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 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: 07.01.2026

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich8, Seefeldstr. 301

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ❖ Telephon 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° 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.*

1. Einführungen.

Frequenz- und Leistungsregulierung in grossen Netzverbänden.

Von *G. Darrieus*, Paris *).

Die Regulierung zusammengeschlossener 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 verwickeltsten 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 möglichster 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 vorangeeilt 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 haben [1]), 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.

festgelegten Werte zu halten, ist man dazu gekommen, den übrigen Werken als Aufgabe ihrer Regulierung die genaue Einhaltung eben dieser Leistungen auf die eigenen Verbindungsleitungen mit dem gemeinsamen Netz vorzuschreiben.

Wie die Erfahrung lehrt, arbeitet dieses System zuverlässig, wenn das taktgebende Netz wesentlich stärker ist als die übrigen. Dies ist aber nicht mehr der Fall, wenn die zusammengeschlossenen Netze von gleicher Grössenordnung sind und so kein sicheres Merkmal mehr zur Feststellung des die Frequenz führenden Netzes vorhanden ist.

Man kann sich dann leicht darüber Rechenschaft geben, dass die Frequenzregulierung durch das damit beauftragte Werk die mit den andern Netzen ausgetauschten Leistungen beeinflusst, während die von den andern Werken zur Aufrechterhaltung der auf den Verbindungsleitungen programmässig vorgeschriebenen Leistungen zu treffenden Massnahmen ihrerseits eine Rückwirkung auf die Frequenz des Gesamtnetzes ausüben.

Es kann also vorkommen, wie Labouret gezeigt hat [2]), dass diese Interferenzen im Fall gleich starker Netze fortgesetzt die Erreichung des erstrebten stabilen Betriebes verhindern, indem sie unaufhörlich Schwingungen der Leistung und der Frequenz hervorrufen.

Man betrachte beispielsweise (Fig. 1) zwei Netze mit der Frequenz f und dem Leistungsaustausch p. Wenn sich in einem gegebenen Zeitpunkt der Arbeitspunkt (f, p) in A befindet, während er nach dem Programm in O' sein sollte, so vergrössert das Netz 1, das mit der Regelung der Leistung p, die es von 2 empfängt, betraut ist, bei Feststellung des zu grossen p die Füllung seiner Turbinen. Dieser Vorgang hat jedoch gleichzeitig die Erhöhung der Gesamtfrequenz zur Folge, dergestalt, dass der Arbeitspunkt eine aufwärts steigende Linie ADB beschreibt; damit weicht die Frequenz, wenn die vorgeschriebene Leistung p hergestellt ist, von ihrem Sollwert ab. Das Eingreifen des taktgebenden Werkes 2 stellt seinerseits die Frequenz wieder her, jedoch unter Störung der Austauschleistung, so dass der Regulierprozess sich in einer gebrochenen Linie fortsetzt, die im dargestellten Fall langsam gegen den Endpunkt O' hin konvergiert, dagegen aber sogar divergieren würde, wenn die Rollen der beiden Netze vertauscht würden.

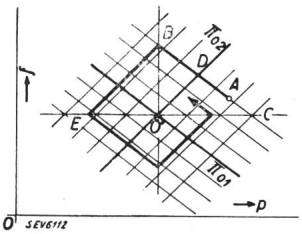

Fig. 1.

Diese der willkürlichen Verteilung der Funktionen der verschiedenen Beteiligten zuzuschreibenden Schwierigkeiten rühren kurz von dem grundsätzlichen Fehler her, dass man für die im Falle von m Netzen zu regelnden m Veränderlichen den unsymmetrischen Komplex gewählt hat, der einerseits von der Frequenz, anderseits von den (m-1) Leistungen p gebildet wird, die an die entsprechenden m Netze abgegeben werden. (Die $m$te dieser Leistungen ist offenbar nicht unabhängig, wegen der Beziehung $\Sigma p = 0$).

Die Sorge, diese Fehler zu beseitigen und gleichzeitig die schwierige und kostspielige Rolle der Frequenzregulierung auf mehrere Werke zu verteilen, lässt heute die Notwendigkeit erkennen, die Ansprüche an die Frequenzregulierung einzuschränken durch Rücksichtnahme auf deren Rückwirkung auf die Leistung.

