

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 63 (1972)
Heft: 10

Artikel: Das Verbundnetz als Regelstrecke der Netzregelung
Autor: Bühler, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915692>

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: 21.02.2026

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

Das Verbundnetz als Regelstrecke der Netzregelung ¹⁾

Von H. Bühler, Ciona di Carona

621.311.161:621.398:621.316:62-502

Es wird das regeltechnische Verhalten eines Verbundnetzes im Hinblick auf die Netzregelung betrachtet. Dazu werden vorerst die Elemente wie Verbraucher, Übertragungsnetz, Synchron-generatoren, Wasser- und Dampfturbinen sowie Turbinen- und Spannungsregelung untersucht. Daraus kann das Verhalten des gesamten Verbundnetzes mit Primärregelung bestimmt werden. Da die Ergebnisse relativ kompliziert sind, so sind gewisse Vereinfachungen vorzunehmen. Diese gestatten auf die in der modernen Regelungstheorie übliche Darstellung im Zustandsraum überzugehen. Abschliessend werden einige Frequenzgangkurven dargestellt.

Le comportement de réseaux interconnectés est considéré du point de vue de leur réglage. Dans ce but, on examine tout d'abord les éléments, tels que consommateurs, réseau de transport, alternateurs synchrones, turbines hydrauliques et thermiques, ainsi que le réglage des turbines et de la tension. Cela permet de déterminer le comportement de l'ensemble des réseaux interconnectés, lors du réglage primaire. Les résultats étant relativement compliqués, il faut admettre certaines simplifications, de façon à pouvoir adopter la représentation d'état selon la théorie moderne de réglage. Pour terminer, quelques courbes de comportement fréquentiel sont indiquées.

1. Einleitung

In grossen Verbundnetzen gelangen immer mehr und mehr Prozessrechner zum Einsatz. Neben den Aufgaben für Protokollierung, Energieabrechnungen und Betriebsüberwachung werden dem Prozessrechner in Zukunft auch Aufgaben für die Optimierung des Betriebes und der Netzregelung übertragen werden [1]²⁾. Um den Regelalgorithmus für die direkte digitale Regelung (DDC) hinsichtlich Struktur und Parameter optimal festlegen zu können, ist es wichtig, das statische und dynamische Verhalten des Verbundnetzes zu kennen, das die Regelstrecke für die Netzregelung bildet. Nachfolgend wird daher näher das Verhalten des Verbundnetzes in regeltechnischer Hinsicht untersucht.

Grundsätzlich bestehen zwei verschiedene Möglichkeiten, um das Verhalten einer Regelstrecke zu bestimmen, und zwar:

- Analytische Untersuchung;
- Messtechnische Untersuchung.

Bei der analytischen Untersuchung werden für die einzelnen Bestandteile einer Regelstrecke aufgrund der physikalischen Beziehungen Differentialgleichungen aufgestellt sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten bestimmt. Der Vorteil der analytischen Untersuchung besteht darin, dass ein guter Einblick in die innern Zusammenhänge und die Struktur der Regelstrecke erreicht wird. Die analytischen Untersuchungen können auch auf Objekte angewendet werden, die sich erst im Projektionsstadium befinden. Ferner liefern sie Grundlagen für eine zuverlässige, die innere Struktur berücksichtigende Modellnachbildung. Als Nachteil steht ein oft recht erheblicher Rechenaufwand gegenüber. Überdies sind vielfach die Parameter nur mühsam zu bestimmen.

Bei der messtechnischen Untersuchung werden die gesuchten Zusammenhänge experimentell am bestehenden Objekt bestimmt. Der Vorteil dieser Identifikationsmethoden besteht darin, dass auch Regelstrecken untersucht werden können, die einer analytischen Behandlung nur schwer zugänglich sind. Nachteilig wirkt sich die oft recht lange Messdauer sowie die

infolge äusserer Störeinflüsse begrenzte Genauigkeit aus. Zusätzliche Schwierigkeiten ergeben sich dann, wenn die Struktur der Regelstrecke nicht a priori bekannt ist.

Oft werden analytische und messtechnische Untersuchungen miteinander kombiniert, indem analytisch die Struktur und messtechnisch die Parameter bestimmt werden. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn sich die Parameter zeitlich in unbekannter Weise verändern. Durch eine Parameteridentifikation werden die massgebenden Daten der Regelstrecke bestimmt. Danach kann der Regler optimal auf die jeweiligen Verhältnisse abgestimmt werden.

Im vorliegenden Beitrag wird das Verbundnetz analytisch untersucht. Die Problemstellung soll anhand der Fig. 1 kurz skizziert werden. Dargestellt ist ein einfaches Verbundnetz mit vier Knotenpunkten, in das ein thermisches Kraftwerk (1), ein Hochdruckkraftwerk mit Pelton-Turbine (2) und ein Niedrdruckkraftwerk mit Kaplan-Turbine (3) einspeist. An allen vier Knotenpunkten sind Verbraucher angeschlossen.

Die Hauptaufgabe der Regelung besteht in erster Linie in der Konstanthaltung der Frequenz und des Spannungsniveaus. Hiezu dienen die Primärregler, d. h. Drehzahlregler bei den

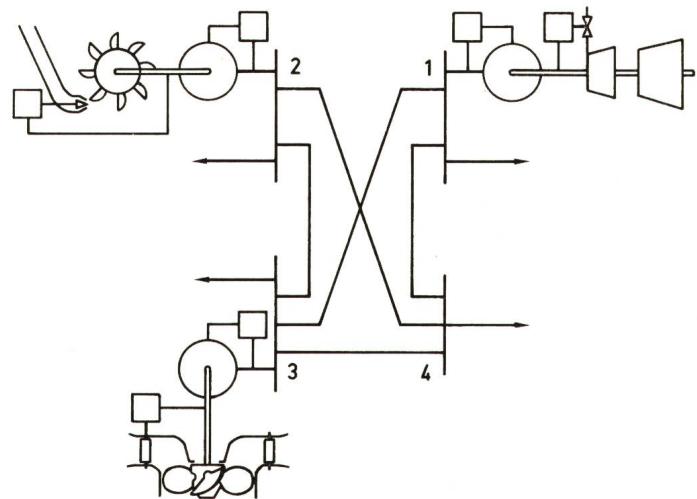


Fig. 1
Einfaches Verbundnetz

mit thermischem Kraftwerk 1, Hochdruck-Speicherwerk 2, Niedrdruck-Laufwerk 3 und Knotenpunkt 4 mit reiner Verbraucherlast

¹⁾ Vortrag, gehalten im Rahmen des Kolloquiums für Forschungsprobleme der Energietechnik an der ETH-Zürich, am 16. November 1971.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

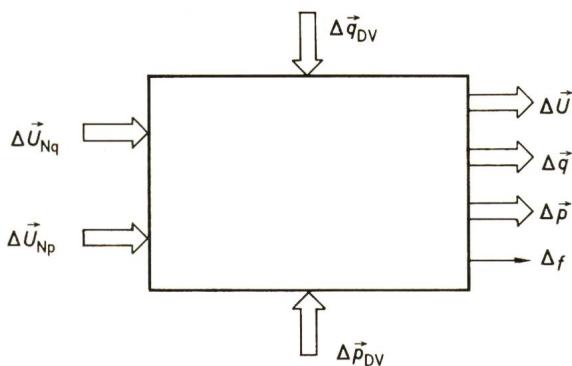


Fig. 2

Schematische Darstellung des Verbundnetzes als Regelstrecke

(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstabsymbole bedeuten Vektoren der Matrizenrechnung)

Turbinen und Spannungsregler bei den Synchrongeneratoren. Um die Frequenzänderung bei Laständerungen der angeschlossenen Verbraucher in sehr engen Grenzen zu halten, wird eine Netzregelung als Frequenz-Leistungsregelung überlagert, die zusätzlich in die einzelnen Turbinenregler eingreift.

Zur Aufrechterhaltung eines optimalen Betriebes ist es überdies notwendig, dass die einzelnen Kraftwerke eine bestimmte Wirk- und Blindleistung abgeben, deren Werte durch die Momentan-Optimierung vorgegeben wird [1]. Hierzu ist sowohl ein Eingriff in die Turbinen- wie in die Spannungsregler erforderlich.

Schematisch ist das Verbundnetz als Regelstrecke in Fig. 2 dargestellt. Als Stellgrößen treten die Änderungen der Eingriffe in die Turbinenregelung Δu_{Np} (zur Beeinflussung der Wirkleistung) und in die Spannungsregelung Δu_{Nq} (zur Beeinflussung der Blindleistung) auf. Die Ausgangsgrößen (Regelgrößen) sind die Frequenzänderung Δf , die Wirk- und Blindleistungsänderungen Δp und Δq sowie die Spannungsänderung Δu . Als Störgrößen wirken die Wirk- und Blindlaständerungen Δp_{Dv} und Δq_{Dv} der Verbraucher. Mit Ausnahme der Frequenzänderung Δf , die eine skalare Größe ist, sind alle übrigen Größen Vektoren mit der Dimension entsprechend der Anzahl Kraftwerke bzw. Knotenpunkte im Netz. Es handelt sich im vorliegenden Fall um eine sehr umfangreiche Mehrfachregelstrecke.

Wie in der Regelungstechnik allgemein üblich, wird mit bezogenen Größen gerechnet. Als Bezugsleistung wird zweckmässigerweise eine mittlere Nennleistung der im Verbundnetz arbeitenden Kraftwerke gewählt. Die bezogenen Größen werden durchwegs mit kleinen Buchstaben bezeichnet.

Entsprechend Fig. 1 sind zur analytischen Untersuchung der Regelstrecke die folgenden Elemente zu behandeln:

- Verbraucher;
- Übertragungsnetz;
- Synchrongeneratoren;
- Turbinen und Turbinenregelung;
- Erregung und Spannungsregelung.

Nachdem in Abschnitt 2 diese Elemente näher untersucht wurden, seien in Abschnitt 3 die Probleme besprochen, die bei der Zusammensetzung der einzelnen Elemente zum Verhalten des ganzen Verbundnetzes entstehen. Dabei zeigt sich die Notwendigkeit, Vereinfachungen einzuführen, die alsdann den Übergang zur Darstellung im Zustandsraum ermöglichen. In einem Anhang (Abschnitt 4) sind einige mathematische Ableitungen zusammengefasst.

2. Die Elemente des Verbundnetzes

2.1 Verbraucher

Die Verbraucher sind normalerweise aus Motorlast (vornehmlich Asynchronmotoren), Ohmscher Belastung (Heizkörper, Kochplatten, Beleuchtung), induktiver Belastung (Magnetisierungsstrom von Transformatoren), kapazitiver Belastung (Phasenschieberkondensatoren und Ersatzkapazität von Leitungen und Kabeln) sowie Vorschaltimpedanzen (Kurzschlussreaktanzen von Transformatoren, Leitungsimpedanz) zusammengesetzt, wie dies in Fig. 3a schematisch dargestellt ist.

Im vorliegenden Fall interessiert die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit der Verbraucher, d. h. die Änderung der Wirk- und Blindlast Δp_D bzw. Δq_D bei einer Änderung des Spannungsbetrages Δu und der Speisefrequenz Δf . Diese Verhältnisse sind eingehend in [2] untersucht worden. In dem für die Netzregelung interessierenden, relativ langsamen Bereich der Änderungen kann die Spannungs- und Frequenzabhängigkeit konstant, d. h. zeitunabhängig durch die Übertragungsfaktoren H_{pu} , H_{qu} und H_{qf} ausgedrückt werden, mit Ausnahme des Zusammenhangs zwischen Wirklaständerung und Frequenzänderung. Hier ist die resultierende Anlaufzeitkonstante T_a aller rotierenden Massen zu berücksichtigen, womit sich die Übertragungsfunktion $H_{pf} + sT_a$ ergibt. Diese Verhältnisse sind in Fig. 3b in Form eines Signalflussdiagramms dargestellt.

Hier sind auch die zusätzlichen Laständerungen infolge Zu- und Abschalten von einzelnen Verbrauchern berücksichtigt (Störgrößen Δp_{Dv} und Δq_{Dv}). Diese Laständerungen setzen sich aus einem quasideterministischen Anteil entsprechend den langsamen, täglichen Lastschwankungen und einem stochastischen Anteil zusammen. Der letztere entsteht durch das zufällige Ein- und Ausschalten einzelner Verbraucher. Diese Änderungen sind normalerweise klein gegenüber der Grundlast.

2.2 Übertragungsnetz

Fig. 4a zeigt schematisch einen Knotenpunkt des Übertragungsnetzes. In diesen Knotenpunkt speist ein Kraftwerk ein, es sind Verbraucher angeschlossen und überdies gehen Übertragungsleitungen weg, die ihrerseits wieder mit andern Netzknoten verbunden und verkoppelt sind.

Hier ist der Zusammenhang gesucht zwischen der Änderung der Wirk- und Blindleistung Δp und Δq im Kraftwerk bei einer Änderung der Belastung Δp_D und Δq_D und einer Änderung des Spannungszeigers um den Betrag Δu und den Winkel $\Delta \epsilon$ sowie einer Frequenzänderung Δf .

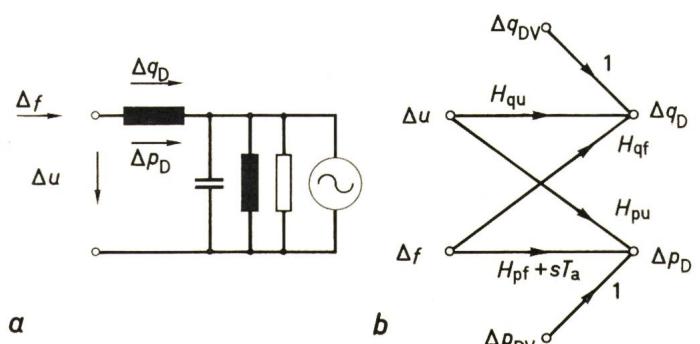


Fig. 3
a Ersatzschaltbild; b Signalflussdiagramm für Spannungs- und Frequenzabhängigkeit

Da die Verhältnisse in einem Netzpunkt durch die Änderung in allen Netzpunkten beeinflusst wird, und somit eine enge Kopplung besteht, so ist das Signalflussdiagramm durch Vektoren und Matrizen darzustellen (Fig. 4b). Hier ist lediglich die Frequenzänderung ein Skalar, da man bei den relativ langsam Änderungen, die bei der Netzregelung auftreten, voraussetzen darf, dass die Frequenz in allen Netzpunkten gleich ist.

