Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 27 (1936)

Heft: 20

Artikel: Zwei Vorschläge zur Regelung des Leistungsaustausches zwischen grossen Netzen

Autor: Friedländer, Erich / Wiskott, Wilhelm

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057532

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: 23.08.2025

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

därspannungskurve nachkommen. Fig. 7 zeigt schematisch die Gittersteuer-Einrichtung bei Verwendung von Steuerwalzen, während die Arbeitsweise der Gittersteuerung an Hand von Fig. 8 zu erkennen ist. Der Mutator nach Fig. 7 ist sechsphasig und mit amplitudengleichen Teilspannungen. Der Aufbau entspricht der Anordnung nach Fig. 4. Zur besseren Uebersicht ist die Schutzdrosselspule D nicht eingezeichnet. Die Gittersteuer-Einrichtung ist eine Erweiterung der Steuereinrichtung nach Fig. 4. Sie enthält zwei Steuerwalzen P und S, deren Kontakte in Reihe geschaltet sind. Die Walze P läuft mit 3000 U/m synchron mit der Frequenz des Drehstromnetzes und die Walze S mit im Mittel 1000 U/m synchron mit der Frequenz des Einphasennetzes [4]). Die Kontakte K_s der Walze P werden mit der Sekundärfrequenz betätigt, sie geben an, in welcher Weise die Sekundärspannung zusammenzusetzen ist. Die Kontakte K_p der Walze P werden mit der Primärfrequenz betätigt, sie bestimmen, welche Teilspannung und damit welche Anode in einem bestimmten Augenblick zur Stromführung herangezogen wird. Die Steuereinrichtung arbeitet so, dass in der einen Sekundärspannungs-Halbwelle die eine Gefässgruppe gleichrichterbereit und die andere wechselrichterbereit ist und dass in der folgenden Spannungshalbwelle die Bereitschaft entsprechend getauscht wird. Mit der beschriebenen Steuereinrichtung beherrscht der Mutator praktisch den ganzen Phasenbereich des Sekundärstromes. In der Praxis ist eine elektrisch wirkende Steuereinrichtung vorzuziehen; die elektrische Steuerung wirkt analog der Steuerung mit Kontaktwalzen.

[4]) Der eine Steuerkontakt gemäss Fig. 4 kombiniert die beiden in Reihe liegenden Kontakte gemäss Fig. 7.

Zwei Vorschläge zur Regelung des Leistungsaustausches zwischen grossen Netzen.

Von *Erich Friedländer*, Berlin-Siemensstadt, und *Wilhelm Wiskott*, Breslau. 621.311.161

Die Arbeit behandelt Mittel zur Verminderung der meist erheblichen Schwankungen der Austauschleistung zwischen gekuppelten grossen Netzen. Die Beziehungen zwischen erzeugter, verbrauchter und gespeicherter Leistung der Netze werden benutzt, um einerseits die Aussichten auf Verwirklichung einer Netzkupplung mit veränderlicher Kupplungsinduktivität abzuschätzen und anderseits ein neues Steuerverfahren zur Beeinflussung der Kraftwerke herzuleiten.

Als Kupplungsdrosselspule eignet sich auf Grund der natürlichen Kennlinie die mit Gleichstrom vormagnetisierte Drosselspule besonders. Die Ausnutzung der hier vorhandenen Möglichkeiten stellt jedoch so hohe Anforderungen an die Regelgeschwindigkeit der Kraftmaschinen, dass man nur mit höchstentwickelten Dampfkraftmaschinensteuerungen daran denken kann, den Bedingungen der Anordnung zu genügen. Diese werden unter Berücksichtigung der Stabilitätsbedingungen abgeleitet, die bei Ueberschreitung des Regelbereichs noch zu erfüllen sind.

Das Steuerverfahren, das auch ohne Zusammenhang mit der Kupplungsdrosselspule (d. h. bei starrer Netzkupplung) angewendet werden kann, beruht auf der Notwendigkeit, den wahren Leistungsbedarf des ganzen Netzes unter Berücksichtigung der augenblicklichen Beanspruchung aller Schwungenergien aus der zeitlichen Aenderung der Frequenz zu ermitteln und hiernach den Steuereinfluss zu bemessen.

Cette étude traite des moyens de diminuer les variations souvent importantes de la puissance échangée entre grands réseaux interconnectés. Les relations entre la puissance produite, la puissance consommée et la puissance accumulée dans les réseaux sont utilisées d'une part pour estimer les chances de réalisation d'un couplage entre réseaux à l'aide d'inductivités variables et, d'autre part, pour développer un nouveau procédé de commande des usines.

La réactance à prémagnétisation par courant continu se prête particulièrement bien au couplage, sur la base de sa caractéristique naturelle. Cependant, l'exploitation des possibilités offertes par ce procédé pose de si fortes exigences à la vitesse de régulation des moteurs primaires que l'on ne peut songer à remplir ces exigences qu'avec des machines à vapeur à commande ultra-perfectionnée. Ces exigences sont déduites en tenant compte des conditions de stabilité qui doivent encore être remplies lorsque l'étendue de réglage est dépassée.

Le procédé de commande, qui peut aussi être appliqué sans réactance de couplage (c'est-à-dire dans des réseaux à couplage rigide), repose sur la nécessité de déterminer la demande véritable d'énergie de tout le réseau en tenant compte de la sollicitation momentanée de toute l'énergie des masses tournantes par suite des variations de la fréquence, pour pouvoir y conformer la commande des usines.

