

BROWN BOVERI MITTEILUNGEN

HERAUSGEGEBEN VON DER A.-G. BROWN, BOVERI & C^{IE} IN BADEN

XXIV. JAHRG.

APRIL 1937

Nr. 4

Die Brown Boveri Mitteilungen erscheinen in monatlichen Heften. Der Nachdruck von Aufsätzen und die Wiedergabe von Abbildungen sind unter Quellenangabe gestattet. Jahresabonnement für die Schweiz Fr. 10.—; Einzelheft für die Schweiz Fr. 1.—, ausschliesslich Verpackung und Portospesen.

STABILITÄT VON DREHSTROMNETZEN MIT AUFLÄRUNGSVERSUCHEN AN KLEINERN UND MITTLERN MASCHINEN.

Dezimalindex 621. 316. 13.016. 35.

I. EINLEITUNG.

Abb. 1 gibt ein typisches Beispiel einer Stabilitätsstörung; sie zeigt die Vorgänge bei einem dreipoligen Kurzschluss in einem Netz. Ein Turbogenerator von 2300 kVA arbeitet parallel mit einem ausgedehnten Netz, das schematisch durch einen grossen Generator dargestellt wird. Auch die angeschlossenen

abgeschaltet ist, wird der Generator rechts vom übrigen Netz wieder in Tritt gezogen. Der Polradwinkel erreicht nach einigen Schwingungen wieder einen stationären Wert; die Spannung baut sich auf ihren früheren Wert auf.

Nicht jede Stabilitätsstörung läuft so glücklich ab, dass sich die Generatoren am Schluss wieder fangen und weiterlaufen, ohne dass das Bedienungspersonal eingreifen muss. Es wäre sehr wertvoll, wenn man bei gegebenen Netzverhältnissen vorausberechnen könnte, wie eine Stabilitätsstörung verläuft. Brown Boveri hat in den letzten Jahren ausgedehnte Versuche durchgeführt, um sich die nötigen Unterlagen für die Stabilitätsberechnungen zu verschaffen. Über diese Versuche wird hier berichtet. Um das Verständnis der Versuchsergebnisse zu erleichtern, werden vorerst noch die wichtigsten Ergebnisse aus der Theorie der Netzstabilität zusammengestellt ¹⁾.

II. STATISCHE STABILITÄT.

Am einfachsten ist das Stabilitätsproblem für Maschinen mit Volltrommelrotoren, sogenannte Turbomaschinen, bei

Verbraucher V des Netzes sind nur schematisch angedeutet. Nun wird auf einer Stichleitung plötzlich ein dreipoliger Kurzschluss eingeleitet. Die Klemmenspannung des Generators rechts wird dadurch stark abgesenkt; er kann nicht mehr soviel Wirkleistung abgeben wie vorher, während die Leistung der Turbine zunächst unverändert bleibt. Daher beschleunigt sich der Rotor und fällt ausser Tritt. Der Polradwinkel ϑ , d. i. die Phasenverschiebung zwischen dem Rotor des Generators rechts und der Klemmenspannung U, wächst nach einer kleinen anfänglichen Abnahme rasch an. Er beträgt nach einer halben Sekunde bereits 80° und nach etwas mehr als einer Sekunde 360° . Der Generator rechts und das übrige Netz laufen asynchron durcheinander, wie der Verlauf des Polradwinkels zeigt. Dabei unterliegen Ströme und Leistungen heftigen Schwankungen. Die Störung findet im gezeigten Beispiel ein gutes Ende, denn nachdem der Kurzschluss

schwacher Sättigung. Im stationären Zustand gilt das Vektordiagramm gemäss Abb. 2. Der Vektor E ist die Leerlaufspannung, d. i. diejenige Klemmenspannung, die der einge-

¹⁾ Über die einfachste statische und dynamische Stabilitätstheorie, wie sie in den beiden nächsten Abschnitten beschrieben wird, bestehen verschiedene Veröffentlichungen. Vgl. z. B. Ollendorff und Peters: Schwingungsstabilität parallel arbeitender Synchronmaschinen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz., V. Bd., 1. H., S. 7.

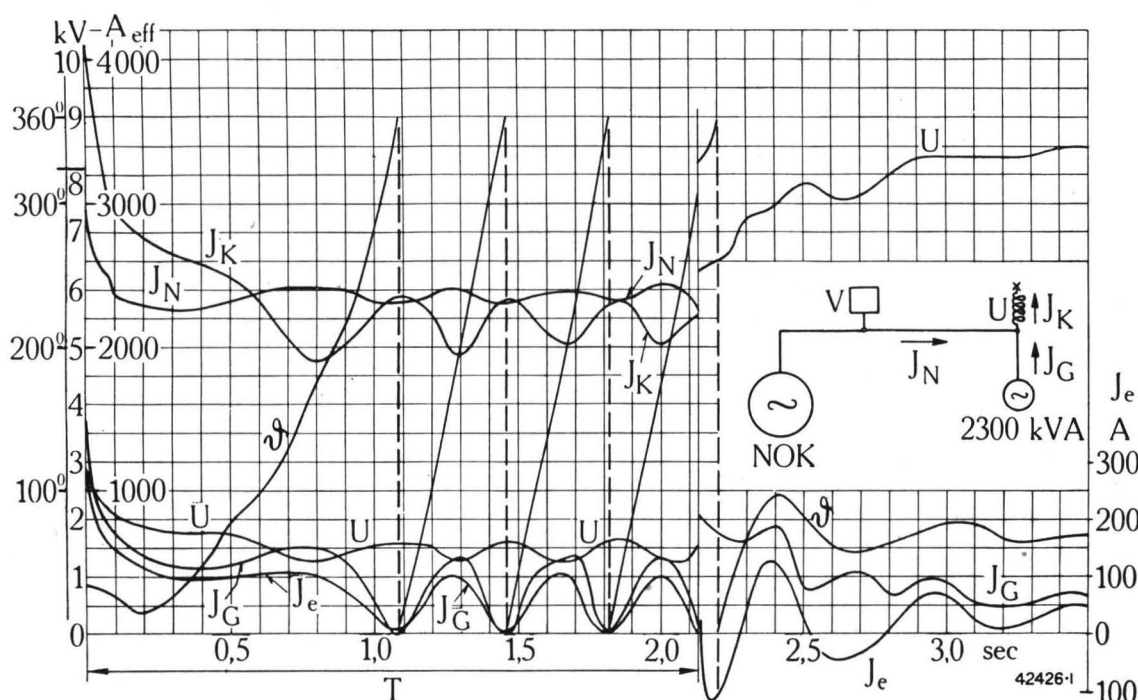


Abb. 1. — Dreipoliger Kurzschluss in einem Netz.

J_e = Erregerstrom des Generators rechts.
T = Kurzschlussdauer.

ϑ = Polradwinkel des Generators rechts.
U, J_N , J_G , J_K , nach Schema.

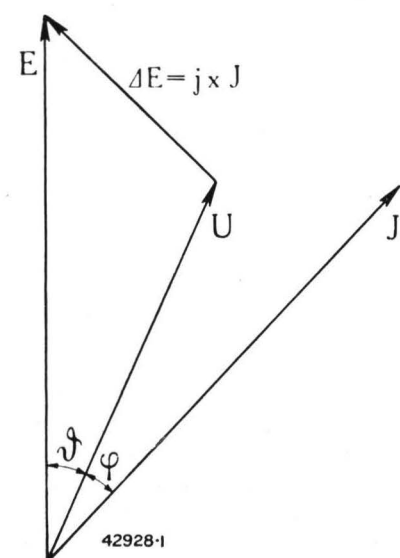


Abb. 2. — Vektordiagramm für eine Volltrommelmaschine bei Vernachlässigung der Sättigung und des Statorwiderstandes.

E = Leerlaufspannung.
J = Belastungsstrom.
U = Klemmenspannung.
 ϑ = Polradwinkel.

stellte Erregerstrom bei leerlaufender Maschine erzeugen würde. U ist die wirkliche Klemmenspannung beim Belastungsstrom J . Der innere Spannungsabfall der Maschine ΔE eilt dem Strom J um 90° vor und ist gleich dem Produkt aus dem Strom und der synchronen Reaktanz x . Der Ohmsche Spannungsabfall in der Maschine ist viel kleiner als der induktive und wurde in Abb. 2 der Einfachheit halber gar nicht eingezeichnet.

Man sieht, dass bei gegebener Leerlaufspannung E , gegebener Klemmenspannung U und gegebener Phasenverschiebung zwischen beiden (ϑ) der innere Spannungsabfall ΔE nach Grösse und Phase bestimmt ist. Damit ist auch der Statorstrom J vollständig bestimmt und weiter die Wirkleistung P . Ohne auf die Ableitung einzugehen, sei nur das Ergebnis angeführt:

$$P = \frac{UE}{x} \sin \vartheta \quad (1)$$

Wenn man bei konstantem Erregerstrom und konstanter Klemmenspannung den Polradwinkel verändert, so ändert sich die Wirkleistung nach einer Sinusfunktion. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 3 graphisch dargestellt (Kurve 1). Bei der Wirkleistung Null, also im Leerlauf, ist der Polradwinkel Null. Wird dann die Wirkleistung vergrößert, so vergrößert sich auch der Polradwinkel. Es kann aber keine grössere Leistung als P_m vorkommen. Wird die Belastung grösser, so fällt die Maschine ausser Tritt. $\vartheta = 90^\circ$ ist die *statische Stabilitätsgrenze*.

Die grösstmögliche Leistung, die *statische Grenzleistung*, beträgt

$$P_m = \frac{UE}{x} \quad (2)$$

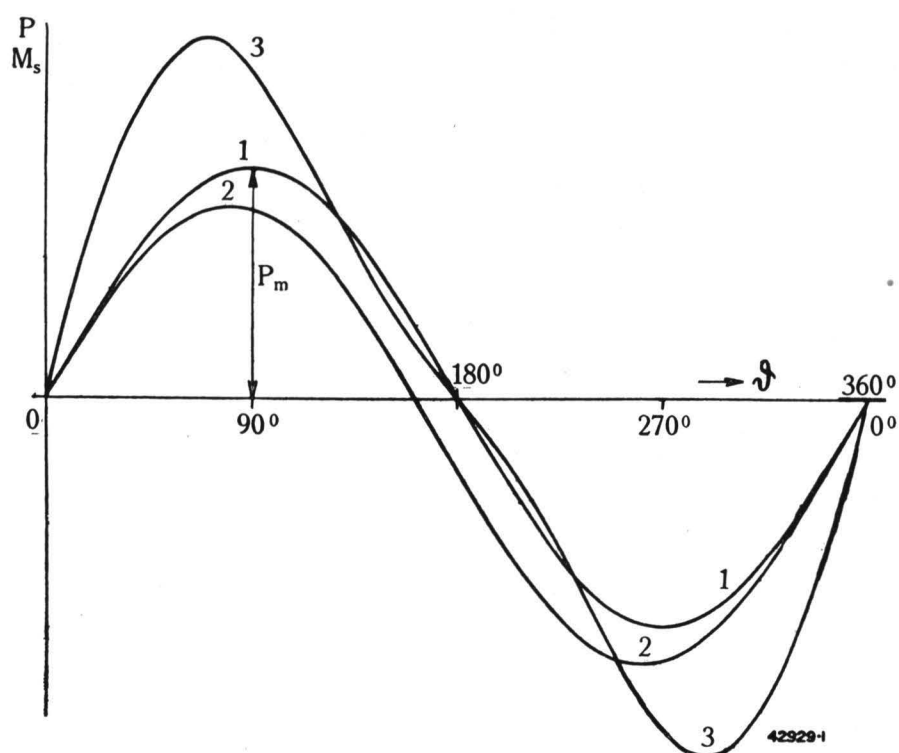


Abb. 3. — Wirkleistung einer ungesättigten Synchronmaschine in Funktion des Polradwinkels.

- Kurve 1 = Volltrommelmaschine ohne Statorwiderstand.
 - Kurve 2 = Volltrommelmaschine mit Statorwiderstand.
 - Kurve 3 = Maschine mit ausgeprägten Polen ohne Statorwiderstand.
- Bei passendem Ordinatenmaßstab gelten die Kurven auch für das Drehmoment.

Sie ist um so grösser, je grösser die Klemmenspannung, je grösser der Erregerstrom ($E \propto J_e$) und je kleiner die synchrone Reaktanz ist.

Die Kurve 1 in Abb. 3 gilt für eine konstant erregte Synchronmaschine an einem starken Netz ($U = \text{konst.}$). Ist der Maschine ein Transformator oder eine längere Leitung vorgeschaltet, sodass die Spannung an den Maschinenklemmen nicht konstant bleibt, dafür aber auf der andern Seite des Transformators oder der Leitung, so ist in Gleichung (1) für U jene konstante Spannung und für x die Summe aus der synchronen Maschinenreaktanz und der Kurzschlussreaktanz des Transformators bzw. der Leitungsreaktanz einzusetzen, d.h. immer die totale Reaktanz, die zwischen der konstanten innern Spannung E und der konstanten äussern Spannung U liegt. Handelt es sich um zwei Synchronmaschinen gleicher Grössenordnung, die über Transformatoren, Leitungen usw. miteinander verbunden sind, so kann man statt U und E die Leerlaufspannungen der beiden Maschinen und für x die totale innere und äussere Reaktanz des Übertragungssystems einsetzen; ϑ bedeutet dann die Phasenverschiebung zwischen den Polrädern der beiden Maschinen. Bei den Versuchen wurde hauptsächlich der Fall einer Maschine an einem sehr starken Netz untersucht, weil die andern Fälle darauf zurückgeführt werden können.

Wie eingangs erwähnt, gilt das Vektordiagramm nach Abb. 2 und die Kurve 1 (Abb. 3) für Turbomaschinen bei geringer Sättigung, unter Vernachlässigung des Statorwiderstandes. Berücksichtigt man den Statorwiderstand, so erhält man die Kurve 2 in Abb. 3. Sie ist ebenfalls eine Sinuskurve; ihre Achsen sind aber verschoben. Für Maschinen mit ausgeprägten Polen erhält man keine sinusförmige Kurve mehr (Kurve 3 in Abb. 3). Bei Berücksichtigung der Eisensättigung wird die Kurve noch komplizierter. Alle diese Kurven haben insofern den gleichen Charakter, als bei $\vartheta = 0$ immer auch die Wirkleistung Null ist, irgendwo zwischen $\vartheta = 0$ und 180° die höchste Leistung erreicht wird, in der Nähe von 180° die Leistung wieder Null wird und von hier bis 360° negative Werte annimmt.

Bei tatsächlichen Übertragungssystemen geht man nie bis in die Nähe der statischen Stabilitätsgrenze und zwar hauptsächlich aus zwei Gründen. Einerseits würden nämlich meistens die Übertragungsverluste im Verhältnis zur übertragenen Leistung viel zu gross¹⁾, andererseits muss eine beträchtliche statische Stabilitätsreserve vorhanden sein, damit das Übertragungssystem auch *dynamisch* stabil ist.

¹⁾ F. Grieb: Betrachtung einiger durch den Zusammenschluss elektrischer Netze bedingter Probleme. Bull. SEV 1930, S. 485.

III. DYNAMISCHE STABILITÄT AUF GRUND DER STATISCHEN LEISTUNGSKURVEN.

Bei plötzlichen oder raschen Zustandsänderungen ist die Gefahr des Aussertrittfallens grösser als bei stationären Zuständen oder sehr langsamen Zustandsänderungen. Als Beispiel sei zunächst ein Synchronmotor untersucht, dessen mechanische Belastung plötzlich erhöht wird. Die Kurven von Abb. 3 stellen die Wirkleistung der Synchronmaschine dar. Da aber das Drehmoment der Wirkleistung proportional ist, so gelten die gleichen Kurven bei entsprechender Maßstabänderung auch für das Drehmoment M_s , das sogenannte synchrone Moment. In Abb. 4 ist die Drehmomentkurve für den Synchronmotor nochmals aufgezeichnet. Das Lastmoment der vom Motor angetriebenen Maschine hat anfänglich den Wert M_0 . Der Polradwinkel hat sich so eingestellt, dass das Antriebsmoment des Syn-

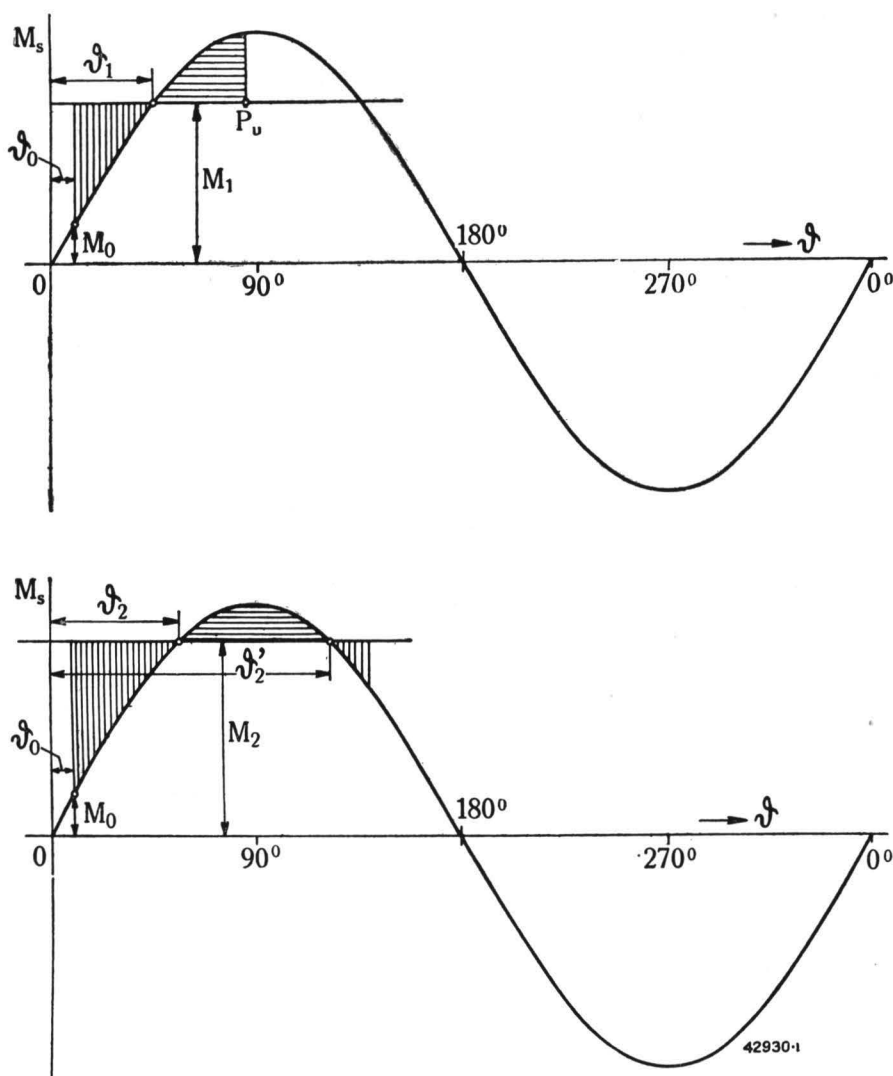


Abb. 4. — Plötzliche Laststeigerung bei einem Synchronmotor.
Oben = Motor bleibt im Tritt. Unten = Motor fällt ausser Tritt.

chronmotors M_s gleich gross ist wie das Lastmoment M_0 . Nun wird (oberer Teil von Abb. 4) das Lastmoment plötzlich auf den Wert M_1 erhöht. Die neue Gleichgewichtslage liegt beim Polradwinkel ϑ_1 . Wegen der Massenträgheit des Polrades wird aber diese neue Gleichgewichtslage nicht sofort erreicht. Im ersten Augenblick nach der Laststeigerung hat der Polradwinkel noch den ursprünglichen Wert ϑ_0 , das Antriebsmoment also den Wert M_0 . Da das Lastmoment überwiegt, wird das Polrad gebremst; der nacheilende Polradwinkel vergrößert sich. Wenn der Wert ϑ_1 erreicht wird, ist am Rotor eine Bremsarbeit geleistet worden, die durch

die senkrecht schraffierte Fläche dargestellt wird (jeweiliges resultierendes Moment, integriert über den zurückgelegten Winkel). Da die Winkelgeschwindigkeit jetzt untersynchron ist, vergrößert sich der nacheilende Polradwinkel noch mehr, d. h. das Polrad schießt über seine neue Gleichgewichtslage hinaus. Jetzt überwiegt das Antriebsmoment, das Polrad wird wieder beschleunigt. Es erreicht wieder die synchrone Winkelgeschwindigkeit, wenn die beschleunigende Arbeit, die durch die waagrecht schraffierte Fläche dargestellt wird, gleich gross ist wie die vorher geleistete Bremsarbeit. Aus der Gleichheit der beiden schraffierten Flächen bestimmt sich der Umkehrpunkt P_u . Das Polrad schwingt nun um die neue Gleichgewichtslage, wobei die Schwingungen wegen der Dämpfung allmählich abklingen.

Im untern Teil der Abb. 4 wird das Lastmoment ausgehend vom gleichen Wert M_0 plötzlich auf einen Wert M_2 erhöht, der grösser ist als M_1 . Die Bremsarbeit wird jetzt grösser; Beschleunigungsarbeit kann nur bis zum Winkel ϑ'_2 geleistet werden. Da sie kleiner ist als die vorher geleistete Bremsarbeit, ist die Winkelgeschwindigkeit bei ϑ'_2 immer noch untersynchron, der Nacheilwinkel wird weiter vergrößert. Nun überwiegt wieder das Lastmoment; der Rotor wird weiter abgebremst: die Maschine fällt ausser Tritt. Die statische Stabilitätsgrenze ist in diesem Fall nicht überschritten, trotzdem fällt der Motor bei der plötzlichen Laststeigerung ausser Tritt. Die Grenze der dynamischen Stabilität liegt dort, wo die gesamte Fläche über der Horizontalen durch den neuen Gleichgewichtspunkt gerade so gross ist, wie die Fläche zwischen ursprünglichem und neuem Gleichgewichtspunkt.

