

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 37 (1946)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Vereinfachte Primärregelung der Uebergabeleistung  
**Autor:** Stein, Th.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1057312>

### **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:** 25.12.2024

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

patine augmente, ce qui accentue le danger d'emballlement.

On peut dire qu'avec un personnel qualifié il semble préférable de le prévenir du patinage et de lui laisser prendre les mesures appropriées pour le

supprimer; il faut toutefois qu'il agisse rapidement, car suivant les circonstances, les moteurs peuvent atteindre une vitesse dangereuse en quelques secondes.

Adresse de l'auteur:  
P. Gaibrois, S. A. des Ateliers de Sécheron, Genève.

## Vereinfachte Primärregelung der Uebergabeleistung

Von Th. Stein, Zürich

621.316.728

*Für die Regelung der Uebergabeleistung von elektrischen Netzen durch nachträgliche Einwirkung auf die Drehzahlverstellmotoren werden die bekannten Frequenz-Leistungs-Regler verwendet. Nur durch Regelung nach einem Verhältniswert Frequenz — Leistung lässt sich bei diesen sekundären Leistungsreglern Stabilität erreichen. Unter Aufstellung der Stabilitätsbedingungen werden im folgenden die abweichenden Verhältnisse untersucht, die bei der Verwendung von Primärreglern gelten, die direkt auf die Hauptsteuerung einwirken. Nach diesen Ergebnissen wird ein vereinfachter Primärregler vorgeschlagen, bei dem ein Leistungsregler ohne jede Vorrichtung zur Anpassung an einen bestimmten Verhältniswert von Leistung und Frequenz an das Gestänge des normalen ölgesteuerten Drehzahlreglers angeschlossen ist, der mit seiner gewöhnlichen mechanischen Rückführung betrieben wird. Versuchsregler dieser Art werden gegenwärtig von Escher Wyss, Zürich, in Zusammenarbeit mit Brown Boveri, Baden, gebaut, um ihre praktische Brauchbarkeit zu erproben.*

*Pour le réglage de la puissance d'interconnexion de deux réseaux par correction apportée au dispositif de changement de vitesse, on utilise les régulateurs fréquence-puissance connus à action secondaire. La stabilité n'est réalisée dans ce système qu'au moyen d'un réglage selon un certain rapport de la fréquence à la puissance. Le présent article expose succinctement les calculs qui conduisent à l'établissement des conditions de stabilité dans le cas d'un réglage primaire agissant directement sur les organes de commande; en suite de quoi l'on propose un dispositif simple de réglage primaire dans lequel un régulateur de puissance sans aucun dispositif d'adaptation à un certain rapport fréquence-puissance, est couplé simplement à la tringlerie d'un régulateur tachymétrique courant à pression d'huile travaillant avec son asservissement mécanique normal. Des régulateurs d'essai de ce type sont en construction chez Escher Wyss à Zurich, en collaboration avec Brown Boveri à Baden, afin d'étudier leurs possibilités d'emploi.*

Als durch den zunehmenden Zusammenschluss der grossen Netze das Bedürfnis entstand, die Uebergabeleistungen in den Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Netzen zu regeln, schien es zunächst, dass diese elektrische Regelaufgabe nur unter Verdrängung des klassischen ölgesteuerten Drehzahlreglers gelöst werden könnte. Solange man sich darauf beschränkte, durch nachträgliche «sekundäre» Korrekturregler auf die Drehzahl-Verstellvorrichtungen einzuwirken, musste in der Tat aus Stabilitätsgründen ausser der Uebergabeleistung auch die der Drehzahl entsprechende Netzfrequenz auf elektrischem Weg auf die korrigierenden kombinierten Frequenz-Leistungs-Regler übertragen werden. In dem Bestreben, den Laststoss nur in dem Netzteil auszuregulieren, in dem er auftritt und alle anderen Korrekturregler zu blockieren, mussten ferner für die Abweichungen der Frequenz und der Uebergabeleistung von ihren Sollwerten ihr Verhältniswert messtechnisch ermittelt und der Frequenz-Kennlinie des Netzes genau angepasst werden. So war die elektrische Frequenzmessung, die Einstellung von Messwerten und das Auswiegen ihrer Verhältniszahl unvermeidlich. Deshalb erschienen Tendenzen berechtigt, auch den primären hydraulischen Drehzahlregler durch elektrische Frequenzregler zu ersetzen, trotz seiner Vorteile der robusten Konstruktion und seiner zuverlässigen und einfachen Arbeitsweise, die jedem Maschinisten geläufig ist.

Ganz andere Bedingungen gelten aber, wenn man gemäss der neuesten Entwicklung — statt der sekundären nachträglichen Korrektur auf dem Umweg über die Drehzahlverstellvorrichtung — dazu übergeht, schnellwirkende Regler der Uebergabeleistung primär auf den Hauptsteuerschieber der Turbinen wirken zu lassen. Es ist nicht zulässig, die für Sekundärregelung gültige Beweisführung, dass es nötig

ist, das Verhältnis der Sollwertabweichungen von Frequenz- und Uebergabeleistung in exakte Ueber-einstimmung mit der Frequenz-Kennlinie des Gesamtnetzes zu bringen, ungeprüft auf primäre Regler der Uebergabeleistung zu übertragen. Ebenso wenig ist die Voraussetzung berechtigt, dass die für Sekundärregelung entwickelten recht komplizierten elektrischen Mess-, Einstell- und Auswiegeapparaturen bei der Primärregelung noch nötig sind.