Die synchrone Kupplung ganzer Netze untereinander mit festgelegtem Leistungsaustausch ist eine Aufgabe, deren bisherige Lösungen oft Enttäuschungen bezüglich der erreichbaren Innehaltung einer bestimmten Leistungsübergabe gebracht haben. Wie bei jedem Regelproblem, bei dem die geregelte Grösse zunächst dauernde Schwankungen zeigt, hat man sich bemüht, diese Aufgabe in der Erkenntnis des Einflusses von Massenträgheiten und Messgliedverzögerungen, mit den auch bei anderen Regelaufgaben erprobten Hilfsmitteln zu bewältigen. Man beschränkte die *Regelgeschwindigkeit*, ordnete *Rückführungen* verschiedener Art an, führte eine *vermehrte Statik* ein mit nachfolgender, stark verzögerter Feinregulierung (doppelte Rückführung) usw. Das Ergebnis aller dieser Versuche ging, wie fast jeder Registrierstreifen der Leistungsübergabe zwischen grösseren Netzen beweist, nicht über Erfolge hinaus, mit denen man sich bei den meisten anderen Regelaufgaben nicht zufrieden geben würde. Der Versuch liegt nahe, sich den Grund für diese Schwierigkeiten noch einmal klar zu machen, um dadurch doch vielleicht brauchbaren Lösungen näher zu kommen.

1. Leistung und Energieinhalt selbständiger Netze.

Die kinetische Energie aller in einem grossen Netz umlaufenden Schwungmassen stellt einen Vorrat an verfügbarer Arbeit dar, von dem vielfach

mehr Gebrauch gemacht wird als es äusserlich in Erscheinung tritt.

Man liest aus dem Zusammenhang zwischen der installierten Maschinenleistung P_m und der Normalanlaufzeit T_A des totalen Netzes mit der Normal-Betriebsfrequenz f_n die mit einer Frequenzänderung verbundene Leistungsentnahme aus den Schwungmassen ab zu

$$p = P_m \cdot \frac{T_A}{f_n} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \qquad (1)$$

Setzt man hierin für $f_n = 50/\mathrm{s}$ und $T_A = 25$ s (dieser Wert schwankt für die verschiedenen Betriebe je nach Art der Generatoren und ihres Antriebs, nach der Belastung durch Motoren, Arbeitsmaschinen, Lichtbelastung usw. schätzungsweise etwa in den Grenzen 15 bis 40 s), so findet man auch angenähert

$$\frac{p}{P_m} \approx \frac{1}{2} \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \qquad (2)$$

Wenn also in einem Netz mit einer installierten Maschinenleistung von z. B. 500 000 kW die Frequenz innerhalb von einer Sekunde um 0,1 Periode, d. h. um 0,2 % ihres Nennwertes sich ändert, so hat das Netz innerhalb dieser Sekunde einen Leistungsbetrag von 5 % seiner gesamten installierten Leistung, nämlich 25 000 kW aus seiner kinetischen Energie geliefert.

Dass diese *vorübergehenden Leistungsabgaben* meist *unbekannt* bleiben, erklärt sich daraus, dass sie nicht annähernd aus irgendwelchen Leistungsregistrierstreifen gefunden werden könnten, da die Energie ja vielfach beim Abnehmer selbst gespeichert ist und nur etwa zur Hälfte aus den Schwungenergien der Generatoren und Turbinen gedeckt wird. Nur dieser Teil ist aber der Messung zugänglich.

Bei kurzzeitigen Fehlbeträgen zwischen erzeugter und verbrauchter Leistung, wie sie in grossen Netzen mit ständig fluktuierendem Verbrauch, aber nur träge veränderlicher Erzeugung selbstverständlich vorkommen, bedeutet daher die *mechanische Energiereserve* eine erhebliche *Schonung der Regelbeanspruchungen* insbesondere des frequenzfahrenden Kraftwerks. Hätte man die oben vorausgesetzte Frequenzänderung durch schnellen Regeleingriff auch nur etwa auf die Hälfte vermindern wollen, so müsste eine Leistung von etwa 15 000 kW binnen kürzester Zeit zur Verfügung stehen, um im nächsten Augenblick wieder zu verschwinden.

2. Schwungleistungsaustausch zwischen gekuppelten Netzen.

a) Starre Kupplung.

Nimmt man nun an, dass 2 selbständige Netze dieser Art starr miteinander über eine Verbindungsleitung gekoppelt sind, von denen jedes aus seiner Energiereserve bei selbständigem Betrieb nach Bedarf schöpfen könnte, so wird offenbar durch die Tatsache der *starren* Kupplung, also der gemeinsamen Frequenz, die *Schwungenergie* des gesamten Netzes *nur noch gemeinsam* verfügbar. Es kann hierbei z. B. einmal vorkommen, dass das eine Netz in einem Augenblick gerade so viel Leistung aus seinen Schwungmassen entziehen will, wie das andere Netz an Leistung eben übrig hat und sonst zur Steigerung seiner Frequenz verbraucht hätte. Der Erfolg wäre in diesem Grenzfall, dass die Bedürfnisse beider Netze sich die Waage halten, so dass die gemeinsame Frequenz jetzt konstant bleibt. Die freigewordene Leistung des einen Netzes wird aber hierbei in voller Höhe zur Bedarfsdeckung des anderen verwendet, sie muss also über die Kuppelleitung übertragen werden. In einem anderen Augenblick, in dem gerade Leistungsüberschuss oder Leistungsmangel in beiden Netzen gleichzeitig auftritt, wird die zusätzlich ausgetauschte Leistung Null sein, dafür ändern beide Netze gemeinsam ihre Frequenz.