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Änderungen ist konstant, d. h. zeitunabhängig. Die Koeffizienten in Form der Matrizen K_{pe} , K_{pu} , K_{qe} und K_{qu} sowie der Vektoren K_{pf} und K_{qt} ergeben sich durch partielle Ableitung der für die Einspeisungsmethode gültigen Beziehungen (hinsichtlich Netzberechnung nach der Einspeisungsmethode siehe [1] und [3]).

Es sei darauf hingewiesen, dass die Matrizen K_{pe} und K_{qe} singulär sind, d. h. ihre Spalten sind linear abhängig. Das lässt sich auch physikalisch erkennen. Verdrehen sich sämtliche Spannungszeiger um den gleichen Winkel $\Delta\epsilon$, so wird dadurch die Lastverteilung im Netz nicht verändert.

2.3 Synchronmaschine

2.3.1 Elektrischer Teil. Bei der Synchronmaschine ist die Änderung der Wirk- und Blindleistung Δp und Δq zu bestimmen in Abhängigkeit der Änderung der Klemmspannung um den Betrag Δu bzw. den Winkel $\Delta\epsilon$, der Frequenz Δf , der Drehzahl Δn , des Polradwinkels $\Delta\delta$ und der Erregerspannung Δu_f (Fig. 5).

Zur Untersuchung des Verhaltens der Synchronmaschine wird zweckmässigerweise die Zweiachsentheorie verwendet [4; 5]. Fig. 5a zeigt das Zeigerdiagramm mit der Aufteilung von Strom i und Spannung u in die Komponenten der Längs- und Querachse. Durch diese Komponenten ausgedrückt, lässt sich die von der Synchronmaschine abgegebene Wirk- und Blindleistung aus

$$\begin{aligned} p &= u_d i_d + u_q i_q \\ q &= u_q i_d - u_d i_q \end{aligned} \quad (1)$$

berechnen. Für kleine Änderungen lassen sich die Produkte linearisieren, und zwar

$$\begin{aligned} \Delta p &= u_d \Delta i_d + i_d \Delta u_d + u_q \Delta i_q + i_q \Delta u_q \\ \Delta q &= u_q \Delta i_d + i_d \Delta u_q - u_d \Delta i_q - i_q \Delta u_d \end{aligned} \quad (2)$$

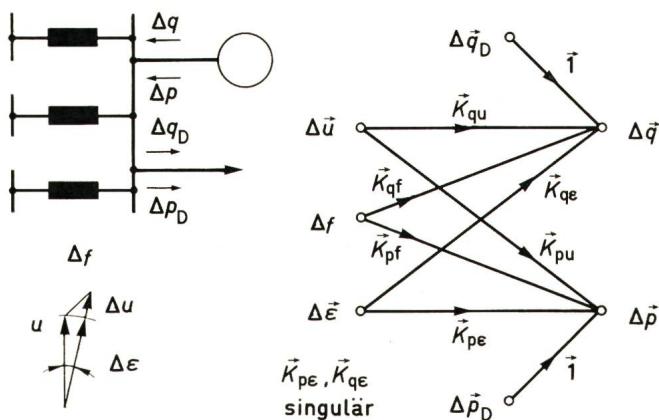
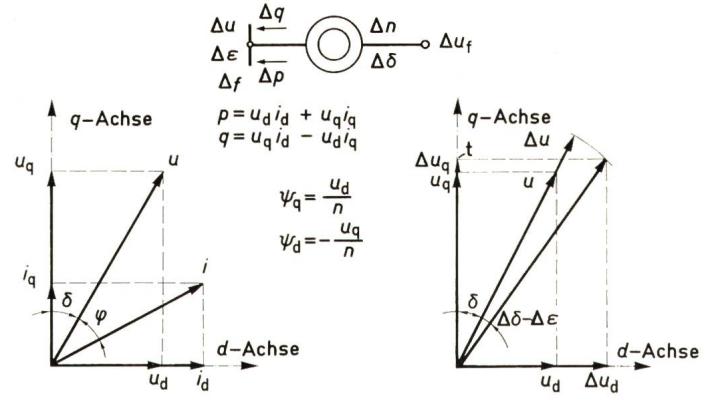


Fig. 4
Übertragungsnetz

a Ersatzschaltbild; b Signalflussdiagramm für die Änderung der Wirk- und Blindleistung
(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Matrizen und Vektoren)



a

b

Fig. 5
Synchronmaschine

a Zeigerdiagramm mit Aufteilung von Strom und Spannung in Längs- und Querachse; b Zeigerdiagramm bei einer Änderung des Spannungszeigers

Diese Beziehungen sind auf der rechten Seite des Signalflussdiagramms in Fig. 6 eingetragen. Die Spannungsänderungen in der Längs- und Querachse können aus Fig. 5b abgelesen werden. Der Spannungszeiger u kann sich gegenüber einem für Übertragungsnetz und Synchronmaschine gemeinsamen Bezugszeiger um den Winkel $\Delta\delta - \Delta\epsilon$ verdrehen. $\Delta\delta$ ist die Winkeländerung infolge einer Verdrehung der q -Achse bei feststehendem Spannungszeiger und $\Delta\epsilon$ die Winkeländerung infolge einer Verdrehung des Zeigers der Klemmspannung bei feststehender q -Achse. Ändert sich die Spannung überdies um den Betrag Δu so gilt (für kleine Änderungen):

$$\begin{aligned} \Delta u_d &= \sin\delta \cdot \Delta u + u_q (\Delta\delta - \Delta\epsilon) \\ \Delta u_q &= \cos\delta \cdot \Delta u - u_d (\Delta\delta - \Delta\epsilon) \end{aligned} \quad (3)$$

Die entsprechenden Zweige befinden sich unten links im Signalflussdiagramm von Fig. 6.

Die Stromänderungen in der Längs- und Querachse folgen gemäss der Theorie der Synchronmaschine aus den Beziehungen

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= \frac{1}{x_d(s)} \Delta \Psi_d + \frac{1}{x_d(1+sT_d')} \Delta u_f \\ \Delta i_q &= \frac{1}{x_q(s)} \Delta \Psi_q \end{aligned} \quad (4)$$

(siehe z. B. [6]). $x_d(s)$ und $x_q(s)$ sind die Reaktanzoperatoren der Längs- und Querachse. x_d ist die synchrone Reaktanz und T_d' die transiente Zeitkonstante der Längsachse. $\Delta \Psi_d$ und $\Delta \Psi_q$ bedeuten die Änderungen der Flussverkettung in der Längs- und Querachse. Bei Vernachlässigung des Ohmschen Widerstandes der Statorwicklung und der transformatorischen Spannung infolge rascher Ausgleichsvorgänge gelten die Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} \Psi_q &= \frac{u_d}{n} \\ \Psi_d &= -\frac{u_q}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

n ist dabei die relative, d. h. die auf die synchrone bezogene Drehzahl der Synchronmaschine. Für kleine Änderungen folgt durch Linearisierung um die Nenndrehzahl $n = 1$:

$$\begin{aligned} \Delta \Psi_q &= \Delta u_d - u_d \Delta n \\ \Delta \Psi_d &= -\Delta u_q + u_q \Delta n \end{aligned} \quad (6)$$

Mit den Beziehungen nach Gl. (4) und (6) kann das Signalflussdiagramm in Fig. 6 komplettiert werden, womit die gesuchten Zusammenhänge festgelegt sind.

2.3.2 Bewegungsgleichung. An der Welle der Synchronmaschine greifen das Antriebsmoment m_A der Turbine und das elektrische Gegenmoment m der Synchronmaschine an (siehe Fig. 7a). Mit der mechanischen Zeitkonstante T_m von Generator und Turbine (Anlaufzeitkonstante) lautet die Bewegungsgleichung:

$$T_m \frac{dn}{dt} = m_A - m \quad (7)$$

Für die zeitliche Ableitung der relativen Drehzahl kann man auch schreiben:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (8)$$

ω_n ist der Nennwert der elektrischen Winkelgeschwindigkeit (für 50 Hz ist $\omega_n = 314 \text{ s}^{-1}$) und δ ist der elektrische Drehwinkel des Rotors gegenüber dem feststehenden Stator. Weicht die auf den Nennwert (von 50 Hz) bezogene Frequenz um Δf von $f = 1$ ab und sind dieser Drehbewegung noch Polradwinkeländerungen $\Delta\delta$ überlagert, so gilt für den Winkel δ :

$$\delta = \omega_n t + \int_0^t \omega_n \Delta f dt + \Delta\delta \quad (9)$$

Aus diesem Ansatz erkennt man, dass Δf die mittlere Frequenzabweichung im Netz bedeutet. Dieser überlagern sich in den einzelnen Kraftwerken (und somit in allen Netzknotenpunkten) weitere, aber sehr kleine Frequenzänderungen, die durch die Polradwinkeländerungen $\Delta\delta$ bedingt sind.

Durch zweimalige Ableitung von Gl. (9) und Einsetzen in die Bewegungsgleichung (7) folgt:

$$\frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{d \Delta f}{dt} = \frac{1}{T_m} (\Delta m_A - \Delta m) \quad (10)$$

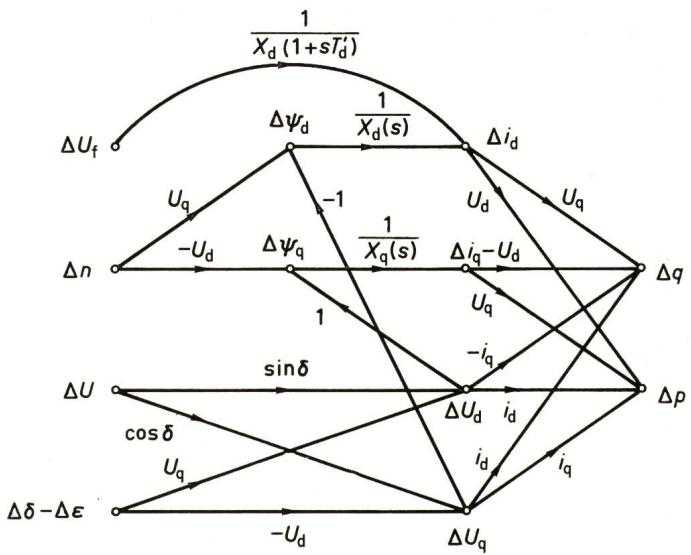


Fig. 6
Synchronmaschine
Signalflussdiagramm

oder nach Einführen der Laplace-Transformation

$$\Delta\omega = \frac{\omega_n}{s^2 T_m} (\Delta m_A - \Delta m - s T_m \Delta f) \quad (11)$$

Diese Beziehung ist im Signalflussdiagramm von Fig. 7b eingetragen.

Das elektrische Drehmoment des Synchrongenerators kann aus der Wirkleistung p und der Drehzahl n aus

$$m = \frac{p}{n} \quad (12)$$

berechnet werden. Für kleine Änderungen um $n = 1$ folgt:

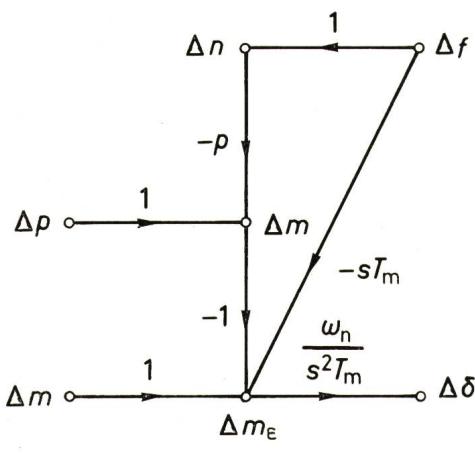
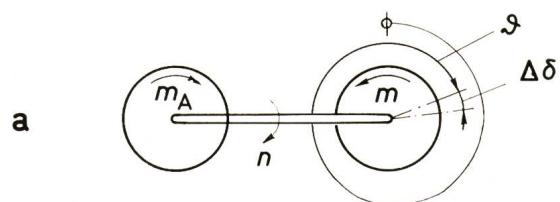
$$\Delta m = \Delta p - p \Delta n \quad (13)$$

Schliesslich ist noch darauf hinzuweisen, dass bei den auftretenden Ausgleichsvorgängen der Netzregelung die Drehzahl-

Fig. 7

Bewegungsgleichung der Synchronmaschine

a an der Generatorwelle angreifende Drehmomente; b Signalflussdiagramm



$$T_m \frac{dn}{dt} = m_A - m$$

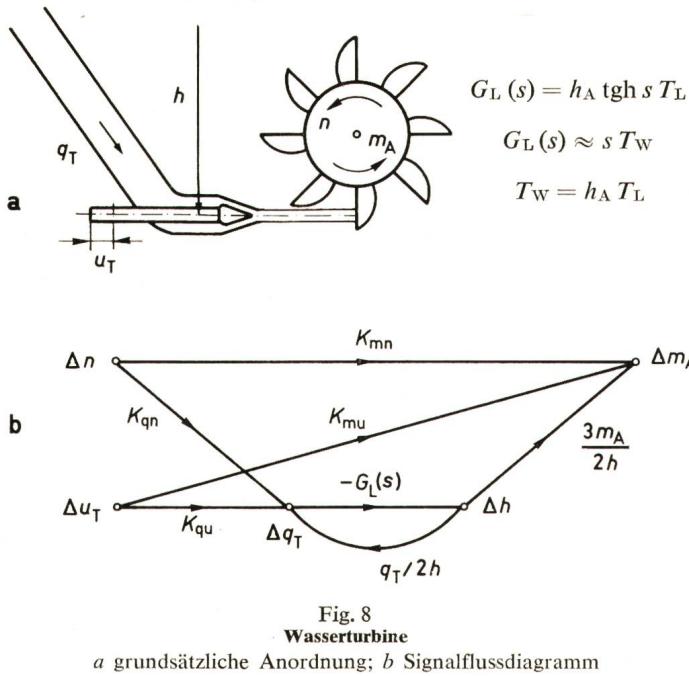
$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$\delta = \omega_n t + \int_0^t \omega_n \Delta f dt + \Delta\delta$$

$$\frac{1}{\omega_n} \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{d \Delta f}{dt} = \frac{1}{T_m} (\Delta m_A - \Delta m)$$

$$p = m n; \Delta m = \Delta p - p \Delta n$$

$$\Delta n = \Delta f$$



änderung gleich der Frequenzänderung gesetzt werden kann, d.h. es ist

$$\Delta n = \Delta f \quad (14)$$

Damit kann das Signalflussdiagramm in Fig. 7b vervollständigt werden.