Eine andere wichtige Zustandsänderung ist die plötzliche Vergrößerung der Übertragungsimpedanz.

Dieser Fall liegt vor, wenn von zwei (oder mehr) parallelen Leitungen plötzlich eine abgeschaltet wird (Abb. 5). Nach Gleichung (1) ergibt sich bei grösserer Übertragungsreaktanz x eine niedrigere Kurve für

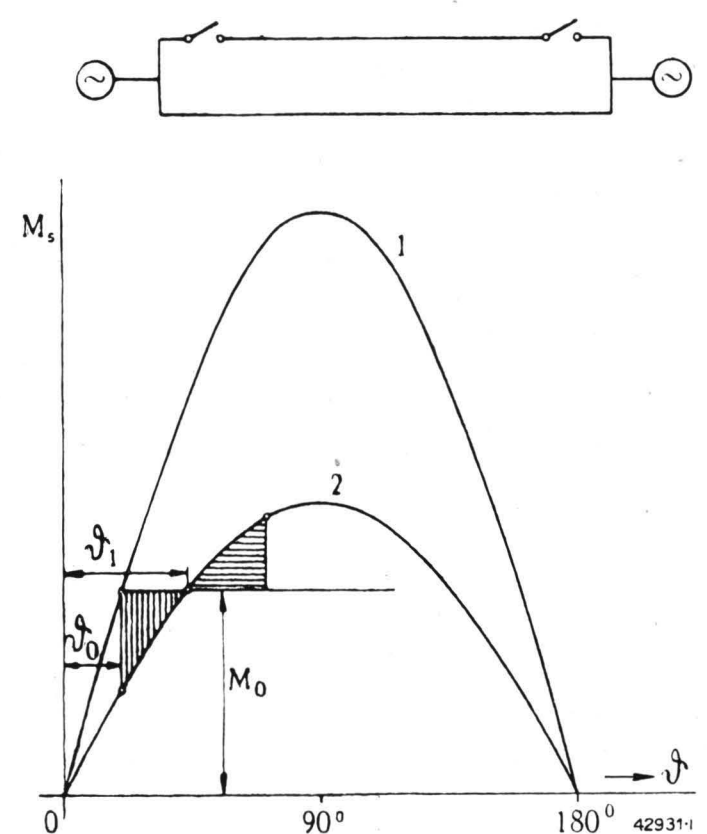


Abb. 5. — Abschaltung einer Verbindungsleitung.
Kurve 1 = Drehmomentkurve vor der Abschaltung.
Kurve 2 = Drehmomentkurve nach der Abschaltung.

die Wirkleistung; ebenso für das Drehmoment. Während vor der Abschaltung beim Lastmoment M_0 der Polradwinkel ϑ_0 war, entsprechend der obern Kurve von Abb. 5, so muss er nach der Abschaltung bei unverändertem Lastmoment grösser werden (ϑ_1), weil jetzt die untere Kurve gilt. Es erfolgt eine Schwingung um die neue Gleichgewichtslage. Die Grösse des Überschwingens bestimmt sich wieder aus der Gleichheit der schraffierten Flächen. Das Kriterium für Aussertrittfallen ist das gleiche wie im Fall der plötzlichen Laststeigerung.

Die gefährlichste Zustandsänderung ist ein Kurzschluss irgendwo im Netz zwischen den beiden Maschinen (Abb. 6). Von den Maschinenklemmen aus

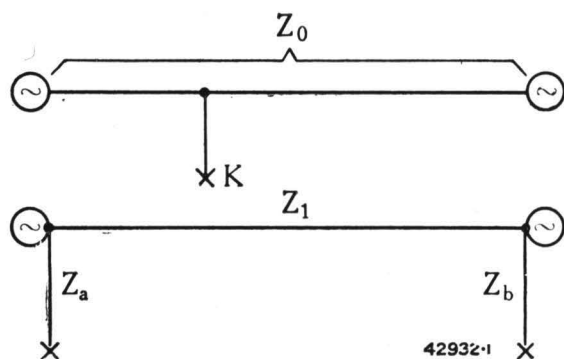


Abb. 6. — Kurzschluss im Abzweig einer Übertragungsleitung und Ersatz durch das sogenannte II-Glied.

K = Kurzschlußstelle.

gesehen, ist die Übertragungsleitung mit dem Kurzschluss im Abzweig gleichwertig mit dem sogenannten II-Glied in Abb. 6 unten. Die Übertragungsimpedanz Z_1 ist hier grösser als die

wirkliche Impedanz Z_0 der Leitung ohne Kurzschluss. Ausserdem erscheinen noch die Belastungsimpedanzen Z_a und Z_b an den Maschinenklemmen. Die mathematische Ableitung für das II-Glied soll hier nicht gebracht werden. Seine qualitative Richtigkeit sieht man aber leicht ein. Bei einem dreipoligen, metallischen Kurzschluss auf der Verbindungsleitung kann ja bekanntlich überhaupt keine Leistung vom Anfang zum Ende der Leitung übertragen werden. Bei einem Kurzschluss in einem Abzweig wird die übertragbare Leistung kleiner als beim gesunden Netz. Das ist aber gleichwertig mit einer Vergrösserung der Übertragungsimpedanz. Ferner fliesst Leistung von den Maschinen an den beiden Leitungsenden zur Kurzschlußstelle, was sich auswirkt wie das Einschalten einer Belastungsimpedanz an den Klemmen jeder Maschine (Z_a , Z_b). Der Kurzschluss wirkt also so, wie wenn die Übertragungsimpedanz plötzlich vergrössert und gleichzeitig die Belastung der beiden Maschinen verändert würde. Da die Impedanzen Z_a und Z_b nicht nur Wirkleistung aufnehmen, sondern meistens noch viel grössere Blindleistung, so wird die EMK der Maschinen geschwächt, was die Stabilität sehr ungünstig beeinflusst.

Eine besondere Gruppe von Störungen, die die dynamische Stabilität in Frage stellen können, sind Polradschwingungen, die durch die Antriebmaschine verursacht werden. Auf Schwingungen, die durch unrichtig eingestellte Primärregler verursacht werden, sei hier nicht eingegangen. Das ist eine Angelegenheit

des Turbinenbauers, die den Elektriker nur indirekt berührt. Dagegen erzeugen Kolbenmaschinen (z. B. Dieselmotoren oder Kolbenkompressoren) pulsierende Drehmomente, die Polradschwingungen verursachen. Hier muss dafür gesorgt werden, dass die Schwingungen möglichst klein bleiben; insbesondere darf die Pulsationsfrequenz des Drehmomentes der Kolbenmaschine nicht mit der Eigenfrequenz der gekuppelten Synchronmaschine in Resonanz kommen. Ohne auf die Berechnung der Eigenfrequenz näher einzutreten, soll nur darauf hingewiesen werden, dass der Rotor der Synchronmaschine ein schwingungsfähiges System ist, da er Masse und Richtkraft aufweist. Die Rolle der Richtkraft übernimmt das synchrone Moment, das den Rotor immer wieder in Richtung gegen die Gleichgewichtslage zurückzieht, wenn er daraus entfernt wurde.

Bei Rotorschwingungen treten periodische Abweichungen von der synchronen Winkelgeschwindigkeit auf. Dadurch wird ein asynchrones Drehmoment erzeugt. Bei kleinem Schlupf ist dieses angenähert proportional dem Schlupf und (sofern der Ohmsche Widerstand der Statorwicklung und der Leitungen nicht zu gross ist) immer so gerichtet, dass es bestrebt ist, den Schlupf zu verkleinern. Es übernimmt daher bei der Schwingung die Rolle der Dämpfung.

Auch bei den früher behandelten plötzlichen Zustandsänderungen (z. B. Abb. 4), bei denen die Überschwungung durch Vergleich der schraffierten Flächen unter und über der M_s -Kurve bestimmt wurde, spielt das asynchrone Moment eine gewisse Rolle. Wie an anderer Stelle¹⁾ gezeigt wurde, darf man aber während Ausgleichvorgängen nicht mit dem stationären, asynchronen Moment rechnen. Es wird deshalb nicht weiter auf die Frage eingetreten und auf die folgenden Abschnitte verwiesen.

IV. MÄNGEL DER EINFACHSTEN DYNAMISCHEN THEORIE.

Bis dahin scheint die Theorie recht einfach und durchsichtig. In unzähligen Veröffentlichungen sind alle möglichen Schlussfolgerungen daraus abgeleitet und viele Spezialprobleme behandelt worden. Alle diese Arbeiten haben aber nur sehr beschränkten Wert, weil die Theorie, auf der sie aufbauen, einen grundlegenden Fehler hat. Sie rechnet nämlich bei den dynamischen Stabilitätsuntersuchungen mit der M_s -Kurve, die für stationäre Zustände abgeleitet wurde. Diese Kurve ist richtig, solange der Erregerstrom der Synchronmaschine konstant bleibt. Nun weiss man aber, dass bei allen raschen Änderungen des Statorstromes

¹⁾ W. Wanger: Beitrag zur Berechnung der dynamischen Stabilität von Synchronmaschinen. Bull. SEV 1937, Nr. 3, S. 41.

durch die induktive Kopplung der Erregerstrom beeinflusst wird. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob jene Änderungen durch Kurzschlüsse, durch Schaltungen im Netz oder durch rasche Änderung des Polradwinkels verursacht werden.

Bei sehr raschen Änderungen bleibt die Flussverkettung der Erregerwicklung (also angenähert das Feld und die induzierte EMK) einigermaßen konstant. In diesem Fall muss man lediglich in Gleichung (1) statt der Leerlaufspannung E die EMK E' einsetzen und statt der synchronen Reaktanz x die Streureaktanz x' , d. i. diejenige Reaktanz, die zwischen U und E' liegt. Man findet denn auch bereits in der Literatur derartige Hinweise. Tatsächlich verdreht sich aber das Polrad nie so ausserordentlich rasch, dass die induzierte EMK wirklich konstant bleibt. Wenn aber keine innere Spannung der Maschine konstant ist, so lässt sich die Methode der Flächenvergleiche nicht mehr anwenden, denn während sich der Rotor von ϑ_0 aus nach rechts bewegt (vgl. z. B. Abb. 4), ändert sich die M_s -Kurve dauernd. Und wie sollte man eine Fläche berechnen, wenn sich die Begrenzungskurve dauernd ändert und man im voraus nicht einmal weiss, wie sie sich ändert?

Die Amerikaner haben eine Schritt-für-Schritt-Methode entwickelt, um diesem Problem beizukommen.¹⁾ Für ein kleines Zeitintervall (z. B. 0,05 s) am Anfang der Bewegung berechnet man die Bewegung und die elektromagnetischen Ausgleichvorgänge. Nachdem man den Polradwinkel, die Winkelgeschwindigkeit und alle Spannungen und Ströme für das Ende des ersten Intervalls bestimmt hat, führt man die gleiche Rechnung für das zweite Zeitintervall durch. Es ist klar, dass diese Methode äusserst langwierige Rechnungen erfordert. Dabei muss man trotzdem noch allerlei vereinfachende Annahmen, die nur schlecht stimmen, in Kauf nehmen. Aus diesen Gründen sowie wegen der sukzessiven Aneinanderreihung von ganz kleinen Werten, liefert diese Methode verhältnismässig ungenaue Ergebnisse, trotz der grossen Arbeit, die sie erfordert.

Um die langwierige Arbeit der Schritt-für-Schritt-Methode zu vermeiden, wurde im Massachusetts Institute of Technology ein Integrator entwickelt, d. i. eine sehr komplizierte Rechenmaschine zur Lösung von Differentialgleichungen. Die mit diesem Integrator durchgeführten Untersuchungen²⁾ haben wertvolle Beiträge

¹⁾ S. z. B. Longley: The Calculation of Alternator Swing Curves. The Step-by-Step Method. Trans. AIEE, Juli 1930, p. 1129.

²⁾ Vgl. z. B. Edgerton, Germeshausen, Brown und Hamilton: Synchronous-Motor Pulling-Into-Step Phenomena. Trans. AIEE, Juni 1933, S. 342.

Shoults, Lauder und Crary: Pull-in Characteristics of Synchronous Motors. El. Eng. 1935, S. 1385.

zum Problem der Synchronmaschine bei Ausgleichvorgängen geliefert. Aber einerseits steht in Europa zur Untersuchung irgendeines konkreten Falles keine derartige Rechenmaschine zur Verfügung, andererseits kann auch der Integrator experimentelle Untersuchungen nicht überflüssig machen, denn er liefert grundsätzlich keine genaueren Ergebnisse als die Schritt-für-Schritt-Methode.

V. EINFÜHRUNG DER „PENDELUNGS“-REAKTANZ.

Nur der Versuch kann die elektrischen und magnetischen Ausgleichvorgänge der Synchronmaschine in ihrer ganzen Kompliziertheit richtig erfassen. Eine Theorie braucht man aber trotzdem, damit man die Ergebnisse, die man bei einem Versuch gefunden hat, auf andere Fälle übertragen kann. Diese Theorie soll so einfach sein, dass man sie tatsächlich praktisch verwenden kann (was bei den Schritt-für-Schritt-Methoden ganz ausgeschlossen ist). Wenn auch die verwendete Methode nicht ganz exakt ist, so erzielt man damit trotzdem noch leicht ebensogute Ergebnisse wie mit einer sogenannten genauen Methode, denn die „genaue“ Methode muss ja doch eine ganze Anzahl vereinfachende Annahmen machen, während die Näherungsmethode gerade das, was nicht gut rechnerisch erfasst werden kann, dem Versuch entnimmt.

Zur Ableitung einer solchen Näherungsmethode sei das Vektordiagramm in Abb. 7 betrachtet. Der dick ausgezogene Teil mit der Klemmenspannung U , der Leerlaufspannung E und dem Strom J gilt für die

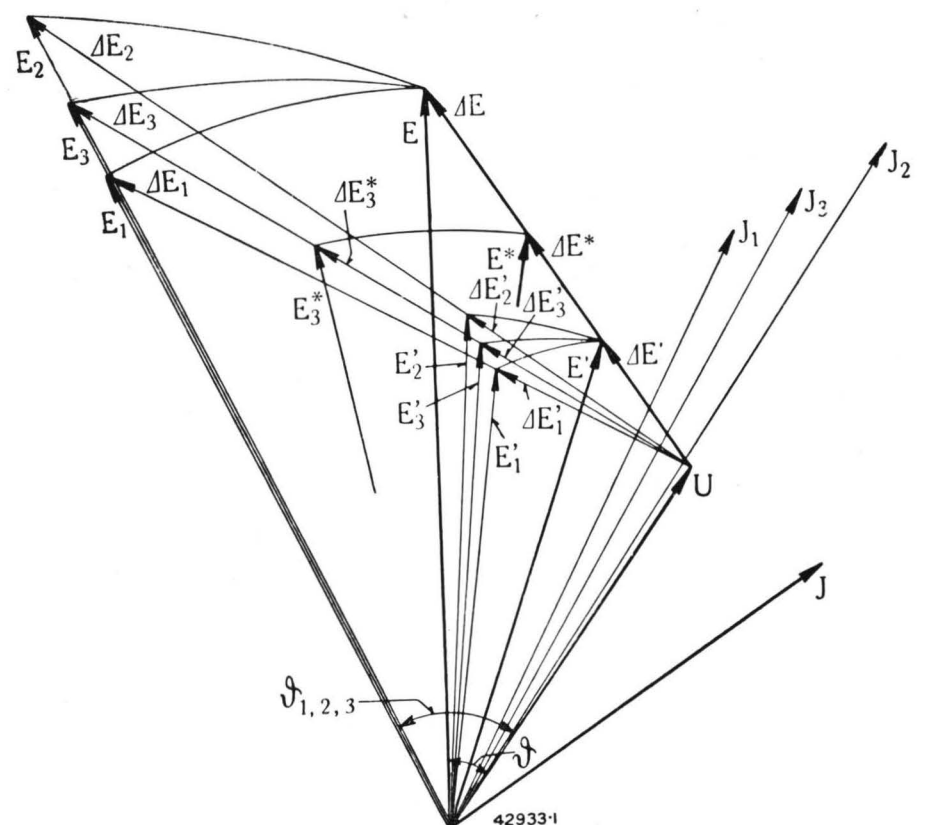


Abb. 7. — Vektordiagramm einer Volltrommelmaschine.

Ohne Index = Ausgangslage.

Index 1 = Endlage nach sehr langsamer Verdrehung.

Index 2 = Endlage nach sehr rascher Verdrehung.

Index 3 = Endlage nach mittelschneller Verdrehung.

$\Delta E = jxJ$; $\Delta E' = jx'J$; $\Delta E^* = jx^*J$; x^* = Pendelungsreaktanz.

Ausgangslage. Der gesamte Spannungsabfall zwischen U und E ist $\Delta E = jxJ$, wobei x die synchrone Reaktanz bedeutet. Irgendwo zwischen Klemmenspannung und Leerlaufspannung liegt die induzierte EMK E' . Der Spannungsabfall zwischen dieser und der Klemmenspannung beträgt $\Delta E' = jx'J$ (x' = Streureaktanz).

Nun soll bei konstanter Klemmenspannung das Polrad so verdreht werden, dass der Polradwinkel grösser wird. Da das Vektordiagramm etwas überladen ist, wurde der Verlauf der Spannungen auch noch in kartesischen Koordinaten aufgezeichnet (Abb. 8). Beim Ausgangswinkel ϑ hat die Leerlaufspannung den Wert E , die induzierte EMK den Wert E' . Wird nun der Polradwinkel sehr langsam vergrössert (langsam

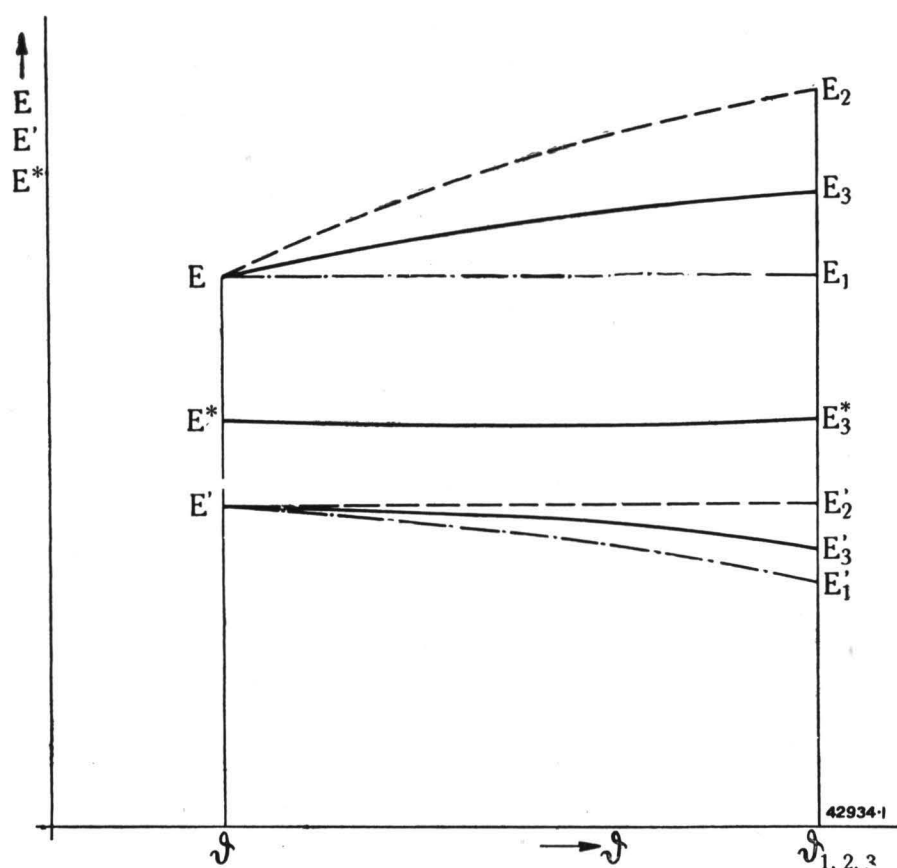


Abb. 8. — Spannungen einer Volltrommelmaschine in Funktion des Polradwinkels.

Ohne Index = Ausgangslage.

Index 1 = Endlage nach sehr langsamer Verdrehung.

Index 2 = Endlage nach sehr rascher Verdrehung.

Index 3 = Endlage nach mittelschneller Verdrehung.

im Vergleich zur magnetischen Zeitkonstante der Maschine), so bleibt der Erregerstrom und daher auch die Leerlaufspannung konstant. Die EMK verkleinert sich dabei längs der untersten Kurve (E_1 und E_1'). Wird dagegen der Polradwinkel sehr rasch vergrössert, so bleibt — wie bereits gesehen — der Erregerstrom nicht konstant, dafür aber die EMK. Die Leerlaufspannung vergrössert sich dabei längs der obersten Kurve (E_2 und E_2').