Ein Mittel, das besonders in Belgien und den Vereinigten Staaten angewandt worden ist, besteht darin, in dem Regulierbereich Zonen abzugrenzen, innerhalb deren gewisse Massnahmen zeitweilig untersagt sind. Die willkürliche Einführung solcher Unstetigkeiten in ein Problem, das von Natur aus keine solche zulässt, kann jedoch nicht befriedigen und bringt, infolge seiner geringen Eignung zu allgemeiner Anwendung, in verwickelten Fällen die Gefahr neuer Schwierigkeiten mit sich.

Eine viel natürlichere Lösung, die durch Fallou [3]) untersucht worden ist, besteht darin, die Regelgrösse aus der Frequenz durch Hinzufügung eines zweiten, der Austauschleistung p proportionalen Ausdruckes zu bilden. Es gibt bereits Apparate, die ermöglichen, nach Belieben die Frequenz oder die Leistung allein, oder schliesslich die mit einem der Leistung proportionalen Glied korrigierte Frequenz («biased» sagen dafür die Amerikaner) zu messen und zu regulieren. Diese letztgenannte Methode hat bereits in den Vereinigten Staaten zu einigen Anwendungsversuchen geführt, die allerdings etwas schüchtern scheinen, denn, in solcher Weise eingeführt durch Rücksichten auf Schaffung eines Ausgleichs zwischen widersprechenden Vorschlägen, bzw. einer Mittellösung, wie es z. B. der Fall ist für die Rückführung als Hilfsmittel zur Verkleinerung der Reglerschwankungen, haben die linearen Verbindungen der Frequenz und der Leistung, obwohl sie von einer richtigen Erkenntnis ausgehen, noch keinen natürlichen und überzeugenden Charakter.

Gerade diesen Charakter trachteten wir diesen Verbindungen zu verleihen in dem von uns um dieselbe Zeit als die bereits angeführten vor der S. F. E. [4]) gehaltenen Vortrag, dessen Resultate hier kurz dargelegt werden sollen.

Bestimmung der natürlichen Variablen der Regulierung.

Betrachten wir in einer Betriebsgemeinschaft von Werken mit stationärem Betrieb und mit einer Nutzabgabe von bestimmter und unveränderlicher Grösse, in der keinerlei Reglerbetätigungen vorgenommen werden, die Wirkung des Auftretens einer neuen Last dQ_n in einem der Netze. Infolge des damit verbundenen Rückganges der Frequenz — df sehen sich sämtliche Werke, welches auch ihre örtliche Lage sein mag, veranlasst, dieser Leistungs-

[2]) Bull. Soc. Franç. des Electriciens, 5. Serie, Bd. VI, Mai 1936, S. 487.

[3]) Bull. Soc Franç. des Electriciens, 5. Serie, Bd. VI, Mai 1936, S. 461.

[4]) Bull. Soc. Franç. des Electriciens, 5. Serie, Bd. VI, Mai 1936, S. 501.

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 begegnen, so dass ein Werk mit einer Betriebsbelastung P und einer Statik S zu der verlangten Zulatzleistung durch eine Leistungsvergrösserung $-k\mathrm{d}f$ beiträgt, wo $k = \frac{P_0}{S f_0}$ und f_0 die normale Frequenz bedeutet [5]).

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 $\mathrm{d}Q_n$ betroffenen Netz die Veränderung durch eine entsprechende Erhöhung der Generatorleistung auszugleichen, sollen mit einem Schlag die Frequenz und alle programmmässigen 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 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 $\mathrm{d}p_n$. 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 $\mathrm{d}f$ erhöhen, dass $K_n\,\mathrm{d}f = \mathrm{d}p_n$ 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_{0n} [6]) eine Vermehrung $\mathrm{d}Q_{0n}$ 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 $\mathrm{d}P_{0n}$ [7]) zu übernehmen, dann wird sich die vorstehende Funktion genau um $\mathrm{d}P_{0n} - \mathrm{d}Q_{0n}$ verändern.

Die m Funktionen $\Pi_n = K_n f - p_n$ sind also die für die Regulierung wesentlichen Grössen. Sie sind unabhängig voneinander [8]) und bieten gegenüber dem äquivalenten Gesamtkomplex f, $p_2 \ldots p_m$ 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

[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.

