

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 28 (1937)
Heft: 22

Artikel: Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden
Autor: Darrieus, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059879>

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>

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des
Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephone 51.742
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXVIII. Jahrgang

N^o 22

Mittwoch, 27. Oktober 1937

Frequenz- und Leistungs-Regulierung in grossen Netzverbänden.

Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV vom 1. Mai 1937
im Kursaal Schänzli in Bern.

621.316.728: 621.311.1

Die Diskussionsversammlung des SEV vom 1. Mai 1937 war von 130 Mitgliedern und Gästen besucht. Sie fand unter dem Vorsitz von Herrn Dir. M. Schiesser, Präsident des SEV, statt.

Einleitend umschrieb der Vorsitzende das Thema: Aus den vielen Problemen, welche die Kupplung der Elektrizitätswerke stellt, sollte nur ein einziges, nämlich die Regulierung von Frequenz und Leistung herausgenommen werden. Alle andern, wie Verteilung von Wirk- und Blindleistung, Spannungsregulierung, Selektivschutz usw., sollen nicht in Betracht gezogen werden.

Die Versammlung wurde wie früher organisiert; man hatte mit dem Versand der Probeabzüge der zu haltenden Referate vor der Versammlung gute Erfahrungen gemacht. Diese Vorabzüge erlaubten den Teilnehmern, sich auf die Diskussion vorzubereiten und sich auf das gestellte Thema zu konzentrieren.

In dieser Nummer veröffentlichen wir die gehaltenen Vorträge und Diskussionsbeiträge in folgender Reihenfolge, die etwa dem Verlauf der Versammlung entspricht:

1. Einführungen:

a) G. Darrieus, Chef des Etudes techniques de la Cie Electro-Mécanique, Paris: Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden.

b) Prof. R. Dubs, Eidg. Techn. Hochschule, Zürich: Die Rückwirkung der Reguliervorgänge auf hydraulische Anlagen.

2. Referate von Vertretern von Elektrizitätswerken:

F. Hug, Ingenieur der Nordostschweiz. Kraftwerke A.-G., Baden: Aus der Praxis der Werke; die Bedürfnisse der Werke.

3. Referate von Vertretern der Fabrikationsfirmen:

a) R. Keller, Oberingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden: Regulieranlagen; ein elektrischer Leistungsregler.

b) H. Wierer, Ingenieur der Siemens-Relais-Gemeinschaft, Berlin: Frequenz- und Leistungsregler.

c) D. Gaden, Ingénieur en chef des Ateliers des Charmilles S. A., Genève: De l'utilisation des régulateurs automatiques mécaniques des machines motrices de groupes électrogènes pour le réglage des interconnexions.

4. Allgemeine Diskussion.

I. Einführungen.

Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden.

Von G. Darrieus, Paris *).

Die Regulierung zusammengesetzter Netzsysteme, die bereits bestehen oder im Entstehen begriffen sind, mit ihren zahlreichen und verwickelten veränderlichen Grössen, erscheint auf den ersten Blick als ein unentwirrbares Problem, dessen vollkommene Lösung übrigens von der Praxis nicht immer abgewartet wurde. Demgegenüber ist es jedoch bemerkenswert, dass die zweckmässige Untersuchung des Problems ermöglicht, für jedes Netz eine einfache Kombination der massgebenden Grössen zu ermitteln; die Form dieser Kombination bestätigt und präzisiert diejenige, welche die gemischte Frequenz- und Leistungsregulierung ahnen liess. Die erforderlichen Messapparate existieren bereits.

Diese natürliche Lösung, welche zwischen den beteiligten Werken keinen willkürlichen Unterschied schafft, kann für den stationären Betrieb als erprobt angesehen werden. Sie passt sich aber ausserdem ohne Schwierigkeiten oder zusätzliche Komplikationen selbst den verwickeltesten Fällen an und scheint auf lange Zeit hinaus normalen Anwendungszwecken praktisch genügen zu können.

Das gleiche Prinzip erlaubt zudem die in gewissen Fällen gerechtfertigte, sinngemässe Anwendung der Regulierung auf die nichtstationäre (Uebergangs-)Periode, in deren Verlauf sich der Einfluss der Reaktanzen des Netzes und der Trägheit der umlaufenden Maschinenteile geltend macht.

Bien que le réglage des vastes systèmes d'interconnexion déjà réalisés ou en cours d'élaboration, paraisse a priori devoir constituer, avec ses variables nombreuses et enchevêtrées, un problème inextricable, dont une solution pleinement satisfaisante n'a d'ailleurs pas toujours été attendue, il est remarquable au contraire que l'étude rationnelle du problème permette de dégager, pour chaque réseau, une combinaison simple des seules grandeurs qui le concernent, dont la forme confirme en la précisant celle que pressentait le réglage mixte fréquence-puissance et pour laquelle les appareils de mesure existent déjà.

