Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 13

Artikel: Turbogeneratoren und elektrische Hilfsbetriebe

Autor: Noser, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916614

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: 16.07.2025

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

als der Durchschlag des Öls, nämlich Beschädigung der festen Isolation, auftreten. Oder aber diese hohe Beanspruchung des Öls bedeutet, dass die Abstände zwischen unter Spannung stehenden Teilen in Öl zu klein gewählt worden sind.

Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. *Herbert Baatz,* dem Vorstand der Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V., Nellingen üb. Esslingen a. N., für die wohlwollende Förderung der vorliegenden Arbeit.

Literatur

[1] *R. Naeher:* Über die Durchschlagsfestigkeit einiger flüssiger Isolierstoffe bei Beanspruchung von langer bis kurzer Dauer. Arch. Elektrotechn. 21(1928)2, S. 169...204.

[2] *A. Nikuradse:* Das flüssige Dielektrikum. Berlin, Springer-Verlag, 1934.

[3] *V. S. Komelkov:* Mechanism of Dielectric Breakdown of Liquids. Comptes rendus de l'académie des sciences de l'URSS 47(1945)4, S. 269...272.

[4] *T. W. Liao* and *I. G. Anderson:* Propagation Mechanism of Impulse Corona and Breakdown in Oil. Trans. AIEE Part. I: Communications and Electronics 72(1953)11, S. 641...648.

[5] *V. Tetzner:* Der Stossdurchschlag der Anordnung Spitze-Platte unter Oel. Arch. Elektrotechn. 44(1958)1, S. 56...68.

[6] *P. Nikolopoulos:* Vorentladungen bei Stoßspannung an der Elektrodenanordnung Stab-Platte in Oel. Dissertation TH Stuttgart 1965.

Adresse des Autors:
Dr. *P. Nikolopoulos,* dipl. Ingenieur, Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen e. V., Zinsholz, Nellingen (über Esslingen a. N.) (Deutschland).

Turbogeneratoren und elektrische Hilfsbetriebe

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 28. Oktober 1965 in Lausanne,

von *R. Noser,* Baden

621.313.322 - 81

Im ersten Teil wird die Entwicklung der Einheitsleistung von Turbogeneratoren in den letzten vierzig Jahren gezeigt. Es werden die Gründe dargelegt, die zur Einführung des Wasserstoffes und der Flüssigkeit als Kühlmedium und zur direkten, unmittelbaren Kühlung von Rotor und Stator führten. Beispiele von Maschinenkonzeptionen werden gezeigt und die Leistungsbereiche angegeben, in welchen die verschiedenen Konzeptionen angewendet werden. Im zweiten Teil wird kurz auf die Erregungsarten von Turbogeneratoren eingegangen. Der dritte Teil behandelt die Hilfsbetriebe der thermischen Kraftwerke, die leistungsmässig 5...7 % der Maschinenleistung ausmachen. Die vier wichtigsten Prinzipschaltungen der Hilfsbetriebe werden diskutiert sowie die Umschaltung der Hilfsbetriebe auf verschiedene Energiequellen.

La première partie de l'exposé illustre l'évolution de la puissance unitaire des turboalternateurs au cours des quarante dernières années. On démontre ensuite les raisons qui ont motivé l'introduction de l'hydrogène et de liquide en tant que milieu réfrigérant et du refroidissement immédiat et direct du rotor et du stator. L'auteur indique en outre quelques exemples de conceptions de machines et les limites de puissance qui leur sont propres. La seconde partie expose rapidement les divers types d'excitation des turboalternateurs. La troisième partie traite des services auxiliaires des usines thermiques qui absorbent de 5 à 7 % de la puissance produite. Les quatre couplages de principe essentiels des services auxiliaires sont ensuite analysés, de même que la commutation des services auxiliaires sur diverses sources d'énergie.

1. Der Turbogenerator

Der jährliche elektrische Energiebedarf der Schweiz und der sie umgebenden Länder nimmt im Mittel pro Jahr um 7 % zu. Dies entspricht rund einer Verdoppelung des Energiebedarfes innerhalb von zehn Jahren. Soll Produktion und Verbrauch im Gleichgewicht bleiben, so erscheint es logisch, dass die Einheitsleistung der Turbogeneratoren ebenfalls diesem Gesetz gehorcht. Fig. 1 zeigt den Verlauf der Einheitsleistung von Turbogeneratoren während den letzten 40 Jahren. In der Kurve sind die gebauten und die in Bau befindlichen Einheitsleistungen berücksichtigt. Während im Jahre 1930 ein

34903-918

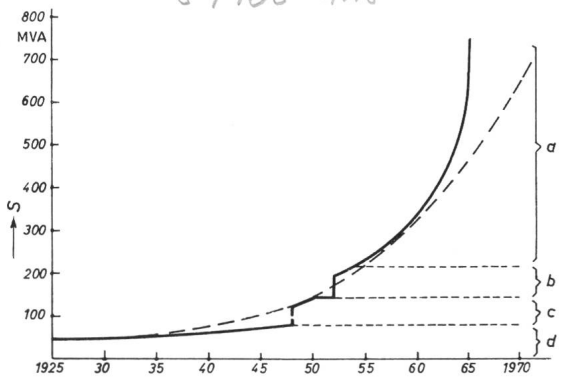


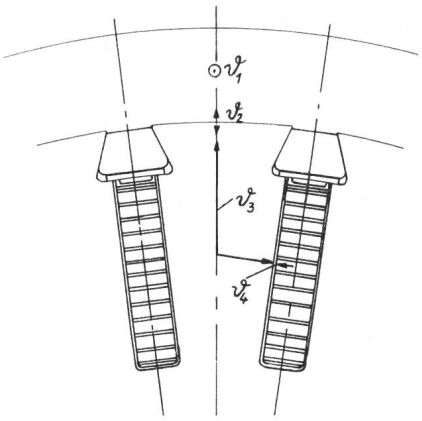
Fig. 1
Verlauf der Einheitsleistung von Turbogeneratoren während der letzten 40 Jahren

Gestrichelt: Vergleichskurve entsprechend Verdoppelung in 10 Jahren
S Scheinleistung; *a* Wasserstoff bis 4 kg/cm², Rotor direkt, Statorwicklung direkt mit Wasser oder Öl; *b* Wasserstoff 2 kg/cm², Rotor direkt, Stator indirekt; *c* Wasserstoff 0,0350...1 kg/cm², Rotor indirekt; *d* Luftkühlung

Turbogenerator von 48 MVA eine Pionierleistung darstellte und bis im Jahre 1947 luftgekühlte Generatoren von 80 MVA hergestellt wurden, trat darauf eine rasche Entwicklung ein. Heute sind in England Generatoren von 588 MVA installiert, in Frankreich solche von 667 MVA in Bau und in Deutschland Generatoren von 750 MVA im Projektstadium. Unter Anwendung der heute bekannten und erprobten Konstruktionsprinzipien ist der Generatorkonstrukteur in der Lage, für 50 Hz zweipolige Generatoren mit einer Einheitsleistung von 1400 MVA bei einem cos φ von 0,9 und einem Kurzschlussverhältnis von 0,35 zu bauen.

Vergleicht man die Kurve der Einheitsleistungen der Generatoren mit der Exponentialkurve, die eine Verdoppelung in 10 Jahren ergibt, so zeigt sich, dass die Wachstumskurve der Einheitsleistung der Generatoren in den letzten Jahren eher steiler verläuft, als die des Verbrauches. Die grosse Steigerung der Einheitsleistung war nur möglich durch die Steigerung der Maschinenausnutzung, das heisst der Leistung pro Volumeneinheit, die in den letzten 15 Jahren auf das 3½fache gestiegen ist. Durch intensive Forschung und Entwicklung gelang es, die magnetische Ausnutzung des Rotors zu steigern, die Verluste zu senken und die konzentriert anfallende Verlustwärme wirksam abzuführen.

