Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 30 (1939)

Heft: 18

Artikel: Elektrische Generatoren

Autor: Dünner, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060858

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

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

Elektrische Generatoren.

Von *E. Dünner*, Zürich, unter Mitarbeit der Industrie.

621.313.12

Einige wichtige Fragen des Grossgeneratorenbaues werden erörtert: Konstruktiver Aufbau, Grenzleistungen und Grenzabmessungen, Verlustaufteilung und Reduktion der Ventilationsverluste, zusammengesetzte Rotorzylinder, Isolation der induzierten Wicklungen, erreichbare Nennspannung, Erregung und Schnelligkeit der Spannungsregulierung, Wasserstoffkühlung, Gleichstrommaschinen für kleine Spannung und grossen Strom.

L'auteur expose quelques questions importantes de la construction des gros générateurs: dispositions constructives, puissances et dimensions limites, répartition des pertes et réduction de pertes de ventilation, cylindres rotoriques en plusieurs pièces assemblées, isolement des enroulements induits, tension nominale obtenable, excitation et rapidité du réglage de la tension, refroidissement à hydrogène, machines à courant continu à basse tension et à fort débit.

Der Bau elektrischer Generatoren bildet für den Konstrukteur eine Kombination elektrischer und mechanischer Probleme, die beide Schwierigkeiten und Verantwortungen in reichstem Masse in sich schliessen. Wenn sich auch nach beiden Richtungen eine gewisse Norm durchgesetzt hat, und äusserlich fast von einer Standardisierung gesprochen werden kann, so ist die Entwicklung doch keineswegs abgeschlossen. Sowohl in elektrischer als auch in mechanischer Hinsicht sind verschiedene Probleme z. Zt. in Abklärung begriffen, und es zeichnen sich bereits wieder neue ab; der den Fortschritt erhaltende Fluss ist noch reichlich vorhanden.

Es soll in den folgenden Zeilen versucht werden, den gegenwärtigen Stand des Generatorbaues durch Skizzierung einiger wichtiger Punkte festzuhalten und, soweit möglich, einen Ausblick in die zukünftige Entwicklung beizufügen.

Das Wachstumsgesetz elektrischer Maschinen, das bekanntlich am Transformator am besten ableitbar ist, zeigt das allgemeine Resultat, dass die Vergrösserung der Dimensionen des aktiven Teils bei konstanter elektrischer und magnetischer Beanspruchung die Leistung in der vierten, das Gewicht und die Verluste in der dritten Potenz wachsen lässt. Der grosse Typ ist daher billiger und besser; es sinken Einheitsgewicht (kg/kVA), Einheitspreis (Fr./kVA), und es steigt der Wirkungsgrad. Dieser Entwicklung steht nur die Abnahme der sogenannten spezifischen Oberfläche, (cm^2/W) entgegen; die grosse Maschine gestattet aber meistens, die Kühlfähigkeit der Oberfläche zu steigern. Die Konzentration grosser Leistungen an einzelnen Punkten erlaubt heute dem Generatorbau, die Vorteile des grossen Typs voll auszunützen; die Entwicklung der elektrischen Generatoren in den letzten drei Jahrzehnten zeigt daher als Hauptmerkmal die Steigerung der Einheitsleistung bis zu der durch die Oekonomie der Energieaufteilung bedingten Grenzen. Im Gegensatz zum Asynchron-Motor ist der Synchron-Generator ein Individualist, für dessen Herstellung die Serienfabrikation kaum eine Rolle spielt; dagegen benötigt seine Bearbeitung einen Park grösster Werkzeugmaschinen, so dass die Fabrikation grösserer Einheiten in der Schweiz auf drei Grossfirmen beschränkt ist.

Eine Betrachtung der Generatoren hat zwischen Langsamläufern mit ausgesprochenen Polen und Schnelläufern mit Turborotoren zu differenzieren; ebenso können Fragen elektrischer und mechanischer Natur zum Teil getrennt behandelt werden.

Die von Amerika übernommene Konstruktion mit geschweissten Platten hat sich bei uns restlos durchgesetzt. Ihre Vorteile, die im kleinen Gewicht, im Wegfall der Giesserei, im Ausschluss von Materialunregelmässigkeiten usw. liegen, liessen diese Bauart zur bevorzugten werden, so dass die frühere Gusskonstruktion nur noch ausnahmsweise angewendet wird. Fig. 1 zeigt den Schnitt durch einen Generator der Firma Sécheron, Genf, bei dem sowohl Stator als auch Rotor und Tragkonstruktion aus Walzeisen zusammengeschweisst sind.

