

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 49 (1958)  
**Heft:** 19

**Artikel:** Methoden zur Erregung von Synchronmaschinen  
**Autor:** Bühler, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059743>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND  
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

## Methoden zur Erregung von Synchronmaschinen<sup>1)</sup>

Von H. Bühler, Bassersdorf

621.313.32.013.8 : 621.316.722

Es wird zuerst ein Überblick über die Anforderungen an die Spannungsregelung grosser Synchrongeneratoren unter verschiedenen Betriebsbedingungen gegeben, dem sich die Beschreibung der gewählten Untersuchungsmethoden anschliesst. Im Abschnitt 3 werden drei prinzipiell verschiedene Spannungsregelungen (Wälzsektorregler, Regelung mit Verstärkermaschinen und Magnetverstärkern, Regelung mit gittergesteuertem Gleichrichter) unter verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht. Abschliessend wird im 4. Abschnitt der Einsatz von klassischen und von modernen Spannungsregelungen kurz gestreift.

L'article commence par un aperçu des exigences posées au réglage de la tension de grands alternateurs synchrones dans différentes conditions de service; puis les méthodes d'investigation adoptées sont décrites. Le chapitre 3 concerne l'étude de trois différents modes essentiels de réglage de la tension (régulateurs à secteurs roulants, réglage avec machines amplificatrices et amplificateurs magnétiques, réglage avec redresseurs à commande par grille), dans différentes conditions de service. Enfin, au chapitre 4, l'auteur décrit brièvement l'application de réglages de tension classiques et modernes.

### 1. Anforderungen an die Spannungsregelung

#### 1.1 Übersicht

Die Anforderungen an eine gute Spannungsregelung von grossen Synchrongeneratoren sind sehr vielfältig. Im Normalbetrieb sollen die infolge der ständigen, kleinen Belastungsänderungen hervorgerufenen Spannungsschwankungen möglichst klein gehalten werden. Bei langen, leerlaufenden Hochspannungsleitungen (kapazitive Belastung) kommt es oft vor, dass diese von einzelnen Generatoren unter Spannung gesetzt werden müssen. In solchen Fällen stellen die kapazitiven Belastungen besondere Anforderungen an die Stabilität und Regelgeschwindigkeit der Spannungsregelung, insbesondere bei plötzlicher Entlastung am Ende einer Übertragungsleitung. Bei Störungen des Parallelbetriebes, z. B. durch Kurzschluss auf einer Übertragungsleitung mit Abschaltung und Schnellwiedereinschaltung lässt sich die sog. dynamische Stabilität mit einer wirksamen Stosserregung verbessern.

Nachstehend sollen die einzelnen Betriebsfälle näher betrachtet werden.

#### 1.2 Normalbetrieb

Im Normalbetrieb arbeiten in der Regel mehrere Generatoren eines Kraftwerkes über Transformatoren parallel auf eine Übertragungsleitung. Diese speist ein Netz, das aber auch von andern Kraftwerken versorgt wird.

Während die Wirkleistungsverteilung auf die einzelnen Maschinengruppen durch die Einstellung der

Turbinenregler bestimmt ist, lässt sich die Blindleistung mit Hilfe der Spannungsregelung einstellen (durch Verändern des «Sollwertes» der geregelten Spannung).

Bei Blindlaständerungen soll nun durch den Spannungsregler die Blindleistungsverteilung aufrecht erhalten bleiben. Dies lässt sich durch die sog. statische Einstellung der Spannungsregler erreichen.

Die geregelte Spannung sinkt leicht mit zunehmendem Erregerstrom des Generators. Bei einem Spannungsregler mit einer Statik von 5% ist die geregelte Spannung bei Leerlauf 100% und sinkt bei einem Erregerstrom entsprechend dem Nennlasterregerstrom auf 95%. Fig. 1 zeigt, dass so eine sta-

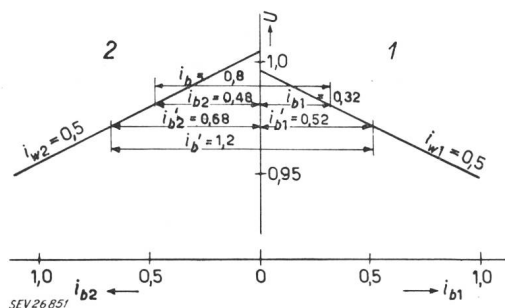


Fig. 1  
Blindstromverteilung bei zwei parallel arbeitenden  
Generatoren 1 und 2  
Regler-Statik 5 %  
U Spannung;  $i_b$  Blindstrom;  $i_w$  Wirkstrom

bile Blindstromverteilung bei Parallelbetrieb von zwei oder mehr Generatoren erreicht wird. Hier sind die statischen Charakteristiken für den Generator 1 nach rechts und für den Generator 2 nach links aufgetragen, wobei durch eine unterschiedliche «Sollwerteeinstellung» Generator 2 mehr Blindstrom ab-

<sup>1)</sup> Dieser Aufsatz ist ein stark gekürzter Auszug aus einer Arbeit, die der Denzler-Stiftung auf Grund des im Bulletin SEV Bd. 47(1956), Nr. 3, S. 107...108 veröffentlichten 8. Wettbewerbs (12. Preisaufgabe) eingereicht wurde. Die preisgekürzte Originalarbeit wird Interessenten auf Wunsch durch den SEV leihweise zur Verfügung gestellt.

geben soll als Generator 1. Erhöht sich nun der totale Blindstrom von  $i_b = 0,8$  auf  $i_b' = 1,2$ , bei gleichbleibendem Wirkstrom, so erkennt man, dass sich der zusätzliche Blindstrom gleichmässig auf beide Generatoren verteilt. Dies gilt natürlich nur solange, als beide Regler die gleiche Statik haben. Ist einer der Regler mit geringerer Statik eingestellt, z. B. 3%, so verläuft die statische Regelkurve flacher; der dazugehörige Generator bekommt nun mehr Blindstrom aufgebürdet.

Bisher wurde nur das stationäre Verhalten des Reglers betrachtet. In Wirklichkeit ändert sich aber die Belastung des Generators fortwährend, so dass der Regler dauernd eingreifen muss. Diese Spannungsschwankungen sollen durch den Regler möglichst klein gehalten werden. Die Grösse dieser Spannungsschwankungen wird abhängig sein von der Regelgeschwindigkeit des Spannungsreglers, sowie auch von den Generatordaten.

### 1.3 Kapazitive Belastung des Generators

Leerlaufende Hochspannungsleitungen stellen für die sie speisenden Generatoren eine kapazitive Belastung dar. Ein Synchrongenerator muss ausgehend vom Leerlauf mit zunehmender kapazitiver Belastung weniger erregt werden, wenn die Generatorklemmenspannung auf dem Nennwert gehalten werden soll. Bei konstanter Erregung würde die Spannung ansteigen.

Ist die Reaktanz der kapazitiven Belastung  $x_c$  gleich der synchronen Längsfeldreaktanz  $x_d$ , so muss der Generatorfeldstrom  $i_f$  auf Null vermindert werden. Gleichzeitig beginnt aber die Selbsterregung des Generators. Wird die kapazitive Belastung weiter vergrössert, so muss der Feldstrom negative Werte annehmen (Fig. 2).

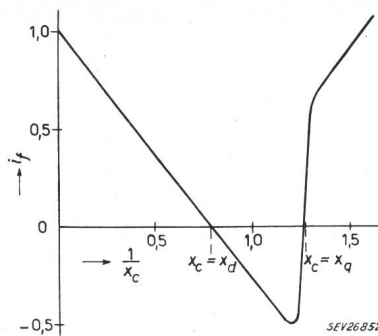


Fig. 2  
Feldstrom  $i_f$  eines Synchrongenerators bei kapazitiver Belastung  
 $x_d = 1,21$ ;  $x_q = 0,787$

Wird  $x_c$  gleich der synchronen Quersfeldreaktanz  $x_q$ , so muss der erforderliche Feldstrom neuerdings zu Null gemacht werden, um mit  $x_c < x_q$  sogar wieder positive Werte anzunehmen. Dies ist auf das Kippen der Klemmenspannung um  $180^\circ$  zurückzuführen.

An die Spannungsregelung werden mit zunehmender kapazitiver Belastung grössere Anforderungen gestellt in Bezug auf eine stabile Spannungshaltung. Die strengeren Bedingungen, die bei kapazitiver Belastung gegenüber dem Normalbetrieb durch den Spannungsregler zu bewältigen sind, haben zur

Einführung der modernen Spannungsregelungen beigetragen, da durch Verwendung verschiedener Stabilisierungsglieder eine stabile und gleichzeitig rasche Regelung aufgebaut werden kann.

