

Betriebserfahrungen mit wassergekühlten Synchronmaschinen

Autor(en): **Baltisberger, K.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 26

PDF erstellt am: **17.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915643>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Betriebserfahrungen mit wassergekühlten Synchronmaschinen ¹⁾

Von K. Baltisberger

621.313.32 : 62-713.1

Die in den letzten Jahren gemachte Feststellung, dass sich in den Industrieländern der Bedarf an elektrischer Energie in 10 Jahren annähernd verdoppelt, bringt mit sich, dass immer grössere Maschineneinheiten projektiert und gebaut werden. Die Installation von wenigen grossen Einheiten in einer Zentrale ist wirtschaftlicher, da mit steigender Leistung die Anschaffungskosten je erzeugtes kW sinken. Die Einsparungen sind um so grösser, je höher die Drehzahl für eine bestimmte Maschinenleistung gewählt werden kann. Die Maschinengruppen werden kleiner, was sich besonders bei den Kavernenzentralen in den Baukosten stark auswirkt. Auch ist eine beträchtliche Einsparung an Betriebs- und Wartungspersonal möglich, insbesondere wenn der Betrieb der Maschinen voll automatisiert wird. Durch die stetige Steigerung der möglichen Gefällshöhen für Francisturbinen ist es mitunter möglich, das vorhandene Gefälle statt in zwei in einer einzigen Stufe auszunützen, was ebenfalls die Tendenz zu grösseren, rascher laufenden Maschinen begünstigt. Zu den konventionellen Kraftwerken mit Wasserturbinen sind zur Speicherung der in den Wärme- oder Atomkraftwerken produzierten überschüssigen Energie sowie zur Erzeugung hochwertiger Spitzenenergie in den letzten Jahren immer mehr Pumpspeicheranlagen hinzugekommen. Diese unterscheiden sich von den herkömmlichen Kraftwerken bekanntlich dadurch, dass sie keinen Jahresspeicher besitzen, sondern nur Stauraum für einige Tage oder für Pumplangzeit-Pumpspeicherwerke für einige Wochen. Mit der Abfallenergie des Kraftwerkes wird zur Zeit schwacher Belastung des Netzes Wasser aus einem nahen Fluss oder See in ein höher gelegenes Stau-becken gepumpt und in Stunden hoher Belastung in Turbinen zurückgewonnen. Von Brown Boveri sind in letzter Zeit eine Anzahl bemerkenswert grosser Wasserkraftgeneratoren in Betrieb genommen worden oder sind noch im Bau [1; 2; 3; 4]²⁾.

Maschinenleistungen bestimmter Drehzahlen, die vor einigen Jahren in der Fachliteratur noch als Grenzleistungen bezeichnet wurden, sind heute zum Teil weit überholt, und Projekte wesentlich grösserer Leistungen sind baureif. Für solche Maschinen setzt sich die Ausführung mit totaler Wasserkühlung von Stator und Rotor durch, da diese gegenüber der bisherigen Bauweise mit Luftkühlung folgende offensichtliche Vorteile aufweist: Die Oberflächenreibungs- und Ventilationsverluste sinken auf ca. 20 %, da die benötigte Förderleistung für das Kühlmedium Wasser gegenüber Luft auf einen Bruchteil abfällt. Zusätzlich sinken die Oberflächenreibungsverluste, da bei direkter Kühlung des Rotorkupfers mittels Wasser die luftführenden Pollücken geschlossen werden können und der Raum zwischen den Polschuhen so abgedeckt wird, dass der Rotor praktisch als glatter Zylinder

umläuft. Der Wirkungsgrad bei Teillast wird dadurch wesentlich angehoben, was sich für Pumpspeicher- und Spitzenkraftwerke als besonders interessant erweist. Ein für die Sicherheit einer Maschine ganz wesentlicher Vorteil der Wasserkühlung der Rotorwicklung ist die kleinere mittlere Erwärmung der Wicklung von nur ca. 20 Grad. Bei luftgekühlten Maschinen erfordert die Beherrschung der bei grossen Fliehkräften und gleichzeitig langen Polspulen durch grosse Erwärmungen auftretenden Relativdehnungen des Kupfers grosse konstruktive Geschicklichkeit und langjährige Betriebserfahrungen. Diese Probleme treten bei wassergekühlten Rotorwicklungen nicht auf. Trotzdem ist es mit Luftkühlung immer noch möglich, Maschinen grösster Leistung zu bauen.

Eine Untersuchung [4] zeigt die baubare maximale Leistung für Luftkühlung in Funktion der synchronen Reaktanz und als Parameter das Verhältnis der maximalen Drehzahl zur Nenn Drehzahl sowie deren $\cos \varphi$. So ist es möglich, mit einer 10poligen Maschine bei einer Reaktanz X_d von ungefähr 1,5 bei $\cos \varphi = 0,8$ immerhin eine Leistung von 470 MVA zu erzielen (50 Hz)! Das scheint auf den ersten Moment eine sehr grosse Leistung zu sein, doch haben die Untersuchungen gezeigt, dass mit heutigen Bauformen und konstruktiven Anpassungen diese Leistung erreicht werden kann.

Es müssen somit noch andere Kriterien massgebend sein, damit die vollständige Wasserkühlung in Stator und Rotor gerechtfertigt ist.