Diese Zusammenhänge werden durch die Leistungs-Gleichungen beider Netze beschrieben. In Fig. 1 ist hierzu das Schema zweier starr gekuppelter Netze gezeigt. In jedem Netz setzt sich im Beharrungszustand die erzeugte Leistung aus derjenigen aller Generatoren P_{g1} (bzw. P_{g2}) und der ausgetauschten Soll-Leistung + (bzw. —) P_{21} zu-

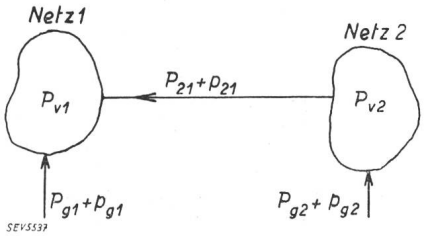


Fig. 1.

sammen. Diese erzeugte Gesamtleistung muss mit der verbrauchten Leistung P_{v1} (bzw. P_{v2}) übereinstimmen. Es wird nun angenommen, dass den verbrauchten Leistungen P_{v1} und P_{v2} der beiderseitigen Netze in einem gegebenen Augenblick ausser den *Sollwerten* von Erzeugung und Fremdbezug (bzw. -abgabe) noch gewisse *Fehlbeträge* der gelieferten Leistung gegenüberstehen (in Fig. 1 durch kleine Buchstaben gekennzeichnet), die in die gemeinsame *Schwungmasse* geliefert (bzw. aus ihr bezogen) werden müssen. p_{g1} bzw. p_{g2} sind dann z. B. diejenigen Differenzleistungen der Erzeugung, die zum Verschwinden gebracht werden müssen, um gleichzeitig die ausgetauschte Fehlerleistung p_{21} zu Null machen. Mit dieser Definition gilt

$$\left.\begin{aligned} &\underbrace{P_{g1}+p_{g1}}_{\text{Erzeugung}} + \underbrace{P_{21}+p_{21}}_{\text{Austausch}} - \underbrace{P_{v1}}_{\text{Verbrauch}} \\ &\qquad = \underbrace{P_{m1} \cdot \frac{T_{A1}}{f_n} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}}_{\text{Schwungleistung}} \\ &P_{g2} + p_{g2} - P_{21} - p_{21} - P_{v2} = P_{m2} \frac{T_{A2}}{f_n} \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

bzw. wegen

$$\left.\begin{aligned} P_{g1} + P_{21} &= P_{v1} \\ P_{g2} - P_{21} &= P_{v2} \end{aligned}\right\} \text{(Beharrungsgleichung)} \quad (4)$$

$$\left.\begin{aligned} p_{g1} + p_{21} &= K_1 \frac{df}{dt} \\ p_{g2} - p_{21} &= K_2 \frac{df}{dt} \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{p_{g1} + p_{g2}}{K_1 + K_2} \quad (6)$$

$$p_{21} = \frac{p_{g1} - p_{g2}}{2} + \frac{K_1 - K_2}{2} \cdot \frac{df}{dt} \quad (7)$$

oder auch

$$p_{21} = p_{g2} \frac{K_1}{K_1 + K_2} - p_{g1} \frac{K_2}{K_1 + K_2} \quad (8)$$

In dem Grenzfall $K_1 = K_2$ (Kuppelstelle zwischen zwei etwa gleich grossen Netzen) ergibt sich daher die Frequenzänderung proportional der Summe, die ausgetauschte Leistung gleich der halben Differenz der beiderseitigen Fehlbeträge der erzeugten Leistung.

b) Elastische Kupplung.

Verzichtet man auf die Annahme starrer Kupplung, so ist zwischen beiden Netzen eine *relative Winkelbewegung*, also auch ein *vorübergehender Frequenzunterschied möglich.* Es sollen für diesen Fall entsprechend Gl. (5) nur noch die Fehlerleistungen an Hand der Fig. 2 betrachtet werden, in-

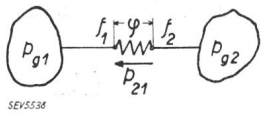


Fig. 2.

dem als Kuppelglied zunächst eine gewöhnliche (lineare) Drosselspule vorausgesetzt wird. Die beiden Netze besitzen dann je eine Frequenz f_1 und f_2, die aber im allgemeinen Fall nicht selbständig sind, sondern durch die Beziehung

$$f_1 - f_2 = \frac{-1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (9)$$

verknüpft sind, wenn unter φ der Winkel der Spannungen beiderseits des Kuppelgliedes verstanden wird. Im übrigen gilt ähnlich (5)

$$\left.\begin{aligned} p_{g1} + p_{21} &= K_1 \cdot \frac{df_1}{dt} \\ p_{g2} - p_{21} &= K_2 \cdot \frac{df_2}{dt} \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Bei der einfachen elastischen Kupplung durch eine Drosselspule ist φ der übertragenen Leistung proportional. Ist P_D die Blindleistung, die die Drosselspule bei voller Betriebsspannung aufnehmen würde, so folgt

$$\varphi = \frac{\omega L \cdot I}{U} = \frac{P_{21} + p_{21}}{P_D} \quad (11)$$

und also

$$\frac{df_1}{dt} - \frac{df_2}{dt} = \frac{-1}{2\pi P_D} \cdot \frac{d^2 p_{21}}{dt^2} \quad (12)$$

In (10) eingesetzt, erhält man hieraus den Verlauf von p_{12} bei gegebenem p_1 und p_2 durch

$$\frac{d^2 p_{21}}{dt^2} + 2\pi P_D \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right) p_{21} = 2\pi P_D \left(\frac{p_{g2}}{K_2} - \frac{p_{g1}}{K_1}\right) \quad (13)$$

Diese Gleichung spiegelt die bekannte Folge [1]) der elastischen Kupplung wieder, dass über jeden Regelvorgang eine sehr langsame *Ausgleichsschwingung* von der Eigenfrequenz

$$\nu = \sqrt{\frac{P_D \left(\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)}{2\pi}} = \sqrt{\frac{\frac{P_D}{P_I} \cdot \frac{f_p}{T_{a1}} + \frac{P_D}{P_I} \cdot \frac{f_p}{T_{a2}}}{2\pi}} \approx \sqrt{\frac{\frac{P_D}{P_I} + \frac{P_D}{P_{II}}}{\pi}} \quad (14)$$

gelagert ist (Grössenordnung der Schwingungsdauer 5 bis 10 s).