Cette solution naturelle qui n'établit aucune différenciation arbitraire entre les participants et qui, pour le régime permanent, peut être considérée comme éprouvée, s'adapte sans difficultés ni complication additionnelle aux cas les plus complexes, et paraît devoir suffire pratiquement d'ici longtemps aux applications courantes.

Les mêmes principes permettent d'ailleurs de réaliser une extension rationnelle, justifiable en certains cas particuliers, du réglage à la période variable au cours de laquelle interviennent les réactances du réseau et l'inertie des machines.

*) Der Vortrag wurde in französischer Sprache gehalten.

Einleitung.

Obgleich die Handhabung des Parallelbetriebes bis auf die Zeit des Entstehens der Wechselstromnetze zurückreicht und dessen technische und wirtschaftliche Vorteile seit langem bekannt sind, hat doch erst in den letzten Jahren und besonders im Verlauf der gegenwärtigen Wirtschaftskrise die Sorge um eine bessere Ausnutzung der bestehenden Anlagen unter Erweiterung ihres Verwendungsbereiches und möglicher Vermeidung neuer Kapitalinvestitionen zu einer raschen Entwicklung des Netzzusammenschlusses geführt.

Der grösste Teil des französischen Netzes bildet seit einigen Monaten ein ausgedehntes Ganzes, das sich von Marseille bis Nantes über Paris und die Ostgrenze erstreckt und sich jenseits dieser in entfernte und manchmal schwer bestimmbare Grenzen verliert.

Die Tatsache, dass sich bei einem solchen System benachbarte Netze dem Ganzen anschliessen können, ohne dass alle Teilnehmer notwendigerweise davon unterrichtet sind, rückt die ausserordentliche Leichtigkeit, mit der sich im allgemeinen das Parallelarbeiten vollzieht, ins rechte Licht. Die historische Entwicklung weist nur eine sehr geringe Zahl wirklicher technischer Schwierigkeiten auf, die wegen ihrer Seltenheit heute sozusagen vergessen sind, wie z. B. die negative Dämpfung von Maschinen mit vollständig geblechten Polen und mit Leitungsverbindungen von zu grossem Widerstand oder zu geringer Spannung.

Diese Einfachheit und die erzielten Erfolge haben vielleicht zu einer Unterschätzung einzelner, noch zu lösender Spezialprobleme geführt, so dass unter dem Zwang der auf dem Spiel stehenden Interessen der Abschluss von Energielieferungsverträgen nicht selten der eine vollständig sachgemässe Ausführung gewährleistenden technischen Lösung vorangeht ist.

Gleichwohl darf man davon überzeugt sein, dass diese technische Lösung in naher Zukunft aufkommen und allen Vertragspartnern binnen kurzem einen vollkommenen Erfolg der zur Zeit in der Verwirklichung begriffenen und sich sehr rasch weiter ausbreitenden Netzzusammenschlüsse gewährleisten wird.

Regulierung der Frequenz.

Das Zusammenfassen sämtlicher parallel geschalteten Maschinen unter ein und dieselbe Frequenz, unabhängig von der Lage dieser Maschinen im Netz, verlangt eine Vereinbarung über die Regelung dieser gemeinschaftlichen Grösse, damit sich nicht binnen kurzem eine ungewollte Lastverteilung zwischen den einzelnen Werken einstellt. Es sei erinnert an die sehr einfache Lösung, die vor ungefähr 20 Jahren in dem «Loire et Centre»-Netz und darauf für einige Zeit in demjenigen der «Union des producteurs d'électricité des Pyrénées occidentales» zur Verwendung kam. Man teilte die Werke in verschiedene Klassen ein, nach Massgabe ihrer Produktionskosten, und teilte ihnen bestimmte,

Uebersetzung.

nach abnehmenden Produktionskosten gestaffelte Frequenzbänder zu mit der Vorschrift, dass man in jeder Klasse nur die Frequenz zu regulieren hat, sobald diese in das ihr zugeteilte Frequenzband fällt.

Dieses System erfordert keine besonderen Vorbereitungen; es passt sich von selbst allen normalen oder zufälligen Schwankungen der Belastungskurve an; es arbeitet ohne jede Fernverständigung und sichert gleichwohl das allmähliche Einsetzen der Werke in ihrer natürlichen Reihenfolge, von den Laufwerken an bis zu den Spitzenwerken nach Massgabe des Anwachsens der Belastung. Leider verlangt die Trennung der Frequenzbänder, abgesehen von den unvermeidlichen Messfehlern der in den verschiedenen Werken aufgestellten Frequenzmesser, eine totale Frequenzänderung zwischen kleiner und Spitzen-Last von heutzutage unzulässiger Grösse.

