

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

Zusammenfassung	2
Résumé	2
Abstract	3
1. Ausgangslage, Vorgehen	4
1.1 Bedeutung	4
1.2 Projektpartner	4
1.3 Projektziele	5
1.4 Vorgehen	5
2. Technik	5
2.1 Funktionsprinzip	5
2.2 HTS-Leiter	5
2.3 Kühlung	7
2.4 Stromübertragung	8
2.5 Elektrische Isolationsmaterialien	8
2.6 Ausführungsformen	9
3. Anwendungsarten	11
3.1 Betriebsverhalten am Netz	11
3.2 Monitoring und Unterhalt	12
3.3 Der Austausch-Rotor	12
4. Markt und Akteure	13
4.1 Anreize	13
4.2 Risiken	13
4.3 Akteure	14
4.4 Einstieg	14
5. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale	14
6. Projekt-Realisierung, Alternativen.....	15
6.1 Projekt-Realisierung, Investitionen	15
6.2 Alternativer Ansatz: verbesserte konventionelle Technik	15
7. Schlussfolgerungen, Ausblick	16
8. Quellenverzeichnis	16

Zusammenfassung

Im Projekt wird in Form einer Studie untersucht, wo die Vor- und Nachteile einer grossen elektrische Maschine mit supraleitender Wicklung liegen. Im Zentrum stehen Synchrongeneratoren, insbesondere Turbogeneratoren im Bereich 50...>1000MW, mit einer Feldwicklung der Technologie Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL). Die einjährige Studie gliedert sich in die drei Phasen „Status“, „Benchmark“ und „Aktionsplan“.

Die Phase „Status“ diente der Beobachtung laufender anderer Projekte und zur Kontaktaufnahme zu schweizerischen und internationalen Partnern. Zwei laufende Entwicklungsprojekte mit schnelllaufenden Rotoren sind von Interesse: der 100MVA-Austauschrotor von General Electric und der rotierende 8MVA-Phasenschieber von American Superconductor. Diese Projekte brauchen den kommerziell erhältlichen HTSL der ersten Generation vom Typ Bi-2223 in einer mechanisch verstärkten Spezialausführung.

Die Phase „Benchmark“ hat intensive Diskussionen des Generatorherstellers mit Kunden und HTSL-Drahtlieferanten beinhaltet. Die vorliegende Auswertung zeigt keine eindeutigen Marktanreize eines HTSL-Rotors. Das erhöhte Betriebsrisiko überwiegt die Betriebskosteneinsparung durch kleinere Verluste. Die über die Normen hinausgehenden Vorteile (Leerlaufkurzschlussverhältnis, $\cos\phi$) werden zur Zeit vom Markt nicht honoriert. Das Leitermaterial ist noch zu teuer, doch wird für das Jahr 2010 mit einem Rückgang auf ca. $\frac{1}{4}$ des heutigen Preises gerechnet. Generatoren mit HTSL-Rotor kombiniert mit einer Stator-Luftspaltwicklung erzielen höhere Ausnutzung, der neuartige Stator birgt aber neue, eigene Risiken.

Die Phase "Aktionsplan" zeigt Möglichkeiten zu einem Folgeprojekt. Bezüglich Markteinführung bei Grossgeneratoren scheint der Austauschrotor (wie bei General Electric) ein geeigneter Ansatz mit vertretbarem Risiko zu sein. Eine Partnerschaft mit Aufteilung Maschine-Leitermaterial oder Stator-Rotor ist fast unabdingbar. Verschiedene optimierte Elemente des (eher vernachlässigten) Stators sind in Abklärung und können in eine solche Partnerschaft eingebracht werden. Ein konkurrierender Ansatz „verbesserte konventionelle Generatoren“ könnte voraussichtlich Vorteile des HTSL-Generators (Wirkungsgrad, Betriebsstabilität) schrumpfen lassen. Eine quantitative vergleichende Wertung zur supraleitenden Maschine steht aber noch aus.

Résumé

Dans le projet on examine sous forme d'étude, où se trouvent les avantages et inconvénients d'une grand machine électrique avec un bobinage supraconductrice. Dans le centre sont des générateurs synchrones, en particulier des turboalternateurs dans le secteur de 50...1000MW, avec un bobinage d'excitation de la technologie supraconducteurs de haute température (SHT). L'étude d'une année se subdivise en trois phases "Statut", "Benchmark" et "Plan d'action".