Aus der Dichte und der spezifischen Wärme ergibt sich der Wärmeinhalt, der bei Wasser mit $4134 \text{ kW/m}^3 \cdot \text{grad}$

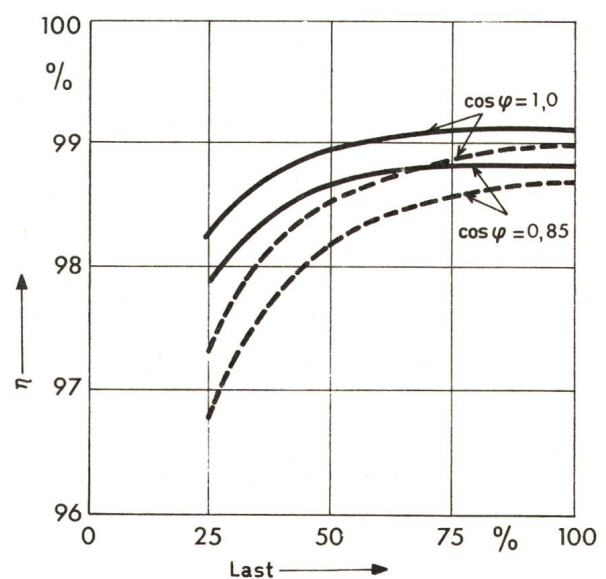


Fig. 1
Wirkungsgradkurve «Tonstad»

190 MVA, 375 U./min, 120 kV, 50 Hz

— direkte Stator- und Rotorwasserkühlung
- - - konventionelle Luftkühlung

¹⁾ Gekürzte Fassung eines Vortrages, gehalten an der ETHZ am 14. November 1972 im Rahmen eines Kolloquiums für Forschungsprobleme der Energietechnik.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

beträgt, währenddem bei Luft von 1 ata ein Wärmeinhalt von $1,065 \text{ kW/m}^3 \cdot \text{grd}$ resultiert. Das Verhältnis beträgt somit 1 : 3880, d. h., das Volumen, das umgesetzt werden muss, um bei annähernd gleicher Kühlmittelerwärmung die Verluste abzuführen, ist bei Wasser ca. 4000mal kleiner als bei Luft [8]. Daher kann eine Pollücke mit vollständiger Wasserkühlung bedeutend besser ausgenützt werden; der Polkern kann breiter gehalten werden, dadurch wird der Fluss im Polkern erhöht, so dass die Luftinduktion ganz allgemein auch gesteigert werden kann. Der Raum zwischen den beiden Polen ist fast vollständig mit Kupfer ausgefüllt, was sich wiederum auf die Verluste nur vorteilig auswirkt. Was resultiert nun aus diesen konstruktiven Massnahmen, die man bei der Wasserkühlung herausholt?

Auf Fig. 1 ist die gemessene Wirkungsgradkurve von Tonstad zu sehen; es fällt sofort auf, dass bei Teillast der Wirkungsgrad ganz wesentlich verbessert wurde gegenüber der Luftkühlung. Der Vollastwirkungsgrad ist nur eine Frage der Verlustbewertung; er kann gleich, kann aber auch schlechter oder besser gehalten werden, je nachdem, wie hoch die Maschine ausgenützt wird. Die Dimensionierung der Maschine ist nicht mehr eine Frage der Temperaturgrenzen, sondern die Grenzen sind gegeben durch die verlangten Reaktanzen und vor allem durch die Verluste. Zum Teil spielt auch das Schwungmoment hinein, dann nämlich, wenn es aus mechanischen Gründen nicht mehr möglich ist, den Durchmesser der Maschine zu vergrössern.

Brown Boveri hat schon vor ungefähr 15 Jahren mit den ersten Entwicklungsversuchen begonnen, die offensichtlichen Vorteile der Flüssigkeitskühlung auszunützen.

Als erster Schritt wurden flüssigkeitsgekühlte Statorwicklungen und Statorblechkörper entwickelt und für Turbogeneratoren auch schon vor mehr als 10 Jahren gebaut. Bei Schenkelpolmaschinen begann die Entwicklung ungefähr vor 10 Jahren, und es lag natürlich nahe, die Rotorwicklung sowie die Wasserzuführung in den Rotor zu entwickeln, zu studieren und konstruktiv ausreifen zu lassen, bis im Jahre 1962 eine Bestellung für zwei vollständig wassergekühlte Maschinen für die Anlage Bavona (86 MVA, 428 U./min) im Haus war. Es war nicht leicht, den Besteller, der sich aus verschiedenen Partnern zusammensetzte, davon zu überzeu-

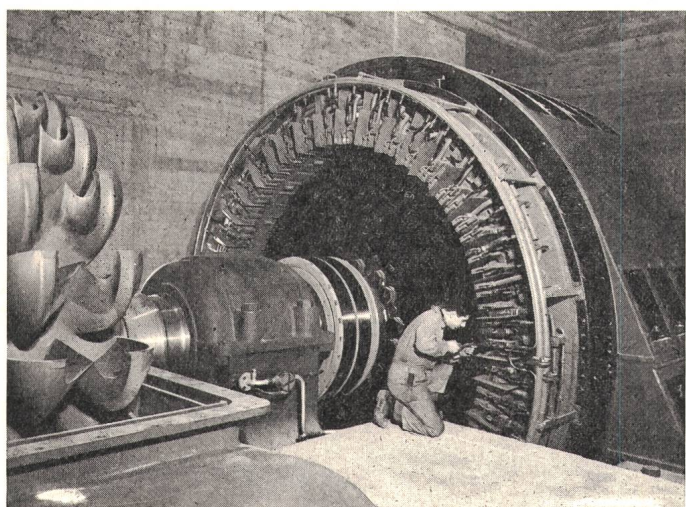


Fig. 2
Maschine «Bavona» in Montage
86 MVA, 428,6 U./min, 12 kV, 50 Hz

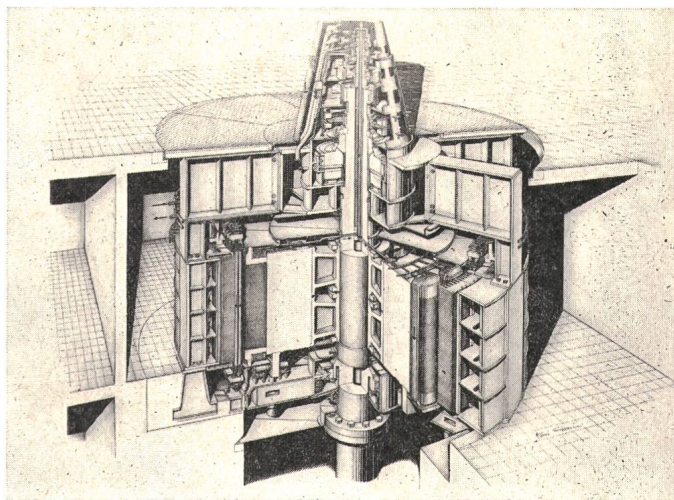


Fig. 3
Längsschnitt des Generators «Tonstad»
190 MVA, 375 U./min, 12 kV, 50 Hz

gen, dass die Technik so weit war, dass man mit gutem Gewissen diese Maschinen bauen konnte. Es waren viele Vorabklärungen notwendig, und es wurde eine längere Serie von Vorversuchen durchgeführt.