2.4 Turbinen und Turbinenregelung

2.4.1 Wasserturbinen. Bei einer Wasserturbine hängt das Antriebsmoment m_A von folgenden Einflussgrößen ab: Turbinenöffnung u_T (Stellgröße) Drehzahl n und massgebende Druckhöhe h . Die letztere ist ihrerseits vom Wasserdurchfluss pro Zeiteinheit q_T abhängig, die wiederum durch u_T , n und h bestimmt wird. Für kleine Änderungen gelten die Beziehungen [7]:

$$\Delta m_A = K_{mu} \Delta u_T + K_{mn} \Delta n + \frac{3m_A}{2h} \Delta h \quad (15)$$

$$\Delta q_T = K_{qu} \Delta u_T + K_{qn} \Delta n + \frac{q_T}{2h} \Delta h$$

Die Koeffizienten K_{mu} , K_{mn} , K_{qu} und K_{qn} folgen aus den meist nichtlinearen Betriebskennlinien der Turbine durch Linearisierung im Betriebspunkt.

Zwischen der Änderung der Druckhöhe Δh und der Änderung der Durchflussmenge Δq_T besteht noch der Zusammenhang

$$\Delta h = -G_L(s) \cdot \Delta q_T \quad (16)$$

Die Übertragungsfunktion $G_L(s)$ berücksichtigt den Druckstoss in der Wasserzuführung. Für lange Druckleitungen gilt:

$$G_L(s) = h_A \operatorname{tgh} s T_L \quad (17)$$

Dabei ist h_A der relative Allievische Druckstoss und T_L die Laufzeit der Turbinenleitung. Für kurze Leitungen kann

$$G_L(s) = s T_w \quad (18)$$

gesetzt werden, mit

$$T_w = h_A T_L \quad (19)$$

Oft wird auch für lange Leitungen mit dem vereinfachten Ausdruck nach Gl. (18) gerechnet. Entsprechend den oben zusammengestellten Beziehungen ergibt sich das in Fig. 8b dargestellte Signalflussdiagramm.

2.4.2 Dampfturbine. Bei der Dampfturbine wird nur das für den Verbundbetrieb bedeutsame Normallastarbeitsgebiet betrachtet, d. h. der Betrieb oberhalb der Kesselmindestlast. Für diesen Fall gilt die in Fig. 9a dargestellte grundsätzliche Anordnung. Hochdruckteil HD und Mittel- und Niederdruckteil MD/ND werden dabei stationär mit der gleichen Dampfmenge beaufschlagt [8].

Das Antriebsdrehmoment m_A einer Dampfturbine hängt von der Dampfmenge pro Zeiteinheit im Hochdruckteil q_{DH} und im Mittel- und Niederdruckteil q_{DM} sowie von der Drehzahl n ab. Bei Ausgleichsvorgängen ist zu beachten, dass q_{DH} und q_{DM} nicht gleich sind. Für kleine Änderungen gilt der Ansatz:

$$\Delta m_A = \frac{1}{1+\gamma} m_A \Delta q_{DH} + \frac{\gamma}{1+\gamma} m_A \Delta q_{DM} - m_A \Delta n \quad (20)$$

γ ist dabei das Verhältnis zwischen der Leistung des Mittel- und Niederdruckteils und derjenigen des Hochdruckteils.

Der Dampfstrom erhält im Hochdruckteil HD, im Zwischenüberhitzer ZÜ und im Mittel- und Niederdruckteil MD/ND je eine Verzögerung, die mit guter Näherung durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung berücksichtigt werden kann. Es ist somit

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_{DM} &= \frac{1}{1+s T_M} \Delta q_{DZ} \\ \Delta q_{DZ} &= \frac{1}{1+s T_Z} \Delta q_{DH} \\ \Delta q_{DH} &= \frac{1}{1+s T_H} \Delta q_{DE} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Die Zeitkonstanten T_M und T_H liegen in der Größenordnung von einigen Zehntelsekunden, während die Zeitkonstante T_Z des Zwischenüberhitzers Werte zwischen 5...15 s annehmen kann. Durch geeignete Ausbildung der Regelventile V wird

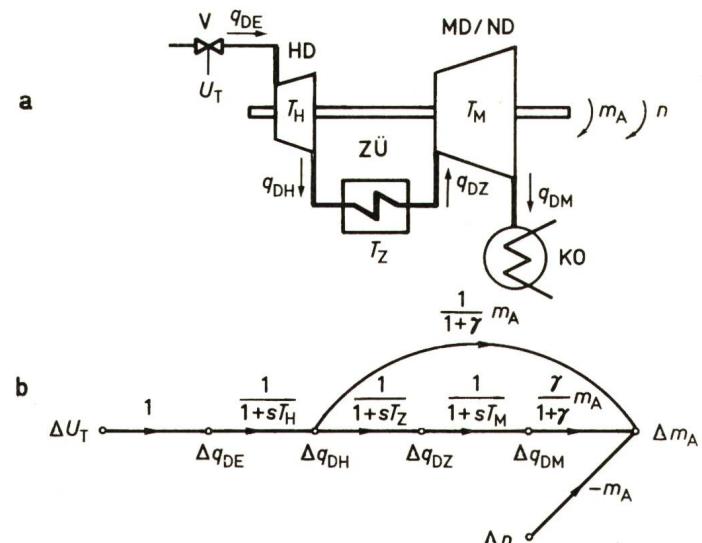


Fig. 9
a grundsätzliche Anordnung; b Signalflussdiagramm

2.5 Erregung und Spannungsregelung

2.5.1 Wälzsektor- oder Öldruckregler. Die klassische Anordnung für die Erregung von Synchronmaschinen besteht aus einer Gleichstrom-Haupterregermaschine und einem Wälzsektor- oder Öldruckregler. Heute werden praktisch nur noch Magnetverstärker- oder Transistorregler eingesetzt, wobei oft die Gleichstromerregermaschine durch einen Drehstromgenerator mit Gleichrichter ersetzt wird.

In Fig. 11a ist das Signalflussdiagramm der klassischen Anordnung dargestellt. T_e ist die Zeitkonstante des Haupterregers. Der Wälzsektor- bzw. Öldruckregler besitzt eine Übertragungsfunktion von $K(1+sT_r)/(1+sK_rT_r)$ mit der die Differenz zwischen Soll- und Istwertänderung Δu_w bzw. Δu der Generatorenspannung verstärkt wird. Auch hier wird der Reziprokwert von K Reglerstatik δ genannt.

Bis anhin ist ein Eingriff der Netzregelung in den Spannungsregler nicht üblich. Um die zukünftigen Erfordernisse der Netzregelung hinsichtlich Blindleistungsbeeinflussung befriedigen zu können, wird die Stellgrößenänderung Δu_{Nq} in den Soll-Ist-Wertvergleich einbezogen. Um trotz der Reglerverstärkung K eine feine Einstellmöglichkeit zu erreichen, wird die Änderung Δu_{Nq} mit dem Faktor $1/K$ abgeschwächt.

Da normalerweise der Haupterreger und der den Regulierwiderstand speisende Hilfsreger auf der Generatorwelle sitzen, so macht sich eine Drehzahländerung Δn auch in einer Erregerspannungsänderung Δu_t bemerkbar. Während sich die Drehzahländerung im Haupterreger verzögert auf Δu_t auswirkt, ist der Einfluss der Hilfsspannungsänderung auf Δu_t mit der Zeitkonstante T_e verzögert. Als resultierender Zusammenhang zwischen Δu_t und Δn kann näherungsweise $2u_t(1+sT_e/2)/(1+sT_e)$ gesetzt werden.

2.5.2 Magnetverstärker- oder Transistorregler. Für eine übliche Ausführung eines Magnetverstärker- oder Transistorreglers geht das Signalflussdiagramm aus Fig. 11b hervor. Der eigentliche Regelverstärker besitzt eine sehr grosse Signalverstärkung K_v . Die Erregerspannungsänderung Δu_t ist über

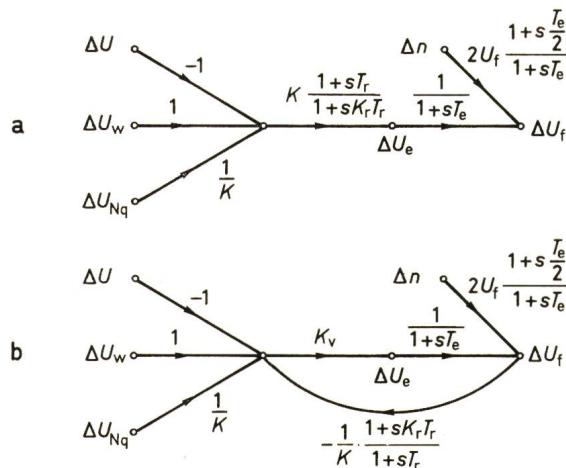
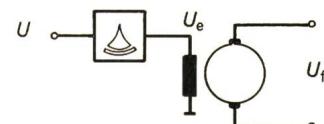


Fig. 11 Erregung und Spannungsregelung, Signalflussdiagramm

a mit Wälzsektor- oder Öldruckregler; b mit Magnetverstärker- oder Transistorregler

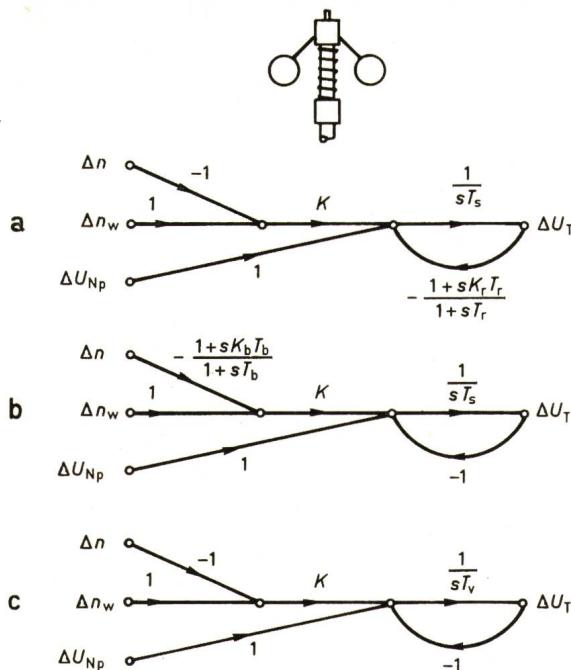


Fig. 10
Turbinenregelung, Signalflussdiagramm

- a Regler für Wasserturbinen mit nachgebender Rückführung
- b Regler für Wasserturbinen mit Beschleunigungsmesswerk
- c Regler für Dampfturbinen

erreicht, dass der Dampfstrom q_{DE} am Eingang der Turbine proportional der Stellgröße (Stellung der Regelventile) u_T ist. Somit gilt

$$\Delta q_{DE} = \Delta u_T \quad (22)$$

Aus den Beziehungen (20)...(22) lässt sich das Signalflussdiagramm entsprechend Fig. 9b aufstellen.

2.4.3 Turbinenregelung. Bei Wasserturbinen werden Turbinenregler mit nachgebender Rückführung oder mit Beschleunigungsmesswerk verwendet.

Fig. 10a zeigt das Signalflussdiagramm für einen Regler mit nachgebender Rückführung. Der Hauptservomotor mit der Zeitkonstanten T_s zur Verstellung der Turbinenöffnung Δu_T ist über ein zeitabhängiges Glied $-(1+sK_rT_r)/(1+sT_r)$ zurückgekoppelt. Die Differenz zwischen Soll- und Istwertänderung der Drehzahl Δn_w bzw. Δn wird mit dem Faktor K verstärkt. Der Reziprokwert von K wird als Statik $\delta = 1/K$ bezeichnet.

Die Stellgrößenänderung für die Netzregelung der Wirkleistung Δu_{Np} greift (über entsprechende hydraulische Kraftverstärker) direkt an den Eingang des Hauptservomotors ein. Der besseren Übersicht halber sind die kleinen Zeitkonstanten der hydraulischen Kraftverstärker vernachlässigt.

Beim Turbinenregler mit Beschleunigungsmesswerk ist der Hauptservomotor (Zeitkonstante T_s) direkt rückgekoppelt (siehe Fig. 10b). Dafür befindet sich im Zweig der Drehzahländerung Δn ein zeitabhängiges Glied $-(1+sK_bT_b)/(1+sT_b)$, das neben der Drehzahländerung Δn auch näherungsweise deren Beschleunigung erfasst.

Bei Dampfturbinen ist die Turbinenregelung etwas einfacher aufgebaut (Fig. 10c). Der Verstellmotor für die Regelventile (Zeitkonstante T_v) ist starr rückgekoppelt. Andere zeitabhängige Glieder bestehen nicht, wenn wiederum von den kleinen Zeitkonstanten der hydraulischen Zwischenverstärker abgesehen wird.

ein Glied mit der Übertragungsfunktion $-(1+sK_rT_r)/(1+sT_r)$ K zurückgekoppelt. Ist $K_v \gg 1/K$, so ist die resultierende Übertragungsfunktion des rückgekoppelten Kreises praktisch gleich $K(1+sT_r)/(1+sK_rT_r)$.

Eingriff der Netzregelung Δu_{Nq} und Drehzahlabhängigkeit von Δu_f wurden gleich wie in Fig. 11a vorausgesetzt. Dabei ist zu beachten, dass infolge der Rückführung von Δu_f auf den Eingang des Regelverstärkers der Einfluss der Drehzahländerung auf die Erregerspannungsänderung Δu_f praktisch Null ist.

3. Das Verbundnetz mit Primärregelung

3.1 Umformung und Zusammenfassung der Signalflussdiagramme, Übertragungsfunktion

3.1.1 Kraftwerke. Die Signalflussdiagramme für Synchronmaschine in Fig. 6 und 7b, der Wasser- bzw. Dampfturbine in Fig. 8b bzw. 9b, der Turbinenregelung in Fig. 10 sowie der Erregung und Spannungsregelung in Fig. 11 können zum resultierenden Signalflussdiagramm der Kraftwerke zusammengezogen werden. Werden dabei einige, weiter nicht interessierende Knotenpunkte eliminiert, so ergibt sich das in Fig. 12 dargestellte Signalflussdiagramm. Bei der Turbinen- und Spannungsregelung wurde die Sollwertänderung Δn_w bzw. $\Delta u_w = 0$ gesetzt und die entsprechenden Zweige a priori weggelassen. Dabei wurde zusätzlich Matrizen- und Vektorschreibweise eingeführt, um gleichzeitig alle Kraftwerke berücksichtigen zu können. Die Übertragungsmatrizen sind dabei durchwegs Diagonalmatrizen, mit Ausnahme der von Δf weggehenden Zweige, welche Vektoren enthalten, da Δf ein Skalar ist. Die Bedeutung der einzelnen Übertragungsfunktionen $G_{xy}(s)$ ist im Anhang (Abschnitt 4.1) angegeben.