La phase "Statut" a servi à l'observation d'autres projets en cour et à l'établissement des contacts à des partenaires suisses et internationaux. Deux projets courants de développement avec des rotors à grande vitesse présentent un intérêt: le 100MVA-rotor d'échange de General Electric et le 8MVA-compensateur synchrone du American Superconductor. Ces projets nécessitent le SHT commercialement disponible de la première génération du type Bi-2223 dans une construction particulière renforcée mécaniquement.

La phase "Benchmark" comprend les discussions intensives du fabricant de générateur avec des clients et des fournisseurs de fils SHT. La présente évaluation ne montre pas d'incitations du marché claires d'un rotor SHT. Le risque industriel accru prédomine l'économie de frais d'exploitation par de plus petites pertes. Les avantages allant au-delà des normes (rapport de court circuit, $\cos\phi$) ne sont pas honorées actuellement par le marché. Le matériel des conducteurs est encore trop coûteux, mais on s'attend pour l'année 2010 à un recul environ $\frac{1}{4}$ du prix actuel. Des générateurs de rotor SHT combiné avec un bobinage statorique à entrefer obtiennent une utilisation plus élevée, le nouveau stator a toutefois ses risques propres et nouveaux.

La phase "Plan d'action" montre des possibilités pour un projet consécutif. Concernant une introduction sur le marché pour des grands générateurs, le rotor d'échange (comme à General Electric)

semble être une approche appropriée avec un risque justifiable. Un partenariat avec une répartition machine - matériel conducteurs ou rotor - stator est presque indispensable. Différents éléments optimisés du stator (plutôt négligé) sont dans une clarification et peuvent être apportés dans un tel partenariat. Une approche concurrentielle "générateurs conventionnels améliorés" pourrait probablement faire rétrécir les avantages du générateur SCHAT (degré d'efficacité, stabilité d'opération). Une évaluation comparative quantitative de la machine supraconductrice est toutefois encore en suspens.

Abstract

In this project in the form of a study, the advantages and disadvantages of large electrical machines with superconducting winding are investigated. The main target is synchronous generators, particularly turbogenerators in the range 50...>1000MW, having a field winding of the high-temperature superconductor (HTSC) technology. The one-year study is divided in the three phases "State", "Benchmark" and "Action Plan".

The Phase "State" was used for the survey of current other projects and for the contacting of Swiss and international partners. Two current development projects with fast rotating rotors are of interest, the 100MVA replacement rotor of General Electric and the 8MVA rotating var-compensator of American Superconductor. These projects make use of the first generation HTSC of the type Bi-2223 in a mechanically reinforced special version.

The phase "Benchmark" involved intense discussions of the generator manufacturer with clients and HTSC wire suppliers. The resulting analysis revealed no clear market incentives of a HTSC-rotor. In view of the high operational risk the savings in operational costs are too moderate. The advantages going beyond standards (short circuit ratio, power factor) are currently not recognized by the market. The wire material is still too expensive, however for the year 2010 a reduction to 1/4 of today's price is predicted. Generators combining HTSC rotors with a stator air gap winding will achieve higher utilization, however this novel stator brings along new, own risks.

The phase "Action Plan" shows possibilities for a continuation of the project. Regarding market introduction for large generators it seems the replacement rotor (pursued by General Electric) is a suited approach with acceptable risk. A partnership with a split into machine-wire or stator-rotor is nearly compulsory. Various optimized elements of the (more neglected) stator are in investigation and might be brought in such a partnership. A concurrent approach "improved conventional generators" might relegate advantages of the HTSC-generator (efficiency, stability). However a quantitative rating against the superconducting machine remains to be done.