Fig. 2 zeigt die fast fertig zusammengebaute Maschine der Maggiakraftwerke in der Anlage Bavona im Tessin. Aus Fig. 3 ist im Längsschnitt eine vertikale wassergekühlte Maschine für 190 MVA bei 175 U./min für die Anlage Tonstad der Siraquina Kraftdelskap ersichtlich.

Heute haben wir ungefähr ein Erfahrungspotential von mehr als 50 000 Betriebsstunden mit vollständig wassergekühlten Schenkelpolmaschinen. Die Betriebserfahrungen können im allgemeinen als sehr gut bezeichnet werden und haben bestätigt, dass die gewählte Konzeption sich bestens bewährt hat. – Nun zu den einzelnen Bauteilen dieser wassergekühlten Maschinen mit gleichzeitigem Hinweis auf die betrieblichen Erfahrungen.

Statorwicklung

In unserem Konzern wurden bis heute Statorwicklungen mit einer gesamten Leistung von ungefähr 36 000 MVA in Flüssigkeitskühlung ausgeführt oder sind im Bau. Die ersten Ausführungen (ca. 3000 MVA bis heute) waren mit Öl, die weiteren dann nur noch mit reinem Wasser gekühlt. Es war naheliegend, dass zuerst das Kühlmedium Öl gewählt wurde, weil das Isoliervermögen von Öl bedeutende Vorteile hat und im Transformatorbau längst bekannt ist. Die Reinhaltung des Wassers ist ein spezielles Problem, auf das nachher eingegangen werden soll.

In Fig. 4 sind Roebelstäbe in verschiedenen Ausführungen zu sehen. Links ein indirekt gekühlter Zweiebenen-Roebelstab für luftgekühlte Maschinen, wie er übrigens auch für wasserstoffgekühlte Maschinen verwendet wird. Dann zwei Einfach-Roebelstäbe mit Flüssigkeitskühlung. Zwischen den Hohlleitern, die die Flüssigkeit führen, sind normale Volleiter eingestreut, und rechts sind flüssigkeitsgekühlte Doppel-Roebelstäbe, die dann zur Anwendung kommen, wenn grössere Stromvolumina pro Nut anfallen. Solche Roebelstäbe sind erst für Leistungen über ungefähr 500 MVA notwendig und werden bis heute speziell im Turbogeneratorenbau verwendet.

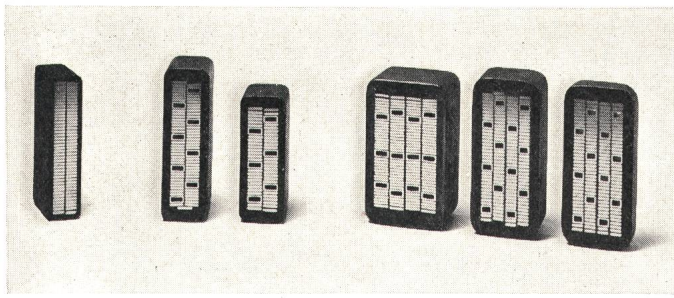


Fig. 4
Roebelstabausführung luft- und flüssigkeitsgekühlt

Der sehr hohe und starke Anstieg der Zusatzverluste in den Kühlleitern wirkt sich betrieblich nicht tragisch aus, da eben an diesen Stellen unmittelbar das Kühlmittel vorbeistreicht. Die zwischen den Hohlleitern liegenden Teileiter müssen ihre Wärme über die dazwischenliegenden Isolationschichten an die Hohlleiter abgeben. Durch die Auswahl von geeigneten Materialien und Fertigungsverfahren ist es möglich, diesen Temperatursprung vom mittleren Teileiter bis zur Flüssigkeit auf einen Wert von ungefähr 10...15 Grad zu halten. Somit, und das hat sich auch im Betrieb gezeigt, sind absolut keine unzulässigen mechanischen Spannungen innerhalb dieses Leiterbündels zu erwarten, auch nicht bei extremen Eisenlängen (8 m). Bei sehr hohen Strömen ist es notwendig, besonders bei Maschinen mit grosser Ausladung, also vor allem im Turbogeneratorenbau, auch die Wickelköpfe zu verdrillen, so dass die Zusatzverluste auf ein Minimum fallen [5].

Jeder Stab wird einer automatischen Teileiterprüfung unterworfen. Jeder einzelne Teileiter wie auch die Kühlleiter werden mit einer Einrichtung verbunden, die in bestimmten Intervallen eine Prüfspannung an die Teileiter anlegt, um Schlüsse, die sich aus der Fabrikation ergeben könnten, aufzuzeigen. Dabei hat sich eine 110-V-Wechselspannung als sehr gut erwiesen. Bei einem Stab mit 60 Teileitern werden 1770 Prüfungen durchgeführt, bei einem solchen mit 80 Teileitern 3160. Nur ein Automat bietet die notwendige Sicherheit, dass eine solche Prüfung absolut einwandfrei durchgeführt wird. Der Prüfungsvorgang läuft daher selbständig ab; falls der Widerstandswert zwischen 2 Drähten kleiner als 200 Ω ist, bleibt der Prüfapparat sofort stehen. Zwei Zählwerke zeigen an, bei welchen Teileitern der Schluss eingetreten ist. Es wird jeder Teileiter gegen jeden anderen geprüft. Schlüsse treten in der Fabrikation äusserst selten auf [6].

