

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 40 (1949)  
**Heft:** 7

**Artikel:** Die Beherrschung der Selbsterregung bei Synchrongeneratoren  
**Autor:** Keller, Robert  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1056355>

### **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:** 18.01.2025

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

# BULLETIN

## DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

### Die Beherrschung der Selbsterregung bei Synchrongeneratoren

Von Robert Keller, Baden

621.313.322.013.62

*Es werden die Anforderungen an die automatische Spannungsregulierung von Synchronmaschinen mit reiner kapazitiver Belastung dargelegt. Diese Verhältnisse gaben Anlass, die üblichen Spannungsregler entsprechend zu ergänzen. An einem Beispiel wird die vorteilhafte Wirkungsweise dieser Ergänzungen erläutert und an Hand oszillographischer Aufnahmen nachgewiesen. Es zeigt sich, dass eine nach üblichen Grundsätzen ausgelegte Synchronmaschine mit ausgeprägten Polen mit Hilfe der verbesserten Spannungsregulierung praktisch gleich hoch kapazitiv wie induktiv belastet werden kann. Die Verbesserung hat darum wirtschaftliche Bedeutung, weil bis anhin bei solchen Belastungsverhältnissen die Synchronmaschine gewöhnlich mit einem anormal hohen Luftspalt versehen wurde, woraus eine entsprechend teurere Maschine resultierte.*

*Les exigences posées à la régulation automatique de la tension des machines synchrones à charge purement capacitive ont conduit à perfectionner les régulateurs de tension. A l'aide d'un exemple et de relevés oscillographiques, l'auteur expose les avantages de ces perfectionnements. Cette meilleure régulation de la tension permet désormais de charger aussi bien capacitivement qu'inductivement une machine synchrone conventionnelle à pôles saillants. Cette amélioration a une grande importance économique, car, dans de telles conditions, il fallait jusqu'ici prévoir une machine à entrefer anormalement grand et, par conséquent, d'un prix plus élevé.*

Die Inbetriebsetzung oder Prüfung einer langen offenen Hochspannungsleitung stellt besondere Anforderungen an den hierfür bestimmten Generator mit zugehöriger Regulierung seiner Erregung. Man kann die Schwierigkeiten zum vornherein dadurch eliminieren, indem man den Luftspalt des Synchrongenerators verhältnismässig gross macht. Diese Massnahme wirkt sich aber sehr unwirtschaftlich aus, weil die Leistung der Polradwicklung und damit auch die ganze Maschine grösser wird. Bei Synchronkompensatoren, die als reine Blindlastmaschinen arbeiten, ist die Einhaltung möglichst kleiner Verluste besonders erstrebenswert, wozu aber die erwähnte grössere Bemessung im Widerspruch steht. Diese Überlegungen, sowie konkrete Fälle, gaben Veranlassung zur Aufnahme von systematischen Versuchen im Laboratorium und in Anlagen mit dem Ziel, die Spannungsregler für diese Aufgabe derart zu vervollkommen, dass eine nach üblichen Grundsätzen, d. h. mit normalem Kurzschlussverhältnis, bemessene Synchronmaschine gleich stark kapazitiv wie induktiv belastet werden kann. Dies bedeutet praktisch, dass die Regulierungsleistung der Maschine gleich der doppelten Nennleistung wird.

Die Voraussetzungen für Selbsterregung in der Hauptachse sind gegeben, wenn

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \leq X_L$$

wo  $X_C$  die kapazitive Leitungsreaktanz,  $X_L$  die Längsreaktanz der Synchronmaschine ist<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> siehe *Waldvogel, P.*: Theorie der Spannungshaltung einer auf eine lange leerlaufende Leitung arbeitenden Drehstrommaschine. *Brown Boveri Mitt.* Bd. 32(1945), Nr. 8, S. 251...263.

Solange die kapazitive Leitungsreaktanz kleiner als die Längsreaktanz der Maschine, aber immer noch grösser als deren Querreaktanz ist, erfolgt die Selbsterregung verhältnismässig langsam und kann daher grundsätzlich von einem zweckmässig gebauten Spannungsregler beherrscht werden. Ist dagegen  $X_C \leq X_q$ , so erfolgt die Selbsterregung sehr rasch und kann von keinem Regler verhindert werden. Bei Vollpolmaschinen, d. h. Turbogeneratoren, ist  $X_L \cong X_q$ , was bedeutet, dass solche Maschinen bei normaler Bemessung weniger hoch kapazitiv belastet werden können als Generatoren mit ausgeprägten Polen, wo  $X_L \cong 2 X_q$  ist.

Es soll nun gezeigt werden, wie hoch und mit welchen Mitteln die kapazitive Belastung einer als Generator nach üblichen Grundsätzen ausgelegten Synchronmaschine gesteigert werden konnte. Die Leistungswerte der untersuchten Maschine waren folgende: 30 000 kVA,  $\cos\varphi = 0,8$ ,  $n = 500/m$ , 11 000 V. Bei Arbeitsweise als Phasenschieber war z. B. garantiert: 11 000 V, 19 000 kVA kapaz., 28 000 kVA indukt. Die Maschine war ursprünglich nicht für diese Belastung konstruiert; sie wies die folgenden charakteristischen Daten auf:

Kurzschlussverhältnis 0,75; komplette massive Pole,  
Längsreaktanz (Synchronreaktanz) 6,4  $\Omega$   
Querreaktanz 3,2  $\Omega$