1. Ausgangslage, Vorgehen

1.1 Bedeutung

Generatoren mit supraleitenden Wicklungen im drehenden Teil (Rotor) haben das unbestrittene Potential Energie zu sparen. Darüber hinaus können sie wegen deutlich anderem Betriebsverhalten einen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Die Anwendung in Rotoren von elektrischen Maschinen ist aber äusserst anspruchsvoll. Die Verwendung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL), wie gezeigt wird, belässt den Maschinenbauer mit -240°C immer noch in einem für Konstruktionsmaterialien kritischen Temperaturbereich, mit z.T. noch ungeprüftem Langzeit-Materialverhalten. Einige Hersteller haben in den 70/80er Jahren bereits unter Verwendung von Tieftemperatur Ni-Ti Leitertechnologie mit heliumgekühlten Rotorwicklungen (-269°C) erste Erfahrungen in der Herstellung von Rotoren gewonnen. Leider sind diese Prototypen nicht zum kommerziellen Einsatz gelangt, und zudem ist das Konstruktions-Wissen mit dem Abbruch der Programme nicht dokumentiert worden, und auch wegen dem zwischenzeitlichen Generationenwechsel verloren gegangen. Dies gilt in eingeschränktem Rahmen auch für verwandte Gebiete, wie Stator-Luftspaltwicklungen.

Nach dem vor einigen Jahren erfolgten erfolgreichen Testen des 70MW Generator-Prototyps mit Tieftemperatur-SL im Rahmen des japanischen Super-GM, begleitet von vielen Publikationen, ver nimmt man, dass das Projekt wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit aufs Eis gelegt wurde. Es ist unsicher, ob eine neue Ausrichtung der Entwicklung auf HTSL-Anwendung für Grossmaschinen im Anlaufen ist. Allgemein anerkannt ist, dass in der beteiligten japanischen Industrie das Wissenspotential für HTSL-Maschinenanwendung zweifellos vorhanden wäre.

Die amerikanische General Electric hat, nach eigenen mehrjährigen Vorarbeiten, im 2002 mit staatlicher Unterstützung ein Projekt zur Entwicklung von supraleitenden Austausch-Rotoren für Kraftwerksgeneratoren begonnen. Gedacht ist zunächst der Einsatz in 60Hz-Standardgeneratoren der Grösse 100MVA und 250MVA. Die Leitertechnologie ist HTSL. Ein kommerzieller Einsatz ist für 2007 geplant.

Es ist vor allem dieses Projekt, welches vorliegende Studie ausgelöst hat. Die Studie soll auf neutrale Weise die möglichen Technologien, Nutzen und Risiko für den Kunden, und die benötigten Mittel für ein Entwicklungsprojekt für Kraftwerksgeneratoren aufzeigen.

1.2 Projektpartner

Das Projekt wurde in Form einer Studie durchgeführt. Entsprechend der Aufgabenstellung liefen alle Kontakte konsultativ und ohne weitere Projektbeteiligung.

Kontakte auf nationaler Ebene:

- Universität Genf, Prof. R. Flükiger, Dept. Phys. Matière Condensée
- ABB Sécheron Meyrin, H. Zueger
- ABB Forschung Dättwil, Dr. M. Lakner
- Vorstellung und Diskussion am BFE-HTSL-Statusseminar vom 24.11.2004.

Kontakte auf internationaler Ebene (Vertraulichkeitserklärungen):

- Hochtemperatur-Supraleiter Hersteller
- Ein Experte für Generatorfragen eines Grosskunden für Kraftwerke

Weitere Kontakte und Informationsquellen:

- Meinungsaustausch an Kongressen, Seminarien: IEEE, CIGRE,...
- US-DOE Annual Superconductivity Wire Workshop und Peer Review

1.3 Projektziele

Die einjährige Studie soll die Möglichkeiten für eine eigenständige Entwicklung eines Synchrongenerators mit einem Rotor auf Basis Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) aufzeigen. Im Zentrum stehen insbesondere Turbogeneratoren im Leistungsbereich 50...>1000MW. Die einzelnen Projektphasen mit ihren Zielen sind:

Status: In einer ersten Phase soll eine Uebersicht über den weltweiten Stand der Supraleitungstechnik in grossen elektrischen Maschinen, insbesonder Generatoren, gewonnen werden.

Benchmark: Das Ziel der zweiten Phase ist es, einen Vergleich mit konventioneller Technik bezüglich technischer Grenzen und Wirtschaftlichkeit durchzuführen und die Marktchancen zu ergründen.

Aktionsplan: Die dritte Phase hat zum Ziel, eine eigene Projektplanung zur Entwicklung eines supraleitenden Generators (allenfalls eines konkurrierenden konventionellen Generators) zu entwerfen.