Das sind die beiden Grenzfälle. Wenn die Verdrehung weder ausserordentlich rasch noch ausserordentlich langsam erfolgt, so verändern sich die Spannungen irgendwie innerhalb diesen Grenzwerten, etwa nach E_3 und E_3' . Die Leerlaufspannung E wird etwas grösser, die EMK E' etwas kleiner. Nun muss aber doch irgendwo zwischen E und E' eine Spannung liegen, die

vor und nach der Verdrehung gleich gross ist. Sie ist mit E^* bezeichnet. Während der Bewegung selber braucht sie nicht genau konstant zu sein; man kann aber mit guter Näherung so rechnen, als ob sie konstant wäre. Damit hat man einen Ausgangspunkt erhalten. Sobald eine Grösse festgelegt ist, die während der Verdrehung konstant bleibt, kann man das Drehmoment als Funktion des Polradwinkels darstellen, und das ermöglicht, die beliebte und einfache Methode der Flächenvergleiche zu verwenden.¹⁾

Im Vektordiagramm (Abb. 7) ist ebenfalls die Spannung E^* vor und nach der Verdrehung eingezeichnet. Der Spannungsabfall zwischen E^* und U kann $\Delta E^* = jx^*J$ geschrieben werden. Die Grösse x^* sei Pendelungsreaktanz genannt, da es die Reaktanz ist, die für Pendelungen und andere mechanische Ausgleichvorgänge massgebend ist. Es ist die Reaktanz zwischen der Klemmenspannung und derjenigen inneren Spannung, die während dem untersuchten Ausgleichvorgang konstant bleibt. Da E^* immer zwischen E und E' liegt, so liegt der Wert der Pendelungsreaktanz x^* immer zwischen den Werten der synchronen Reaktanz x und der Streureaktanz x' . Das ist aber auch alles, was man von vornherein weiss. Die genauen Werte von x^* für die verschiedenen Maschinentypen liefert der Versuch.

VI. VERSUCHE MIT VERSCHIEDENEN ROTOREN.

Es wurden zwei grosse Gruppen von Versuchen durchgeführt. Die erste Gruppe sollte den Einfluss verschiedener Rotorkonstruktionen zeigen, die zweite sollte darlegen, wie der Parallelbetrieb von Synchronmaschinen durch Kurzschlüsse im Netz beeinflusst wird. Für die erste Versuchsgruppe standen Synchronmaschinen von 110 und 150 kVA, 525 V, 1000 U/min zur Verfügung. Dabei konnten folgende verschiedene Rotoren untersucht werden: ausgeprägte Pole mit Dämpferwicklung, ausgeprägte Pole ohne Dämpferwicklung, massiver Volltrommelrotor mit Kupferkeilen, desgleichen mit Holzkeilen, und schliesslich ein lamellierter Volltrommelrotor mit einer als Käfig ausgebildeten Dämpferwicklung.

¹⁾ In Abb. 8 ist der Verlauf der Spannungen nur bis zu dem Moment eingezeichnet, wo der Polradwinkel zum ersten Male den neuen stationären Wert $\vartheta_{1,2,3}$ erreicht. Die Überschwingung und die nachfolgende Pendelung um die neue Gleichgewichtslage ist nicht mehr eingetragen. Die Spannung E^* ist so definiert, dass sie beim ersten Durchgang des Polrades durch die neue Gleichgewichtslage gleich gross ist wie in der Ausgangslage. — In der obigen Ableitung ist die Verschiedenheit der Reaktanzen für Haupt- und Querachse nicht berücksichtigt worden, weil auf möglichst einfache Art nur das Wesentliche der Methode gezeigt werden sollte.

Alle diese Rotoren wurden in der Schaltung nach Abb. 9 untersucht. Der Gleichstrommotor M wurde aus einem Netz gespeist. Der Schalter S' war zunächst offen, der Widerstand R also nicht angeschlossen. Der Motor trieb die Versuchsmaschine G an, die über einen 2000-kVA-Transformator Leistung in ein starkes Netz lieferte. Es wurde absichtlich ein so grosser Transformator gewählt, damit die Klemmenspannung der Versuchsmaschine bei den Ausgleichvorgängen konstant blieb. Durch Öffnen des Schalters S wurde die Leistungszufuhr auf der Antriebsseite plötzlich unterbrochen, sodass die Synchronmaschine in die Leerlaufstellung einpendeln musste. Bei weiteren Versuchen wurde der Widerstand R parallel zum Gleichstrommotor angeschlossen. Zunächst speiste wieder das Gleichstromnetz den Motor; die Synchronmaschine war generatorisch belastet. Wenn man jetzt den Schalter S öffnete, so hörte nicht nur die Leistungszufuhr auf, sondern der Widerstand R bezog noch Leistung aus der Gleichstrommaschine. Die Synchronmaschine musste diese antreiben, sie wurde also jetzt motorisch belastet. Diese plötzliche Umschaltung ist die schlimmste Laständerung, die es für die Synchronmaschine gibt. Sie ist noch bedeutend ungünstiger als die plötzliche Belastung einer leerlaufenden Maschine. — Bei diesen Versuchen wurden alle interessierenden Grössen oszillographisch aufgenommen, insbesondere auch der Polradwinkel und die Wirkleistung der Synchronmaschine.

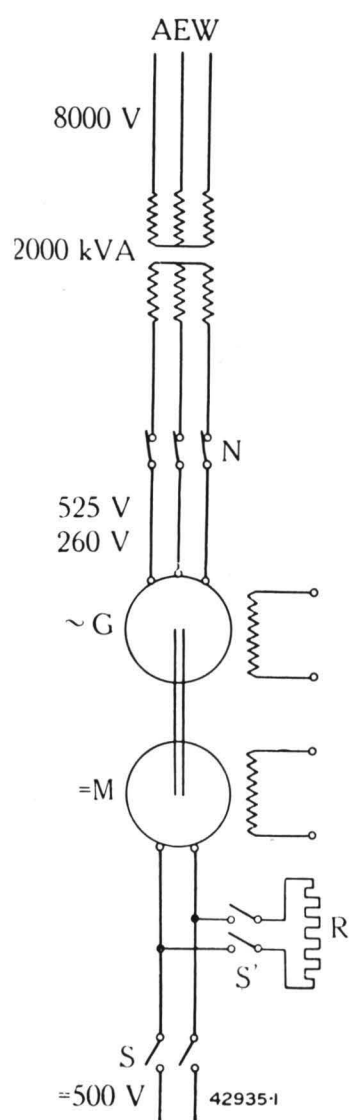


Abb. 9. — Schaltbild für die Versuche mit verschiedenen Rotoren.

Die Versuchsergebnisse sind in den wichtigsten Zügen die folgenden: bei keiner der Lastabschaltungen fiel die Maschine ausser Tritt. Das ist weiter nicht verwunderlich, da sie auch nach der einfachsten Theorie, die mit den stationären Drehmomentkurven rechnet, nicht ausser Tritt fallen würde. Aber auch bei den sehr ungünstigen Lastumschaltungen, wo sie nach jener einfachsten Theorie unbedingt ausser Tritt fallen sollte, blieb sie fast immer im Tritt. Man ersieht daraus, dass jene Theorie die Verhältnisse tatsächlich nicht richtig erfasst; die Stabilität ist bedeutend besser. Wie bereits erwähnt wurde, sind es hauptsächlich die in der Erregerwicklung induzierten zusätzlichen Ströme, die die Abweichungen von jener einfachsten Theorie verursachen. Natürlich hat auch eine Dämpferwicklung einen ge-

wissen Einfluss. Da jedoch normalerweise die Dämpferwicklung viel weniger Kupfer enthält, so verbessert sie die dynamische Stabilität lange nicht so sehr wie die Erregerwicklung. Tatsächlich war bei sämtlichen Rotoren, auch bei denen ohne Dämpferwicklung, die Stabilität viel besser, als die einfachste Theorie erwarten lässt. Nur wenn man den Rotor mit ausgeprägten, lamellierten Polen ohne Dämpferwicklung, mit offener Erregerwicklung laufen liess, so verhielt er sich entsprechend jener einfachsten Theorie, weil jetzt der Rotor keine geschlossenen Stromkreise mehr besass, in denen zusätzliche Ströme induziert werden konnten.

Der Einfluss der Dämpferwicklungen machte sich dadurch bemerkbar, dass die Rotoren mit Dämpferwicklungen durch die Lastumschaltungen überhaupt nicht ausser Tritt geworfen werden konnten, während der Volltrommelrotor mit Holzkeilen und der Rotor mit ausgeprägten, lamellierten Polen ohne Dämpferwicklung in einzelnen Fällen ausser Tritt fielen. Dagegen verhielt sich der massive Volltrommelrotor mit Kupferkeilen genau so gut, wie alle Rotoren mit Dämpferwicklungen. Damit soll natürlich der Dämpferwicklung nicht jeglicher Wert abgesprochen werden. In gewissen Sonderfällen kann sie sehr gute Dienste leisten. Dagegen wird ihr Wert vielfach überschätzt. In den meisten und wichtigsten Fällen erzielt man fast die gleiche Wirkung durch massive Pole.

Die ausserordentlich gute dynamische Stabilität, die bei den vorliegenden Versuchen festgestellt wurde, gilt nicht ohne weiteres für Synchronmaschinen in Netzen, wo den Maschinen grössere Reaktanzen von Leitungen, Transformatoren usw. vorgeschaltet sind. Man kann aber aus den vorliegenden Versuchen die Pendelungsreaktanzen, von denen im vorigen Abschnitt die Rede war, für die verschiedenen Maschinen ermitteln. Sind jene Reaktanzen bekannt, so lässt sich dann die Stabilität auch für andere Netzverhältnisse berechnen. Hier soll jedoch nicht untersucht werden, wie aus den Versuchsergebnissen die Pendelungsreaktanzen zu ermitteln und wie aus diesen die Drehmomentkurven zu berechnen sind; das bleibt einer andern Veröffentlichung vorbehalten.

Dagegen soll an ein paar typischen Beispielen gezeigt werden, wie sehr das Drehmoment der Synchronmaschine durch die im Rotor induzierten Ströme im günstigen Sinn beeinflusst wird. Abb. 10 zeigt eine Lastabschaltung bei der Maschine mit ausgeprägten Polen und Dämpferwicklung. Kurve 1 ist die stationäre Leistungskurve, mit der die einfachste Theorie rechnet. Kurve 2 zeigt den wirklichen, gemessenen Verlauf der Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels. Der Rotor schwingt von A ausgehend bis 42° und pendelt in die neue Gleichgewichtslage bei B ein. Kurve 2 weicht von Kurve 1 in dem Sinn ab, dass dem Rotor am Anfang weniger Energie entzogen wird (horizontal schraffierte Fläche statt vertikal schraffierte)

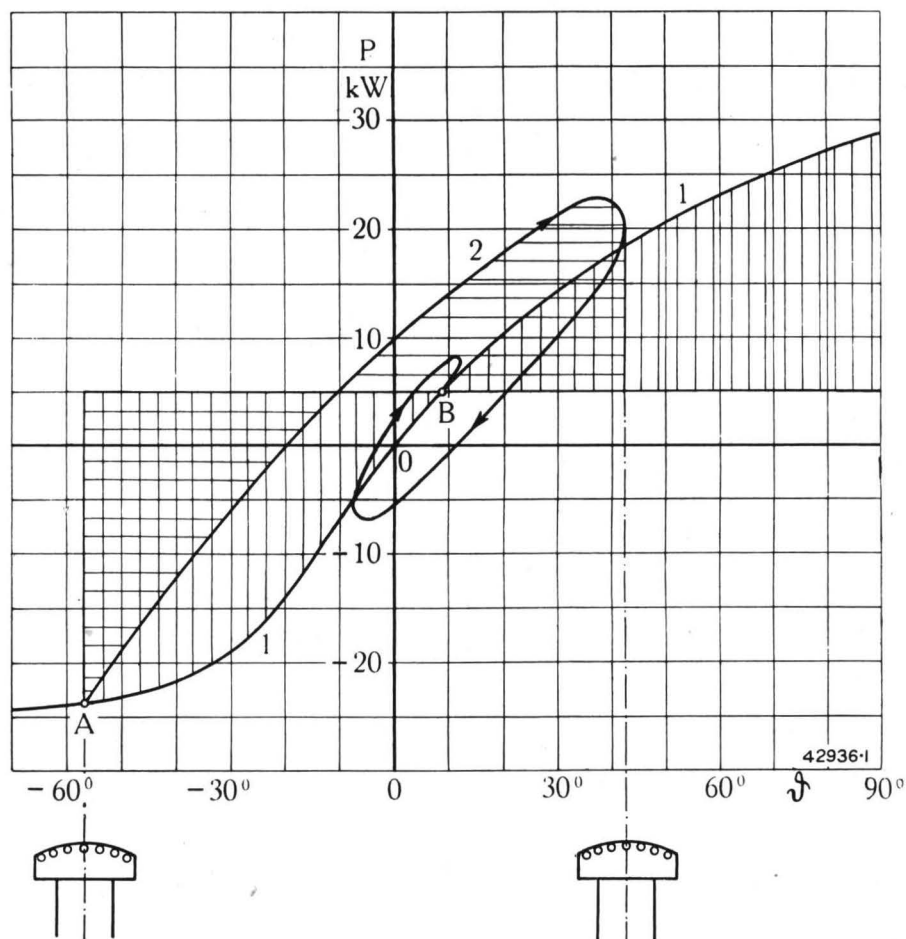


Abb. 10. — Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels bei einer Lastabschaltung der Maschine mit ausgeprägten Polen und Dämpferwicklung.

Kurve 1 = Stationäre Werte.

Kurve 2 = Bei der Lastabschaltung gemessene Werte.

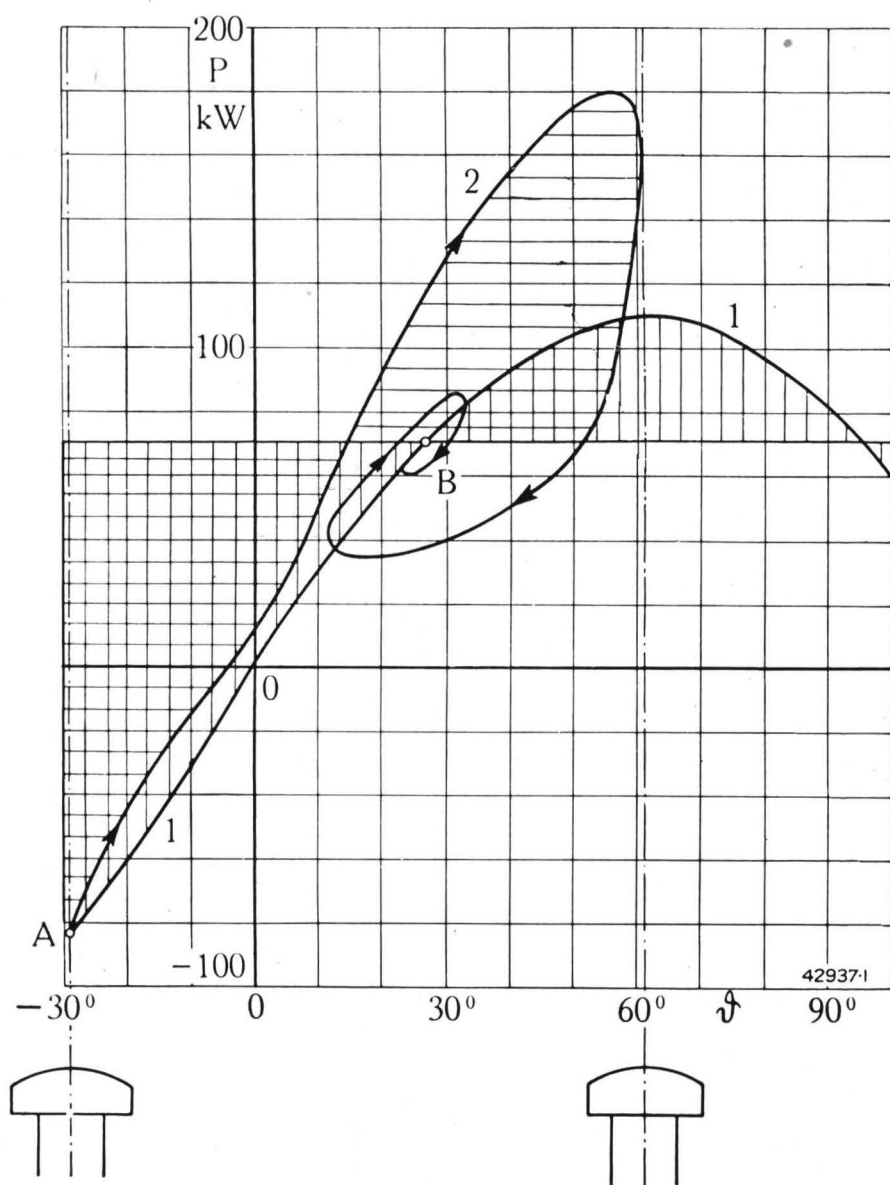


Abb. 11. — Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels bei einer Lastumschaltung der Maschine mit ausgeprägten Polen ohne Dämpferwicklung.

Kurve 1 = Stationäre Werte.

Kurve 2 = Bei der Lastumschaltung gemessene Werte.

und dass ihm früher wieder Energie zugeführt wird. Das hat zur Folge, dass der Rotor rund 45° weniger weit überschwingt, als wenn die stationäre Kurve 1 gelten würde.

Abb. 11 zeigt eine Lastumschaltung für die Maschine mit ausgeprägten Polen ohne Dämpferwicklung. Die gemessene Kurve 2 weicht von der stationären Kurve 1 anfänglich nicht so viel ab, weil die Dämpferwicklung fehlt. Dafür bewirkt nachher die Erregerwicklung eine sehr grosse Abweichung. Der Rotor erreicht eine maximale Auslenkung von 61° (Gleichheit der beiden horizontal schraffierten Flächen). Würde die stationäre Kurve 1 gelten, so wäre der Rotor ausser Tritt gefallen, denn die ganze obere, vertikal schraffierte Fläche ist nicht so gross wie die untere.

Abb. 12 gilt für die Maschine mit dem massiven Volltrommelrotor mit Kupferkeilen. Für Kurve 2, die bei einer Lastabschaltung aufgenommen wurde, ist durch Schraffur hervorgehoben, wie gewaltig viel kleiner die dem Rotor entzogene Energie ist, weil die dynamische Kurve 2 gilt, statt der stationären Kurve 1. Ähnlich wie hier sind die Verhältnisse auch beim lamelierten Volltrommelrotor mit Dämpferwicklung.

Ausser dem Verhalten der Synchronmaschine bei raschen Winkeländerungen und Schwingungen interes-

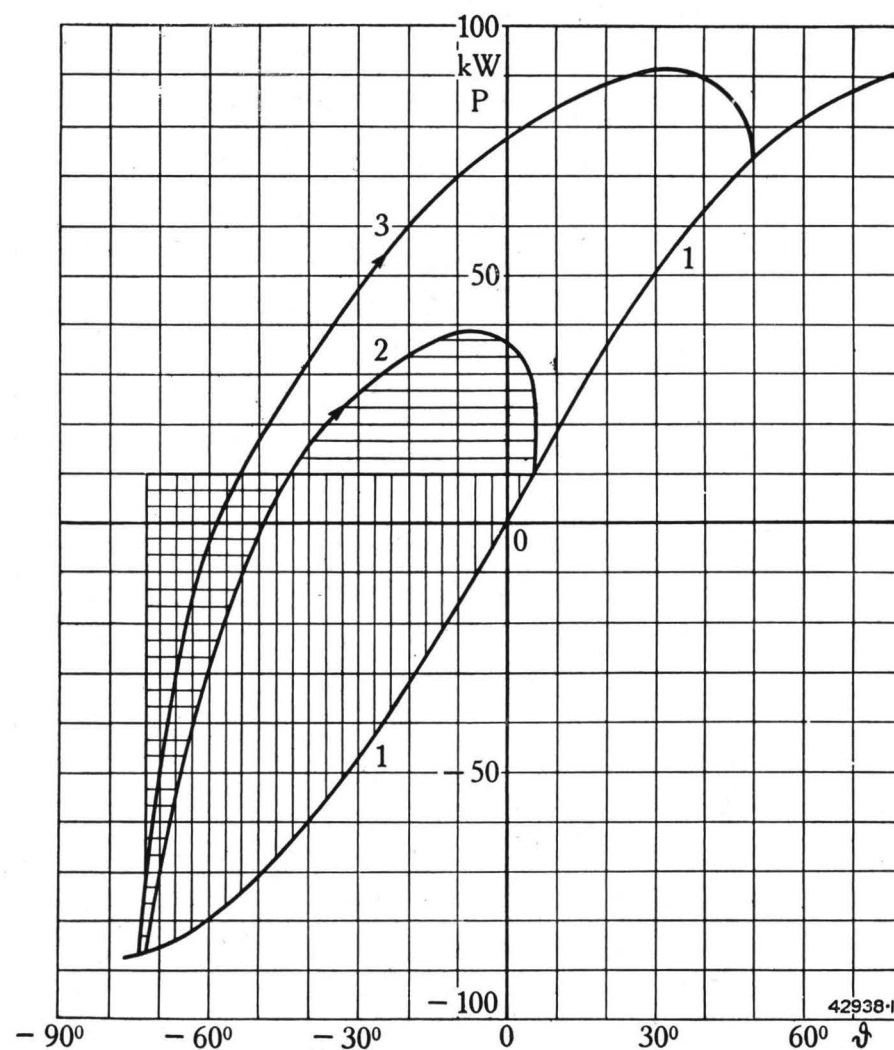


Abb. 12. — Wirkleistung in Funktion des Polradwinkels bei einer Lastabschaltung und -umschaltung der Maschine mit massivem Volltrommelrotor und Kupferkeilen.

Kurve 1 = Stationäre Werte.

Kurve 2 = Bei der Lastabschaltung gemessene Werte.