Ist  $x_c < x_q$ , so ist auch mit einem raschen Spannungsregler kein Betrieb möglich. Infolge der Umkehr des Feldstromes ins positive Gebiet arbeitet der Regler nicht mehr richtig. Bei zu grosser Spannung vermindert der Regler den Feldstrom  $i_f$ . Das hat aber im Bereich  $x_c < x_q$  zur Folge, dass die Spannung weiter ansteigt. Der Regler regelt auf grösste negative Erregung, wobei die Generatorspannung einen sehr hohen Wert annimmt, der nur durch die Sättigungserscheinungen bestimmt wird. Eine kapazitive Belastung  $x_c < x_q$  muss also unter allen Umständen vermieden werden. Um bei gegebener kapazitiver Belastung diese Bedingung einhalten zu können, müssen unter Umständen die Generatorreaktanzen angepasst werden, wobei der untenstehende kurz behandelte sog. Lastabwurf mit Drehzahlanstieg berücksichtigt werden muss.

Noch anspruchsvollere Bedingungen an die Spannungsregelung stellt der Lastabwurf. Ein Generator eines Kraftwerkes gebe über eine lange Hochspannungsleitung Wirk- und Blindleistung an ein Netz ab. Aus irgend einem Grunde wird an der Übergangsstelle der Lastschalter geöffnet. Dadurch fällt die Wirklast weg und die Generatoren sind durch die leerlaufende Leitung kapazitiv belastet. Die Generatorspannung steigt plötzlich an und soll durch den Spannungsregler möglichst rasch auf den Sollwert geregelt werden. Infolge des Wirklastwegfalls steigt die Generatordrehzahl vorübergehend an, bis der Turbinenregler eingreift.

Der Drehzahlanstieg hat eine Erhöhung der Frequenz zur Folge, was wiederum bewirkt, dass die kapazitive Belastung vergrössert wird. Der Drehzahlanstieg beträgt bei einem Vollastabwurf 10...30% innerhalb 1...2 s. Bis die Nennzahl wieder erreicht ist, vergehen 20...30 s.

### 1.4 Störungen des Parallelbetriebes (Dynamische Stabilität)

Beim Parallelbetrieb einer Synchronmaschine muss unterschieden werden, zwischen der statischen und der dynamischen Stabilität [2]<sup>2)</sup>. Ein Betrieb ist statisch stabil, wenn nach einer kleinen Störung, z. B. einer kleinen Belastungsänderung immer noch ein stationärer Betriebspunkt vorhanden ist. Bei der dynamischen Stabilität dagegen wird untersucht, ob die Polräder der Synchronmaschinen nach einer plötzlichen, grossen Störung, z. B. Kurzschluss oder starke Belastungsänderung, ausser Tritt fallen oder nicht. Dies ist natürlich abhängig von Art, Grösse und Dauer der Störung.

Betrachte man als Beispiel den Fall, wo ein Kraftwerk über zwei oder mehrere Leitungen mit einem Netz verbunden ist und an dieses Leistung abgibt. Auf einer dieser Leitungen kann plötzlich eine Störung, z. B. durch einen Kurzschluss, auftreten, wobei das Gleichgewicht zwischen elektrischem Gene-

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

ratormoment und Turbinenmoment gestört wird. Ein Überschuss an Antriebsleistung bewirkt, dass die Polräder der von der Störung betroffenen Generatoren gegenüber den andern voreilen, wobei die ersteren unter Umständen ausser Tritt fallen [3].

Ob ein Kraftwerk bei einer Störung ausser Tritt fällt oder nicht, hängt ausser von den Generator- und Leitungsdaten, der Störungsart und Schaltzeiten noch von der übertragenen Leistung ab. Die Stabilitätsgrenze, d. h. die Grösse der übertragbaren Leistung, bei der der Parallelbetrieb bei einer bestimmten Störung aufrecht erhalten bleibt, lässt sich durch eine wirksame Stösserregung mit einer raschen Spannungsregelung noch etwas erhöhen.

Eine weitere Anforderung an die Spannungsregelung ist also die, dass der Regler bei Störungen des Parallelbetriebes kurzzeitig die Haupterregerspannung rasch und stark erhöhen muss.

Dies bedingt einerseits einen genügend dimensionierten Haupterregerspannung und andererseits eine Regelung mit kurzer Ansprechzeit. Auch hier lassen sich somit bei modernen Spannungsregelungen mit Magnetverstärkern und Verstärkermaschinen bessere Resultate erreichen, als mit den klassischen Anordnungen.

## 2. Untersuchungsmethoden für die verschiedenen Betriebsbedingungen

### 2.1 Übersicht

Die Anforderungen bei den verschiedenen Betriebsbedingungen sind sehr unterschiedlich, so dass auch die Untersuchungsmethoden von Fall zu Fall angepasst werden müssen.

Im Normalbetrieb hat man es mit kleinen, statistisch verteilten Störungen zu tun. Da nur kleine Abweichungen auftreten, darf man im betreffenden Betriebspunkt den Regelkreis linearisieren und das Frequenzgangverfahren anwenden. Für die Beurteilung der Güte der Spannungsregelung sind statistische Kriterien zu Hilfe zu ziehen.

Bei kapazitiver Belastung treten meist grosse Belastungsänderungen auf, so dass die Nichtlinearitäten (Anschläge bei mechanischen Reglern, Sättigung usw.) nicht mehr vernachlässigt werden dürfen. Zwar ist die linearisierte Theorie, z. B. mit Hilfe der Frequenzgangmethode, nützlich zur Untersuchung der Stabilität des Regelkreises bei einer bestimmten kapazitiven Belastung, von einer guten Spannungsregelung wird aber nicht nur verlangt, dass sie stabil arbeitet, sondern dass nach einer plötzlichen, grossen Belastungsänderung die Spannung möglichst rasch und ohne grosse Pendelungen wieder auf den Sollwert zurückgeführt werden soll. Da eine numerische Berechnung des Ausgleichsvorganges sehr zeitraubend ist, wurde bei den durchgeführten Versuchen die Regelstrecke (Generator mit kapazitiver Belastung) mit Hilfe von Analogiegeräten nachgebildet, an die dann ein richtiger Regler angeschaltet werden konnte. Ebenso wurde der Einfluss der Spannungsregelung bei Störungen der Stabilität des Parallelbetriebes mit einem Analogiegerät untersucht.

## 2.2 Normalbetrieb

### 2.2.1 Allgemeines

Die Untersuchung der Spannungshaltung in einem grossen Verbundnetz, mit mehreren Kraftwerken und verschiedenen Verbraucher-Zentren wäre sehr kompliziert und würde den hier gestellten Rahmen sprengen. Da der Einfluss der verschiedenen Spannungsreglerarten untersucht werden soll, sei eine möglichst einfache Anordnung untersucht, nämlich die, dass ein einzelner Generator direkt ein Verbrauchernetz speisen soll, auf das keine weiteren Kraftwerke arbeiten. Dieser Fall ist in Fig. 3 dargestellt. Um die Untersuchung weiter zu vereinfachen, wird angenommen, dass der Spannungsregler statisch eingestellt sei, dass jedoch weder Statikompensation noch Kompounding vorhanden seien.

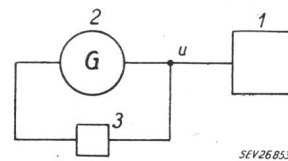


Fig. 3

Anordnung zur Untersuchung des Normalbetriebes einer Spannungsregelung

1 Verbrauchernetz; 2 Generator; 3 Spannungsregler mit Haupterregerspannung; u Geregelte Generatorspannung

Im Verbrauchernetz treten dauernd Wirk- und Blindlaständerungen auf, die durch das Zu- und Abschalten von Verbrauchern (Motoren, Beleuchtung, Heizöfen usw.) hervorgerufen werden. Diese Belastungsänderungen haben eine Änderung der Generator-Klemmenspannung zur Folge, die vom Regler wiederum auf den Sollwert zurückgeführt werden soll, wobei die Reglerstatik zu berücksichtigen ist, d. h. der Sollwert der Generatorspannung ist eine Funktion der Belastung. Da aber der Regler eine Störung nur mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung ausregeln kann, wird der Sollwert nie genau erreicht, sondern es ist immer eine veränderliche Abweichung  $\Delta u(t)$  vorhanden. Der mittlere quadratische Fehler von  $\Delta u(t)$ , gemessen über eine sehr lange Zeit theoretisch  $t \rightarrow \infty$ , ist ein Mass für die Güte der Spannungsregelung. Dieser Wert lässt sich mit Hilfe von statistischen Beziehungen bestimmen.

Solche Untersuchungen wurden bereits für die Drehzahlregelung von Wasserturbinen durchgeführt [4; 5]. Die gleichen Überlegungen sollen nachstehend auf die Spannungshaltung eines geregelten Synchrongenerators angewendet werden, wobei die Gleichungen ohne ihre Ableitungen angeschrieben werden.

### 2.2.2 Das Verhalten des Verbrauchernetzes

Wird die Wirk- und Blindleistung eines Verbrauchernetzes in Funktion der Zeit registriert, so erhält man einen Verlauf wie er z. B. in Fig. 4 aufgetragen ist.

Die Abweichung der Wirk- bzw. Blindleistung  $\Delta p(t)$ , bzw.  $\Delta q(t)$  soll auf den Mittelwert  $p_0$  bzw.  $q_0$  bezogen werden.