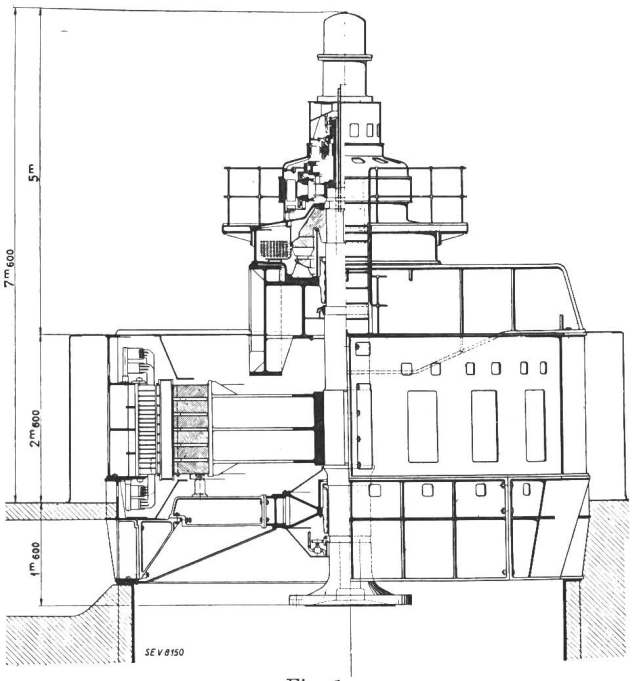

Fig. 1.
Drehstromgenerator für das Kraftwerk Verbois, Genf.
27 500 kVA, 18 000 V, 136 U/min.
(Sécheron.)

Für Antrieb mit Wasserturbinen kommt ausschliesslich die Bauart des Rotors mit ausgesprochenen Polen zur Anwendung. Bei Antrieb mit Peltonturbinen, d. h. bei sehr grossem Gefälle, ergibt sich für den Generator die Ausführung mit horizontaler Welle. Fig. 2 gibt den Schnitt durch eine derartige Ausführung. Die Verwendung von ausgesprochenen Polen führt hier schon zu Grenzbeanspruchungen, da bei der Schleuderdrehzahl 900/min eine Umfangsgeschwindigkeit von 140 m/s erreicht wird.

Für mässigere Gefälle, die weitaus häufiger sind, bildet die Anordnung mit vertikaler Welle die übliche Ausführung; sie ergibt für den hydraulischen und elektrischen Teil eine sehr saubere Trennung

(Fig. 1 und Fig. 3). Das Traglager muss unter Berücksichtigung des Wasserdruckes oft eine ungeheure Last aufnehmen, bei ganz grossen Ausführungen weit über 500 t. Dann kann der Einbau dieses Lagers unterhalb des Generators konstruktiv

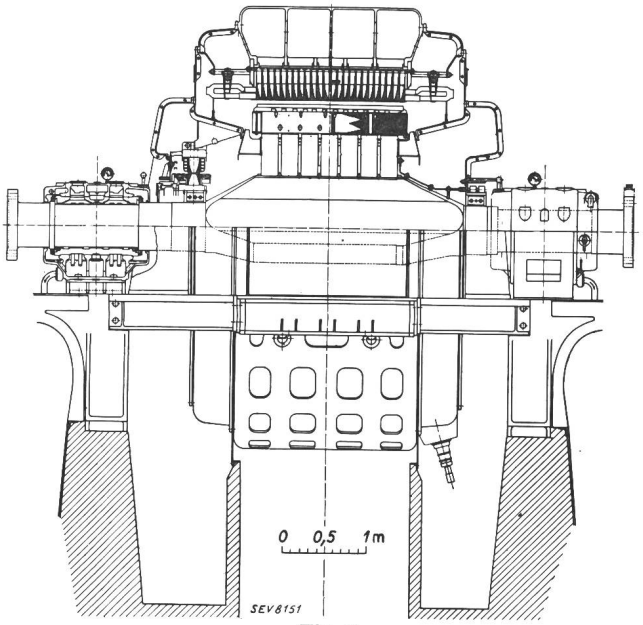

Fig. 2.
Drehstromgenerator für das Kraftwerk Dixence.
37 500 kVA, 13 000 V, 500 U/min.
(Maschinenfabrik Oerlikon.)