Aus diesen Werten ergibt sich z. B. die max. zulässige kapazitive Belastung bei Erregerstrom Null im Polrad von

$$P_{kap.} = \frac{11\,000^2}{6,2} \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{19\,000\text{ kVA}}}$$

d. h. gerade der garantierte Wert. Die erwähnte garantierte kapazitive Belastung entsprach einem normal auftretenden Zustand des angeschlossenen

Hochspannungsnetzes. Es war darum angezeigt, dafür zu sorgen, dass die Maschine diese Belastung mit einer genügenden Reserve aufnehmen konnte, dies namentlich mit Rücksicht auf die bei Lastabschaltungen auftretenden Frequenzerhöhungen, welche mindestens vorübergehend eine entsprechend höhere kapazitive Belastung hervorrufen. Zudem schloss der Ausbau des Hochspannungsnetzes die Möglichkeit nicht aus, dass noch weitere offene Leitungen bei Störung von der in Frage stehenden Synchronmaschine gespeist würden.

Wie erwähnt, ergibt sich die max. kapazitive Last bei unerregter Polradwicklung zu

$$P = \frac{U^2}{X_L} \cdot 10^{-3} \text{ kVA}$$

wo

$$X_L = X_C$$

Bei weiterer Verringerung von  $X_C$ , d. h. sobald  $X_C < X_L$ , muss der Haupterregestrom negative Werte annehmen, um die Spannung auf dem Sollwert zu halten. Bei den angestellten Betrachtungen ist immer angenommen, dass der Generator auf eine offene Hochspannungsleitung arbeite (Fig. 1). Die Reaktanz des Transformators, welche von der kapazitiven Leitungsreaktanz subtrahiert werden sollte, wurde vernachlässigt.



Fig. 1

Die erwähnten Verhältnisse, die massgebend sind für die kapazitive Belastungsfähigkeit, liessen erkennen, dass es möglich sein muss, diese Belastung mittels Ausnutzung der negativen Erregung zu erhöhen, ohne von der üblichen Massnahme Gebrauch zu machen, die in der Verkleinerung der Synchronreaktanz, bzw. Vergrösserung des Kurzschlussverhältnisses und damit des Luftspaltes besteht. Diese radikale Massnahme stellt nun aber durchaus nicht ohne weiteres die beste Lösung dar, aus folgendem Grunde: Für Generatoren mit Wasserturbinenantrieb entsteht die max. kapazitive Belastung meistens nur bei Störung, und zwar dann, wenn der betrachtete Generator über eine lange Hochspannungsleitung auf ein Netz arbeitet, der Hochspannungsschalter *b* (Fig. 1) z. B. zufolge eines Kurzschlusses auslöst und wenn mit dieser Auslösung auch die Wirklast des Generators plötzlich verschwindet.

Je nach Charakteristik der Turbine stellt sich bei diesem Vorgang eine Frequenzerhöhung von 8...30% ein, und dementsprechend erhöht sich die kapazitive Belastung proportional entsprechend

$$P_{kap} = \frac{U^2}{X_C} \cdot \frac{\omega_1}{\omega}$$

worin  $\omega_1$  die erhöhte Kreisfrequenz bedeutet. Für die Spannungserhöhung auf der Leitung muss berücksichtigt werden, dass diese eine Steigerung bis zum doppelten Betrag der totalen Streuspannung (Generator plus Transformator) erreichen kann.

Der genaue Betrag der Spannungsänderung ergibt sich aus der geometrischen Zusammensetzung dieser Werte; er ist am grössten bei  $\cos\varphi = 0$ .

Der weitere Anstieg dagegen ist zeitbedingt und hängt vorwiegend von der Ankerrückwirkung und vom Frequenz-, bzw. Drehzahlanstieg ab (Fig. 2).

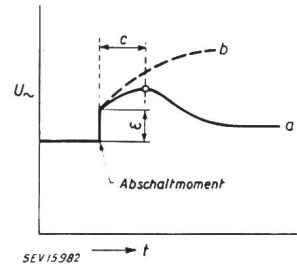


Fig. 2  
Verlauf der Abschaltspannung  
a) mit Spannungsregler  
b) ohne Spannungsregler

Der erst erwähnte sprunghafte Anstieg  $\varepsilon$  ist durch die charakteristischen Daten des Generators und des Transformators gegeben und kann von keinem Spannungsregler vermindert werden. Dagegen ist für den weiteren Verlauf des Zeitabschnittes *c* die Wirkungsweise der automatischen Spannungsregulierung allein entscheidend. Es wurde schon früher darauf hingewiesen, dass dieser Spannungsanstieg je nach Erregerschaltung ganz beträchtliche Werte annehmen kann. Der Vollständigkeit halber sei nochmals kurz auf die entscheidenden Verhältnisse hingewiesen (Fig. 3). Massgebend ist der