Der mittlere quadratische Fehler der Abweichung ist:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_p^2 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t)^2 dt \\ \varepsilon_q^2 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta q(t)^2 dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Eine sehr wichtige Beziehung ist die Fourier-Zerlegung von  $\Delta p(t)^2$  bzw.  $\Delta q(t)^2$ , die Spektralfunktion genannt wird. Da  $\Delta p(t)^2$  und  $\Delta q(t)^2$  im allge-

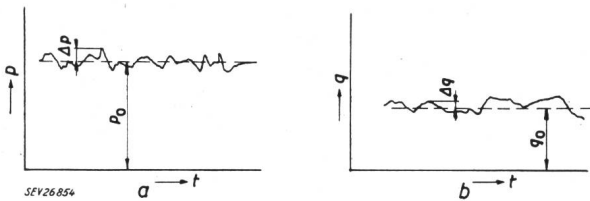


Fig. 4

Verlauf der Wirkleistung  $p$  (a) und der Blindleistung  $q$  (b) in einem Verbrauchernetz

Weitere ezeichnungen siehe im Text

meinen nicht periodische Funktionen sind, erhält man ein kontinuierliches Spektrum. Zwischen dem mittleren Fehlerquadrat  $\varepsilon_p^2$  bzw.  $\varepsilon_q^2$  und der Spektralfunktion  $A_p(\lambda)$  bzw.  $A_q(\lambda)$  besteht die Beziehung [5]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_p^2 &= \int_0^\infty A_p(\lambda) d\lambda \\ \varepsilon_q^2 &= \int_0^\infty A_q(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

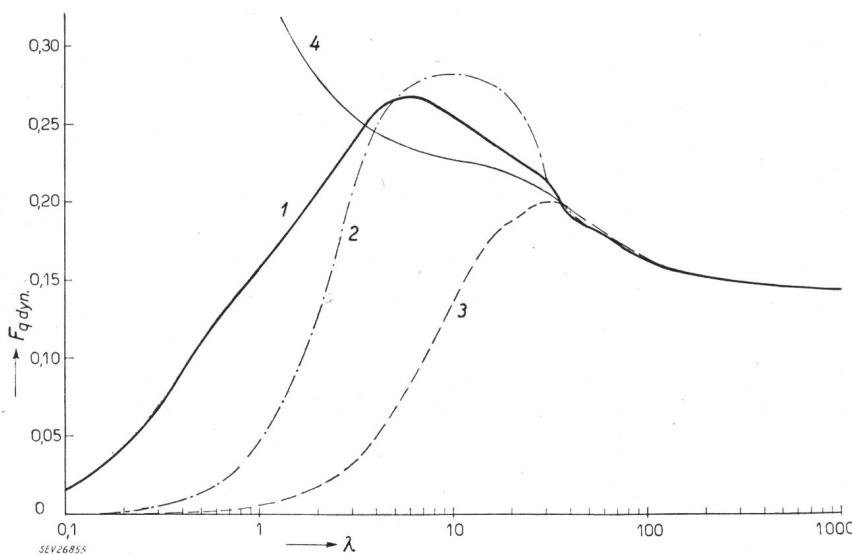


Fig. 5

Spannungsregelung im Normalbetrieb

Dynamischer Frequenzgang

$$F_{q \text{ dyn.}} = |F_q(j\lambda)| - F_q(0)$$

$$\lambda = \frac{f[\text{Hz}]}{50} \cdot 1000 [\%] \quad (\lambda = \text{auf 50 Hz bezogene Schwingungsfrequenz in } \%)$$

1 Wälzsektorregler; 2 Spannungsregelung mit Verstärkermaschine; 3 gittergesteuerter Gleichrichter; 4 ungerelgelter Generator

Für die Spektralfunktion  $A_p(\lambda)$  der Wirkleistungsänderung  $\Delta p(t)$  liegen Werte aus Messungen in einem Netz vor [5]. Nach diesen Messungen und Auswertungen von *D. Gaden* kann man setzen

$$A_p(\lambda) = \frac{A_{p0}}{\lambda^2} \quad (3a)$$

Auf das gleiche Resultat sind *G. Lehmann* und *R. Fortet* gekommen, auf Grund von rein theoretischen Überlegungen, unter Zugrundelegung eines Modells mit sehr vielen Belastungselementen, die rein zufällig ein- und ausgeschaltet werden [6]. Man darf daher auch für die Blindlaständerungen das gleiche Gesetz erwarten, so dass man setzen kann:

$$A_q(\lambda) = \frac{A_{q0}}{\lambda^2} \quad (3b)$$

### 2.2.3 Das Verhalten der Spannungsregelung

Theoretische Untersuchungen zeigten, dass für die Spannungsänderung einer Synchronmaschine vor allem Blindlaständerungen massgebend sind.

Wir wollen uns daher im Folgenden auf diese beschränken.

Angenommen, dass sich die Blindlast sinusförmig mit einer (kleinen) Frequenz  $\lambda$  ändere, so wird für die Spannungsänderung der geregelten Synchronmaschine:

$$\Delta \bar{u} = F_q(j\lambda) \Delta \bar{q} \quad (4)$$

Der Frequenzgang  $F_q$  der geregelten Synchronmaschine bei sinusförmigen Blindlaständerungen ist eine Funktion der Frequenz  $\lambda$ .

Aus der Spektralfunktion  $A_q(\lambda)$  der Blindlaständerung lässt sich mit Hilfe des Frequenzganges  $F_q(j\lambda)$  die Spektralfunktion  $A_U(\lambda)$  der Spannungsänderung bestimmen aus:

$$A_U(\lambda) = |F_q(j\lambda)|^2 \cdot A_q(\lambda) \quad (5)$$

Der mittlere quadratische Fehler der Spannungsabweichung wird dann:

$$\varepsilon_U^2 = \int_0^\infty A_U(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

d. h.  $\varepsilon_U^2$  ist gleich einer Fläche, welche von der  $A_U(\lambda)$ -Kurve und der Abszisse eingeschlossen wird (Fig. 6). Ferner sei noch der partielle mittlere quadratische Fehler zwischen der untern Grenzfrequenz

quenz  $\lambda_1$  und der oberen Grenzfrequenz  $\lambda_2$  definiert:

$$\varepsilon_U^{*2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_U(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

Das quadratische Mittel der Spannungsabweichung ist schliesslich:

$$\varepsilon_U = \sqrt{\int_0^{\infty} A_U(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

$$\varepsilon_U^* = \sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_U(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

Der quadratische Mittelwert der Spannungsabweichung ist ein Mass für die Güte der Regelung, d. h. je kleiner diese Zahl ist, um so besser werden Störungen infolge Blindlaständerungen ausgegelt.

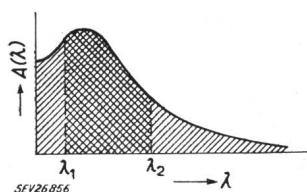


Fig. 6  
Spektralfunktion und  
mittleres Fehlerquadrat  
 $A(\lambda)$  Spektralfunktion  
 $\lambda$  bezogene Schwingungs-  
frequenz

Spannungsregelungen besitzen normalerweise eine Statik, so dass eine bleibende Laständerung eine bleibende Spannungsänderung hervorruft. Da aber eine langsame und eine rasche Regelung die gleiche Statik aufweisen, so ist es zweckmässig, nur das dynamische Verhalten in die Rechnung einzubeziehen, d. h. von  $F_q(j\lambda)$  ist der Betrag im stationären Zustand  $F_q(0)$  zu subtrahieren und die Differenz

$$F_{q \text{ dyn.}}(\lambda) = |F_q(j\lambda)| - F_q(0) \quad (10)$$

in Gl. (5) einzusetzen.

Für verschiedene Reglerarten ist  $F_{q \text{ dyn.}}(\lambda)$  in Fig. 5 gezeigt.

### 2.3 Kapazitive Belastung des Generators

Eine leerlaufende Hochspannungsleitung lässt sich zusammen mit der Transformator-Kurzschlussreaktanz immer auf eine reine Kapazität reduzieren (wenn von den kleinen Verlusten abgesehen wird). Man kann daher alle Aufgaben auf den einfachen Fall zurückführen, bei dem ein einzelner Synchron-generator mit einem Kondensator belastet wird.

Zur Untersuchung der Stabilität der Spannungsregelung verwendet man am besten die Frequenzgangmethode zusammen mit dem Nyquist-Kriterium. Gegenüber andern Verfahren (z. B. Routh-Kriterium und Hurwitz-Stabilitätsbedingung für Differentialgleichungen) hat die Frequenzgangmethode den Vorteil, dass man z. B. Regelkreislöser mit einer Frequenzgangmessung erfassen kann. Damit lässt sich das oft mühsame Aufstellen der charakteristischen Gleichung umgehen, was besonders bei komplizierten Regelungen von Vorteil ist.

