbinenöffnung.

5. Elektrischer Frequenzregler mit elektromagnetischer Stabilisierung.

a) Aufbau.

Entgegen dem Fliehkraftpendelregler wird nicht mehr die Drehzahl, sondern mit dem elektrischen



Frequenzmeßsystem.

Als Messorgan findet ein sog. «Phasensprung»-Frequenzsystem Verwendung. Die Drehtrommel 24 dieses Messorgans steht unter dem Einfluss von 2 Stromkreisen, die über den Spannungswandler 13 an die Generatorspannung 12 angeschlossen sind, deren Frequenz reguliert wird (siehe Fig. 3 und Fig. 5). Der eine dieser Stromkreise besitzt einen sehr grossen ohmschen Widerstand, so dass eine Frequenzabweichung vom Sollwert auf die Grösse und Phasenlage dieses Stromes einen vernachlässigbar kleinen Einfluss hat, d. h. beide Grössen bleiben praktisch konstant. Der zweite Stromkreis ist als Resonanzkreis mit kleinem ohmschen Widerstand ausgebildet. Bei der geringsten Abweichung von der Resonanz, d. h. von der Sollfrequenz entsteht sofort eine rasche Aenderung des Stromes und der Phasenlage. Infolge dieser Differenz in der Phasenlage der beiden Ströme wird dann auf die Drehtrommel 24 ein Drehmoment ausgeübt. Je nachdem dieser Phasenwinkel im positiven oder negativen Sinne zu zählen ist, wird auch ein Drehmoment im einen oder andern Drehsinn erzeugt. Die Grösse des erzeugten Drehmomentes ist anfänglich direkt proportional der Frequenzabweichung. Fig. 6 zeigt zum bessern Verständnis den Verlauf der Ströme, Phasenwinkel und des erzeugten Drehmomentes in Funktion der Frequenz.

Mit der variablen Induktivität 22 kann die Resonanzfrequenz und damit die einzuhaltende Sollfrequenz verändert werden.

Anschluss des Frequenzmeßsystems.

Er kann direkt an die Generatorspannung der zu regulierenden Maschinen-Gruppe oder an einen speziellen, vom Erregungszustand des Generators unabhängigen Frequenz-Generator erfolgen. Da das Mess-

system einphasig gewickelt ist, bestünde bei normalem einphasigen Anschluss die Gefahr, dass bei einem Kurzschluss zwischen den beiden angeschlossenen Phasen das Frequenzmeßsystem 20 keine Spannung erhielte. Dieser Nachteil wurde jedoch auf einfachste Art dadurch behoben, dass das Meßsystem in offener V-Schaltung gemäss Fig. 5 angeschlossen wird. Die Spannung am Frequenz-Meßsystem kann auf diese Weise nur dann Null werden, wenn ein allpoliger Kurzschluss un-

system einphasig gewickelt ist, bestünde bei normalem einphasigen Anschluss die Gefahr, dass bei einem Kurzschluss zwischen den beiden angeschlossenen Phasen das Frequenzmeßsystem 20 keine Spannung erhielte. Dieser Nachteil wurde jedoch auf einfachste Art dadurch behoben, dass das Meßsystem in offener V-Schaltung gemäss Fig. 5 angeschlossen wird. Die Spannung am Frequenz-Meßsystem kann auf diese Weise nur dann Null werden, wenn ein allpoliger Kurzschluss un-

mittelbar am Generator entsteht. Bei allen andern Störungen ist immer eine gewisse Spannung am Meßsystem vorhanden. Selbst wenn diese Spannung auf recht tiefe Werte sinkt, ist der Regler immer noch imstande, richtig zu arbeiten. Fig. 7 zeigt