In der Kurve der ausgeführten Einheitsleistungen sind zwei charakteristische Sprünge festzustellen. Beide sind gegeben durch die Einführung einer neuen Kühlungsart der Maschine. Der erste Sprung konnte gemacht werden durch die Einführung des Wasserstoffes als Kühlgas anstelle von Luft und der zweite durch die Einführung der direkten Leiterkühlung im Rotor.



	Luft	H_2		
	1 kg/cm²	1,035 kg/cm²	2 kg/cm²	3 kg/cm²
ϑ_1	10	10	10	10
ϑ_2	35	22,5	13,5	10
ϑ_3	27	27	27	27
ϑ_4	18	7,5	7,5	7,5
$\Delta\vartheta_{tot}$	90 °C	67 °C	58 °C	54,5 °C

Fig. 2
Temperaturgefälle ϑ im indirekt gekühlten Turborotor
Lauf in Luft, bzw. Wasserstoff

Anhand eines Beispiels soll dies erläutert werden. Der Wasserstoff hat bei gleichem Druck eine zehnmal kleinere Dichte als Luft, seine Zähigkeit ist zweimal kleiner, der Wärmeinhalt pro Volumeneinheit jedoch gleich. Bei gleichem Druck betragen im Wasserstoff die Oberflächenreibungsverluste nur 15 % von denjenigen in Luft, und die Konvektionsziffer α_k, die für den Wärmeübergang massgebend ist, ist 1,55mal grösser.

Fig. 2 zeigt anhand der Temperaturgefälle in einem indirekt gekühlten Rotor die Auswirkungen des Wasserstoffes. Das Wicklungskupfer liegt in Nuten, eingebettet in Isolation. Der Weg der Verlustwärme geht durch die Isolation, durch den Zahn an die Oberfläche des Rotors und von diesem an das Gas im Luftspalt. In der Legende zur Fig. 2 sind die entsprechenden Temperaturdifferenzen der einzelnen Wegstrecken eingetragen. Dabei ist angenommen, dass das Gas im Luftspalt eine konstante Vorerwärmung von 10°C besitzt und der Erregerstrom konstant ist. Der Temperatursprung δ_2 an der Rotoroberfläche geht mit der Einführung des Wasserstoffes zurück und reduziert sich weiter mit der Erhöhung des Wasserstoffdruckes, dank der erhöhten Konvektionsziffer α_k. Der Temperatursprung im Eisen δ_3 bleibt natürlich konstant. Der Temperatursprung über die Isolation δ_4, einschliesslich Spalt des Nutenspiels, reduziert sich infolge der besseren Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffes, der in die Hohlräume der Nutenspiele eindringt. Bei gleicher Verlustleistung im Erregerkupfer sinkt somit die Übertemperatur $\Delta\delta_{tot}$. Lässt man umgekehrt die durch die Normen vorgeschriebenen Übertemperaturen konstant, so kann der Erregerstrom und damit die Ausnutzung der Maschine gesteigert werden.

Die Tabelle in Fig. 2 zeigt aber auch, dass es keinen Sinn hat, bei einem indirekt gekühlten Rotor, den Wasserstoffdruck stark zu erhöhen. Der Temperatursprung $\delta_3 + \delta_4$ im Eisen und Isolation bleibt konstant und bildet damit den Hauptanteil der Erwärmung. Diese Temperaturdifferenzen können nun aber dadurch eliminiert werden, dass man den Wasserstoff direkt in Kontakt bringt mit dem Erregerkupfer. Dies bedeutet die direkte Kühlung des Rotorkupfers, die zum zweiten Sprung in der Kurve der Einheitsleistung geführt hat.

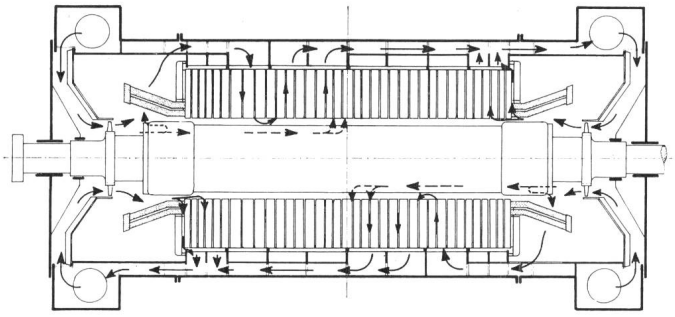


Fig. 5
Kühlschema eines Turbogenerators mittlerer Leistung mit direkter Wasserstoffkühlung im Rotor (BBC)

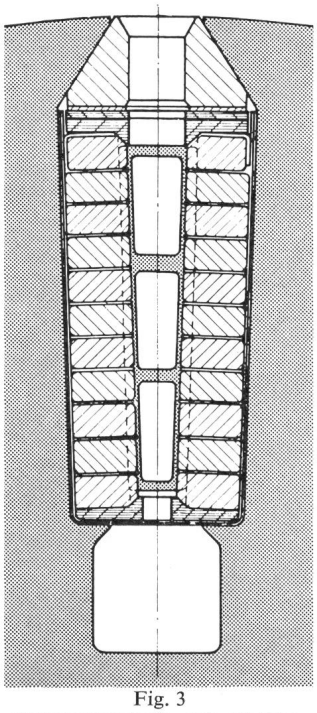


Fig. 3
Rotornutenschnitt mit direkter Wasserstoffkühlung des Rotorkupfers (MFO)

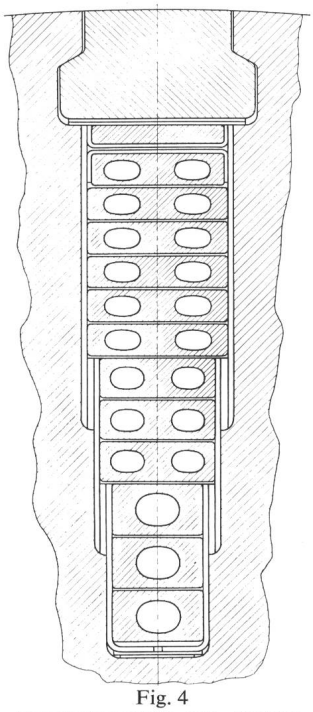


Fig. 4
Rotornutenschnitt mit direkter Wasserstoffkühlung des Rotorkupfers (BBC)

Die konstruktive Ausbildung der Rotornut mit direkter Leiterkühlung ist je nach Konstrukteur verschieden. Fig. 3 zeigt eine Lösung, bei welcher zwei Spulenseiten in jeder Nut an den Nutwänden anliegen und in der Mitte distanziert sind, um so einen Kühlkanal zu bilden. Ein zweiter Kanal unterhalb der Nut bringt zusätzliches Kaltgas in die Mitte des Rotors.

Fig. 4 zeigt eine andere Konstruktion, bei welcher der Kupferleiter als Hohlleiter ausgebildet ist, durch welchen das Gas direkt durchgeführt wird.