Der Frequenzgang  $F$  des offenen Regelkreises wird in der komplexen Zahlenebene aufgezeichnet (Fig. 7). Das Stabilitäts-Kriterium von Nyquist sagt aus: «Befindet sich der Punkt  $-1$  links von der Frequenzgangkurve des aufgeschnittenen Systems, wenn diese Kurve im Sinne steigender Frequenz  $\lambda$  durchlaufen wird, so ist das System stabil.» (Das Beispiel in Fig. 7 zeigt also eine Frequenzgangkurve von einem stabilen System.)

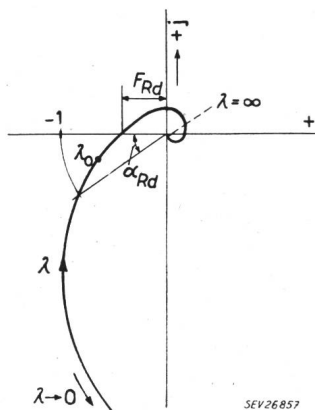


Fig. 7  
Frequenzgang des offenen  
Regelkreises  
Stabilitätskriterium  
nach Nyquist  
 $A_{Rd} = 1/F_{Rd}$  Amplituden-  
rand;  $\alpha_{Rd}$  Phasenrand;  
 $\lambda_0$  Eigenfrequenz des Regel-  
kreises

Eine Regelung soll nicht nur gerade stabil sein, sondern es ist auch erwünscht, dass ein Ausgleichsvorgang gut gedämpft sei, wobei ein leichtes Überschwingen etwas günstigere Verhältnisse ergibt, als ein aperiodischer Vorgang. Einen Anhaltspunkt über das Abklingen eines Regelvorganges geben der sog. Phasenrand (Winkel  $\alpha_{Rd}$ ) und der Amplitudenrand  $A_{Rd} = 1/F_{Rd}$ . Bei Nachlaufregelungen soll  $\alpha_{Rd} = 30^\circ \dots 60^\circ$  und  $A_{Rd} = 2,5 \dots 10$  sein.

Die aus dem Frequenzgang gezogenen Rückschlüsse auf das Ausgleichsverhalten, haben nur Gültigkeit, solange die Linearisierung zulässig ist, d. h. bei relativ kleinen Störungen. Das Zu- und Abschalten einer leerlaufenden Leitung bedeutet nun aber in den meisten Fällen eine so grosse Störung, dass sich die Nichtlinearitäten im Regelkreis bereits stark bemerkbar machen, sei es in Begrenzung durch Anschläge bei mechanischen Reglern, oder Sättigungserscheinungen im Haupterregter und Verstärkermaschinen usw. Wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt wurde, kann die Bestimmung des Ausgleichsvorganges mit Hilfe eines Analogiegerätes erfolgen. Dazu wurde der Synchron-generator mit kapazitiver Belastung und der Haupterregter nachgebildet. Während die Synchronmaschine als lineares Gebilde angenommen wird, ist bei der Nachbildung des Haupterregers der Sättigungseinfluss zu berücksichtigen. Durch eine besondere Einrichtung kann nun der richtige Spannungsregler, d. h. ein Versuchsaufbau mit den richtigen Elementen (Magnetverstärker, Verstärkermaschinen, aber auch Wälzsektorregler) an die Generator- und Haupterregter-Nachbildung angeschlossen werden, so, dass der Regler ähnlich dem richtigen Betrieb im Kraftwerk arbeiten muss. Die Ausgleichsvorgänge können oszillographisch festgehalten werden.

Auch der für die Spannungsregelung noch schwierigere Fall, nämlich der Lastabwurf mit Drehzahlanstieg wurde mit Hilfe eines Analogiegerätes untersucht. Dabei wurde die folgende Anordnung

zugrunde gelegt (Fig. 8). Ein Generator 1 gebe über seinen Transformator 2 und eine lange Hochspannungsleitung 3 Wirk- und Blindleistung an ein Netz 5 ab. Aus irgend einem Grund wird der Schalter 4 geöffnet, so dass der Generator nur noch durch

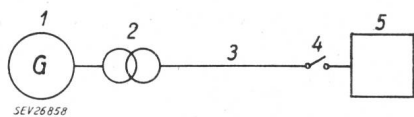


Fig. 8

Schematische Anordnung zur Untersuchung des Lastabwurfes am Ende einer Leitung

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Leitung; 4 Lastschalter;  
5 Netz

die leerlaufende Leitung kapazitiv belastet ist. Infolge der plötzlichen Entlastung der Turbine steigt deren Drehzahl an.

Während in den meisten Fällen das Einschalten einer langen Doppelleitung auf einen leerlaufenden Generator noch möglich ist, würde beim Lastabwurf infolge des Drehzahlanstieges, bzw. infolge der Frequenzerhöhung die kapazitive Reaktanz zu klein sein, so dass ein Kippen des Generators eintreten würde. Bei einer bezogenen Drehzahl  $n$  lautet die Bedingung für das Nicht-Auftreten des Kippens:

$$x_c > n^2 (x_q + x_T) \quad (11)$$

Darin bedeuten  $x_c$  kapazitive Reaktanz der Leitung,  $x_q$  synchrone Quersfeldreaktanz und  $x_T$  Kurzschlussreaktanz des Transformators. Alle Werte gelten bei einer Nenndrehzahl von  $n = 1$ .

### 2.4 Störungen des Parallelbetriebes Dynamische Stabilität

Die Anordnung, die der Untersuchung der dynamischen Stabilität, d. h. Störungen des Parallelbetriebes durch Kurzschlüsse usw., zugrunde gelegt wurde, zeigt Fig. 9. Ein Kraftwerk, dessen Generatoren über die Transformatoren in Blockschaltung überspannungsseitig parallelgeschaltet sind, arbeitet über eine Hochspannungs-Doppelleitung auf ein grosses Netz, das praktisch starr sein soll.

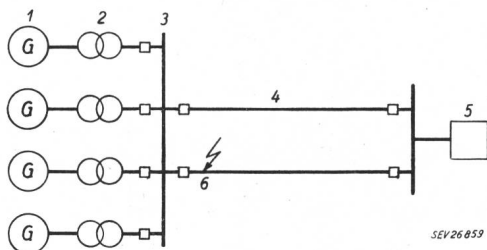


Fig. 9

Schema der Anlage zur Untersuchung der dynamischen Stabilität

- 1 Generator; 2 Transformator; 3 Sammelschiene;  
4 Doppelleitung; 5 starres Netz; 6 Fehlerstelle

In der Nähe des Kraftwerkes soll auf einer Leitung eine Störung 6 auftreten. Die betroffene Leitung wird beidseitig abgeschaltet und nach einer kurzen Unterbrechzeit wieder zugeschaltet (Schnellwiedereinschaltung).

Die Störung kann entweder ein einpoliger Erdschluss, ein zweipoliger Kurzschluss, ein Doppelerdschluss, oder ein dreipoliger Kurzschluss sein.

Das Differentialgleichungssystem für Synchron-generator und Regler würde sehr umfangreich und eine numerische Lösung zeitraubend sein (siehe z. B. [2]). Die Gleichungen der Synchronmaschine wurden daher wieder auf einem Analogiegerät nachgebildet, wobei an diese Einrichtung ebenfalls der richtige Spannungsregler angeschlossen werden konnte. Der Ausgang der Generatornachbildung kann mit einem einpoligen Netzmodell verbunden werden, auf dem sich die Störungen auf der Leitung nachahmen lassen.

Ein einpoliger Erdschluss oder ein zweipoliger Kurzschluss bzw. Doppelerdschluss sind unsymmetrische Störungen, so dass in diesen Fällen mit Hilfe der symmetrischen Komponenten ein Ersatzschaltbild aufgestellt werden muss, das dann auf dem einpoligen Netzmodell dargestellt werden kann [7; 8].

## 3. Untersuchung von Spannungsregelungen

### 3.1 Übersicht

Nachfolgend sollen die Resultate von einigen theoretisch und experimentell untersuchten Spannungsregelungen beschrieben werden, und zwar für folgende Anordnungen:

- Spannungsregelung mit Wälzsektorregler;
- Spannungsregelung mit Verstärkermaschinen und Magnetverstärkern;
- Spannungsregelung mit gittergesteuertem Gleichrichter im Falle eines Normalbetriebes.

Die Untersuchungen werden zum Teil theoretisch (Normalbetrieb, Frequenzgangkurve bei kapazitiver Belastung) und zum Teil experimentell (kapazitive Belastung, Störungen des Parallelbetriebes) durchgeführt. Der Generator (Regelstrecke) soll die nachstehenden Konstanten besitzen:

$$\begin{aligned} x_d &= 1,21 & T_d' &= 1,40 \text{ s} \\ x_d' &= 0,35 & T_d'' &= 0,043 \text{ s} \\ x_d'' &= 0,24 & T_q'' &= 0,043 \text{ s} \\ x_q &= 0,787 & H &= 4,9 \text{ kW}_s/\text{kVA} \\ x_q'' &= 0,27 & & \end{aligned}$$

Der Haupterregere besitze eine ungesättigte Zeitkonstante von 1,0 s. Bei den meisten Versuchen wurde der Einfluss von verschiedenen maximalen Haupterregerspannungen untersucht. Dabei wird mit  $u_{fm}$  die auf die Leerlauferregerspannung des Generators bezogene maximale Haupterregerspannung bezeichnet.