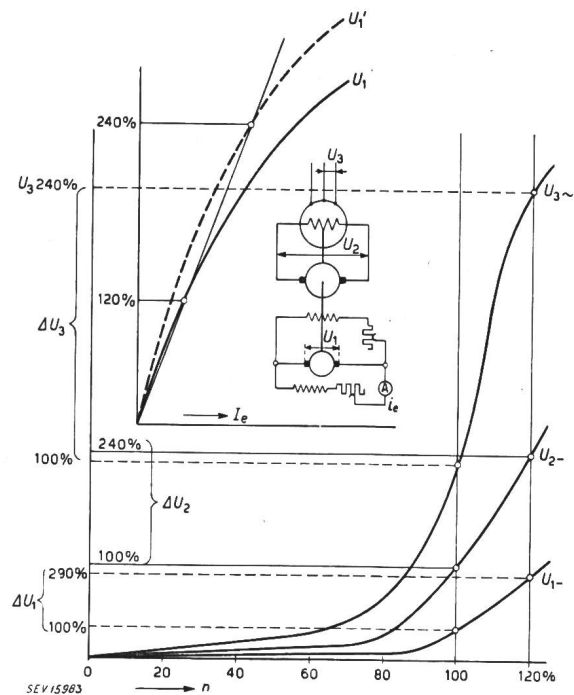


Fig. 3

Spannungsanstieg eines Generators in Abhängigkeit von der Drehzahl

- $U_1$  Hilfserrergerspannung bei  $n_0$
- $U_1'$  Hilfserrergerspannung bei  $n'$
- $U_1$  Hilfserrergerspannung in Abhängigkeit von der Drehzahl
- $U_2$  Haupterrergerspannung in Abhängigkeit von der Drehzahl
- $U_3$  Generatorspannung in Abhängigkeit von der Drehzahl

Spannungsanstieg am Hilfserrerer, welcher je nach Sättigung im Betriebspunkt bei einem Drehzahlanstieg von z. B. 30% bis zu 200% anwachsen kann. Bei der in Fig. 3 angegebenen Standardschal-

tung für Grossgeneratoren erfolgt die Spannungsänderung am Stator selbst bei konstanter Hilfserregerspannung quadratisch mit der Tourenzahl. Insgesamt müsste bei Versagen der automatischen Spannungsregulierung mit einer Statorspannungsänderung von

$$\Delta U_3 \approx 100\% + \varepsilon\% \approx 120\%$$

gerechnet werden, weil die Zeit für das Abklingen von  $\varepsilon$  viel grösser ist als die Zeit für den Drehzahlanstieg, welcher nur 1...2 s beträgt. Der Stand der Regulier Technik ist heutzutage aber so weit, dass die Spannungserhöhung zufolge Drehzahlanstieg einwandfrei beherrscht werden kann.

Es ergibt sich daraus aber auch, dass die Ausrüstung des Generators mit einem anormalen Luftspalt diese Gefahr um nichts vermindert. Hier kann nun die negative Impulssteuerung des Erregerstromes einen beschleunigten Abbau des Haupterregers bewirken.

Es stellt sich nun die Frage, wieweit diese negative Erregung getrieben werden kann. Hiefür ist folgendes bestimmend:

a) Im Parallelbetrieb mit dem Netz darf die negative Erregung die Kippgrenze, bzw. die dynamische Stabilitätsgrenze bei den vorgeschriebenen Wirklasten nicht gefährden. Als maximaler negativer Wert des Erregerstromes gilt derjenige, bei dem die Synchronmaschine im Leerlauf am Netz bei Betriebsspannung noch in Tritt bleibt.

b) Bei Betrieb des Generators auf offene Leitung muss beim maximalen durch den Regler einstellbaren negativen Erregerstrom die Spannungsregulierung noch völlig stabil sein.

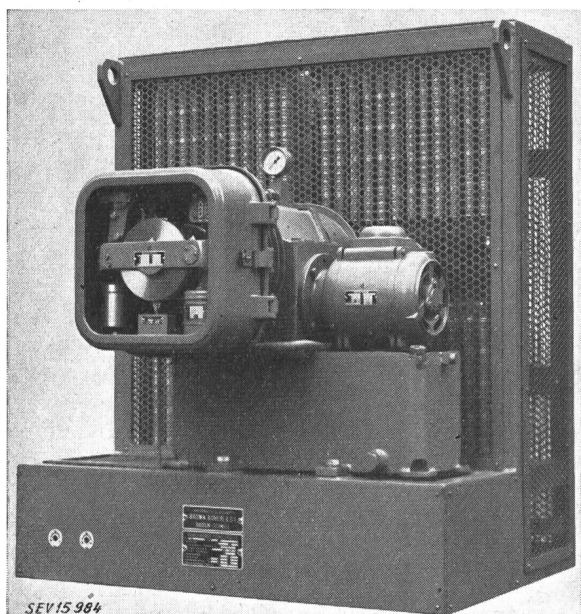


Fig. 4  
Hochleistungs-Spannungsregler

Gestützt auf diese Verhältnisse wurden die Brown-Boveri-Spannungsregler, welche direkt arbeitende Widerstandsregler sind, ergänzt.

Die Beherrschung einer hohen Regulierleistung setzt in erster Linie einen leistungsfähigen Spannungsregler voraus. Die Sektor-Regler dürften zu den schnellsten direkt wirkenden Widerstandsreglern gehören. Deren einziger Nachteil ist die beschränkte Leistungsfähigkeit, weshalb zwecks Bewältigung der hohen Regulierleistung im Erregerkreis von Grossgeneratoren der Hochleistungsregler entsprechend Fig. 4 geschaffen wurde, der folgendermassen wirkt (Fig. 5):

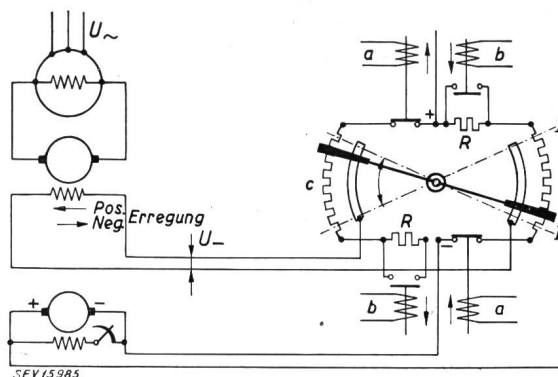


Fig. 5  
Prinzipschema des Spannungsreglers mit negativer Stoss-Erregung

- a) Schnellschützen für Unterbrechung der positiven Erregung
- b) Schnellschützen für die negative Stoss-Erregung
- c) Potentiometer-Regler

Der Regler steuert die Erregerwicklung des Haupterregers in Potentiometerschaltung mit Speisung des Potentiometers durch den konstant erregten (Nebenschluss-) Hilfserreger.