Das vorliegende Signalflussdiagramm liefert die Wirk- und Blindleistungsänderungen Δp und Δq , die durch Änderungen der Netzspannung (Δu , $\Delta \vec{e}^1$), der Frequenz Δf und der Stell-

¹⁾ Die mit einem Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Vektoren der Matrizenrechnung (nicht Raumvektoren!).

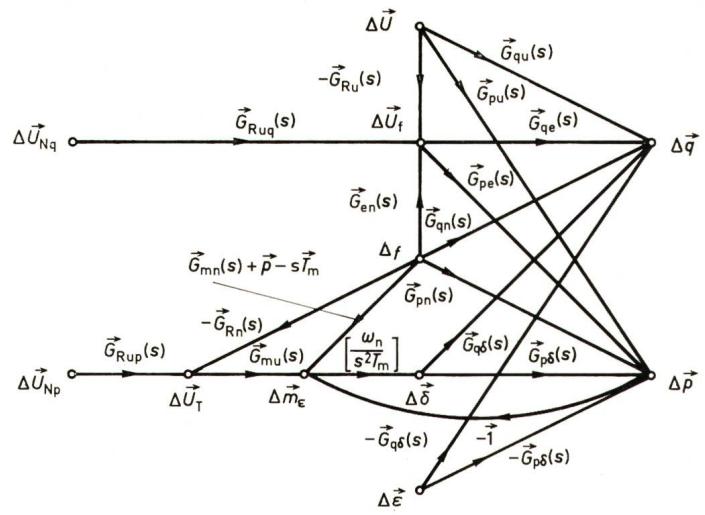
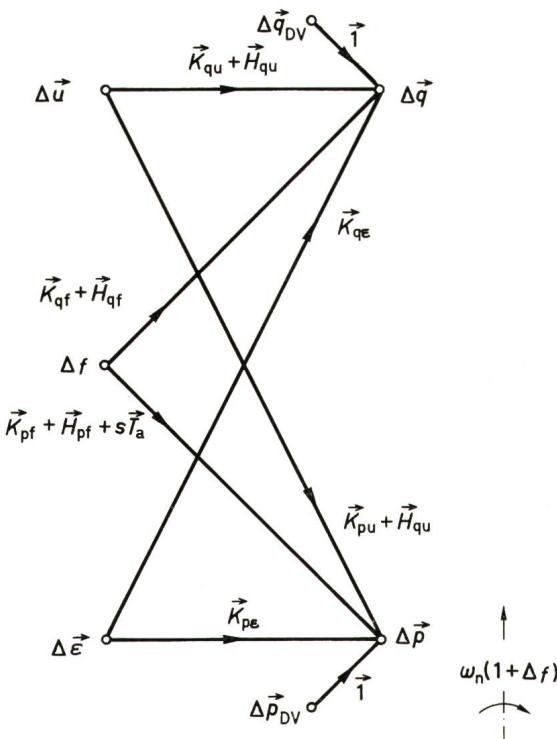


Fig. 12
Kraftwerke, Signalflussdiagramm

grössen der Netzregelung Δu_{Np} und Δu_{Nq} in den Kraftwerken bedingt sind.

3.1.2 *Übertragungsnetz und Verbraucher.* Wird das Signalflussdiagramm für das Übertragungsnetz in Fig. 4b und dasjenige für die Verbraucher in Fig. 3b (letzteres in Matrix- und Vektorschreibweise) miteinander kombiniert, so ergibt sich nach Elimination der Knotenpunkte Δp_D und Δq_D das Signalflussdiagramm nach Fig. 13.

Die Wirk- und Blindleistungsänderungen Δp und Δq sind hier durch die Änderungen der Netzspannung (Δu , $\Delta \vec{e}$), der Frequenz Δf , und der Wirk- und Blindlast Δp_{DV} und Δq_{DV} im Übertragungsnetz und Verbraucher bestimmt.

3.1.3 *Das komplette Verbundnetz.* Bei den Ausgangsgrößen Δp und Δq in den beiden Signalflussdiagrammen in Fig. 12 und 13 handelt es sich um die gleichen Größen. Um das Ver-

Fig. 13
Übertragungsnetz und Verbraucher, Signalflussdiagramm
 mit Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Matrizen und
 Vektoren)

$$\vec{y} = \vec{y}_a = \vec{A} \vec{x} + \vec{a}$$

$$\vec{y} = \vec{y}_b = \vec{B} \vec{x} + \vec{b}$$

$$\vec{O} = [\vec{A} - \vec{B}] \vec{x} + \vec{a} - \vec{b}$$

$$\vec{x} = [\vec{A} - \vec{B}]^{-1} (\vec{b} - \vec{a})$$

$$\vec{\varphi} = \vec{y}_a - \vec{y}_b$$

$$\vec{x} = -\vec{K}_p \vec{\varphi}; \quad K_p \rightarrow \infty$$

$$-\vec{K}_p^{-1} \vec{x} = [\vec{A} - \vec{B}] \vec{x} + \vec{a} - \vec{b}$$

$$\vec{x} = [\vec{K}_p^{-1} + \vec{A} - \vec{B}]^{-1} (\vec{b} - \vec{a})$$

$$\Delta \delta_b = \sum \Delta \delta_j = \vec{e}^T \Delta \vec{\delta} = 0$$

$$\vec{e}^T = [1 \ 1 \ \dots \ 1]$$

halten des kompletten Verbundnetzes zu erhalten, sind die beiden Signalflussdiagramme miteinander zu kombinieren. Das Naheliegendste wäre, das Signalflussdiagramm in Fig. 13 algebraisch nach Δu und $\Delta \varepsilon$ aufzulösen. Dies bedingt eine Invertierung der entsprechenden Matrizen. Da jedoch, wie bereits erwähnt, K_{qe} und K_{pe} singulär sind (siehe Abschnitt 2.2), so ist diese Inversion nicht möglich. Eine Auflösung der Beziehungen des Signalflussdiagramms in Fig. 12 nach Δu und $\Delta \varepsilon$ ist zwar möglich, liefert jedoch relativ komplexe Übertragungsfunktionen, die zum Teil sogar unstabil sein können.

Es wird daher ein dritter Weg beschritten, bei dem die beiden Signalflussdiagramme ohne weitere Umformungen miteinander kombiniert werden können. Das Prinzip soll anhand einer allgemeinen Betrachtung kurz erläutert werden.

Die Signalflussdiagramme in den Fig. 12 und 13 können durch zwei Matrixgleichungen

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_a = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{a} \quad (23a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_b = \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (23b)$$

wiedergegeben werden. Werden die beiden Gleichungen gleichgesetzt, so folgt

$$\mathbf{O} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}] \mathbf{x} + \mathbf{a} - \mathbf{b} \quad (24)$$

oder nach der Unbekannten x aufgelöst:

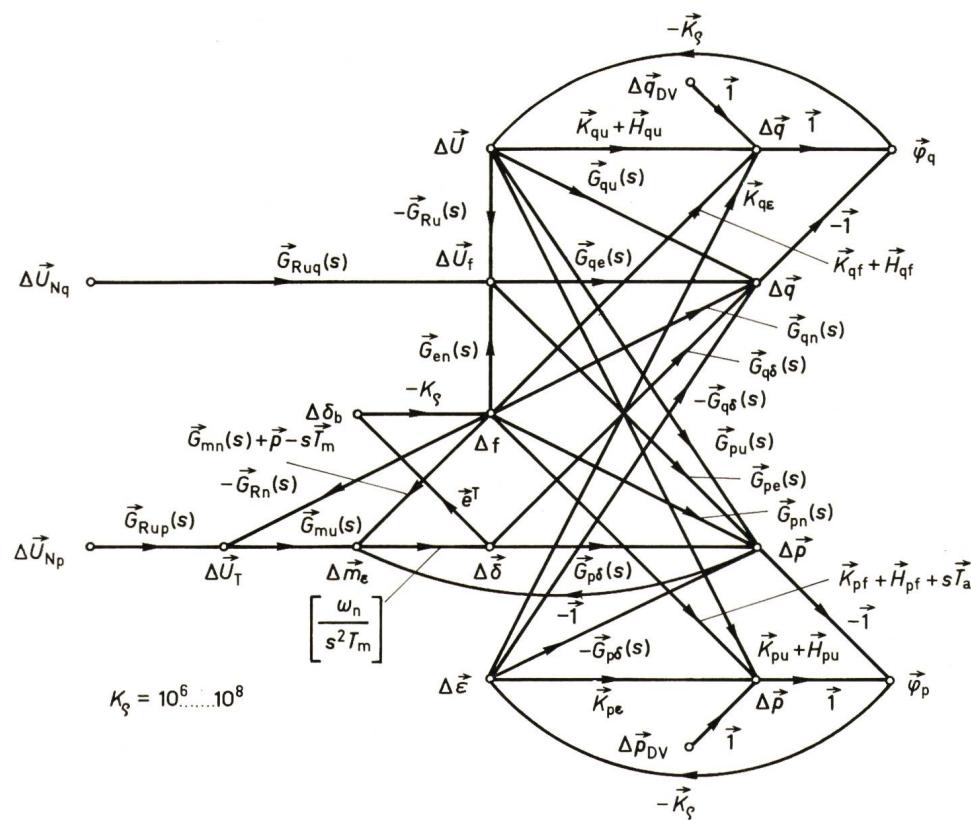
$$\mathbf{x} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}]^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \quad (25)$$

Man kann aber auch die Differenz

$$\vec{\phi} = \mathbf{y}_a - \mathbf{y}_b \quad (26)$$

bilden und zwischen dieser Differenz $\vec{\varphi}$ und der Unbekannten x die «Rückkopplungsbeziehung»

$$\mathbf{x} = -\mathbf{K}_\varrho \vec{\varphi} \quad (27)$$



einführen, wobei \mathbf{K}_ϱ eine Diagonalmatrix ist, deren Glieder theoretisch $K_\varrho \rightarrow \infty$ gehen sollten. Setzt man die Gl. (23a) und (23b) in (26) ein und ersetzt darin $\vec{\varphi}$ durch $-\mathbf{K}_\varrho^{-1} \mathbf{x}$, so folgt

$$- \mathbf{K}_0^{-1} \mathbf{x} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}] \mathbf{x} + \mathbf{a} - \mathbf{b} \quad (28)$$

oder nach x aufgelöst

$$\mathbf{x} = [\mathbf{K}_o^{-1} + \mathbf{A} - \mathbf{B}]^{-1} (\mathbf{b} - \mathbf{a}) \quad (29)$$

Je grösser K_ℓ ist, um so kleiner ist K_ℓ^{-1} und die Lösung nach Gl. (29) nähert sich um so besser an die genaue Lösung in Gl. (25).

Das hier angegebene Verfahren ist in der Analogrechentechnik bestens bekannt. Mit einem offenen Verstärker (sehr hohe Verstärkung) kann durch geeignete Rückkopplung z. B. mit einem Multiplikator dividiert oder mit einem Integrator differenziert werden.

Wenden die beiden Signalflussdiagramme in Fig. 12 und 13 an den entsprechenden Eingangsknoten Δu , $\Delta \dot{e}$ und Δf miteinander verbunden, an den Ausgängen für Δp bzw. Δq die Differenzen gebildet ($\dot{\varphi}_p$ bzw. $\dot{\varphi}_q$) und schliesslich die Rückkopplungszweige von $\dot{\varphi}_p$ nach $\Delta \dot{e}$ und $\dot{\varphi}_q$ nach Δu eingeführt, so ergibt sich das Signalflussdiagramm in Fig. 14.

Die Frequenzänderung Δf war in den bisherigen Signalflussdiagrammen Eingangsgröße. Im gesamten Verbundnetz ist aber gerade die Frequenzänderung Δf eine der am meisten interessierenden Größen. Es ist somit noch eine Bestimmungsgleichung für die Frequenzänderung selber aufzustellen. Bei der Ableitung aller vorstehenden Beziehungen wurden (infolge der Linearisierung) kleine Änderungen vorausgesetzt. Insbesondere müssen auch die Polradwinkeländerungen $\Delta \vec{\delta}$ klein sein. Um dies zu gewährleisten, werden die Polradwinkeländerungen gegenüber einem mit der Kreisfrequenz $\omega_n(1+\Delta f)$ umlaufenden fiktiven Bezugssystem gemessen, derart, dass die Summe der Polradwinkeländerungen

$$\Delta \delta_b = \sum \Delta \delta_i = 0 \quad (30)$$

ist. Mit dem Zeilen-Einheitsvektor

$$\mathbf{e}^T = [1 \ 1 \dots 1] \quad (31)$$

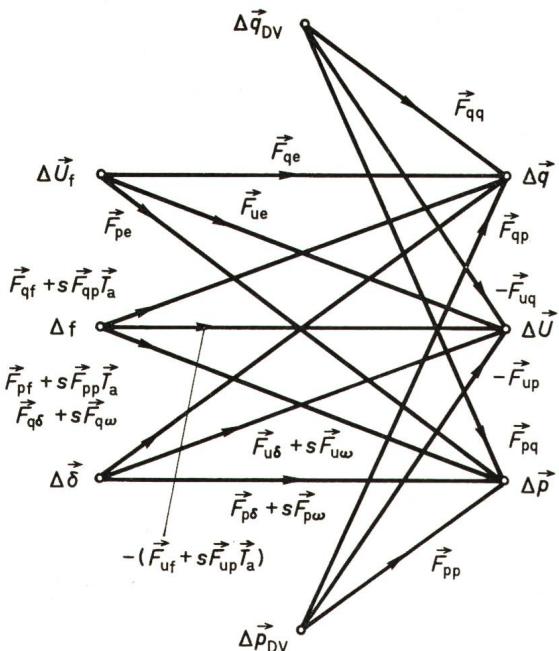
kann obige Beziehung auch als

$$\Delta\delta_b \cdot e^T \Delta\vec{\delta} = 0 \quad (32)$$

geschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass das Produkt $e^T \Delta\delta$ ein skalares Produkt ist. Die Bedingungen in Gl. (32) ergibt nun gerade die gesuchte Bestimmungsgleichung für die Frequenzänderung Δf . Diese muss so festgelegt werden, dass der Zeiger des fiktiven Bezugssystems mit $\omega_n(1 + \Delta f)$ gerade so rasch umläuft, dass $\Delta\delta_b = 0$ ist. Im Signal-

Fig. 14
Komplettes Verbundnetz, Signalflussdiagramm

(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstaben
bedeuten Matrizen und Vektoren)



$$\begin{aligned}
 G_{\text{pu}}(s) &\approx G_{\text{pu}} \\
 G_{\text{p}\delta}(s) &\approx G_{\text{p}\delta} + s G_{\text{p}\omega} \\
 G_{\text{p}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{p}\text{n}} \\
 G_{\text{p}\text{e}}(s) &\approx G_{\text{p}\text{e}} \\
 G_{\text{e}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{e}\text{n}} \\
 G_{\text{q}\text{u}}(s) &\approx G_{\text{q}\text{u}} \\
 G_{\text{q}\delta}(s) &\approx G_{\text{q}\delta} + s G_{\text{q}\omega} \\
 G_{\text{q}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{q}\text{n}} \\
 G_{\text{q}\text{e}}(s) &\approx G_{\text{q}\text{e}}
 \end{aligned}$$

Fig. 15
Synchronmaschine, Übertragungsnetz und Verbraucher
umgeformtes Signalflussdiagramm bei Vereinfachung
der Übertragungsfunktion der Synchronmaschine

(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Matrizen und Vektoren)

flussdiagramm kann dies so berücksichtigt werden, dass zwischen $\Delta\delta_b$ und Δf ein «Rückkopplungszweig» mit dem Übertragungsfaktor $-K_\varrho$ eingeführt wird (siehe Fig. 14), wobei auch hier $K_\varrho \rightarrow \infty$ gehen sollte.