[6]) Genau genommen bei unveränderlicher Frequenz f_0.

[7]) Die Mehrbelastung $\mathrm{d}P_{0n}$ bei konstanter Frequenz und die Frequenzvergrösserung $\mathrm{d}f$ 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 $\Sigma p_n = 0$ 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 $Op\,Of$ 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 auszuüben 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 Faktor 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 bezüglichen 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 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.

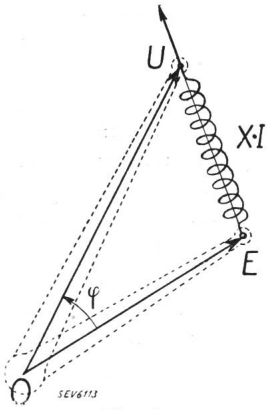

Fig. 2.

Betrachten wir z. B. (Fig. 2) den einfachen Fall eines einzigen Werkes mit einer internen elektromotorischen Kraft E, die an den Netzverband in einem Anschlusspunkt 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 Voreilung $d\varphi$ erhält, während die interne elektromotorische 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 Korrektureingriff 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 Synchronoskopes, das einerseits mit dem Netz und anderseits 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.

Anderseits 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 durch eine elementare progressive Reduktion (Fig. 3) zurückführen, die darin besteht, jedes an denselben Netzknoten 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 zugedacht

sind, die sich umgekehrt wie die entsprechenden Kupplungsreaktanzen verhalten. Dieser leicht zu beweisende Satz wird unmittelbar erklärt, wenn man das Diagramm durch das bekannte, aus Hebeln und Federn zur Darstellung der Kupplungsreaktanzen

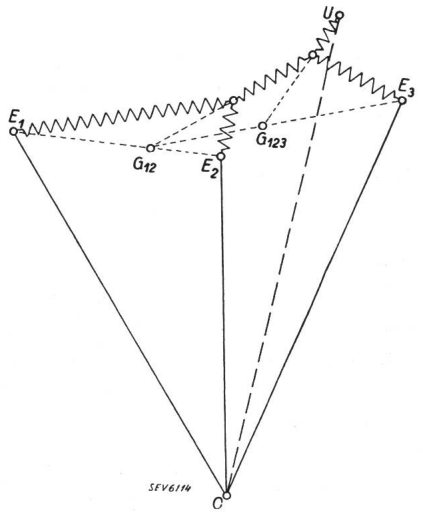

Fig. 3.

zusammengesetzte mechanische Modell ersetzt, das vielfach zum Studium von Stabilitätsproblemen namentlich in den Vereinigten Staaten benutzt worden ist [9]).

Wenn aber eine allgemeine Lösung auf diese Weise gefunden werden kann und die korrekte Bestimmung des Faktors K' auch in den verwickeltsten Fällen möglich ist, so kommt man zu der Erkenntnis, dass diese Lösung, wenn sie sich auch streng aus den gleichen Grundlagen ergibt, die zur Lösung des analogen Problems beim stationären Betrieb geführt haben, von geringerem praktischen Interesse ist, weil einerseits ihre Bedeutung weniger klar und die von ihr gelieferten Angaben weniger deutlich sind und anderseits die auf eine Zwischenphase von kurzer Dauer beschränkte Gültigkeit einen zu flüchtigen Charakter hat.

Hauptphase der Uebergangsperiode.

Gleich bei Beginn der Störung, wo die Winkelgeschwindigkeiten noch ihre ursprüngliche Grösse besitzen und die Regler, da sie noch nicht angesprochen haben, die ursprünglichen Drehmomente der Maschinen aufrechterhalten, ruft die neue, von den Reaktanzen abhängige Strom- und Leistungsverteilung Aenderungen der widerstrebenden Drehmomente hervor, die im allgemeinen ungleiche Beschleunigungen der Generatoren und infolgedessen momentane Abweichungen der Frequenz und Phase zur Folge haben.

Es entstehen daraus meistens eine Reihe von Schwingungen verschiedenen Typs, der Zahl nach $m - 1$ (wenn m die Zahl der zusammengeschlossenen Werke ist), und zwar je nach der Art der relativen Eigenschwingung der einzelnen Abschnitte des Systems.

