

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 67 (1976)

Heft: 21a: Sondernummer Elektrotechnik 1976 = Edition spéciale Electrotechnique 1976

Artikel: Maschinen und Transformatoren

Autor: Abegg, K. / Kreuzer, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915230>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 31.03.2025

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

Maschinen und Transformatoren

Von K. Abegg und J. Kreuzer

621.314.21; 621.313

1. Einleitung

Die Technik der rotierenden elektrischen Maschinen und der Transformatoren befindet sich zurzeit in einer Konsolidierungsphase. Nach dem stürmischen Wachstum in den sechziger Jahren und zu Beginn der siebziger Jahre hat die Ölkrise 1973 und die damit zusammenhängende Rezession in allen Industriestaaten zu einer Verschiebung der Entwicklungsschwerpunkte geführt. Während der zunehmende Elektrizitätsbedarf in der Wachstumsphase zu Maschinen und Transformatoren mit immer höheren Leistungen zwang, haben die rückläufigen Zuwachsraten des Energiebedarfes, die steigenden Preise der Primärenergieträger und der zunehmende Konkurrenzkampf in den vergangenen zwei Jahren dazu geführt, dass die Akzente der Entwicklung auf Sicherheit, Verfügbarkeit und Kostenreduktion gelegt werden mussten. Das Schwergewicht der Entwicklungsarbeiten liegt heute auf der Qualitätssicherung bei gleichzeitiger Rationalisierung. Dabei umfasst die Qualitätssicherung sämtliche Bereiche, ausgehend vom Konzept, über Technik, Fertigung, Prüfung bis zum Betrieb und zur Serviceleistung. Die grössten Rationalisierungseffekte liegen in der Normalisierung und Standardisierung sowie in der Anwendung von Fertigungsverfahren, die es gestatten, die für das Produkt und seine Komponenten notwendigen Qualitätsanforderungen mit minimalem Aufwand zu erfüllen.

2. Rotierende Maschinen

Besonders eindrücklich sind die Erfolge der Rationalisierungsmaßnahmen bei den kleinen und mittleren Maschinen und Transformatoren im Leistungsbereich bis 100 MVA.

Die Asynchronmotoren im mittleren Leistungsbereich überdecken mit Achshöhen von 400 bis 1000 mm einen ausserordentlich grossen Applikationsbereich in der Industrie und im Kraftwerkbau. Durch eine zweckmässige Baukasten-technik ist es gelungen, die Vielfalt an Bauformen und Betriebsparametern elektrischer, mechanischer und betrieblicher Art durch Standard-Baureihen mit normalisierten Komponenten und Fertigungsverfahren mit minimalem Aufwand zu bewältigen. Wesentlich zu diesem Erfolg hat die sogenannte *Compact-Technik* für die Statorn dieser Maschinen beigetragen (Fig. 1). Der Blechkörper und die Statorwicklung werden nach einem einheitlichen Fertigungsverfahren als kompaktes Bauelement hergestellt, welches im Statorgehäuse befestigt wird. Die Statorspulen werden mit Isolierbändern aus Glasgewebe und Glimmervlies isoliert, in die Nuten des Blechkörpers eingelegt und im Wicklungskopf durch Glaskordeln gegeneinander fixiert. Anschliessend werden Blechkörper und Wicklung im Vakuum mit Kunstharz imprägniert und in einem Ofen ausgehärtet. Obwohl das Verfahren einen beträchtlichen Aufwand erfordert, konnte ein wesentlicher Rationalisierungseffekt bei gleichzeitiger Quali-

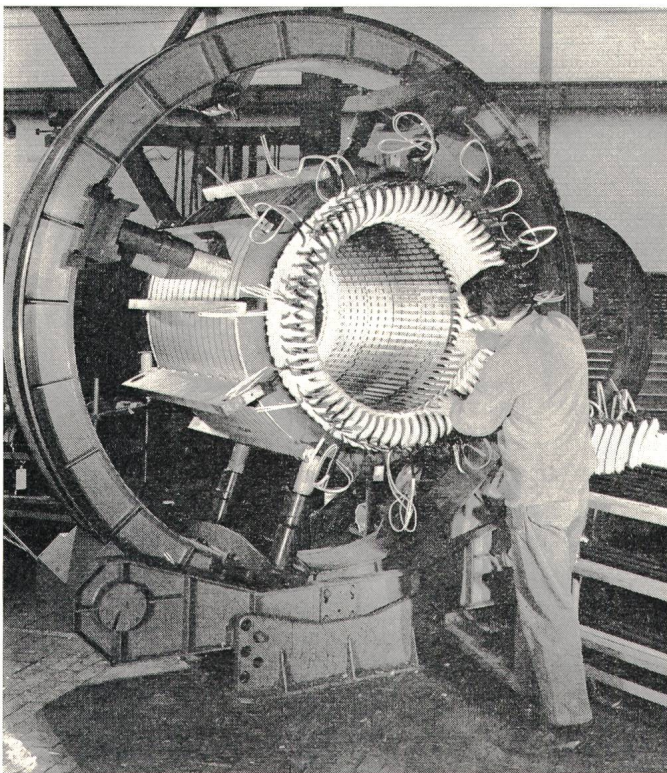


Fig. 1 Einbaustator (Blechkörper + Wicklung) für einen 4poligen Asynchronmotor von 5500 kW, 6 kV