Fig. 5 zeigt das Kühlschema eines Turbogenerators mit direkter Kühlung des Rotorkupfers, bei Anwendung des Hohlleiterprinzips nach Fig. 4. Die beiden Ventilatoren an den Enden drücken das Kaltgas in die Stirnräume der Maschine. Das Kaltgas für den Rotor tritt unterhalb der Kappenplatte in den Rotor ein und strömt durch die Hohlleiter achsial zur Maschinenmitte, wo es radial in den Luftspaltraum austritt. Ein Teil des eintretenden Gasstromes wird für die Kühlung der Rotorstirnverbindungen benötigt und tritt direkt bei der Kappenplatte wieder heraus. Der Gasstrom für die Kühlung des Stators umströmt den Wickelkopf und wird in verschie-

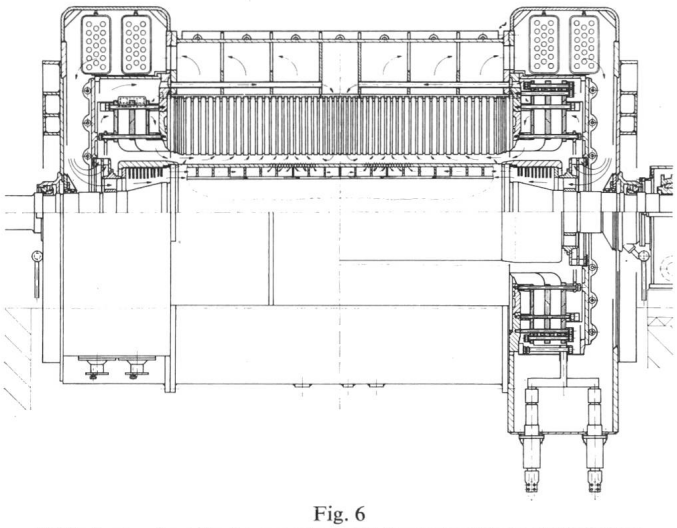


Fig. 6
Kühlschema eines Turbogenerators mit forcierter Wasserstoffkühlung im Rotor (MFO)

denen Abschnitten durch die radialen Kühlkanäle geführt. Schlussendlich wird das erwärmte Gas den Kühlern zugeführt. Bei diesem Kühlschema, das für mittlere Leistungen angewendet wird, trägt der Ventilator zur Gasförderung durch den Rotor nichts bei. Die Förderhöhe für das Rotorgas ist einzig durch die Durchmesserdifferenz zwischen Gaseintritt und Gasaustritt gegeben.

Bei Anwendung der direkten Leiterkühlung im Rotor ist, wie vorher gezeigt wurde, die Übertemperatur praktisch nur durch die Gaserwärmung und den Temperatursprung Gas—Kupfer gegeben. Für die Gaserwärmung ist der sekundliche Massendurchsatz massgebend, der proportional dem Produkt aus statischem Gasdruck und sekundlichem Volumenstrom ist. Für den Temperatursprung Gas—Kupfer ist die Konvektionsziffer α_k massgebend, die mit steigendem statischem Gasdruck und mit der Gasgeschwindigkeit ansteigt. Bei gleicher Geometrie der Rotornut kann deshalb die Kühlwirkung erhöht werden, entweder durch Erhöhung des statischen Gasdruckes oder durch Erhöhung des Förderdruckes und damit der Gasgeschwindigkeit. Aufgabe des Konstrukteurs ist es, die optimale Auswahl der Parameter zu finden. Über diese Optimierung bestehen verschiedene Veröffentlichungen [1; 2][1]).

Fig. 6 zeigt das Kühlschema eines Turbogenerators, bei welchem ein, dem Rotor vorgeschalteter Ventilator, einen Zusatzdruck zur Förderung des Gases liefert. Das Gas wird nach dem Austritt aus dem Kühler in zwei Kreisläufe für den Rotor und den Stator aufgespalten. Das Rotorgas tritt durch den Ventilator unter der Kappenplatte in den Wickelkopfraum. Ein erster kleiner Teil des Gases kühlt die Wickelköpfe und tritt am Ballenende in den Luftspalt aus. Ein zweiter Teil des Gases durchströmt die trapezförmigen Kanäle zwischen den Spulenseiten in der Nut (siehe Nutenschnitt Fig. 3) in achsialer Richtung, und verlässt diese etwas vor Erreichen der Generatormitte durch die Öffnungen in den Nutenkeilen. Ein dritter Teil des Gases wird durch den unterhalb der Wicklungsnut angeordneten Ventilationskanal zur Rotormitte geführt und kühlt die mittlere Partie. Das Kühlgas für den Stator wird durch einen separaten Radialventilator durch Statorwickelkopf und Eisenpakete gefördert.

Die direkte Kühlung des Rotorkupfers erlaubt die Ausnutzung des Rotors stark zu steigern, besonders wenn hohe statische Gasdrücke und Zusatzventilatoren mit grosser Förderhöhe angewendet werden. Der Stator muss der gesteigerten Rotorausnutzung folgen. Man ist deshalb für grössere Leistungen gezwungen, auch für den Stator die direkte Kühlung anzuwenden. Das Kühlmittel muss direkt in den Stab eingeführt werden, unter Umgehung der Wärmeleitwege durch die Hauptisolation und das Statoreisen. Als Kühlmittel kommt entweder Wasserstoff oder Flüssigkeit (Öl, Wasser) in Frage. Die Ausführung des direkt gekühlten Statorstabes ist je nach Konstrukteur verschieden. Fig. 7 zeigt drei verschiedene Stabquerschnitte für direkt gekühlte Statorleiter. In der linken Nut ist jeder Teilleiter des Roebelstabes als Hohlleiter ausgebildet, durch den die Kühlflüssigkeit geführt wird. Dieser Stabquerschnitt eignet sich nur für Flüssigkeitskühlung. Die Stabform in der Bildmitte wird bei entsprechender Dimensionierung sowohl für Wasserstoff- wie auch für Flüssigkeitskühlung verwendet. Das Kühlmedium wird durch Kühlkanäle, die zwischen den beiden Roebelstabhälften liegen, hindurchgeführt. Bei der dritten Stabform (rechts im Bild) sind einige Hohlleiter, die die Kühlflüssigkeit führen, zwischen die normalen Teilleiter des Roebelstabes eingestreut. Fig. 8 und 9 zeigen ausgeführte Stabquerschnitte für Flüssigkeitskühlung.

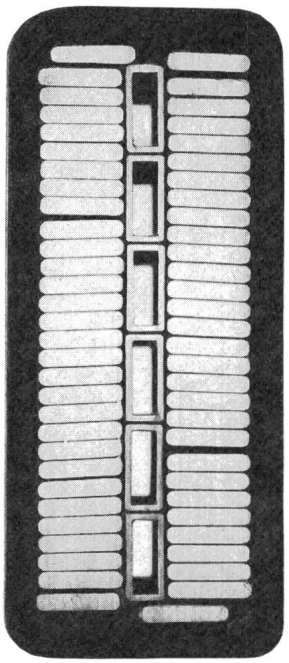


Fig. 8
Querschnitt durch einen Statorstab mit Flüssigkeitskühlung (MFO)

Fig. 10 zeigt das Kühlschema eines Turbogenerators grosser Leistung mit forcierter Gaskühlung im Rotor und Wasserkühlung der Statorwicklung. Der Radialventilator mit grosser Druckhöhe fördert das Kühlgas in den Wickelkopfraum. Der für den Rotor benötigte Anteil tritt unter den Kappenplatten durch in den Rotor ein. Das Kühlgas des Rotorwickelkopfes wird am Ballenende in den Luftspalt ausgeblasen. Ein zweiter Kühlgasstrom wird achsial durch den Rotorhohlleiter zur Maschinenmitte geführt, wo er ebenfalls in den Luftspalt