verschiedene Vorteile bieten. Neben der besseren Zugänglichkeit zu den verschiedenen Generatorteilen und der verkleinerten Höhe zum Abheben des rotierenden Teiles kann die Verkürzung der Arme des Tragsterns oder häufiger Tragbalkens entscheidend werden (Fig. 3). Trotz der beiden riesigen Tragbalken, bestehend aus je 5 ca. 2 Meter hohen Plattenträgern, ergab sich bei 700 t Vertikaldruck eine Durchbiegung von 1,5 mm.

Für die Befestigung der Pole am Rotorring kommen mehrere Varianten zur Anwendung; neben Schrauben- und Schwalbenschwanzbefestigung ist es namentlich diejenige mit Polklauen, welche sehr grosse Beanspruchungen zulässt und z. B. Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 150 m/s bei 2 m Durchmesser beherrschen lässt. Die Verwendung von Kaplanturbinen führt leider zu sehr hohen Durchbrenndrehzahlen; an Stelle der frühern Werte 2 × Nenndrehzahl muss mit 2,5 und mehr gerechnet werden. Derartige Schleuderdrehzahlen schaffen dem Konstrukteur oft grosse Schwierigkeiten und reduzieren unter Umständen die Ausnützung. Die Grenzleistungen sind immerhin bei hohen Polzahlen recht stattlich; bei 16 Polen und doppelter Durchbrenndrehzahl lassen sich z. B. 90 000 kVA betriebssicher mit üblicher Ankerrückwirkung erreichen. Die Dimensionen solcher langsam laufenden Generatoren werden allerdings sehr gross; die in Fig. 3 dargestellte Maschine z. B. besitzt eine