Das Signalflussdiagramm in Fig. 14 eignet sich sehr gut zur Berechnung der Frequenzgangkurven zwischen bestimmten Ein- und Ausgangsknoten. Für gegebene Zahlenwerte für die einzelnen Zweige lässt sich z. B. das Signalflussdiagramm auf einem Digitalrechner abbauen und umformen, bis nur noch die gewünschten Ein- und Ausgangsknoten übrig bleiben. Für die praktische Rechnung kann dabei $K_\varrho = 10^6 \dots 10^8$ gesetzt werden. Dagegen ist es praktisch unmöglich, aus diesem Signalflussdiagramm die expliziten Übertragungsfunktionen zu bestimmen, wie sie z. B. für die optimale Anpassung der Netzregelung benötigt werden.

Es ist daher notwendig, Vereinfachungen und Umformungen vorzunehmen. Insbesondere soll angestrebt werden, das Verbundnetz im Zustandsraum darzustellen. Damit können die in der modernen Systemtheorie entwickelten Methoden zur Bestimmung der optimalen Netzregelung Verwendung finden.

3.2 Vereinfachung der Übertragungsfunktionen

3.2.1 Synchronmaschinen. Da bei der Netzregelung nur relativ langsame Ausgleichsvorgänge auftreten, so können die Übertragungsfunktionen der Synchronmaschinen relativ gut vereinfacht werden, indem diese durch den statischen Übertragungsfaktor ersetzt und somit frequenzunabhängig angesetzt werden. Lediglich bei den Übertragungsfunktionen $G_{\text{p}\delta}(s)$ und $G_{\text{q}\delta}(s)$ ist ein mit s proportionales Dämpfungsglied zu berücksichtigen, da sonst ungedämpfte Polradschwingungen auftreten würden. Eine solche Näherung wäre natürlich unbrauchbar.

Man kann somit näherungsweise setzen:

$$\left. \begin{aligned}
 G_{\text{pu}}(s) &\approx G_{\text{pu}} & G_{\text{qu}}(s) &\approx G_{\text{qu}} \\
 G_{\text{p}\delta}(s) &\approx G_{\text{p}\delta} + s G_{\text{p}\omega} & G_{\text{q}\delta}(s) &\approx G_{\text{q}\delta} + s G_{\text{q}\omega} \\
 G_{\text{p}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{p}\text{n}} & G_{\text{q}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{q}\text{n}} \\
 G_{\text{p}\text{e}}(s) &\approx G_{\text{p}\text{e}} & G_{\text{q}\text{e}}(s) &\approx G_{\text{q}\text{e}} \\
 G_{\text{e}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{e}\text{n}} & G_{\text{e}\text{n}}(s) &\approx G_{\text{e}\text{n}}
 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Die Näherung ist besser als man im ersten Moment erwarten würde, da nämlich in den meisten Übertragungsfunktionen die Zeitkonstanten im Nenner (Polstellen) durch Zeitkonstanten im Zähler (Nullstellen) annähernd kompensiert werden.

3.2.2 Synchronmaschinen, Übertragungsnetz und Verbraucher. Der Teil auf der rechten Seite des Signalflussdiagramms in Fig. 14 stellt das Verhalten der Synchronmaschine, des Übertragungsnetzes und der Verbraucher dar. Mit den für die Synchronmaschine eingeführten Näherungen treten in all diesen Zweigen nur noch reine Zahlenmatrizen auf. Das Signalflussdiagramm kann damit durch Matrixoperationen umgeformt werden. Die numerischen Rechnungen kann man auf einem Digitalrechner ohne Schwierigkeiten programmieren und durchführen.

Werden dabei die nicht interessierenden Knotenpunkte eliminiert, so ergibt sich das Signalflussdiagramm in Fig. 15. Bei der Umformung wurde noch eine weitere Vereinfachung vorgenommen, indem von den von $\Delta\delta$ weggehenden Zweigen in Fig. 14 das Dämpfungsglied in $G_{\text{p}\delta}(s)$ und $G_{\text{q}\delta}(s)$ nur dort berücksichtigt wurde, wo $\Delta\delta$ direkt von der Polradwinkeländerung $\Delta\delta$ abhängt. Die Berechnung der in Fig. 15 auftretenden Matrizen ist im Anhang (Abschnitt 4.2.1) angegeben.

Es ist interessant darauf hinzuweisen, dass die Anlaufzeitkonstante \mathbf{T}_a der Verbraucher mit \mathbf{F}_{pp} , \mathbf{F}_{qp} bzw. \mathbf{F}_{up} multipliziert werden, d. h. mit den gleichen Matrizen, welche den Zusammenhang zwischen $\Delta\mathbf{p}$, $\Delta\mathbf{q}$ bzw. $\Delta\mathbf{u}$ und $\Delta\mathbf{p}_{\text{DV}}$ festlegen. Die Anlaufzeitkonstanten \mathbf{T}_a der Verbraucher werden somit im gleichen Verhältnis wie die Wirklaständerungen $\Delta\mathbf{p}_{\text{DV}}$ auf die einzelnen Kraftwerke verteilt.

3.2.3 Turbinen und Turbinenregelung. Die Beziehungen für die Turbinen und Turbinenregelung lassen sich unabhängig von Turbinen- und Reglerart so vereinfachen, dass unter Berücksichtigung der Bewegungsgleichung der Synchronmaschine für die Polradwinkeländerung die folgende Beziehung entsteht:

$$\Delta\delta = \frac{\omega_n}{s^2 T_m} \left[\frac{1 + s T_{\text{tu}}}{1 + s T_{\text{tm}}} (K_{\text{tu}} \Delta u_{\text{Np}} - K_t \Delta f) - s T_m \Delta f - \Delta p \right] \quad (34)$$

$$\Delta u_f = \frac{1 + s T_r}{1 + s K_r T_r} (\Delta u_{Nq} - K \Delta u)$$

$$\Delta \delta = \frac{\omega_n}{s^2 T_m} \left[\frac{1 + s T_{tu}}{1 + s T_{tm}} (K_{tu} \Delta u_{Np} - K_t \Delta f) - s T_m \Delta f - \Delta_p \right]$$

Fig. 16

**Turbine, Erregung und Regelung
Vereinfachte Signalflussdiagramme**

- a Turbine, Turbinenregelung und Bewegungsgleichung der Synchronmaschine
b Erregung und Spannungsregelung

Die Übertragungsfaktoren K_{tu} und K_t sowie die Zeitkonstanten T_{tm} und T_{tu} sind je nach Turbinen- und Reglerart verschieden (siehe Anhang, Abschnitt 4.2.2). Für diese Beziehung lässt sich das Signalflussdiagramm in Fig. 16a angeben.

$\Delta m'$ ist eine Hilfsgröße, die gleich dem zeitverzögerten Anteil im ersten Ausdruck in der eckigen Klammer von Gl. (34) ist. $\Delta \omega$ ist gleich $\Delta \dot{\delta}$, d. h. der zeitlichen Ableitung der Polradwinkeländerung $\Delta \delta$.

3.2.4 Erregung und Spannungsregelung. Vernachlässigt man die Zeitkonstante des Haupterregers T_e so gilt für die Erregerspannungsänderung:

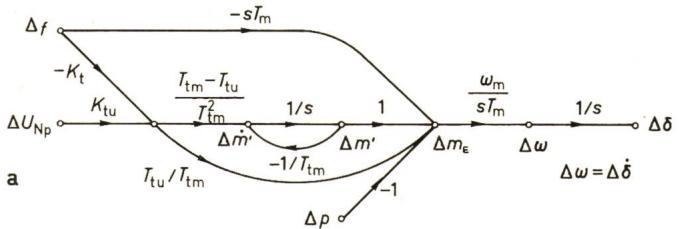
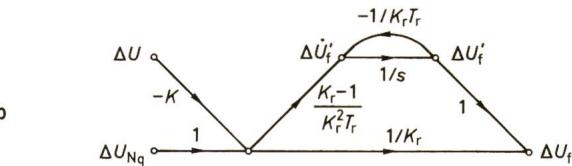
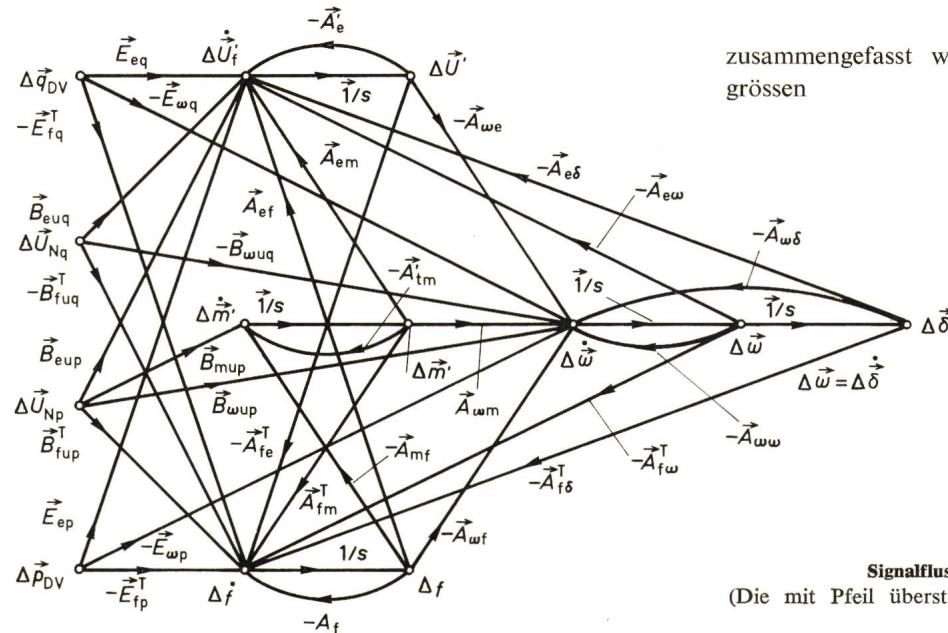
$$\Delta u_f = \frac{1 + s T_r}{1 + s K_r T_r} (\Delta u_{Nq} - K \cdot \Delta u) \quad (35)$$

Dabei ist zu beachten, dass der drehzahlabhängige Anteil (Zweig $G_{en}(s)$ in Fig. 14) bereits bei der Vereinfachung und Umformung der Synchronmaschine berücksichtigt worden ist.

Aus Gl. (35) folgt das Signalflussdiagramm in Fig. 16b. $\Delta u_f'$ stellt der zeitverzögerte Anteil der Erregerspannungsänderung Δu_f dar.

3.3 Darstellung im Zustandsraum

In den Signalflussdiagrammen von Fig. 15 und 16 treten als zeitabhängige Glieder nur noch Integrationen ($1/s$) oder



Differentiationen (Multiplikation mit s) auf. Es ist nun nicht mehr schwierig, auf die Darstellung im Zustandsraum überzugehen.