Vielmehr wurde am einfachsten Fall eines primären Reglers der Uebergabeleistung, der allein auf die Antriebsmaschine einwirkt, durch Ermittlung der Stabilitätsbedingungen bereits nachgewiesen<sup>1)</sup>, dass er z. B. 30mal stabiler arbeitet als ein Sekundärregler, weil der Primärregler mit Schliesszeiten der Vorsteuerung arbeiten kann, die einen Bruchteil einer Sekunde betragen, statt der Nachsteuerung des Drehzahlverstellmotors von 20...60 s Verstellzeit beim Sekundärregler.

Mit der gleichen Methode der Stabilitätsberechnung wird in folgendem festgestellt, dass es möglich ist, «Vollstabilität» zu erreichen, indem man den gewöhnlichen ölgesteuerten Drehzahlregler mit seiner mechanischen Rückführung ganz normal mit der üblichen Ungleichförmigkeit wie bisher arbeiten lässt, wobei ein einfacher Leistungsregler am gleichen Steuergestänge angreift. Es wird nachgewiesen, dass jedes Auswiegen der Leistungsabweichung und Drehzahlabweichung und die Anpassung an die Frequenzkennlinie des Netzes sowie das Abschalten der Hauptrückführung zu diesem Zweck bei der Primärregelung den Sinn verlieren. Damit können auch alle elektrischen Schaltungen der Reglapparaturen wegfallen, die hierzu dienen.

<sup>1)</sup> Stein: «Lastverteilung durch primäre Leistungsregler», Escher Wyss Mitteilungen 1942/43, S. 18.

Ausser der starken Vereinfachung der Apparatur und ihrer Bedienung entsteht der wesentliche Vorteil, dass der gewöhnliche Drehzahlregler mit normaler Ungleichförmigkeit und mit eingeschalteter Rückführung des Hauptservomotors die Maschine wie bisher beherrscht und bei jeder Störung ungehindert und ohne Umstellmassnahmen den Betrieb allein übernimmt, ebenso vor dem Parallelschalten. Dies kann den Entschluss, die Uebergaberegung einzuführen, bedeutend erleichtern.

### Die Unterschiede der Sekundär- und Primärregler

Wenn man sekundär mit einer Verstellzeit von 20...60 s auf den Drehzahlverstellmotor einwirkt, vollzieht sich in der Zwischenzeit durch die eingreifenden Drehzahlregler eine Frequenzänderung. Dieser Regelvorgang ist beispielsweise nach 2...4 s praktisch beendet. Nach der Kennlinie für die Gesamtbelastung des Netzes

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} \cong \text{konst.}$$

gibt von da ab die eingetretene Frequenzänderung  $\Delta f$  nach Grösse und Richtung (Zunahme oder Abnahme) ein Mass für die eingetretene Aenderung  $\Delta P_{tot}$  der Gesamtlast. Durch Auswägen dieses  $\Delta f$  mit der an jedem der Frequenz-Leistungs-Regler gemessenen Aenderung  $\Delta P$  der einzelnen Uebergabeleistungen wird festgestellt, in welchem Netz der Laststoss aufgetreten ist, um alle anderen Frequenz-Leistungs-Regler zu blockieren.

Die Voraussetzungen für diese klare Aufgabenstellung bestehen beim Primärregler nicht mehr. Wenn seine Vorsteuerung im Bruchteil einer Sekunde dem Leistungswert gefolgt ist und den Steuerungsvorgang einleitet, ist noch nichts von einer mit der Leistungsabweichung  $\Delta P$  vergleichbaren Frequenzabweichung  $\Delta f$  zu merken. Es ist also *nicht zulässig, für die Primärreglung den Schluss zu ziehen*

1. dass durch Frequenz-Leistungs-Regler ein Laststoss sofort von der Antriebsmaschine übernommen wird, in dessen Netz er auftritt;

2. dass solche Regler das Ansprechen der Antriebsmaschinen aller anderen Netze verhindern können;

3. dass die Messung des Verhältnisses der Sollwertabweichungen von Frequenz und Leistung und ihre Anpassung an die Kennlinie des Netzes den besten Regelvorgang gibt;

4. dass diesem Verhältnis Frequenz: Leistung und der Kennlinie des Netzes beim Primärregler noch irgendeine Bedeutung zukommt.

### Grenzen aller Primärregler

Unabhängig von der speziellen Schaltung arbeiten *alle primären Uebergaberegler im ersten Augenblick gleich schlecht*: denn sie verhindern nicht, dass sich ein Laststoss auf sämtliche parallelarbeitenden Antriebsmaschinen der Netze nach dem Verhältnis ihrer Schwungmassen verteilt. Zwar werden beispielsweise in der ersten  $\frac{1}{10}$  s die nächstliegenden Generatoren stärker belastet, bis durch die entstehenden Winkelabweichungen auch bei dem am weitesten abliegenden Generator der Synchronismus wieder hergestellt ist. Auch streben alle Arten

von Uebergaberegler dem gleichen Endeffekt zu, die Uebergabeleistung auf den ursprünglichen Wert zurückzuführen.