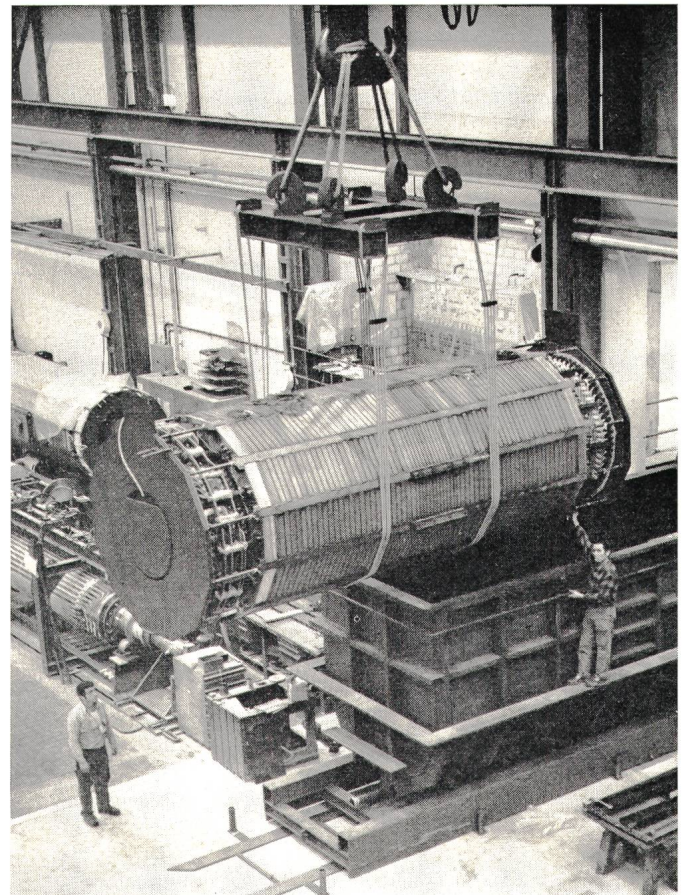


Fig. 2 55 Tonnen schwerer Einbaustator für einen luftgekühlten Turbogenerator von 65 MVA, 11 kV, beim Ausfahren aus dem Imprägniergefäss nach erfolgter Vakuumimprägnierung mit Kunstharz und Aushärtung

Kühlmittel Maschinenteil	Luft		Luft + Wasser. (Öl)	Wasserstoff				Flüssigkeiten + inerte Gase
						+ Wasser		
<i>Stator</i> Wicklung Blechkörper inaktiver Teil	indirekt	direkt	direkt H ₂ O direkt Luft direkt Luft	indirekt	direkt	direkt H ₂ O direkt H ₂ direkt H ₂	direkt H ₂ O direkt Öl direkt N ₂	
<i>Rotor</i> Wicklung Rotorkörper Inaktiver Teil	indirekt	direkt	direkt H ₂ O direkt Luft direkt Luft	direkt	direkt	direkt H ₂ direkt H ₂ direkt H ₂	direkt H ₂ O direkt Luft oder N ₂	
<i>Anwendungs- beispiele:</i>	Schleifring- anker- motoren Kollektor- maschinen	Käfigankermotoren Turbogeneratoren < 130 MVA Hydrogeneratoren < 15 MVA/Pol	Hydrogeneratoren > ca. 15 MVA/Pol (z. B. BBC) Turbogeneratoren > 300 MVA (z. B. ASEA)	Turbogeneratoren				
				< 250 MVA	> 250 MVA (z. B. Westing- house)	2polig: > 200 MVA 4polig: > 800 MVA (alle Her- steller gros- ser Turbo- generatoren)	> 400 MVA > 1000 MVA (z. B. KWU)	> 1000 MVA > 1500 MVA (z. B. BBC)

Direkt ≙ direkter Kontakt
Indirekt ≙ kein direkter Kontakt } Zwischen Kühlmittel und Verlustträger

tätsverbesserung erzielt werden. Blechkörper und Wicklung bilden ein homogenes Ganzes mit verbesserter Kurzschlussfestigkeit. Die imprägnierten Glaskordeln zur Wicklungskopfabstützung verhindern das bei der konventionellen Technik kritische Lockern der Bandagen und Lösen von Abstützteilen. Die Statorbleche sind miteinander verklebt; die Gefahr von Blechvibrationen, Blechschlüssen und damit von Eisenbrand ist weitgehend eliminiert. Der vorzügliche Kontakt zwischen Wicklung und Blechkörper gewährleistet einen gleichmässig guten Wärmeübergang und vermeidet die gefürchteten Hotspots, welche die Lebensdauer der Wicklungen beeinträchtigen. Zudem hat die Erfahrung gezeigt, dass Compact-Statoren praktisch wartungsfrei sind. Diese Vorteile müssen allerdings mit einem gewissen Fabrikationsrisiko erkauft werden: Fehler, welche nach dem Imprägnieren und Aushärten festgestellt werden, können nur mit relativ grossem Aufwand korrigiert werden. Das Compact-Verfahren erfordert daher ein ausgeklügeltes Qualitätssicherungssystem für die Fertigung, welches derartige Fehler ausschliesst.