Für den *Beharrungszustand* $\left(\frac{d^2 p_{21}}{dt^2} = 0\right)$ folgt die gleiche Beziehung (8) zwischen Fehlerzeugung und Austauschleistung wie bei starrer Kupplung.

c) Gleitende Kupplung.

Die dritte Art der Kupplung verdient besonderes Interesse, bei der — wenigstens für eine beschränkte Zeit — der Leistungsübergang erzwungen konstant bleibt, dafür aber die Frequenzen f_1 und f_2 von einander unabhängig bleiben. Diese Kupplungsart umschliesst die eigentlich erstrebenswerte, *asynchrone Netzverbindung mit erzwungenem Leistungsaustausch,* die nur in den naheliegenden, heutigen Ausführungsmöglichkeiten (Motorgenerator, Gleichrichter-Wechselrichter) meist zu teuer wird. Hierbei wird $p_{12} = 0$, und man findet mit (9) und (10) eine Bedingung für den Verlauf des Phasenwinkels φ zwischen den beiden Netzen in Abhängigkeit von den beiderseitigen Fehlern der Leistungserzeugung

$$\left(\frac{p_{g1}}{K_1} - \frac{p_{g2}}{K_2}\right) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (15)$$

oder mit

$$K_1 \approx \frac{P_{m1}}{2} \qquad K_2 \approx \frac{P_{m2}}{2}$$

[1]) R. Rüdenberg, Wiss. Ver. a. d. Siemens Konz. Bd. XI, 1, S. 69.

$$\frac{p_{g1}}{P_{m1}} - \frac{p_{g2}}{P_{m2}} = \frac{1}{4\pi} \frac{d^2 \varphi}{d t^2} \qquad (16)$$

Diese Gleichung sagt, dass der Winkel zwischen den Spannungen der beiden Netze in Abhängigkeit von der *Beschleunigung* durch die Differenz der anteiligen Leistungsfehler einem «*Fallgesetz*» unterworfen ist. Es ist hierbei wesentlich, die Zeiten zu wissen, die für einen bestimmten, vielleicht zulässigen Winkelweg erforderlich sind. Es sei der Fall angenommen, dass $\frac{p_1}{P_{m1}} = -\frac{p_2}{P_{m2}} = \frac{1}{20}$ sei, d. h. in einem gegebenen Augenblick soll jedes Kraftwerk eine Fehlerleistung von 5 % der gesamten installierten Maschinenleistung abgeben. Man fragt nach der Zeit, die ein Winkelweg von z. B. $6^\circ = \frac{\pi}{30}$ erfordert. Wegen

$\varphi = 2\pi \left(\frac{p_{g1}}{P_{m1}} - \frac{p_{g2}}{P_{m2}}\right) \cdot \tau^2$ findet man diese Zeit zu

$$\tau = \sqrt{\frac{10}{60}} = 0{,}41\,\text{s}.$$

Die Grössenordnung dieser Zeit von ½ s zeigt nun, dass es nicht ganz ausserhalb des Bereiches aller heutigen technischen Möglichkeiten liegt, in den meisten Fällen innerhalb der «Fallzeit» *die Beschleunigungen* durch p_{g1} und p_{g2} rechtzeitig *auf regeltechnischem Wege zum Verschwinden zu bringen*, um so eine billigere sychrone Kupplung zweier Netze mit den übrigen vorteilhaften Eigenschaften der asynchronen Kupplung zu erreichen. Hierzu gehört einmal die Schaffung eines *Kuppelgliedes*, das einen wenigstens begrenzten Winkelweg zwischen beiden Netzen ermöglicht, ohne dass sich dabei wie bei der normalen «elastischen» Kupplung sofort die Uebertragungsleistung ändert und ferner ein *Regelverfahren*, welches den steuernden Kraftwerken unverzüglich Aufschluss über p_{g1} und p_{g2} anstatt wie bisher über p_{21} gibt, um den richtigen Regeleingriff zu ermöglichen.

3. Die Kuppeldrosselspule.

a) Grundschema und Kennlinien.

Es leuchtet zunächst ein, dass die Aufgabe, bei verschiedenen Werten von φ (dem Winkel zwischen den zu verbindenden Netzspannungen) gleichbleibende Leistung zu übertragen, grundsätzlich mit einer *Drosselspule* gelöst werden kann, *deren Induktivität* dem augenblicklichen Bedürfnis nach Differenzspannung bei gleichbleibendem Laststrom entsprechend *ständig verändert* werden kann. Diese Aenderung muss aber so schnell vor sich gehen, dass auch stossweise Leistungsänderungen im Netz sofort durch ebensolche Induktivitätsänderungen beantwortet werden. Zur Lösung dieser Aufgabe bietet nun das Verhalten der mit gleichbleibendem *Gleichstrom vormagnetisierten eisengeschlossenen Drosselspule* einen möglichen Weg. Fig. 3 zeigt das bekannte einphasige Schema, Fig. 4 die Spannung an den Klemmen der Drosselspule in Abhängigkeit vom Drosselspulenstrom für verschiedene Werte der Gleichstromvor-

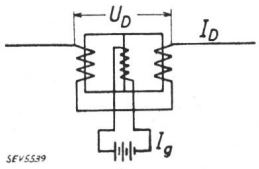


Fig. 3.