1.4 Vorgehen

Das Projekt wurde in Form einer Studie durchgeführt. Das Projekt fokussiert sich auf die Anwendung von Hochtemperatur-Supraleitung. Die Aufteilung in die oben genannten drei Phasen, welche natürlich mit Ueberlappungen ablaufen, ergibt die logische Sequenz: Informationsbeschaffung -> Messen des Neuen am Bestehenden -> Aktionen. Es wird im Projekt keine eigene Entwicklung getrieben, dazu reichen Zeit und Geldmittel nicht. Die Studie besteht zum grössten Teil aus Beobachtungs-, Koordinations- und Planungsarbeit. Das Projekt soll mit einer Planung über die weiteren Schritte aufwarten. Die internationalen Kontakte ergaben sich über Anfragen an ALSTOM und Beziehungen des Projektleiters in internationalen Gremien (IEEE, CIGRE).

2. Technik

2.1 Funktionsprinzip

Die rotierende Erregerwicklung einer Synchronmaschine, hier eines Synchrongenerators, wird mit einem Leiter aus Hochtemperatur-Supraleiter Material ausgebildet. Mit dieser Massnahme resultieren zwei Effekte:

1. Es können die ohmschen Verluste in der im Normalfall gleichstromdurchflossenen Erregerwicklung zum Verschwinden gebracht werden. Der Wirkungsgrad des Generators, welcher im Bereich 98.0% bis 99.0% liegt, kann, je nach Bauart, um 0.3 bis 0.5% verbessert werden.
2. Weil das Produkt aus Rotorstrom und Windungszahl aufgrund der Verlustlosigkeit sozusagen beliebig erbracht werden kann, kann mit Vergrösserung des magnetischen Luftspalts die synchrone Reaktanz des Generators gesenkt werden (das Leerlauf-Kurzschlussverhältnis erhöht werden), was in erwünschtem Mass zur Erhöhung der Netzstabilität beiträgt. Aus demselben Grunde kann der Generator bei einem tieferen Leistungsfaktor $\cos \phi$ (mehr Blindleistung) betrieben werden.

2.2 HTS-Leiter

Von den gegenwärtig kommerziell erhältlichen HTSL der ersten Generation kommen im Maschinenbau ausschliesslich Drähte vom Typ Bi-2223 in Frage. Mehrere Lieferanten sind in der Lage, diese in akzeptablen Längen (300m) zu liefern (American Superconductor, SuperPower, Trithor, ...). Die Leiterabmessungen bewegen sich bei etwa 4.0x0.22 bis 4.5x0.3mm mit kritischen Stromdichten von 100A/mm² im magnetischen Eigenfeld bei 77K (Flüssig-Stickstoff). In Maschinen kann an Rändern von gewickelten Spulen das Feld beträchtlich höher sein (2 Tesla). Ferner muss die

Erregerstromüberhöhung bei einer Kurzschluss-Fortschaltung im Hochspannungsnetz unterbrochungslos überstanden werden. Der HTSL muss deshalb auf etwa 25 bis 35 K gekühlt werden um bei 2 Tesla Normalkomponente auf wirtschaftlichen mindestens $100\text{A}/\text{mm}^2$ gehalten zu werden. Die Situation ist am besten durch Fig. 1 dargestellt. Mechanischer Stress durch thermische Dilatation und Fliehkräfte im Grossmaschinenbau erfordert mindestens 0.4% Dehnbarkeit ohne bleibende elektrische Degradation, was heute als Spezialversion lieferbar ist, der Wunsch der Maschinenbauer ist aber 0.5%, was heute nur mit Abstrichen in anderen Eigenschaften lieferbar ist. Die Preise für Leiter liegen zur Zeit bei ca. $120\text{Euro}/\text{kAm}^*$, in 2010-2012 wird etwa $25\text{Euro}/\text{kAm}$ prognostiziert. Auch mit einer zukünftig lieferbaren Länge von bis 1200m wird es zur Forderung von Spleissung (Joints) der Leiter in der Spule kommen. Dies wird heute zwar durch überlapptes Verlöten praktiziert, die Spleissung bleibt aber immer eine inhärente Störstelle. In diesem Zusammenhang ist auch auf die Leiterisolation hingewiesen, deren Technologie noch Absicherungen zum Langzeitverhalten bei Tieftemperatur braucht.