Man könnte daran denken, wie wir es im Jahre 1925 vorgeschlagen haben¹⁾, bei dieser Regulierung den Frequenzunterschied durch sein Integral, d. h. den mit Synchronuhr registrierten Phasenunterschied gegenüber einem idealen Netz mit unveränderlicher Frequenz oder gegenüber einer Normaluhr zu ersetzen, wodurch es möglich würde, die augenblickliche Frequenz in engeren Grenzen zu halten. Diese Lösung hat aber wie die erste den Mangel, dass die Verteilung einer gegebenen Last zwischen den Werken nicht von deren Lage im Netz abhängt, so dass in den Verbindungsleitungen ausserordentlich starke Lastschwankungen entstehen können.

Wenn auch die genannten Methoden im Fall eines Einzelnetzes, selbst wenn es eine grosse Zahl von Werken umfasst, genügen, werden sie unanwendbar, wenn es sich um den Zusammenschluss unabhängiger Netze handelt, zwischen denen der vertraglich festgesetzte Leistungsaustausch einem bestimmten Programm zu folgen hat.

Die in diesem Fall allgemein angewandte Lösung zur Aufrechterhaltung der Frequenz in so engen Grenzen, als es die Genauigkeit des Frequenzmessers nur irgendwie zulässt, besteht in der Uebertragung der Regulierung an ein einziges Werk, vorzugsweise das stärkste, was dazu führt, diesem alle in dem gesamten Netzverband auftretenden Belastungsänderungen aufzubürden, wo und so entfernt sie auch liegen mögen, da bei wirklich gesicherter Frequenzregelung die Regler der übrigen Maschinen und die durch diese aufgenommenen Belastungen von keiner Belastungsänderung irgendwelcher Art, selbst wenn sie in ihrem eigenen Netz eintritt, beeinflusst werden.

Um daher von dem die Regulierung besorgenden Werk, wenigstens bei stationärem Betrieb in dessen eigenem Netz, die äusseren Belastungsschwankungen fernzuhalten und die ihm im Hinblick auf den Betrieb (Ueberwachung der Kessel usw.) zufallende, im allgemeinen ziemlich kostspielige Rolle zu erleichtern und um weiterhin die Austauschleistungen innerhalb der durch das Programm

¹⁾ Conf. Int. des Grands Réseaux, Paris 1925, Bd. I, S. 234.

erhöhung im Verhältnis des Produktes der Leistung P_0 ihrer gerade in Betrieb befindlichen Maschinen in dem reziproken Wert der Statik S ihrer Regler zu beugen, so dass ein Werk mit einer Betriebsbelastung P und einer Statik S zu der verlangten Zulatzleistung durch eine Leistungsvergrößerung $-kdf$ beiträgt, wo $k = \frac{P_0}{S f_0}$ und f_0 die normale Frequenz bedeutet⁵⁾.

Es kann dabei vorkommen, wie in Frankreich beim Beginn der grossen Zusammenschlüsse häufig festgestellt wurde, dass die plötzlich erforderliche Leistung, z. B. beim Anfahren eines Zuges, sich nicht etwa auf die benachbarten Werke, sondern von einem Ende des Netzes bis zum andern auf das entfernteste Werk überträgt, weil dieses etwa, ohne das stärkste zu sein, eine aussergewöhnlich geringe Statik besitzt.

Dieser sich im allgemeinen über das ganze Netz ausbreitende Energiezustrom zu der neuen Entnahmestelle stört nicht nur die Frequenz, sondern auch alle programmässigen Austauschleistungen, so dass nach jetziger Praxis alle Betriebsleiter und besonders der Frequenzchef sich unter diesem Einfluss irrtümlich zum Eingreifen veranlasst sehen, um die vorgeschriebene Ordnung der Dinge möglichst wieder herzustellen, während die einzig nötige und hinreichende Intervention darin zu bestehen hat, in dem durch die Leistungserhöhung dQ_n betroffenen Netz die Veränderung durch eine entsprechende Erhöhung der Generatorleistung auszugleichen, sollen mit einem Schlag die Frequenz und alle programmässigen Leistungen auf ihren ursprünglichen Zustand zurückgeführt werden. Das gleichzeitige Eingreifen aller übrigen Netze ist unnütz, ja verwerflich, da dasselbe rückgängig zu machen ist, und fügt nur neue, willkürliche Störungen zu der ihre Ursache bildenden ursprünglichen äusseren Störung hinzu, wodurch die Wiederherstellung des allgemeinen Gleichgewichtszustandes verzögert wird.