Werden die Signalflussdiagramme in Fig. 16a und b zur Berücksichtigung aller Kraftwerke in Matrixform übergeführt und mit dem Signalflussdiagramm in Fig. 15 kombiniert, so ergibt sich nach einiger Umformung und Beseitigung nicht interessierender Knotenpunkte das Signalflussdiagramm für die Zustandsgrößen in Fig. 17. Δf , $\Delta \dot{\delta}$, $\Delta \omega$, $\Delta m'$ und $\Delta u_f'$ bilden die Zustandsgrößen. Das Signalflussdiagramm zeigt die Abhängigkeit zwischen den Zustandsgrößen, ihren ersten Ableitungen nach der Zeit und den Stellgrößen Δu_{Np} und Δu_{Nq} sowie den Störgrößen Δp_{DV} und Δq_{DV} . Die Zustandsgleichung für die Frequenzänderung ergibt sich, wie bereits besprochen, aus der Bedingung, dass die Summe der Polradwinkeländerungen $\sum \Delta \delta_i$, gleich Null sein muss (siehe Abschnitt 3.1.3). Der besseren Übersicht halber wurden in Fig. 17 die Ausgangsgrößen, d. h. Wirk- und Blindleistungsänderung Δp und Δq sowie die Spannungsänderung Δu weggelassen. Die einzelnen Zustandsgrößen können zum Zustandsvektor

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \omega \\ \Delta m' \\ \Delta u_f' \end{bmatrix} \quad (36)$$

zusammengefasst werden. Entsprechend werden die Stellgrößen

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta u_{Np} \\ \Delta u_{Nq} \end{bmatrix} \quad (37)$$

und die Störgrößen

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \Delta p_{DV} \\ \Delta q_{DV} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Fig. 17
Signalflussdiagramm für die Zustandsgrößen
(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Matrizen und Vektoren)

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \vec{\delta} \\ \Delta \vec{\omega} \\ \Delta \vec{m'} \\ \Delta \vec{u}_t' \end{bmatrix} \quad \vec{u} = \begin{bmatrix} \Delta \vec{u}_{Np} \\ \Delta \vec{u}_{Nq} \end{bmatrix} \quad \vec{y} = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta \vec{p} \\ \Delta \vec{q} \\ \Delta \vec{u} \end{bmatrix}$$

$$\vec{x} = \vec{A} \vec{x} + \vec{B} \vec{u} + \vec{E} \vec{v}$$

$$\vec{y} = \vec{C} \vec{x} + \vec{D} \vec{u} + \vec{F} \vec{v}$$

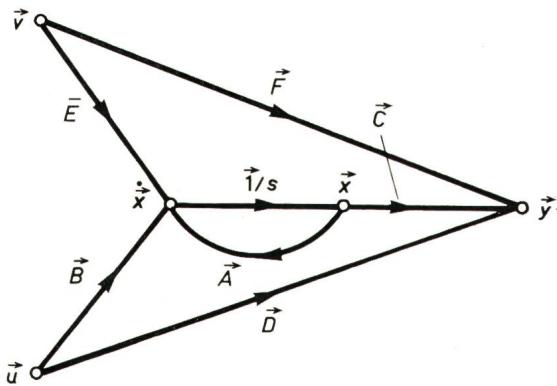


Fig. 18

Allgemein gültiges Signalflussdiagramm für die Darstellung im Zustandsraum
(Die mit Pfeil überstrichenen Buchstaben bedeuten Matrizen und Vektoren)

zusammengezogen. Fasst man noch die Ausgangsgrößen zum Vektor

$$y = \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta p \\ \Delta q \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (39)$$

zusammen, so folgt für das Verbundnetz die allgemeine, bekannte Form der Vektordifferentialgleichung im Zustandsraum:

$$\dot{x} = \mathbf{A} x + \mathbf{B} u + \mathbf{E} v \quad (40a)$$

$$y = \mathbf{C} x + \mathbf{D} u + \mathbf{F} v \quad (40b)$$

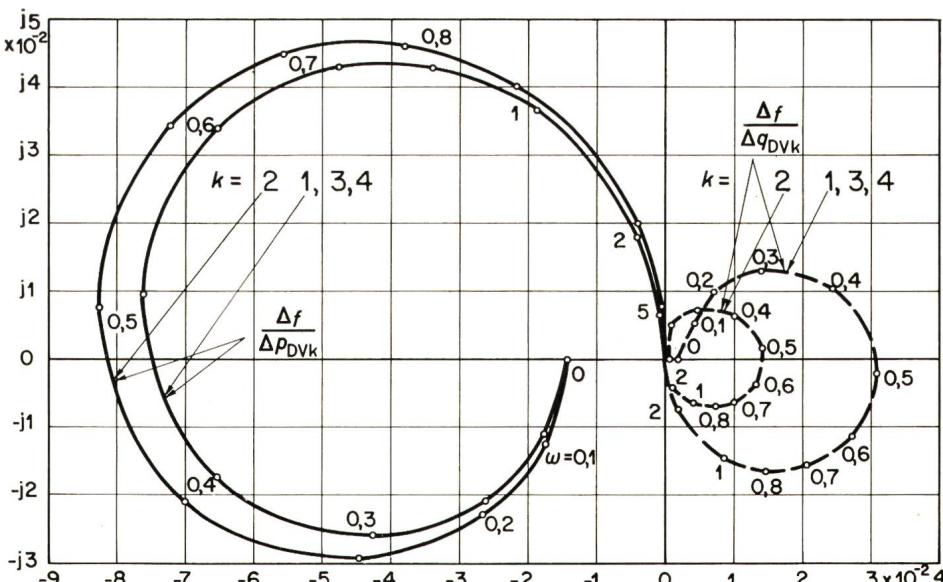


Fig. 19
Berechnete Frequenzgangkurven für das Netz
in Fig. 1
Frequenzänderung Δf in Abhängigkeit von Wirk- bzw. Blindlaständerungen Δp_{DVk} bzw. Δq_{DVk} in den einzelnen Netzknotenpunkten $k = 1 \dots 4$.

Die Matrizen \mathbf{A} , \mathbf{B} und \mathbf{E} setzen sich aus den entsprechenden Zweigen von Fig. 17 zusammen. Analog geben die Matrizen \mathbf{C} , \mathbf{D} und \mathbf{F} die Zusammenhänge zwischen Ausgangsgrößen, Zustandsgrößen, Stellgrößen und Störgrößen. Die Ableitung der obigen Beziehungen wird im Anhang (Abschnitt 4.3) näher angegeben.

Die Gl. (40a) und (40b) können durch das Signalflussdiagramm in Fig. 18 wiedergegeben werden, das ganz allgemein für die Darstellung im Zustandsraum gilt.

3.4 Berechnete Frequenzgangkurven

Aufgrund der Darstellung im Zustandsraum, gemäß Abschnitt 3.3, wurden mit Hilfe eines Digitalrechners Frequenzgangkurven berechnet, und zwar für ein einfaches Verbundnetz mit vier Knotenpunkten, entsprechend der Anordnung in Fig. 1. Einige Beispiele sind in den Fig. 19...22 wiedergegeben.

Fig. 19 zeigt die Abhängigkeit der Frequenzänderung Δf von Wirk- und Blindlaständerungen Δp_{DVk} und Δq_{DVk} in den einzelnen Netzknotenpunkten $k = 1 \dots 4$. Laständerungen, die in den Netzknotenpunkten 1, 3 und 4 auftreten, ergeben praktisch die gleichen Frequenzgangkurven. Laständerungen im Knotenpunkt 2 geben einen abweichenden Kurvenverlauf, insbesondere für Blindlaständerungen. Die Begründung liegt darin, dass die Knotenpunkte 1, 3 und 4 durch relativ kurze Hochspannungsleitungen miteinander verbunden sind und somit eine starke Kopplung vorliegt, wogegen der Knotenpunkt 2 weiter entfernt ist, was eine weniger enge Kopplung ergibt.

Die Frequenzgangkurven weisen eine ausgeprägte Resonanzüberhöhung auf, und zwar im Frequenzbereich von etwa $\omega = 0,5 \text{ s}^{-1}$. Dieser Effekt ist durch den Einfluss der Turbinenregelung bedingt.

Im Zusammenhang mit der Netzregelung interessiert insbesondere der Einfluss der Stellgrößen Δu_{Npk} und Δu_{Nqk} der einzelnen Kraftwerke. In Fig. 20 ist die Abhängigkeit der Frequenzänderung dargestellt. Daraus geht hervor, dass vor allem die Stellgrößen für die Wirkleistung Δu_{Npk} einen entscheidenden Einfluss auf die Frequenzänderung ausüben. Der Einfluss der Stellgrößen für die Blindleistungsänderungen Δu_{Nqk} ist gering. Der Kurvenverlauf für die drei Kraftwerke ist sehr unterschiedlich, was neben den Netzverhältnissen vor allem auf die unterschiedlichen Nennleistungen und Charakteristiken der einzelnen Kraftwerke zurückzuführen ist. Auch hier ist eine Resonanz im tiefen Frequenzbereich ($\omega \approx 0,5 \text{ s}^{-1}$) feststellbar.

Der Frequenzgang für die Wirkleistungsänderung Δp_1 im Kraftwerk 1 ist in Fig. 21 dargestellt, und zwar in Abhängigkeit der Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung in allen drei Kraftwerken. Der Einfluss von Δu_{Nqk} ist sehr gering. Lediglich das Kraft-

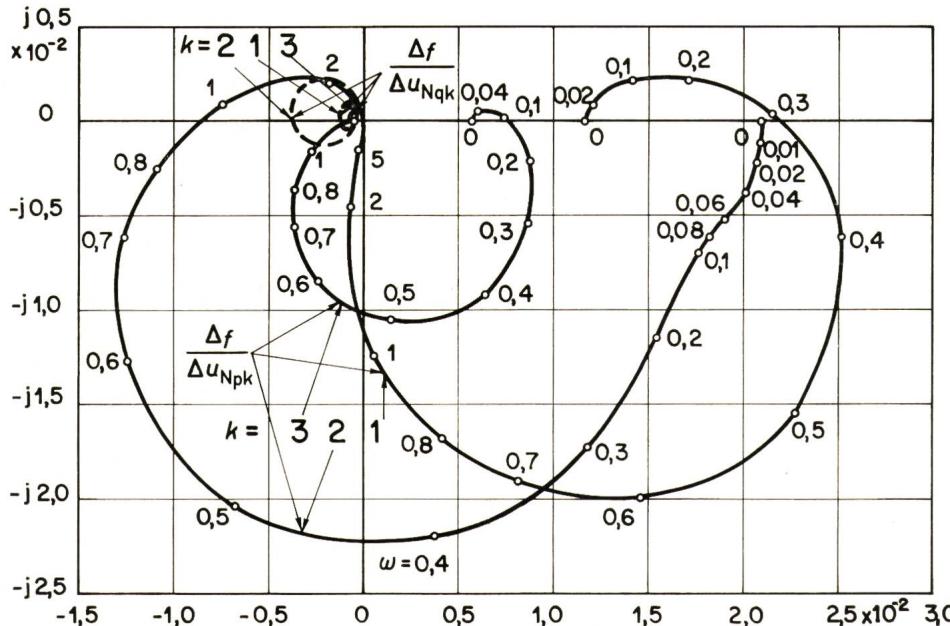


Fig. 20
Berechnete Frequenzgangkurven für das
Netz in Fig. 1
Frequenzänderung Δf in Abhängigkeit
der Stellgrößen der Netzregelung
 Δu_{Npk} und Δu_{Nqk} in den einzelnen
Kraftwerken $k = 1 \dots 3$.

werk 2 liefert eine Frequenzgangkurve, die entsprechend dem Maßstab in Fig. 21 erkennbar ist. Dafür ist der Einfluss der Stellgröße für die Wirkleistung Δu_{Npk} in den Kraftwerken 2 und 3 beachtenswert. Eine Vergrößerung der Stellgröße in diesen Kraftwerken ergibt erwartungsgemäß eine Reduktion der Wirkleistung im Kraftwerk 1. Im Bereich der höheren Kreisfrequenzen $\omega \approx 10 \text{ s}^{-1}$ ist eine ausgeprägte Resonanzschleife vorhanden, die durch die Polradschwingungen bedingt ist.

Für die Blindlaständerung Δq_1 im Kraftwerk 1, abhängig von den Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung in allen drei Kraftwerken, gelten die Frequenzgangkurven in Fig. 22. Eine Änderung der Stellgrößen für die Blindleistung Δu_{Nqk} in den Kraftwerken $k = 2$ und 3 hat einen gewissen, nicht allzu grossen Einfluss auf die Blindleistungsänderung im Kraftwerk 1. Dagegen wirken sich Stellgrößenänderungen für die Wirkleistung Δu_{Npk} in allen drei Kraftwerken sehr stark auf die Blindleistung im Kraftwerk 1 aus. Auch hier treten im höheren Frequenzbereich die durch Polradschwingungen bedingten, stark ausgeprägten Resonanzschleifen auf.

Aus den Fig. 21 und 22 ist ersichtlich, dass eine starke gegenseitige Kopplung zwischen den Ausgangsgrößen, hier Wirk- und Blindleistungsänderung im Kraftwerk 1 und den Stellgrößen für Wirk- und Blindleistung in den übrigen Kraftwerken vorhanden ist. Überdies ist auch die Blindleistungsänderung stark mit der Stellgröße für Wirkleistung im eigenen Kraftwerk gekoppelt. Ähnliche Verhältnisse treten in den übrigen Kraftwerken auf. Das Verbund-

netz ist somit eine stark verkoppelte Mehrfachregelstrecke. Diesem Umstand ist vor allem dann Beachtung zu schenken, wenn die Netzregelung in den einzelnen Kraftwerken bestimmte Wirk- und Blindleistungen einregulieren muss, um eine optimale Verteilung der erzeugten Wirk- und Blindleistung zu gewährleisten [1].

Vom regelungstechnischen Standpunkt betrachtet, bildet somit das Verbundnetz einen sehr interessanten Anwendungsfall der Theorie der Mehrfachregelungen. Die modernen Methoden der Regelungstechnik werden bestimmt einen beachtenswerten Einfluss auf den Betrieb und Regelung der Verbundnetze ausüben. Mit dem Prozessrechner steht dabei ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Verfügung, um die Theorie in die Praxis umzuwandeln.

4. Anhang

4.1 Übertragungsfunktionen

4.1.1 Synchronmaschine. Aus dem Signalflussdiagramm der Synchronmaschine in Fig. 6 lassen sich die folgenden Übertragungsfunktionen ableiten, deren Bedeutung aus dem Signalflussdiagramm in Fig. 12 ersichtlich ist.

$$G_{pu}(s) = \frac{p}{u} + u \sin \delta \cos \delta \left[\frac{1}{x_q(s)} - \frac{1}{x_d(s)} \right] \quad (41a)$$

$$G_{p\delta}(s) = q + u^2 \left[\frac{\cos^2 \delta}{x_q(s)} + \frac{\sin^2 \delta}{x_d(s)} \right] \quad (41b)$$

$$G_{pn}(s) = -u^2 \sin \delta \cos \delta \left[\frac{1}{x_q(s)} - \frac{1}{x_d(s)} \right] \quad (41c)$$

$$G_{pe}(s) = \frac{u \sin \delta}{x_d(1 + s T_d)} \quad (41d)$$

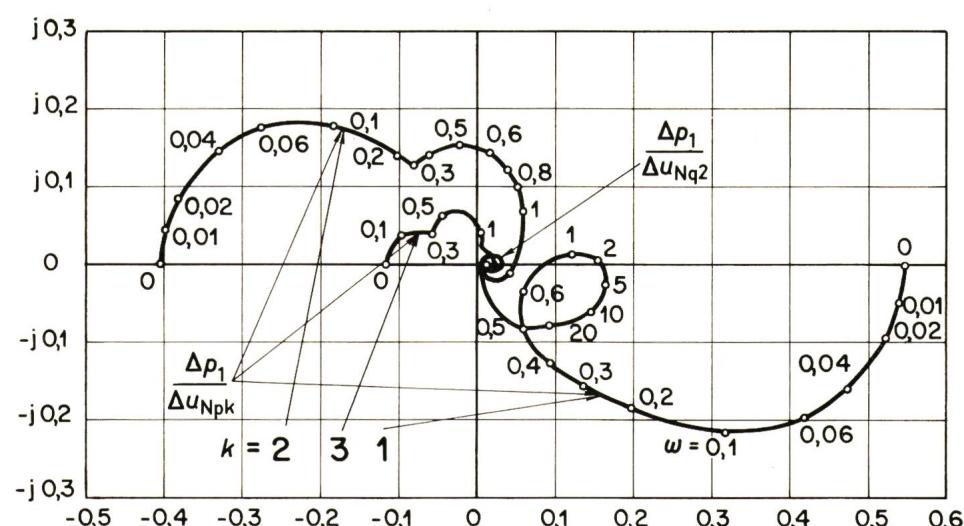


Fig. 21
Berechnete Frequenzgangkurven für das
Netz in Fig. 1

Wirkleistungsänderung Δp_1 im Kraftwerk 1 in Abhängigkeit der Stellgrößen der Netzregelung Δu_{Npk} und Δu_{Nqk} in den einzelnen Kraftwerken $k = 1 \dots 3$.