Kurve 3 = Bei der Lastumschaltung gemessene Werte.

siert auch ihr Verhalten bei asynchronem Lauf. Man muss dieses kennen, wenn man untersuchen will, ob eine ausser Tritt gefallene oder eine asynchron ange-

zerlegen. Die asynchrone Leistung ist immer positiv und entspricht dem Mittelwert. Um diesen Mittelwert herum führt die Leistung Schwankungen aus, die der

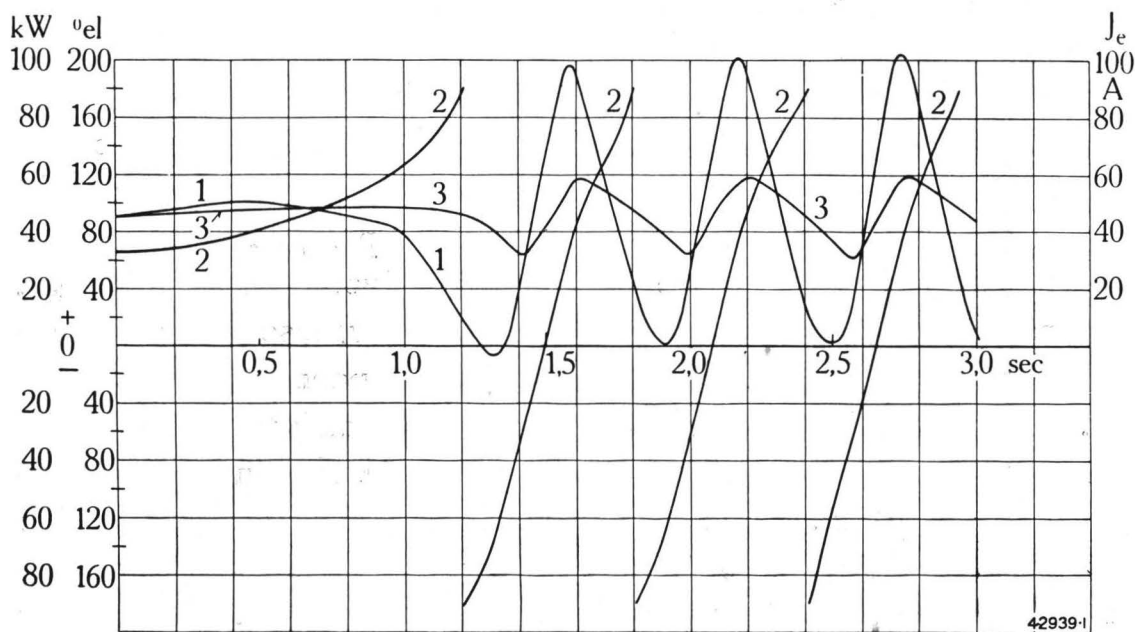


Abb. 13. — Aussertrittwerfen der Maschine mit Volltrommelrotor und Dämpferwicklung durch Überschreiten der statischen Grenzleistung.

Kurve 1 = Wirkleistung. Kurve 2 = Polradwinkel. Kurve 3 = Erregerstrom.

lassene Maschine richtig in Tritt gezogen wird. Deshalb wurden auch die paar Fälle, wo die Versuchsmaschinen ausser Tritt fielen, eingehend untersucht. Die Maschinen, die bei den Lastumschaltungen nie ausser Tritt fielen, wurden durch Steigerung der Belastung über die statische Grenzleistung ausser Tritt geworfen. Als Beispiel zeigt Abb. 13 das Aussertrittwerfen für den Voll-

trommelrotor mit Dämpferwicklung. Der Polradwinkel wächst über 180° hinaus, ist von unten her wieder eingezeichnet und schlüpft dann regelmässig durch. Die Wirkleistung macht dabei periodische Schwankungen. Man kann sie in zwei Komponenten zerlegen. Die asynchrone Leistung ist immer positiv und entspricht dem Mittelwert. Um diesen Mittelwert herum führt die Leistung Schwankungen aus, die der

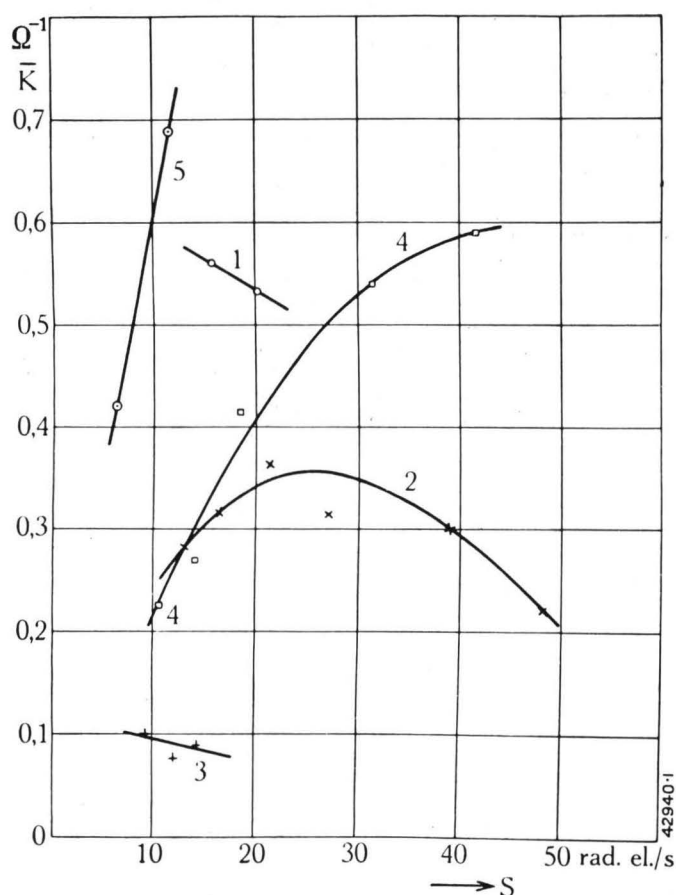


Abb. 14. — Faktor der asynchronen Leistung in Funktion des Schlupfes.

Kurve 1 = Ausgeprägte Pole mit Dämpferwicklung.
Kurve 2 = Ausgeprägte Pole ohne Dämpferwicklung.
Kurve 3 = Ausgeprägte Pole ohne Dämpferwicklung bei offener Erregerwicklung.
Kurve 4 = Massiver Volltrommelrotor mit Kupferkeilen.
Kurve 5 = Lamellierter Volltrommelrotor mit Dämpferwicklung.
S = Schlupf.

trommelrotor mit Dämpferwicklung. Der Polradwinkel wächst über 180° hinaus, ist von unten her wieder eingezeichnet und schlüpft dann regelmässig durch. Die Wirkleistung macht dabei periodische Schwankungen. Man kann sie in zwei Komponenten

Messpunkte von Kurve 5 scheinen noch ganz im geradlinigen Teil zu liegen, die von 1 bereits im abfallenden. Der Kuriosität halber sind auch noch die sehr kleinen Werte der Maschine mit offener Erregerwicklung eingetragen (Kurve 3).

In Abb. 15 sind die Amplituden der pulsierenden Leistungen aufgezeichnet, in Prozent der höchsten Leistung

der stationären Leistungskurve. Mit Ausnahme der Maschine mit offener Erregerwicklung weichen die Amplituden der pulsierenden Leistung nicht stark von der statischen Grenzleistung ab (Kurven nahe bei 100%).

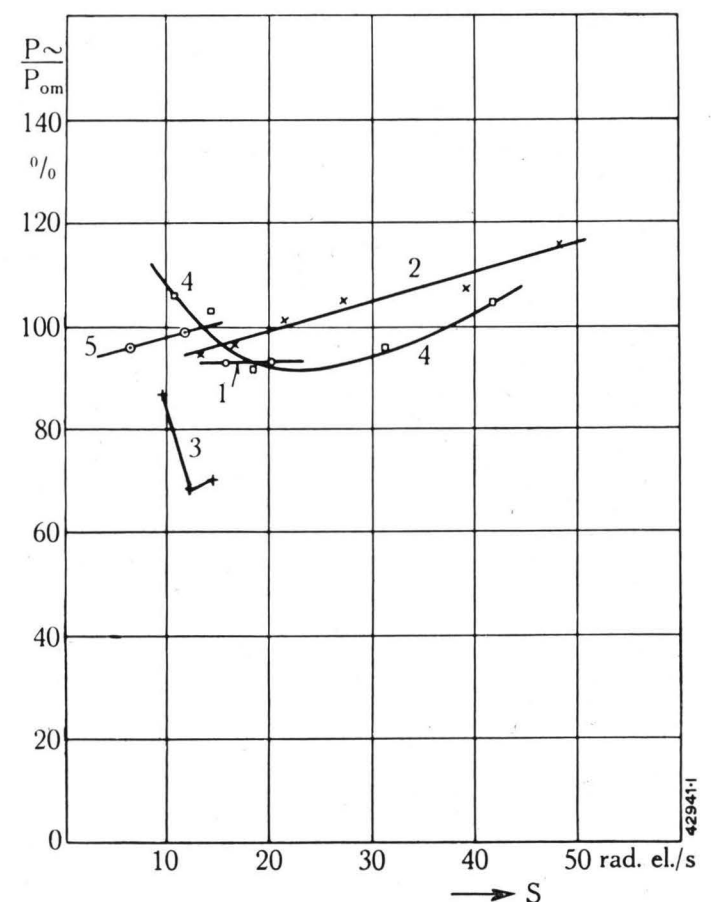


Abb. 15. — Amplitude der pulsierenden Leistung bei asynchronem Lauf, in Prozenten der statischen Grenzleistung.

Kurve 1 = Ausgeprägte Pole mit Dämpferwicklung.
Kurve 2 = Ausgeprägte Pole ohne Dämpferwicklung.
Kurve 3 = Ausgeprägte Pole ohne Dämpferwicklung bei offener Erregerwicklung.
Kurve 4 = Massiver Volltrommelrotor mit Kupferkeilen.
Kurve 5 = Lamellierter Volltrommelrotor mit Dämpferwicklung.
S = Schlupf.

VII. STABILITÄTSVERSUCHE BEI KURZSCHLÜSSEN.

Es sei nun zur zweiten Versuchsgruppe übergegangen, für die das Schema in Abb. 16 aufgezeichnet wurde. Der verwendete Turbogenerator hat 2300 kVA bei $\cos \varphi = 0,7$ und 3000 U/min. Er arbeitet parallel mit einem sehr starken Netz, das einen Gesamtmaschineneneinsatz in der Grössenordnung von 100 MVA hat. Über Drosselspulen, die eine Abzwegleitung darstellen sollten, wurden plötzliche Kurzschlüsse ausgeführt. Die Kurzschlussdauer wurde zwischen einigen Zehntelsekunden und gut zwei Sekunden ausgedehnt. Die Kurzschlüsse waren z. T. drei-, z. T. zweipolig. Durch verschieden grosse Reaktanz der Drosseln konnte auch die Heftigkeit der Kurzschlüsse verändert werden. Bei den heftigsten Kurzschlüssen wurde die Klemmenspannung des Generators plötzlich auf rd. 30 % und im Dauerkurzschluss auf 20 % abgesenkt.

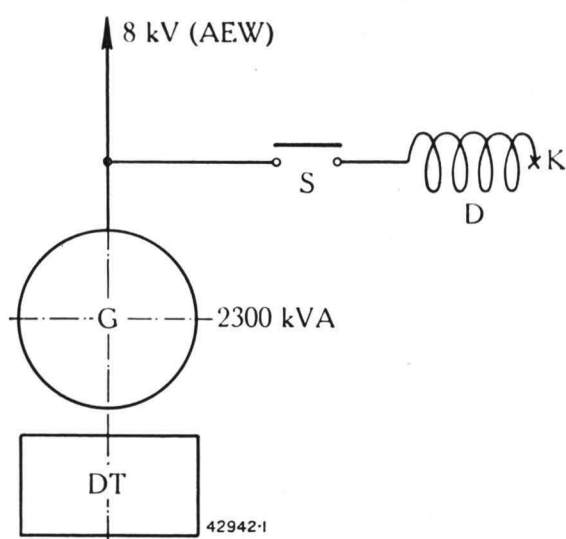


Abb. 16. — Schaltbild für die Stabilitätsversuche bei Kurzschlüssen.

D = Drosselspulen.
DT = Dampfturbine.
G = Generator.
K = Kurzschlussstelle.
S = Kurzschlusschalter.

auch bei abgestelltem Dampf durchgeführt, wobei die Synchronmaschine als Phasenschieber lief, und zwar sowohl über- wie untererregt und bei $\cos \varphi = 1$.

Auch diese grosse Gruppe von Versuchen überraschte dadurch, dass die Stabilität bedeutend besser war, als man erwartete. Beim Generatorbetrieb fiel die Maschine nie ausser Tritt, wenn sie mit Dreiviertel-Nennlast vorbelastet war und die Spannung im ersten Moment auf 60 %, im Dauerkurzschluss auf 40 % abgesenkt wurde. Bei grösserer Vorbelastung oder tieferer Spannungsabsenkung fiel sie zwar bei genügend langem dreipoligen Kurzschluss ausser Tritt, erreichte aber sehr rasch einen asynchronen stationären Zustand, wobei der Schlupf nie über 9 % stieg. Der Schnellschluss der Turbine hat nie angesprochen. Nach

Der Generator lief bei verschiedenen Vorbelastungen von $\frac{3}{4}$ bis über Nennlast, bei $\cos \varphi = 1$ und 0,8. Der Erregerstrom wurde von einer direkt gekuppelten Erregermaschine geliefert und während der Kurzschlüsse nicht reguliert. Der Turbinenregler arbeitete in üblicher Weise. Eine Anzahl

Versuche wurden

Abschaltung des Kurzschlusses wurde der Generator nach wenigen Schlüpfungen wieder in Tritt gezogen. Eine sehr wichtige Zahl ist die folgende: der Generator fiel auch bei den ungünstigsten Bedingungen nicht ausser Tritt, wenn der Kurzschluss nicht länger als 0,4 s dauerte.

Bei den zweipoligen Kurzschlüssen wurde der Generator auch bei der längsten Kurzschlussdauer nicht ausser Tritt geworfen. Der zweipolige Kurzschluss ist nämlich aus zwei Gründen günstiger als der dreipolige. Erstens ist bei gleicher Spannungsabsenkung der betroffenen Phasen das mitläufige Spannungssystem beim zweipoligen Kurzschluss bedeutend grösser als beim dreipoligen. Zweitens verursacht das inverse Stromsystem des zweipoligen Kurzschlusses in der Maschine ein ganz beträchtliches Bremsmoment, das dem Antriebsmoment der Turbine entgegenwirkt. Das ist sehr günstig, weil ja die Drehzahl von belasteten Generatoren bei Kurzschlüssen meistens steigende Tendenz hat. Bei Synchronmotoren ist das Bremsmoment des inversen Stromes dagegen ungünstig, da es sich zum Lastmoment der angetriebenen Maschine addiert und dadurch das Aussertrittfallen begünstigt.

Lief die Maschine als Phasenschieber, so wurde sie überhaupt nie ausser Tritt geworfen, weder bei zwei- noch bei dreipoligen Kurzschlüssen. Das Polrad pendelte während des Kurzschlusses einfach in eine neue Gleichgewichtslage ein und kehrte nach der Abschaltung wieder in die alte Lage zurück.

Ein paar typische Kurven von diesen Versuchen sind in den Abb. 1, 17 und 18 wiedergegeben. Abb. 1 stellt einen heftigen dreipoligen Kurzschluss dar, bei dem der Generator ausser Tritt fiel. Abb. 17 zeigt einen zweipoligen Kurzschluss bei sonst fast gleichen Bedingungen. Das Polrad führt lediglich ein paar Schwingungen aus, wobei der Polradwinkel während des Kurzschlusses nicht grösser als 35° wird. Nach der Abschaltung schwingt er bis 47° . (Das inverse Brems-

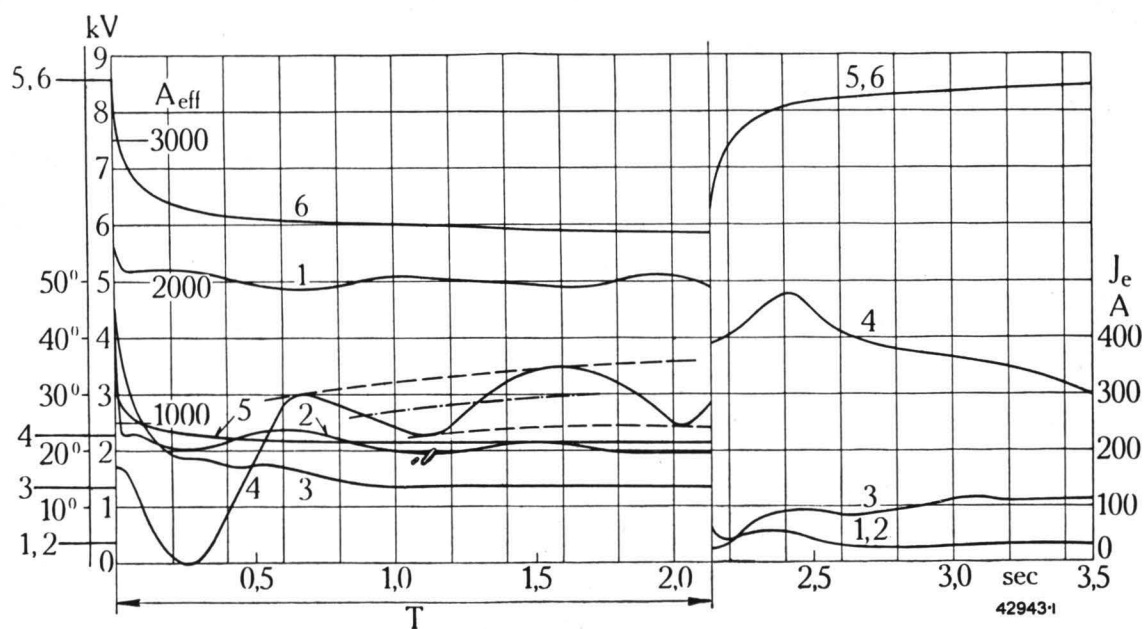


Abb. 17. — Zweipoliger Kurzschluss (Phasen RT) bei der Schaltung nach Abb. 16. Vorbelastung des Generators: 1690 kW, $\cos \varphi = 0,8$.

Kurve 1 = Netzstrom Phase R. Kurve 4 = Polradwinkel.
Kurve 2 = Generatorstrom Phase R. Kurve 5 = Klemmenspannung RT.
Kurve 3 = Gleichstromglied des Erregerstromes. Kurve 6 = Klemmenspannung ST.
T = Kurzschlussdauer.

moment hat jetzt aufgehört.) Nachher kehrt er in seine alte Lage zurück. Abb. 18 zeigt einen heftigen dreipoligen Kurzschluss bei Phasenschieberbetrieb, und zwar im ungünstigen Fall von schwacher Erregung ($\cos \varphi = 1$). Auch hier macht das Polrad lediglich ein paar Schwingungen.

Die sehr günstigen Ergebnisse der vorliegenden Versuche dürfen nicht ohne weiteres auf andere Netzverhältnisse übertragen werden. Bei diesen Versuchen war die Synchronmaschine über verhältnismässig kleine Impedanzen an ein starkes Netz angeschlossen. Sind längere Leitungen mit grössern Impedanzen im Spiel, so wird die dynamische Stabilität unbedingt ungünstiger. Die Maschinen werden schon bei kleinerer Vorbelastung und geringerer Spannungserniedrigung ausser Tritt fallen. Ferner ist es wohl möglich, dass sie nach Abschaltung des Kurzschlusses nicht mehr in Tritt gezogen werden. Eines aber bleibt auch bei andern Netzverhältnissen richtig: die Maschinen werden nicht ausser Tritt geworfen, wenn der Kurzschluss nach höchstens 0,3 bis 0,4 s wieder abgeschaltet wird, denn so lange dauert es unter allen Umständen, bis der Rotor die nötige Verdrehung ausgeführt hat, um ausser Tritt zu fallen. Die Eigenschwingungsdauer grösserer normaler Synchronmaschinen ist nämlich immer von der Grössenordnung einer Sekunde.

VIII. MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER STABILITÄT.

Man wird sich fragen, wie die Stabilität in den Fällen, wo sie nicht befriedigt, verbessert werden kann. Die statische Stabilität ist, wie bereits erwähnt, gewöhnlich nicht gefährdet. Für die dynamische Stabilität müssen verschiedene Fälle unterschieden werden. Bei Kupplung einzelner Synchronmaschinen mit Kolbenmaschinen, wo die Gefahr von Schwingungen besteht, muss durch geeignete Wahl der Reaktanzen

und Trägheitsmomente erreicht werden, dass die Pulsationen des Antriebmomentes nicht mit der Eigenfrequenz der Polradschwingungen in Resonanz kommen. Auch eine Erhöhung der Dämpfung durch eine geeignete Dämpferwicklung kann vorteilhaft sein.

Eine zweite Gruppe von Störungen besteht in raschen Zustandsänderungen, wie Zu- und Abschalten von Last, Abschalten von parallelen Leitungen usw. Alle diese Zustandsänderungen müssen ohne *besondere* Massnahmen ausgehalten werden können, lediglich durch geeignete Anlage des Netzes. Dazu gehören vor allem genügend starke Verbindungsleitungen in genügender Anzahl. Je kleiner die Reaktanzen und Ohmschen Widerstände zwischen den verschiedenen Zentralen und Unterwerken, desto günstiger sind die Stabilitätsverhältnisse. Dabei sind die Reaktanzen und Widerstände immer auf die gleiche Spannung zu reduzieren, sodass sie bei Leitungen von gleichem Querschnitt um so kleiner erscheinen, je grösser die Übertragungsspannung ist. Ferner können konstruktive Massnahmen an den Synchronmaschinen die Stabilität verbessern, wobei aber die Wirkung von Dämpferwicklungen nicht überschätzt werden soll. Eine Vergrösserung der Schwungmomente verbessert häufig — aber durchaus nicht immer — die Stabilität. Ferner ist es günstig, wenn die verschiedenen parallel laufenden Generatoren und ihre Antriebsmaschinen samt Reglern möglichst gleichartig sind und wenn die Wirk- und Blindleistung, die ein Kraftwerk liefert, möglichst gleichmässig auf die verschiedenen Maschinen verteilt wird.