Da also Anfangsabweichung und End-Beharrungslage bei allen Schaltungen gleich sind, entscheiden *nur die Stabilitätsbedingungen* über Brauchbarkeit und Güte der Anordnungen. Die Stabilität muss gut sein, damit die Abweichungen schnell abklingen und nur für Regelanordnungen, die die Stabilität des Primärreglers verbessern, ist die Anwendung oder Beibehaltung berechtigt.

### Formelzeichen und Definitionen

$w$  Wurzel der charakteristischen Gleichung (für  $\varphi$  und  $\mu$ )

*Relative Abweichungen*  
von der Beharrungslage

$\varphi = \frac{\Delta n}{n}$  Abweichung  $\Delta n$  der Drehzahl bezogen auf Drehzahl  $n$

$\sigma = \frac{\Delta s}{s_{max}}$  Abweichung  $\Delta s$  der Steueröffnung, bezogen auf die volle Steueröffnung  $s_{max}$

$\mu = \frac{\Delta m}{m_{max}}$  Abweichung  $\Delta m$  der Servomotorstellung, bezogen auf den Servomotorhub bei Vollast

*Absolute Abweichungen*  
vom Beharrungswert

$\Delta P, \Delta P_1$  Abweichung der Turbinenleistungen  
 $\Delta P_g, \Delta P_{g1}$  Abweichung der Generatorleistungen  
 $\Delta P_a$  Abweichung der Uebergabeleistung  
 $\Delta P_{a max}$  für volle Oeffnung des Steuerschiebers  
nötige Abweichung  $\Delta P_a$

$P$  Vollast der drehzahlgeregelten Maschinen

$P_1$  Vollast der leistungsgeregelten Maschinen

$\delta = \frac{\Delta n_{max}}{n}$  Ungleichförmigkeit des normalen Drehzahlreglers  
( $\Delta n_{max}$  für die volle Steueröffnung nötige Drehzahlabweichung bei ausgeschalteten Isodromvorrichtungen,  $n$  mittlere Drehzahl)

$\delta_1 = \frac{\Delta P_{a max}}{P_1}$  Ungleichförmigkeit des Leistungsreglers

$\delta_0$  Ungleichförmigkeit des zugehörigen Drehzahlreglers

$r$  Rückführkonstante,  
bei Reglern mit Rückführung  $r \sim 1$   
bei Reglern ohne Rückführung  $r = 0$

$T_s$  Schliesszeit in s für den Hauptservomotor

$T_a$  Anlaufzeit der Maschine in s von Stillstand auf Vollast bei Beschleunigung durch das konstante maximale Drehmoment

$v = \frac{P_1}{P} =$  Leistung der leistungsgeregelten Netze  
Leistung der drehzahlgeregelten Netze

$m, m_0$  internes Leistungsverhältnis der Netze nach Fig. 3

**Stabilitätsbedingungen**

Nachdem am einfachsten Beispiel eines Leistungsreglers, der allein auf die Antriebsmaschine einwirkt, nachgerechnet wurde<sup>1)</sup>, dass ein Leistungsregler mit ca. 0,4 s Schliesszeit der Vorsteuerung sich annähernd so verhält wie ein augenblicklich wirkender, beschränken wir uns für die folgenden komplizierteren Rechnungsfälle auf den «idealen» Leistungsregler mit Schliesszeit null der Vorsteuerung.

Es soll jetzt gemäss Fig. 1 das zweckmässigste Zusammenarbeiten eines Drehzahlreglers mit der Ungleichförmigkeit  $\delta_0$  und eines Reglers der Ueber-

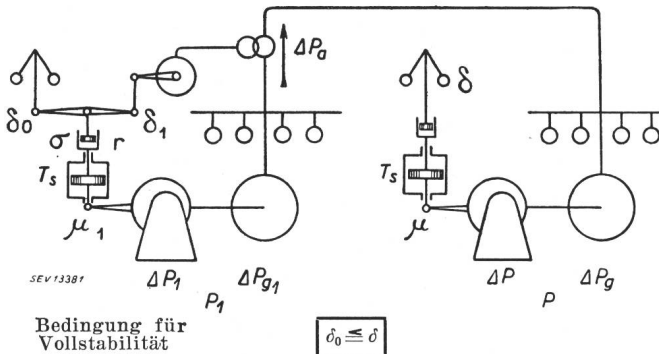


Fig. 1.

Neues Prinzip eines Primärreglers der Uebergabeleistung mit unabhängigem Nebeneinanderarbeiten des gewöhnlichen Drehzahlreglers mit einem Leistungssystem gibt *Vollstabilität unter Wegfall aller Vorrichtungen zum Auswiegen und Anpassen* des Verhältnisses Frequenz-Leistung der bisherigen Frequenz-Leistungs-Regler

gabeleistung mit der Ungleichförmigkeit  $\delta_1$  untersucht werden, die beide am Gestänge der gleichen Maschine angreifen. Die Bewegung  $\mu_1$  des Servomotors mit der Schliesszeit  $T_s$  wird durch eine Rückführung  $r$  auf den Steuerschieber  $\sigma$  übertragen.