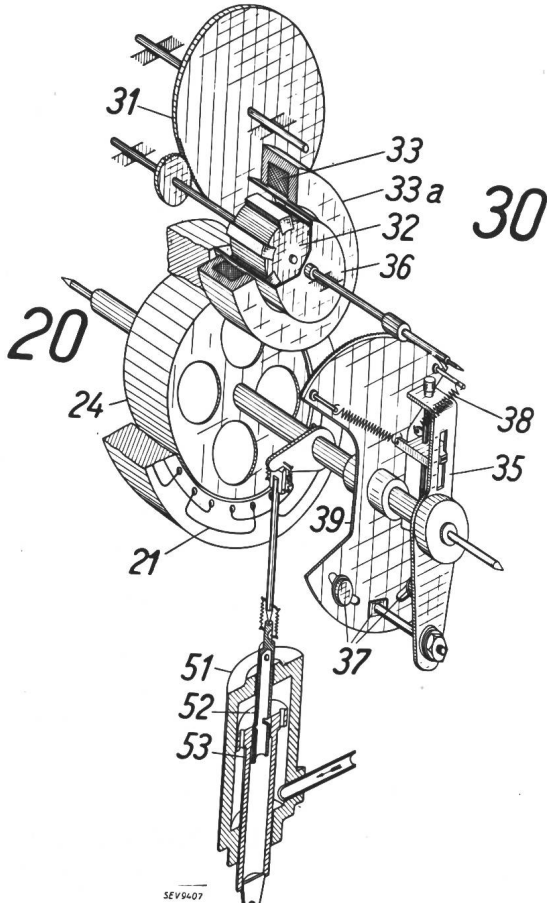


Fig. 4.

Frequenzsteuersystem mit elektromagnetischer Stabilisierung.

die erzielte Ansprechempfindlichkeit in Abhängigkeit von der Spannung. Bei 20 % der Nennspannung wird immer noch auf eine Empfindlichkeit von ca. ± 0,8 % reguliert. Bleibt die Spannung aus irgendeinem Grunde aus, so schliesst die Turbine automatisch durch eine kleine Zusatzkraft

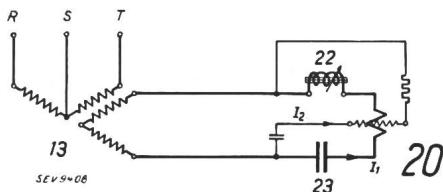


Fig. 5.

Frequenzmeßsystem.

Anschluss und Schaltung.

auf die Drehtrommel bis zur Leerlaufdrehzahl. Der Energieverbrauch des Meßsystems beträgt nur ca. 70 VA. Im Vergleich zu diesem kleinen VA-Verbrauch stellt das verfügbare Drehmoment ein Maximum an Ausnutzung dar.

b) Elektromagnetische Stabilisierung.

Wie bereits erwähnt, wurden für die Stabilisierungseinrichtung des elektrischen Frequenzreglers zwei verschiedene Lösungen entwickelt. Sie wirken prinzipiell gleich, doch sind die hierfür ver-

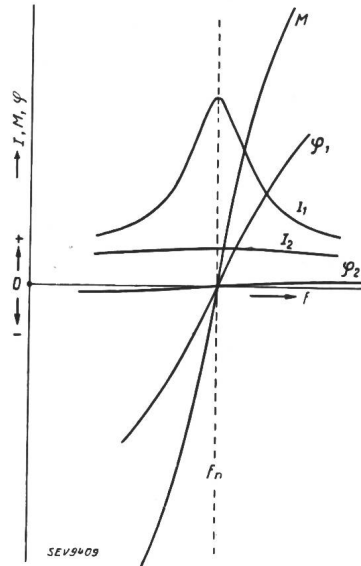


Fig. 6.

Frequenzmeßsystem. Ströme (I_1 und I_2), Phasenwinkel (φ_1 u. φ_2) und Drehmoment (M) in Funktion der Frequenz (f). f_n = Sollfrequenz.

wendeten Mittel ganz verschieden. Wir unterscheiden deshalb zwischen elektromagnetischer und elektrohydraulischer Stabilisierung.

Die Wirkungsweise der elektromagnetischen Stabilisierung geht aus Fig. 3 und 4 hervor.

Die Bewegung der Drehtrommel 24 des elektrischen Frequenzmeßsystems 20 wird über einen Hebel auf die Steuerhülse 52 des Vorsteuerventils 51 übertragen. Dessen Differentialkolben 53 betätigt das Hauptsteuerventil 54 zum Hauptservomotor 55, der das Regulierorgan 11 der Turbine betätigt. Vom Hauptservomotor aus erfolgt nun eine Rückführung auf die Stabilisierungseinrichtung 30. Sie besteht im wesentlichen aus einer Dämpfungstrommel 36, die über die Rückführfedern 38 vom Messorgan aus angetrieben wird. Durch die von Gleichstrom durchflossene Dämp-

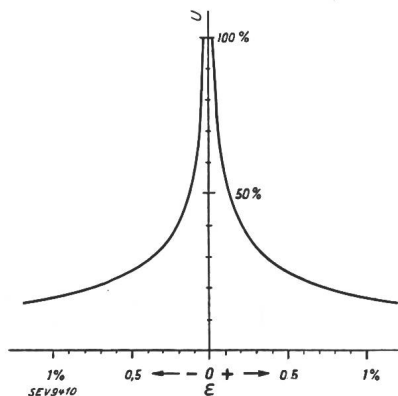


Fig. 7.