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

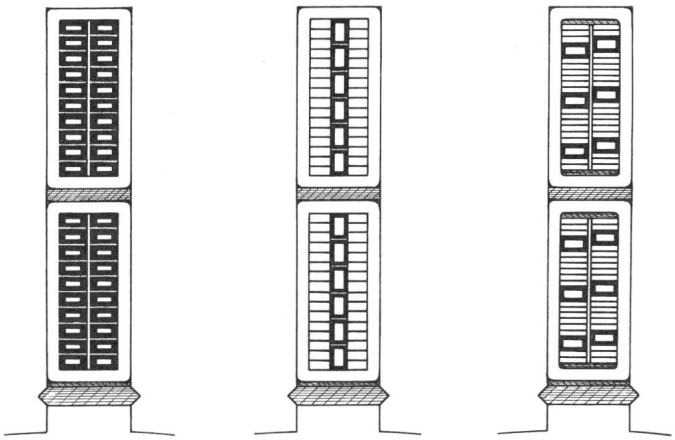


Fig. 7
Querschnitte von Statorstäben für die direkte Flüssigkeits- bzw. Wasserstoffkühlung des Statorkupfers

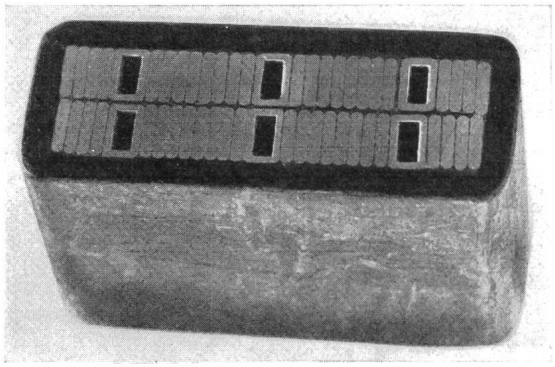


Fig. 9
Querschnitt durch einen Statorstab mit Flüssigkeitskühlung (BBC)

austritt (Rotornutenschnitt siehe Fig. 4). Die beiden Luftspaltblenden an den Eisenenden des Stators sorgen dafür, dass im Rotor der gesamte Druck des Radialventilators wirksam wird. Das Statoreisen wird ebenfalls durch den Wasserstoff mit achsialer Flussrichtung gekühlt. Im Blechsegment eingestanzte Löcher bilden beim Schichten der Segmente achsiale Kanäle. In der Maschinenmitte sind radiale Ventilationsschlitze vorgesehen, um das Rotor- und Statorgas abzuführen. Die Statorwicklung ist wassergekühlt. Von einem Verteilrohr aus wird das Wasser durch Isolierschläuche der Wicklung zugeführt, strömt durch zwei wasserseitig in Serie geschaltete Stäbe und wird wiederum durch Isolierstrecken dem Sammelrohr zugeführt. Fig. 11 zeigt einen Generator von 400 MVA mit diesem Kühlprinzip während der Montage im Versuchslokal.

Die Flüssigkeit hat gegenüber Wasserstoff für die Kühlung den grossen Vorteil, daß ihr Wärmeinhalt bedeutend grösser ist. So ist z. B. der Wärmeinhalt von Wasser pro Volumeneinheit 950mal grösser als derjenige von Wasserstoff bei 4 kg/cm^2. Das durch die Leiter durchzusetzende Volumen pro Zeiteinheit von Flüssigkeit ist deshalb um Grössenordnungen kleiner als von Gas. Der Leistungsbedarf der Flüssigkeitspumpen ist wesentlich kleiner als derjenige der Gasventilatoren. So beträgt z. B. der Leistungsaufwand für die Rotorventilation allein bei einem 600-MW-Generator ca. 200 kW, während derjenige für eine Flüssigkeitspumpe nur ca. 10 kW ausmacht. Die Wärmeabgabeziffer zwischen Kupfer und Flüssigkeit ist ebenfalls bedeutend höher als zwischen Kupfer und Gas. Heute werden bei allen Generatorkonstrukteuren die grössten Anstrengungen gemacht, um die direkte Flüssigkeitskühlung ebenfalls im Turborotor einzuführen. Sie erlaubt bei gleichen Maschinendimensionen den Wirkungsgrad wesentlich zu verbessern oder bei gleicher Leistung die Maschinendimensionen zu verkleinern. Ebenfalls kann durch die direkte Flüssigkeitskühlung des Rotors die Einheitsleistung der Maschine gesteigert werden.

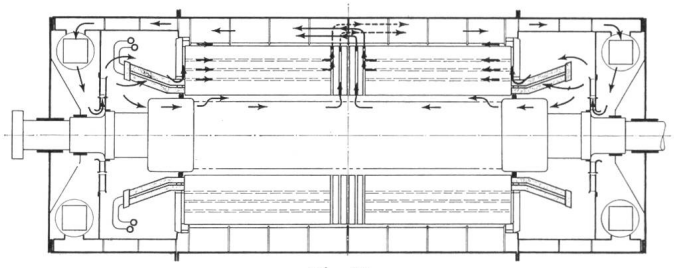


Fig. 10
Kühlschema eines Turbogenerators grosser Leistung mit forcierter Wasserstoffkühlung im Rotor und Wasserkühlung der Statorwicklung (BBC)

Nachdem die verschiedenen Konzeptionen der Turbogeneratoren dargestellt sind, stellt sich die Frage, in welchen Leistungsbereichen sie angewendet werden. Die Wahl der Konzeption ist nicht nur durch technische, sondern auch durch wirtschaftliche Gesichtspunkte bestimmt. Jede Verbesserung in der Kühlung der Maschine oder im Kampf gegen die Verluste ist mit zusätzlichen Kosten verbunden. Die Grenzen können deshalb nicht generell scharf gezogen werden. Die Art des Einsatzes der Maschine, die Verlustbewertung und die Transportmöglichkeiten haben einen starken Einfluss auf die Wahl der Maschinenkonzeption. Die Leistungsbereiche, die im folgenden angegeben werden, überschneiden sich daher sehr stark.

Fig. 12 zeigt in schematischer Darstellung die verschiedenen Konzeptionen einer Herstellerfirma. Die Konzeption *a* mit indirekter Kühlung im Stator und direkter Kühlung im Rotor

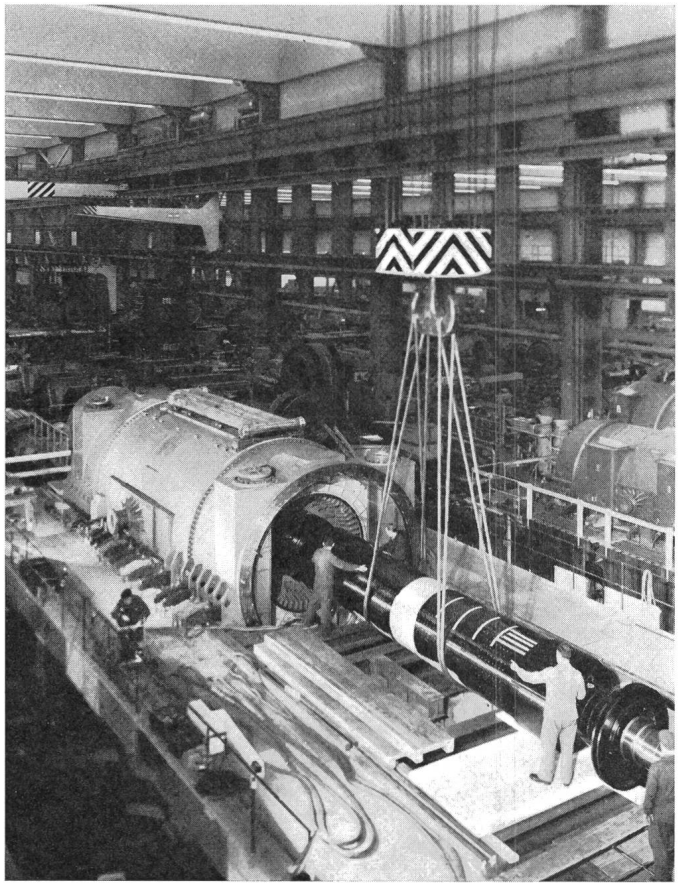


Fig. 11
Montage eines Turbogenerators von 400 MVA, cos φ = 0,75, 50 Hz, für Laufversuche im Werk (BBC)