Bei Eintritt irgendeiner Störung gibt es, ganz allgemein genommen, offensichtlich nur eine einzige Kombination für die Verstellung der Schieber, Verteilorgane oder Ventile der Generatorgruppen, die geeignet ist, den normalen Betriebszustand, die Frequenz und den programmgemäss vorgeschriebenen Leistungsaustausch wieder herzustellen. Die korrekte Methode ist daher die, welche gestattet, alle diese nötigen Handhabungen mit einem einzigen Blick zu übersehen und durch das Vorgreifen derselben die anderen überflüssig zu machen, um

⁵⁾ Zu dieser Zusatzleistung der Werke kommt, streng genommen, noch der kleine Beitrag der Verteilnetze selbst hinzu, deren Last bei unveränderlichem Zustand im allgemeinen gleichzeitig mit der Frequenz zurückgeht, und zwar in einem Verhältnis, das mit der Natur der Belastung jener Netze (Widerstände, Motoren zum Antrieb von Maschinen verschiedenen Charakters, Pumpen, Ventilatoren und dgl.) veränderlich ist, aber ausserdem durch eine wenn auch wesentlich grössere Statik (von der Grössenordnung 50 bis 100 : 100) als die der Maschinen gekennzeichnet sein kann, so dass der dem Wert k hinzuzufügende Koeffizient k' im allgemeinen gegenüber dem Gesamtwert $K = k + k'$ (der Dimension nach eine Energie), der die Reaktion des Netzes auf eine Frequenzänderung darstellt, vernachlässigt werden kann.

so die Regulierung auf dem direktesten und schnellsten Wege zu sichern.

Die eindeutige Lösung des so gestellten Problems besteht darin, für jedes Netz die zwischen den Variablen des Systemzustandes, der Frequenz und der Austauschleistungen bestehende Funktion zu erfassen, welche abhängig ist von Aenderungen, Belastungsschwankungen, Reglerantrieben usw., die im Innern dieses Netzes auftreten, jedoch aber von den ähnlichen Veränderungen, die sich ausserhalb des Netzes abspielen, vollkommen unabhängig ist.

Es zeigt sich, dass diese Funktionen von der gleichen Form sind wie die linearen Zusammenhänge der Frequenz und Leistung, deren Wichtigkeit schon frühzeitig geahnt wurde und deren Anwendung sich allmählich durch mehr qualitative Erwägungen aufzwang. Da sie nun aber den Charakter wirklicher physikalischer Grössen aufweisen, die von jeder Hypothese oder willkürlichen Annahme unabhängig sind, so ergibt sich, dass sie durch die Beschaffenheit selbst des Systems vollkommen festgelegt sind.

Angenommen, es verändere sich z. B. aus äusserer Ursache, wie Veränderung der Belastung, Inbetriebnahme einer neuen Maschine oder Einwirkung auf einen Regler in irgendeinem der $m - 1$ übrigen Netze, die durch Netzzusammenschluss an das Netz mit dem Index n gelieferte Leistung p_n um den Betrag dp_n . Wenn, wie wir sahen, das Netz durch eine allgemeine Statik (Maschinen + Netz) $K_n = k_n + k'_n$ gekennzeichnet ist, dann muss sich die Frequenz dieses Netzes um einen solchen Betrag df erhöhen, dass $K_n df = dp_n$ wird, so dass die Grösse $K_n f - p_n$ in dem betrachteten Fall unveränderlich bleibt.

Wenn im Gegensatz dazu im Inneren des Netzes die Last Q_{on} ⁶⁾ eine Vermehrung dQ_{on} erfährt, oder wenn z. B. zum Ausgleich derselben vom Bedienungsstand der Regler der Maschinen aus ein derartiger Impuls gegeben wird, dass diese, während sie auf unveränderliche Frequenz f_0 gehalten werden, imstande sind, eine Mehrbelastung dP_{on} ⁷⁾ zu übernehmen, dann wird sich die vorstehende Funktion genau um $dP_{on} - dQ_{on}$ verändern.

Die m Funktionen $\Pi_n = K_n f - p_n$ sind also die für die Regulierung wesentlichen Grössen. Sie sind unabhängig voneinander⁸⁾ und bieten gegenüber dem äquivalenten Gesamtkomplex $f, p_2 \dots p_m$ den Vorteil, zwischen den Netzen die grundsätzliche Anfangssymmetrie wieder herzustellen, deren Vorhandensein die rationelle Behandlung des Problems a priori verlangt.

In dem Fall von zwei Netzen, der Gegenstand von Fig. 1 bildet, gehören die das allmähliche Fortschreiten des Punktes p, f darstellenden Geraden

⁶⁾ Genau genommen bei unveränderlicher Frequenz f_0 .

⁷⁾ Die Mehrbelastung dP_{on} bei konstanter Frequenz und die Frequenzvergrößerung df bei konstanter Leistung, die von ein und derselben Beeinflussung des Reglers herrühren, stehen offenbar im Verhältnis k oder im umgekehrten Verhältnis zur Statik (= Ungleichförmigkeitsgrad des Reglers).