### 3.2 Normalbetrieb

Für den Normalbetrieb wurde das Verhalten der Spannungsregelung nach den in Abschnitt 2.2 dargelegten Gesichtspunkten untersucht. Der dynamische Frequenzgang:

$$F_{q \text{ dyn.}}(\lambda) = |F_q(j\lambda)| - F_q(0)$$

des geregelten Synchrongenerators ist für verschiedene Spannungsreglerarten in Fig. 5 dargestellt. In

dieser ist auch die entsprechende Kurve für den unregulierten Generator eingetragen.

Man erkennt, dass mit einem Wälzsektorregler Spannungsschwankungen infolge Blindlaständerungen nur bei  $\lambda < 3,5 \cong 0,175$  Hz vermindert werden. Für eine Regelung mit Verstärkermaschine liegt die Grenze bei  $\lambda = 3,9 \cong 0,195$  Hz. Oberhalb dieser Frequenz werden die Spannungsschwankungen durch den Regler noch angefacht. Für die Speisung eines normalen Verbrauchernetzes wirkt sich dies nicht störend aus. Sind jedoch als Verbraucher Walzwerke und grosse Lichtbogenöfen zu speisen, bei denen periodische Belastungsänderungen mit einer Frequenz von 0,5...1,5 Hz, d. h. mit  $\lambda = 10...30$  vorkommen können, so muss man die Anfachtung der Spannungsschwankungen durch den Regler beachten. In dieser Hinsicht ist eine Spannungsregelung mit gittergesteuertem Gleichrichter günstiger. Hier sind die Spannungsänderungen bis  $\lambda = 35 \cong 1,75$  Hz durchwegs kleiner bei der geregelten Maschine, als beim unregulierten Synchrongenerator. Eine Anfachtung tritt also nicht ein. Oberhalb  $\lambda = 35 \cong 1,75$  Hz hat praktisch keine Spannungsregelung mehr einen Einfluss auf die Spannungsschwankungen. Es ist dies darauf zurückzuführen, dass die Zeitkonstante der Generatorfeldwicklung keine Feldstromänderung mit grosser Frequenz mehr zulässt. Der Grenzwert der Frequenz bei dem dieser Effekt auftritt, hängt von den Generatorkonstanten ab.

Die Spektralfunktion der Blindlaständerung ist nach Gl. (3b):

$$A_q(\lambda) = \frac{A_{q0}}{\lambda^2}$$

Diese Darstellung gilt etwa für Frequenzen:

$$\lambda \geq 0,3 \cong 0,015 \text{ Hz} \quad [5]$$

Für die Berechnung des partiellen quadratischen Mittelwertes der Spannungsabweichung nach Gl. (9) setzt man daher  $\lambda_1 = 0,3$  und  $\lambda_2 = \infty$ .

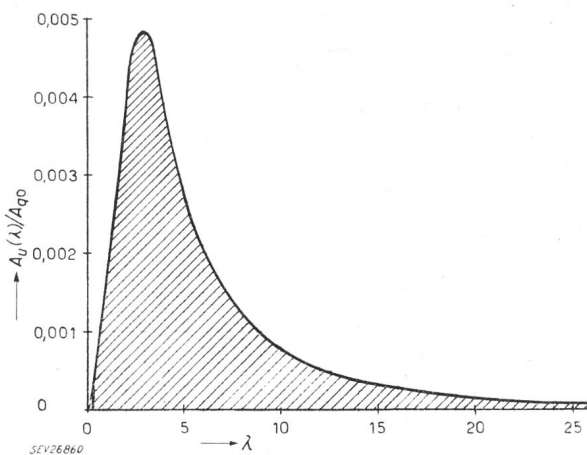


Fig. 10

Spektralfunktion  $A_u(\lambda)/A_{q0}$  für Spannungsregelung mit Verstärkermaschine im Normalbetrieb  
 $\lambda$  auf 50 Hz bezogene Schwingungsfrequenz in %

Die Spektralfunktion der Spannungsänderung  $A_U(\lambda)/A_{q0}$  für die Spannungsregelung mit Verstärkermaschine zeigt Fig. 10. Die schraffierte Fläche

entspricht dem partiellen Fehlerquadrat. Für die drei Reglerarten wurden die folgenden Werte für  $\epsilon_U^*$  bestimmt:

|                                 |                                       |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Wälzsektorregler                | $\epsilon_U^* = 0,269 \sqrt{A_{q0}}$  |
| Verstärkermaschine              | $\epsilon_U^* = 0,172 \sqrt{A_{q0}}$  |
| Gittergesteuerter Gleichrichter | $\epsilon_U^* = 0,0765 \sqrt{A_{q0}}$ |

d. h. der partielle quadratische Mittelwert der Spannungsabweichung verhält sich bei den drei Reglern wie 3,52 : 2,25 : 1.

### 3.3 Kapazitive Belastung

Ein Ausschnitt aus der Frequenzgangkurve des offenen Regelkreises bei einer Spannungsregelung mit Wälzsektorregler bei kapazitiver Belastung mit  $x_c = x_d$  geht aus Fig. 11 hervor. Da der kritische Punkt  $-1$  links von der Frequenzgangkurve liegt, so ist die Regelung stabil. Der Phasenrand ist  $\alpha_{Rd} = 23,5^\circ$  und der Amplitudenrand  $A_{Rd} = 8,33$ . Der kleine Phasenrand deutet vor allem auf eine zu schwache Dämpfung des Regelvorganges hin.

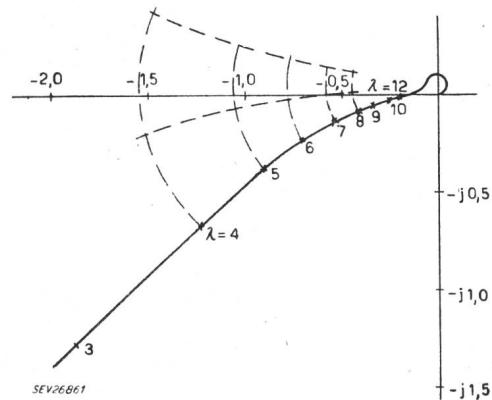


Fig. 11

Spannungsregelung mit Wälzsektorregler  
 Frequenzgang des offenen Regelkreises bei kapazitiver Belastung  $x_c = x_d$   
 $\lambda$  auf 50 Hz bezogene Schwingungsfrequenz in %

Die Ausgleichsvorgänge beim Zu- und Abschalten von kapazitiver Last wurden experimentell untersucht. Die so ermittelten Regelzeiten  $t_R$  und Zeiten des ersten Nulldurchganges  $t_0$  gehen aus Fig. 12 und

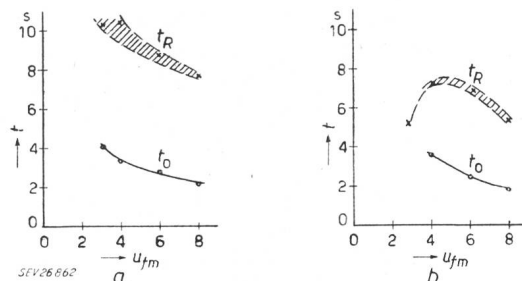


Fig. 12

Spannungsregelung mit Wälzsektorregler  
 Regelzeit  $t_R$  und  $t_0$  beim Zuschalten (a) und Abschalten (b) von einer kapazitiven Last  $c = 0,6$   
 $u_{fm}$  maximale Haupterregerspannung;  $t$  Zeit

13 hervor. Als Regelzeit  $t_R$  wird diejenige Zeit definiert, bei der die Generatorspannung auf  $\pm 2\%$  des Endwertes ausgeregelt wird. Die Zeit des ersten



Nulldurchganges  $t_0$  ist diejenige Zeit, bei der die Generatorspannung zum erstenmal denjenigen Wert annimmt, der stationär im Endzustand erreicht wird.