Die relative Steueröffnung  $\sigma$  wird dann durch die Summe der Reglerabweichungen von Drehzahlregler und Leistungsregler beeinflusst. Die relative Reglerabweichung vom Beharrungszustand ist beim Drehzahlregler gleich dem Verhältnis der relativen Drehzahlabweichung  $\varphi$  zur Ungleichförmigkeit  $\delta_0$ .

$$\text{Abweichung des Drehzahlreglers} = - \frac{\varphi}{\delta_0}$$

Das Minuszeichen gibt an, dass bei zunehmender Drehzahl der Regler in Richtung abnehmender Steueröffnung wirkt. Entsprechend ist die

$$\text{Abweichung des Leistungsreglers} = - \frac{\Delta P_a}{\Delta P_{amax}} = - \frac{\Delta P_a}{\delta_1 P_1}$$

Wenn man noch berücksichtigt, dass die relative Rückführabweichung  $r \mu_1$  der Servomotorstellung  $\mu_1$  der Steueröffnung entgegenwirkt, wird die

$$\text{Steueröffnung } \sigma = - \left( \frac{\varphi}{\delta_0} + \frac{\Delta P_a}{\delta_1 P_1} + r \mu_1 \right) \quad (1)$$

Die relative Bewegungsgeschwindigkeit  $\dot{\mu}_1$  des Servomotors in bezug auf die maximale Geschwindigkeit  $1/T_s$  bei Schliessen in der Schliesszeit  $T_s$  ist

$$\dot{\mu}_1 = \frac{\sigma}{T_s}; T_s \dot{\mu}_1 + r \mu_1 + \frac{\varphi}{\delta_0} + \frac{\Delta P_a}{\delta_1 P_1} = 0 \quad (2)$$

Entsprechend gilt für die parallel arbeitende, zweite Maschine mit gewöhnlichem Drehzahlregler, wobei die Rückführkonstante  $r \cong 1$  gesetzt sei

$$T_s \dot{\mu} + \mu + \frac{\varphi}{\delta} = 0 \quad (3)$$

Ferner gilt für die Leistungsabweichungen und für die mit der Leistung proportional angenommenen relativen Abweichungen der Servomotoren vom Beharrungszustand

$$\text{Leistungsabweichung } \Delta P_a = \Delta P_{g1} = - \Delta P_g \quad (4)$$

$$\text{Abweichung der Servomotorstellung } \mu = \frac{\Delta P}{P}; \mu_1 = \frac{\Delta P_1}{P_1} \quad (5)$$

Bei der Anlaufzeit  $T_a$  der Maschine ist die maximale Beschleunigung der Maschine, d. h. die Drehzahlzunahme pro Zeiteinheit bei vollem Drehmoment  $1/T_a$ . Die relative Zunahme der Drehzahlabweichung pro Zeiteinheit  $\dot{\varphi} = d\varphi/dt$  ist der relativen Leistungsdifferenz von Turbine und Generator proportional, also

$$\dot{\varphi} = \frac{\Delta P - \Delta P_g}{P} \cdot \frac{1}{T_a} \text{ und } \dot{\varphi} = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_{g1}}{P_1} \cdot \frac{1}{T_a} \quad (6)$$

Dabei ist gemäss Definition  $v = \frac{P_1}{P}$ .

Aus den Gleichungen (2), (4), (5), (6) lässt sich zunächst die Beziehung ableiten

$$\delta_1 T_s \dot{\mu}_1 + (1 + r \delta_1) \mu_1 - T_a \dot{\varphi} + \frac{\delta_1}{\delta_0} \varphi = 0 \quad (7)$$

Das Glied  $r \delta_1$  zeigt den Rückföhreinfluss. Für den Regler mit Rückführung ( $r = 1$ ) ist der Rückföhreinfluss vernachlässigbar klein, aber auf keinen Fall schädlich, d. h. *vom dynamischen Standpunkt aus ist es durchaus zulässig, die Rückführung des Hauptservomotors normal beizubehalten.*

Die weitere Ableitung ergibt, wenn man  $r \delta_1 = 0$  setzt und weitere Glieder weglässt, die charakteristische Gleichung

$$(1 + v) \delta \delta_1 T_a T_s^2 w^3 + [(1 + v) \delta \delta_1 T_a T_s + \delta T_a T_s] w^2 + [\delta T_a + \delta_1 T_s + v \frac{\delta \delta_1}{\delta_0} T_s] w + 1 + \frac{\delta \delta_1}{\delta_0} v = 0 \quad (8)$$

oder abgekürzt

$$c_0 w^3 + c_1 w^2 + c_2 w + c_3 = 0$$

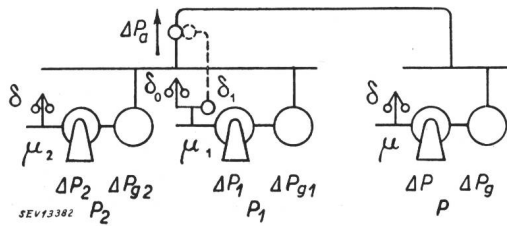
Die Stabilitätsbedingung  $c_1 c_2 > c_0 c_3$ <sup>2)</sup> ergibt

$$\text{Stabilitätsbedingung } \delta T_a + v \delta \frac{\delta_1}{\delta_0} T_s > v \cdot \delta_1 T_s \quad (9)$$

<sup>2)</sup> Tolle: «Reglung der Kraftmaschinen», Verlag J. Springer 1921.

**Bedingung für Vollstabilität**

Das Glied  $\delta T_a$  ist in jedem Fall als stabilisierende Grösse vorhanden, unabhängig von den Reglerkonstanten. Deshalb wollen wir als Grenze der Vollstabilität die Bedingungen bezeichnen, die ein-



Bedingung für Vollstabilität

$$\delta_0 \leq \delta$$

Fig. 2.