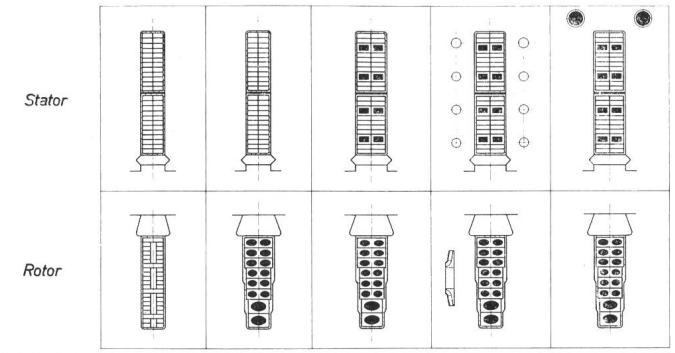
mittels Luft kann bis zu Leistungen von 90 MVA angewendet werden. Die Konzeption *b* mit indirekter Kühlung im Stator und direkter Kühlung im Rotor ohne Zusatzventilator mittels Wasserstoff wird für Leistungen von 40...235 MVA benützt. Die Konzeption *c* mit Flüssigkeitskühlung des Stators und Wasserstoffkühlung des Rotors ohne Zusatzventilator ist eine Lösung, die nur noch bei speziellen Bedingungen, wie z. B. Transportbeschränkungen, angewandt wird. Sie überdeckt den Leistungsbereich von 150...250 MVA. Die Konzeption *d* mit Flüssigkeitskühlung der Statorwicklung, achsialer Wasserstoffkühlung des Statoreisens und direkter Wasserstoffkühlung der Rotorwicklung mit Zusatzkompressor wird ab einer Leistung von 190 MVA angewendet und ist verwendbar bis zu einer Leistung von ca. 1400 MVA. Die letzte Konzeption (*e*) mit

Wasserkühlung im Stator und Rotor dürfte je nach der Verlustbewertung im allgemeinen ab ca. 500 MVA interessant sein.

2. Die Erregung des Turbogenerators

Die Erregung der Turbogeneratoren bis zu Leistungen von 150 MVA erfolgt normalerweise durch direkt angetriebene Erreger. Für kleine Leistungen finden ebenfalls Kompoundierungsschaltungen mit Drosselspulen und Siliziumgleichrichtern Anwendung. Für Leistungen über ca. 150 MVA, für welche die Erregermaschine von 3000 U./min technisch problematisch wird, werden verschiedene Erregungssysteme verwendet. Entweder wird die Erregermaschine über ein Untersetzungsgetriebe angetrieben oder es treten an deren Stelle stationäre, statische Gleichrichter, wie z. B. gittergesteuerte Quecksilberdampf-Gleichrichter. Ein anderes Erregungssystem unterdrückt den Kollektor der Erregermaschine und das Untersetzungsgetriebe dadurch, dass als Erregermaschine ein kleiner direkt angetriebener Turbogenerator verwendet wird, dessen Ausgangsleistung durch stationäre Halbleiterdioden gleichgerichtet wird. Um die Schleifringe, bzw. deren Wartung zu umgehen, ist ebenfalls ein System mit mitrotierenden Halbleiterdioden entwickelt worden. Fig. 13 zeigt einen Längsschnitt durch die Erregungseinrichtung mit rotierenden Gleichrichtern für einen Turbogenerator von 667 MVA. Der Anker der Wechselstromerregermaschine sitzt auf der Welle und speist die Dioden, die in den beiden Trägerscheiben untergebracht sind. Der Gleichstrom wird wie üblich durch die Hohlbohrung der Welle in das Maschineninnere geführt. Diese Anordnung besitzt keinen einzigen Kontakt zwischen rotierendem und stillstehendem Teil. Da kein Kohlestaub mehr auftritt, kann der Luftkreislauf der Erregeranordnung geschlossen werden. Im Gehäuse der Erregeranordnung sind eigene Luftkühler eingebaut. Die Dioden sind in dem dargestellten Fall in dreiphasiger Brückenschaltung angeordnet. Pro Brückenzweig sind mehrere Dioden parallelgeschaltet. Für den Fall eines Defektes an einer Diode sind für jeden Parallelpfad Sicherungen eingebaut, die mitrotieren und die kranke Diode abschalten. Eine spezielle Einrichtung überwacht ebenfalls kontaktlos jede Sicherung und meldet den Ausfall mit der Angabe, um welche Sicherung es sich handelt. Die Dimensionierung der Diodenbrücke wird so vorgenommen, dass pro Zweig mehrere Dioden ausfallen können, ohne dass der Generator abgestellt werden muss.

Die Erregeranordnung mit rotierenden Dioden wird heute nicht nur für grosse Turbogeneratoren angewandt, sondern auch für Synchrongeneratoren kleiner Leistung.



Stator	Luft	H_2	H_2O (Öl)	H_2O (Öl)	H_2O
Rotor	Luft	H_2	H_2	H_2 mit Kompressor	H_2O
	a	b	c	d	e

Fig. 12
Leistungsmässige Einteilung der verschiedenen Konzeptionen von Turbogeneratoren (BBC)
Erläuterungen siehe im Text

3. Hilfsbetriebe

Im Gegensatz zu den hydraulischen Kraftwerken, die wenige Hilfsantriebe mit einer verschwindend kleinen Leistung brauchen, benötigen die Hilfsantriebe eines Dampfkraftwerkes einen bedeutenden Anteil der vom Generator erzeugten Leistung. Man kann annehmen, dass eine Einheit von 150 MW durchschnittlich 15 Hochspannungsmotoren und über 100 Niederspannungsmotoren erfordert. Die Leistung der Hilfsbetriebe ist abhängig von der Kesselbauart, Brennstoffsorte, Verwendung von Kühltürmen mit künstlicher Belüftung, Luftkondensation, anstatt Kondensation mit Kühlwasser. Sehr stark ist der Einfluss des Frischdampfdruckes auf die Leistung der Hilfsantriebe. Unter normalen Verhältnissen beträgt die von einer Dampfzentrale benötigte Leistung der Hilfsbetriebe 5 bis 7 % der Generatorenleistung.

Fig. 14 zeigt die Abhängigkeit der Leistung der Hilfsbetriebe vom Frischdampfdruck p. In dieser Kurve ist die Leistung unterteilt in die Leistung der Kesselspeisepumpen und die Leistung der übrigen Hilfsbetriebe. Die heute normal üblichen Frischdampfdrücke gehen bis 180 kg/cm². Mit diesem Wert ergibt sich der oben angegebene Prozentsatz von ca. 7 %.

Die Auslegung des Hilfsnetzes ist damit für ein Dampfkraftwerk von grösster Bedeutung. Für deren Speisung werden verschiedene Schaltungen verwendet, von denen sich eine heute besonders eingebürgert hat. Fig. 15 zeigt die vier wichtigsten Schaltungen für die Speisung der Hilfsbetriebe.