In den letzten zwei Jahren ist die Compact-Technik auch im Turbogeneratorenbau eingeführt worden. Insbesondere die luftgekühlten Turbogeneratoren im Leistungsbereich bis ca. 130 MVA konnten von den Erfahrungen mit dieser Technik bei den Motoren mittlerer Leistung profitieren. Luftgekühlte Turbogeneratoren für den Antrieb durch Dampf- oder Gasturbinen erfordern eine raumsparende, kompakte Bauweise zur Reduktion des Investitionsaufwandes. Sie müssen sich sowohl für den Grundlast- als auch für den Spitzenlastbetrieb eignen, d. h. täglich zum Teil mehrmals angefahren und stillgesetzt werden können, und sollen möglichst wartungsfrei sowie montage- und servicefreundlich sein. Die Compact-Technik erfüllt diese Anforderungen in idealer Weise (Fig. 2). Zudem gestattet sie durch Anwendung der Baukastentechnik die Typenzahl zu reduzieren und die Lieferung von Ausführungsvarianten ohne Änderung des Fertigungsprozesses der aktiven Bauteile.

Auch in der gegenwärtigen Konsolidierungsphase spielt in der Weiterentwicklung der rotierenden elektrischen Maschinen die *Kühltechnik* eine dominierende Rolle. Ihr Ziel ist höhere Ausnützung des teurer werdenden Materials bei möglichst tiefen Betriebstemperaturen, möglichst gleichmässiger Temperaturverteilung und minimalem Aufwand. Die Einhaltung der Bedingungen an das Erwärmungsverhalten der Maschine sind unerlässlich mit Rücksicht auf die betrieblichen Forderungen bezüglich Laufruhe, Verfügbarkeit, Wartungsarmut und Lebensdauer. Die Weiterentwicklung der Kühltechnik ist daher nicht nur die wesentlichste Voraussetzung für die weitere Steigerung der Einheitsleistungen, sondern ebensosehr eine Bedingung zum Erreichen der Zielsetzung: Betriebssicherheit bei minimalem Aufwand.

In Tabelle I sind die Kühlverfahren für rotierende elektrische Maschinen zusammengestellt, wobei auf das Kühlmittel Helium, welches für supraleitende Wicklungen gebraucht wird, verzichtet wurde, da nicht damit zu rechnen ist, dass Kryomaschinen in den nächsten 10...15 Jahren in grösserem Umfang eingesetzt werden.

Bei den luftgekühlten Maschinen wird die Statorwicklung meistens indirekt gekühlt, d. h., das Wicklungskupfer steht nicht in direktem Kontakt mit dem Kühlmittel. Eine Ausnahme bilden die grossen Hydrogeneratoren, deren Statorwicklungen direkt mit Wasser gekühlt werden. Die Rotorwicklungen luftgekühlter Maschinen werden mit Ausnahme der Kollektor- und Schleifringanker-Maschinen direkt gekühlt. Bei grossen Hydromaschinen setzt sich auch die direkte Wasserkühlung der Rotorwicklung immer mehr durch. Die Entwicklungsschwerpunkte liegen in der Verlustoptimierung durch geeignete Wahl der Stromdichten im Kupfer, der magnetischen Induktionen und Dynamoblechqualitäten sowie der zweckmässigen Auslegung des Ventilationssystems einerseits und der Geräuschminderung andererseits.

Die grösste Vielfalt an Kühlsystemen herrscht bei den grossen Turbogeneratoren, was nicht verwunderlich ist, handelt es sich doch bei den 2poligen Turbogeneratoren um Maschinen mit den grössten Leistungen pro Gewichtseinheit.

Drei Kühlverfahren stehen im Vordergrund (Fig. 3):

- Wasserstoffkühlung kombiniert mit direkter Wasserkühlung der Statorwicklung und direkter Wasserstoffkühlung der Rotorwicklung
- Wasserstoffkühlung mit direkter Wasserkühlung der Stator- und Rotorwicklung
- Flüssigkeitskühlung mit direkter Wasserkühlung der Stator- und Rotorwicklung und Ölkühlung des Blechkörpers.