Ein besonderes Problem bei diesen gemischten Roebelstäben besteht darin, die Kühlleiter aussen zusammenzufassen in einer Anschlusskammer, wie in Fig. 5 zu sehen ist. Um die vorhin erwähnten Temperatursprünge nicht nur zu berechnen, sondern auch zu messen, sind umfangreiche Versuche durchgeführt worden, an Roebelstäben, mit eingebauten Messleitungen, zur Ermittlung der Stabinnentemperatur. Die Isolationstechnik dieser Roebelstäbe ist genau gleich wie bei konventionell gekühlten Maschinen [7]. Vergleichbar mit einer luftgekühlten Maschine ergibt sich aber für die Statorwicklung ein um etwa 60 °C tieferes Temperaturniveau. Aus Erfahrungen ist bekannt, dass die thermische Lebensdauer sich ungefähr bei 10 °C Temperaturabsenkung verdoppelt. Daraus kann gefolgert werden, dass die Isolation bei wassergekühlten Maschinen praktisch nur noch mechanisch

und elektrisch beansprucht wird. Bekannterweise wird aber auch letztere Beanspruchungsart stark temperaturabhängig, so dass behauptet werden darf, dass sich die Isolation im Betrieb gegenüber dem Neuzustand kaum verändert. Dies wurde durch dielektrische Nachmessungen an den Bavona-Generatoren nach 5jähriger Betriebszeit bestätigt. Sowohl die Verlustfaktor- sowie auch die spezifischen Ionisationsstrommessungen ergaben eine unwesentlich veränderte Isolation. Im Betrieb wurde eine absolute Temperatur in der Statorwicklung mit eingebauten Widerstandselementen von 58 °C gemessen bei Bavona, während bei der norwegischen Maschine Tonstad ein Wert von 62 °C herauskam. Dies entspricht also einer thermischen Reserve von ca. 90 °C gegenüber der für dieses Isolationssystem zulässigen Temperaturgrenze von 155 °C. Fig. 6 zeigt die fertig eingebaute Statorwicklung mit den Kühlwasseranschlüssen, den Sammelrohren, den Trennwänden in den Phasentrennungen. Die Lötstellen mit den Anschlußstücken sind blank, deshalb hat man hier Trennwände eingebaut.

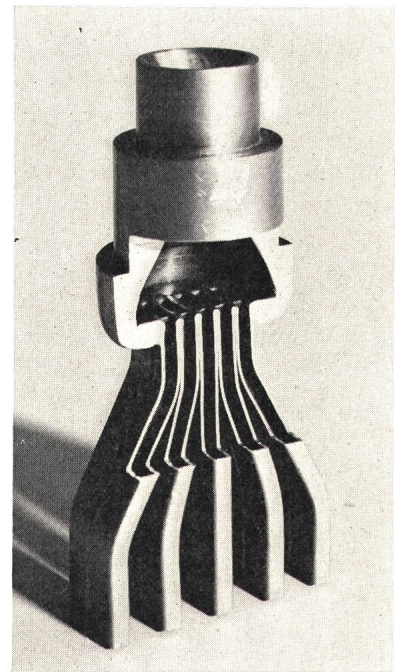


Fig. 5
Anschlusskammer für Flüssigkeitskühlung

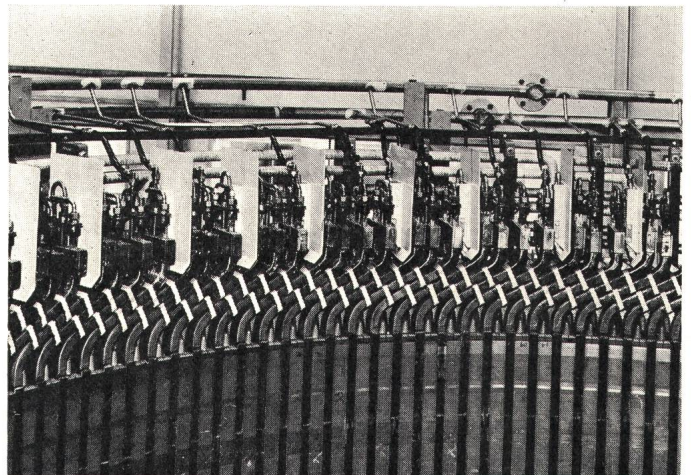


Fig. 6
Eingebaute Statorwicklung mit Flüssigkeitskühlung

Statorblechpaket

Das Statorblechpaket ist am Rücken mit Kühlrohren versehen. In diesen fließt wiederum Wasser. Man kann hier darauf verzichten, reines Wasser zu verwenden, da keine isolationstechnischen Anforderungen gestellt werden müssen. Bei eingebauter Wicklung ergibt sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung, wo das Temperaturmaximum in der Nähe des Nutgrundes liegt. Diese Konzeption [8] hat sich bei den bisher gebauten Maschinen sehr gut bewährt. Es ist so, dass das Niveau des Statorblechpaketes um einige Grade höher liegt als das Niveau in der Statorwicklung. Die Zahnverluste fließen, wie die Messungen bestätigt haben, über die Isolation an das Statorwicklungskupfer und werden mit diesem Kühlkreislauf abgeführt. Die hinten eingesetzten Kühlrohre führen praktisch nur die Jochverluste ab. Es sind andere Lösungen bekannt, bei denen statt Kühlrohre am Rücken in axialer Richtung Kühlplatten zwischen die Bleche eingelegt werden. Die Temperaturverteilung ist bei dieser Lösung in axialer Richtung un stetig, während sie hier bei dieser Lösung in radialer Richtung variiert. Durch die Verwendung von Kühlrohren können grosse Querschnitte verwendet werden. Die Anschlußstelle für die Wasserzuführung kann reichlich gehalten werden, im Gegensatz zu den Kühlplatten, wo mit kleinen Querschnitten und vielen feinen Anschlussnippeln gearbeitet werden muss. Dadurch, dass bei der von uns gewählten Lösung das Statorblechniveau um einige Grade höher liegt als das Niveau der Wicklungstemperatur, haben wir praktisch keine Relativdehnung zwischen dem in der Nut liegenden Stab und dem umgebenden Eisen infolge der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Eisen. Bei Maschinen mit kleineren Polzahlen, d. h. mit grösseren radialen Jochhöhen, ist es unter Umständen notwendig, radial mehrere Kühlrohre im Statorjoch einzusetzen. Auch diese Lösung wurde mehrfach bei Turboalternatoren ausgeführt [9]. Selbstverständlich müssen diese Rohre, die im Eisen drin liegen, isoliert werden, da sie einem Wechselfluss ausgesetzt sind und somit Spannungen von einigen 100 bis 1000 V in den Rohren induziert werden können. Die Blechbefestigung, das Blechen an sich, ist genau gleich wie bei einer luftgekühlten Maschine, wobei der leicht erhöhten Blechtemperatur Beachtung geschenkt werden muss. Fig. 7 zeigt das Blechen eines 190-MVA-Generators in der Werkstatt.