Frequenzmeßsystem. Ansprechempfindlichkeit (ϵ) in Funktion d. Spannung (U).

fungswicklung 33 entsteht bei einer Drehung der Trommel eine Dämpfungskraft nach der bekannten Wirkung der elektromagnetischen Wirbelstrombremse. Der magnetische Fluss fließt durch den die Wicklung aussen umgebenden Eisenring 33a

und durchsetzt die ebenfalls eisernen Polschuhe des Polrades 32. Die Wirbelströme entstehen erst im Moment der Bewegung der Trommel und wachsen mit steigender Drehzahl derselben. Im gleichen Masse wächst auch die Dämpfungskraft. Nun wird über das Uebersetzungsgetriebe 31 das Polrad vom Hauptervomotor aus entgegen der vom Frequenzmeßsystem eingeleiteten Bewegung der Trommel 36 in Rotation versetzt. An Stelle der «Kraftlinienschnidung» durch die Drehung der Trommel entsteht nun ein «Schneiden» der Kraftlinien durch Zurückdrehen des Kraftlinienfeldes. Das Polrad vermag die Trommel je nach Geschwindigkeit verschieden stark zurückzudrehen und vergrößert damit vorübergehend durch stärkeres Spannen der Rückführfedern 38 die Rückführkraft des Frequenzmeßsystemes. Mittels der eingetragenen Pfeile in Fig. 3 läßt sich die Wirkungsweise dieser Stabilisierungseinrichtung bei einem Reguliervorgang leicht verfolgen. Es ist auch ohne weiteres einleuchtend, dass mit dieser Anordnung eine sehr stabile Regulierung erzielt wird.

Diese verstärkte vorübergehende Rückführung mit grosser Dämpfung würde nun selbstverständlich bei grösseren Drehzahländerungen, die bei Lastabschaltungen entstehen, einer raschen Ausregulierung hinderlich sein. Die verstärkte Rückführung und Dämpfung soll deshalb nur für kleine Regulierbewegungen wirken. Für grosse Aenderungen soll sie dagegen unwirksam werden, damit die Regulierzeit möglichst klein wird. Dies wird nun in vorliegender Ausführung dadurch erreicht, dass bei einem grossen Ausschlag des Frequenzmeßsystemes die Dämpfung und damit die Rückführkraft geschwächt wird. Bei Ueberschreiten einer einstellbaren Winkelabweichung zwischen Frequenzmeßsystem und Rückführsektor 39 betätigen die Kontakte 37 ein Steuerschütz 37a, das durch Vorschalten eines Widerstandes den Strom in der Dämpfungswicklung stark verringert. Auf diese Weise wird die starke Rückführung und Dämpfung vorübergehend aufgehoben, bis das Meßsystem wieder in die Nähe der neuen Mittellage kommt, und die Rückführung sofort automatisch wieder einschaltet. Durch diese Einrichtung wird also einerseits ein sehr stabiler Lauf und andererseits eine äusserst rasche Regulierung bei grossen Laständerungen erreicht.

Eine ähnliche Wirkung lässt sich auch ohne Schwächung des Dämpfungsstromes erzielen, wenn eine Rutschkupplung zwischen der Dämpfungstrommel 36 und dem Rückführsektor 39 eingebaut wird. Uebersteigt dann das Rückführdrehmoment einen bestimmten Wert, so beginnt die Rutschkupplung zu rutschen und lässt damit ebenfalls eine grössere Ueberregulierung zu.

Die Speisung der Dämpfungswicklung und des Frequenzmeßsystemes von der gleichen Stromquelle aus ergibt den weitem Vorteil, dass bei Spannungsrückgängen infolge Kurzschlüssen im Netz auch die Dämpfung und Rückführung sich automatisch entsprechend verkleinert. Sollte aus irgendeinem Grunde die Spannung am Meßsystem ganz ausblei-

ben, so wird durch eine kleine Zusatzkraft der Regler selbsttätig in die Leerlaufstellung der Turbine gebracht, so dass ein Durchbrennen auch dann nicht befürchtet werden muss.

c) Drehzahlverstellung.

Entgegen dem Fliehkraftregler wirkt die Drehzahlverstellrichtung nicht auf das Steuergerüst ein, sondern auf die Drosselspule 22. Durch Verstellen des Regulierdrehkerns von Hand oder mittels des Drehzahlverstellmotors 43 — der vom Kommandopult aus ferngesteuert wird — kann die Sollfrequenz in der gewünschten Art verändert werden.

d) Statikeinstellung.