Auch wenn in einem Netz von vielen Maschinen nur eine nach der Uebergabeleistung geregelt wird, ändert sich nichts an der Stabilitätsbedingung

gehalten werden müssen, damit sich die anderen beiden Glieder der Gleichung (9) das Gleichgewicht halten

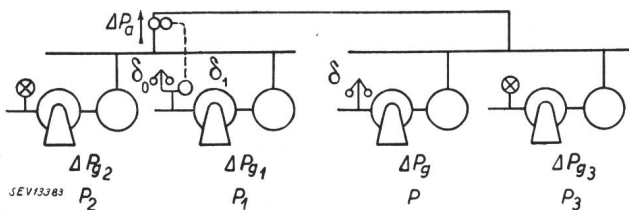
$$v \frac{\delta \delta_1 T_s}{\delta_0} \geq v \delta_1 T_s$$

Bedingung für Vollstabilität  $\delta_0 \leq \delta$  (10)

- $\delta_0$  Drehzahlungleichförmigkeit am zusätzlichen Drehzahlregler der leistungsgeregelten Maschine
- $\delta$  Drehzahlungleichförmigkeit im drehzahlgeregelten Netz.

Der Verhältniswert  $\delta_1 : \delta_0$  der Ungleichförmigkeiten von Leistung und Frequenz, das kennzeichnende Regelprinzip der bisherigen sekundären Frequenz-Leistungs-Regler fällt bei der Vollstabilitäts-Bedingung des Primärreglers vollkommen aus dem Rechnungsgang heraus und erscheint nicht mehr in der Endformel (10).

Auch wenn man nach Fig. 2 mit den früher abgeleiteten<sup>1)</sup> Ergänzungen den Einfluss zusätzlicher drehzahl geregelter Maschinen im leistungsgeregelten Netz berücksichtigt, ändert sich, wie die Rechnung ergibt, nichts an der Bedingung der Vollstabilität. Bei zusätzlichen blockiert laufenden Grundlastmaschinen in beiden Netzen ergibt die Nachrechnung, dass nach der Formel unter Fig. 3 gewisse Anpassungen der Ungleichförmigkeit  $\delta_0$  ge-



Bedingung für Vollstabilität

$$\delta_0 < \frac{m_0}{m} \delta$$

$$m_0 = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \text{Anteil der nicht blockierten Maschinen im leistungsgeregelten Netz}$$

$$m = \frac{P}{P + P_3} = \text{Anteil der nicht blockierten Maschinen im drehzahlgeregelten Netz}$$

Fig. 3.

Bei zusätzlichen Grundlastmaschinen mit blockierter Steuerung weicht die Stabilitätsbedingung etwas ab, wenn ihr Anteil in den Netzen nicht gleich ist

geben sind, aber nur, wenn das Ausmass der Grundlastmaschinen in beiden Netzen verschieden ist.

In der Formel (10) erscheint die Ungleichförmigkeit  $\delta_1$  des Leistungsreglers überhaupt nicht. Sie kann also ohne jeden Einfluss auf die Stabilität frei gewählt werden. Sie ist ferner auf keinen Fall in ein bestimmtes einstellbares Verhältnis zur Ungleichförmigkeit  $\delta_0$  des Drehzahlreglers zu setzen, das wesentliche Merkmal des Frequenz-Leistungs-Reglers.

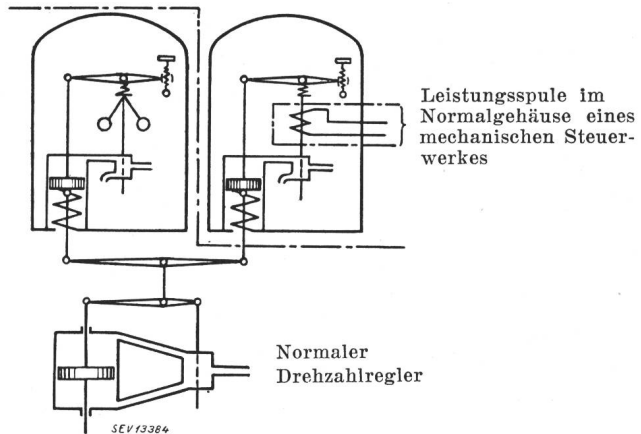


Fig. 4.

Anordnung des Versuchsreglers von Escher Wyss (Patent angemeldet Nov. 1944)

Der normale Drehzahlregler und seine Rückführung bleiben genau wie bisher in Funktion. Das erübrigt Umstellungsmassnahmen für Anfahren und Störungen. Wegfall der Regulierung des Verhältniswertes der Abweichungen von Frequenz und Leistung und seiner Anpassung an die Kennlinie des Netzes.

Das Prinzip des Frequenz-Leistungs-Reglers, ein bestimmtes, der Kennlinie des Netzes angepasstes Verhältnis der Abweichungen von Frequenz und Leistung einzuhalten, das beim Sekundärregler nötig ist, wird beim Primärregler gegenstandslos und die dazu dienenden Reglerbestandteile können wegfällen.