In diesem Ansatz ist der drehzahlabhängige Anteil der Erregerspannung nicht mehr in Δu enthalten, sondern mit dem mit Δf proportionalen Glied kombiniert.

Für Übertragungsnetz und Verbraucher kann man aus Fig. 13 die Beziehungen

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{K}_{pe} \vec{\Delta \varepsilon} + (\mathbf{K}_{pu} + \mathbf{H}_{pu}) \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{K}_{pf} + \mathbf{H}_{pf} + s \mathbf{T}_a) \Delta f + \Delta \mathbf{p}_{DV} \quad (51a)$$

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{K}_{qe} \vec{\Delta \varepsilon} + (\mathbf{K}_{qu} + \mathbf{H}_{qu}) \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{K}_{qf} + \mathbf{H}_{qf}) \Delta f + \Delta \mathbf{q}_{DV} \quad (51b)$$

ablesen. Werden die Gl. (50) und (51) einander gleichgesetzt, so folgt:

$$\mathbf{F}_{pe} \vec{\Delta \varepsilon} + \mathbf{F}_{pu} \Delta \mathbf{u} = (\mathbf{G}_{p\delta} + s \mathbf{G}_{p\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{G}_{pe} \Delta \mathbf{u}_f - (\mathbf{K}_{pf} + \mathbf{H}_{pf} - \mathbf{G}_{pn} - \mathbf{G}_{pe} \mathbf{G}_{en} + s \mathbf{T}_a) \Delta f - \Delta \mathbf{p}_{DV} \quad (52a)$$

$$\mathbf{F}_{qe} \vec{\Delta \varepsilon} + \mathbf{F}_{qu} \Delta \mathbf{u} = (\mathbf{G}_{q\delta} + s \mathbf{G}_{q\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{G}_{qe} \Delta \mathbf{u}_f - (\mathbf{K}_{qf} + \mathbf{H}_{qf} - \mathbf{G}_{qn} - \mathbf{G}_{qe} \mathbf{G}_{en}) \Delta f - \Delta \mathbf{q}_{DV} \quad (52b)$$

Dabei ist

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{pe} &= \mathbf{K}_{pe} + \mathbf{G}_{p\delta} & \mathbf{F}_{pu} &= \mathbf{K}_{pu} + \mathbf{H}_{pu} - \mathbf{G}_{pu} \\ \mathbf{F}_{qe} &= \mathbf{K}_{qe} + \mathbf{G}_{q\delta} & \mathbf{F}_{qu} &= \mathbf{K}_{qu} + \mathbf{H}_{qu} - \mathbf{G}_{qu} \end{aligned} \quad (53)$$

Als zusätzliche Vereinfachung wurden die mit $\Delta \varepsilon$ verknüpften Glieder $s \mathbf{G}_{p\omega}$ und $s \mathbf{G}_{q\omega}$ vernachlässigt.

Mit den durch

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{ep} & \mathbf{F}_{eq} \\ \mathbf{F}_{up} & \mathbf{F}_{uq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{pe} & \mathbf{F}_{pu} \\ \mathbf{F}_{qe} & \mathbf{F}_{qu} \end{bmatrix}^{-1} \quad (54)$$

definierten Matrizen lassen sich die Gl. (52) nach $\vec{\Delta \varepsilon}$ und $\Delta \mathbf{u}$ auflösen. Es folgt

$$\begin{aligned} \vec{\Delta \varepsilon} &= (\mathbf{F}_{e\delta} + s \mathbf{F}_{e\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{F}_{ee} \Delta \mathbf{u}_f - \\ &- (\mathbf{F}_{ef} + s \mathbf{F}_{ep} \mathbf{T}_a) \Delta f - \mathbf{F}_{ep} \Delta \mathbf{p}_{DV} - \mathbf{F}_{eq} \Delta \mathbf{q}_{DV} \end{aligned} \quad (55a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u} &= (\mathbf{F}_{u\delta} + s \mathbf{F}_{u\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{F}_{ue} \Delta \mathbf{u}_f - \\ &- (\mathbf{F}_{uf} + s \mathbf{F}_{up} \mathbf{T}_a) \Delta f - \mathbf{F}_{up} \Delta \mathbf{p}_{DV} - \mathbf{F}_{uq} \Delta \mathbf{q}_{DV} \end{aligned} \quad (55b)$$

mit

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{e\delta} &= \mathbf{F}_{ep} \mathbf{G}_{p\delta} + \mathbf{F}_{eq} \mathbf{G}_{q\delta} \\ \mathbf{F}_{e\omega} &= \mathbf{F}_{ep} \mathbf{G}_{p\omega} + \mathbf{F}_{eq} \mathbf{G}_{q\omega} \\ \mathbf{F}_{ee} &= \mathbf{F}_{ep} \mathbf{G}_{pe} + \mathbf{F}_{eq} \mathbf{G}_{qe} \\ \mathbf{F}_{ef} &= \mathbf{F}_{ep} (\mathbf{K}_{pf} + \mathbf{H}_{pf} - \mathbf{G}_{pn} - \mathbf{G}_{pe} \mathbf{G}_{en}) + \\ &+ \mathbf{F}_{eq} (\mathbf{K}_{qf} + \mathbf{H}_{qf} - \mathbf{G}_{qn} - \mathbf{G}_{qe} \mathbf{G}_{en}) \end{aligned} \quad (56a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{u\delta} &= \mathbf{F}_{up} \mathbf{G}_{p\delta} + \mathbf{F}_{uq} \mathbf{G}_{q\delta} \\ \mathbf{F}_{u\omega} &= \mathbf{F}_{up} \mathbf{G}_{p\omega} + \mathbf{F}_{uq} \mathbf{G}_{q\omega} \\ \mathbf{F}_{ue} &= \mathbf{F}_{up} \mathbf{G}_{pe} + \mathbf{F}_{uq} \mathbf{G}_{qe} \\ \mathbf{F}_{uf} &= \mathbf{F}_{up} (\mathbf{K}_{pf} + \mathbf{H}_{pf} - \mathbf{G}_{pn} - \mathbf{G}_{pe} \mathbf{G}_{en}) + \\ &+ \mathbf{F}_{uq} (\mathbf{K}_{qf} + \mathbf{H}_{qf} - \mathbf{G}_{qn} - \mathbf{G}_{qe} \mathbf{G}_{en}) \end{aligned} \quad (56b)$$

Die Wirk- und Blindleistungsänderungen $\Delta \mathbf{p}$ und $\Delta \mathbf{q}$ ergeben sich durch Einsetzen von $\vec{\Delta \varepsilon}$ und $\Delta \mathbf{u}$ in (50a) und (50b). Hinsichtlich der Dämpfungsglieder $s \mathbf{G}_{p\omega} \vec{\Delta \varepsilon}$ und $s \mathbf{G}_{q\omega} \vec{\Delta \varepsilon}$ wird eine weitere Vereinfachung vorgenommen, indem hier für $\vec{\Delta \varepsilon}$ nur das von $\vec{\Delta \delta}$ direkt abhängige Glied berücksichtigt wird, d. h. für $\vec{\Delta \varepsilon}$ wird nur das erste Glied in (55a) berücksichtigt und

somit $s \mathbf{G}_{p\omega} \Delta \varepsilon \approx s \mathbf{G}_{p\omega} \mathbf{F}_{e\delta} \vec{\Delta \delta}$ und $s \mathbf{G}_{q\omega} \Delta \varepsilon \approx s \mathbf{G}_{q\omega} \mathbf{F}_{e\delta} \vec{\Delta \delta}$ gesetzt. Damit folgt:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{p} &= (\mathbf{F}_{p\delta} + s \mathbf{F}_{p\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{F}_{pe} \Delta \mathbf{u}_f + \\ &+ (\mathbf{F}_{pf} + s \mathbf{F}_{pp} \mathbf{T}_a) \Delta f + \mathbf{F}_{pp} \Delta \mathbf{p}_{DV} + \mathbf{F}_{pq} \Delta \mathbf{q}_{DV} \end{aligned} \quad (57a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{q} &= (\mathbf{F}_{q\delta} + s \mathbf{F}_{q\omega}) \vec{\Delta \delta} + \mathbf{F}_{qe} \Delta \mathbf{u}_f + \\ &+ (\mathbf{F}_{qf} + s \mathbf{F}_{qp} \mathbf{T}_a) \Delta f + \mathbf{F}_{qp} \Delta \mathbf{p}_{DV} + \mathbf{F}_{qq} \Delta \mathbf{q}_{DV} \end{aligned} \quad (57b)$$

mit

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_{p\delta} &= \mathbf{G}_{p\delta} (1 - \mathbf{F}_{e\delta}) + \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{u\delta} \\ \mathbf{F}_{p\omega} &= \mathbf{G}_{p\omega} (1 - \mathbf{F}_{e\delta}) - \mathbf{G}_{p\delta} \mathbf{F}_{e\omega} + \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{u\omega} \\ \mathbf{F}_{pe} &= \mathbf{G}_{pe} - \mathbf{G}_{p\delta} \mathbf{F}_{ee} + \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{ue} \\ \mathbf{F}_{pf} &= \mathbf{G}_{pn} + \mathbf{G}_{pe} \mathbf{G}_{en} + \mathbf{G}_{p\delta} \mathbf{F}_{ef} - \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{uf} \\ \mathbf{F}_{pp} &= \mathbf{G}_{p\delta} \mathbf{F}_{ep} - \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{up} \\ \mathbf{F}_{pq} &= \mathbf{G}_{p\delta} \mathbf{F}_{eq} - \mathbf{G}_{pu} \mathbf{F}_{uq} \end{aligned} \right\} \quad (58a)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_{q\delta} &= \mathbf{G}_{q\delta} (1 - \mathbf{F}_{e\delta}) + \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{u\delta} \\ \mathbf{F}_{q\omega} &= \mathbf{G}_{q\omega} (1 - \mathbf{F}_{e\delta}) - \mathbf{G}_{q\delta} \mathbf{F}_{e\omega} + \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{u\omega} \\ \mathbf{F}_{qe} &= \mathbf{G}_{qe} - \mathbf{G}_{q\delta} \mathbf{F}_{ee} + \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{ue} \\ \mathbf{F}_{qf} &= \mathbf{G}_{qn} - \mathbf{G}_{qe} \mathbf{G}_{en} + \mathbf{G}_{q\delta} \mathbf{F}_{ef} - \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{uf} \\ \mathbf{F}_{qp} &= \mathbf{G}_{q\delta} \mathbf{F}_{eq} - \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{up} \\ \mathbf{F}_{qq} &= \mathbf{G}_{q\delta} \mathbf{F}_{eq} - \mathbf{G}_{qu} \mathbf{F}_{uq} \end{aligned} \right\} \quad (58b)$$

Mit den Gl. (57a), (57b) und (55b) folgt das in Fig. 15 dargestellte Signalflussdiagramm.

4.2.2 Turbinen und Turbinenregelung. Die in Gl. (34) angegebene Näherungsbeziehung für Turbinen und Turbinenregelung unter Berücksichtigung der Bewegungsgleichung ergibt sich unter den folgenden Bedingungen:

Bei Wasserturbinen wird mit $G_{1L}(s) = s T_w$ gerechnet [siehe Gl. (18)]. Da ferner

$$3 \frac{m_A K_{qu}}{q_T K_{mu}} \approx 3 \quad 3 \frac{m_A K_{qn}}{q_T K_{mn}} \approx 1 \quad (59)$$

ist, so folgt für die Übertragungsfunktion in den Gleichungen (43)

$$G_{mu}(s) = K_{mu} \frac{1 - s^2 T_w'}{1 + s T_w'} \quad (60a)$$

$$G_{mn}(s) = K_{mn} \frac{1}{1 + s T_w'} \quad (60b)$$

mit

$$T_w' = \frac{q_T}{2h} T_w \quad (60c)$$

Da überdies $K_{mn} \approx -m_A \approx -p$ ist, so kann für den Zweig zwischen Δm_e und Δf im Signalflussdiagramm von Fig. 12 näherungsweise

$$G_{mn}(s) + p - s T_m \approx -p \frac{1}{1 + s T_w'} + p - s T_m \approx -s T_m \quad (61)$$

gesetzt werden.

Für einen Regler mit nachgebender Rückführung kann der Nenner der Übertragungsfunktion (45) mit guter Näherung in zwei Zeitkonstanten aufgespalten werden, entsprechend

$$\begin{aligned} 1 + s(T_s + K_r T_r) + s^2 T_s T_r &\approx \\ [1 + s(T_s + K_r T_r)] \left(1 + s \frac{T_s}{K_r} \right) &\quad (62) \end{aligned}$$

Die Zeitkonstante T_s/K_r ist normalerweise klein und kann vernachlässigt werden.

Bei einem Drehzahlregler mit Beschleunigungsmesswerk [Übertragungsfunktion in Gl. (46)] kann die meist kleine Zeitkonstante T_b weggelassen werden. Für beide Regelarten gilt dann

$$G_{Rn}(s) = K \frac{1 + s T_n}{1 + s T_{tr}} \quad (63)$$

Dabei ist für einen Regler mit nachgebender Rückführung

$$T_n = T_r \quad T_{tr} = T_s + K_r T_r \quad (64a)$$

und für einen Regler mit Beschleunigungsmesswerk

$$T_n = K_b T_b \quad T_{tr} = T_s \quad (64b)$$

zu setzen.