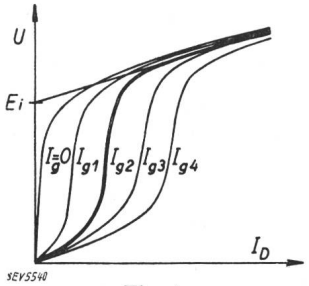
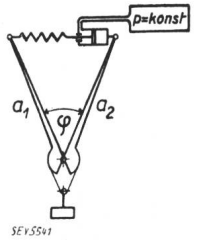


Fig. 4.

magnetisierung. Man erkennt (z. B. die stark ausgezogene Kennlinie), dass in einem weiten Bereich die Spannung U bei nur wenig veränderlichem Strom I_D schwanken kann; dies ist der hier wesentliche *Regelbereich* der Drosselspule. Daran anschliessend findet man starke Stromänderungen bei kleiner Spannungsschwankung möglich. Das Verhalten einer solchen Drosselspule entspricht daher — wenn man vereinfacht im steilen Bereich der Kennlinie die Stromänderung, im Sättigungsbereich die Spannungsänderung vernachlässigt — einer *Gleitverbindung* zwischen zwei Netzen, die beim Erreichen bestimmter «Anschlagpunkte» in eine ziemlich *starre Verbindung übergeht.* Fig. 5 erläutert dieses Ersatzbild an Hand des bekannten Modells einer Kraftübertragung nach Griscom [2]). Die Arme a_1 und a_2 des Modells, die entsprechend

Fig. 5.



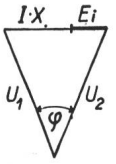


Fig. 6.

der übertragenen Leistung P_{21} einen Winkel φ wie die Polradspannungen zweier gekuppelter Maschinen (Netze) einschliessen, sind hier über einen durch einen Luftzylinder mit Kolben dargestellten Kupplungsmechanismus verbunden, der in einem Bereich freier Beweglichkeit nur eine bestimmte (dem Druck p in einer grösseren Luftkammer entsprechende) Kraft übertragen kann. Erreicht der Kolben in dem Zylinder die eine oder andere Endlage, so wird die Kupplung an dieser Stelle starr.

b) Stabilitäts- und Grenzleistung der mit Gleichstrom vormagnetisierten Netzkupplungsdrosselspule.

Man wird bei einer solchen Art der Netzverbindung zunächst danach fragen müssen, wie der ungewöhnliche Charakter des Kuppelgliedes die *übertragbare Leistung* beeinflusst. Dass die Drosselspule

[2]) S. B. Griscom, Electr. J. 1926, S. 230.

im eigentlichen Regelbereich nicht allein stabil ist, sondern nur durch ständigen Regeleingriff ein stationärer Betrieb möglich ist, wurde bereits erwähnt. Die oben errechnete Fallzeit von etwa ½ s beschränkt dabei die Ausführbarkeit eines solchen Regelverfahrens auf Steuerung der Uebergabeleistung durch *Dampfkraftwerke* mit Reglern, die besonders *kurze Schliesszeiten* der Ventile besitzen. *Wasserkraftmaschinen* sind für die Ausregelung schneller Lastpulsationen grundsätzlich *ungeeignet*.

Man wird angesichts der knappen Regelzeit das Verhalten der Kuppeldrosselspule aber nur dann als zulässig im Sinne der zu verlangenden Betriebssicherheit des ganzen Systems ansehen dürfen, wenn auch bei zu spätem Eingriff des Reglers oder bei ungenügender Leistungsreserve der gesteuerten Maschine das System stabil bleibt. Wohl darf die Grenze der gewünschten Regelleistung mitunter überschritten werden, die Netze dürfen aber dabei nicht auseinanderfallen. Man bestimmt demgemäss die *Grenzleistung* einer solchen Uebertragungsanordnung *in dem Bereich*, in dem die vormagnetisierte Drosselspule bei anwachsender Klemmenspannung in den *Sättigungsast* der Regelcharakteristik übergeht, bzw. bei dem das Ersatzschema Fig. 5 als am Bewegungsanschlag liegend anzusehen ist. Im Griscomschen Modell tritt jetzt an Stelle der reinen Federverbindung eine durch einen starren Stab (oder einen Faden) verlängerte Feder. Dabei soll die Feder alle Induktivitäten im Stromkreis zwischen den als starr anzusehenden Spannungszentren beider Netze einschliesslich der Sättigungsinduktivität der Kuppeldrosselspule selbst darstellen. Das starre Glied bildet die scheinbare in der Drosselspulenkennlinie begründete feste Spannungsquelle mit der EMK E_i nach. Diese EMK findet man aus der Drosselspulencharakteristik durch Verlängern des Sättigungsastes bis zur Ordinatenachse, wie in Fig. 4 gezeigt ist. Denn offenbar kann man sich den gesättigten Teil der Kennlinie auch ersetzt denken durch die Charakteristik einer Maschine mit der EMK E_i und einem inneren Blindwiderstand, der dem Anstieg der Kennlinie im Sättigungsbereich entspricht.