Wie beim Fliehkraftpendelregler erwähnt, verlangt der Parallelbetrieb mehrerer Maschinengruppen eine statische Arbeitscharakteristik. Dies wird beim elektrischen Frequenzregler, der von Haus aus astatisch ist, durch Verändern der Resonanzfrequenz des Meßsystemes erreicht, indem der einzuhaltende Sollwert in Abhängigkeit der Stellung des Hauptervomotors verändert wird. Die Drosselspule 22 hat zu diesem Zweck einen zweiten Drehkern, der vom Hauptervomotor aus gesteuert wird. Mit dem Hebel 41 ist die Statik beliebig zwischen 0 und 6% einstellbar.

6. Elektrischer Frequenzregler mit elektrohydraulischer Stabilisierung.

a) Aufbau.

Der Aufbau des Frequenzmeßsystemes mit der gesamten Oeldrucksteuerung bleibt derselbe wie beim elektrischen Frequenzregler mit elektromagnetischer Stabilisierung, siehe Abschnitt 5a.

b) Elektro-hydraulische Stabilisierung.

Wie bereits der Name sagt, erfolgt hier die Stabilisierung auf hydraulischem und elektrischem Wege. Gegenüber dem mechanischen Fliehkraftregler oder gegenüber dem bereits beschriebenen Frequenzregler mit elektromagnetischer Stabilisierung ist bei diesem Regler die Stabilisierungseinrichtung in zwei voneinander getrennte Rückführungen und Dämpfungen aufgelöst und zwar:

Normale Rückführung und Dämpfung (Bezeichnungen mit dreistelligen Zahlen),
vorübergehende stark wirkende Zusatz-Rückführung und -Dämpfung (Bezeichnungen mit zweistelligen Zahlen).

Die normale Rückführung besteht, wie aus Fig. 8 hervorgeht, aus der vom elektrischen Reglerbau her bekannten magnetischen Wirbelstromdämpfung 360 und 361 mit Federrückführung 380. An Stelle der vorher nötigen Dämpfungswicklung tritt hier ein permanenter Magnet 361. Die Rückführung und Dämpfung wird in ihrer Wirkung so eingestellt, dass bei grossen Pendelungen die Schwingungsamplituden abnehmen.

Die vorübergehende, stark wirkende Zusatz-Rückführung und -Dämpfung dient nun dazu, die

Pendelungen mit den kleinen Amplituden zu beheben. Die vom Servomotor 55 eingeleitete Rückführbewegung wird zuerst hydraulisch verstärkt und dann über die Drosselspule 22 direkt auf die Wicklung 21 des Meßsystems 20 elektrisch übertra-

Federn 38 die rückläufige Bewegung ein, wobei die Blende 34 die Rücklaufzeit bestimmt.

Diese Stabilisierungseinrichtung ist in einen besonderen Behälter eingebaut, dessen Flüssigkeit nicht am allgemeinen Druckölumlauf teilnimmt.

Ihre Temperatur bleibt deshalb in engen Grenzen konstant und hat daher im Dauerbetrieb praktisch die gleiche Viskosität wie nach längerem Stillstand der Turbine.

c) Drehzahlverstellung.

Die Drehzahlverstellung geschieht hier gleich wie bei dem elektrischen Regler mit elektromagnetischer Stabilisierung, siehe Abschnitt 5c.

d) Statikeinstellung.

Die Drosselspule 22 wird hier für drei Zwecke benützt. Der eine Drehkern 44 dient, wie bereits erwähnt, wiederum der Drehzahlverstellung von Hand oder mittels ferngesteuertem Drehzahlverstellmotor 43. Der andere Drehkern 42 wird sowohl für die Statik als auch für die vorübergehend stark wirkende elektro-hydraulische Stabilisierung benützt.

Die Statik kann beliebig zwischen 0 und 6% am Hebel 41 eingestellt werden, der die Steuerbüchse 36 in Abhängigkeit von der Stellung des Hauptservomotors 55 betätigt. Durch die Federn 38 wird der