Pressplatten

Übersteigt die Leistung pro Pol einen gewissen Wert, so ist es auch notwendig, die Pressplatten zu kühlen. Fig. 8 zeigt eine Anordnung, wie sie ebenfalls beim erwähnten 190-MVA-Generator gewählt wurde. Es sind Pressplatten aus antimagnetischem Stahlguss, wo ein Kühlrohr eingebettet ist. Diese Kühlrohre sind aussen wiederum miteinander wassermässig in Serie geschaltet. Auch hier kann Frischwasser statt Reinwasser verwendet werden. Die Messungen des Pressplattenkreislaufes haben gezeigt, dass immerhin bis zu 2 % der Totalverluste der Maschine über diese Pressplatten abfließen.

Rotorwicklung

Bei vollständig wassergekühlten Maschinen benötigt den grössten Aufwand an Entwicklungsarbeiten die Kühlung der Rotorwicklung.

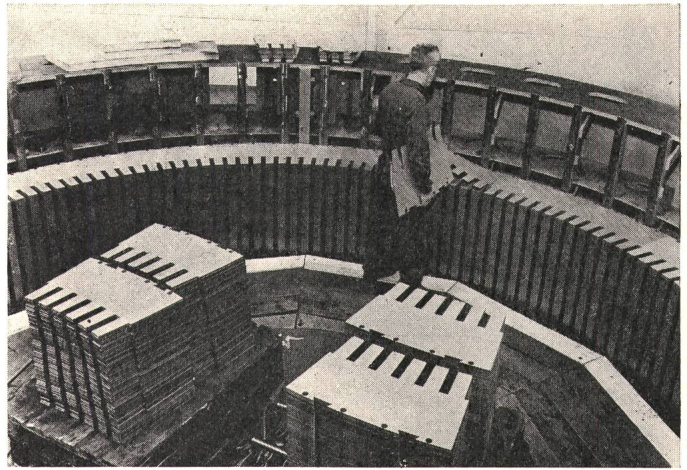


Fig. 7
Einlegen der Statorbleche mit Nuten für die Kühlrohre

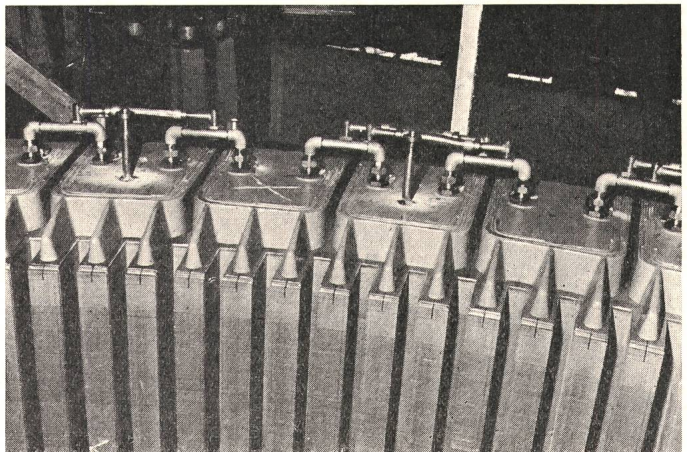


Fig. 8
Pressplattenkühlung

Das Kühlwasser fließt direkt durch den Leiter, ist also im direkten Kontakt mit dem Kupfer. Diese Konzeption hat sich bestens bewährt, obwohl man befürchtet hatte, dass Kavitations- und Erosionserscheinungen das Kupfer abtragen könnten. Bei den von uns gewählten Querschnitten und Geschwindigkeiten ist jedoch der Kupferabtrag so klein, dass er vernachlässigt werden kann. Für Bavona und Tonstad wurde eine 2-Lagen-Polspule gewählt; das Kühlwasser fließt von einem Sammelring herkommend über flexible Schläuche durch die Wicklung, über einen weiteren Kühlschlauch geführt, gesammelt und in die Rückleitung zurück. Die Spulen sind durch tangentialen Abstützungen gegen Ausbauchen gesichert, und durch das Abdecken der Polrücken ist eine praktisch zylindrische Oberfläche erreicht worden. Die mechanische Konstruktion des Poles ist nicht wesentlich verschieden von derjenigen einer konventionellen Maschine.

Die Polspulenwindungen wurden hart zusammengelötet. Hier wurde ein umfangreiches Prüfprogramm abgewickelt, um absolute Gewähr für die Dichtheit der Lötstellen zu haben. Den fertig bewickelten Pol bereits eingesetzt und mit den Wasseranschlüssen zeigt Fig. 9.