⁸⁾ Während dagegen die Leistungen p_n durch die Bedingung $\sum p_n = 0$ miteinander verbunden sind.

beziehungsweise zu zwei Scharen von Geraden, deren jede den verschiedenen Werten der Funktionen $\Pi_1 = K_1 f - p_1$ und $\Pi_2 = K_2 f - p_2$ entspricht; diese Geraden bestimmen ein System von schrägen Koordinaten mit den Axen $O'\Pi_1$ und $O'\Pi_2$, welches, wenn es auch grundsätzlich dem ursprünglichen rechtwinkligen System $OpOf$ gleichwertig ist, gegenüber diesem den erheblichen Vorteil bietet, die natürlichen Variablen, die unmittelbar und einwandfrei die getrennten Massnahmen der beiden Teilnehmer zum Ausdruck bringen, darzustellen.

Ihre Verwendung zeigt klar, dass, um den Arbeitspunkt A nach O' zu bringen, wie es dem angenommenen Programm entspricht, der Operateur 1 nichts Besseres tun kann und auch nichts anderes tun darf, als diesen Punkt nach D zu befördern, da die Verschiebung DO' zur Beendigung der Regulierung ohne Tastversuche oder Schwingungen vom zweiten Netz abhängt, und zwar allein von diesem.

Wir haben in der erwähnten Veröffentlichung an einigen Beispielen gezeigt, auf welche Weise die Verwendung dieser natürlichen Variablen stets nicht nur die unmittelbarste und schnellste Regulierung unter normalen Verhältnissen sicherstellt, sondern noch dazu den besten Kompromiss bei beliebigen anormalen Zuständen bietet. Wenn nun die Frequenzregulierung grundsätzlich von allen Beteiligten abhängt und wenn die vollkommene Aufrechterhaltung des Programms an die strikte Einhaltung aller Reguliervorschriften gebunden ist, so erkennt man leicht, dass die Verantwortlichkeit für die Aufrechterhaltung der Frequenz, nach Massgabe des durch K gekennzeichneten Einflusses, den jedes Netz ausüben imstande ist, praktisch doch wieder den stärksten Netzen des Systems zufällt, mit dem vorteilhaften Unterschied allerdings, dass nun das Resultat durch weniger zahlreiche und weitgehende Einzeleingriffe erhalten wird und auch mit weniger Fehlern, sowohl zufälligen (Rückwirkung der Reguliervorgänge) als auch systematischen (Fehler der Frequenzmesser und Wattmeter) behaftet ist.

Wenn, wie Fallou festgestellt hat, die Stabilität sich praktisch der Verwendung eines in ziemlich weiten Grenzen beliebigen Wertes der Konstanten K anpassen kann, so besteht im allgemeinen kein triftiger Grund, einem andern Wert vor dem oben definierten, theoretisch richtigen den Vorzug zu geben, der der einzige ist, für den die äusseren Belastungsschwankungen keinerlei Massnahmen von seiten des betrachteten Netzes hervorrufen.

Wenn man einwendet, dass der Koeffizient K nicht nur von der Statik, sondern auch noch von der totalen Nennleistung P der in Betrieb befindlichen Generatoren abhängt, dass also die Funktion Π eine Reihe verschiedener von der Zahl der in Betrieb befindlichen Maschinen abhängiger Werte zulässt, so darf man darin nicht einen unbequemen Zwang erblicken, sondern die Notwendigkeit, eine in der Natur der Sache liegende Beziehung anzuerkennen und sie als Tatsache hinzunehmen.

Es ist übrigens hervorzuheben, dass die der Regulierung zugrunde gelegten Grössen Π von keinem ausserhalb des betrachteten Netzes bestehenden Fak-

tor abhängen, sondern einzig und allein von im Innern desselben Netzes vorgenommenen Ablesungen (Leistungen, Statik, Frequenz), deren Feststellung (ausgenommen bisweilen auf mässige Entfernung für die Austauschleistung) keinerlei Fernverständigung verlangt. Sie genügen also der wichtigen Bedingung, dass sie ein für allemal bestimmt und von den verschiedenen Teilnehmern verwendet werden können, ohne dass sich diese in irgendeiner Weise um die Vorgänge im Nachbarnetz zu kümmern oder die derzeitige Ausdehnung des Zusammenschlusses überhaupt zu kennen haben. Der Zusammenschluss kann sich deshalb auf der gleichen Grundlage frei weiter entwickeln, ohne irgendeine Umstellung der bestehenden Anweisungen, bzw. Gepflogenheiten zu verlangen.

Auch in dieser leichten Anpassung an die mannigfachen Bedürfnisse der Wirklichkeit kommt ganz ungezwungen der grundlegende, sachliche und daher notwendige Charakter des neuen Prinzips zum Ausdruck.

Ausdehnung auf den Fall der Uebergangsperiode.