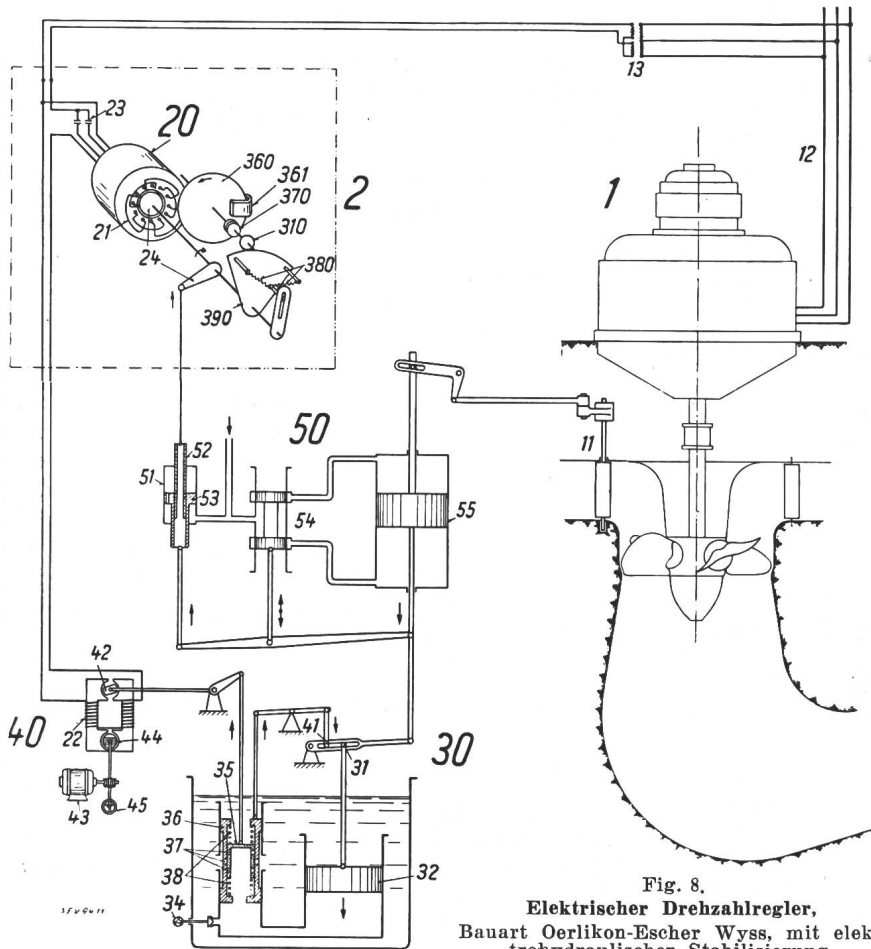


Fig. 8.

Elektrischer Drehzahlregler,
Bauart Oerlikon-Escher Wyss, mit elektrohydraulischer Stabilisierung.

gen. An Hand der Fig. 8 und 9 lässt sich die Wirkungsweise gut verfolgen.

Eine vom Servomotor 55 eingeleitete Regulierbewegung wird in stark übersetztem Masse in rückführendem Sinne mittels eines grossen Kolbens 32, der auf einen kleinen Kolben 35 einwirkt auf den Drehkern 42 der Drosselspule 22 übertragen. Die dadurch entstehende Induktivitätsänderung der Drosselspule bewirkt nun die direkte Rückführung des Meßsystems. Eine eingeleitete Regulierbewegung wird auf diese Weise dem Meßsystem als zu gross vorgetäuscht, weshalb sie vorzeitig wieder aufgehoben wird. Dadurch kann jede zu kleinen Pendelungen neigende Turbine zu stabilem Lauf gezwungen werden.

Damit bei grössern Regulierbewegungen die Steuervorgänge nicht gehemmt werden, wird der relative Arbeitsweg des kleinen Kolbens 35 in der Steuerbüchse 36 durch Durchlaßschlitze 37 für die Druckflüssigkeit nach beiden Seiten begrenzt. Bevor der kleine Kolben 35 seine Endlage erreicht hat, werden diese Austrittsschlitze 37 am Kolben und an der Steuerhülse 36 frei und die Druckflüssigkeit kann durchströmen. Langsam leiten nun die

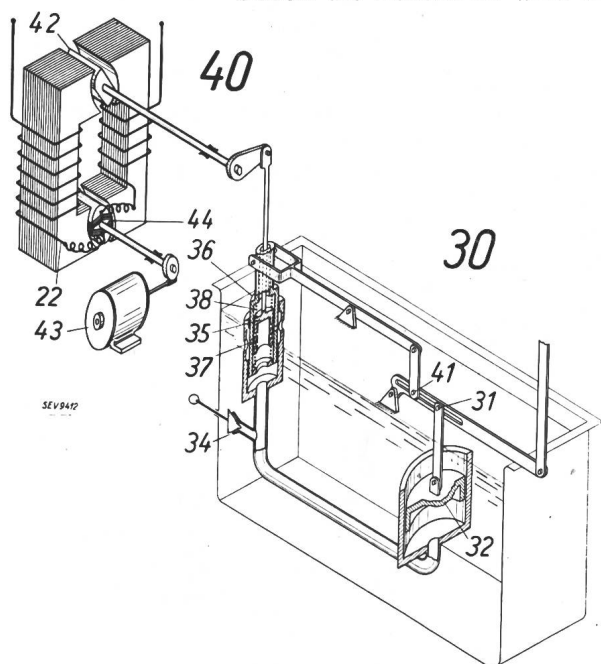


Fig. 9.