An Stelle der aufeinander abgestimmten Kombination des Frequenz-Leistungs-Reglers, tritt ein unabhängiges Nebeneinander-Arbeiten des üblichen Drehzahlreglers mit einem Leistungsregler. Dieser kann deshalb nach Fig. 4 eine einfache mechanische Rückführung seiner Vorsteuerung erhalten. Elektrische Brückenschaltungen zur Anpassung von Verhältniswerten und elektrische Rückführung der Vorsteuerung sind nicht mehr nötig.

Wie weitgehend der Drehzahlregler ganz unabhängig vom angeschlossenen Leistungsregler seine normale Funktion behält, geht aus Formel (10) hervor. Die einzige Bedingung besteht nämlich darin, dass die Ungleichförmigkeit  $\delta_0$  gleich oder kleiner sein soll als die der Drehzahlregler im anderen Netz. Nicht mit dem Leistungsregler, sondern mit den übrigen Drehzahlreglern steht also bei der Primärreglung der Drehzahlregler in dynamischer Beziehung.

Wenn man, wie beim gewöhnlichen Zusammenarbeiten zwischen Drehzahlreglern, die beiden Ungleichförmigkeiten  $\delta_0$  und  $\delta$  gleich macht, so entsteht nach Gleichung (9) die

Stabilitätsbedingung bei  $\delta_0 = \delta; \delta T_a > 0$  (11)

Wie sich leicht nachrechnen lässt, ist das genau die

bekannte Stabilitätsbedingung für ein Netz, in dem nur gewöhnliche drehzahlgeregelte Maschinen vorhanden sind.

*An den leistungsgeregelten Maschinen braucht man nur die normalen Drehzahlregler in Funktion zu lassen und ganz unabhängig vom Leistungsregler mit ähnlicher Ungleichförmigkeit wie die übrigen Drehzahlregler des Netzes einzustellen. Die Stabilität der Gesamtregulierung bleibt dann ebensogut, wie vor Einführung der Leistungsregulierung.*

Der Versuch, die Stabilität des Systems nach Gleichung (9) dadurch noch zu erhöhen, dass man  $\delta_0$  klein macht, d. h. den Drehzahlregler der leistungsgeregelten Maschine auf Drehzahl-schwankungen sehr stark reagieren lässt, verbessert den praktischen Regelverlauf nicht. Damit wird eine Abweichung der Frequenz schneller zum Abklingen gebracht. Dies aber nur, indem man sehr hohe vorübergehende Abweichungen der Leistung der leistungsgeregelten Maschine und in der Verbindungsleitung zum benachbarten Netz in Kauf nimmt. Das widerspricht aber dem Sinn der Regelung nach der Uebergabeleistung, durch die gerade möglichst konstante Uebergabeleistung gesichert werden soll. Es braucht also keine Vorsorge für die Einstellung besonders kleiner Ungleichförmigkeiten getroffen zu werden. Umgekehrt bedeutet es auch keine Gefahr für die Stabilität, wenn die Ungleichförmigkeit  $\delta_0$  des Drehzahlreglers der leistungsgeregelten Maschine etwas höher liegt als bei den übrigen Drehzahlreglern, weil gemäss Gleichung (9) die Grösse  $\delta T_a$  eine Stabilitätsreserve darstellt. So lässt sich auch bei weitläufigen Netzen den praktischen Gegebenheiten leicht Rechnung tragen. Insbesondere ist es nicht nötig, je nach der wechselnden Zahl und Art der in Betrieb befindlichen Antriebsmaschinen nach der veränderten Summen-Kennlinie des Netzes wie bei der Sekundärregulierung sämtlicher Uebergabe-regler anders einzustellen.

*Im Gegensatz zur Sekundärregulierung, bei der eine exakte Anpassung des Frequenz-Leistungs-Gesetzes nötig ist, erfordert die Primärregulierung nur in der Grössenordnung angepasste Ungleichförmigkeit der Drehzahlregler. Hierzu genügen die üblichen mechanischen Einstellvorrichtungen.*

Die weitgehenden Vereinfachungen, die bei der Berechnung gemacht wurden, dienen dem Zweck, einen einfachen Ueberblick zu erhalten. Für spezielle Untersuchungen wird man nach der gleichen Methode exaktere Berechnungen durchführen.

#### Erklärung der Ergebnisse

Als störende Ursache, die das Zusammenwirken der rein nach der Drehzahl geregelten Netze mit den auf Uebergabeleistung regulierten erschwert, wurde folgendes erkannt<sup>1)</sup>: Würden sich die Drehzahländerungen nur im drehzahlgeregelten Netz auswirken, dann wäre immer Vollstabilität erreichbar. Durch den Umweg über den Synchronismus aller Antriebsmaschinen des Netzes wird aber eine störende Zusatzleistung, die aus den Schwungmassen der Antriebsmaschinen stammt, in den Netzen erzeugt, die nach Uebergabeleistung geregelt werden.

Wenn sich jetzt als Grundbedingung der Vollstabilität ergibt, dass der Regler im Netz, das auf Uebergabeleistung reguliert, mit derselben Ungleichförmigkeit, d. h. genau so arbeiten soll wie alle übrigen, so bedeutet das folgendes: Der Drehzahlregler soll einfach dem Leistungsregler die ihn nichts angehende Aufgabe abnehmen, auf die durch Drehzahländerung entstehenden Zusatzleistungen zu reagieren. Sobald er das tut, arbeitet die Summe aller Drehzahlregler und die Summe aller Leistungsregler des Gesamtnetzes vollstabil nebeneinander, ohne dass irgend eine Beziehung zwischen Frequenzänderung und Leistungsänderung, d. h. den Ungleichförmigkeiten  $\delta_0$  und  $\delta_1$  des Drehzahl- und Leistungsreglers einzuhalten ist.