In dem einfachen Fall einer einzigen Maschine an einem unendlich grossen Netz lässt sich die schon im Jahre 1892 von M. Boucherot berechnete Schwingungsdauer in der einfachen Form ausdrücken

$$\tau = \sqrt{\frac{2\,T T_A P_0}{\cos\varphi\; P_S}},$$

wo T die Periode $1 : f$, T_A die Anlassdauer $\frac{I\Omega^2}{P_0}$, I das Trägheitsmoment, Ω die normale Winkelgeschwindigkeit, φ den Phasenwinkel zwischen E und U, P_0 die Nennleistung und $P_S = \frac{E\,U}{X}$ die synchronisierende Leistung bedeutet, oder das Maximum der über die Reaktanz X zwischen der internen EMK E des Generators und der Netzspannung U übertragenen Leistung, wenn diese beiden Vektoren senkrecht aufeinander stehen. Da die Definition der gegebenen Nennleistung einer Maschine einen gewissen Grad von Willkür enthält, der übrigens das Produkt $T_A P_0 = I\Omega^2$, welches das Doppelte der kinetischen Energie W der Maschinen ausmacht, nicht beeinflusst, ist es zweckmässig, die der synchronisierenden Leistung entsprechende Anlassdauer T_S einzuführen, und zwar so, dass $T_S P_S = T_A P_0 = 2\,W$, woraus sich für die Periode τ der Eigenschwingung die einfache Formel ergibt

$$\tau = \sqrt{\frac{2\,\pi\; T T_S}{\cos\varphi}}$$

Diese Schwingungsdauer ist im allgemeinen von der Grössenordnung einer Sekunde. Die Ausdehnung auf zwei Werke vollzieht sich einfach durch den Ersatz von $1 : T_S$ durch die Summe der entsprechenden Grössen für die zwei Werke und für den gemeinsamen Wert der synchronisierenden Leistung P_S und schliesslich durch Einsetzen des Phasenwinkels der internen Spannungen an Stelle von φ.

Diese neue Periode kann ziemlich grosse Dauer erreichen, wenn die synchronisierende Leistung relativ schwach ist, z. B. wenn zwei weit auseinander liegende starke Netze für eine geringe Austauschleistung durch eine lange Leitung mit niedriger Spannung verbunden sind, z. B. 5 Sekunden in dem von Fallou angeführten weit ausgedehnten amerikanischen Netzverband von ungefähr 5 000 000 kW Spitzenleistung [10]). Das Vorkommen von $\cos\varphi$ im Nenner zeigt übrigens, dass diese Eigenschwingungsdauer ins Unendliche wächst, wenn man sich der Stabilitätsgrenze ($\cos\varphi = 0$) nähert.

[9]) a) Quelques problèmes relatifs aux réseaux bouclés d'extension indéfinie. G. Darrieus, Conf. Int. des Grands Réseaux, Paris 1925, Bd. I, S. 243.

b) A Mechanical Analogy to the problem of Transmission Stability. S. B. Griscom, The Electric Journal, mai 1926, Bd. 23, S. 230. Quantitative Mechanical Analysis of Power System transient disturbances, R. C. Bergvall and P. H. Robinson. J. of the AIEE, Juni 1928, Bd. 47, S. 419.

c) Les modèles mécaniques en électrotechnique, G. Darrieus, Bull. Soc. Franç. des Electriciens, 4. Serie, Bd. 9, 1929, S. 794.

[10]) Bull. Soc. Franç. des Electriciens, 5. Serie, Bd. 7, Febr. 1937, S. 169, und: Frequency, Time and Load Control on Interconnected Systems, Philip Sporn and V. M. Marquis, El. World, 12. März 1932, S. 495, und 2. April 1932, S. 618; insbesondere Fig. 8, S. 498.

Für diese hohen Werte von τ muss man in die Verbindungsreaktanz 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

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

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

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

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 Vorzeichen) 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 Π'' 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 Π'' besitzt alle die befriedigenden Eigenschaften, die bereits für die analoge Funktion Π des stationären Betriebes für richtig erkannt wurden und die durch Π', 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 straffere Berücksichtigung des Uebergangszustandes verlangen; es ist jedoch anzunehmen, dass die einfache Lösung für den stationären Betrieb unter alleiniger Benutzung der Funktion Π, 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*