Die im Betrieb mit der gewählten Lösung gemachten Erfahrungen haben bestätigt, dass die gewählte Rotorkonzeption die einzige richtige war. In diesen 50 000 Betriebsstunden wurde nie eine Leckage festgestellt. Die Dichtungselemente sind absolut intakt, denn auch hier liegt das Tempera-

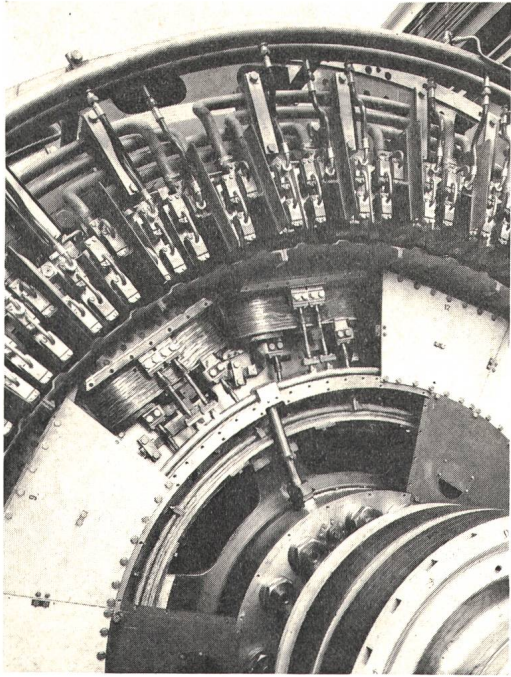


Fig. 9
Eingebauter Rotor

turniveau sehr tief. Bei Bavona wurden 53°C mit der Widerstandsmethode gemessen im Betrieb und bei Tonstad 50°C . Wenn diese Zahlen verglichen werden mit den absoluten Temperaturen in der Rotorwicklung einer normal gekühlten Maschine, dann liegen wir ungefähr 80°C tiefer. Ein ganz wesentliches Moment liegt bei dieser Kühlkonzeption darin, dass der «hot spot» sich dort befindet, wo das Warmwasser aus der Spule austritt. Dieses Warmwasser hat also praktisch die Temperatur des Kupfers, denn der Wärmeübergang vom Kupferrohr an das Wasser ist zu vernachlässigen, und die Wärmeleitung innerhalb des Kupfers bei diesen Querschnitten liegt bei einigen wenigen Graden.

Zuführung des Kühlwassers in den Rotor

Fig. 10 zeigt einen Schnitt durch eine Kühlwasserzuführung. Es sind zwei Dichtungsstellen vorhanden. Der «Wasserkopf» ist auf einem Doppel-Axialkegelrollenlager gelagert. Die Wasserzuführung ist in der Mitte oben. Das Wasser wird in axialer Richtung durch die Welle an eine zentrale Verteilstelle gebracht, wo dann die Kühlrohre das Wasser zu den einzelnen Polspulen führen. Das warme Wasser wird durch den Raum zwischen dem koaxial liegenden Rohr und der Welle zurückgeführt, kann durch die radialen Öffnungen austreten und wird über die Warmwasserkammer in den Kühlkreis zurückgeführt. Der Dichtungsverlust ist sehr klein. Es wurde vorgesehen, dass das Leckwasser im Raum nach der unteren Dichtung abgefangen wird. Die Leckwassermengen waren aber bei Bavona gleich Null. Es sind also Dichtungen, die trocken funktionieren. In der Anlage Tonstad waren es einige Milliliter pro Tag.

Kühlkreisläufe

Das Schema in Fig. 11 zeigt, dass die in den Stator- und Rotorwicklungen entstehenden Verluste durch geschlossene Kühlkreise, in denen entionisiertes sauerstofffreies Wasser

zirkuliert, abgeführt werden. Die Kühlung der Statorbleche und Pressplatten erfolgt dagegen durch normales Frischwasser. Ein über Fremdventilatoren und Luft-Wasser-Kühler geschlossener Kreis leitet zusätzlich etwa 10% der Gesamtverluste ab. Dies sind neben den auf den Polschuhoberflächen entstehenden Verlusten hauptsächlich Luftreibungsverluste, die jedoch durch Auskleidung der Endpartien des Rotors und durch Abdecken der Pollücken mit Aluminiumplatten niedrig gehalten werden. Auf diesem Schema sind oben die beiden Reinwasserkreisläufe, Rotor- und Statorwicklung, dann die beiden Frischwasserkreisläufe, Statorblech und Pressplatten. Unten sind die Pumpen, die Kühler sowie die Filter angegeben, und ganz unten erscheint die Wasseraufbereitung.

Mit Ausnahme des Wicklungskupfers und der Verbindungsschläuche bestehen sämtliche Rohre und Elemente der Kühlkreise aus rostfreiem Stahl. Sicherheitshalber ist für die Hauptkreise eine Reservegarnitur vorhanden.

Bei Abfall des Wasserdruckes werden automatisch Reservepumpen eingeschaltet. Die Pumpen haben neben den Drehstromantrieben an Notstromaggregate angeschlossene Gleichstrommotoren. Ausserdem wird die Leitfähigkeit des aufbereiteten Wassers, die relative Feuchtigkeit in den Statorgruben und die Flüssigkeitszirkulation in allen Kreisen ständig überwacht. Die Temperaturen in den Kühlkreisen, den Wicklungen und den Statorzähnen tastet man dagegen periodisch ab. Die genaue Kenntnis der Daten des Reinwassers hat besondere Priorität. Seine physikalischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften müssen betriebssicher überwacht werden können. Die im Prinzipschema angegebene Anordnung erfüllte diese Bedingung in jeder Beziehung. Umfangreiche Untersuchungen in den Laboratorien, vor allem aber die Erfahrung aus dem jahrelangen Betrieb sämtlicher wassergekühlten Wicklungen bei Turbo- und Wasserkraftgeneratoren mit einer installierten Gesamtleistung von ca. 20 000 MVA haben die Sicherheit gegeben, die heute zur Beurteilung des Fragenkomplexes notwendig ist. Bei den ausgeführten Rotorwicklungen ist dank der richtigen Wahl der elektrischen Leitfähigkeit und des Sauerstoffgehaltes des Wassers praktisch keine Korrosion am Kupfer und am Stahl eingetreten. Durch die sehr kleinen Leckwassermengen ist ein Ersatz der Sauerstoffentfernerpatronen etwa erst nach 2 Jahren notwendig. Diese Patronen basieren auf chemischer Entgasung.