Elektrohydraulische Stabilisierung
mit Drehzahlverstellungs- und Statikeinstellungseinrichtung.

kleine Kolben 35 elastisch in der jeweiligen Mittel-lage der Steuerbüchse 36 gehalten.

Mittels eines Hebels wird die Stellung des kleinen Kolbens 35 auf den Drehkern 42 übertragen, womit die Sollfrequenz in eine ganz bestimmte Abhängigkeit zur Servomotorstellung gebracht wird.

7. Elektrischer Frequenz-Leistungsregler.

Prinzip und Ausführung.

Eine kombinierte Frequenz-Leistungs-Regulierung ist in vielen Spezialfällen erwünscht und ermöglicht insbesondere eine neuartige Netzkuppung mit gleichmässiger automatischer Spitzenlastverteilung auf mehrere Kraftwerke. Ihre ausführliche Beschreibung fällt jedoch nicht in den Rahmen dieses Artikels und soll daher nur angedeutet werden.

Zum eben beschriebenen Frequenzmeßsystem kommt noch ein Leistungsmeßsystem, das ferngesteuert wird oder fahrplanmässig auf bestimmte

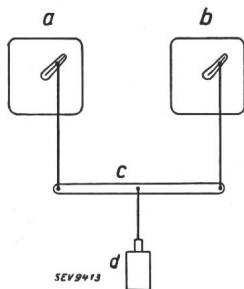


Fig. 10.
Elektrischer Frequenz-Leistungsregler,

Bauart Oerlikon-Escher Wyss.
Prinzipskizze.

- a Frequenzmeßsystem.
- b Leistungsmeßsystem.
- c Einstellhebel.
- d Vorsteuerventil.

Leistungswerte reguliert. Die Uebertragung der Regulierbewegungen auf die hydraulischen Steuerorgane ist in Fig. 10 schematisch sehr anschaulich dargestellt. Sowohl das Frequenzmeßsystem *a* als auch das Leistungsmeßsystem *b* wirken gemeinsam über den Hebel *c* auf das schon beschriebene Vorsteuerventil *d*. Die Grösse der regulierten Frequenz hängt nun in einem bestimmten Verhältnis von der Stellung des Leistungsmeßsystems ab. Durch Blockieren des einen oder andern Meßsystems kann wahlweise (z. B. fahrplanmässig) mit Frequenz- oder Leistungsregulierung gefahren werden.

8. Ausgeführte Versuche und Betriebserfahrungen.

Für die Durchführung der ersten praktischen Versuche mit dem Frequenzregler wurde das Kraftwerk Murg-Plätz gewählt. Es besitzt eine Freistrahlturbine mit kombinierter Ablenker- und Nadelregulierung; dieser Turbine wird das Wasser durch eine sehr lange Rohrleitung zugeführt. Diese ersten Versuche zeigten, wie genau das Frequenzmesssystem arbeitet, dass aber die Dämpfung viel wirksamer sein muss.

Der Regler wurde daraufhin vollständig umgebaut und zur weitem Erprobung im Kraftwerk Eglisau aufgestellt. Nachdem die Vorproben ge-

zeigt haben, dass der Regler zuverlässig arbeitet, erlaubte uns die Betriebsleitung eine Turbine für mehrere Monate in praktischen Betrieb zu nehmen, um Erfahrungen sammeln zu können. Fig. 11 zeigt die Versuchsanordnung des elektrischen und mechanischen Reglers.