Die weitaus schlimmste Gefahr für die dynamische Stabilität bedeuten die Kurzschlüsse. Auch hier spielen natürlich die soeben erwähnten, allgemeinen Netzbedingungen eine wichtige Rolle. Darüber hinaus ist die Dauer des Kurzschlusses von grundlegender Bedeutung. Es wurde bereits festgestellt, dass das Aussertrittfallen immer vermieden werden kann, wenn der Kurzschluss nach höchstens 0,3 bis 0,4 s wieder abgeschaltet wird. Um sicher zu gehen, soll die Grenze auf $\frac{1}{4}$ s angesetzt werden¹⁾. Dabei muss man aber sofort noch eine Einschränkung machen. Der stabile Parallelbetrieb kann durch ein so rasch arbeitendes Selektivschutzsystem natürlich nur dann ohne Einschränkung gewährleistet werden, wenn genügend Reserveleitungen vorhanden sind. Wird infolge eines Kurzschlusses eine Verbindungsleitung abgeschaltet, so muss trotzdem noch eine Verbindung genügender Leistungsfähigkeit vorhanden sein.

¹⁾ Diese Zeit gilt selbstverständlich nicht nur für die Relais allein, sondern enthält auch noch die gesamte Schalterzeit.

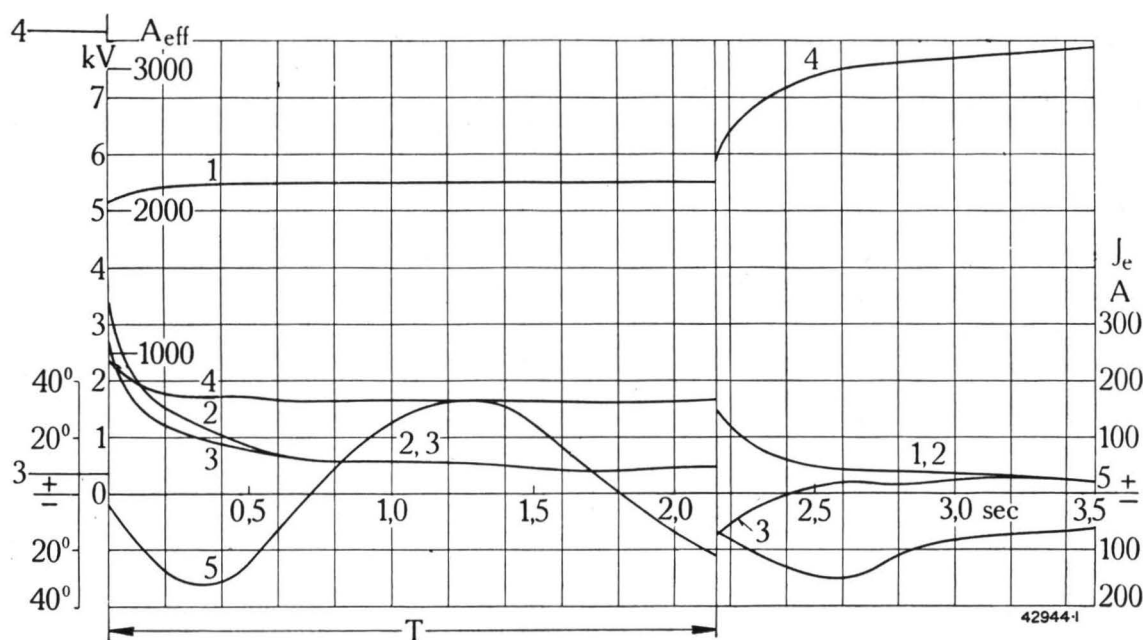


Abb. 18. — Dreipoliger Kurzschluss bei der Schaltung nach Abb. 16. Phasenschieberbetrieb bei $\cos \varphi = 1$.

Kurve 1 = Netzstrom.
Kurve 2 = Generatorstrom.
Kurve 3 = Gleichstromglied des Erregerstromes.
Kurve 4 = Verkettete Klemmenspannung.
Kurve 5 = Polradwinkel.
T = Kurzschlussdauer.

Auch die *Stosserregung* bietet gewisse Möglichkeiten zur Verbesserung der Stabilität. Durch die Stosserregung wird der Erregerstrom und dadurch das Feld während des Kurzschlusses künstlich hochgehalten, woraus eine Erhöhung des synchronen Momentes und somit eine Verbesserung der Stabilität folgt. Die Stosserregung ist aber nur ein Notbehelf. Die *Lösung* des Stabilitätsproblems ist das Selektivschutzsystem mit höchstens $\frac{1}{4}$ s gesamter Abschaltzeit. Die Stosserregung hat natürlich auch die unangenehme Folge, dass die Kurzschlußströme erhöht werden. Ferner gibt es immer Fälle, wo die Stosserregung das Aussertrittfallen nicht verhindern kann, z. B. bei direkten dreipoligen Kurzschlüssen auf wichtigen Verbindungsleitungen. In diesen Fällen schadet sie nur.

Die Vorteile der Stosserregung kommen nur dann zur Geltung, wenn sie imstande ist, den Erregerstrom ausserordentlich rasch zu erhöhen. Die aus der Literatur bekannten Stosserregungsschaltungen benötigen jedoch 0,6 bis 2 s zum Feldaufbau. Eine solche Stosserregung ist ziemlich wertlos. Andererseits ist es aber gar nicht möglich, mit der Zeit für den Feldaufbau unter etwa 0,5 s zu kommen, weil die magnetische Zeitkonstante der Synchronmaschine und des Erregers überwunden werden muss. Jedoch lässt sich auf eine andere Art eine wesentliche Verbesserung erzielen. Bekanntlich bleibt bei einem Kurzschluss das Feld im allerersten Moment erhalten, klingt dann aber sehr rasch ab. Wenn es nun gelingt, das Abklingen zu verhindern oder zu verzögern, so kann die Stabilität im Vergleich zum normalen Verlauf des Kurzschlusses bedeutend verbessert werden. Dabei muss die Zeitkonstante der Synchronmaschine nicht überwunden werden, denn das Feld wird ja nicht aufgebaut, es wird nur gehalten. Um einen Erfolg zu erzielen, muss die Spannung des Erregers ausserordentlich rasch erhöht werden, damit der anfänglich grosse Erregerstrom

möglichst wenig abklingt. Das ist am besten dadurch möglich, dass man den grossen Erregerstrom des Generators selber dazu verwendet, die Spannung des Erregers zu erhöhen.

Brown Boveri hat zwei derartige Schaltungen entwickelt, die im Prinzip in Abb. 19 dargestellt sind.

Beide Schaltungen verwenden Haupt- und Hilfs-erregers, wie auch die aus der Literatur bekannten Stosserregungsschaltungen. Der Hilfs-erregers speist über einen Spannungsschnellregler die normale Erregerwicklung des Haupterregers. Dieser erregt den Generator. In beiden Fällen hat der Haupterregers noch eine zweite Erregerwicklung mit Hauptschlusscharakter. Bei der obern Schaltung ist diese zweite Wicklung normalerweise stromlos. Jedoch im Augenblick des Kurzschlusses, wenn der Erregerstrom des Generators stossartig ansteigt, wird durch einen Serietransformator in der Wicklung H ein Strom induziert, der einige Zeit andauert. Auf diese Art kann die Spannung des Haupterregers beim Kurzschluss ausserordentlich rasch erhöht werden. Durch den zusätzlichen Strom in H wird dann die hohe Spannung gehalten, bis der Spannungsregler wirksam wird. Bei der untern Schaltung ist die Wicklung H mit der Erregerwicklung des Generators direkt in Serie geschaltet. Sie ist aber normalerweise durch einen Schnellschalter kurzgeschlossen, sodass sie stromlos ist. Bei Kurzschluss wird der Schnellschalter geöffnet, sodass die Wicklung H eine hohe Spannung im Haupterregers erzeugt. Wie die Versuche zeigten, ist es bei zweckmässiger Steuerung des Schalters möglich, so rasch zu öffnen, dass bereits 0,02 s nach Kurzschlussbeginn der volle Erregerstrom J_e durch die Wicklung H fliesst.

Die beiden Schaltungen sind in ihrer Wirkung etwa ebenbürtig. Der Aufwand für die Stosserregung ist folgender: in beiden Fällen wird ein anomal grosser Erregers mit lamellierten Polen und Jochen benötigt. Um eine nennenswerte Wirkung zu erzielen, muss er mindestens viermal grösser sein als normal. Die obere Schaltung benötigt einen Schnellregler, der den grossen Erregers voll aussteuern kann. Die untere Schaltung braucht einen Schnellschalter, und die obere statt dessen einen Serietransformator. Die Leistung dieses Transformators braucht aber nicht mehr als etwa 4 % der Generatorleistung zu betragen.

Der Erfolg, der mit Brown Boveri-Stosserregungsschaltungen erzielt wird, ist aus Abb. 20 ersichtlich. Die Kurven wurden mit dem gleichen Turbogenerator ¹⁾ wie die Versuche des vorigen Abschnittes aufgenommen, bei einem dreipoligen Kurzschluss, der die Klemmenspannung im ersten Moment auf rd. 40 % absenkte. Die unterste Kurve zeigt den Abfall der Klemmenspannung, wenn der Erregerstrom überhaupt nicht reguliert wurde. Die mittlere Kurve gilt bei Verwen-

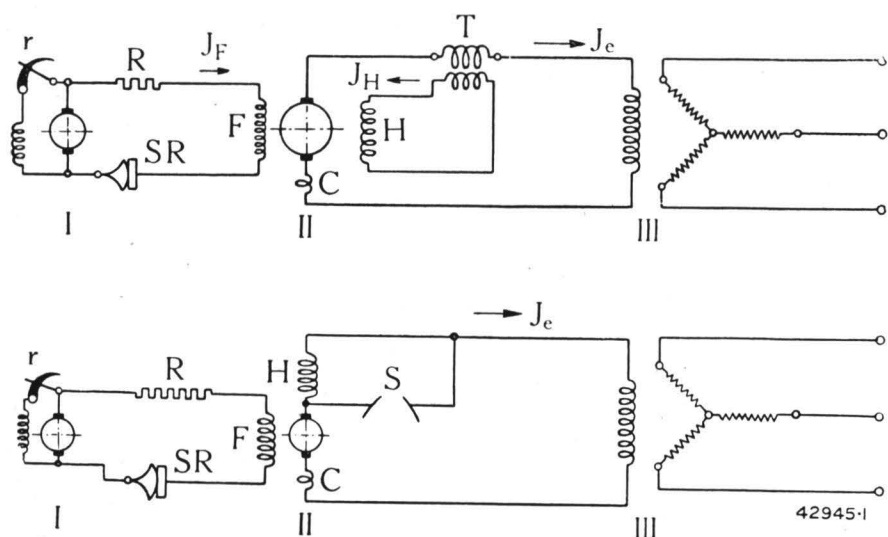


Abb. 19. — Stosserregungsschaltungen.

Oben: mit Serietransformator im Erregerkreis.

Unten: mit Schnellschalter im Erregerkreis.

I = Hilfs-erregers. II = Haupterregers. III = Generator.

C = Compounderregerswicklung des Haupterregers.

F = Fremderregerswicklung des Haupterregers.

H = Serieerregerswicklung des Haupterregers.

S = Schnellschalter.

SR = Spannungsschnellregler.

T = Serietransformator.

¹⁾ Jedoch in der Schaltung für 4000 V.

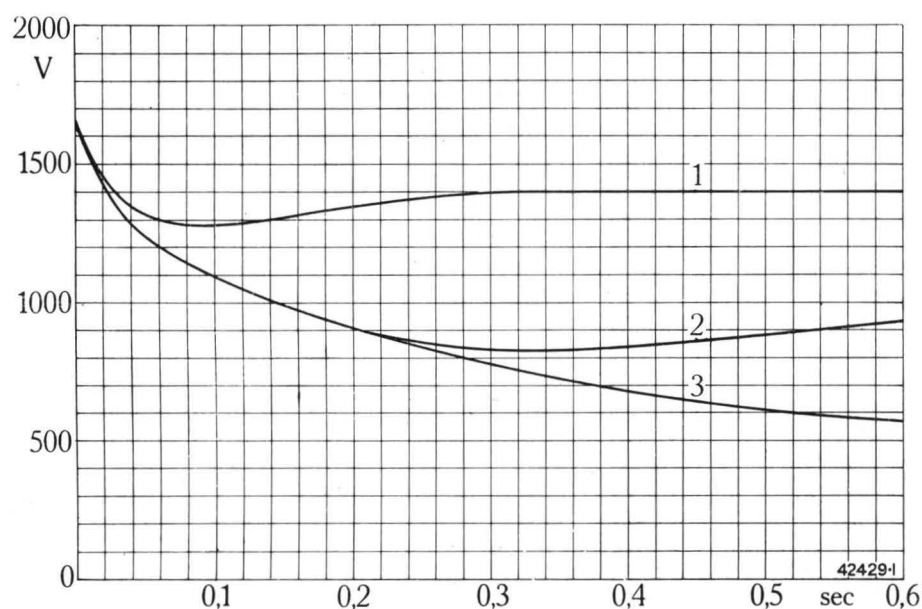


Abb. 20. — Verlauf der Klemmenspannung eines Turbogenerators von 2300 kVA, 3000 U/min, 4000 V bei einem dreipoligen Kurzschluss über Drosselspulen, mit und ohne Stosserregung.

1 = Mit Stosserregung. 2 = Mit Spannungsregler.
3 = Ohne Regulierung.

dung eines guten Spannungsschnellreglers, die oberste Kurve bei Anwendung der Stosserregung nach der obern Schaltung der Abb. 19. Die Stabilität ist um so besser, je höher die Klemmenspannung ist und je länger sie hoch bleibt. Die Abbildung zeigt deutlich die bedeutende Stabilitätsverbesserung durch die Stosserregung.

Zum Schluss noch ein paar Worte über die Wirkung des Überstromreglers auf die Stabilität des Parallelbetriebes. Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, dass eine Verkleinerung der Erregung während der Dauer eines Kurzschlusses in den meisten Fällen ungünstig wirkt. Auch wenn die Generatoren infolge eines Kurzschlusses ausser Tritt gefallen sind, ist eine gewisse minimale Erregung nötig, damit sie sich wieder fangen können. Tiefer darf also der Überstromregler nicht entregen, sonst ist er schädlich. Eine Entregung bis zu dieser Grenze hinunter ist dagegen

sehr vorteilhaft, weil dadurch die Ausgleichströme und -leistungen verkleinert werden, und auch weil dadurch unerwünschte Rückwirkungen auf die Turbinenregler eher vermieden werden können. Ferner erfolgt in vielen Fällen das Intrittziehen ausser Tritt gefallener Synchronmaschinen bei niedriger Erregung bedeutend leichter. Der Überstromregler soll daher eine Verzögerung haben, die ungefähr der vom Selektivschutz benötigten Zeit entspricht. Sofern die Störung nachher noch besteht, soll der Überstromregler ansprechen, darf aber nicht zu tief entregen. Bei sehr heftigen Kurzschlüssen, wie dreipoligen Sammelschienenkurzschlüssen, lässt man den Überstromregler mit Vorteil sofort wirken. Denn in diesem Fall kann die Stabilität doch nicht aufrecht erhalten werden; dann sollen die Kurzschlußströme möglichst rasch verkleinert werden.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass die Grundlage einer guten Stabilität die zweckmässige Anlage des Netzes ist, wozu vor allem genügend starke Übertragungsleitungen gehören. Das beste Mittel, um die Stabilität auch bei Kurzschlüssen zu gewährleisten, ist ein rasch wirkendes Selektivschutzsystem, wobei kurze Relais- und kurze Schalterzeiten gleich wichtig sind. In vielen Fällen lässt sich die Stabilität bei Kurzschlüssen durch Stosserregung verbessern, jedoch nur dann, wenn diese ausserordentlich rasch wirkt (innerhalb weniger Hundertstel-Sekunden). Auch der Überstromregler kann bei passender Verwendung die Stabilität günstig beeinflussen. Dabei kann er sehr wohl mit einer Stosserregungsschaltung so kombiniert werden, dass bei einem Kurzschluss zunächst nur diese wirkt und der Überstromregler erst dann eingreift, wenn die Maschinen trotz allem ausser Tritt fallen oder wenn der Kurzschluss nach der normalen Abschaltzeit des Selektivschutzes noch weiter dauert.

(MS 530)

Dr. W. Wanger.

UMBAU VON ZWEI BENZIN-ELEKTRISCHEN TRIEBWAGEN DER SCHMALSPURBAHN DIEKIRCH-VIANDEN (LUXEMBURG).

Dezimalindex 621. 335. 4. 033. 44. (435. 9).

Auf der rund 14 km langen, sehr kurven- und steigungsreichen Strecke Diekirch-Vianden der luxemburgischen Schmalspurbahn verkehrten in den Jahren 1924—1936 ausser den von Dampflokomotiven geführten Zügen zwei benzin-elektrische Triebwagen, die bereits im Jahre 1912—13 den Vorortsverkehr Luxemburg-Eich vermittelten, dann aber während der ganzen Dauer des Weltkrieges und darüber hinaus bis zum Jahre 1924 in einem Lokomotivschuppen untergebracht waren. Diese Triebwagen waren mit je einem Benzinmotor von 90 PS bei 950 U/min und einer elektrischen Leistungsübertragung der Westinghouse-Gesellschaft in

Le Havre ausgerüstet. Nach zwölfjährigem, strengem Betrieb erwies sich eine Erneuerung der Maschinenanlagen als erforderlich. Dieser Anlass wurde dazu benützt, den infolge unhaltbarer Zustände mit dem Dampflokomotivdienst und der stets zunehmenden Automobilkonkurrenz unwirtschaftlich arbeitenden Betrieb zu modernisieren im Sinne einer Kürzung der Fahrzeiten und Verminderung der Betriebskosten. Von der Bahnverwaltung wurde beschlossen, die Benzinmotoren durch leistungsfähigere Dieselmotoren zu ersetzen und die elektrische Ausrüstung und Steuerung den neuen Verhältnissen anzupassen. Gemäss Pflichten-

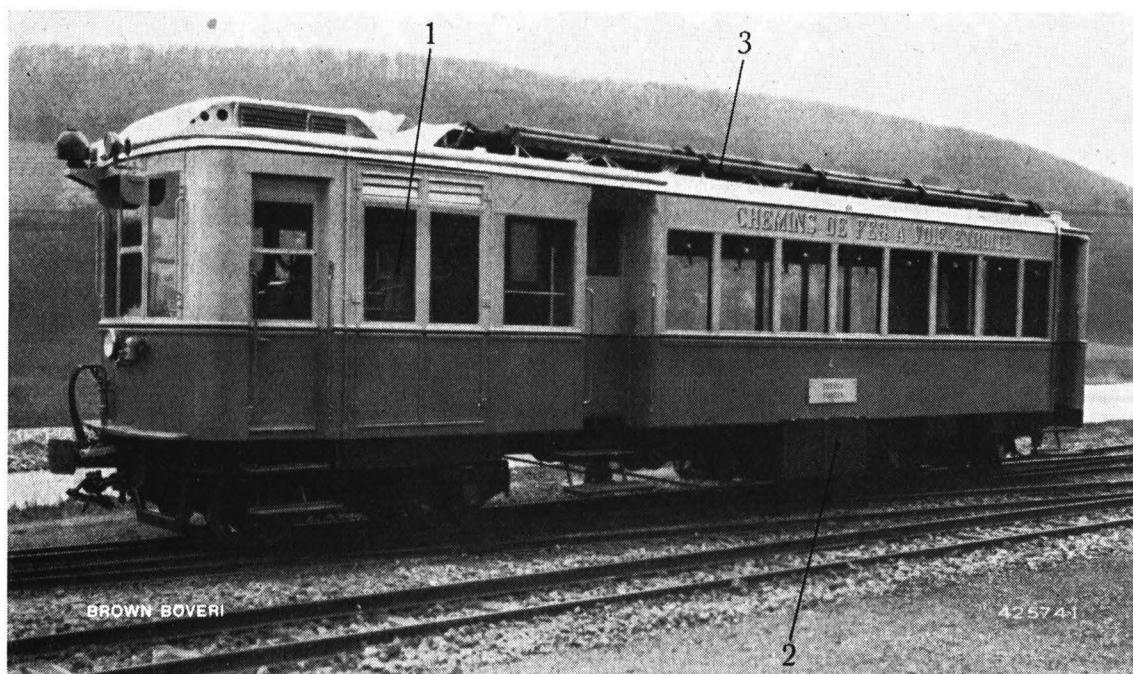


Abb. 1. — Triebwagen Nr. 4 der Schmalspurbahn Diekirch-Vianden, nach dem Umbau auf diesel-elektrischen Betrieb.

- 1 = Maschinenraum mit quer zur Fahrzeuglängsachse eingebauter Diesel-Generator-Gruppe.
 2 = Triebmotoren-Drehgestell.
 3 = Kühler für das Umlaufwasser des Dieselmotors.

heft war die Leistungsfähigkeit der umzubauenden Triebwagen derart zu steigern, dass mit einem Anhängewagen von 13 t Dienstgewicht die bisherige Fahrzeit von 42 auf 29 Minuten vermindert werden konnte, einschliesslich der sieben Zwischenhalte je von 30 Sekunden.