Alle drei Verfahren befinden sich in der Konsolidierungsphase. Auch die direkte Wasserkühlung der Turborotorwicklungen hat in den letzten Jahren die Bewährungsprobe bestanden, nachdem dieses Verfahren bei Rotoren grosser Hydrogeneratoren schon seit mehr als 10 Jahren mit Erfolg verwendet wird. Während die wasserstoffgekühlten Maschinen mit direkter Wasserkühlung der Wicklungen auf der konventionellen Wasserstofftechnik der Vor- und Nachkriegsjahre basieren, stellt die Flüssigkeitstechnik kombiniert mit einem inerten Schutzgas eine Neuentwicklung dar. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass jeder Maschinenteil mit dem am besten geeigneten, wirksamsten Kühlmittel gekühlt wird: die Wicklungen mit Wasser, der Blechkörper mit Öl, einem Kühlmittel, das sich bei den Transformatoren seit Jahrzehnten bewährt hat. Dadurch ist es möglich, die Maschine kompakter und leichter auszuführen als bei Wasserstoffkühlung, die schwere, explosions sichere Gehäuse erfordert. Ein besonders neuralgischer Ort bei den 2poligen Turbogeneratoren, die Stirnpartie des Blechkörpers, kann mit Öl direkt wirksam gekühlt werden. Öl wirkt zusätzlich isolierend und schwingungsdämpfend auf den Statorblechkörper und verhindert damit die Gefahr von Eisenbrand bei diesen relativ langen Blechkörpern. Als inertes Gas wird Stickstoff verwendet, welches auch bei hohen Statorspannungen Schäden durch eventuelle Glimmerscheinungen sowie Zündeffekte durch Lichtbögen im Zusammenhang mit eventuellen Wicklungsdefekten verhindert. Die Erfahrungen mit dieser wasserstofffreien Kühltechnik zeigen, dass dank der Reduktion der Maschinenlänge für eine bestimmte Leistung und der gleichmäs-

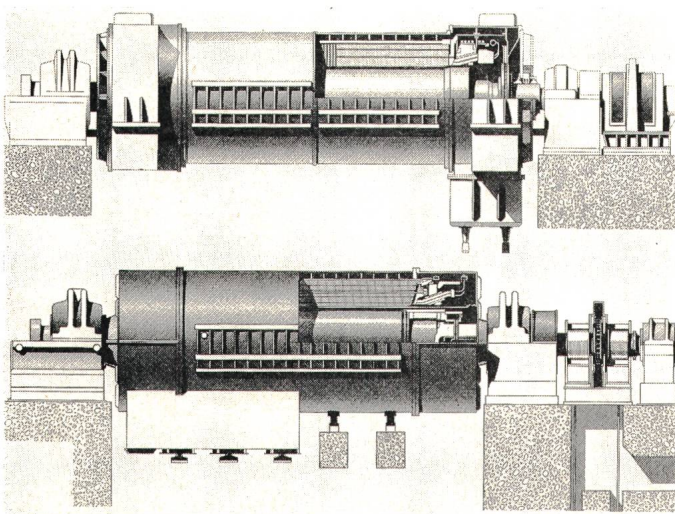


Fig. 3 4polige Turbogeneratoren von 1500 MVA, 1800 U/min, 27 kV, für Kernkraftwerke

- oben: Wasserstoff und Wasserkühlung (Statorwicklung: direkte Wasserkühlung, Rotorwicklung: direkte Wasserstoffkühlung)
- unten: Flüssigkeitskühlung (Statorwicklung: direkte Wasserkühlung, Blechkörper: direkte Ölkühlung, Rotorwicklung: direkte Wasserkühlung)

sigen Temperaturverteilung der Rotorwicklung eine wesentliche Verbesserung der Laufruhe und des Betriebsverhaltens sowohl im stationären Betrieb als auch bei transienten Vorgängen erzielt wird. Durch optimale Anordnung eines Isolierzylinders im Luftspalt ist es möglich, auch bei 2poligen Rotoren die Ventilationsverluste in der Grössenordnung derjenigen von wasserstoffgekühlten Maschinen zu halten.

Auch die neuesten Erfahrungen mit konventionell luftgekühlten Hydrogeneratoren, insbesondere Pumpspeichermaschinen hoher Leistung pro Pol, zeigen deutlich, dass der Wahl geeigneter, auf die Art der Verlustträger abgestimmter Kühlverfahren immer grössere Bedeutung zukommt. Die Rotor-Wasserkühlung wird daher auch bei Hydrogeneratoren ab Leistungen von ca. 15 MVA pro Pol mit Erfolg eingesetzt. Neben den üblichen Wasserübertragern für axiale Wasserzufuhr zum Rotor stehen auch erprobte Übertrager für radiale Wasserzufuhr zur Verfügung, so dass auch Motor-Generatoren für Pumpspeichergruppen mit beidseitig gekuppelten hydraulischen Maschinen (Pumpe, Turbine) mit wassergekühlten Rotorwicklungen ausgeführt werden können.

Die Weiterentwicklung der Kühlung mit flüssigem Helium für supraleitende Maschinen ist sowohl in Europa als auch in den USA im Gang. Das Schwergewicht der Entwicklungsarbeiten liegt bei Spezialmaschinen für Marinezwecke und besondere industrielle Anwendungen sowie bei den Turbogeneratoren. Der Zeithorizont für den Bedarf 2poliger Turbogeneratoren mit Leistungen über 2 GVA wurde jedoch erneut hinausgeschoben, so dass die Frage der Wirtschaftlichkeit von Kryogeneratoren heute im Vordergrund steht. Bei den Turbogeneratoren liegt daher der Akzent bei Untersuchungen zur Abklärung der Betriebssicherheit wichtiger Komponenten, bei Versuchen mit Prototypen reduzierter Leistung und bei Wirtschaftlichkeitsanalysen unter Berücksichtigung der Einsparungen an Gewicht, Volumen und Verlusten beim Generator einerseits und den Risiken bezüglich Zuverlässigkeit des Generators und seines Zubehörs (Kältemaschinen usw.) im Betrieb andererseits.