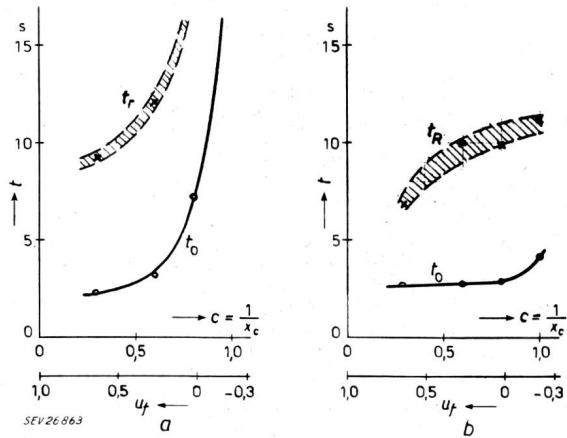


Fig. 13

**Spannungsregelung mit Wälzsektorregler**

Regelzeit  $t_R$  und  $t_0$  beim Zuschalten (a) und Abschalten (b) von einer kapazitiven Last

Max. Haupterregerspannung  $u_{fm} = 4$

c Kapazität der Leistung;  $x_c$  kapazitive Reaktanz der Leitung;  $u_f$  bezogene Haupterregerspannung; t Zeit

Aus Fig. 12 geht der Einfluss der maximalen Haupterregerspannung  $u_{fm}$  beim Zu- und Abschalten von kapazitiver Last  $c = 0,6$  hervor. Man er-

kennt, dass die Zeiten  $t_R$  und  $t_0$  mit grösserem  $u_{fm}$  abnehmen. Für  $u_{fm} = 4$  sind in Fig. 13 die Zeiten  $t_R$  und  $t_0$  eingetragen, die sich beim Zu- und Abschalten verschiedener Kapazitäten ergeben. Hier ist auch noch die im stationären Betrieb erforder-

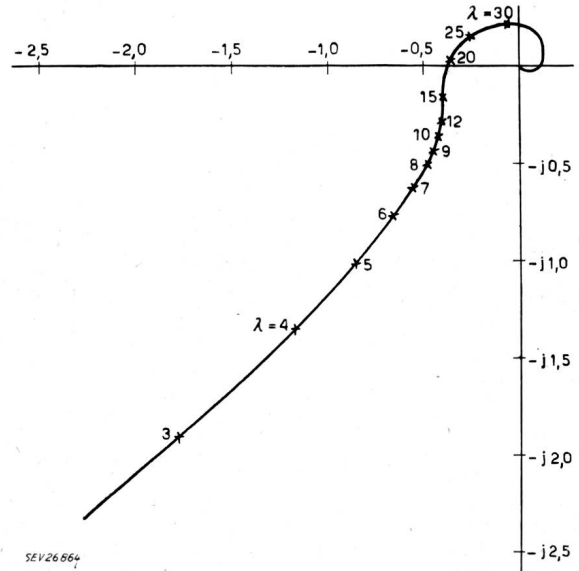


Fig. 14

**Spannungsregelung mit Verstärkermaschine**

Frequenzgang des offenen Regelkreises bei kapazitiver

Belastung  $x_c = x_d$

Bezeichnungen s. Fig. 11

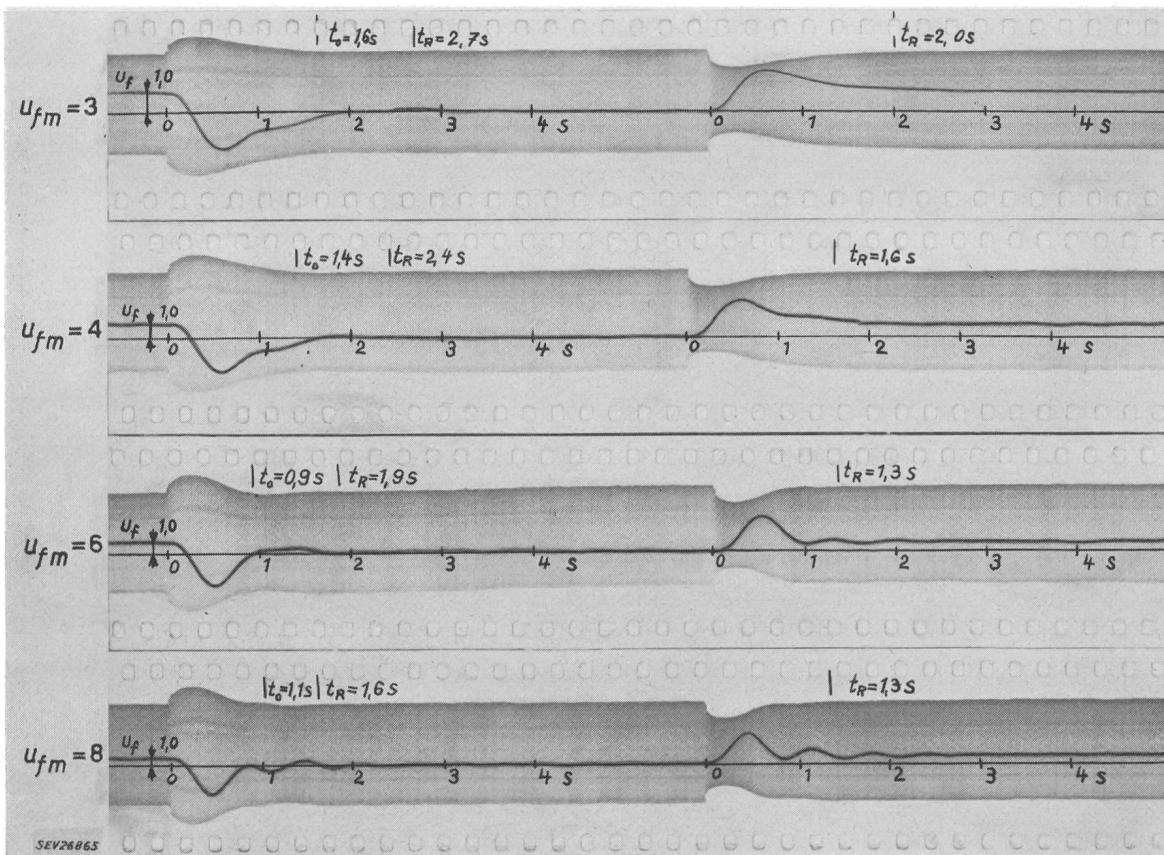


Fig. 15

**Spannungsregelung mit Verstärkermaschine**

Zuschalten (a) und Abschalten (b) kapazitiver Last  $c = 0,8$

$u_{fm}$  max. Haupterregerspannung;  $u_f$  Haupterregerspannung;  $t_R$  Regelzeit;  $t_0$  Zeit des ersten Nulldurchganges



liche Erregerspannung  $u_f$  angegeben. Mit zunehmender Kapazität  $c$  steigen  $t_R$  und  $t_0$  stark an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender kapazitiver Last die Überregelreserve in negativer Richtung stark abnimmt. Nur für ungefähr  $u_f \geq 0,2$ , also noch positiver Erregung, kann man noch einigermaßen annehmbare Regelzeiten erwarten. Es soll noch erwähnt werden, dass die untersuchte Regelung keine Stosserregungseinrichtung aufgewiesen hat.

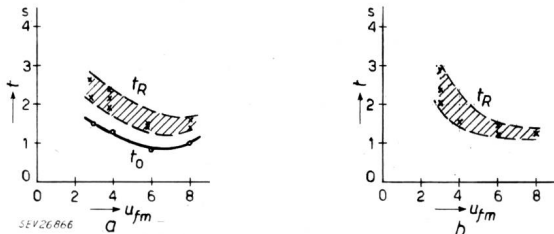


Fig. 16

Spannungsregelung mit Verstärkermaschine  
Regelzeit  $t_R$  und  $t_0$  beim Zuschalten (a) und Abschalten (b)  
kapazitiver Last  $c = 0,8$   
Weitere Bezeichnungen s. Fig. 12

Für eine Spannungsregelung mit Verstärkermaschine zeigt Fig. 14 einen Ausschnitt aus der Frequenzgangkurve bei kapazitiver Belastung mit  $x_c = x_d$ . Daraus kann man den Phasenrand  $\alpha_{Rd} = 49,5^\circ$  und den Amplitudenrand  $A_{Rd} = 2,64$  entnehmen. Danach ist ein guter Verlauf des Ausgleichsvorganges zu erwarten. Beim Vergleich mit Fig. 11 beachte man, dass in der Nähe des kritischen Punktes — 1 bei einer Regelung mit Verstärkermaschinen grössere Frequenzen  $\lambda$  auftreten, was auf eine raschere Regelung hinweist.

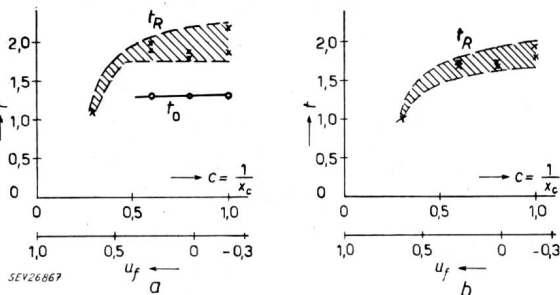


Fig. 17

Spannungsregelung mit Verstärkermaschine  
Regelzeit  $t_R$  und  $t_0$  beim Zuschalten (a) und Abschalten (b)  
kapazitiver Last  
Max. Haupterregerspannung  $u_{fm} = 4$   
Weitere Bezeichnungen s. Fig. 12

Beim Zuschalten einer kapazitiven Belastung steht kurzzeitig die ganze Verstärkermaschinen-spannung zur Verfügung. Auf diese Weise erreicht man bei einer guten Stabilität der Regelung kurze Regelzeiten. Fig. 15 enthält Oszillogramme einer Messreihe beim Zu- und Abschalten von  $x_c = x_d$  so, dass die stationäre Erregung gerade den Wert 0 annimmt.