#### Zusammenfassung

1. Solange man sich mit der sekundären Korrektur der Uebergabeleistung durch nachträgliche verspätete Einwirkung auf die Drehzahlstellvorrichtungen begnügt, ist der elektrisch kombinierte Frequenz-Leistungs-Regler die gegebene Lösung. Das Frequenz-Leistungs-Verhältnis muss dabei messtechnisch erfasst und mit der Frequenz-Leistungs-Kennlinie des Netzes in exakte Uebereinstimmung gebracht werden, damit der Leistungstoss an der Stelle des Gesamtnetzes ausreguliert wird, wo er auftritt.

2. Die durchgeführten Untersuchungen bezwecken, einen möglichst einfachen Primärregler zu schaffen. Es ist festzustellen, ob die gleichen kombinierten elektrischen Regelapparate nötig oder welche Vereinfachungen gegeben sind, wenn man die Uebergabeleistung nicht verspätet sekundär einwirken lässt «nachdem» der Hauptservomotor unter dem Einfluss seines normalen Drehzahlreglers gearbeitet hat, sondern wenn der Leistungsimpuls augenblicklich primär einwirkt, «bevor» die Hauptsteuerung anspricht.

3. Im ersten Augenblick arbeiten alle Anordnungen primärer Regler der Uebergabeleistung gleich schlecht, weil sie nicht verhindern, dass zunächst der Laststoss sich auf alle Generatoren des Gesamtnetzes verteilt, auch die am weitesten abliegenden. Deshalb entscheiden die Stabilitätsbedingungen darüber, welche Mess-, Einstell- und Kombinationseinrichtungen nötig sind und welche weggelassen werden können.

4. Nach den Stabilitätsbedingungen wird das Prinzip der elektrisch kombinierten Frequenz-Leistungsregler, das Auswiegen der Abweichungen von Frequenz und Leistung und die Einstellung nach der Frequenz-Leistungs-Kennlinie des Netzes beim Primärregler gegenstandslos. Alle hierzu dienenden elektrischen Einstell- und Kombinationsvorrichtungen können deshalb beim Primärregler wegfallen.

5. Eine feste Beziehung zwischen den Ungleichförmigkeiten von Leistung und Frequenz, die wesentliche Grundlage der Sekundärregler, besteht beim Primärregler nicht. Die Ungleichförmigkeit des Leistungsreglers kann frei gewählt werden. Es handelt sich um ein vollkommen unabhängiges

Nebeneinanderarbeiten von Leistungs- und Drehzahlregler.

6. Der normale Drehzahlregler bleibt in Funktion und beherrscht die Maschine genau wie bisher. Er kann mit der üblichen Ungleichförmigkeit ohne exakte Abstimmung und mit eingeschalteter Hauptrückführung arbeiten. Das Anfahren und der Eingriff bei Störungen stellt deshalb überhaupt keine Probleme. Das Anfügen des Leistungsreglers gestaltet sich einfacher als beim Fahrplanregler, bei dem der Drehzahlregler ausser Funktion bleiben muss.

7. Am Leistungsregler können alle elektrischen Brücken, Einstellvorrichtungen und elektrischen Rückführungen wegfallen, da sie beim Sekundärregler nur nötig sind, um eine feste und einstellbare Beziehung zum Drehzahlregler herzustellen. Beim Primärregler genügt eine gewöhnliche mechanische Rückführung der Vorsteuerung des Leistungsreglers.

Die elektrische Kombination des Frequenz-Leistungs-Reglers war eine zweckmässige Uebergangslösung für die Zeit, in der man sich darauf beschränkte, sekundär korrigierend nach der Uebergabeleistung zu regeln. Der verspätete Eingriff

zwingt hier zu relativ komplizierten Anordnungen, um Pendelungen zu vermeiden. Sobald man aber die Uebergabeleistung primär eingreifen lässt, entsteht eine ganz wesentliche Vereinfachung. Dabei behält der ölgesteuerte Drehzahlregler seine beherrschende Funktion, wobei ihm ein stark vereinfachter, vollkommen unabhängig arbeitender Leistungsregler anzufügen ist.

Indem man umschaltbar zu Zeiten, in denen nicht nach der Uebergabeleistung zu regeln ist, das Leistungssystem als Fahrplanregler oder dann als Schnellregler benützt, der exakter als ein Beschleunigungsregler die Leistung der Kraftmaschine mit der Generatorleistung in Uebereinstimmung bringt<sup>3)</sup>, lässt sich das Leistungssystem als *Universalregler* verwenden.

Es sind gegenwärtig Versuchsregler im Bau, mit denen nachgeprüft werden soll, wie weit sich diese für den theoretischen Idealfall abgeleiteten Beziehungen in der Praxis verwirklichen lassen.

<sup>3)</sup> Stein: «Selbsttätige Feuerungsregelung», VDI-Zeitschrift 1927, S. 1184.

Adresse des Autors:

Th. Stein, Escher Wyss Maschinenfabriken A.-G., Zürich.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Bemerkungen über das Phänomen des Flimmerns und die Definition des Welligkeitsgrades

von H. Goldmann, H. König und F. Mäder  
Bulletin ASE 1946, No. 2, p. 25, édition verte.