Der Zwang zur besseren *Materialausnutzung* und die Forderung nach hoher Betriebssicherheit verlangen bessere Kenntnisse des Verhaltens der verwendeten Materialien im Betrieb. Theoretische Untersuchungen und die Auswertung von Erfahrungen im Versuchslokal und im Betrieb führten zu einem besseren Einblick in die Art und Grösse der mechanischen Beanspruchungen kritischer Maschinenteile, wie Wicklungen und deren Abstützungen, Wellen und Kupplungen, Lager usw., unter normalen oder gestörten Betriebsbedingungen. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Materialprüfung und neuerdings auch auf dem Gebiet der Bruchmechanik und der Bruchanalyse gestatten eine zweckmässige Wahl und Prüfung der Materialien sowie eine bessere Beurteilung der Betriebssicherheit bei Abnutzungs- und Ermüdungserscheinungen im Betrieb.

Aus der Vielfalt an Problemen, die besonders bei den Grossmaschinen im Zusammenhang mit der Leistungssteigerung und der dazu notwendigen stärkeren Ausnutzung sowie durch die betrieblichen Anforderungen entstehen, seien nachfolgend einige herausgegriffen, die in den vergangenen Jahren gelöst wurden oder noch bearbeitet werden:

Es stehen heute Grossgeneratoren mit Spannungen bis 26 kV im Betrieb. Die Wicklungs- und Isolationstechnik auf der Basis Micavlies-Glas-Kunstharz hat sich weitgehend

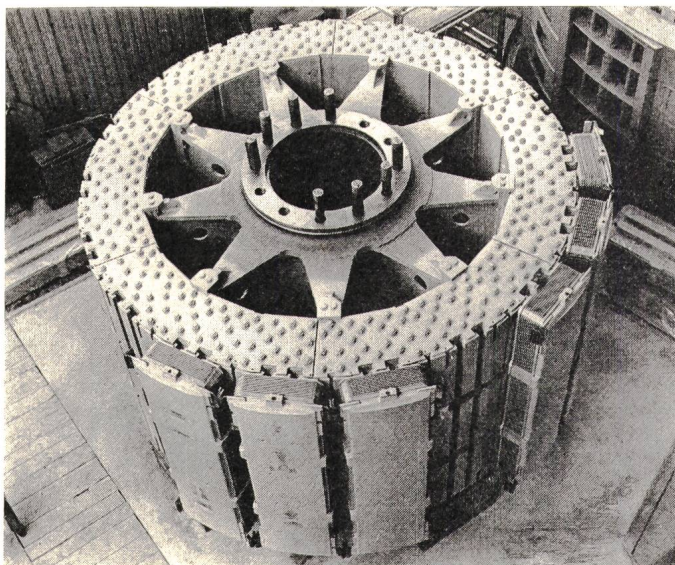


Fig. 4 Polrad der Pumpspeichermaschine Vianden (230 MVA, 333 U/min, 15,75 kV) mit massiven Polen und Polverbindern für direkten asynchronen Anlauf

durchgesetzt. Sie gestattet weitere *Spannungserhöhungen* bis 30 kV.

Die *Erhöhung des Strombelages* bei den Turbogeneratoren führt einerseits zu höheren Verlusten im Stirnraum, andererseits zu grösseren dynamischen Kräften auf die Wicklung in der Nut. Durch nichtmetallische Abstützung der Wicklungsköpfe und geeignete Gestaltung der Stirnraumpartie des Blechkörpers können die Stirnraumverluste in einer annehmbaren Grösse gehalten und die bei transienten Vorgängen grossen dynamischen Beanspruchungen der Wicklung aufgenommen werden.

Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass abnormalen Betriebszuständen wie Schiefast auch bei Turbogeneratoren mit Vorteil durch *vollständige Dämpferwicklungen* entgegengewirkt werden kann. Besondere Beachtung wird den transienten Netzstörungen geschenkt, die zu stark ansteigenden Drehmomentschwingungen führen können, wenn sie in der Nähe der Turbogeneratoren auftreten.

Mit zunehmenden Einheitsleistungen steigt auch der *Erregerbedarf*. Die Erregerleistung kann über Schleifringe oder rotierende Dioden zugeführt werden. Wassergekühlte Schleifringe gestatten bei Turborotoren mit Wasserkühlung hohe Erregerströme bis zu 15 kA zu übertragen. Die Erregung über rotierende Thyristoren ist noch im Entwicklungsstadium.

Mit steigenden Energiekosten nimmt bei den Pumpspeichermaschinen die Nachfrage nach *polumschaltbaren Maschinen* zu, da diese ermöglichen, die Drehzahl für den Pump- und Turbinenbetrieb an die günstigsten hydraulischen Betriebsbedingungen anzupassen. Die Betriebserfahrungen mit diesen technisch anspruchsvollen Maschinen sind gut. Für Maschinen mit grossen Leistungen setzt sich die Lösung mit zwei verschachtelten Statorwicklungen immer mehr durch. Die Optimierung der Polfeldkurven für die beiden Drehzahlen erfolgt durch Umschaltung versetzter Pole oder von Polen mit verschiedenen breiten Polschuhen.