Das Spannungsvektorbild der Anordnung in diesem Arbeitsbereich der Drosselspule ist in Fig. 6 dargestellt. Man findet für den vereinfachten Fall, dass die Spannungen beider Netze übereinstimmend gleich U sind, aus den Beziehungen

$$P = U \cdot I \cos \frac{\varphi}{2} \tag{17}$$

$$U \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{1}{2} (E_i + I \cdot X) \tag{18}$$

die der Fig. 6 zu entnehmen sind, unter Einführung der Abkürzungen

$$\sin \frac{\varphi}{2} = y \tag{19}$$

$$\frac{1}{8} \frac{E_i}{U} = z \tag{20}$$

für den Grenzwinkel φ_{max} die Bedingung

$$y = z + \sqrt{z^2 + \frac{1}{2}} \tag{21}$$

und für die Grenzleistung

$$P_{max} = \frac{U^2}{X} \cdot \frac{2}{y} (1 - y^2)^{3/2} = \frac{U^2}{X} \cdot \lambda \tag{22}$$

$\lambda = \frac{2}{y} (1 - y^2)^{3/2}$ kennzeichnet demnach die Verminderung der Grenzleistung durch E_i. Hieraus lässt sich sofort der Zusammenhang zwischen λ, φ_{max} und $\frac{E_i}{U}$ ablesen, der in Fig. 7 aufgetragen ist. Man sieht, dass der kritische Kippwinkel bei dieser Anordnung 90° übersteigt, dass trotzdem aber die übertragbare Leistung mit wachsendem E_i sinkt. Man wird demnach keinesfalls höhere Werte als $\frac{E}{U} = 0{,}2$ zulassen dürfen, wenn man nicht erhebliche Beschränkungen der Grenzleistung in Kauf nehmen will. Damit wird wiederum der für den Regler im ungesättigten Gebiet freibleibende Fallweg auf ± 6° eingeengt. Daher wurde der Berechnung der ungefähren Fallzeit bereits dieser Winkelweg zugrunde gelegt.

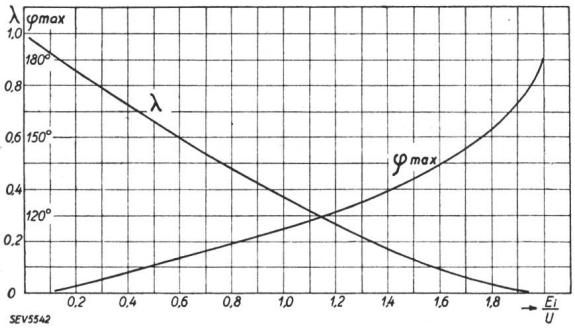


Fig. 7.

c) Schaltung einer Drehstrom-Kuppeldrosselspule.

Die technische Ausführung einer mit Gleichstrom vormagnetisierten Drehstrom-Drosselspule unterscheidet sich von der Einphasenanordnung ausschliesslich durch die Ausnutzung der bei Drehstrom gegebenen Möglichkeiten, durch Zusammenfassung der Eisenkerne Rückschlusseisen zu sparen. Ferner muss man durch richtige Wicklungsverteilung für möglichst gleichmässige Beanspruchung der Joche sorgen. Die so entstehende einfache Steuerdrosselspule ist in dem Uebersichtsschaltbild Fig. 8 als KD bezeichnet.

Da vielfach die mit der Verwendung gesättigten Eisens entstehenden Oberwellen bei grossen Leistungen störend sind, so darf an dieser Stelle kurz darauf hingewiesen werden, dass der Oberwellenausgleich auch für solche Steuerdrosselspulen technisch keine Schwierigkeiten bereitet: man schaltet zwei Drosselspulen ähnlicher Bauart zusammen

und sorgt z. B. durch Zickzackschaltung der Wechselstromwicklungen für eine Flussversetzung von je 30° in beiden Drosselspulen. Dadurch verschwinden alle Oberwellen bis zur 9. einschliesslich.

4. Der Steuerbefehlgeber.

Die Aufgabe, eine geeignete Anordnung zu finden, die möglichst schnell den *wahren Leistungsbedarf* im Netz ermittelt und *danach* die Befehle auf einen geeigneten Maschinenregler geben kann, lässt sich grundsätzlich in Anlehnung an Gl. (5) und Gl. (10) anfassen. An der Kuppelstelle kann die Austauschleistung P_{21} und die Frequenz f bzw. f_1 und f_2 leicht gemessen werden. Was man sucht, ist der wahre Leistungsfehler in einem der beiden oder in den Netzen beiderseits der Kuppelstelle, d. h. p_{g1} und p_{g2}. Dieser ergibt sich aus Gl. (10) z. B. zu

$$p_{g1} = -p_{21} + K_1 \cdot \frac{\mathrm{d}f_1}{\mathrm{d}t}$$
$$p_{g2} = +p_{21} + K_2 \cdot \frac{\mathrm{d}f_2}{\mathrm{d}t} \qquad (23)$$

Damit ist die Vorschrift für die Ausgestaltung des Steuermechanismus bereits angegeben: Man muss ein Steuerrelais verwenden, dessen Bewegung einerseits (wie bisher gebräuchlich) von der Abweichung der Durchgangsleistung P_{21} vom Sollwert beeinflusst wird. Dazu kommt aber noch ein Korrekturglied, das eine der Frequenzänderungsgeschwindigkeit proportionale Zusatzkraft ausübt.

Das Leistungsglied kann man durch ein Wattmetersystem einführen. Ein viel empfindlicheres Mass wird unter Einführung der vormagnetisierten Kupplungsdrosselspule deren Klemmenspannung. Das Frequenzänderungselement lässt sich auf mannigfache Weise herstellen. Man geht, um Unabhängigkeit von der Netzspannung zu gewährleisten, zweckmässig über irgendwelche Konstanthalteschaltungen auf eine frequenzempfindliche Anordnung wie z. B. Resonanz- oder Kettenglieder und differenziert die so erhaltenen frequenzproportionalen Messgrössen nach Gleichrichtung, z. B. durch Ausnutzung eines Kondensatorladestromes als Steuermessgrösse.