#### Rectification

La formule indiquée à la page 28 — colonne de gauche, 7° ligne à partir du bas — doit être corrigée de la façon suivante:

$$\bar{E}_w + E_z = \bar{E}$$

A la même page — colonne de droite, 7° ligne à partir du haut — il faut lire:

$$\text{Mittelwert } \bar{E}$$

A la même page — colonne de droite, 1<sup>er</sup> alinéa après le tableau I, avant-dernière ligne — il faut lire: steigender Beleuchtungsstärke, au lieu de: steigender Beleuchtungsstärke.

La deuxième ligne du titre du tableau II, page 29, doit être corrigée comme suit: Zeile 14 beweist... au lieu de: Zeile 17 beweist...

Le titre de la 4<sup>e</sup> colonne du tableau II doit être corrigé comme suit: Halbsinus (Hg, Leuchtstoff), au lieu de: Halbsinus (Hg, Leuchtstärke).

### 60 000-kW-Dampfturbine in Saint-Denis

(Nach Génie civil 1945, Nr. 14.)

621.165

Neben dem im Jahre 1905 auf dem rechten Ufer der Seine erstellten Dampfkraftwerk Saint-Denis I ist 1934 das thermische Kraftwerk Saint-Denis II mit 150 000 kW installierter Leistung in Betrieb gekommen. Als Grundlastwerk erfährt das Werk II nur geringe Belastungsschwankungen und nur selten die Ausserbetriebsetzung oder die Inbetriebnahme einer Maschinengruppe. Saint-Denis II enthielt im ersten Ausbau 3 Turbogruppen von je 50 000 kW mit einer Drehzahl von 3000/min. Je eine Gruppe wurde durch Brown Boveri — Charleroi, Oerlikon — Jeumont bzw. Als. Thom — Jeumont geliefert. Jeder Turbine sind zwei Dampfkessel von 70 kg/cm<sup>2</sup> Druck mit Kohlenstaubeuerung zugeordnet.

Die gewaltige Entwicklung des Elektrizitätsverbrauchs in der Pariser Gegend hatte schon vor dem eben zu Ende gegangenen Krieg zur Bestellung einer vierten *Turbogruppe von 60 000 kW* geführt. Ihr Bau wurde 1939 begonnen und durch

die Firma Als. Thom für die Turbine, die Kondensator- und die Speisewasser-Anlage, sowie die Firma Jeumont für den Generator trotz kriegsbedingten Schwierigkeiten vollendet.

Beim Turbineneintritt sind folgende Dampfverhältnisse vorhanden: 58 kg/cm<sup>2</sup>, 500°. Das Kühlwasser von etwa 15° wird der Seine entnommen. Das Kondensat mit dem destillierten Zusatzspeisewasser wird durch Anzapfdampf auf 190° vorgewärmt. Die 60 000-kW-Turbine hat einen ähnlichen Aufbau wie die ebenfalls von Als. Thom gelieferte 50 000-kW-Turbine. Die neue Turbogruppe grösserer Leistung hat eine Länge von 16,30 m; sie ist damit nur 0,60 m länger als ihre Vorgängerin.

Der Hochdruckzylinder sowie die Leitschaufeln, die den höchsten Temperaturen ausgesetzt sind, bestehen aus Molybdän-Stahl. Besondere Sicherungseinrichtungen schützen die Dampfturbine bei gefährlicher Abnahme des Vakuums im Kondensator und beim Absinken des Schmieröldruckes.

Der neue Generator, Fabrikat Jeumont, hat mit 71 400 kVA die gleiche Scheinleistung wie die Jeumont-Generatoren, die früher zu zwei der 50 000-kW-Turbinen geliefert wurden. Der neue Generator kann 60 000 kW bei  $\cos \varphi = 0,84$  abgeben, während die bisherigen Turbogeneratoren ihre volle Leistung von 50 000 kW sogar bei einem  $\cos \varphi$  von nur 0,7 einhalten konnten. Länge und Aussendurchmesser des Generators wurden durch bessere Materialausnutzung gegenüber der früheren Konstruktion um etwa 15 % reduziert.

Der magnetische Kreis besteht im Stator aus 0,4 mm dicken Blechen mit hohem Siliziumgehalt. Die Verlustziffer beträgt 1,3 W/kg. Zur Kühlung des Generators werden durch zwei Ventilatoren 30 m<sup>3</sup>/s Luft zugeführt. Bei den Abnahmeprüfungen wurden folgende Verluste und Wirkungsgrade gemessen:

Mechanische Verluste	344 kW
Eisenverluste bei mittlerer Spannung	148 kW
Total Verluste, gemessen im Kurzschluss	330 kW
Wirkungsgrad:	
bei Vollast und $\cos \varphi = 1$	98,64 %
bei Vollast und $\cos \varphi = 0,84$	98,24 %

Die Generatorspannung kann zwischen 9,8 und 11,2 kV reguliert werden. Durch das Kraftwerk Saint-Denis II wird u. a. das ausgedehnte Netz der Pariser Untergrundbahn in 10 kV direkt ab Generator beliefert. In der Revue Générale de l'Electricité 1945, Nr. 3, S. 77 erschien ebenfalls eine kurze Beschreibung dieser 60 000-kW-Dampfturbine. Gz.