Bedeutende Fortschritte wurden bei den Pumpspeichermaschinen auch mit dem *asynchronen Anlauf* erzielt, der in starken Netzen ein einfaches, betriebssicheres Anlaufverfahren darstellt (Fig. 4).

3. Transformatoren

Die *Verteiltransformatoren* bis 1600 kA sind in zahlreichen Ländern hinsichtlich Nenngrössen und Ausführung weitgehend normalisiert. An eine internationale Vereinheitlichung ist wohl kaum zu denken, sind doch die entwicklungsgeschichtlichen Gegebenheiten und Tendenzen in den verschiedenen Ländern zu unterschiedlich. Um so mehr aber bemühen sich heute alle Hersteller, die Normierungsbestrebungen ihrer Heimmärkte durch Standardisierung und Rationalisierung der Fabrikation zu vervollständigen.

Da die installierte Transformatorleistung in der Energieverteilung ein mehrfaches der zugeordneten Generatorleistung ausmacht und neben grossen Lastspitzen auch erhebliche Schwachlastzeiten in Kauf genommen werden müssen, verstärkt sich der Ruf nach extrem kleinen Eisenverlusten ständig. Die Kapitalisierungen erreichen hier bereits Werte von mehr als 10 000 Franken pro kW, wobei die Schweiz allerdings im Spitzenfeld liegt. Das neue Hi-B-Transformatorblech mit einer höheren magnetischen Güte als das bisher verwendete Texturblech hilft die gestellten Forderungen zu erfüllen. Optimale Blechformen und Schnitteinrichtungen liefern den fabrikatorischen Beitrag.

Die Kapitalisierung der Kupferverluste beträgt etwa ein Viertel der Eisenverlustwerte. Mit Blechbandwicklungen auf der Unterspannungsseite erreicht man gute Füllfaktoren, günstige Stromverteilungen und niedrige Kupferverluste; gleichzeitig wird die Herstellung vereinfacht und verkürzt. Die früher weitverbreitete Oberspannungs-Spulenwicklung ist heute grösstenteils durch die Kupferlackdraht-Lagenwicklung abgelöst worden, welche eine ausserordentliche Gewittersicherheit und eine hohe Kurzschlussfestigkeit aufweist. Die Anzapflagen liegen aussen, es gibt keine Ampère-Windungslücken und folglich auch keine nennenswerten Kupferzusatzverluste.

Der oftmals verwendete Radiatoren- und Röhrenkessel wurde bei Verteiltransformatoren durch den Wellwandkessel abgelöst; Fertigungsautomaten haben die mühsame Handarbeit wirtschaftlich und gütemässig weit übertroffen (Fig. 5).

Netztransformatoren mittlerer Leistung (2 MVA... 100 MVA) haben ebenfalls einen starken Wandlungsprozess erfahren. Davon war nicht nur der technische Sektor, sondern hauptsächlich das wirtschaftliche Gebiet betroffen. Während bei den Verteiltransformatoren der Standardisierungstrend auf sog. «Fixtypen» hinzielte, standen bei Mitteltransformatoren zufolge des breiten Variantenkataloges die «variablen Typen» stark im Vordergrund. Um die erheblichen Konstruktions- und Papierablaufkosten nicht jedesmal voll aufwenden zu müssen, lag eine partielle Normierung nahe. Es wurde ein «Standardgerippe» geschaffen, in welches sich die «variablen Typen» mit genügender Flexibilität einfügen lassen. Dieses System ist mit dem Baugruppenprinzip von Grosstransformatoren über 100 MVA gut vergleichbar. Natürlich griffen die Normierungsbestrebungen auch unmittelbar auf die Technik über, so dass sich heute der 2-MVA- und der 100-MVA-Transformator verblüffend ähnlich sehen.

Beginnt man wiederum beim Eisenkern, so steht auch hier das Streben nach niedrigen Eisenverlusten besonders im Blickfeld. Es wurden alle Konstruktionselemente vermieden, welche den Eigenschaften der hochgezüchteten Texturbleche

unzutraglich sind. Sogar die Kernpressung hat man vom System der Wicklungspressung komplett getrennt, um eine zusätzliche Längsbeanspruchung der geglühten Bleche zu vermeiden.

Bei den Wicklungen treten die Drilleiter stark hervor. Dadurch ist es möglich, die Eisenkerne zu verkürzen, was nicht nur den Materialaufwand herabsetzt, sondern auch den Lärmpegel ohne Zusatzmassnahmen reduziert. Die Hochspannungswicklungen werden bereits ab relativ niedrigen Spannungsreihen verschachtelt; hiermit vermeidet man zusätzliche Querfeldverluste infolge der sonst nötigen Isolationstreppen. Die Hauptwicklungen sind aussen und innen durch Keilleisten verspannt, wodurch ihre mechanische Festigkeit zusätzlich gesteigert werden konnte, wie «Zerquetschversuche» bewiesen. Das Isoliermaterial besteht hauptsächlich aus Transformerboard in der bekannten Zylinder-Kappen-Konstruktion. Mit diesem Prinzip wird die äusserst wichtige Wicklungsstabilisierung bei der Vor- und Hauptvakuumtrocknung sehr erleichtert und zeitlich verkürzt.