5. Beispiel einer Gesamtanordnung.

Um eine Vorstellung von dem Gesamtbedarf für die Durchführung eines solchen Regelverfahrens für die Beherrschung der Austauschleistung zwischen grossen Netzen zu vermitteln, ist in Fig. 8 das Grundschema eines Schaltbildes für eine Netzkupplung gezeigt, bei der die Beeinflussung der Leistungserzeugung gleichzeitig nach 2 Seiten erfolgt.

Die 6schenklige Kuppeldrosselspule trägt ausser den 6 Netzwicklungen noch eine durchgehende Erregerwicklung, die über alle 6 Schenkel in Reihe geschaltet ist und von einem Gleichrichter aus dem Netz selbst mit Gleichstrom gespeist wird. Dieser Gleichstrom bestimmt zugleich die Höhe der übertragenen Leistung. Sieht man hier einen gesteuerten Gleichrichter vor, so lässt sich auch die Wahl der Austauschleistung mit besonders bequem verstellbaren Steuervorrichtungen nach Wunsch regeln. Die Steuerung der Gesamterzeugung erfolgt durch je ein Relais R_1 und R_2, dessen oberes Messglied von der Spannung der Kuppeldrosselspule beeinflusst wird, während dem untern

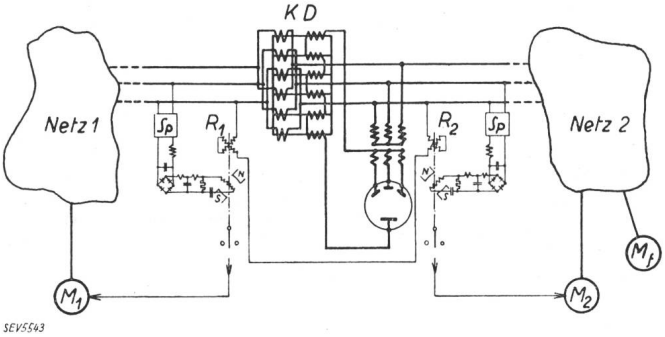


Fig. 8.

der der Frequenzänderung proportionale Ladestrom eines Kondensators zugeführt wird. Die Spannung dieses Kondensators wird frequenzproportional gehalten unter Zwischenschaltung eines Gleichhalters S_p, der örtliche Spannungsschwankungen fernhält und eines im anlaufenden Ast arbeitenden Resonanzkreises, dessen Kondensatorspannung z. B. gleichgerichtet und dann geglättet wird. Eine Verstellung dieses Steuerkreises ist bei verändertem Sollwert der Austauschleistung (verändertem Drosselspulengleichstrom) nicht erforderlich.

Die Steuerung der Uebergabeleistung von nur einer Seite aus genügt auch, sofern von der andern Seite her die Frequenzregelung erfolgt oder auf genauere Frequenzhaltung verzichtet wird, als die Statik der Kraftmaschinenregler von selbst hergibt. Dagegen ist gleichzeitige Steuerung der Uebergabeleistung von 2 Seiten her — wie in Fig. 8 ausgeführt — noch neben einer zusätzlichen Frequenzführung zulässig. Denn die beiden Maschinen M_1 und M_2 schieben sich nur gegenseitig Leistung zu je nach Bedarf an der Uebergabestelle, lassen aber die Frequenz noch frei. Die Doppelregelung hat den Vorteil, dass die gesamten Regelanforderungen auf 3 Maschinen verteilt werden, von denen M_1 den Leistungsbedarf von Netz 1, M_2 denjenigen von Netz 2 und M_f die Gesamtenergie der Schwungmassen aller Netzteile überwacht (Frequenz). Dadurch ist die frequenzfahrende Maschine von denjenigen Laststössen befreit, die gegenseitig in beiden Netzen auftreten.

6. Voraussetzungen für die Anwendung.

So aussichtsreich diese Vorzüge des Steuerprinzips scheinen, so bleibt für den Erfolg der Drosselspulenkupplung doch noch eine Unsicherheit bezüglich des erforderlichen Regulierspiels, der Fall-

zeit und Regelgeschwindigkeit, die in den durchgerechneten Zahlenbeispielen u. a. auch dadurch zum Ausdruck kommt, dass bei den vorausgesetzten Werten von relativer Leistungsschwankung und Regulierzeit nur eben die äussersten Grenzen des Zulässigen erreicht werden. Da die wesentlichste Einflussgrösse, deren Beherrschung die vorliegende Aufgabe gilt, die natürliche, *regellose Lastschwankung* ist, diese aber im Verhältnis zur betriebenen Maschinenleistung grosser Netze in Wirklichkeit ausserordentlich klein ist, so wird der zu beachtende Einfluss bei Laboratoriumsversuchen von störenden Nebeneinflüssen (insbesondere Netzspannungsschwankungen) leicht völlig zugedeckt. Infolgedessen könnte wohl nur ein *Versuch im grossen Netz* zuverlässigen Aufschluss über die praktische Durchführbarkeit der beschriebenen Netzkupplung geben.

Beispiele über die Anwendungsmöglichkeit der elektrischen Heizung.

Von *E. Bindler*, St-Blaise.

(Mitteilung der Berna A.-G., Abt. Elektr. Apparate, St-Blaise.)