*Preis in Euro dividiert durch Leiterstrom in kA bei 77K mal totale Leiterlänge. Beispiel: Ein kleiner Generatorrotor braucht 10km HTSL-Draht mit 100A bei 77K. Der Draht kostet heute (2005) $120 \cdot 10'000 \cdot 0.1 = 120'000\text{Euro}$.

HTSL der zweiten Generation, z.B. der favorisierte YBCO, sind erst im R&D-Stadium. Ehrgeizige Pläne der Hersteller sprechen von 3 Jahren bis Markteinführung, vorsichtige von 6 Jahren. Die Rohmaterial-Preise liegen bei verschwindend kleinen $5\text{Euro}/\text{kAm}$, die grosse Unbekannte, und damit Beschäftigung für die weltweite Forschungs-Front, ist hier ein wirtschaftlicher Auftragsprozess von hauchdünnen SL-Schichten auf Substrate. Leiterabmessungen werden identisch zu den Bi-2223 beabsichtigt, um eine spätere Substitution zu ermöglichen. Preisprognosen der Lieferanten: die Preise werden asymptotisch auf die der Bi-2223 zusteuern ($25\text{Euro}/\text{kAm}$), aber nicht tiefer gehen, hingegen wird ein technischer Vorteil bezüglich der Betriebsparameter erwartet, z.B. höhere Betriebstemperatur (z.B. 50K) bei selben elektrischen Daten, oder Erreichen von mechanischer Dehnung von $>0.4\%$ bei selben elektrischen Daten, siehe Fig. 2. Viele praktische Fragen sind aber überhaupt noch nicht angedacht, so z.B. das Spleissen. Ein Betrieb bei 77K (Flüssig-Stickstoff) scheint aber für Generatoren nicht erreichbar zu sein.

Anhaltspunkte für eine Draht-Spezifikation für Generatoranwendung sind in [2] und [3] ersichtlich.

Die Leiterhersteller haben selber auch Einrichtungen zur Herstellung fertiger Formspulen. Es bleibt zu prüfen, ob der Maschinenhersteller diese Kompetenz delegieren soll oder besser bei sich aufbaut.

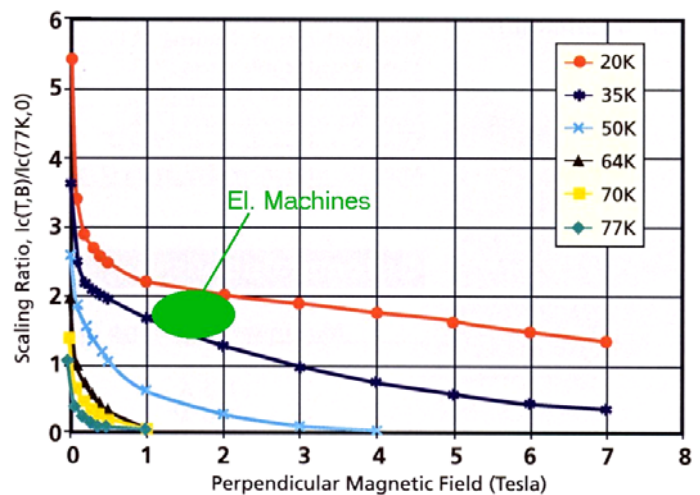


Fig. 1: Erlaubte Stromstärke bei Magnetfeld normal zu Band.
1pu: Kritischer Strom bei 77K im Eigenfeld.
Quelle: American Superconductor [1]

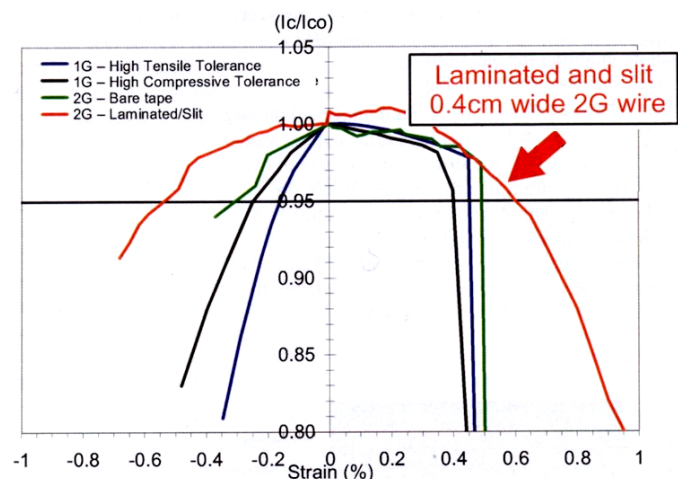


Fig. 2: Erlaubte Stromstärke unter mechanischer Spannung.
+ Zug, - Druck Quelle: American Superconductor [1]