Diese Potentiometerschaltung gestattet grundsätzlich, den Haupterreger in gleichem Masse positiv und negativ zu erregen. Der Haupterreger selbst ist in bezug auf Vollasterregerbedarf zirka 50% überdimensioniert, um eine rasch wirkende Impulsregelung zu erreichen. Die gewählten Schaltungen bezweckten nun die Beschränkung der starken negativen Erregung auf Ausgleichsvorgänge. Der statisch noch zulässige Wert ist durch die Grenze für das Aussertrittfallen der Maschine im Parallelbetrieb bei Untererregung gegeben. Diese Grenze liegt bei normalen Maschinen mit ausgeprägten Polen und einem üblichen Kurzschlussverhältnis von zirka 0,6 bei zirka -40% des bei Nennspannung im Leerlauf benötigten Erregerstromes. Dieser Wert ist also verhältnismässig gering. Andererseits ist es aber durchaus zweckmässig, eine stärkere negative Erregung zu einem beschleunigten Feldabbau heranzuziehen. Die Wirkung der Schaltung war darum so gedacht, dass die beiden Zustandswiderstände R (Fig. 5) im Potentiometer den stationären negativen Erregerstrom auf den erwähnten Wert begrenzen. Die Erregerwicklung des Haupterregers erhält daher bei den verschiedenen Lagen des beweglichen Bürstenpaares entsprechend Fig. 5 folgende Spannungswerte:

in der Nullage (0)	0
in der Stellung I	+ 150% Vollast-Erregung
in der Stellung II	- 40% Leerlauf-Erregung
	entspr. max. stationärer
	kapazitiver Belastung.

Tritt nun zufolge einer Störung eine starke Spannungssteigerung am Generator auf, deren Höhe aber begrenzt werden soll, so treten die je zwei Schnellschütze *a* und *b* je paarweise gekuppelt und gleichzeitig in Aktion. Der genauere Vorgang ist folgender: Zufolge eines Kurzschlusses oder eintretender Spannungsabsenkung verstellten sich die Reglerbürsten gegen die Endlage I (Fig. 5) entsprechend maximaler Erregung. Wird nun die Störung abgetrennt, so benötigt der Regler zirka 0,2 s, um in die Endlage II für negative Erregung zu gelangen. Hat die Spannungserhöhung zirka 20% erreicht, so ziehen diese Schnellschütze, unabhängig von der Reglerbewegung, in 0,02 + 0,03 s an, wodurch der negative Impuls mit der vollen Wirkung der Potentiometerspannung des Reglers auftritt. Streng genommen ist der negative Stromanstieg in der Erregerwicklung des Haupterregers ausschliesslich gegeben durch die Beziehung

$$-\frac{di}{dt} = \frac{U_{HE}}{L};$$

die Stellung des Reglers bestimmt nur den Endwert dieses Stromes (siehe Fig. 6). Dies gilt für den

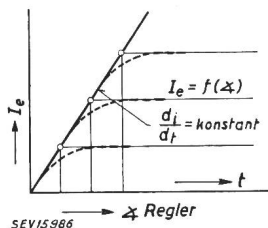


Fig. 6  
Verlauf des negativen Erregerstromes des Haupterregers bei Wirkung der Stösserregung *I<sub>e</sub>* Haupterregung

Fall, wo das Potentiometer geöffnet ist und dessen Widerstände nur als Vorwiderstände wirken. Bei geschlossenem Potentiometer ändert der Stromanstieg mit der Reglerstellung.

Aus dem Diagramm Fig. 7 geht die Arbeitsweise des Reglers hervor. Man erkennt daraus die vom Regler in Abhängigkeit einer plötzlich auftretenden

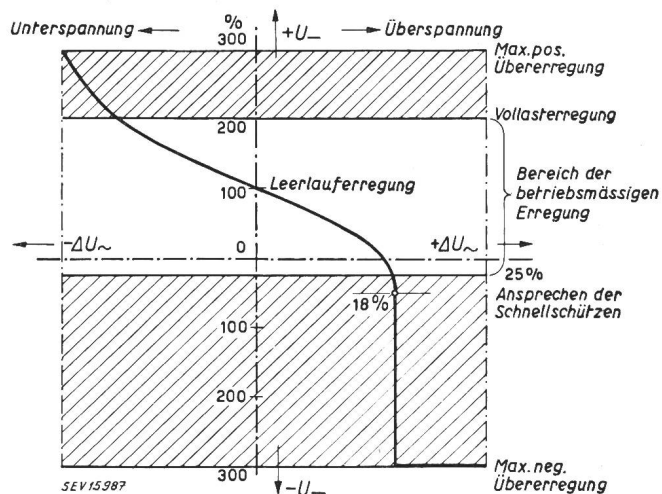


Fig. 7

Diagramm der positiven und negativen Übererregung des Haupterregers in Abhängigkeit von der Spannungsabweichung. Schraffierte Gebiete werden nur während Übergangszuständen benutzt

den Abweichung der Statorspannung von  $\pm \Delta U$ , erzeugte Über-Erregung  $\Delta U$ .