Eine wesentliche Erneuerung erfuhr das System der Wicklungspressung, indem man den massiven Stahl weitgehend aus dem Transformatorinneren verdrängte. Bereits seit vielen Jahren sind Pressringe aus Schichtholz mit gutem Erfolg in Verwendung. Was war naheliegender, als auch die grossen Hauptstahlbalken durch dieses Material zu ersetzen. Damit wird die Kurzschlussfestigkeit sogar noch gesteigert, wie Versuche zeigten. Mit dem Schichtholz kann man viel

näher an die Wicklungen heran, als dies bei Stahl mit Rücksicht auf die Spannung möglich war; ausserdem wird der Pressdruck homogener verteilt und grosse freie Biegelängen vermieden. Da auch die Schaltungsabstützungen einschliesslich ihrer Verbindungsschrauben aus Isoliermaterial bestehen, gibt es im ganzen Transformator ausser dem Kern nahezu kein Eisen mehr.

Die neue Bauart senkte nicht nur die Fehlerquoten, sondern auch die Zusatzverluste, Spannungs- und Stromabstände sowie die Durchlaufzeit in der Fertigung. Da das hochwertige Schichtmaterial relativ teuer ist, wird der Transformator entsprechend materialintensiver, aber dafür sinken die Fertigungsstunden. Fig. 6 zeigt den Aktivteil eines Transformators mittlerer Leistung der neuen Reihe. Die einfache Schienenverlegung spricht für sich, dasselbe gilt auf der abgewandten Seite hinsichtlich der unkomplizierten Hochspannungs-Ausleitungen.

Die Kessel wurden wesentlich leichter und – so paradox es klingt – gleichzeitig noch vakuumstabiler. Die Breitseiten sind selbsttragende Profilwände, so dass die früher zahlreich aufgeschweissten Versteifungstraversen entfallen können; es verbleiben nurmehr vier Vertikalschweissnähte. Der Boden und die Schmalseiten weisen ölsparende, selbsttragende Viereckformen auf, Versteifungen werden auch hier unnötig. Die Fahrrollen übernehmen von der kräftigen Trägerfusskonstruktion direkt das aktive Gewicht des Transformators, der Kessel bildet somit nur die 100 %-Vakuumhülle; dicke Bodenplatten sind damit überholt.

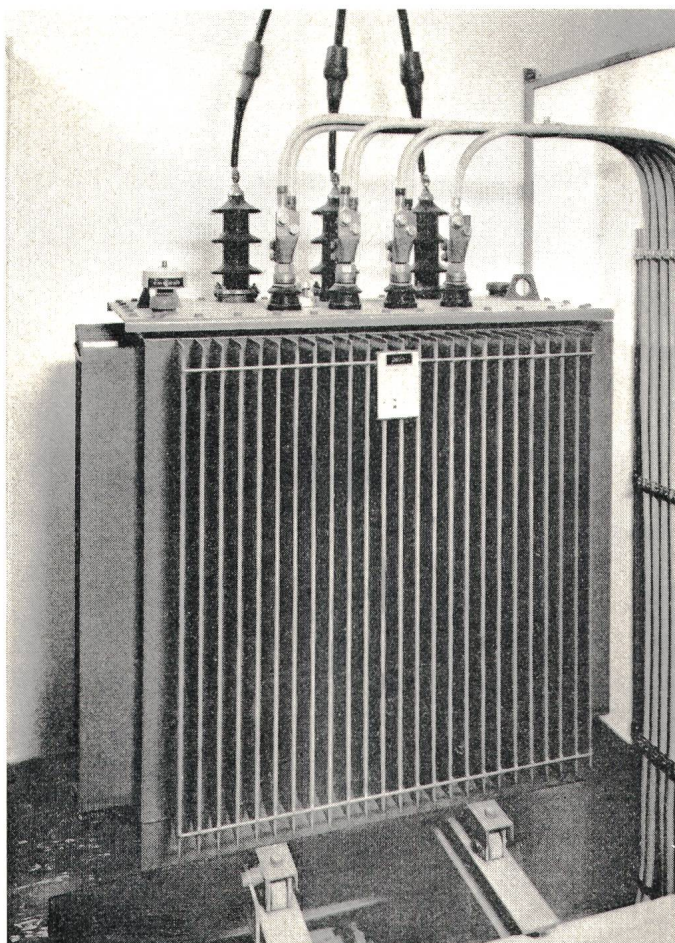


Fig. 5 Verteiltransformator 630 kVA; $16,5 \pm 0,5/0,412$ kV; 50 Hz; Schaltung Dy 5; ONAN-Kühlung