Beim Bau der ersten wassergekühlten Rotoren hat man verständlicherweise das Ziel verfolgt, alle neuen Elemente im Betrieb überwachen zu können. Für die Maschine Bavona wurde ein System entwickelt [3]; [8], bei dem es möglich ist, die Temperatur direkt auf der Warmwasseraustrittsseite des Rotors zu messen. Als Messwertgeber hat man spezielle Temperaturfühler und Kupferkonstantan-Thermoelemente verwendet. Die insgesamt 28 Meßstellen im Rotor werden in 2sekundigen Intervallen von einem mitrotierenden Magnetschrittschalter abgetastet und die Thermospannungen über Schleifringe einem kompensierenden Schreiber zugeführt. Schrittschalter und Temperaturschreiber sind synchronisiert, wobei die Schaltung so gewählt ist, dass keine Meßstellenverschiebungen auftreten können. Der rotierende Teil der Messeinrichtungen ist so ausgeführt, dass er trotz der auftretenden Fliehkräfte einwandfrei funktioniert.

Ausserdem sind Schrittschalter und Temperaturfühler gut auswechselbar.

Ein besonderes Problem stellt die fehlerfreie Übertragung der Thermospannungen über die Schleifringe dar. Es musste die optimale Materialkombination für Bürsten und Meßschleifringe gefunden und durch zusätzliche Kaltlötstellen verhindert werden, dass Thermoelemente bzw. Thermospannungen mit unbekannter Temperatur vorhanden sind. Nach langwierigen Versuchen gelang es, die fehlerverursachenden Einflüsse so weit zu eliminieren, dass eine Messgenauigkeit von $\pm 1,5$ Grad in einem Temperaturbereich von 0 bis 120 Grad erreicht wurde.

Man kann ohne zu übertreiben heute behaupten, dass die Angst vor der Wasserkühlung überwunden ist. Die Wasserkühlung wird immer dann interessant werden, wenn entweder eine relativ gute Verlustbewertung vorliegt, oder kleine Gewichte und Abmessungen oder Grenzleistungen verlangt werden. Insbesondere wird die Wasserkühlung interessant werden, wenn dazu noch ein kleines Schwungmoment zulässig ist.

Vielfach wird heute eine kleine transiente Reaktanz verlangt, um die dynamische Stabilität der Maschine zu verbessern. Diese Forderung ist kein Hindernis für die vollständig wassergekühlte Maschine. Das Erreichen dieser kleinen Reaktanz muss aber mit Mehrverlusten erkaufte werden. Für zukünftige Pumpspeicherwerke wird die Wasserkühlung bei hochtourigen Maschinen hinunter bis zu Leistungen von 100 MVA interessant sein, und zwar nicht nur aus den vorher erwähnten Vorteilen der kleineren Verluste, Gewichte und Abmessungen, sondern speziell wegen der ausgezeichneten Eigenschaften der wassergekühlten Maschine in bezug auf Lastwechsel. Man denke hier an Generatorbetrieb, Motorbetrieb, Phasenschieberbetrieb und vor allem an das plötzliche Anfahren mit voller Leistung bzw. mit Überlastlei-

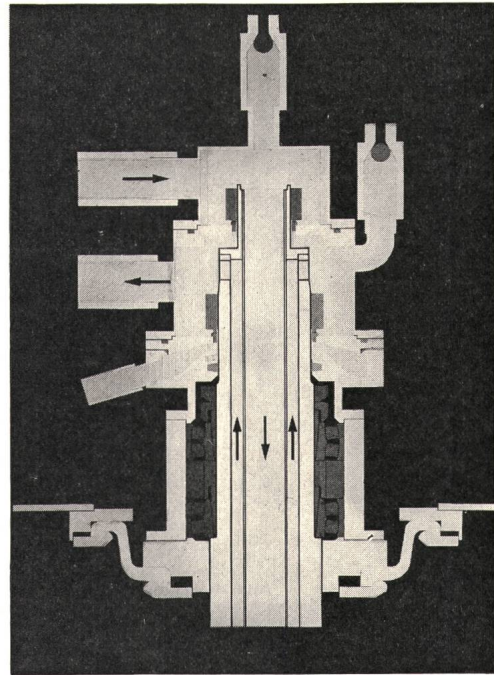


Fig. 10
Kühlwasserzuführung

stung, wodurch sich ja die wassergekühlten Maschinen speziell auszeichnen. Eine genaue Grenze für die Wirtschaftlichkeit der Anwendung der Wasserkühlung kann nur fallweise angegeben werden. Sie liegt für eine Maschine von 500 U./min bei ungefähr 150 MVA. Darüber ist Wasserkühlung günstiger, darunter Luftkühlung wirtschaftlicher. Diese Betrachtung gilt selbstverständlich nur für den Preis der elektrischen Maschine. Es ist nicht von der Hand zu weisen, dass z. B. bei Kavernenzentralen die bauseits einzusparenden Ko-