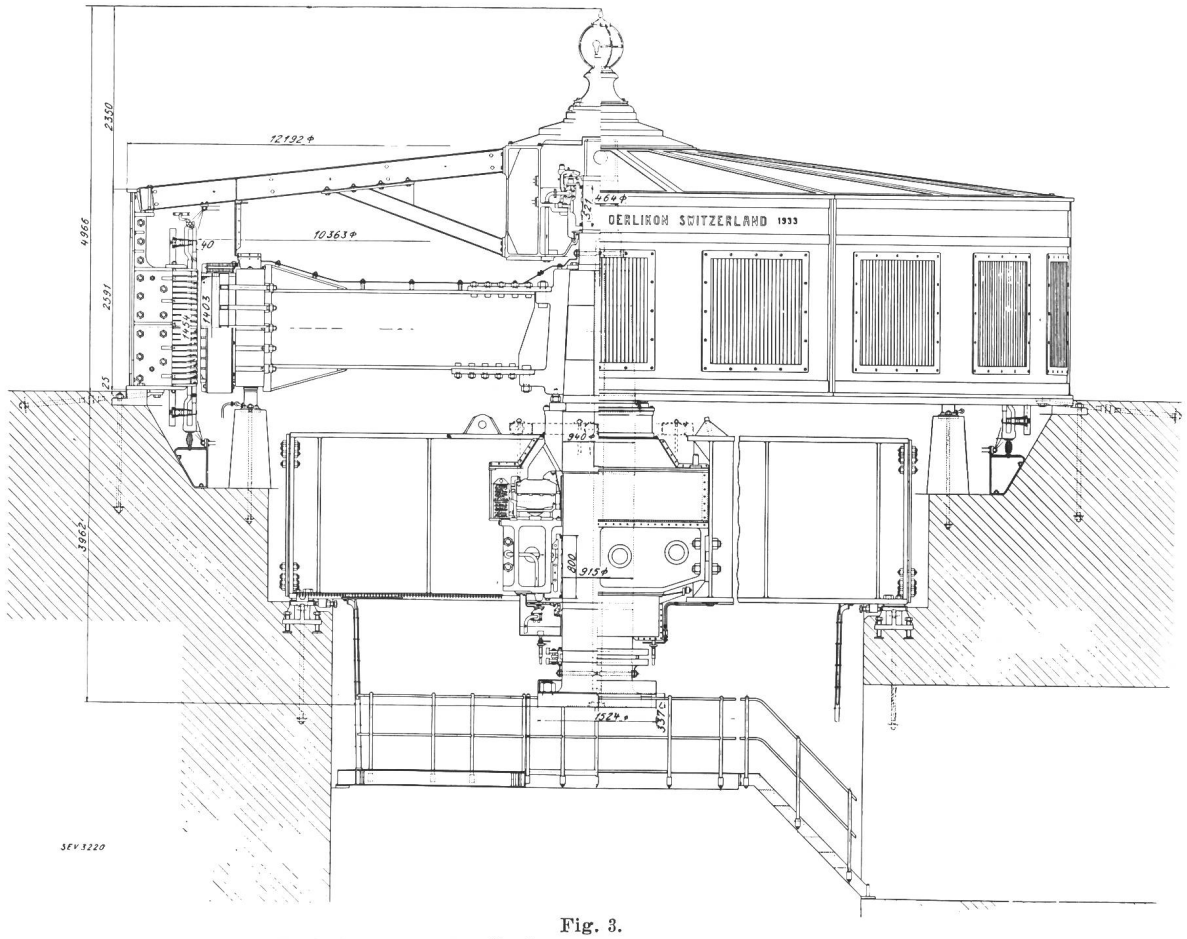

Fig. 3.
Drehstromgenerator für das Kraftwerk Beauharnois (Kanada).
44 000 kVA, 13,2 bis 14,5 kV, 25 Hz, 75 U/min. (Maschinenfabrik Oerlikon.)

Bohrung von 10,4 m, einen Aussendurchmesser von 12,2 m bei ca. 1,5 m Eisenlänge. Die Schwierigkeiten der Herstellung und der Stückbearbeitung solcher Maschinen lassen sich leicht einschätzen, wie auch die für den Transport nötige Unterteilung die Konstruktion oft weitgehend erschwert.

Die Verwendung der Dämpferwicklung ist nicht nur bei Einphasen-, sondern auch bei Mehrphasen-Generatoren ziemlich allgemein geworden, da sie bei transienten Pendelerscheinungen wesentlich zur Beruhigung des Systems beiträgt und die Grobsynchronisierung stark unterstützt. Die grosse Variation in der Belastung von induktiv zu kapazitiv erfordert entsprechend grosse Regulierung der Erregung; grössere Maschinen haben daher Haupt- und Hilfserreger.

Bei den Turbogeneratoren hat sich die 2polige Ausführung ausschliesslich durchgesetzt; andere Polzahlen kommen für 50 Hz kaum mehr vor. Die Grenzleistung liegt bei 2 Polen über 80 000 kVA, wobei sich für eine Bohrung von 1100 mm eine Länge des aktiven Eisens über 3 m ergibt, was naturgemäss mancherlei Schwierigkeiten in sich schliesst. Die Materialbeanspruchungen sind beim Schleudern der Rotoren mit 1,25facher Nenndrehzahl extrem hoch; zur Verwendung gelangt vergüteter Stahl mit 75 kg/mm² Festigkeit und 45 kg/mm² Streckgrenze, die bis zu 70 % ausgenützt wird. Durch das Zusammendrängen der grossen Leistungen auf kleinsten Raum wird sehr kleines Einheitsgewicht, unter 1,5 kg/kVA, kombiniert mit sehr hohem Wirkungsgrad erreicht. Für Leistungen über 50 000 kVA z. B. werden bei $\cos \varphi = 0{,}8$ Wirkungsgrade über 0,98 garantiert. Die Aufteilung der Verluste nach Tabelle I zeigt den grossen Anteil der Venitlationsverluste, so dass eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades in erster Linie wohl hier angreifen muss. Trotzdem rechnungsgemäss die Verwendung von Wasserstoff als Kühlmedium die reinen Ventilationsverluste auf $^1/_{10}$ und damit die Gesamtverluste unter Umständen um $^1/_4$ reduziert, haben die bisher erreichten hohen Wirkungsgrade bei uns die Luftkühlung beibehalten lassen. Die ebenfalls grossen Zusatzverluste im Gebiet der Spulenköpfe werden durch Schlitzen der Pressplatten, die z. T. aus Bronze bestehen, möglichst reduziert.