621.364.3

Es wird darauf hingewiesen, dass bei günstigen Verhältnissen und bei zweckmässiger Ausführung der Anlage die elektrische Raumheizung wirtschaftlich sein und sowohl den Inhaber als auch das Energie liefernde Werk befriedigen kann. Es werden einige erfolgreiche Anlagen kurz beschrieben: Schulhäuser, Räume eines Kraftwerkes, Kirchen; es wird auch auf andere Anwendungsmöglichkeiten hingewiesen.

L'auteur démontre que, dans des conditions favorables et lorsque l'installation est appropriée, le chauffage électrique peut être économique et satisfaire aussi bien l'abonné que le distributeur d'énergie. L'auteur décrit ensuite quelques installations intéressantes: maisons d'école, locaux d'usine, églises et rappelle quelques autres possibilités d'application.

Bei der Verwendung der elektrischen Energie für Heizungszwecke muss vor allem ihre Wirtschaftlichkeit und damit ihre Konkurrenzfähigkeit sorgfältig untersucht werden. Der hohe Wirkungsgrad dieser Heizung sowie ihre Unabhängigkeit vom ausländischen Brennstoff lassen oft ein voreiliges Urteil zu ihren Gunsten aufkommen; Laienkreise begrüssen sie immer wieder als willkommene Lösung des Heizungsproblems. In Fachkreisen wird dagegen zu oft die Auffassung über die Unzweckmässigkeit und Unbrauchbarkeit der elektrischen Heizung für Wohn- und Arbeitsräume verallgemeinert.

Eine gründliche Untersuchung der Frage führt aber zur Feststellung, dass auch hier allgemein gefasste Urteile unrichtig sind. Nur eine genaue Prüfung der für die Heizung massgebenden Verhältnisse in jedem Raum durch die Fachleute in Verbindung mit dem Energielieferanten und den besondern Netzverhältnissen kann ein erschöpfendes Bild über die Zweckmässigkeit oder Unbrauchbarkeit der elektrischen Heizung für jeden einzelnen Fall ergeben.

Im folgenden seien einige interessante Anlagen kurz beschrieben, deren Zweckmässigkeit im Betrieb bewiesen wurde.

Heizungsanlage im Schulhaus Meinier.
(Gebiet des Elektrizitätswerkes Genf.)

Die Verteilung der Räume ist aus Fig. 1 und 2 ersichtlich; der Kubikinhalt des Schulzimmers I beträgt 150 m³, derjenige des Schulzimmers II 110 m³, derjenige des Schulzimmers IV 160 m³.

Die elektrische Heizungsanlage ist seit 1934 in Betrieb. Sie wird vollständig automatisch-thermostatisch reguliert. Die Totalleistung beträgt ca. 40 kW. Die tägliche Betriebszeit ist 8 bis 12 h und 13 h bis 16 h.

Ein günstiger Energiepreis wurde vom EW Genf nach spezieller Vereinbarung mit der Gemeinde angesetzt, unter der Bedingung, dass die Apparatur von 6 h bis 8 h und von 16 h bis 22 h automatisch abgeschaltet wird. In jedem Schulzimmer wird die Temperatur automatisch durch Thermostaten gesteuert und auf einem konstanten Wert (20° C) gehalten. Das Einschalten der gesamten Leistung geschieht durch Fernschalter, die von einer Schaltuhr gesteuert werden. Die Fernschalter sind als Verzögerungsschalter ausgebildet, so dass beim Ein- und Ausschalten der ganzen Apparatur durch die Schaltuhr die einzelnen Fernschalter Leistungsgruppen von

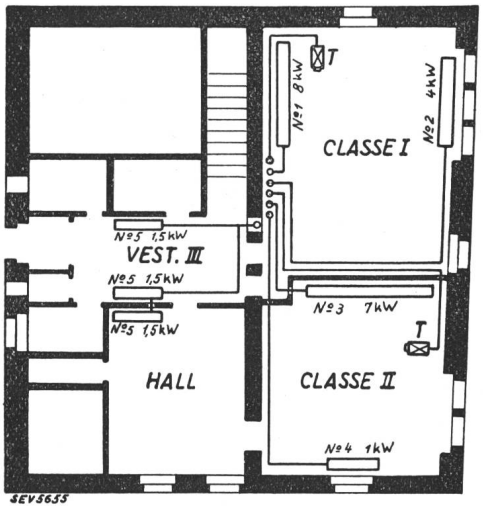
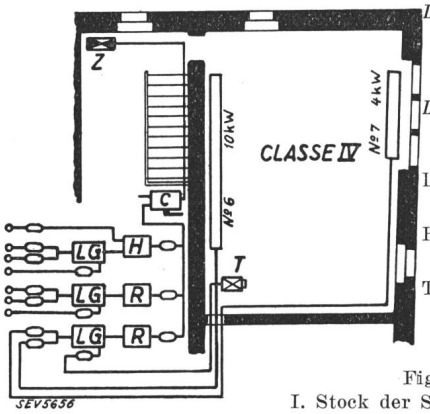


Fig. 1.
Erdgeschoss der Schule Meinier.



Legende zu Fig. 1 und 2.
C Umschalter.
H Schaltuhr.
R Relais.
LG Automatische Schalter.
T Thermostaten.
Z Zählertafel.
Leitungen:
Hauptleitung *Z—C* 4·20 mm².
Heizkörperleitungen: 1,5... 8 kW: 4·2,5 mm². 10 kW: 4·4 mm².
Thermostatenleitungen: 2·1 mm², bzw. 3·1 mm².

Fig. 2.
I. Stock der Schule Meinier.

maximal 15 kW mit ca. 10 Sekunden gegenseitiger Verzögerung ein- und ausschalten (Kaskadenschaltung).

Um eine kurze Anheizdauer und einen langsamen Auftrieb der Wärme zur Zimmerdecke zu erreichen, werden