Inmitten dieser Versuchsperiode kam aber der Kriegsausbruch, und militärische Gründe (Sperrgebiet) zwangen uns, die Apparatur abzumontieren und zurückzunehmen. Einige Zeit später folgte

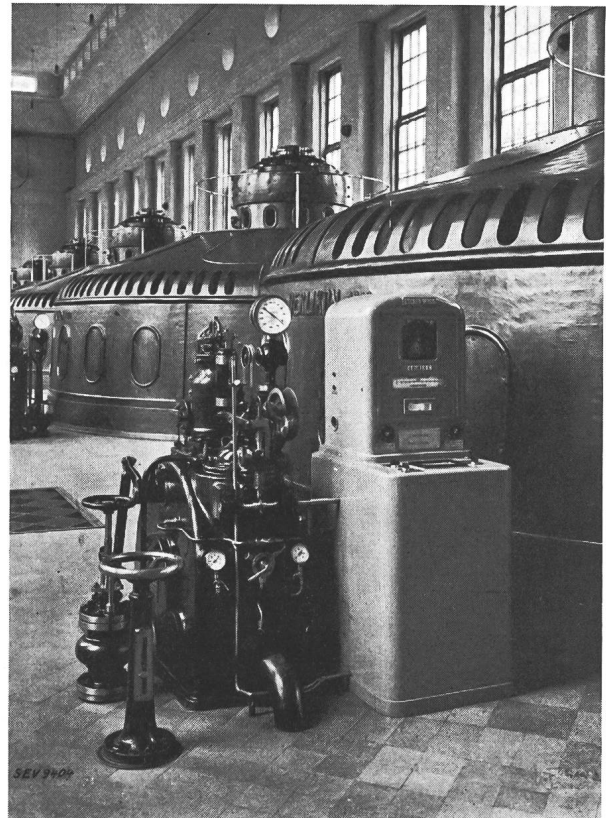


Fig. 11.
Betriebsversuche

im Kraftwerk Eglisau. Links der mechanische, rechts der provisorisch angebaute elektrische Drehzahlregler.

die Aufstellung des Frequenzreglers im Kraftwerk Felsenau des EW Bern. Hier blieb der Regler einige Monate im Betrieb und anschliessend fanden die Regulierproben statt. Mit einem Tachographen (Instrument zur graphischen Auftragung der Drehzahl) wurde der Verlauf der Drehzahl bei Last-Zu- und -Abschaltungen aufgenommen. Einige markante Tachogramme (Fig. 12a) zeigen, wie nach Belieben durch Aenderung der Dämpfung der Verlauf der Drehzahl sich in weiten Grenzen einstellen lässt. Trotzdem diese Versuche vollauf bestätigen, dass der Frequenzregler nun allen seinen Aufgaben gewachsen ist, wurde der Regler auch noch im Kraftwerk Dietikon installiert, um sicher zu sein, dass er auch eine schwer regulierbare Kaplan-turbine gut steuert. An zwei Sonntagen wurden viele Belastungs- und Entlastungsversuche durchgeführt und zwar Abschaltungen vom Netz

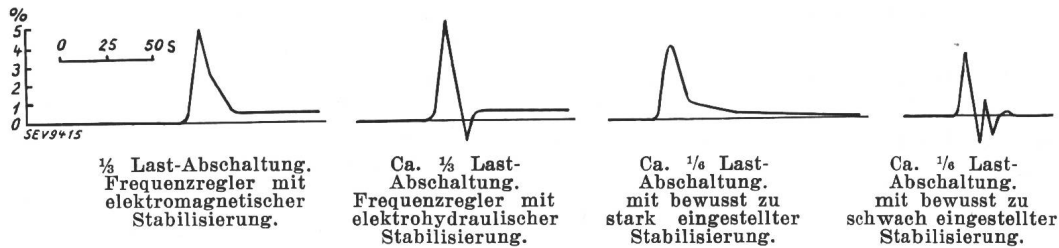


Fig. 12a.

Tachogramme,

(Drehzahlabweichung in % der Nenndrehzahl)
 aufgenommen mit einem Dr. Horn-Tachographen an einer Turbine im Kraftwerk Felsenau des Elektrizitätswerkes der Stadt Bern. Horizontale Francis-Doppelturbine mit automat. Leitradregulierung.
 $H = 12,5...14,3$ m $P = 1700...1950$ kW $Q = 16$ m³/s $n = 214$ U/min

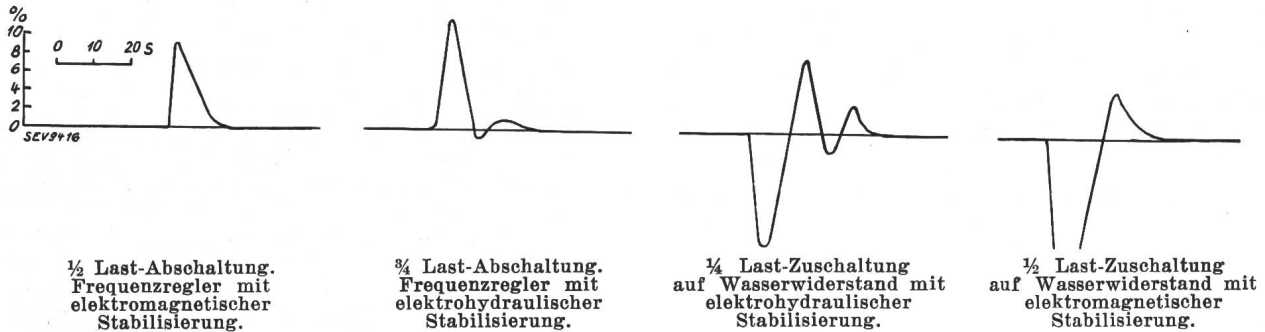


Fig. 12b.