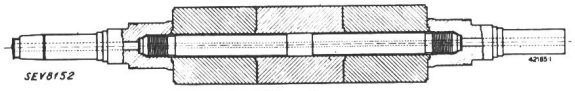

Fig. 4.
Mehrteiliger Rotor eines Turbogenerators,
dessen einzelne Teile durch eine Zugstange zusammengehalten sind; die Vibrationscharakteristiken sind nicht verschieden von denjenigen eines massiven Rotors.
(Brown Boveri.)

In konstruktiver Hinsicht bildet der Rotor, sowohl in mechanischer als auch thermischer Richtung, noch immer das Sorgenkind des Konstrukteurs. Die Verwendung von Aluminium für die Rotorwicklung hat sich nicht durchgesetzt. Die Vergütung der grossen massiven Rotorkörper, die nur von ganz wenigen, ausländischen Eisenwerken ausgeführt werden kann, führte zu einer Abhängigkeit vom Auslande, die sich speziell in den Lieferterminen ungünstig auswirkte. Durch Aufteilen des bisher einteilig gehaltenen Eisenstückes in mehrere Rotorzylinder (Fig. 4) wurde es möglich, diese Turborotoren in einheimischen Eisenwerken zu walzen und zu vergüten, was besonders in heutiger Zeit sehr hoch geschätzt werden muss. Ein weiterer Vorteil solcher Aufteilung liegt in der besseren Vergütung und leichteren Kontrolle. Die Schwierigkeiten der Rotorkühlung sind heute durch geschickte Anordnung der Luftführung ziemlich behoben; die langen und vielfach gebogenen Ventilationswege und die Zuführungskanäle erfordern aber sehr hohe Pressungen, oft über 300 mm Wassersäule.

Die Isolation der Ankerwicklung, bei Synchronmaschinen fast ausnahmslos die Statorwicklung, bildet ein weiteres Problem, an dem stetig gearbeitet wird. Der Schutz gegen die, auf der Steilheit der Wanderwellen beruhenden, Ueberspannungsgefahr wird heute erreicht, indem die Einzelleiter so reichlich isoliert werden, dass zwischen benach-

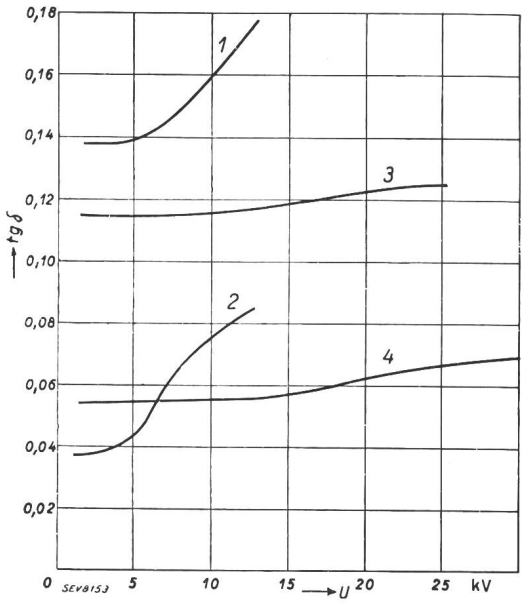

Fig. 5.
Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Spannung.
1 Generator handelsüblich (Schellack-Isolation, warm 100° C).
2 » » » » kalt.
3 » verbessert (warm 100° C).
4 » » kalt.

barten Windungen kurzzeitig Phasenspannung ausgehalten wird. Das übliche Isoliermaterial der Nutauskleidung und der Leiter ist Mikanit. Zwischen Stillstand bei niedriger und Lauf bei hoher Umgebungstemperatur können Temperaturunterschiede an der Wicklung von 100° C auftreten, die beträchtliche Längenausdehnungen zur Folge haben. Die Differenz der linearen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Eisen beträgt rund $6 \cdot 10^{-6}$, was bei grossen axialen Längen ein gegenseitiges Verschieben zur Folge hat, bei dem die zwischenliegende Isolation der Hauptleidtragende ist. Das übliche Schellackmikanit wird häufig durch Mikanit ersetzt, bei dem als Klebmittel der Mikaplättchen ein asphalthaltiger Lack verwendet ist.

Fig. 5 und 6 orientieren dabei über den Gewinn bezüglich dielektrischer Verluste; auch mechanisch verhält sich dieses Material, da es bei den vorkommenden Temperaturen stets leicht plastisch bleibt, wesentlich besser.