Die bisherigen Ausführungen waren auf die Betrachtung des stationären Betriebes beschränkt und die beschriebene Lösung zielte darauf hin, den oft vorkommenden, unnützen und meistens schädlichen Eingriffen vorzubeugen, um sie auf diejenigen zu beschränken, die zur Wiederherstellung des vorgeschriebenen Betriebszustandes unbedingt nötig und auch ausreichend sind. Auf den Beziehungen zwischen den Messgrössen Π , f , p usw. beruhend, die wie der Einfluss der Statik nur für einen stationären Betrieb Bedeutung haben, hat diese Lösung nun zur Voraussetzung, dass die vom Regler vorgenommenen Anpassungsmassnahmen, wie dies übrigens in der Praxis meist der Fall ist, erst mit einer gewissen Verzögerung in Wirksamkeit treten, derart, dass die ihnen bei irgendeiner Störung zugrunde liegenden, abgelesenen Betriebswerte sich auf den neuen stationären Betriebszustand beziehen.

Im Verlauf der den Störungen folgenden Uebergangsperiode liegen die Dinge viel schwieriger, und die augenblickliche Verteilung der veränderlichen Belastungen zwischen den verschiedenen Werken und Leitungen der ganzen Netzkombination sowie die nun unterschiedlichen augenblicklichen Frequenzen dieser verschiedenen Teile hängen von vielen, ganz anderen Faktoren ab (Reaktanzen der Leitungen, Transformatoren, Generatoren, umlaufenden Massen der Maschinen) als von der Statik der Regler.

Um den Reguliervorgang abzukürzen und gleichzeitig die Wirkungen einer örtlichen Störung möglichst einzuschränken, kann man diese Uebergangsperiode benützen, um die beim endgültigen Eingreifen erforderlichen Massnahmen zu überlegen und vorzubereiten. Bei solchen Vorbereitungen kann man sich, wie man sehen wird, in der Zerlegung des Uebergangszustandes von genau den gleichen, für den stationären Betrieb bereits entwickelten Gesichtspunkten leiten lassen.

Anfangsphase der Uebergangsperiode.

Im Verlauf einer ersten, im Vergleich zur Dauer der verschiedenen gegenseitigen Schwingungen der Werke kurzen Phase behalten die an die Polräder der Generatoren gebundenen inneren elektromotorischen Kräfte infolge der Trägheit der umlaufenden Massen die gemeinsame Anfangsfrequenz und ihre bezüglichlichen Phasendifferenzen aufrecht, so dass sich die neue, die an einem Punkt des Systems plötzlich aufgetretene Aenderung begleitende Stromverteilung ausschliesslich durch die Impedanzen oder praktisch durch die Reaktanzen bedingt wird, während sich die Maschinen selbst bei diesen Stromveränderungen wie ein immerhin durch die in Serie geschalteten Reaktanzen begrenzter Kurzschluss verhalten.

Genau genommen sollten im Verlauf dieser Periode zwei aufeinanderfolgende Phasen unterschieden werden, je nachdem die minimalen Reaktanzen oder subtransitorischen Reaktanzen in Wirksamkeit treten, welche der Aufrechterhaltung der resultierenden Flüsse in den Dämpfungswicklungen oder äquivalenten Stromkreisen der Pole (im Fall von massiven Polen) entsprechen oder, im Gegensatz dazu, die Uebergangsreaktanzen, die sämtliche Streuungen des Stators gegenüber der induzierenden Wicklung in sich schliessen, wie wenn die dazwischen liegenden dämpfenden Stromkreise nicht vorhanden wären. Die erste, bei plötzlichem Kurzschluss wichtige Phase geht jedoch im Verhältnis zu der bis zum Ansprechen der Regler vergehenden Zeit so rasch vorüber, dass man sie vernachlässigen und sich allein auf die Betrachtung der Uebergangsreaktanzen beschränken kann, die

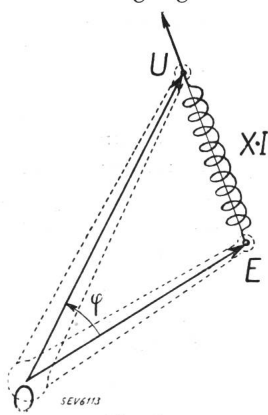


Fig. 2.

in dem Falle auftreten, wo der quer zu den wenig Widerstand bietenden induzierenden Wicklungen gerichtete resultierende Fluss konstant bleibt, und die während der Reguliervorgänge allein von praktischer Bedeutung sind.

Betrachten wir z. B. (Fig. 2) den einfachen Fall eines einzigen Werkes mit einer internen elektromotorischen Kraft E , die an den Netzverband in einem Anschluss-

punkt mit einer Spannung U über eine Kette von Reaktanzen mit dem Gesamtwert X angeschlossen ist.