Aus Fig. 16 kann man die Regelzeit  $t_R$  und die Zeit des ersten Nulldurchganges  $t_0$  entnehmen. Die gleichen Zeiten sind in Fig. 17 enthalten, aber diesmal für einen festen Wert  $u_{fm} = 4$ , aber für verschiedene kapazitive Belastungen  $c$ . Im Gegensatz

zur Spannungsregelung mit Wälzsektorregler (siehe Fig. 13) wächst hier die Regelzeit  $t_R$  praktisch nicht mit zunehmender Kapazität  $c$ .

Schliesslich sei noch der Lastabwurf mit anschließendem Drehzahlanstieg bei kapazitiver Belastung erwähnt. Für  $c = 0,6$  sind in Fig. 18 vier

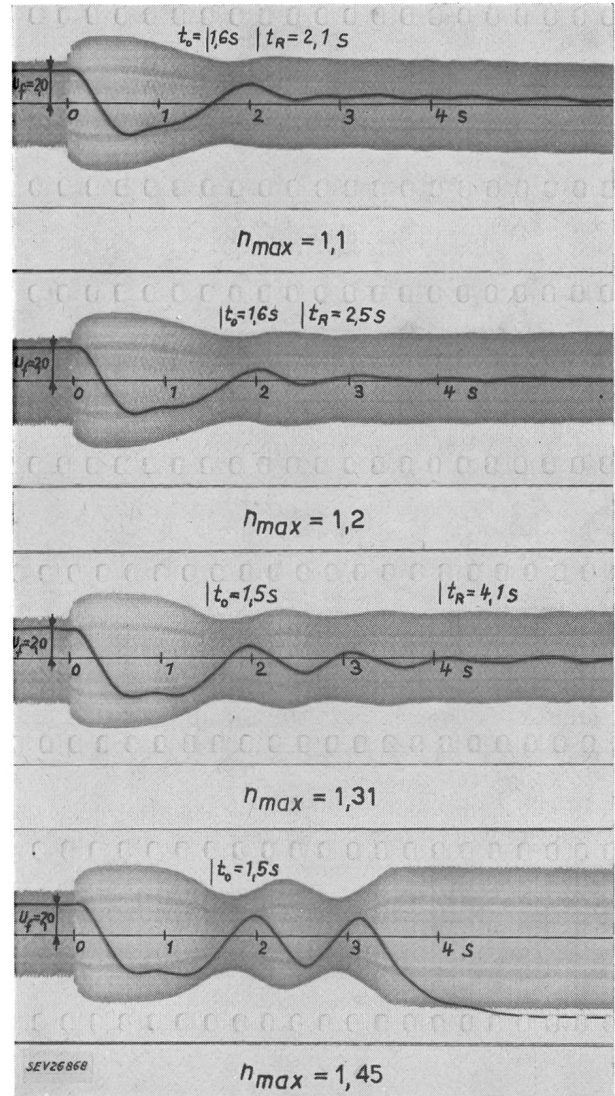


Fig. 18

Spannungsregelung mit Verstärkermaschine  
Lastabwurf mit Drehzahlanstieg,  $c = 0,6$   
 $n_{max}$  auf Nennzahl bezogene max. Drehzahl  
Weitere Bezeichnungen s. Fig. 15

Oszillogramme dargestellt für verschiedene maximale Drehzahlen  $n_{max}$ , die nach etwa 2 s erreicht werden. Interessant ist das unterste Oszillogramm für  $n_{max} = 1,45$ . Für die vorliegenden Verhältnisse ist dies gerade die Grenze, wo die Bedingung nach Gl. (11)  $x_c > n^2 x_q$  nicht mehr eingehalten wird. Somit tritt das Kippen der Generatorspannung ein, so, dass der Regler nicht mehr im Stande ist, die Spannung zu halten.

### 3.4 Störungen des Parallelbetriebes (Dynamische Stabilität)

Die Störungen des Parallelbetriebes wurden experimentell untersucht. Der Untersuchung ist das

in Fig. 19 gezeigte Netzwerk zugrunde gelegt. Der Transformator besitzt eine Kurzschlussreaktanz  $x_T = 0,12$ , die beiden Stränge der Doppelleitung eine Reaktanz von je  $x_{(1)} = 0,83$ . Diese bezogenen Leitungsdaten entsprechen einer 250 km langen 220-kV-Leitung mit einer Bezugsleistung von 400 MVA

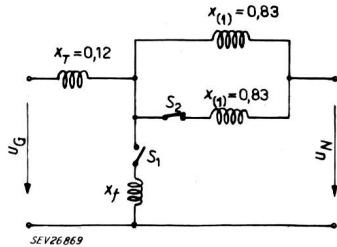


Fig. 19

**Einpoliges Ersatzschema zur Untersuchung der dynamischen Stabilität**

Zweipoliger Kurzschluss  $x_f = 0,19$ ; Doppelerdschluss  $x_f = 0,07$ ; dreipoliger Kurzschluss  $x_f = 0$

$U_G$  Generatorspannung;  $U_N$  Netzspannung;  $x_T$  Kurzschlussreaktanz des Transformators;  $x_{(1)}$  Reaktanz der Einfachleitung;  $x_f$  Reaktanz an der Fehlerstelle;  $S_1, S_2$  Schalter

[3]. Das Netzwerk an der Fehlerstelle ist zu einer einzigen Reaktanz  $x_f$  zusammengefasst, deren Wert je nach Fehlerart verschieden ist. Mit elektronischen Zeitrelais liess sich zur Nachbildung eines Kurzschlusses der Schalter  $S_1$  während 0,16 s kurzzeitig schliessen, worauf der eine Leitungsstrang während 0,38 s mit dem Schalter  $S_2$  unterbrochen wurde. Nachher war wiederum der ursprüngliche Zustand hergestellt. Die untersuchten Störungen waren zweipolige Kurzschlüsse, Doppelerdschlüsse und dreipolige Kurzschlüsse.

Die dynamische Stabilitätsgrenze ist der Wert des Polradwinkels  $\delta_N$  bzw. der Wert der übertragenen Leistung  $p$ , bei dem die Synchronmaschine gerade noch in Tritt bleibt. Die experimentell gefundenen Grenzwerte sind für drei Fehlerarten in Funktion der maximalen Haupterregerspannung  $u_{fm}$  für eine

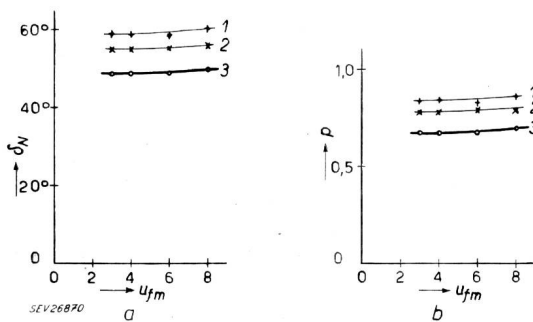


Fig. 20

**Spannungsregelung mit Wälzsektorregler**

Dynamische Stabilitätsgrenze des Parallelbetriebes

1 zweipoliger Kurzschluss; 2 Doppelerdschluss; 3 dreipoliger Kurzschluss

$u_{fm}$  max. Haupterregerspannung;  $\delta_N$  Polradwinkel;  $p$  Wirkleistung

Regelung mit Wälzsektorregler in Fig. 20 aufgetragen. Der Sektorregler war dabei mit mittleren Werten der Dämpfung und der Rückführung eingestellt.

Die Stabilitätsgrenze steigt ganz leicht an, je grösser die max. Spannung  $u_{fm}$  des Haupterregers

gewählt wird. So nimmt z. B. die übertragbare Leistung im Falle eines Doppelerdschlusses von  $p = 0,78$  auf  $p = 0,80$ , d. h. um 2,6 % zu, wenn  $u_{fm}$  von 3 auf den Wert 8 erhöht wird.

Für eine Spannungsregelung mit Verstärkerkaskade ist ein Teil der durchgeführten Versuche in

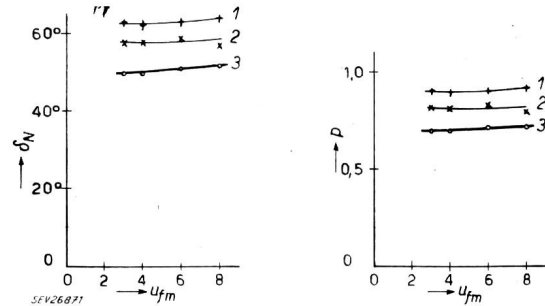


Fig. 21

**Spannungsregelung mit Verstärkerkaskade**

Dynamische Stabilitätsgrenze des Parallelbetriebes  
Bezeichnungen s. Fig. 20

Fig. 21 aufgetragen. Fig. 22 enthält zwei Oszillogramme, aus denen der Verlauf der Generatorspannung und der Haupterregerspannung  $u_f$  hervorgehen und zwar oben für einen stabilen Fall und unten für einen instabilen Fall.