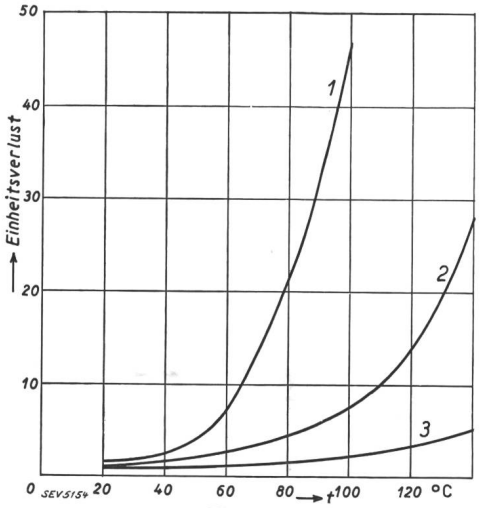

Fig. 6.
Dielektrische Verluste in Abhängigkeit von der Temperatur.
1 Handelsübliche Isolation (Schellack-Isolation).
2 Hochspannungs-Porzellan.
3 Verbesserte Isolation.

Die Spannungen der Grossgeneratoren liegen zwischen 5000 bis 15 000 V; Isolationsstärken der Nutenkännel von 2 bis 5 mm ergeben auch bei den schärfsten Prüfbedingungen die gewünschte Sicherheit. Das lästige Glimmen, sichtbar besonders beim Austritt der Wicklung aus der Nut, wird unterdrückt, entweder durch Einwickeln einer Kupferfolie, die an Eisen gelegt wird, oder durch Anstreichen der Oberfläche mit einem schwach leitenden Lack. Immer wieder stellt sich das Problem, durch hohe Generatorspannung den Transformator und dessen Verluste zu ersparen. Fig. 7 zeigt den Längsschnitt durch einen Turbogenerator von Brown Boveri für 22 000 V Nennspannung. Es sei speziell auf die Wicklungsanordnung des Stators mit 4 runden, übereinander angeordneten Leitern aufmerksam gemacht, die bei einem Isolationsauftrag von 5 mm gleichmässigste Fabrikation und damit grösste Sicherheit ergibt. Ohne auf die Frage einzutreten, ob sich Spannungen von 30 bis 50 kV für Generatoren durchsetzen werden, ist festzustellen, dass es heute möglich ist, Wicklungen für derartige Spannungen absolut betriebssicher herzustellen mit Isolationsaufträgen, welche immer noch eine vernünftige Ausnützung der Maschine gestatten.

Die neuzeitlichen Anforderungen an die Schnelligkeit der Spannungsregulierung, sowie die öfters auftretende Notwendigkeit, lange Hochspannungsleitungen bei kleiner Last unter Spannung zu halten, haben die Anwendung von Hilfserregern zwecks Fremderregung des Haupterregers bald zur Norm werden lassen. Es wird dadurch die durch den Schnellregler zu leistende Reglerarbeit erhöht, so dass bei grossen Generatoren die Belastbarkeitsgrenze üblicher Regler erreicht ist. Der Hochleistungsöldruckschnellregler ist ein Schnellregler, der auf das Steuerventil eines Oeldruckservomotors einwirkt und damit Widerstände im Erregerkreis des Haupterregers steuert. Der ganze Regulierweg wird in 0,3 Sekunden beschrieben, so dass, wie Fig. 8 zeigt, die an einem Synchronkompensator von 15 000 kVA, 750 U/min, aufgenommen wurde, der Spannungsaufbau am Haupterreger fast plötzlich erfolgt. Stosserregung, die z. B. der Ultrarapidregler der MFO besitzt, dürfte, wenn nötig, den Reguliervorgang noch weiter beschleunigen. Kunstschaltungen am Erreger haben sich in der Schweiz nicht eingeführt, wohl mit Recht. Im Gegensatz zu amerikanischen Maschinen wird bei uns das Verhältnis «Kurzschlußstrom bei Leerlauferregung zu Nennstrom» sehr klein gemacht (0,5 und weniger). Dies erlaubt bedeutend höhere Ausnützung der Maschine, erhöht aber die Reglerarbeit und nötigt zur Vorsicht bei kapazitiver Belastung.