In der Schaltung *a* arbeitet der Generator ohne Zwischenschaltung eines Transformators direkt auf das Sammelschienensystem des Kraftwerkes. Das Hilfsnetz wird im Normalbetrieb von der Kraftwerksammelschiene über einen Schalter und Transformator gespeist. Zum Anfahren einer Maschinengruppe ist eine Hilfsquelle von einem Fremdnetz notwendig. Diese Schaltung wird heute noch für Turbogeneratorgruppen von 10...20 MW verwendet. Bei grösserenGruppen-Einheitsleistungen können die Kurzschlussleistungen bei Generatorspannung nicht mehr wirtschaftlich ge-

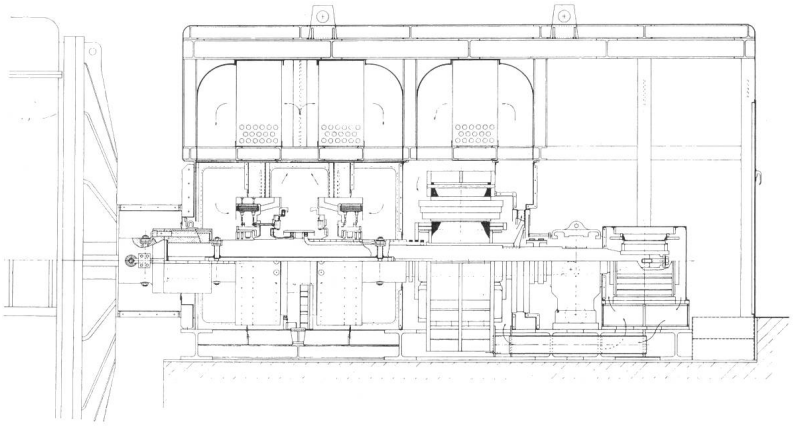


Fig. 13
Schnitt durch Erregungseinrichtung mit rotierenden Gleichrichtern für einen Turbogenerator von 667 MVA

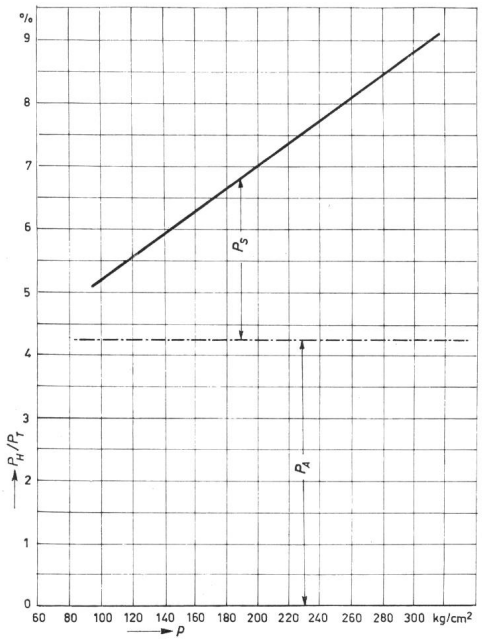


Fig. 14
Leistungsbedarf P_H der Hilfsbetriebe als Prozentsatz der Einheitsleistung P_T der Turbogeneratorgruppe in Abhängigkeit des Frischdampfdruckes p
P_S Leistung der Speisepumpen; P_A Leistung der übrigen Hilfsbetriebe; $P_H = P_S + P_A$

meistert werden, so dass andere Speisemöglichkeiten der Hilfsbetriebe verwendet werden.

In der Schaltung *b* wird das Hilfsnetz aufgeteilt in ein Hilfsnetz für die allgemeinen Hilfsbetriebe und die Hilfsnetze für die eigentlichen Maschinengruppen. Mit jeder Turbogeneratorgruppe ist ein Hilfsgenerator direkt gekuppelt, der im Normalbetrieb das Hilfsnetz der eigenen Maschinengruppe speist. Die Maschinengruppe wird damit autonom. Der Anfahrtransformator speist im Normalbetrieb die allgemeinen Hilfsbetriebe des ganzen Kraftwerkes und beim Anfahren zusätzlich die Hilfsbetriebe der Maschinengruppe. Nachteilig an dieser Schaltung ist, dass die Turbogeneratorgruppe verlängert und damit das Bauvolumen vergrössert wird. Eine Revision des Hilfsgenerators dauert ebenfalls bedeutend länger, als die eines Transformators.

Die Schaltung *c* ist ähnlich derjenigen nach *b*. Der Hilfsgenerator wird jedoch nicht mit der Turbogeneratorgruppe direkt gekuppelt, sondern von einer separaten Dampfturbine angetrieben. Diese Lösung kommt sehr selten zur Anwendung, da die Investitionskosten hoch sind, die Dauer einer Revision lang und der Wirkungsgrad einer solchen Gruppe, im Vergleich zur Hauptturbogeneratorgruppe, niedrig sind. Damit diese Schaltung wirtschaftlich wird, müsste die Hilfsturbogeneratorgruppe die Hilfsbetriebe mehrerer Maschinengruppen speisen. Ein Ausfall der Hilfsturbogeneratorgruppe würde jedoch dann den Ausfall aller oder des grössten Teiles der Hauptturbogeneratorgruppen bedeuten.

Die Schaltung *d* wird heute fast ohne Ausnahme für Kraftwerke mit Einheitsleistungen von mehr als 30 MW verwendet. Im Gegensatz zur Schaltung *b* werden die Hilfsbetriebe der Maschinengruppe nicht von einem Hilfsgenerator gespeist, sondern von den Klemmen des Hauptgenerators über einen Transformator. Wegen der hohen Kurzschlussleistung wird zwischen Generator und Hilfstransformator kein Schalter vorgesehen. Der Nachteil der Schaltung *d* gegenüber der Schaltung *b* ist, dass bei einem Defekt im Hilfstransformator die ganze Turbogeneratorgruppe ausser Betrieb gesetzt werden muss, während in Schaltung *b* ein Fehler im Hilfsgenerator nicht unbedingt zum Stillsetzen der Turbogeneratorgruppe führt. Um Fehlerquellen zu eliminieren, wird der Hilfstransformator möglichst ohne Stufenschalter ausgeführt, und es empfiehlt sich, die Verbindungen zwischen dem Generator und Haupt- sowie Eigenbedarfstransformator gekapselt mit getrennten Phasen auszuführen (Fig. 16).

In den Lösungen *b, c* und *d* ist für das Anfahren, sowie für die Speisung der allgemeinen Hilfsbetriebe, ein Anfahrtransformator vorgesehen, der gewöhnlich an ein lokales Netz angeschlossen wird. Im Falle, dass das lokale Netz nicht sicher genug ist, kann dieser Transformator an die Hochspannungssammelschiene des Kraftwerkes angeschlossen werden. Bei Spannungen von 220 kV und höher, bei denen der Preis des Anfahrtransformators und der Hochspannungszelle sehr hoch ist, besteht die Möglichkeit, durch Varianten der Schaltung *d* wirtschaftlichere Lösungen zu finden.

Der Eigenbedarfs-Transformator der Maschinengruppe dient zur Speisung aller Antriebe und elektrischer Kreise, welche für den Betrieb der Maschinengruppe unbedingt erforderlich sind. Er muss überdies in der Lage sein, die Leistung der allgemeinen Hilfsbetriebe zu decken.

Der Anfahrtransformator muss so bemessen werden, dass dieser nicht nur die Speisung der allgemeinen Hilfsbetriebe sichert, sondern gleichzeitig den Eigenbedarf einer Maschinengruppe und das Anfahren einer zweiten Gruppe erlaubt.

Als Beispiel sei ein Kraftwerk mit zwei Maschinengruppen von je 150 MVA angenommen. Die folgenden Hilfsleistungen können als durchschnittliche Werte eingesetzt werden:

Blockeigenbedarf pro Gruppe (5...7 %)	7,5...10,5 MVA
Allgemeine Hilfsbetriebe, total	1,5... 3 MVA
Anfahrleistung einer Maschinengruppe	3 ... 4 MVA

Mit diesen Angaben beträgt die Leistung des Eigenbedarfs-Transformators einer

Maschinengruppe	9...13,5 MVA
und die Leistung des Anfahrtransformators .	12...17,5 MVA

Die Transformatoren sind so zu dimensionieren, dass die Spannungsabfälle bei den Mittelspannungs- und Niederspannungsschienen der Hilfsbetriebe nicht zu gross werden, wenn während des normalen Betriebes eine weitere Speisepumpe eingeschaltet wird oder die Hilfsbetriebe von der Eigenbedarfsschiene der Maschinengruppe zur Allgemeinschiene oder umgekehrt umgeschaltet werden. In den meisten Fällen sind beide Transformatoren so bemessen, dass der maximale kurzzeitige Spannungsabfall unter 15 % bleibt.