Fazit: Die heute verfügbaren HTSL der ersten Generation genügen knapp den Anforderungen des Maschinenbaus. Neon-Verdampfungskühlung bei 27K ist möglich, wenn auch wegen fehlender Margen nicht empfehlenswert. Die zwingend zu erstellende Leiterspezifikation als gemeinsame Basis zum Lieferanten wird unweigerlich in Konflikt mit deren "Katalog"-Angebot führen. Aus heutiger Sicht wird es hier zu Kompromissen kommen müssen. Aber genau in diesem Feld werden später die Ursachen von Ausfällen anzutreffen sein. Es ist klar, dass alle speziellen Forderungen mit Auswirkungen auf den Leiterpreis verbunden sind.

Leiter der zweiten Generation werden in 3 bis 6 Jahren zur Verfügung stehen und sollen abmessungskompatibel zur ersten Generation sein. Dank erwarteter Verbesserung bezüglich Magnetfeldresistenz und Dehnungsresistenz kann die Betriebstemperatur auf ca. 50K angehoben werden, ein Betrieb mit Stickstoff-Verdampfungskühlung bei 77K scheint aber ausgeschlossen. Die Preise werden bestenfalls auf die Preiskurve der ersten Generation zu liegen kommen.

2.3 Kühlung

Als Kühlmedium für HTSL-Maschinen wird entweder Flüssig-Neon von 27K oder gasförmiges Helium von >4K in Betracht gezogen (Tabelle 1).

Neon-Kühlung wird durch die HTSL erstmals möglich, weil der Siedepunkt mit 27K gerade auf der Schwelle der zulässigen Leitertemperatur liegt (siehe Fig. 1). Die Kühlung der Wicklung kann über einen Thermo-Syphon-Effekt erfolgen, welcher die Wärme aus der Wicklung abführt. Eine Wiederverflüssigung wird über einen in die Welle hineinragenden Kaltkopf oder Wärmetauscher bewerkstelligt. Die Abführung der Wärme aus der Wicklung kann in direktem Kontakt mit den Leitern, durch in die Wicklung eingelegte Kühlrohre oder über die Anbindung der Wicklung über Wärmeleitung in Festkörpern (Metallkonstruktionen) erfolgen.

Der Nachteil der Neon-Kühlung ist der Gefrierpunkt von 24.6K, der sehr nahe am Siedepunkt liegt. Zum einen ist eine sehr genaue Temperaturregelung am Kaltkopf nötig, zum andern kann natürlich bei Bedarf nicht auf eine tiefere Rotorwicklungstemperatur gewechselt werden. Leider ist gerade diese (Sicherheits-) Marge im Gross-Maschinenbau vorerst unumgänglich.

Die Verwendung von gasförmigem Helium zur Wicklungskühlung beseitigt dieses Problem. Infolge des nicht vorhandenen Thermo-Syphon-Effekts muss der Gaskreislauf über eine Kühlmittel-Transferkupplung zu einem stationären Kälteaggregat verbunden sein, wo sich auch eine Umwälzpumpe für das gasförmige Helium befindet.

Die Abführung der Wärme aus dem Rotor wird als Standard über handelsübliche Gifford-McMahon Kaltköpfe bewerkstelligt (Hersteller: Cryomech, Leybold, Sumitomo). Diese ragen axial in eine Zentralbohrung des Rotors hinein und sind über eine fluidgefüllte Konakfläche thermisch an das Rotor-Kühlmedium angebunden, am andern Ende sind sie über Normaltemperatur-Schläuche mit

Fluid	Boiling at	Application
Helium	4.2K	in cold head
Neon	27K*	in rotor
Nitrogen	77K	not suited for machines

* freezing at 24.6K, narrow temp. control needed (!)