Bei Vernachlässigung der zugehörigen Widerstände ist die durch den Netzverband gelieferte Wirkleistung bekanntlich:

$$p = \frac{UE}{X} \sin \varphi.$$

Darin bedeutet φ den Phasenwinkel zwischen U und E , so dass, wenn die Phase der Spannung U aus irgendeinem Grunde eine plötzliche Verteilung $d\varphi$ erhält, während die interne elektromoto-

rische Kraft E aus Trägheitsgründen nach wie vor mit der ursprünglichen Winkelgeschwindigkeit ω umläuft, die Veränderung der Austauschleistung p der Gleichung

$$dp = \frac{UE}{X} \cdot \cos \varphi \, d\varphi$$

folgt.

Diese Beziehung zwischen den gleichzeitigen Aenderungen von dp und $d\varphi$ lässt jede äussere Störung bestehen, während eine im Innern des Netzes bei einem beliebigen Punkt der Reaktanzenkette X vorkommende Belastungsänderung durch eine Variation des Ausdruckes

$$\Pi' = \frac{UE}{X} \cos \varphi \cdot \varphi - p = K' \varphi - p$$

in Erscheinung treten wird.

Dies ist also die Formel, die, wie die Funktion Π für den stationären Betrieb, in der ersten Phase der Uebergangsperiode den Anhaltspunkt für die unmittelbare Entscheidung zu liefern hat, ob die allgemeine in dem Netz beobachtete Störung einen Korrekturingriff in dem betrachteten Netz begründet (= erheischt) oder nicht.

Die Bestimmung dieser Funktion umfasst ausser der Messung der Leistung p nur die der augenblicklichen Phase φ , z. B. mit Hilfe eines Synchronskopes, das einerseits mit dem Netz und andererseits mit einem als Normaluhr dienenden Oszillator verbunden ist. Es ist zu beachten, dass die neue Funktion, die ziemlich ähnlich beschaffen ist wie die von Π , sich nur durch den Ersatz der Frequenz durch ihr Zeitintegral, d. h. die Phase unterscheidet.

Der Koeffizient K' ist jedoch nicht mehr völlig konstant, wie es K in dem Fall war, wo die Regulatoren durch eine bestimmte Statik gekennzeichnet waren, und hängt von φ durch den Faktor $\cos \varphi$ ab, der jedoch in dem häufigen Fall, dass die Phasenverschiebung klein bleibt, als unveränderlich betrachtet werden kann.

Andererseits ist die Interpretation der Funktion $K' \varphi - p$, wenn ihre Aenderung einen internen Ursprung der Störung verrät, weniger deutlich, als es für die analoge Funktion Π der Fall war, deren Aenderung bei stationärem Betrieb in jedem Fall unabhängig von der Situation in dem Netz sowohl den genauen Wert dieser Störung als auch die Grösse der anzuwendenden Korrektur angab.

Der allgemeine Fall, dass das Netz mehrere Werke mit an Grösse und Phase verschiedenen internen elektromotorischen Kräften umfasst, die unter sich und mit dem Anschlusspunkt des Systems durch eine mehr oder weniger kompliziert verzweigte Kette von Reaktanzen verbunden sind, lässt sich leicht auf den einfachen Fall eines Einzelwerkes (Fig. 3) zurückführen, die darin besteht, jedes an denselben Netzknotten angeschlossene Kraftwerks-Paar durch ein fiktives Werk zu ersetzen, dessen charakteristischer Vektor als Endpunkt das Schwerpunktszentrum der Enden der Vektor-Komponenten besitzt, welchen Enden Massen zugeordnet

Für diese hohen Werte von τ muss man in die Verbindungsreaktanzen die vollen Synchronreaktanzen der Maschinen und nicht bloss die Streureaktanzen einbeziehen, auch wenn sie vorübergehend sind. Diese langen Schwingungen führen übrigens meistens zu einer beträchtlichen Dämpfung.

Abgesehen von diesen Uebergangsschwingungen, die von dem Unterschied zwischen den ursprünglichen Verhältnissen und dem neuen Betriebszustand abhängen und deren Bestimmung mehr oder weniger verwickelt ist, deren Periode und Dauer aber im allgemeinen zu kurz sind, um die Regulierung ernstlich zu beeinflussen, besteht die Haupterscheinung, die dem Auftreten einer Ueberlast dQ in irgendeinem Punkt des Systems folgt, bevor die Regler Zeit zum Eingreifen gehabt haben, in einer allgemeinen Verlangsamung, infolge deren die neue den Werken auferlegte Belastung zunächst aus der gesamten kinetischen Energie W der Maschinen gedeckt wird, so dass die Ableitung der Frequenz durch die Beziehung

$$dQ = - \frac{2W}{f} \frac{df}{dt}$$

gegeben ist.