Wird nun die Zeitkonstante T_n des Reglers auf T_w' der Turbine abgestimmt, so fallen diese Zeitkonstanten heraus und es folgt näherungsweise:

$$G_{Rn}(s) G_{mu}(s) = K K_{mu} \frac{1 - s 2 T_w'}{1 + s T_{tr}} \quad (65)$$

Unter Beachtung der im Signalflussdiagramm von Fig. 12 dargestellten Zusammenhänge ergibt sich dann die in Gl. (34) angegebene Beziehung. Dabei ist für die Koeffizienten bzw. Zeitkonstanten zu setzen:

$$\left. \begin{array}{l} K_t = K K_{mu} \quad T_{tm} = T_{tr} \\ K_{tu} = K_{mu} \quad T_{tu} = -2 T_w' \end{array} \right\} \quad (66)$$

Bei Dampfturbinen [Übertragungsfunktion nach Gl. (44)] kann die Zeitkonstante T_H vernachlässigt werden, ebenso gilt hier näherungsweise:

$$G_{mn}(s) + p - s T_m \approx -m_A + p - s T_m \approx -s T_m \quad (67)$$

In der Übertragungsfunktion des Drehzahlreglers für die Dampfturbinen [Gl. (47)] ist die Zeitkonstante T_v vernachlässigbar klein. Man erhält dann wiederum die vereinfachte Gl. (34), wobei jetzt für die Koeffizienten und Zeitkonstanten gilt:

$$\left. \begin{array}{l} K_t = K m_A \quad T_{tm} = T_z \\ K_{tu} = m_A \quad T_{tu} = T_z' \end{array} \right\} \quad (68)$$

4.3 Darstellung im Zustandsraum

Als erster Schritt für die Darstellung im Zustandsraum sind die Signalflussdiagramme in Fig. 16 in Matrixschreibweise überzuführen, wobei vorerst das Signalflussdiagramm in Fig. 16a für Turbine, Turbinenregelung und Bewegungsgleichung untersucht wird.

Es sind eine Reihe von Diagonalmatrizen einzuführen, deren Diagonalglieder von den Daten des Kraftwerkes k abhängen und zwar:

Matrix \mathbf{A}_m mit den Diagonalgliedern ω_n/T_{mk} , \mathbf{B}_m mit den Diagonalgliedern T_{tuk}/T_{tmk} , \mathbf{A}_{tm} mit den Diagonalgliedern $1/T_{tmk}$, \mathbf{B}_{mu} mit den Diagonalgliedern $(T_{tmk} - T_{tuk})/T_{tmk}^2$, \mathbf{K}_{tu} mit den Diagonalgliedern K_{tuk} . Ferner werden noch zwei Vektoren \mathbf{K}_t und \mathbf{T}_m benötigt, die sich aus K_{tk} bzw. T_{mk} zusammensetzen. Aus Fig. 16a lassen sich dann die folgenden Differentialgleichungen aufstellen

$$\dot{\vec{\delta}} = \vec{\omega} \quad (69a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vec{\omega}} &= \mathbf{A}_m [\Delta \mathbf{m}' - \Delta \mathbf{p} + \mathbf{B}_m (\mathbf{K}_{tu} \Delta \mathbf{u}_{Np} - \mathbf{K}_t \Delta f) \\ &\quad - \mathbf{T}_m \Delta f] \end{aligned} \quad (69b)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{m}'} = -\mathbf{A}_{tm} \Delta \mathbf{m}' + \mathbf{B}_{mu} (\mathbf{K}_{tu} \Delta \mathbf{u}_{Np} - \mathbf{K}_t \Delta f) \quad (69c)$$

Analog kann das Signalflussdiagramm in Fig. 16b für Erregung und Spannungsregelung behandelt werden. Hier sind folgende Diagonalmatrizen einzuführen: \mathbf{A}_e mit den Diagonalgliedern $1/K_{rk} T_{rk}$, \mathbf{B}_e mit den Diagonalgliedern $(K_{rk}-1)/K_{rk}^2 T_{rk}$, \mathbf{R} mit den Diagonalgliedern $1/K_{rk}$ und \mathbf{R}' mit den Diagonalgliedern K_{rk} . Aus Fig. 16b folgen dann die Gleichungen:

$$\Delta \mathbf{u}_f = \Delta \mathbf{u}'_f + \mathbf{R}_r (\Delta \mathbf{u}_{Nq} - \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}) \quad (70a)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{u}}'_f = -\mathbf{A}_e \Delta \mathbf{u}'_f + \mathbf{B}_e (\Delta \mathbf{u}_{Nq} - \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}) \quad (70b)$$

Der nächste Schritt besteht in der Aufstellung der Bestimmungsgleichung für die Frequenzänderung Δf . Nach Abschnitt 3.1.3 muss hiezu die Bedingung $\Delta \delta_b = \mathbf{e}^T \Delta \vec{\delta} = 0$ erfüllt sein, wobei \mathbf{e}^T der Zeilen-Einheitsvektor nach Gl. (31) ist. Die Bedingung $\Delta \delta_b = 0$ ist sicher dann erfüllt, wenn $\Delta \dot{\delta}_b = \Delta \ddot{\delta}_b = 0$ ist, d. h. wenn sowohl die Winkelgeschwindigkeit wie auch die Winkelbeschleunigung des fiktiven Bezugssystems gleich Null ist. Damit folgt

$$\ddot{\Delta \delta}_b = \mathbf{e}^T \Delta \vec{\ddot{\delta}} = \mathbf{e}^T \Delta \vec{\omega} = 0 \quad (71)$$

Setzt man hier $\dot{\vec{\omega}}$ nach Gl. (69b) ein, so erhält man nach einer kleinen Umstellung die gesuchte Differentialgleichung für Δf :

$$\Delta \dot{f} = \frac{\mathbf{e}^T \mathbf{A}_m}{\mathbf{e}^T \mathbf{A}_m \mathbf{T}_m} [\Delta \mathbf{m}' - \Delta \mathbf{p} + \mathbf{B}_m (\mathbf{K}_{tu} \Delta \mathbf{u}_{Np} - \mathbf{K}_t \Delta f)] \quad (72)$$

Hier ist zu beachten, dass $\mathbf{e}^T \mathbf{A}_m \mathbf{T}_m$ ein Skalar ist, und damit die Division mit $\mathbf{e}^T \mathbf{A}_m \mathbf{T}_m$ zulässig.

Ersetzt man in den Gl. (57a), (57b) und (55b) $s \Delta \vec{\delta}$ durch $s \Delta \vec{\delta} \bullet \circ \Delta \vec{\delta} = \Delta \vec{\omega}$ und $s \Delta f$ durch $s \Delta f \bullet \circ \Delta f$, so folgt:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{p} &= \mathbf{F}_{p\delta} \Delta \vec{\delta} + \mathbf{F}_{p\omega} \Delta \vec{\omega} + \mathbf{F}_{pe} \Delta \mathbf{u}_f + \\ &+ \mathbf{F}_{pf} \Delta f + \mathbf{F}_{pp} \mathbf{T}_a \Delta \dot{f} + \mathbf{F}_{pp} \Delta \mathbf{p}_{Dv} + \mathbf{F}_{pq} \Delta \mathbf{q}_{Dv} \end{aligned} \quad (73a)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{q} &= \mathbf{F}_{q\delta} \Delta \vec{\delta} + \mathbf{F}_{q\omega} \Delta \vec{\omega} + \mathbf{F}_{qe} \Delta \mathbf{u}_f + \\ &+ \mathbf{F}_{qf} \Delta f + \mathbf{F}_{qp} \mathbf{F}_a \Delta \dot{f} + \mathbf{F}_{qp} \Delta \mathbf{p}_{Dv} + \mathbf{F}_{qq} \Delta \mathbf{q}_{Dv} \end{aligned} \quad (73b)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u} &= \mathbf{F}_{u\delta} \Delta \vec{\delta} + \mathbf{F}_{u\omega} \Delta \vec{\omega} + \mathbf{F}_{ue} \Delta \mathbf{u}_f - \\ &- \mathbf{F}_{uf} \Delta f - \mathbf{F}_{up} \mathbf{T}_a \Delta \dot{f} - \mathbf{F}_{up} \Delta \mathbf{p}_{Dv} - \mathbf{F}_{uq} \Delta \mathbf{q}_{Dv} \end{aligned} \quad (73c)$$

Die Gl. (69), (70), (72) und (73) gestatten die Berechnung der gesuchten Ausgangsgrößen Δf , $\Delta \mathbf{p}$, $\Delta \mathbf{q}$ und $\Delta \mathbf{u}$ mit Hilfe der Zustandsgrößen Δf , $\Delta \vec{\delta}$, $\Delta \vec{\omega}$, $\Delta \dot{\mathbf{m}'}$, $\Delta \mathbf{m}'$ und $\Delta \mathbf{u}'_f$. Dieses Gleichungssystem ist aber noch nicht in der normalen Form der Darstellung im Zustandsraum, indem in den Differentialgleichungen für die Zustandsgrößen zum Teil die Ausgangsgrößen $\Delta \mathbf{p}$ und $\Delta \mathbf{u}$ erscheinen. Überdies stört auch die Ableitung $\Delta \dot{f}$ sowie die Zwischengröße $\Delta \mathbf{u}_f$ in mehreren Gleichungen. Um auf die normale Darstellungsform zu gelangen, für die das Signalflussdiagramm in Fig. 17 angegeben ist, sind weitere Umformungen vorzunehmen. Es würde jedoch an dieser Stelle zu weit führen, diese Umformungen anzugeben. Ebenso weisen die Resultate einen so grossen Umfang auf, dass hier auf deren Angabe verzichtet wird, um so mehr geachtet wird, als damit keine neuen Gesichtspunkte auftreten.

Literatur

- [1] *H. Bühler*: Optimale Netzregelung mit Prozessrechnern. Bull. SEV 62(1971)2, S. 113...122.
- [2] *T. Laible*: Abhängigkeit der Wirk- und Blindleistungsaufnahme passiver Netze von Spannungs- und Frequenzschwankungen. Bull. SEV 59(1968)2, S. 49...65.
- [3] *J. Carpentier*: Contribution à l'étude du dispatching économique. Bull. Soc. franç. Electriciens 8/3(1962)32, p. 431...447.
- [4] *T. Laible*: Moderne Methoden zur Behandlung nichtstationärer Vorgänge in elektrischen Maschinen. Bull. SEV 41(1950)14, S. 525...536.
- [5] *T. Laible*: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb mit Anwendungsbeispielen und unter Berücksichtigung der modernen amerikanischen Literatur. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1952.
- [6] *H. Bühler*: Methoden zur Erregung von Synchronmaschinen. Neue Technik 1(1959)1, S. 33...52, Nr. 2, S. 21...43, Nr. 3, S. 41...62 und Nr. 4, S. 39...55
- [7] *G. Hutařev*: Regelungstechnik. Kurze Einführung am Beispiel der Drehzahlregelung von Wasserturbinen. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1969.
- [8] *W. Latzel*: Die Frequenzgangdarstellung der Turbine und die Anpassung des elektronischen Turbinenreglers. BBC-Nachrichten 50(1968)6, S. 291...296.

Adresse des Autors:

H. Bühler, Prof. EPF-L, 6914 Ciona di Carona.

MARCEL DEPREZ

1843-1918



Deutsches Museum

Der jetzt zu den Alten gehörenden Generation wurde der Name Deprez' schon während des Studiums bekannt, dann nämlich, als man im Laboratorium mit Galvanometern zu tun hatte. Es handelte sich um die Bauart Deprez-d'Arsonval. Deprez hatte das Instrument 1878 gebaut. D'Arsonval verbesserte es drei Jahre später, und 1882 kam es zu einer von beiden gemeinsam entwickelten Form.

Deprez, am 29. Dezember 1843 in Aillant sur Milleron geboren, besuchte die Ecole supérieure des Mines. Als der Direktor dieser Schule den mittelmässigen Schüler zu sich bestellte, um ihn zu besseren Leistungen anzuregen, erkannte er, dass Deprez hochbegabt war. Da er aber auch während des Unterrichtes Problemen nachsann, wirkte er verträumt. Nach Abschluss der Studien holte sich der Schuldirektor den jungen Deprez als Sekretär. Von dort weg kam er zur Chemin de fer du Nord. Für diese verbesserte er die Schiebersteuerung der Dampflokomotiven, entwickelte eine ganze Reihe von Mess- und Registrierapparaten, unter anderem einen neuen Indikator zum Aufnehmen der Dampfdiagramme. Als Krönung dieses Schaffens baute er für die Nordbahn den ersten Dynamometerwagen, der an der Weltausstellung von 1878 in Paris gezeigt wurde.

Deprez beschäftigte sich auch intensiv mit den Phänomenen der Elektrizität. Die Foucaultschen Ströme benützte er für einen Geschwindigkeitsmesser. Er erkannte früh die grosse Bedeutung der Elektrizität für die Ausbeutung der Naturkräfte und stellte eine «Theorie des Krafttransports» auf. Für die Verteilung der Kraft sah er zwei Möglichkeiten: das Seriesystem mit konstantem Strom und die Parallelschaltung der Abnehmer mit konstanter Spannung. Dem letzteren System gab er den Vorzug.

An der Elektrizitätsausstellung von 1881 in Paris stellte er eine Elektrizitätsverteilung mit einem Generator und einigen Nähmaschinenmotoren als Energieverbraucher aus und reichte dem gleichzeitig stattfindenden 1. Elektrikerkongress mehrere Berichte ein, die grosse Beachtung fanden.

Die Ausstellung in Paris hatte auf Oskar von Miller grossen Eindruck gemacht. Er wollte 1882 den Deutschen etwas Ähnliches zeigen und beauftragte Deprez, für die in München geplante Schau eine Kraftübertragung auf grosse Distanz einzurichten. In der folgenden Tabelle sind die im Verlauf von vier Jahren durch Deprez verwirklichten Versuchsanlagen zusammengestellt.

Jahr	Übertragungsstrecke	Länge km	Leitung	Leistung PS	Spannung V	η %
1882	Miesbach-München	57	Telegraphenleitung, Fe 4,5 mm	0,5	1343 850	38
1883	Schleife La Chapelle-Le Bourget-La Chapelle (Paris)	17	Eisenleitung	2,0	2700	37
1883	Vizelle-Grenoble	14	Cu-Draht	7,0	3000	62
1885	Creil-Paris	56	5 mm Cu	40	5700	78

Es ist das Verdienst Deprez', durch diese ersten Versuche gezeigt zu haben, dass die elektrische Kraftübertragung möglich ist. 1886 wurde er zum Mitglied der Académie Française ernannt und 1890 für ihn am Conservatoire national des Arts et Métiers ein Lehrstuhl für industrielle Elektrizität eingerichtet. Damit hatte Deprez, der gleichzeitig Theoretiker und Praktiker war, sein ihm angemessenes Tätigkeitsfeld gefunden.

Am 14. Oktober 1918 starb er in Vincennes. 1935 fand zur Feier des 50jährigen Jubiläums der Versuche zwischen Creil und Paris eine grosse Erinnerungsfeier statt.

H. Wüger