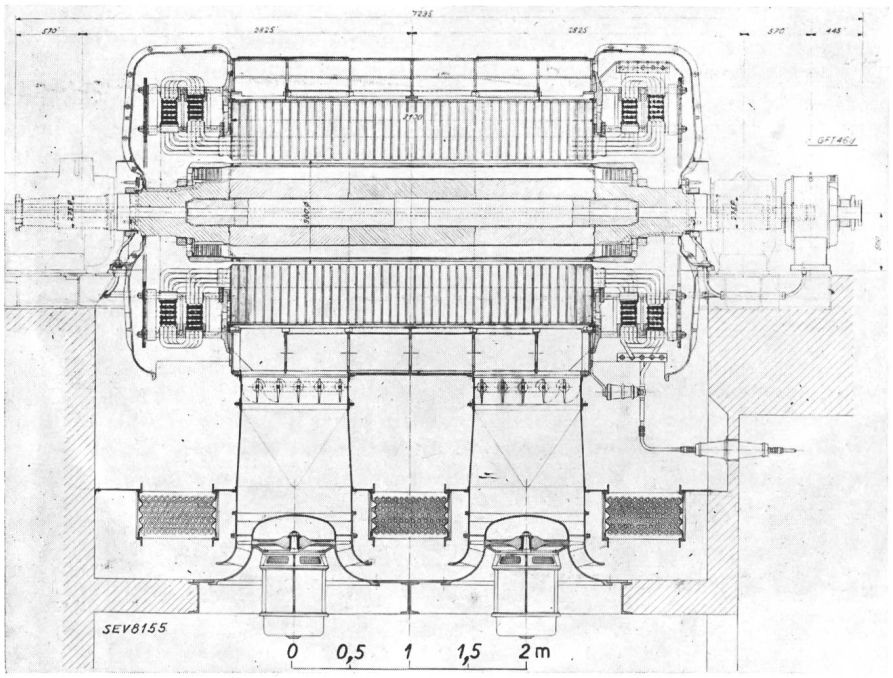

Fig. 7.
Drehstromgenerator.
37 500 kVA, 22 000 V, 3000 U/min.
(Brown Boveri.)

Werfen wir einen kurzen Blick in die Zukunft, soweit sich die diesbezüglichen Fragen übersehen lassen. Obwohl vom Konstrukteur her keine einschränkenden Gründe vorliegen, werden in bezug

auf Einheitsleistungen wohl keine wesentlich grössern Maschinen mehr gebaut werden. Die zulässige Leistungskonzentration in einer Maschine ist sicher auch in den grössten Industriezentren mit den heute

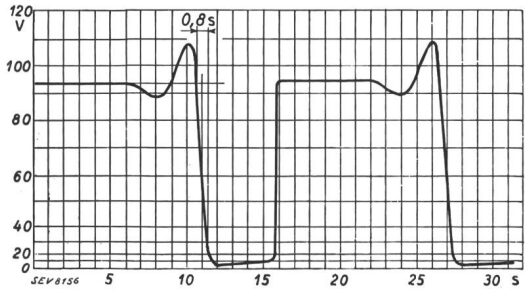

Fig. 8.
Spannungsaufbau am Erreger
mit Brown-Boveri-Hochleistungs-Oeldruck-Schnellregler.

vielfach ausgeführten Maschinen von 100 000 kVA erreicht. Speziell bei uns in der Schweiz wurde mit der Aufteilung in 3 Einheiten die Leistung 40 000 kVA nirgends überschritten.

Bezüglich Höhe der Maschinenspannung, wo der Kampf zwischen der Ausführung mit Generator und Transformator oder Hochspannungsgenerator geht, müssen wohl noch längere Betriebserfahrungen abgewartet werden, bis ein schlüssiges Urteil gefällt werden kann. In der Schweiz, wo ziemlich hohe Uebertragungsspannungen vorliegen, ist die erste Lösung die gegebene.