Das Ausertrittfallen der Synchronmaschine, bzw. deren Schlüpfen, erkennt man an der Schwebung der Generatorspannung.

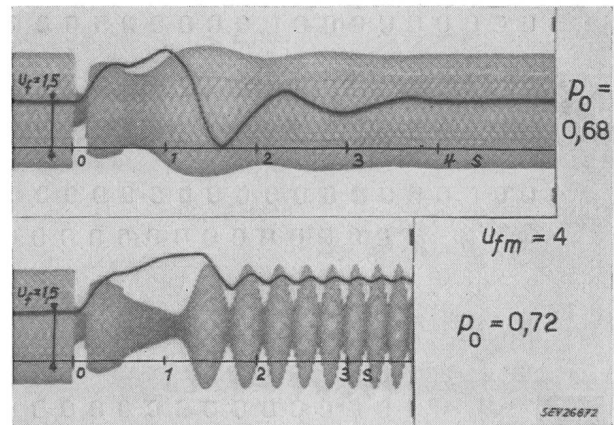


Fig. 22

**Spannungsregelung mit Verstärkerkaskade**

Dynamische Stabilität des Parallelbetriebes bei dreipoligem Kurzschluss

$p_0$  Wirkleistung vor der Störung  
Weitere Bezeichnungen s. Fig. 15

Aus einer grossen Anzahl von Messungen wurde die Vergrößerung der übertragbaren Leistung bei Verwendung einer Regelung mit Verstärkerkaskade gegenüber einem Wälzsektor festgestellt. Diese ist bei

|                         |          |
|-------------------------|----------|
| Zweipoligem Kurzschluss | 7...11 % |
| Doppelerdschluss        | 8... 9 % |
| Dreipoligem Kurzschluss | 9...13 % |

Der Gewinn liegt im Durchschnitt bei 10%.

#### 4. Der Einsatz der klassischen und der modernen Spannungsregelungen

Abschliessend sollen noch die wichtigsten Ergebnisse der untersuchten Spannungsregelungen zusammengestellt und deren Einsatz angegeben werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass überall da der Einsatz einer modernen Spannungsregelung, z. B. mit Verstärkermaschinen und Magnetverstärkern angebracht ist, wo strenge Bedingungen an die Regelgeschwindigkeit gestellt werden. Dies trifft insbesondere zu beim Unterspannungsetzen von langen, leerlaufenden Hochspannungsleitungen und beim Wirklastabwurf mit kapazitiver Belastung.

Ebenso ist ein rasches Ansprechen der Spannungsregelung wichtig, um die dynamische Stabilität des Parallelbetriebes zu verbessern. Diese Anforderungen werden da gestellt, wo Energie über lange Hochspannungsleitungen übertragen werden muss, d. h. in den Fällen wo auch beim Unterspannungsetzen der leeren Leitung strengere Anforderungen gestellt werden.

Im Normalbetrieb wird in Bezug auf Spannungshaltung in den meisten Fällen eine Spannungsregelung mit Wälzsektorregler bzw. mit Öldruckregler, der praktisch die gleichen Ergebnisse liefert, genügen. Einzig bei speziellen Belastungsverhältnissen mit periodisch rasch schwankender Belastung wird man zu rascheren Spannungsregelungen greifen müssen.

Die bisherigen Schlussfolgerungen wurden ohne Rücksicht auf die erforderliche Leistung zur Erregung der Synchronmaschine gezogen. Bei grossen Synchrongeneratoren kann es aber vorkommen, dass die notwendige Leistung mit den klassischen Mitteln nicht mehr beherrscht werden kann, so dass aus diesem Grund zu einer modernen Lösung gegriffen werden muss, selbst wenn vom regeltechnischen Gesichtspunkt eine übliche Anordnung ausreichen würde. So werden z. B. grosse, wasserstoffgekühlte Turbogeneratoren oft mit gittergesteuerten Gleichrichtern erregt.

#### Literatur

- [1] Bühler, H.: Die theoretischen Grundlagen des Modells einer Synchronmaschine mit Blindlast, zur Untersuchung von Spannungsregelungen. Bull. Oerlikon Bd. -(1956), Nr. 315, S. 26...39.
- [2] Crary, S.: Power System Stability. New York: Wiley 1950.
- [3] Laible, Th.: Das Verhalten der Synchronmaschinen bei Störungen der Stabilität. Bull. Oerlikon Bd. -(1955), Nr. 310, S. 37...44.
- [4] Gaden, D.: Considérations sur la précision du réglage. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Ser., Bd. 2(1952), Nr. 16, S. 179...197.
- [5] Gaden, D.: Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 2, S. 45...56.
- [6] Lehmann, G.: Calcul du spectre des fluctuations du courant absorbé par un réseau de distribution électrique. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Ser., Bd. 3(1953), Nr. 33, S. 593...595.
- [7] Wagner, C. F. und R. D. Evans: Symmetrical Components. New York und London: McGraw-Hill 1933.
- [8] Clarke, E.: Circuit Analysis of A.C. Power Systems. Bd. 1 und 2. New York: Wiley 1943/46.

#### Adresse des Autors:

H. Bühler, Girhaldenstrasse, Bassersdorf (ZH).

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

#### Tagungen in Kopenhagen und Stockholm vom 1. bis 4. Juli bzw. 7. bis 18. Juli 1958

Die Anmeldungen zu der ursprünglich nur in Stockholm vorgesehenen Tagung der CEI, sowohl was die Zahl der tagenden Comités d'Etudes (CE), als auch der Delegierten und ihrer Begleiter betrifft, waren derart gross, dass das Comité d'Action im Einvernehmen mit dem Gastgeber, dem schwedischen Nationalkomitee der CEI, eine Entlastung des Haupttagungsortes Stockholm vornehmen musste. In dieser Lage erklärte sich das dänische Nationalkomitee entgegenkommenderweise bereit, eine Gruppe von 3 Comités d'Etudes und Sous-Comités eine Woche vor der Haupttagung nach Kopenhagen einzuladen. Das schwedische Nationalkomitee seinerseits fasste eine weitere Zahl von Comités d'Etudes und Sous-Comités zu einer Gruppe zusammen, welche ebenfalls eine Woche vor der Haupttagung ihre Sitzungen in Ludvika und Västerås (Schweden) abhielten.

#### Vom 1. bis 4. Juli tagten in Kopenhagen:

Sous-Comité 12-2: Sécurité (Radiocommunications)  
Comité d'Etudes 20: Câbles Electriques  
Comité d'Etudes 35: Piles

#### Vom 30. Juni bis 5. Juli tagten in Västerås:

Sous-Comité 2C: Classification des matériaux isolants (Machines tournantes)  
Comité d'Etudes 15,  
Comité d'Experts 15,  
Groupes de Travail  
1...7: Matériaux isolants  
Sous-Comité 39-2: Dispositifs à semi-conducteurs (Tubes électroniques)

#### Vom 1. bis 5. Juli tagten in Ludvika:

Sous-Comité 17A: Appareillage à haute tension (Appareils d'interruption)  
Comité d'Etudes 22: Convertisseurs de puissance, 1<sup>re</sup> partie des séances

Sous-Comité 22-2: Redresseurs à semi-conducteurs (Convertisseurs de puissance), 1<sup>re</sup> partie des séances

#### Vom 7. bis 18. Juli tagten in Stockholm:

Conseil  
Comité d'Action  
Comité d'Etudes 1: Nomenclature  
Sous-Comité 2F: Dimensions des balais de charbon (Machines tournantes)  
Comité d'Etudes 3,  
Comité d'Experts 3: Symboles graphiques  
Comité d'Etudes 7: Aluminium  
Sous-Comité 7-1: Alliages d'aluminium (Aluminium)  
Comité d'Etudes 8: Tensions et courants normaux, fréquences normales  
Comité d'Etudes 13: Appareils de mesure  
Sous-Comité 13A: Compteurs (Appareils de mesure)  
Sous-Comité 13B: Appareils de mesure indicateurs (Appareils de mesure)  
Sous-Comité 13C: Appareils de mesure électroniques (Appareils de mesure)  
Comité d'Etudes 14: Transformateurs de puissance  
Comité d'Etudes 17: Appareils d'interruption  
Sous-Comité 17B: Appareillage à basse tension (Appareils d'interruption)  
Comité d'Etudes 22: Convertisseurs de puissance, 2<sup>e</sup> partie des séances  
Sous-Comité 22-2: Redresseurs à semi-conducteurs (Convertisseurs de puissance), 2<sup>e</sup> partie des séances  
Comité d'Etudes 23: Petit appareillage  
Comité d'Etudes 24: Grandeurs et unités électriques et magnétiques  
Comité d'Etudes 25: Symboles littéraires et signes  
Comité d'Etudes 28: Coordination de l'isolement  
Comité d'Etudes 29, Groupes de Travail  
1, 3, 5, 6, 7, 8: Electroacoustique