Der Auftrag auf den Umbau der beiden Triebwagen wurde auf dem Submissionsweg an die Compagnie Industrielle pour l'Application des Procédés Brown Boveri, Brüssel, zur Ausführung durch die A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, erteilt.

Abb. 1 zeigt einen der Triebwagen nach dem Umbau. Die Hauptdaten des Fahrzeuges sind folgende:

Spurweite	1000 mm
Gesamtlänge, über die Puffer gemessen	13348 mm
Achsfolge	2—2 A, zwei zweiachsige Drehgestelle, wovon eines mit zwei Triebmotoren ausgerüstet.

Durchmesser der Trieb- und Laufräder	800 mm
Dienstgewicht ohne Nutzlast	28 t
Dienstgewicht einschliesslich Nutzlast	32 t
Anzahl Sitzplätze	32
Anzahl Stehplätze	20
Grundfläche des Gepäckraumes	rd. 2,5 m ²
Grundfläche des Maschinenraumes mit zugehörigem Führerstand	rd. 6 m ²
Dauerleistung des Dieselmotors	180 PS bei 1180 U/min
Grösste Fahrgeschwindigkeit .	60 km

Der kräftig gebaute *Wagenteil* hat sich während des zwölfjährigen Dienstes sehr gut gehalten, sodass beim Umbau auf diesel-elektrischen Betrieb ausser der Verstärkung der Aufhängfedern des Drehgestelles

unter dem Maschinenraum und einem Neuanstrich keine Änderungen erforderlich waren. Die vorhandene, nur auf das Triebdrehgestell wirkende Westinghouse-Druckluftbremse wurde ergänzt durch Einbau eines Bremszylinders mit Radklotzbremse in das Laufdrehgestell unter dem Maschinenraum. Beim Ersatz der alten Triebmotoren vollständig geschlossener Bauart durch leistungsfähigere mit Eigenlüftung musste wegen der geringen Abmessungen der letzteren eine besondere Trägerkonstruktion für den Einbau verwendet werden. Die Festlegung der Diesel-Generator-Gruppe bot insofern gewisse Schwierigkeiten, als letztere quer zur Fahrzeuglängsachse in einem Maschinenraum von gegebenen Abmessungen eingebaut werden musste und sehr raschlaufende Dieselmotoren

aus verschiedenen Gründen nicht in Frage kommen konnten.

Die *Dieselmotoren* (Abb. 2) sind von der Humboldt-Deutzmotoren A.-G., Köln-Deutz, geliefert worden. Die verwendete Dieselmotortype ist eine nach dem Vorkammersystem gebaute Sechszylinder-Viertaktmaschine von 180 PS Dauerleistung bei 1180 U/min und 200 PS Stundenleistung bei 1180 U/min (vier feste Betriebsdrehzahlen: 600 U/min Leerlauf, 630—850—1100—1180 U/min Vollast).

Als Regler dient ein schnellaufender Pendelregler mit Schneidenlagerung, der über einem Öldruck-Servomotor durch Veränderung des Kolbenhubes der Brennstoffpumpe mit Hilfe eines schrägen Nockens die Fördermenge (Füllung) beeinflusst. Der Brennstoffverbrauch beträgt bei Vollast 190 g/PS_h und der Schmier-

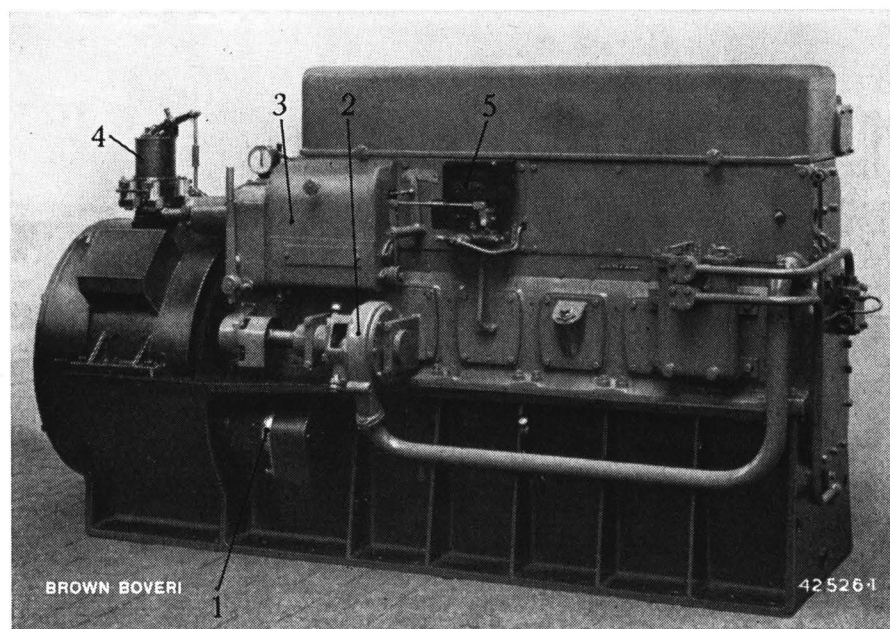


Abb. 2. — Diesel-Generator-Gruppe.

- 1 = Anlassmotor.
 2 = Kühlwasserpumpe.
 3 = Fliehkraftregler.
 4 = Elektro-pneumatischer Drehzahlversteller.
 5 = Servofeldregler.

ölverbrauch 3,5 g/PS_h. Das Anlassen des Dieselmotors erfolgt durch zwei angebaute Anlassmotoren je von 6 PS, die von einer Akkumulatorenbatterie gespeist werden. Bei kaltem Dieselmotor werden vor dem Anlassen die in die Vorkammer hineinragenden Glühkerzen eingeschaltet.

Der Dieselmotor ist zusammen mit dem starrgekuppelten Generator auf einem sehr kräftigen Fundamentrahmen aufgeschraubt, der seinerseits unter Zwischenlage von 20 mm dickem Filz auf dem Wagenkastenrahmen befestigt ist. Der Ein- und Ausbau der Dieselgeneratorgruppe erfolgt von der Seite her, ohne Entfernen des Wagendaches.

Gemäss Pflichtenheft der Bahngesellschaft war der vorhandene, auf dem Fahrzeugdach angeordnete Wasserkühler zu verwenden und durch Anbringen entsprechender, gleichartiger Zusatzkühler den neuen Leistungsverhältnissen anzupassen. Der Kühler besteht aus Rippenrohren, die eine Dachfläche von rd. 17 m² bedecken. Ein ganz neuer Kühler könnte mit wesentlich geringeren Abmessungen und besserer Wirksamkeit ausgeführt werden.

Beim ursprünglichen benzin-elektrischen Maschinensatz waren der Motorkompressor für die Bremsluft-erzeugung (Normalleistung 6,5 PS bei 600 V) und die Heizanlage (3 kW bei 550 V) an den Generator angeschlossen, während für die Aufladung der 12-V-Beleuchtungsbatterie eine kleine, durch Riemen angetriebene Lademaschine verwendet wurde. Beim Umbau war für die Anordnung und Auslegung der neuen *elektrischen Ausrüstung* dem Umstand Rücksicht zu tragen, dass der Motorkompressor und die Heizanlage unverändert übernommen werden mussten, wobei mit einer Erneuerung der Beleuchtungsanlage, deren Spannung auf 24 V heraufgesetzt werden sollte, zu rechnen war. Die Spannungsverhältnisse der Haupt- und Hilfsbetriebstromkreise waren somit zum vornherein festgelegt. Der fliegende Anbau eines Hilfs-generators an die Diesel-Generator-Gruppe war bei der äussersten Beschränkung in der Baulänge des Maschinensatzes ausgeschlossen. Von der Anordnung des Hilfsgenerators auf dem Hauptgenerator und Antrieb durch Riemen wurde auf Grund früherer, schlechter Erfahrungen abgesehen. Als einfache und zweckmässige Lösung ergab sich die Anordnung einer Spannungs-umformergruppe, mit der die veränderliche Spannung des Generators auf die praktisch konstante Spannung von 24 V umgesetzt wird. Die grundsätzliche Schaltung ist folgende: am Generator sind angeschlossen die beiden dauernd parallel geschalteten Triebmotoren, der Motorkompressor, die elektrische Heizung für den Triebwagen und Anhängewagen und die Spannungs-umformergruppe. Von der Spannungsumformergruppe werden gespeist: die Hauptgenerator-Fremderregung, die Anlassbatterie, die Steuer- und Beleuchtungsstromkreise.

Der eigenventilierte *Generator* (Abb. 3) weist nur ein als Rollenlager ausgebildetes Schildlager auf der Kollektorseite auf; auf der Kupplungsseite stützt sich der Generatoranker auf das Lager des Dieselmotors ab. Der Zahnkranz, in dem die Ritzel der beiden Anlassmotoren des Dieselmotors eingreifen, ist am Generatorlüfter befestigt.

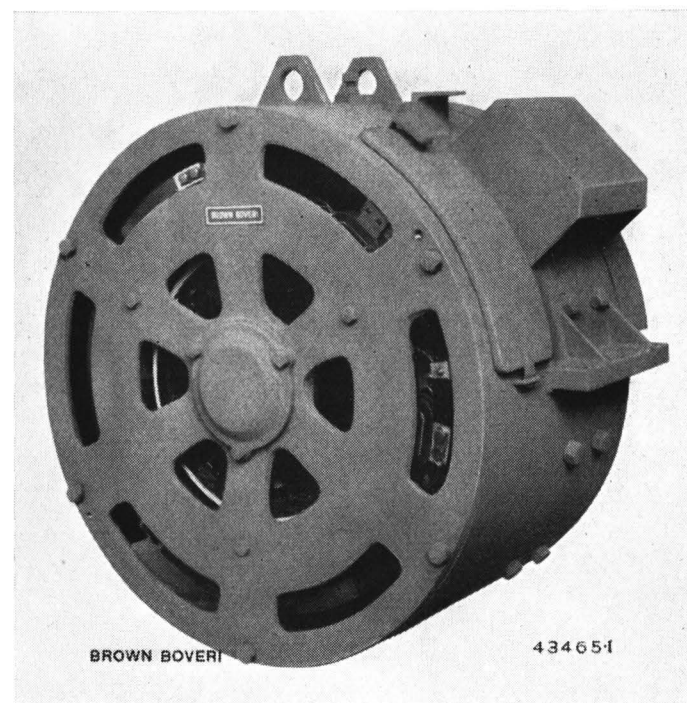


Abb. 3. — Generator in einlageriger Bauart für starre Kupplung mit dem Dieselmotor.
Ansicht des Schildlagers des Generators.

Der als sechspolige Maschine für eine Stundenleistung von 112 kW (402 V, 278 A) und eine Dauerleistung von 116 kW (546 V, 212 A) bei 1180 U/min gebaute Generator hat Eigen- und Fremderregung und ferner eine Gegencompoundwicklung zur Begrenzung des Höchststromes beim Anfahren. Die Triebmotorstromkreise enthalten keine Maximalstromrelais.

Die *Triebmotoren* sind eigenventilierte vierpolige Reihenschlussmotoren in Tatzenlagerbauart. Die Anker weisen Rollenlager auf; die Tatzenlager sind Gleitlager mit Kissenschmierung. Die Motoren sind für eine Stundenleistung je von 64,5 PS (402 V, 133 A) bei 922 U/min entsprechend einer Fahrgeschwindigkeit von 24,5 km/h bei Triebrädern von 760 mm Durchmesser und einem Zahradübersetzungsverhältnis von 1:5,78 ausgelegt. Die zulässige grösste Betriebsdrehzahl beträgt 2800 U/min. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlich gleichbleibenden Leistungsabgabe von 15 PS (einschliesslich Heizung) an die Hilfsbetriebe, ergeben sich bei der Dauerleistung des Dieselmotors folgende Zugkräfte am Radumfang und Fahrgeschwindigkeiten:

bei der Anfahrt: 2800 kg von 0 bis etwa 9,5 km/h;
bei Stundenlast der elektrischen Leistungsübertragung: 1380 kg bei 24,5 km/h;
bei Dauerlast der elektrischen Leistungsübertragung: 860 kg bei 40 km/h.

Die im Maschinenraum angeordnete *Spannungs-umformergruppe* besteht aus einem Gleichstrom-Compoundmotor in gemeinsamem Gehäuse zusammengebaut mit einem Gleichstrom-Nebenschlussgenerator. Der Motor ist unmittelbar an die Klemmen des Hauptgenerators angeschlossen und wird somit unter einer

veränderlichen Spannung von 220—630 V gespeist. Der Generator der Spannungsumformergruppe liefert eine Spannung von 26—30 V für die Aufladung der Anlassbatterie und die Speisung der Steuer- und Beleuchtungsstromkreise. Die Spannungsregulierung des Generators erfolgt durch Beeinflussung seiner Erregung mit Hilfe eines Spannungsreglers.

Die *Akkumulatorenbatterie* (Bleibatterie, Fabrikat Tudor) besteht aus vier Kasten zu sechs Elementen von 320 Ah Kapazität bei fünfstündiger Entladung. Die normale Entladespannung beträgt 22 V bei 64 A.

Die *Steuerung*. Für die Einstellung der Zugkraft und Geschwindigkeit sowie für weitere, für den Fahrbetrieb nötige Schaltungen ist in jedem Führerstand ein Steuerkontroller angeordnet, der folgende Betätigungswalzen aufweist: eine Hauptwalze (Fahrwalze) mit einer Abschlußstellung, einer Nullstellung und sieben Betriebstellungen; eine Nebenwalze mit einer Nullstellung und vier Betriebstellungen. Mit der Fahrwalze stellt der Führer Drehzahl und Leistung des Dieselmotors ein. Mit der Nebenwalze wird die Drehrichtung der Triebmotoren festgelegt; sie ist zu diesem Zweck mit Starkstromkontakten versehen. Die Nebenwalze dient ferner zu Umschaltzwecken der Hilfsbetriebe bei Fahrt und Stillstand des Triebwagens bei laufendem Dieselmotor.

Für die Änderung der Federspannung des Fliehkraftreglers bei der Drehzahleinstellung des Dieselmotors dient der in Abb. 4 dargestellte elektro-pneumatische *Drehzahlversteller*. Im Gehäuse des Drehzahlstellers sind fünf durch Magnetventile gesteuerte Druckluftkolben angeordnet, die über ein Gestänge die Reglerfeder verstellen (Abb. 2). Zum Anlassen des

Dieselmotors wird die Leerlaufdrehzahl eingestellt, wodurch der Regler die für ein sicheres Anspringen nötige Anlassfüllung gibt. Das Abstellen des Dieselmotors erfolgt durch Entregen aller Magnetventile. Die Reglerfeder wird dadurch soweit entspannt und die Füllung in einem solchen Masse vermindert, dass der Motor stillsteht.

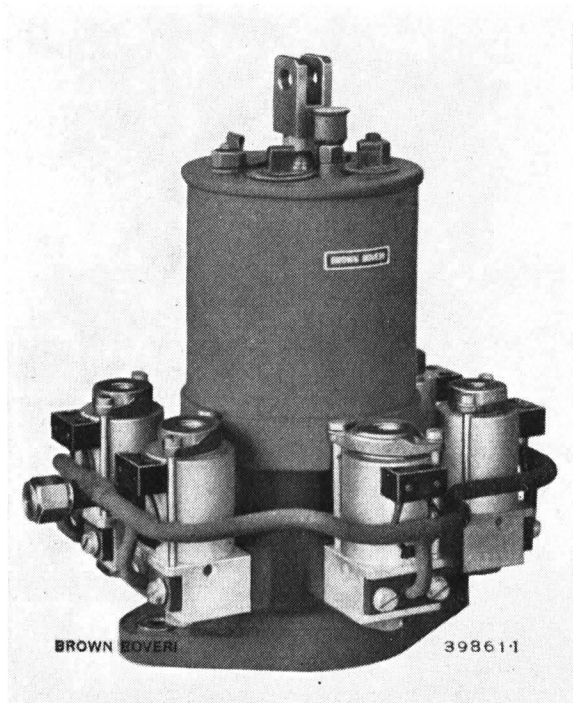


Abb. 4. — Elektro-pneumatischer Drehzahlversteller mit fünf Druckluftkolben für sechs Einstellstufen, einschliesslich Nullstellung. Gesamter Verstellweg 50 mm; Stufen 1 bis 4 beliebig einstellbar. Verstellkraft auf und ab: 10 kg bei einem kleinsten Druck von 3 kg/cm² Überdruck.

Die Triebwagen sind mit der Brown Boveri-Servofeldreglersteuerung¹⁾ ausgerüstet. Um bei den vier festen Betriebsdrehzahlen des Dieselmotors sieben Regulierstufen zu erhalten, wird durch am Servofeldregler angebaute Magnete das Drehmoment bei unveränderter Drehzahl abgestuft. Die Leistungseinstellung für die verschiedenen Kontrollerstufen ist folgende:

Fahrstufe	Dieselmotor		Leistung	
	Drehzahl	Drehmoment %	PS	in %
1	630	85	82	45
2	850	85	110	61
3	850	100	130	72
4	1100	85	143	79
5	1100	100	168	93
6	1180	100	180	100
7	1180	111	200	111

Abb. 5 zeigt die Generator-Charakteristiken und Regulierkurven der Servofeldreglersteuerung für die

drei festen Betriebsdrehzahlen 1180, 1100 und 630 U/min. Bei 25 V Fremderregung ergibt sich ein grösster Anfahrstrom von 475 A (Schnittpunkt der Kurve 1 mit der Widerstandsgeraden 4). Der Fremderregungsstromkreis des Generators besteht aus zwei parallelen Zweigen, von denen der eine die feste „Grunderregung“ liefert, während der andere durch den Servofeldregler ausreguliert wird. Im Falle eines Defektes an einem Triebmotor wird gleichzeitig mit dessen Ausserbetriebsetzung die „regulierbare Erregung“ und damit der Servofeldregler abgeschaltet. Die Steuerung arbeitet nun als „Charakteristi-

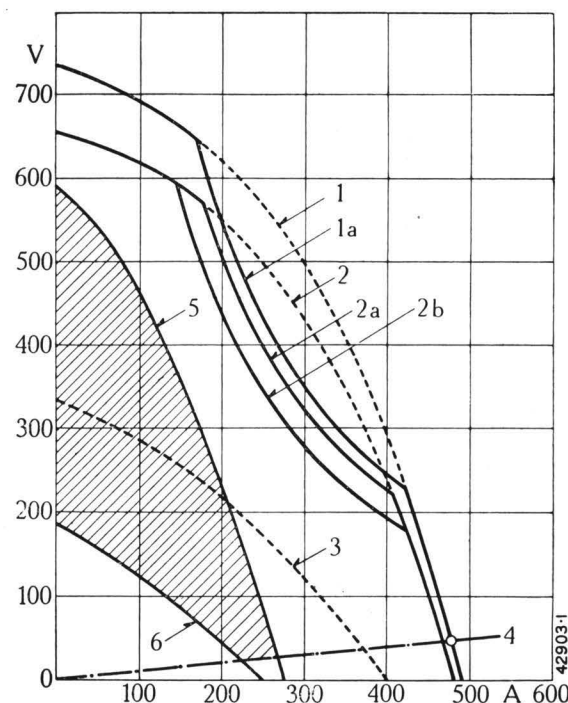


Abb. 5. — Generator-Charakteristiken und Regulierkurven der Servofeldreglersteuerung.

1, 2, 3 = Spannung in Abhängigkeit der Stromstärke bei den konstanten Betriebsdrehzahlen von 1180, 1100 und 630 U/min und höchster Fremderregung bei 25 V.

1a, 2a, 2b = Durch den Servofeldregler ausregulierte Generator-Spannung in Funktion der Stromstärke bei 1180 U/min und 100% Drehmoment, 1100 U/min und 100% Drehmoment, 1100 U/min und 85% Drehmoment.

4 = Widerstandsgerade des Belastungsstromkreises.

5, 6 = Spannung in Abhängigkeit der Stromstärke bei geschwächter Fremderregung (Erregerstromzweig der Servofeldregulierung abgeschaltet) bei konstanten Drehzahlen von 1180 bzw. 630 U/min (Betrieb mit nur einem Triebmotor).

¹⁾ Brown Boveri Mitteilungen, Jahrgang 1935, Heft Nr. 12, S. 239.

ken-Steuerung“ und gestattet die Aufrechterhaltung des Betriebes. Die Verhältnisse sind so gewählt, dass bei normaler Fremderregungsspannung der betriebstüchtige Triebmotor nur innerhalb des von den Charakteristiken 5 und 6 eingeschlossenen Gebietes belastet werden kann und dass auch bei höchster Fremderregungsspannung der zulässige Anfahrstrom nicht überschritten wird.

Die Steuerung ist mit einer *Sicherheitseinrichtung* kombiniert, die unmittelbar in Wirkung tritt, wenn während der Fahrt das Sicherheitspedal losgelassen wird.

Betriebsergebnisse.