Dank der verständnisvollen Unterstützung durch die Motor-Columbus A.-G. in Baden, die Atel, die BKW und die AJAG konnte die neue Schaltung nach gründlicher Vorbereitung auf der 150-kV-Gotthardleitung praktisch ausprobiert werden. Wir begnügen uns hier mit der Wiedergabe der hauptsächlichsten Resultate. Für die Versuche standen folgende Hochspannungs-Leitungsstücke von 150 kV zur Zusammenschaltung zur Verfügung (Fig. 8):

Lavorgo—Gösgen	175 km
Airolo—Mörel	55 km
Rathausen—Bikigen	60 km
Total	290 km

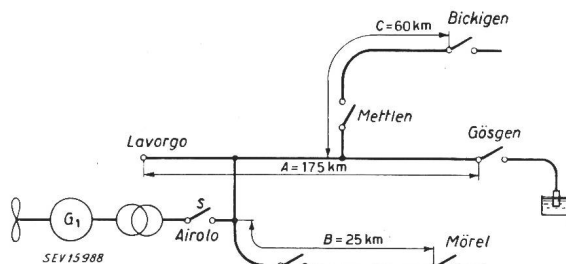


Fig. 8

Netz der angeschlossenen Hochspannungsleitungen bei den Selbsterregungsversuchen mit einem Generator des Kraftwerkes Lucendro

Umgerechnet auf die Generatorspannung von 11 kV wurde die kapazitive Leitungsreaktanz ermittelt zu  $X_C = 11,2 \Omega$  für das Leitungsstück Lavorgo-Gösgen allein. Mit Erdschluss eines Pols verringert sich diese auf

$$X_{CE} = 6,2 \Omega$$

Im Interesse eines geringeren Risikos für die Versuche wurde auf den Erdschluss verzichtet und dafür das erwähnte, ausgedehntere Hochspannungsnetz von 290 km Länge verwendet. Mit dieser Leitungslänge errechnete sich ein dauerndes Einsetzen der negativen Erregung bei Frequenzwerten von 50 Hz an.

Für die Unterspannungsetzung dieses Hochspannungsnetzes wurden, ausgehend von 42 Hz, die Frequenz und Generatorspannung gesteigert. Die interessierenden Daten und gemachten Beobachtungen sind in Tabelle I mit Fig. 8 wiedergegeben. Es geht daraus hervor, dass die kapazitive Belastung schliesslich durch Steigerung der Betriebsspannung bis auf zirka 33 000 kVA gesteigert werden konnte.

Die vorhandene Tendenz zur Selbsterregung oder, was gleichbedeutend ist, die Labilität des elektrischen Systems ohne Regler, wurde durch folgende Versuche nachgewiesen:

Im geschilderten Zustand der Selbsterregung führt der Regler dauernd eine ganz geringfügige Pendelbewegung aus, die aber am Voltmeter des Generators kaum sichtbar ist. Verhindert man den Regler an diesem Spiel durch leichtes Blockieren, so geht die Spannung entweder zurück oder sie steigt an. Es genügte nun, die Blockierung im Sinne

Tabelle I

Generator I				Haupterregger I		Spannung in Gösigen	Spannung in Airola		Leitungsstrecke
f (n)	MW	kV	A	Spannung V	Strom A	kV	kV	kVA	
42	0	7	370	25	105	100	100	5 500 11 000 4 200	A A + B
50	0	7	460	12	45				
50	0	10,1	640	18	75	150	145		
55,5	0	5,25	460	5	10				
52	0	8,45	915	12	- 55	130	130	13 350	A + B + C
54	0	8,6	960	15	- 70	133	130	14 250	A + B + C
54	0	10,1	1130	Kurzezeitiger Versuch. Spannung stabil.				19 800	A + B + C
54	0	12,8	1450	Stossweise mit Abschaltung durch Druckluftschalter 150 kV, S (Airola).			ca. 200	33 000	

einer ganz geringen Herabsetzung des negativen Erregerstromes um einige Prozent vorzunehmen, um einen verhältnismässig raschen Spannungsanstieg zu provozieren, wie die folgenden Figuren zeigen.

Das Diagramm a, in Fig. 9, zeigt auf dem Schnellschreiber den bei dieser Blockierung sich rasch einstellenden Spannungsanstieg bei zirka 4 kV Generatorspannung. Die stabile Ausregulie-

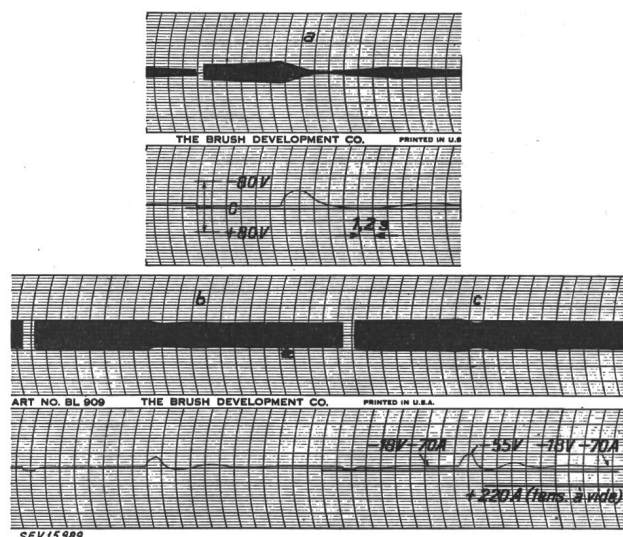


Fig. 9

Wirkung der automatischen Regulierung an einem 30 000-kVA-Generator mit angeschlossener 150-kV-Leitung von 290 km Länge