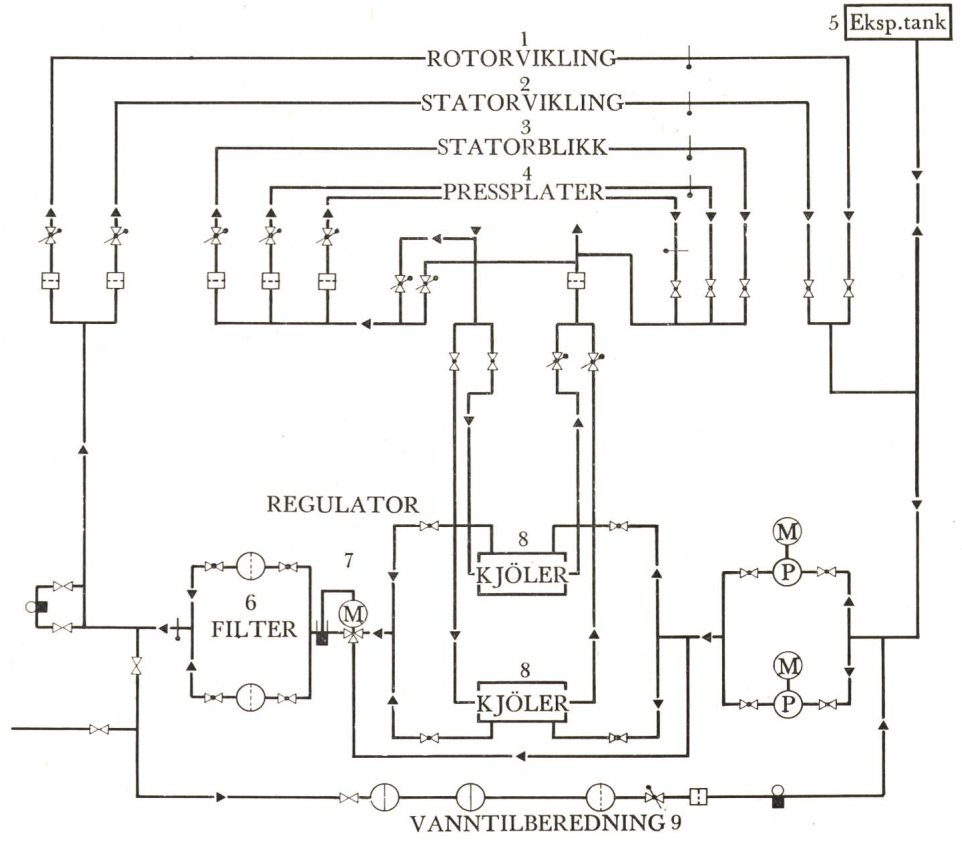


Fig. 11
Kühlwasserschema

- | | |
|-------------------|--------------|
| 1 Rotorwicklung | 7 Regler |
| 2 Statorwicklung | 8 Kühler |
| 3 Statorblech | 9 Wasser- |
| 4 Pressplatten | aufbereitung |
| 5 Expansionsgefäß | M Motor |
| 6 Filter | P Pumpe |

sten erheblich grösser sein können, wenn die Dimensionen der Maschine sich auf das Bauvolumen des Maschinensaales auswirken. Selbstverständlich muss bei einer echten Evaluation auch in Betracht gezogen werden, dass die Lebensdauer einer wassergekühlten Maschine entsprechend dem bedeutend tieferen Temperaturniveau anders eingesetzt werden muss als dies bei einer luftgekühlten Maschine der Fall ist. Währendem bei einer konventionellen Maschine die Lebensdauer praktisch gegeben ist durch die Isoliermaterialien und ca. 25 Jahre beträgt, so liegt der entsprechende Wert bei Wasserkühlung bei 40, wenn nicht sogar bei 50 Jahren. Selbstverständlich gelten analoge Überlegungen für Turbo-Generatoren, wie auch für Asynchronmaschinen, Einphasen-Synchronmaschinen, und vor allem auch in der Antriebstechnik mit den immer grösser werdenden Leistungen wird sich eines Tages die Frage stellen, ob nicht auch hier die Wasserkühlung Eingang finden wird. Bei Schenkelpolmaschinen allein hat man heute eben doch die Betriebserfahrung von in Betrieb befindlichen Maschinen mit einer Gesamtleistung von etwa 1000 MVA, und während 50 000 Betriebsstunden konnte man feststellen, dass der seinerzeit vom verstorbenen Prof. *Wiedemann* eingeschlagene Weg der einzig richtige ist, um die bei grossen und grössten Leistungen auftretenden Probleme sicher zu beherrschen.

Die Verdampfungskühlung wird kaum ernsthaft realisiert werden, da der Aufwand gegenüber der Wasserkühlung in keinem Verhältnis zum Gewinn steht.

Sollten sich die bis heute gebauten Einheitsleistungen dem steigenden Energiebedarf anpassen (in 20 Jahren ca. 4fache Einheitsleistung!), dann bricht wohl die Zeit der Supraleitung an. Die Entwicklungen in dieser Richtung können nicht mehr von einzelnen Firmen allein getragen werden. Nur eine enge Zusammenarbeit zwischen den Hochschulen und den Herstellern nach sorgfältig ausgearbeiteten Entwicklungsplänen wird die Möglichkeit geben, auch in Zukunft die Spitzenstellung auf diesem Gebiet halten zu können.

Literatur

- [1] *E. Wiedemann*: Wasserkraftgeneratoren mit Flüssigkeitskühlung in Stator und Rotor. *Brown Boveri Mitt.* 51(1964)5, S. 267...273.
- [2] *E. Ostby* und *K. Gamlesaeter*: Vollständig wassergekühlte 190-MVA-Generatoren für das Wasserkraftwerk Tonstad in Norwegen. *Brown Boveri Mitt.* 56(1969)8, S. 380...385.
- [3] *K. Baltisberger* und *K. Gamlesaeter*: Betriebserfahrungen mit vollständig wassergekühlten Schenkelpolmaschinen. *Brown Boveri Mitt.* 58(1971)1, S. 18...24.
- [4] *E. Meyer*: Grenzleistungen von Synchronmaschinen hoher Drehzahl für Wasserkraftwerke. *Brown Boveri Mitt.* 55(1968)4/5, S. 201...207.
- [5] *G. Neidhöfer*: Roebelstabwicklungen für grosse Synchronmaschinen. *Brown Boveri Mitt.* 57(1970)1, S. 4...14.
- [6] *P. Marti* und *R. Schuler*: Fabrikation und Prüfung von Roebelstäben. *Brown Boveri Mitt.* 57(1970)1, S. 25...31.
- [7] *R. Schuler*: Isolationssysteme für rotierende Hochspannungsmaschinen. *Brown Boveri Mitt.* 57(1970)1, S. 15...24.
- [8] *E. Wiedemann*: Direkt wassergekühlte Wasserkraftgeneratoren. *ETZ-A* 87(1966)13, S. 465...473.
- [9] *E. Wiedemann*: Grossturbinen mit ausschliesslicher Wasserkühlung. *Brown Boveri Mitt.* 53(1966)9, S. 501...512.

Adresse des Autors:

K. Baltisberger, El.-Ing. HTL, Brown-Boveri & Cie. AG, Postfach, 5401 Baden.