Mit dem ersten umgebauten Triebwagen sind am 30./31. März 1936 und mit dem zweiten am 7./8. Juli 1936 die Abnahmeprobefahrten ausgeführt worden, die störungsfrei und zur grössten Zufriedenheit der Bahngesellschaft verliefen. Die Bedingungen des Pflichtenheftes wurden in jeder Beziehung erfüllt. Die beiden Fahrzeuge stehen seither im fahrplanmässigen Dienst und haben bis Ende August 1936 mehr als 15 000 km ohne die geringste Störung zurückgelegt (durchschnitt-

liche Fahrgeschwindigkeit rd. 30 km/h). Ein Vergleich der Brennstoffkosten beim Dampf-, benzin-elektrischen und diesel-elektrischen Betrieb ergibt, auf eine Hin- und Rückfahrt Diekirch-Vianden (rd. 28 km) bezogen, folgendes Bild:

- a) Dampfbetrieb: 250 kg Brikette, die Tonne zu luxemb. Fr. 144,75 plus 10% Zuschlag für Anheizen Fr. 39,80
- b) 90 PS benzin-elektrischer Triebwagen
28 l Benzin zu luxemb. Fr. 1,80 „ 50,40
- c) 180/200 PS diesel-elektr. Triebwagen
20 kg Gasöl zu luxemb. Fr. 0,52 „ 10,40

Ausser der wesentlich grösseren Leistungsfähigkeit der auf diesel-elektrischen Betrieb umgebauten Triebwagen wird gegenüber dem früheren Betrieb mit Benzinmotor je Hin- und Rückfahrt eine Brennstoffersparnis von luxemb. Fr. 40.— erzielt. Gegenüber dem Dampfbetrieb ist die Ersparnis etwas geringer; dafür ist in Betracht zu ziehen, dass durch den Wegfall des Heizers eine weitere nennenswerte Ersparnis erreicht wird.

(MS 522)

A. E. Müller.

KLEINE MITTEILUNGEN.

Die Umschlagsanlagen des Kohlenhafens Born (Holland).

Dezimalindex 621.34:621.869.274(492).

Die Umschlagsanlagen des Kohlenhafens Born am Julianakanal in Holland gestatten jährlich zwei Millionen Tonnen Kohle umzuschlagen und zu lagern. Eine so grosse Umschlagsleistung konnte nur durch moderne und den Betriebsverhältnissen genau angepasste Verladeeinrichtungen erreicht werden. Da die Kohle in der Regel von Eisenbahnwagen in Kähne umgeschlagen wird, konnten Waggonkipper als Verladeeinrichtung gewählt werden. Mit dieser modernen Einrichtung erzielt man eine grosse Umschlagsleistung und bei entsprechenden Massnahmen auch eine weitgehende Schonung der Kohle.

Schon im Jahre 1934 nahmen die Niederländischen Eisenbahnen einen Hochleistungswaggonkipper in Betrieb. Diese Verladeeinrichtung, deren mechanischer Teil von der Demag in Duisburg und die elektrische Ausrüstung von Brown Boveri geliefert wurde, dient besonders für den Umschlag von Industriekohlen und gestattet im Durchschnitt rd. 300—350 Eisenbahnwagen je von rd. 20 Tonnen Nutzlast in 24stündigem Betrieb umzuschlagen. Dieser Waggonkipper von 45 Tonnen Tragkraft besteht aus einem feststehenden Portal und aus einer fahrbaren Laufkatze, an welcher die kippbare Plattform hängt. Die Anlage wird von einer an einem Fusse des Portals befestigten Führerkabine gesteuert. Ausserdem sind eine Reihe Spills, Drehscheiben und sonstige Hilfseinrichtungen vorhanden, mit

welchen die vollen Wagen leicht auf die Plattform gebracht und die leeren Wagen auf die gewünschten Geleise zurückgesandt werden.

Das Hubwerk wird von einem Dreiphasen-Asynchronmotor von 125 kW bei 40% ED und bei 725 U/min in Brown Boveri untersynchroner Senkbremsschaltung mit Umkehrphase angetrieben. Diese untersynchrone Bremschaltung gestattet die Plattform während der Kippbewegung elektrisch abzubremesen sowie die Motordrehzahl in weiten Grenzen, sogar unterhalb der synchronen Drehzahl, herunterzuregulieren. Die Betriebsergebnisse dieses Waggonkippers waren derart günstige, dass die Niederländischen Eisenbahnen sich entschlossen, eine zweite, nach den gleichen Gesichtspunkten gebaute Anlage aufzustellen.

Der auf dem Titelblatt dieses Heftes dargestellte Waggonkipper wurde im Jahre 1935 dem Betrieb übergeben; er wurde ebenfalls für eine Tragkraft von 45 Tonnen vorgesehen und dient besonders für den Umschlag von Hausbrandkohlen. Die Anordnung des mechanischen Teiles, der von der A.-G. J. Pohlig in Köln, geliefert wurde, weicht von jener der ersten Anlage ab, und erinnert eher an die klassische Bauart einer Verladebrücke mit oben laufendem Drehkran. Die fahrbare Brücke ist 59 m lang und überspannt sechs parallele Bahngleise. Am oberen Teil des Hauptträgers sind die Schienen für den Drehkran befestigt. Die vollen Kohlenwagen werden auf eine Plattform gebracht, verriegelt und dann wird die Plattform samt Wagen in die im Titelbild dargestellte Stellung gehoben. Hierbei wird die Plattform gekippt; die Kohle fällt in einen Trichter und wird durch Aufgabe-Schurren auf ein Transportband geführt, das auf der ganzen Brückenlänge

arbeitet. Aus dem Titelbild geht hervor, dass das wasserseitige Ende dieses Transportbandes gesenkt werden kann, um die Kohle sanft in die Kähne gleiten zu lassen, ohne dass sie Gefahr läuft, zerkleinert zu werden, was sicher vorkommen würde, wenn sie einfach von einer gewissen Höhe in den Kahn herunterstürzen würde.

Die Umschlagsleistung dieser Anlage beträgt 160 bis 190 Wagen bei einem täglichen Betrieb von 16 Stunden.

Die elektrische Ausrüstung wird durch Drehstrom 380 V, 50 Per/s gespeist. Das Hub- und Kippwerk weist zwei Motoren je von 155 kW bei 40% ED auf. Das Kranfahrwerk wird durch einen Motor von 80 kW, das Portalfahrwerk durch einen solchen von 125 kW angetrieben. Während sämtliche Dreh- und Fahrtriebe normale Umkehrschaltungen aufweisen, wurde für das Hub- und Kippwerk wiederum die Brown Boveri untersynchrone Senkbremsschaltung mit Umkehrphase gewählt. Bei dieser Schaltung erfolgt die elektrische Bremsung lediglich durch Umkehren einer Statorphase um 180° elektrisch. Auch während dieser Phasenumkehrung entwickelt der Motor ein Drehmoment, da das magnetische Feld in der Maschine bestehen bleibt. Die Schaltung weist somit keine Freifallstellung auf, und die Plattform kann daher auch bei falschem Steuern keine zu grosse Geschwindigkeit annehmen.

Diese Schaltung gestattet, sehr günstige Verladeverhältnisse bei niedrigen Stromkosten zu erreichen; sie ermöglicht sowohl über- wie auch untersynchrone Bremsung, d. h. die Last kann über grosse Wegstrecken schnell mit jeder gewünschten Geschwindigkeit gesenkt und elektrisch bis zum Stillstand abgebremst werden. Es ist zu beachten, dass diese Schaltung nicht mehr Apparate benötigt, als eine gewöhnliche Umkehrschaltung, d. h. es sind lediglich Controller, Widerstand und Bremslüfter mit den notwendigen End- und Verriegelungsschaltern erforderlich. Im vorliegenden Fall wurden unter Berücksichtigung der verhältnis-

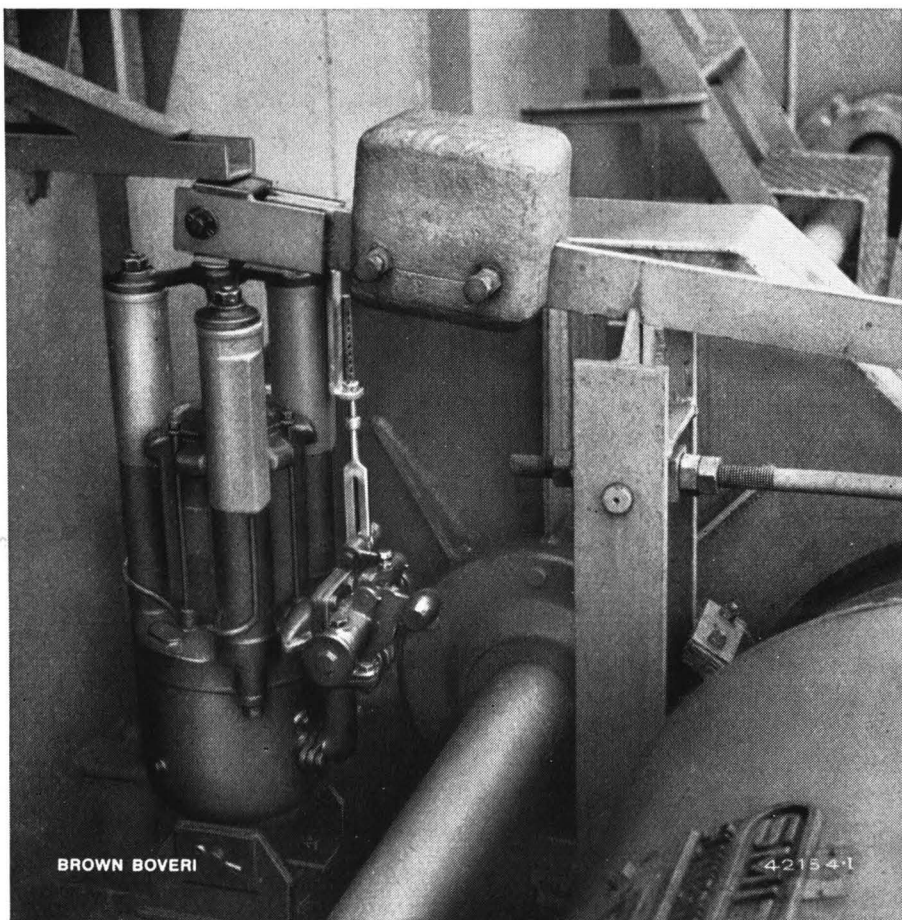


Abb. 1. — Elektrohydraulischer Drücker mit Staubschutz und einstellbarer Dämpfung, aufgestellt in einem Hochleistungshubwerk.

mässig grossen auftretenden Leistungen in weitem Masse Schützensteuerungen verwendet. Es ist auch interessant zu erwähnen, dass für die meisten Antriebe die mechanischen Stopfbremsen nicht durch Bremslüftmagnete, sondern durch den neuen elektrohydraulischen Drücker, Bauart Brown Boveri, angetrieben werden (Abb. 1).

Letztere Anlage befindet sich seit mehr als einem Jahr in Betrieb und hat, wie die erste, sehr günstige Betriebsergebnisse ergeben. Die massgebenden technischen Stellen der Niederländischen Eisenbahnen äusserten sich sehr lobend, besonders auch über die untersynchrone Senkbremsschaltung, die eine einfache und unbedingt sichere Steuerung sämtlicher Bewegungen der Anlage gestattet.

(MS 527)

G. Rochat.

Vereinfachung der selbsttätigen Reguliereinrichtung von elastischen Netzkupplungsumformern.

Dezimalindex 621.314.26.078.

Es dürfte ziemlich bekannt sein, dass die verschiedenen von Brown Boveri bis heute ausgeführten Umformergruppen zur elastischen Netzkupplung, so unter anderem die klassisch gewordenen Gruppen von Mühleberg¹⁾ und Seebach²⁾, nicht nur eine Regulierung der Austauschleistung auf gleichbleibenden Wert, sondern auch in Abhängigkeit der Frequenz des einen oder andern Netzes gestatten. Die Betriebsergebnisse sind sehr gute.

Wenn auch zur Einhaltung einer gleichbleibenden Leistung ziemlich einfache Regulierorgane genügen, so sind die Apparate zur Regulierung in Abhängigkeit der Frequenz kostspielig.

Solange es sich um Netzkupplungsgruppen grosser Leistung handelt, belasten diese Apparate den Gesamtgestehungspreis nur unerheblich, sie fallen aber zu sehr ins Gewicht bei verhältnismässig kleinen Gruppen.

Nun ist aber die Regulierung in Funktion der Frequenz für diese letzteren ebenfalls wünschenswert und zwar aus mehr als einem Grunde: man will nicht nur möglichst lange die Frequenz des gespeisten Netzes durch Aufnahme der nötigen Zusatzenergie durch die Gruppe halten, sondern wenn der Generator allein arbeiten muss, ist es auch wünschenswert über Strom unveränderlicher Frequenz zu verfügen. Im besonderen soll auch das Durchbrennen der Gruppe vermieden werden, da sie in diesem Falle, wenn sie auf konstante Leistung reguliert und nicht mit Organen zur Geschwindigkeitsbegrenzung versehen wird, wie eine Turbine mit vollgeöffnetem Leitapparat durchbrennen könnte. Es muss also eine zusätzliche Regulierung in Abhängigkeit der Generatorfrequenz vorgesehen werden.

Eine Handregulierung würde nicht nur ein zu oftmaliges Eingreifen des Personals bedingen, sondern auch nicht die nötige Sicherheit bieten.

So ist man dazu gekommen, eine vereinfachte selbsttätige Regulierung zu entwerfen. Um ihre Wirkungsweise leicht verständlich zu machen, sei das Prinzip der Brown Boveri-Scherbius-Regulierung kurz in Erinnerung gerufen.

¹⁾ Siehe Druckschrift Nr. 1344 D: Die Umformeranlage Mühleberg.

²⁾ Siehe Bull. SEV, Jahrgang 1934, Nr. 3.

Die Leistung einer Asynchronmaschine ist bekanntlich eine Funktion der in ihrem Läufer induzierten EMK. Gelingt es also, diese EMK in jedem Zeitpunkt durch eine gleich grosse, entgegengesetzte EMK von gleicher Frequenz aufzuheben, so wird in jedem Zeitpunkt die Leistung Null sein, unabhängig von der Drehzahl. Will man, dass die auf diese Weise neutralisierte Maschine eine regulierbare Leistung aufnehme, so genügt es, im Läufer eine zweite Spannung von geeigneter Frequenz zu erzeugen, auf die nach Belieben eingewirkt werden kann und welche allein die neue Leistung der Maschine bestimmt.

Die Gegen-EMK wird durch die Scherbius-Maschine erzeugt, eine mit Schlupffrequenz erregte Kollektormaschine, die an ihren Bürsten wieder eine Spannung mit Schlupffrequenz liefert.

Ursprünglich wurde bei der sogenannten Seiz-Schaltung diese elektromotorische Kraft in der Scherbius-Maschine mit Hilfe einer Nebenschlusserregung erzeugt, die dem Rotor der Asynchronmaschine entnommen wurde.

Diese Art der Kompensation war aber einerseits nicht genau und gab andererseits Anlass zu Selbsterregungserscheinungen.

Erst durch eine nur *teilweise* Aufhebung der Läufer-EMK durch dieses Mittel ist es gelungen, die Selbsterregung zu unterdrücken.

Der *andere Teil* wird dann durch einen Nulleistungsregler kompensiert.

Man kann mit Hilfe des letzteren die Läufer-EMK auch vollständig kompensieren und auf die Nebenschlusserregung verzichten.

Der Regler wirkt folgendermassen:

Seinem Prinzip gemäss befindet er sich nur dann im Gleichgewicht, wenn die gemessene Leistung gleich Null ist. Nun nimmt, wie bereits gesagt, bei einmal kompensierter Läufer-EMK die Asynchronmaschine keine Leistung mehr auf. Der Regler wird also in den Statorkreis eingeschaltet. Solange die Maschine noch Leistung aufnimmt, d. h. ihre Läufer-EMK von Null abweicht, wird sich der Regler verstellen und auf die Erregung der Scherbius-Maschine einwirken (über eine zweite ebenfalls Schlupffrequenz aufweisende Kollektormaschine), bis die Rotor-EMK der Asynchronmaschine wieder kompensiert und in der Folge die in ihren Stator fliessende Leistung Null geworden ist.

Der Läufer dieser Maschine kann jetzt gegenüber dem Statorfeld einen beliebigen Schlupf aufweisen.

Damit die Asynchronmaschine eine gegebene Leistung liefere, bleibt noch übrig, dem Läufer eine zweite EMK von geeigneter Grösse (und ebenfalls von Schlupffrequenz) zuzuführen. Die Leistung wird einzig noch von dieser Zusatzspannung abhängen, die Drehzahl kann eine beliebige sein. Die Erzeugung dieser zweiten Spannung geschieht in der Scherbius-Maschine durch Überlagerung eines von einem Potentiometer abgenommenen Stromes über denjenigen des Reglers, der vom Stator herkommt. Da der

Regler definitionsgemäss eine Leistung Null misst, muss die Summe dieser beiden Ströme Null werden. Der Regler wird sich also verstellen und die Scherbius-Maschine so lange erregen, bis der Strom der Asynchronmaschine entgegengesetzt gleich demjenigen des Potentiometers ist. In diesem Zeitpunkt hat der Regler seine neue Gleichgewichtslage erreicht. Das Potentiometer bestimmt also den vom Netz kommenden Strom, mit andern Worten, die Leistung der Gruppe hängt von der Einstellung des Potentiometers ab. Einer bestimmten eingestellten Lage entspricht eine gleichbleibende Leistung.

Will man in Abhängigkeit der Frequenz eines der Netze regulieren, so wird das Potentiometer in Funktion dieser Frequenz gesteuert.

Bis vor kurzem war aber die direkte elektrische Regulierung in Funktion der Frequenz nicht ausgeführt worden. Es musste zu elektromechanischen Lösungen zurückgegriffen werden (durch Elektromotor angetriebenes Pendel, das über Gestänge und Übertragungshebel auf ein automatisches Potentiometer wirkt, unter Umständen auch eine synchron mit dem Netz rotierende Tachometerdynamo zur Speisung des Pendelmotors).

Dank des von Brown Boveri kürzlich entwickelten Frequenzreglers lassen sich jetzt diese Organe vermeiden. Die Sektoren und Widerstände des Frequenzreglers übernehmen die Rolle des Potentiometers. Mit Hilfe einer auf dem Reglerdeckel angebrachten Verstellerschraube kann die Gleichgewichtslage des Drehsystems, die für einen gegebenen Frequenzbereich eine konstante Leistung der Gruppe aufzwingt, jederzeit festgelegt werden. Der Regler bleibt normal in Ruhe, die Gruppe arbeitet mit konstanter Leistung; erst wenn die Frequenz ausserhalb des gewählten Bereiches liegende Werte annimmt, greift der Regler ein, um die übertragene Leistung zu beeinflussen. Diese Art der Regulierung eignet sich ganz besonders bei Synchron-

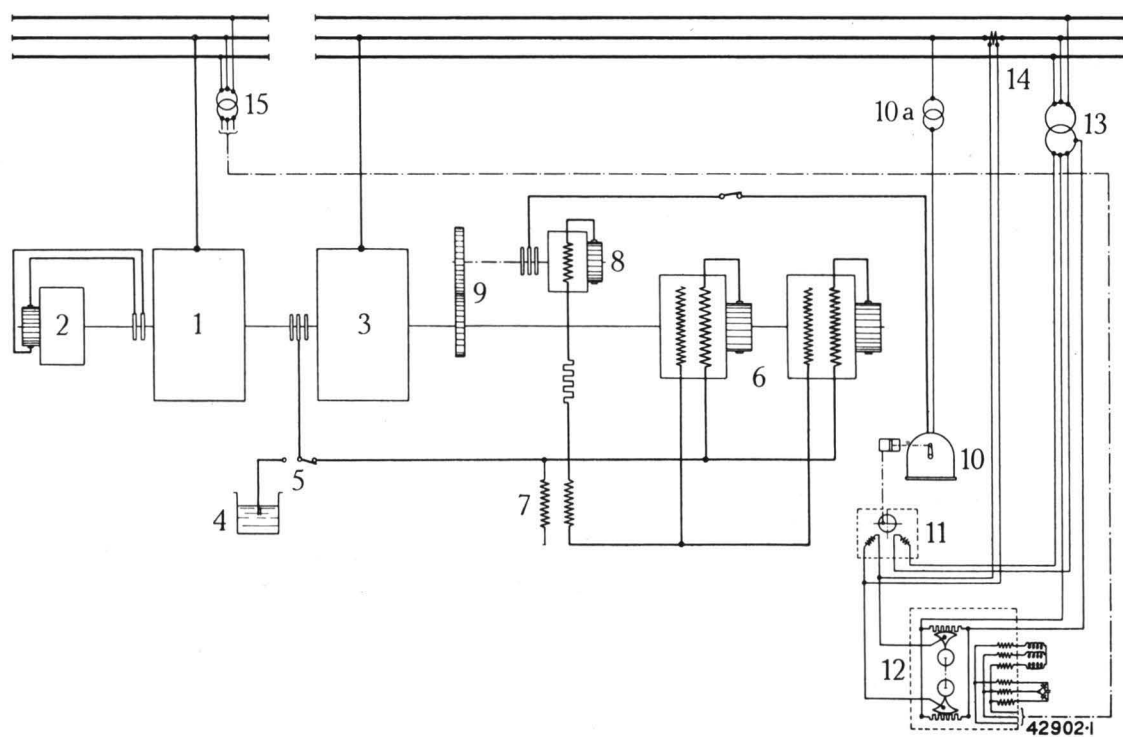


Abb. 1. — Grundsätzliches Schaltbild einer elastischen Umformergruppe mit selbsttätiger Regulierung von Leistung und Frequenz.

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1 = Synchrongenerator. | 9 = Hilfsgetriebe. |
| 2 = Erreger. | 10 = Doppel-Induktionsregler. |
| 3 = Synchronmotor. | 10 a = Hilfstransformator. |
| 4 = Anlasser. | 11 = Nulleistungsregler. |
| 5 = Umschalter. | 12 = Frequenzregler. |
| 6 = Doppel-Scherbius-Maschine. | 13, 15 = Spannungswandler. |
| 7 = Erregertransformator. | 14 = Stromwandler. |
| 8 = Hilfserreger (Frequenzwandler). | |

maschinen im Einzelbetrieb; ihre Drehzahl bleibt, welches auch die Belastungsschwankungen seien, innerhalb gewisser Grenzen unverändert.