- a) Generatorspannung bei vorübergehender Blockierung des Spannungsreglers bei ca. 4 kV Generatorspannung
- b und c) Verlauf der Generatorspannung bei künstlich eingeleiteter Spannungsabweichung bei 52,5 Hz und 54 Hz

rung der im gleichen Belastungszustand, aber bei höheren Spannungen, provozierten Spannungsabweichungen durch Auslenkung des Reglers ist in den Diagrammen b und c des Schnellschreibers ersichtlich. Die in der letzten Zeile angegebene Belastung wurde unabsichtlich erreicht und musste mit dem 150-kV-Schalter S in Airola abgetrennt werden. Die reine, kapazitive Belastung betrug dabei zirka 33 000 kVA bei einer Spannung von mindestens 200 kV. Der Druckluftschalter bewältigt diese besondere Beanspruchung einwandfrei.

Bei den Versuchen erwies sich die am Regler neu eingeführte Fernverstellung des Spannungswertes als sehr vorteilhaft. Die Unterspannung-

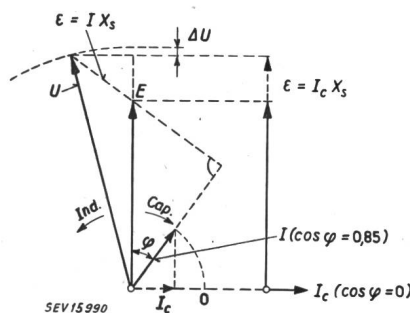


Fig. 10  
Vektor-Diagramm zur Ermittlung des Spannungsanstieges bei Abschaltung einer Wirklast bei  $\cos \varphi = 0,85$  kap. am Ende einer langen Leitung

setzung oder Prüfung einer langen offenen Leitung erfolgt vom Spannungswert Null aus, ausschliesslich durch den Regler, dessen Sollwert durch eine Fernsteuerung von Null zum Maximalwert gesteigert werden kann. Damit ist die grösste Sicherheit gegen unerwünschte Spannungsüberschreitungen gewährleistet. Die am Regler im automatischen Betrieb vorhandene vibrierende Arbeitsweise verleiht

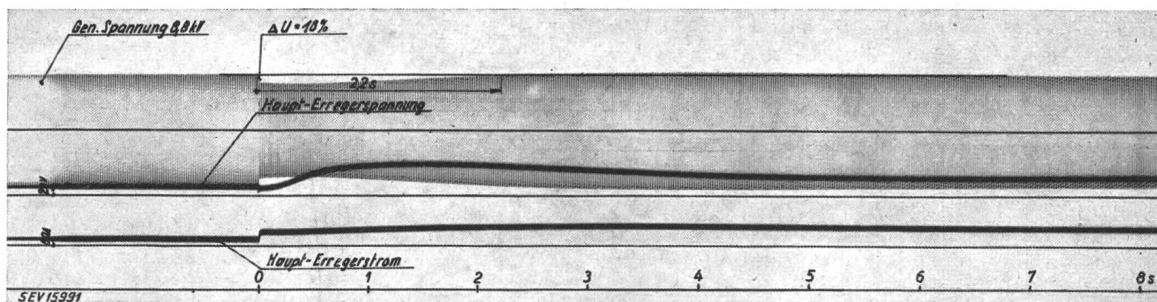


Fig. 11

Oszillogramm der Generatorspannung beim Abschalten einer kap. Belastung von 7500 kVA;  $\cos \varphi = 0$

demselben praktisch stufenlose Erregerstromregulierung, was eine weitere günstige Voraussetzung für die Beherrschung dieser Probleme darstellt.

ins Gewicht fällt. Es ergibt sich aus diesem Verhalten ebenfalls die Schlussfolgerung, dass mit der in neuester Zeit stark propagierten Serie-Erregung

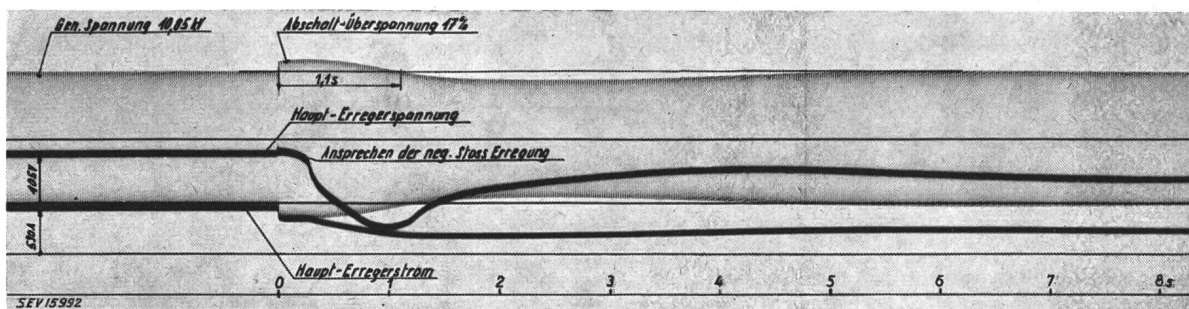


Fig. 11a  
Oszillogramm der Generatorspannung beim Abschalten einer induktiven Belastung von 16 800 kVA;  $\cos \varphi = 0$

Eine Lastabschaltung von zirka 10 MW durch den 150-kV-Schalter am Ende der Leitung in Gösigen stellte erwartungsgemäss keine besonderen Anforderungen an die Regulierung. Wenn die abzuschaltende Leistung wesentlich unter der natürli-

mindestens in bezug auf diese Vorgänge kein Vorteil erreicht wird.