Eine letzte Frage betrifft die Reduktion der grossen Ventilationsverluste, siehe Tabelle I. Immer

Verluste einer Synchronmaschine von 30 000 kVA, 3000 U/min.
Tabelle I.

	kW
Eisenverluste	113
Kupferverluste im Stator	125
Kupferverluste im Rotor (Erregung)	90
Ventilations- und Reibungsverluste	150
Zusatzverluste	75
Totalverluste	553

wird der Anreiz bestehen, sie durch Verwendung eines leichtern Kühlmediums zu reduzieren. Wenn auch die Verwendung von Wasserstoff konstruktive Komplikationen mit sich bringt und die Kosten der Generatoranlage um 10 bis 20 % erhöht, so spricht doch vieles dafür, dass diese Frage nicht ruhen wird. Sind die in Amerika gesammelten Erfahrungen zufriedenstellend (es sind dort Synchronmaschinen mit zusammen über 1 Million kVA Leistung mit dieser neuen Kühlung im Betriebe), so dürfte ihrer Einführung auch bei uns der Weg geebnet sein.

Bekanntlich können Asynchronmaschinen, übersynchron angetrieben, Wirkleistung als Generator abgeben, leider unter Aufnahme von Blindleistung. Als Grossmaschinen sind sie sehr selten und auch als Kleingeneratoren, wo sie den Kraftausgleich und die Drehzahlregulierung der Turbine besorgen, ist ihre Anwendung nur vereinzelt.

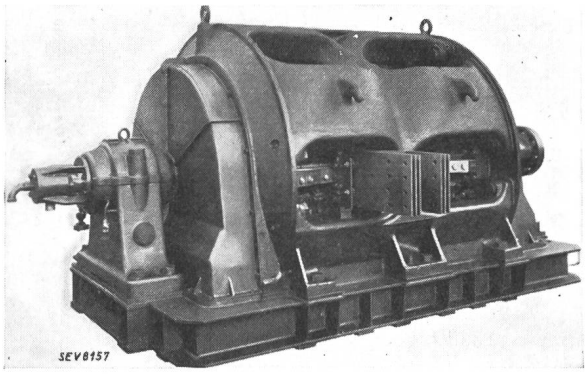

Fig 9.
Unipolarmaschine.
13 V, 30 000 A, 750 U/min.
(Brown Boveri.)

Der Bau der Gleichstromgeneratoren für normale Spannungs- und Stromverhältnisse bewegt sich in den althergebrachten Bahnen, wobei dank der jahrzehntelangen Erfahrungen die Ausnützung und die Güte stets etwas gesteigert werden konnte. Spannungen über 3000 Volt werden kaum verlangt und bereiten am Kommutator schon erhebliche Schwierigkeiten; häufiger sind die Maschinen für niedrige Spannung, dafür sehr grossen Strom. Fig. 9 zeigt die Ansicht einer von Brown Boveri kürzlich gebauten Unipolarmaschine für 13 V und 30 000 A. Der Anker trägt keine Wicklung, sondern benützt als Leiter die Wirbelbahnen des massiven Eisenrotors, der im Innern von Kühlwasser durchflossen ist. Die Schwierigkeiten derartiger Maschinen liegen vornehmlich in der Stromabnahme, und deren Verhalten wird über die Zukunftsaussichten solcher Ausführungen entscheiden.

Lastverteilung: Regulierung, Fernmessen, Fernsteuern, Fernregeln, Kommandoräume.

Von *E. A. Engler*, Baden,

621.311.177

Die heutige Technik der Zusammenarbeit zwischen Lauf- und Speicherwerken und das Parallelarbeiten ganzer Netzgruppen unter sich und mit solchen des Auslandes wird kurz dargestellt. Die Probleme der Regulierung, des Fernmessens, Fernsteuerns und Fernregelns, die die Zusammenarbeit verschiedener Werke und Werkverbände stellt, werden erörtert. Schliesslich werden kurz einige Richtlinien für die zweckmässige Gestaltung der Kommandoräume angedeutet.

L'auteur expose la collaboration entre usines au fil de l'eau et usines à accumulation, ainsi que la marche en parallèle de groupes entiers de réseaux entre eux et avec ceux de l'étranger. Il examine les problèmes que pose la collaboration de plusieurs usines ou groupes d'usines en matière de réglage, de télémesure, de télécommande et de téléréglage. Finalement, il esquisse quelques directives pour l'aménagement rationnel des postes de commande.

Die *Lastverteilung* im schweizerischen Elektrizitätswerkbetrieb ist im wesentlichen beherrscht vom Verbundbetrieb zwischen Laufwerken und Speicherwerken. Die grossen Laufwerke sind an