Der Frequenzregler ist ähnlich gebaut wie die üblichen Spannungsregler, umfasst aber zwei auf gemeinsamer Achse angebrachte Drehsysteme. Davon ist das eine dem Einfluss eines induktiven, des andere dem eines entgegenwirkenden, kapazitiven Spannungskreises unterworfen. Für eine gegebene Frequenz oder einen gegebenen Frequenzbereich halten sich die auf das Drehsystem wirkenden Kräfte das Gleichgewicht. Die Achse nimmt eine bestimmte Lage ein. Nimmt die Frequenz ausserhalb bestimmter Grenzen liegende Werte an, so ändern sich die Werte ωL und $\frac{1}{\omega C}$ der beiden Systeme im umgekehrten Sinn, der Einfluss eines der beiden Kreise überwiegt, die Trommel bewegt sich im entsprechenden Sinn und ändert die Stellung der Sektoren.

Abb. 1 stellt das grundsätzliche Schaltbild einer Umformergruppe mit Scherbius-Maschine und Hilfsrerger mit zugehörigen Regulierorganen dar.

Diese vereinfachte Regulierung mit Hilfe eines Frequenzreglers ist von Brown Boveri mit Erfolg bei der Umformergruppe von 1850 kVA in der Unterstation Bevers der Rhätischen Werke angewandt worden. Diese Gruppe dient zur elastischen Kupplung des 50-periodigen Verteilnetzes der Rhätischen Werke mit Schwankungen von 49,5—51,5 Per/s mit dem $16\frac{2}{3}$ -periodigen Netz der Rhätischen Bahn, das Schwankungen zwischen 15 und 18 Per/s aufweist.

(MS 526)

A. Maret. (Vt.)

Die Schleppseilanlage für Skifahrer bei St. Moritz (Graubünden).

Dezimalindex 625.921.3(494).

Für das rasche und mühelose Erreichen von hochliegenden Skigeländen und zur Vermeidung der ermüdenden und zeitraubenden Aufstiege in Übungsgeländen sind in



Abb. 1. — Skilift Suvretta bei St. Moritz.

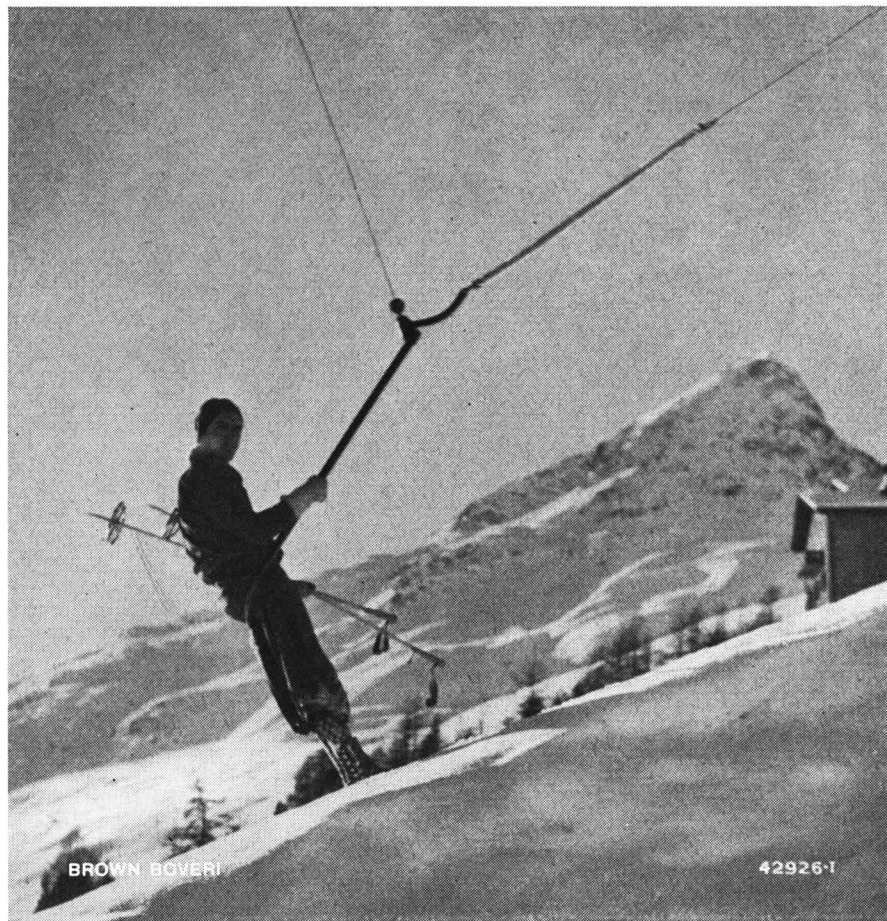


Abb. 2. — Schleppleinrichtung des Skilifts Suvretta bei St. Moritz.

neuerer Zeit neben Stand- und Luftseilbahnen auch Schleppseilanlagen für Skifahrer (Skilift) ausgeführt worden. Eine solche Anlage grösseren Ausmasses ist der im Dezember des Jahres 1935 in Betrieb gesetzte Skilift Suvretta bei St. Moritz, ausgeführt nach den Patenten und unter Leitung von Herrn Ing. E. Constam, Zollikon bei Zürich, Erfinder des in dieser Anlage angewendeten neuartigen Beförderungssystems.

Die Anlage hat eine Länge von 800 m. Der Höhenunterschied zwischen der im Tale gelegenen Antriebstation und der Bergstation beträgt 260 m. Es können bei Vollausbau der Anlage in der Stunde bis 450 Personen befördert werden, bei einer grössten Schleppgeschwindigkeit von 2,25 m/s. Die Einrichtung besteht im wesentlichen aus einem endlosen Drahtseil, das von einer Anzahl Stützen getragen und in den Endstationen um zwei Trommeln geführt wird. An diesem Seil sind sinnreich konstruierte Schleppbügel aufgehängt, die zum gefahr- und mühelosen Schleppen der Skifahrer dienen. Die untere der beiden erwähnten Trommeln wird über ein Kegelradgetriebe von einem Drehstrom-Asynchronmotor von 47 kW Nennleistung bei 965 U/min, 380 V, 50 Per/s angetrieben. Ein siebenstufiger Kontroller dient zum Anlassen des Motors und nötigenfalls auch zum Regulieren der Schleppgeschwindigkeit. Das Windwerk ist mit einer Bremseinrichtung mit Magnetantrieb versehen, wie sie bei Seilbahnen auch verwendet wird. Ein Schaltkasten mit Paketwärmeauslösern schützt den Motorantrieb vor Überlastungen und

schaltet die Antriebsrichtung auch ab bei Stromausfall im Netz und bei Betätigung des Endschalters am oben gelegenen Zielplatz. Der Endschalter ist mit einem quer zur Fahrbahn gespannten Seil verbunden, das die erwähnte Abschaltung des Antriebes veranlasst, wenn ein Skifahrer in dieses Seil hineinfahren sollte. Dadurch wird verhindert, dass die Fahrer an die Seiltrommel herangezogen werden, falls sie über den Zielplatz hinausfahren.

Die elektrische Einrichtung der Anlage ist von der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden, geliefert worden und hat den gestellten Anforderungen restlos entsprochen. Zwei weitere Anlagen, Patent Constam, mit elektrischer Ausrüstung von der Cie Electro-Mécanique, Paris, wurden im Winter des Jahres 1935/36 in den französischen Alpen erstellt. Die Leistungsfähigkeit solcher Anlagen ist sehr beachtenswert. Im ersten Winterbetrieb 1935/36 wurden mit der Anlage Suvretta ungefähr 30000 Personen befördert.

(MS 531)

E. Hugentobler.

Speisewasser für den Velox-Dampferzeuger.

Dezimalindex 621.187.12:621.181.65.

Die Qualität des Speisewassers ist für eine moderne Dampfkraftanlage von grosser Bedeutung, weil seine Eigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit des Dampfkessels haben. Auf Grund der heutigen Erkenntnisse muss man, unabhängig vom Kesselsystem, verlangen, dass das Speisewasser:

- 1. keine festhaftenden Ablagerungen im Kessel bildet;
- 2. die Kesselbaustoffe nicht angreift;
- 3. kein Spucken, Schäumen oder ähnliche Störungen bei der Verdampfung verursacht.

Man begegnet nun oft, namentlich im Konkurrenzkampf, der unrichtigen Behauptung, dass der Velox-Dampferzeuger infolge der grossen spezifischen Wärmeleistungen der Kesselsteinbildung mehr ausgesetzt sei und an das Kesselwasser höhere Anforderungen stelle als Hochleistungskessel anderer Bauart.

Diese Beobachtung veranlasst Brown Boveri die vorzüglichen Ergebnisse einer seit langer Zeit in einer chemischen Fabrik in praktischem Betrieb stehenden Velox-Kraftanlage bekannt zu geben, deren Speisewasserverhältnisse besonders ungünstig sind.

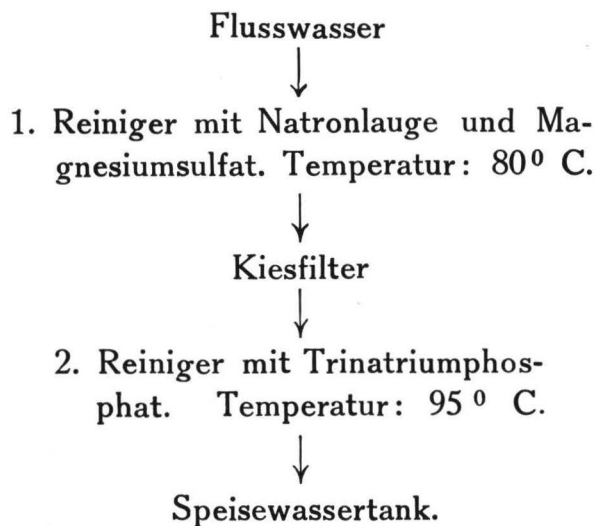
Der Velox-Dampferzeuger dieser Anlage liefert eine grösste Dampfmenge von 18000 kg/h bei einem Druck von 36 kg/cm² abs und einer Dampftemperatur von 400° C. Dieser Dampf wird zur Erzeugung von elektrischer Energie in einer Gegendruckturbine entspannt und dann vollständig für gewisse chemische Prozesse verbraucht. Für die Kessel wird gar kein Kondensat wiedergewonnen. In solchen Anlagen ist die Wasserfrage besonders schwierig, da die Kessel mit 100 % aufbereitetem Rohwasser gespeist werden müssen. Auch das Rohwasser, das in dieser An-

TABELLE I.
Rohwasser, Speisewasser und Kesselwasser für einen Velox-Dampferzeuger mit 100% chemisch aufbereitetem Wasser.

Zusammensetzung	Rohwasser (Mittelwerte)	Rohwasser (Mindest- und Höchstwerte)	Aufbereitetes Rohwasser nach der 1. Stufe (Mit- telwerte)	Speisewasser (Mittelwerte)	Kesselwasser (Mittelwerte)
p in cm ³ n/10 HCl	—	—	0,25	0,4	14,4
m in cm ³ n/10 HCl	1,7	1,4— 3,9	1,65	1,75	16,5
Vorübergeh. Härte (deutsche Grade)	4,8	3,9— 8,1	—	—	—
Bleibende Härte (deutsche Grade)	1,5	1,1— 7,9	—	—	—
Gesamthärte (deutsche Grade)	6,3	5,0— 16,0	0,7	0,1	0,6
CaO in mg/l	—	37 —118	—	0,1	0,6
MgO " "	—	10 — 32	—	0	0
Al ₂ O ₃ " "	—	0 — 1	—	0,2	—
Cl " "	21,3	21 — 76	—	15,9	170,0
SO ₃ " "	—	13 — 28	—	38,4	391,0
Si O ₂ " "	14,0	12 — 21	—	13,2	117,5
P ₂ O ₅ " "	—	—	—	2,9	23,5
Natronzahl	—	—	—	—	550

lage verwendet wird, ist denkbar ungünstig. Es handelt sich um ein kieselsäurereiches, aber weiches Flusswasser, dessen Analyse in der beigegebenen Tabelle I zu finden ist. Wie die Höchst- und Mindestwerte der Analysen zeigen, schwankt die Qualität des Wassers im Laufe des Jahres. Ausserdem enthält das Wasser zeitweise einen sehr feinen Tonschlamm in Suspension. Dieser Schlamm ist so fein im Wasser zerteilt, dass seine Entfernung durch Filtration mit Hilfe von Kiesfiltern ganz aussichtslos ist. Seine Ausscheidung ist nur durch Behandlung des Wassers mit frisch gefälltem Aluminium- bzw. Magnesiumhydroxyd möglich. Diese Hydroxydflocken haben die Fähigkeit, den suspendierten Tonschlamm zu adsorbieren. Eine darauffolgende Filtration durch Kiesfilter liefert dann vollkommen klares Wasser. Die Erdalkalibikarbonate werden durch Natronlauge zur Ausscheidung gebracht. Bei dieser Umsetzung bildet sich eine der Natronlauge äquivalente Menge Soda, die ihrerseits die bleibende Härte niederschlägt. Zur gleichzeitigen Entfernung der Härte und des Tonschlammes wird das Rohwasser in einem Wasserreiniger mit Natronlauge und Magnesiumsulfat bei einer Temperatur von 80° C behandelt. Das Wasser, das aus diesem Reiniger anfällt, weist eine mittlere Härte von 0,7—1 deutschen Härtegraden auf. In einer Anlage mit ausgesprochener Kondensatwirtschaft könnte dieses Wasser ohne weitere Behandlung als Zusatzspeisewasser Verwendung finden. Als Kesselspeisewasser allein kann es, im Hinblick auf den beträchtlichen Gehalt an Kieselsäure, unter keinen Umständen verwendet werden. Es muss daher einer zweiten Behandlung mit Trinatriumphosphat unterzogen

werden, zum Zwecke, eine Silikatsteinbildung im Kessel zu verhindern. Die ganze Aufbereitung des Rohwassers dieser Anlage erfolgt nach folgendem Schema:



Die Analyse des anfallenden Speisewassers ist in der Tabelle I gegeben. Das Wasser ist als praktisch härtefrei zu bezeichnen. Die Härte schwankt zwischen einem Mindestwert von 0 und einem Höchstwert von 0,3 deutschen Härtegraden. Die Abschlammmenge des Kesselwassers beträgt etwa 10% des zugeführten Speisewassers; das Wasser im Kessel erfährt also eine zehnfache Eindickung. Durch diese Konzentrationszunahme würde sich auch die sehr geringe Härte im Kessel anreichern und unzulässige Werte annehmen. Nach der Speisewasseranalyse ist ganz besonders eine Silikatsteinbildung zu befürchten. Man darf aber nicht vergessen, dass die Phosphationen ebenfalls eine zehnfache Konzentrationszunahme erfahren. Da das Kalziumphosphat schon bei kleineren Konzentrationen ausfällt als das Kalziumsilikat, kommt es zur Ausscheidung der Härte in Form von Kalzium-Phosphatflocken und nicht als Kalzium-Silikatstein. Diesen Phosphatflocken kommt auch die Fähigkeit zu, SiO_2 zu adsorbieren. Dadurch findet eine gewisse Entkieselung statt, die sich darin zu erkennen gibt, dass die Kieselsäure nicht die gleiche Konzentrationszunahme wie ihre Lösungsgenossen erfahren hat. Mit diesem Speisewasser ist seit bald einem Jahr ein einwandfreier Betrieb des Velox-Dampferzeugers möglich. Die Verdampferelemente bleiben vollständig steinfrei, und auch ein Mitreissen von Salzen durch den Dampf konnte nicht beobachtet werden.

Aus diesen Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb geht hervor, dass der Velox-Dampferzeuger nicht nur in Dampfkraftanlagen mit Kondensat- und Destillatwirtschaft, sondern selbst auch bei Speisung mit 100% aufbereitetem kieselensäurereichem Rohwasser einwandfrei arbeitet.

Die Gefahr der Ablagerung von Steinen aller Art ist im Velox-Dampferzeuger geringer als bei irgendeinem Kesselsystem, weil durch die Umwälzpumpe eine hohe Wassergeschwindigkeit und durch eine sorgfältige Wasserführung eine heftige Spülung der beheizten Flächen erzwungen wird. Tote Ecken mit erhöhter Salzkonzentration

und der Möglichkeit ungestörter Ablagerung werden dadurch verhindert. Der Brown Boveri-Velox-Dampferzeuger kann demnach in jeder Dampfanlage unbekümmert um die Art der Kondensatwirtschaft Aufstellung finden und wird dank seiner besonderen Vorzüge sehr zur Wirtschaftlichkeit des Betriebes beitragen.

(MS 532)

J. Biert.

Betriebsicherheit von Brown Boveri-Material.

Dezimalindex 6 (009.2): 621.313.322.

In der Anlage der Papierfabrik Cham A.-G., Cham (Schweiz), befinden sich heute noch in vollem, einwandfreiem Betrieb zwei Brown Boveri-Generatoren, die in den Jahren 1897 bzw. 1904 geliefert wurden, also seit 40 bzw. 33 Jahren Dienste tun.

Die erste der beiden Maschinen trägt die Fabriknummer 2835. Sie wurde als Zweiphasen-Wechselstromgenerator mit vertikaler Welle, als „Schirmtyp“ geliefert und war bemessen für 260 kVA, bei 2100 V und 62 A je

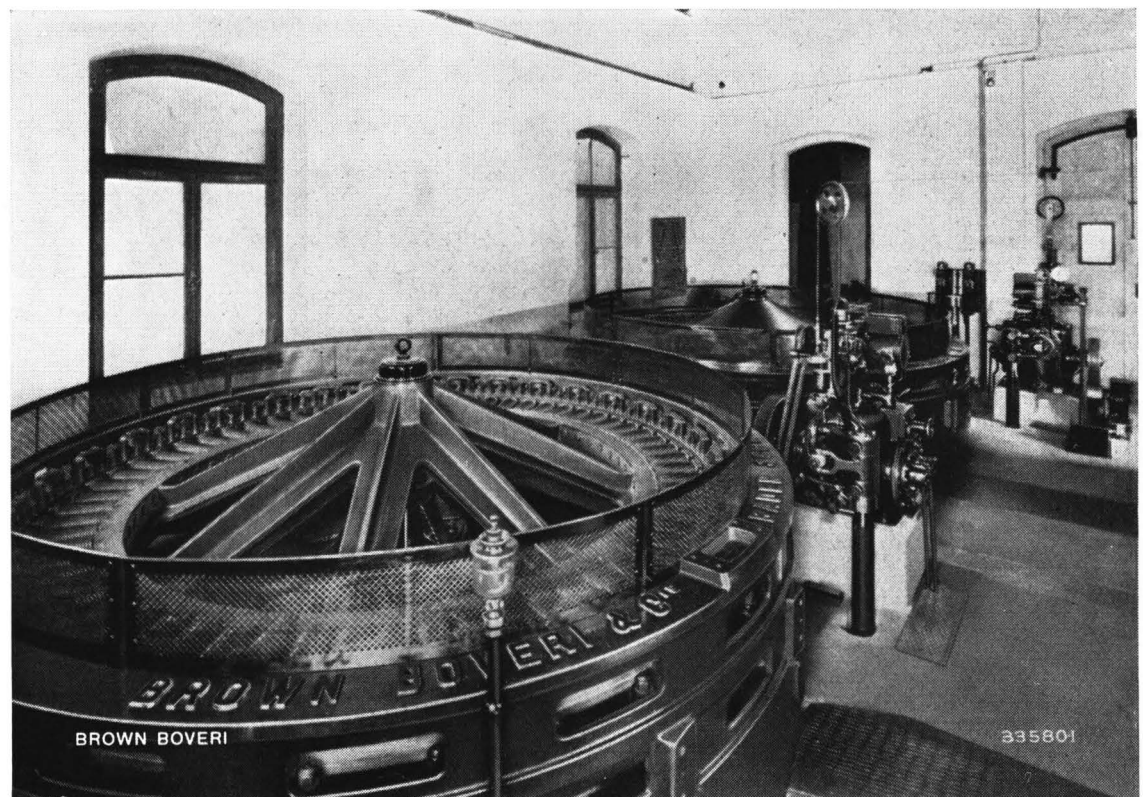


Abb. 1. — Papierfabrik Cham A.-G., Cham. Zwei Dreiphasen-Generatoren aus den Jahren 1897 bzw. 1904.

Phase sowie 87,5 U/min, entsprechend 46,7 Per/s. Der vertikalachsige Erreger ist getrennt aufgestellt und läuft über Kegelhäder, vom Generator angetrieben, mit 450 U/min. Der zweite, im Jahre 1904 gelieferte Stromerzeuger war ebenfalls für Zweiphasen-Wechselstrom gewickelt und hat gleichfalls eine vertikale Welle. Die Daten dieser Maschine: 260 kVA, 2100 V, 62 A je Phase, 127 U/min entsprechend 46,7 Per/s. Die Erregermaschine läuft getrennt.

Heute arbeiten beide Generatoren mit 50 Per/s und 2250 V; ihre Drehzahlen sind, der Frequenz entsprechend, auf 94 bzw. 136 U/min erhöht worden. Seit ihrer Inbetriebsetzung laufen die zwei Maschinen mit Ausnahme des Sonntags sozusagen Tag und Nacht und haben, trotz der langen „Dienstjahre“, zu grösseren Reparaturen oder Überholungsarbeiten keinen Anlass gegeben.

(MS 501)

Prop.