Von besonderem Interesse dürfte das Oszillogramm Fig. 12 sein, wo die 175 km lange Leitung direkt auf den entsprechend Normalspannung er-

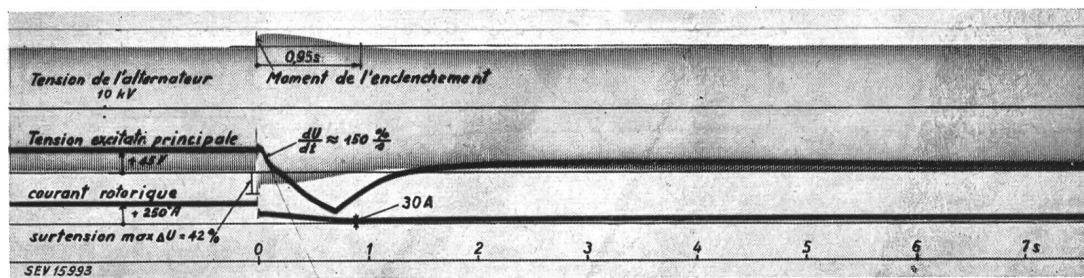


Fig. 12  
Oszillogramm der Generatorspannung beim plötzlichen Zuschalten einer 175 km langen 150-kV-Leitung Generator 30 000 kVA;  $\cos \varphi = 0,8$ ; 500 U./min. Kurzschlussverhältnis 0,75

chen Leistung der Übertragungsleitung liegt, so arbeitet der Generator im untererregten Gebiet. In diesem Fall betrug der  $\cos \varphi$  0,85 kap. und es ist aus dem Diagramm Fig. 10 leicht ersichtlich, dass nur eine geringe Spannungserhöhung eintrat, weil der Strom praktisch konstant blieb und der  $\cos \varphi$  von 0,85 kap. auf Null kap. änderte. Zudem betrug die Frequenzerhöhung nur zirka 4%. Wesentlich anders würde diese Abschaltung bei höherer Last und im Anschluss an einen Kurzschluss je nach Zeitdauer desselben verlaufen, wo dann die max. Spannungserhöhung auftritt. Aus den Oszillogrammen Fig. 11 geht die Wirkungsweise der Spannungsregulierung bei Zu- und Abschaltungen hervor. Man macht dabei die interessante Feststellung, dass die Schnelligkeit des Reglers in allen Fällen gross genug ist, um im Anschluss an die vom Stator induzierte Rotorstromänderung nicht nur eine Rückbildung des Rotorstromes in Richtung des Wertes vor der Störung durchzuführen, sondern diesen dynamisch erzeugten Wert zu halten, bzw. weiter auf-, bzw. abzubauen. Dies kommt daher, weil bei Maschinen von solchen Dimensionen die magnetische Zeitkonstante gegenüber der Regler-Zeitkonstante viel grösser ist, so dass diese praktisch nicht mehr

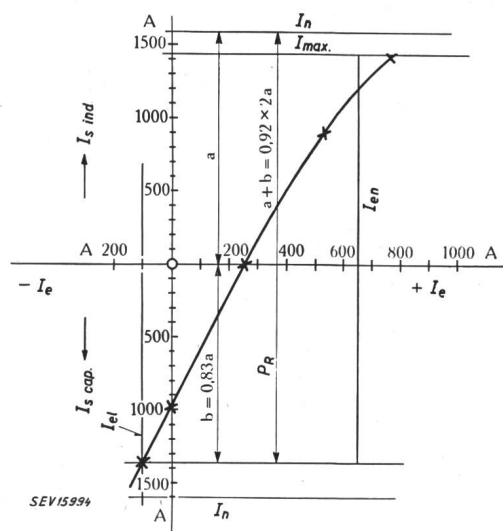


Fig. 13  
Diagramm der Belastbarkeit eines Synchron-Generators 30 000 kVA;  $\cos \varphi = 0,8$  Kurzschlussverhältnis 0,75  
 $I_s$  ind.,  $I_s$  cap. Statorstrom in Abhängigkeit vom Polradstrom bei Nennspannung  
 $I_e$  Erregerstrom  $I_n$  Nennstrom des Generators  
 $I_{e n}$  Nennerregerstrom  $I_{max}$  Maximalstrom bei Betrieb als Kompensator  
 $P_R$  Regulierleistung  $I_e$  Stabilitätsgrenze

regten Generator zugeschaltet wurde. Weil die Ausgangsspannung höher war als bei allen andern Versuchen und andererseits die negative Stosserregung auf einen festen Absolutwert eingestellt war, hat auch die Stosserregung viel rascher angesprochen. Dié bei diesem Vorgang erreichte Abbaugeschwindigkeit der Erregerspannung beträgt 150 %/s. Trotz dieser hohen Reguliergeschwindigkeit erfolgt das Einschwingen in den neuen Erregerszustand dank der stabilen Arbeitsweise des Reglers einwandfrei.

Aus der graphischen Darstellung Fig. 13 geht die Belastbarkeit des Generators hervor. Man ent-

nimmt daraus, dass diese Maschine mit 30 000 kVA Generator-Nennleistung eine totale Regulierleistung von  $30\,000 \cdot 1,92 = 58\,000$  kVA als Synchron-Kompensator abgeben kann, wenn sie mit der beschriebenen Spannungsregulierung ausgerüstet ist.