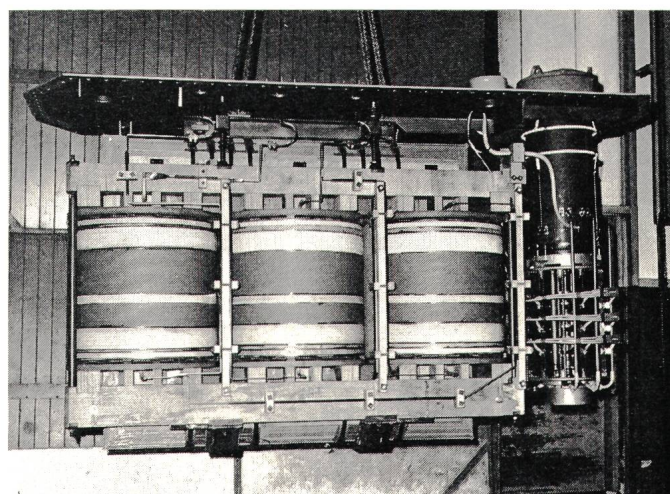


Fig. 6 Aktivteil eines Transformators mittlerer Leistung, 25 MVA; $51,4 \pm 11 \times 0,6/18$ kV, 50 Hz; Schaltung Yy, ONAF-Kühlung

Neben den Gewichtseinsparungen konnten also aufwendige Schweissarbeiten weggelassen und gleichzeitig örtliche Materialanhäufungen vermieden werden. Da die Profilwandteilung auf die heutigen Breitradiatoren abgestimmt ist, wurde deren Anschluss sehr vereinfacht. Zu erwähnen ist auch, dass die neue Kesselart allgemein als formschön empfunden wird (Fig. 7).

Die *Grosstransformatoren* über 100 MVA sind sowohl in den technischen Hauptdaten als auch in ihrer Ausführung so variantenreich, dass nur eine sog. Baugruppen-Normierung in Frage kommt. Da mit zunehmender Typenleistung der Konstruktionsaufwand prozentual weniger stark ins Gewicht

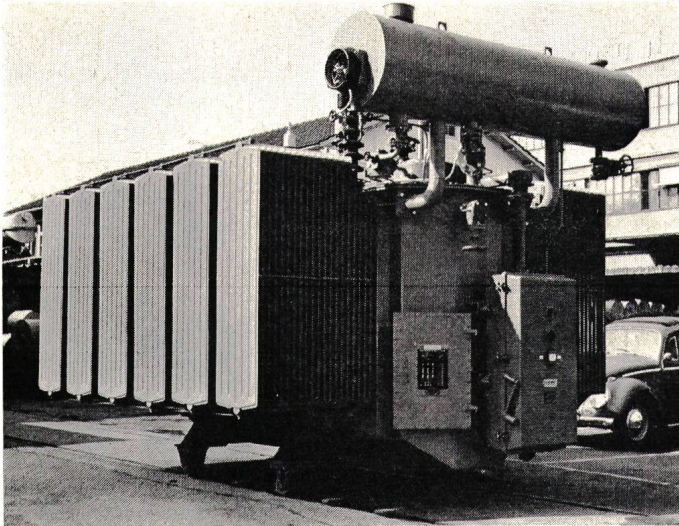


Fig. 7 Transformator 12,5 MVA; $51,4 \pm 11 \times 0,6/18$ kV; 50 Hz; Schaltung Yy; ONAN-Kühlung

fällt, wird hier in erster Linie eine Vereinheitlichung in der Technik selbst angestrebt; dies vereinfacht die Fertigung, verkürzt die Durchlaufzeit und steigert gleichzeitig die Sicherheit.

Bei grossen Einheiten und hohen Spannungen ist die Entwicklung noch stärker im Fluss als bei mittleren und kleinen. Die Verringerung der Gewichte und Abmessungen steht mehr im Vordergrund als die Reduktion der Verluste, will man doch ständig grössere Einheiten bahnprofilgängig transportieren. Erschwerend kommt auf diesem Gebiet hinzu,

dass die Forderungen nach einem minimalen Lärmpegel stets verschärft werden.

Mit steigender Baugrösse gewinnen ferner Dinge an Bedeutung, die bei kleineren Einheiten einen untergeordneten Charakter haben. Im einzelnen wäre hier zu erwähnen:

- Gezielte Lenkung der enormen Streuflüsse
- Vermeidung von örtlich unzulässigen Erwärmungen
- Herausführung sehr grosser Ströme
- Dielektrische Probleme bei extrem hohen Spannungen
- Lastregelung speziell bei Netzkupplungs-Autotransformatoren
- Optimale Ölführung besonders bei «gerichteter» Strömung

Alle diese Punkte sind eng mit der Forderung nach einer hohen Betriebssicherheit verbunden, nachdem der Ausfall einer derartigen Grenzleistungseinheit eine grosse Lücke in der Versorgung bedeuten würde. Die Überlegungen haben bei mehreren im Bau befindlichen Kernkraftwerken der Schweiz mit etwa 1200 MVA/400 kV dazu geführt, dass man sich für Einphaseneinheiten mit jeweils einem Reservepol entschieden hat. Vergleicht man den minimalen prozentualen Mehraufwand an den Gesamtkosten mit den enormen Folgen eines Betriebsstillstandes, so war die Entscheidung sicherlich richtig.

Adressen der Autoren

Dipl. El.-Ing. *Karl Abegg*, Direktor, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden, und Dr. sc. techn. *Josef Kreuzer*, S.A. des Ateliers de Sécheron, 1211 Genève 21.