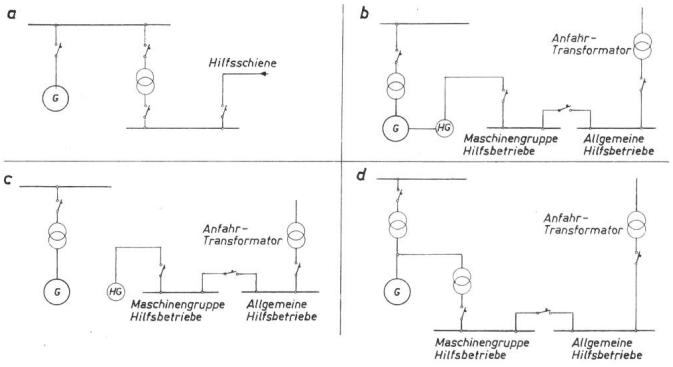


Fig. 15
Die vier wichtigsten Prinzipschaltungen für die Speisung der Hilfsbetriebe

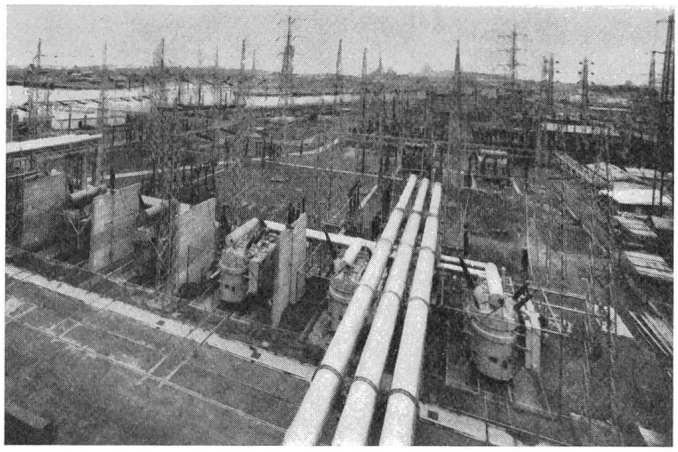


Fig. 16
Leitungen zwischen Generator und Haupttransformator in gekapselter Ausführung

Die zu wählende Spannung des Hilfsnetzes hängt von seiner Grösse ab. Bei Turbogeneratorgruppen kleinerer Leistung als ca. 25 MW ist es möglich, die verschiedenen Antriebe an die Niederspannung anzuschliessen. Mit der Erhöhung der Leistung der Turbogeneratorgruppen über ca. 25 MW werden einige Motoren, vor allem die für die Speisewasserpumpen so gross, dass es sich lohnt, diese als Hochspannungsmotoren auszuführen. Überdies, sobald die Leistung der Hilfsbetriebe einen Wert von 1500 kVA oder mehr erreicht, erhöhen sich die Kurzschlußströme so stark, dass die Niederspannungsanlage nicht mehr wirtschaftlich wird.

Als Mittelspannung wird in Europa meistens 6 kV verwendet, neben 6,3; 6,6 und 3 kV. Die an diese Spannung angeschlossenen Motoren nehmen ungefähr 90% des gesamten Leistungsbedarfes auf.

Für die Niederspannung findet man gewöhnlich 380/220 V und in einigen Fällen 500 V.

Die Anstrengungen während der letzten Jahre, um die Abmessungen der Zellen zu verkleinern, den Kontakt mit den spannungsführenden Teilen, sowie Fehlmanipulationen und Explosionsgefahr zu vermeiden, führten zu der Verwendung von gekapselten, ausziehbaren Hoch- und Niederspannungsfeldern.

Als Gleichspannung wird 110 oder 220 V vorgesehen.

Wie in Fig. 15 gezeigt, müssen die Hilfsbetriebe der Maschinengruppen nach dem Anfahren vom Anfahrtransformator auf den Eigenbedarfs-Transformator der Maschinengruppe umgeschaltet werden. Eine Umschaltung kann auch nötig werden bei einem eventuellen Defekt. Für die Umschaltung stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Im einen Fall werden die beiden Transformatoren der Schaltung *d* parallel geschaltet und erst anschliessend der Kuppelschalter geöffnet. Dies sollte möglichst vermieden werden, da sonst ein Leistungsfluss zwischen dem Anfahrnetz und dem Generatornetz stattfinden kann und auch die Mittelspannungsschalter für die Summe der Kurzschlussleistungen beider Transformatoren bemessen sein müssen. Im zweiten, allgemein üblichen Fall, wird der Kuppelschalter zwischen den allgemeinen Hilfsbetrieben und den Hilfsbetrieben der Maschinengruppe geöffnet bevor die Hilfsbetriebe der Maschinengruppe auf den Eigenbedarfs-Transformator der Gruppe geschaltet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass keine kurzzeitige Parallelschaltung der Netze stattfindet und die Schalter nur für die Kurzschlussleistung des grössten der Hilfstransformatoren bemessen sein müssen. Die Umschaltung wird in den meisten Fällen mittels einer einfachen Einrichtung, die hauptsächlich aus einem Zeitrelais besteht, eingeleitet. Dieses Zeitrelais leitet den Einschaltimpuls mit einer Verzögerung von ca. 1 s weiter, da sonst die Gefahr von Phasenopposition zwischen der Spannung der einzuschaltenden Schiene und der Motorenrestspannung besteht.

Mit der Verwendung einer während einiger Jahre zur vollen Zufriedenheit erprobten elektronischen Einrichtung ist es möglich, die Umschaltung in der kurzmöglichsten Zeit vorzunehmen. Die elektronische Einrichtung gibt praktisch trägheitlos den Befehl zur Umschaltung, sobald:

a) Die Phasendeckung der beiden zu vergleichenden Spannungen vorhanden ist;

b) Die Differenzspannung zwischen Motorenrestspannung und Spannung des Reservenetzes nicht einen bestimmten Wert übersteigt und

c) Die Frequenzdifferenz zwischen ab- und einzuschaltendem Netz nicht höher als 4% ist.

Bei günstigen Verhältnissen ist es möglich, mit der elektronischen Einrichtung Umschaltzeiten von ca. 0,13 s zu erreichen.

Der bei der Langsamumschaltung erwähnte Grenzwert von einer Sekunde entspricht der Zeit, die erfahrungsgemäss notwendig ist, damit die Motorenrestspannung in einem Dampfkraftwerk den Wert von 40 % der Nennspannung erreicht. Die Motoren sollten so gebaut werden, dass ihre Einschaltung bei 40 % Restspannung in Phasenopposition erfolgen kann.

Damit während der spannungslosen Zeit beim Umschalten die Motoren in Betrieb bleiben, werden die Schalter der Hochspannungsmotoren mit kurzzeitiger Abfallsperre oder mit Gleichstromsteuerung versehen. Für die Überspannungsschütze, gewöhnlich mit Wechselstromsteuerung, sind Zeitrelais oder Kondensatoren zu verwenden, um den kurzzeitigen Spannungsabfall zu überbrücken.