Die Verteilung zwischen den Werken vollzieht sich wie im Fall des stationären Betriebes ohne irgendwelche Rücksicht auf ihre bezügliche Lage in dem System und im Verhältnis nicht mehr des Quotienten der Leistung in die Statik, sondern der kinetischen Energie jeden Werkes.

Daraus folgt, indem man $K'' = \frac{2W}{f}$ einsetzt, dass jede der m Grössen

$$II'' = K'' \cdot \frac{df}{dt} - p,$$

die den verschiedenen Netzen zugehören, unveränderlich bleibt, wenn die Störung irgendwelcher Art ausserhalb des betrachteten Netzes liegt, während sie im entgegengesetzten Fall (bis auf das Vor-

zeichen) die ihr zufallende Korrektur exakt bestimmt.

Während die Konstanten K' und K die Dimensionen einer Leistung, bzw. einer Energie besitzen, hat K'' die Dimensionen des Produktes einer Energie und einer Zeit, d. h. einer Wirkung (vgl. theoretische Mechanik: Prinzip der kleinsten Wirkung).

Die Bestimmung der Ableitung der Frequenz verlangt eine Einrichtung zur Beschleunigungsmessung. Die Betrachtung der Funktion II'' bestätigt also die Gedanken, welche einige Konstrukteure schon dazu geführt haben, die gewöhnlichen tachymetrischen Regulatoren mit Zusatzeinrichtungen zu versehen, um auf sie entweder die Beschleunigung oder die elektrische Leistung einwirken zu lassen.

Diese Funktion II'' besitzt alle die befriedigenden Eigenschaften, die bereits für die analoge Funktion II des stationären Betriebes für richtig erkannt wurden und die durch II' , die sich auf die subtransitorische Phase bezieht, im Gegensatz dazu nicht vollständig erreichbar sind: vollkommene Unabhängigkeit in bezug auf das, was im übrigen Teil des Systems vor sich geht, und sichere Anzeige bei interner Störung. Sie würde sich also zu einer sicheren Verbesserung der Reguliergeschwindigkeit eignen, und zwar in den Sonderfällen, welche die strafere Berücksichtigung des Uebergangszustandes verlangen; es ist jedoch anzunehmen, dass die einfache Lösung für den stationären Betrieb unter alleiniger Benutzung der Funktion II , die ausschliesslich mit bekannten Begriffen und erprobten Apparaten arbeitet, noch auf lange Zeit hinaus für die verschiedensten Fälle des Netzzusammenschlusses ausreichen wird.

Der Vorsitzende dankt Herrn Darrieus für das interessante Referat. Herr Darrieus hat die Schwierigkeiten gezeigt und verschiedene Methoden der Frequenz- und Leistungsregulierung angegeben. Dann hat er seine eigene Meinung dargelegt, wie das Problem angepackt werden muss, um es einfach zu gestalten. Er wiederholt in deutscher Sprache einige Kernsätze aus dem Referat.

Die Rückwirkung der Reguliervorgänge auf die hydraulischen Anlagen.

Von Prof. R. Dubs, Zürich.

Es wird ein Ueberblick gegeben über die Beanspruchungen, die in den hydraulischen Anlagen bei Reguliervorgängen auf der Belastungsseite auftreten, besonders bei plötzlicher Entlastung. Das Zustandekommen und der Einfluss der Gefällsänderungen wird besprochen; ferner wird auf die Druckstösse unter Berücksichtigung der Elastizität der Rohrleitungen und des Wassers eingegangen.

L'auteur donne un aperçu des sollicitations qui se produisent dans les installations hydrauliques lors de variations de la charge et du réglage qui s'en suit, en particulier lors de décharge brusque. Il explique ensuite comment les variations de la hauteur de chute se produisent et quelle influence elles exercent, et examine finalement les coups de bélier en tenant compte de l'élasticité des conduites et de l'eau.

Wenn die Frequenz, d. h. die Drehzahl der elektrischen Maschinen konstant gehalten werden soll, so muss stets Gleichgewicht zwischen Last und Antrieb bestehen, d. h. auf eine Maschine bezogen, muss das antreibende Moment M_a stets gleich sein dem widerstehenden Moment M_w . Bezeichnet man mit ω die Winkelgeschwindigkeit und mit t die Zeit, so gilt stets:

$$\Theta \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_w$$

wenn Θ das Massenträgheitsmoment aller rotierenden Teile bedeutet. Erfolgt nun eine Aenderung des widerstehenden Momentes M_w , z. B. durch eine Entlastung der Maschine, so müsste, damit ω konstant bleibt, das antreibende Moment M_a vollständig synchron zu M_w verändert werden. Dies ist nun aber aus zwei Gründen nicht möglich. Erstens wird die Anpassung des antreibenden Momentes M_a an das widerstehende Moment M_w durch Eingreifen des Fliehkraftregulators erst eingeleitet, nachdem