Abschliessend sei der Motor-Columbus A.-G., Baden, der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität, Olten, den Bernischen Kraftwerken A.-G., Bern und der Aluminium-Industrie-A.-G., Lausanne für die grosszügige Überlassung ihrer Anlagen und für die Mitwirkung bei den Versuchen bestens gedankt.

Adresse des Autors:

R. Keller, Oberingenieur der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden.

## Messgenauigkeit der technischen Teilstrahlungs-pyrometer

Von A. Jagersberger, Steyr (Österreich)

536.521

In der vorliegenden Arbeit werden die Fehlergrenzen der zu technischen Temperaturmessungen geeigneten Teilstrahlungsverfahren eingehend analysiert, wobei gleichzeitig eine Aufteilung des insgesamt auftretenden Fehlers in einen absoluten und einen relativen Messfehler vorgenommen wird. Unter dem absoluten Messfehler wird die Abweichung verstanden, die zwischen der wahren Temperatur des Messobjektes und dem an der Skala des Pyrometers abgelesenen Temperaturwert besteht. Dieser absolute Fehler setzt sich zusammen aus dem Eichfehler des Messgerätes und dem relativen Messfehler, der durch die Genauigkeit des Leucht-dichtenabgleiches und die Genauigkeit des Messinstrumentes bedingt ist, dessen Zeiger sich bei gleich grossen Stromstärken nur innerhalb einer gewissen Toleranz auf ein und denselben Teilstrich einstellt.

Dans cet article, l'auteur analyse les limites d'erreurs des procédés de rayonnement partiel appliqués à la mesure technique des températures. L'erreur totale est elle-même subdivisée en erreur absolue et en erreur relative. La première est l'écart entre la vraie température de l'objet mesuré et la valeur relevée sur l'échelle du pyromètre. Cette erreur absolue comporte l'erreur d'étalonnage de l'appareil de mesure et l'erreur relative qui dépend du degré de précision de la comparaison des brillances et de la précision de l'appareil de mesure, dont l'aiguille ne se place qu'avec une certaine tolérance devant la même division de l'échelle pour indiquer des courants de même intensité.

### 1. Wirkungsweise der Teilstrahlungs-pyrometer

Die Teilstrahlungs-pyrometer beruhen wie alle optischen Temperaturmessgeräte auf der Voraussetzung, dass die Strahlungen der zu messenden Körper dem Planckschen Strahlungsgesetz entsprechen oder auch dessen vereinfachter Form, dem für alle Temperaturmessungen bis etwa 5000 °C ausreichend genauen Wienschen Strahlungsgesetz, das durch Formel (1) ausgedrückt wird.

$$W(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (1)$$

Die Energie  $W$  der Strahlung ist also nur abhängig von der absoluten Temperatur  $T$  und der Wellenlänge  $\lambda$ .

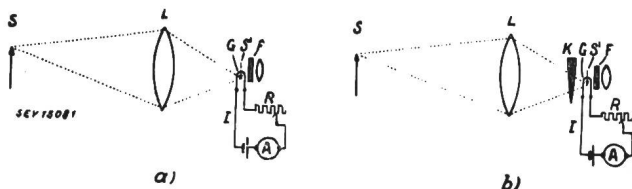


Fig. 1

Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise der Teilstrahlungs-pyrometer

- a) Teilstrahlungs-pyrometer nach dem Strommessverfahren
  - b) Teilstrahlungs-pyrometer nach dem Graukeilverfahren
- S Strahler (Messobjekt), L Linse, K Graukeil, G Glühfaden der Pyrometerlampe, S' Strahlerbild, F Filter, I Strom, R Regulierwiderstand, A Ampèremeter

In Fig. 1 ist die Wirkungsweise der Teilstrahlungs-pyrometer schematisch dargestellt. Man muss bei der Berechnung der Messgenauigkeit grundsätz-

lich zwischen den beiden Methoden a) und b) unterscheiden.

#### a) Das Stromverfahren

Beim Stromverfahren (Fig. 1a) wird die Leuchtdichte einer Vergleichslichtquelle, die hier immer als Glühfaden  $G$  angenommen wird, der Leuchtdichte des Strahlerbildes  $S'$  angeglichen, die mit der Leuchtdichte des Strahlers  $S$  übereinstimmt. Die Angleichung der Leuchtdichten erreicht man durch Verändern des Glühfadenstromes  $I$  mit Hilfe eines Regulierwiderstandes  $R$ . Jeder Stromstärke entspricht eine gewisse Leuchtdichte des Glühfadens und daher eine ganz bestimmte Leuchtdichte des Strahlers. Da die Strahlerleuchtdichte proportional  $W(\lambda, T)$  ist, gehört somit zu jedem Glühfadenstrom  $I$  eindeutig eine Temperatur  $T$  des Strahlers. Die Aufgabe der Eichung ist es, diesen Zusammenhang  $T = f(I)$  zu ermitteln.

#### b) Das Graukeilverfahren

Beim Graukeilverfahren (Fig. 1b) wird die Leuchtdichte des Strahlers  $S$ , bzw. dessen Bildes  $S'$ , der konstant bleibenden Leuchtdichte des Glühfadens angeglichen. Die Angleichung erfolgt durch Schwächung der Strahlung mit einem Graukeil  $K$ , an dessen Stelle auch gelegentlich andere Lichtschwächungsmittel verwendet werden. Der Glühfadenstrom  $I$  wird auf einen konstanten, durch die Eichung gegebenen Wert eingestellt, wonach jeder Lichtschwächung  $X$  nach Angleichung der Leuchtdichten eindeutig eine Temperatur  $T$  des Strahlers