Gegeben durch die Wichtigkeit der Hilfsbetriebe müssen verschiedene zusätzliche Sicherheitsmassnahmen getroffen werden. Bei Blockschaltung der Maschinengruppe mit dem Transformator für die Speisung der Hilfsbetriebe bleiben der Eigenbedarfs- und der Anfahrtransformator immer in Betrieb. Bei einem Fehler in irgendeinem Kreis der allgemeinen Hilfsbetriebe wird der Betrieb der Maschinengruppe nicht beeinflusst. Die für den Betrieb der Gruppe notwendigen Antriebe, wie Speisewasserpumpen, Frisch- und Saugzugventilatoren, Kühlwasserpumpen, Kondensatpumpen usw., sind meistens zweifach vorhanden. Bei Ausfall eines dieser Antriebe ist es möglich, weiterzufahren, evtl. mit reduzierter Last.

Eine Anzahl Antriebe, wie z. B. diejenigen für die Ölversorgung der Lager oder für die Dichtölversorgung der wasserstoffgekühlten Generatoren, müssen auch dann im Betrieb bleiben, wenn eine Gesamtstörung der Anlage eintritt. Diese Pumpen werden deshalb ergänzt durch Gleichstrom-Notpumpen, die von einer Akkumulatorenbatterie gespeist werden.

Bei gewissen Kesselbauarten, vor allem bei Zwangsdurchlaufkesseln, müssen ausser den erwähnten Gleichstromverbrauchern bei Störungen auch noch kleinere Wechselstromverbraucher weiter betriebsfähig bleiben, wie z. B. ein Teil der elektrischen Kesselregelanlagen und der Kesselüberwachungsgeräte, wichtige Klappenantriebe usw. Für diese Energieverbraucher wird eine sog. «gesicherte Drehstromschiene» vorgesehen. Diese wird normalerweise von der vorhandenen Drehstromschiene versorgt, welche die übrigen Messgeräte, Regler

usw. speist. Erst bei Gesamtstörungen wird sie automatisch auf einen batteriegespeisten Gleichstrom-Drehstromumformer umgeschaltet.

Zum Schluss noch einige Bemerkungen zu den Antriebsmotoren für die Hilfsbetriebe. Fast ohne Ausnahme werden in modernen Kraftwerken wegen ihrer Robustheit und leichten Wartung, Kurzschlussanker-Asynchronmotoren mit direkter Einschaltung verwendet. Für den Antrieb von Kohlemühlen, Ventilatoren und Kohlenbrechern kommen vollständig gekapselte Motoren mit Aussenventilation zur Anwendung. Dies ist auch für alle anderen Antriebe in salzhaltiger oder chemisch verunreinigter Atmosphäre der Fall. Für Speisewasserpumpen grosser Leistung können luftgekühlte Motoren mit Wasserkühlern gewählt werden. Wo eine Drehzahlregulierung verlangt wird, wie z. B. für die Speisewasserpumpen, können Käfigankermotoren mit hydraulischen Kupplungen oder sogar Schleifringmotoren mit Wasseranlasser in Anwendung kommen. Heutzutage werden auch elektronische Einrichtungen verwendet, die das Problem der Drehzahlregulierung auf elegante und sichere Weise lösen.

Literatur

[1] *H. Spiess:* Die günstigste Bemessung der Kühlkanäle bei direkt gekühlten Turborotorwicklungen. Bull. Oerlikon –(1963)355, S. 20...23.

[2] *Gerhard Neidhöfer:* Optimierung auf kleinste Ventilations- und Stromwärmeverluste bei gasgekühlten Läufern von Grossturbogeneratoren. ETZ–A, 86(1965)11, S. 353...360.

Adresse des Autors:
R. Noser, dipl. Ingenieur, Vorstand der Abteilung für Synchronmaschinen der AG Brown, Boveri & Cie., 5400 Baden.

EMIL RATHENAU

1838—1915

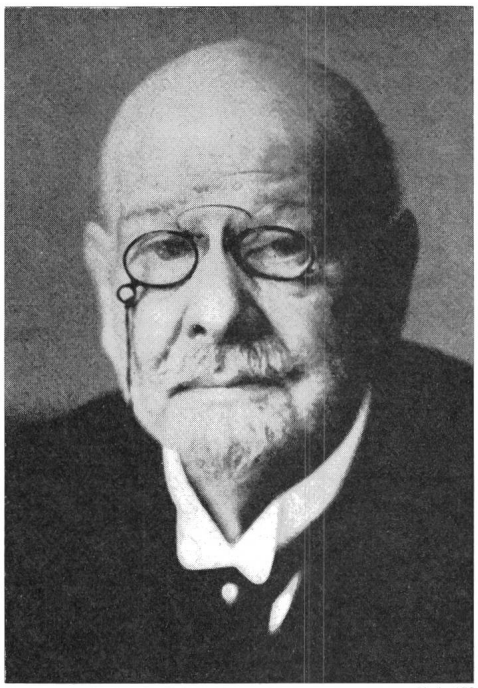


Photo AEG

Die Bedeutung des deutschen Grossindustriellen Emil Rathenau liegt vor allem darin, dass er die wichtigen Erfindungen erkannte und sich dann mit grossem Elan dafür einsetzte.

Als Sohn eines Kaufmanns am 11. Dezember 1838 in Berlin geboren, studierte er an der Technischen Hochschule in Hannover und 1861/62 an der ETH in Zürich. Als 35jähriger kaufte er zusammen mit einem Jugendfreund eine Maschinenfabrik, zog sich aber zwei Jahre darauf wieder zurück, um Reisen zu machen. So besuchte er 1876 in Philadelphia eine Ausstellung. Von dort brachte er das Telephon nach Berlin, um alsdann im Auftrag des Generalpostmeisters *Stephan* in Berlin die erste Telephonzentrale einzurichten. Den grössten Impuls erhielt er indessen 1881 an der Elektrizitätsausstellung in Paris, wo *Edison* 1000 Kohlenfaden-Glühlampen im Betrieb zeigte. Rathenau erwarb von *Edison* Patente, gründete eine Studiengesellschaft und richtete im Auftrag von *Millers* 1882 an der Elektrotechnischen Ausstellung in München die Illuminationen ein. Mit 5 Mill. Mark Aktienkapital gründete er 1883 in Berlin die «Deutsche Edison Gesellschaft», die sich indessen verpflichtet hatte, alle elektrischen Einrichtungen von *Siemens* zu kaufen; nur Glühlampen wurden selber fabriziert. Mit dem Namen Siemens, der überall den besten Ruf genoss, machte Rathenau gute Geschäfte. Er verstand es auch stets, die richtigen Leute einzusetzen.

1887 wurde die Deutsche Edison-Gesellschaft in die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft (AEG) umgewandelt und Rathenau deren Generaldirektor. Den gleichen Posten nahm er bei der auch von ihm gegründeten Berliner Elektrizitätswerk AG (BEWAG) ein. In dieser Zeit wandte sich *Oskar von Miller* an Rathenau und an *Huber-Werdmüller* der MFO. Gemeinsam setzten sie sich für die Verwirklichung der ersten Drehstrom-Kraftübertragung ein, die 1891 an der Ausstellung in Frankfurt a/M grosses Aufsehen erregte.

Vier Jahre vor der Jahrhundertwende gründete er dann eine eigene Finanzierungsgesellschaft, die Bank für elektrische Unternehmungen in Zürich, aus der später die heutige Elektrowatt hervorging.

In diese Zeit fielen dann die die AEG einschränkenden Bestimmungen im Vertrag mit Siemens. Dann folgten verschiedene andere Neugründungen. Erwähnt seien die der Telefunken-Gesellschaft (gemeinsam mit Siemens, 1903) und der Aluminiumwerke Rheinfelden.

Rathenau starb am 20. Juni 1915 in Berlin, nicht berühmt durch eigene Ingenieurtaten, sondern als Wirtschaftsführer und Finanzmann.

H. Wüger