Tachogramme,

(Drehzahlabweichung in % der Nenndrehzahl)
 aufgenommen an einer Turbine im Kraftwerk Dietikon der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich. Kaplanturbine mit regulierbarem Leit- und Lauftrad.
 $H = 3,75...4,2$ m $P = 1250$ kW $Q = 34,5...40$ m³/s $n = 93,8$ U/min

mit sofortiger nachfolgender Belastung auf Wasserwiderstand und umgekehrt (Fig. 12b).

Die Resultate waren trotz der ungünstigen Verhältnisse gut. Auch hier konnte der Drehzahlverlauf dank der leichten Einstellbarkeit der Stabilisierungseinrichtung auf die zweckmässigste Form gebracht werden.

Der elektrische Frequenzregler Bauart Oerlikon-Escher Wyss hat in praktischen Betriebsversuchen bewiesen, dass er eine erstklassige Lösung der elektrischen Steuerung von Regulierorganen von Kraftmaschinen darstellt. Den Betriebsmann interessiert besonders die verblüffende Anpassungsfähigkeit an die Turbinenverhältnisse. Dank der guten Zugänglichkeit der massgebenden Teile und der Einfachheit des Aufbaues kann bei der Inbetriebsetzung jede Turbine innert kürzester Zeit zu stabilem Lauf bei kleinster Regulierzeit gebracht werden.

9. Technische Daten und Vorteile.

1. Kleinste Ansprechempfindlichkeit, kleiner als 0,3 %.
2. Kürzeste Regulierzeit und grösste Stabilität dank neuartiger Rückführ- und Dämpfungseinrichtung.
3. Statikeinstellung beliebig zwischen 0 und 6 %.
4. Arbeitsfähigkeit des Reglers bis zu Spannungen von ca. 10 % der Nennspannung.
5. Automatische Schliessung der Turbine auf Leerlaufdrehzahl bei Spannungslosigkeit des Meßsystems.
6. Automatische Anpassung der Rückführ- und Dämpfungskräfte an das vom Meßsystem erzeugte Drehmoment.
7. Unabhängigkeit der Rückführungs- und Dämpfungseinrichtung von der Druckölsteuerung bzw. Raumtemperatur.
8. Kleiner Eigenverbrauch des Meßsystems, ca. 70 VA.
9. Anwärme- und Temperaturfehler des Meßsystems vernachlässigbar klein.
10. Spannungsunabhängigkeit des Meßsystems.
11. Unabhängigkeit des Meßsystems von der Kurvenform der Spannung.
12. Einfacher Aufbau bei Frequenz-Leistungsregulierung.
13. Einfache Anbaumöglichkeit an andere Primärmaschinen, z. B. Dampfturbinen.

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Messungen an Dipolen im Dezimeterwellengebiet.
 (Nach P. Lange, Telefunken-Mitteilungen Bd. 21, Mai 1940, Nr. 83, S. 72.) 621.396.67.029.6

Für viele Zwecke ist die Kenntnis des Widerstandes eines im Strombauch erregten horizontalen Dipols wichtig, und zwar in Abhängigkeit von seinen Abmessungen und seiner Entfernung vom leitenden Boden. Die Theorie solcher Dipole im freien Raum oder mit reflektierender, unendlich ausgedehnter Ebene ist bekannt. Es wird dabei angenommen, dass der Dipol unendlich dünn sei. Die Anwendung von

Dezimeterwellen gestattet, die Theorie durch Versuche im kleinen Maßstab nachzuprüfen.

Die Widerstandsmessungen werden mit einer Lecherleitung durchgeführt, die auf der einen Seite mit dem unbekanntem Widerstand \Re abgeschlossen und auf der Gegenseite mit einem Meßsender erregt wird. Dann wird nach der Telegraphengleichung

$$\frac{\Re}{Z} = \frac{n(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha x)}{n^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha x} + j \cdot \frac{(1 - n^2) \operatorname{tg}^2 \alpha x}{n^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha x}$$