Tabelle 1: Kühlmedien für Supraleiter

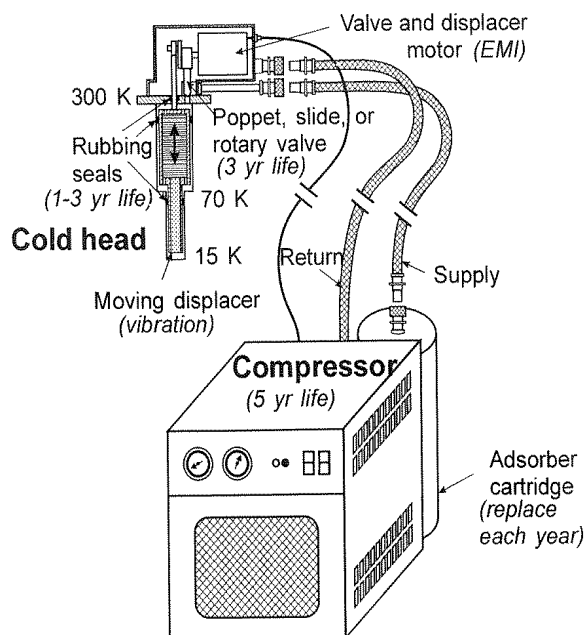


Fig. 3: Standzeiten der Komponenten eines Gifford-McMahon Kälteaggregates Quelle [5]

einem kleinen Kompressor verbunden. Alternativ kann das Neon auch über einen rotierenden Flüssigkeitsübertrager zu den räumlich von der Maschine getrennten Kaltköpfen geführt werden, dasselbe kann für gasförmiges Helium angewendet werden. Für 300W Abfuhrwärme im Rotor (GE-100MW) müssen drei Kaltköpfe à 100W parallel betrieben werden (Cryomech AL330* [4]). Die Zuverlässigkeit (bewegte Zylinder im Kaltkopf) bereitet immer noch Kopfzerbrechen (Fig. 3), entsprechend komplex und kostenintensiv sind die vorgeschlagenen Schaltungen für Redundanz. Solche Anordnungen stehen dann nicht direkt mit dem Rotor in Berührung. Alternativen ohne bewegte Teile im Kaltkopf sind in Entwicklung. Zukünftige Lösungen stellen z.B. Stirling Pulse-Tube oder Turbo-Brayton dar.

Die Kälteleistung für die Kühlung der supraleitenden Spule muss also mittels thermischer Isolationen gering gehalten werden. Zum einen wird dies mittels Kräfte/Drehmomentübertragern bewerkstelligt, welche möglichst wenig Wärme in die Spulen einfließen lassen. Dies ist primär Aufgabe des Maschinenkonstruktors. Zum anderen wird die thermische Isolation über perfektes Vakuum und Verspiegelung der Oberflächen minimiert. An der Minimierung des Emissionskoeffizienten forscht für GE z.B. das Oak Ridge National Lab [6]. Für GE arbeitet beispielsweise das Los Alamos National Laboratory daran, über Jahre hochwertige Vakuums aufrecht zu erhalten [7].

*Für eine Kälteleistung eines Kaltkopfs von 100W @ 30K muss eine elektrische Kompressor-Anschlussleistung von 8000W erbracht werden.

2.4 Stromübertragung

Stromübertragung vom Tieftemperaturbereich in den normalleitenden Bereich findet in Form von Durchführungen im Rotor statt. Die Aufgabe ist es, auf einer Seite an den supraleitenden Draht anzuschließen, auf der anderen Seite an normalleitende Schienen. Meist wird dies mit einer lokalen Leiterverjüngung bewerkstelligt, welche den Wärmefluss in den Supraleiter begrenzt. Gleichzeitig wird der HTSL-Anschlussbolzen direkt intensiv gekühlt. Gegenüber Tieftemperatur-Supraleitern hat sich das Problem der Stromübertragung in höchstem Masse entschärft. Solche Durchführungen, welche bis zu einigen hundert Ampere belastbar sind, zählen aber immer noch zum "strategischen Material", und werden von spezialisierten Fremdlieferanten (Sumitomo, Cryomech,...) bezogen.

Umgekehrt kommt mit der aus Isolationstechnischen Gründen limitierten Erregerspannung die Forderung, die Induktivität der Erregerwicklung zu begrenzen. Dies kann mit Parallelschalten von Strompfaden geschehen. Der 100MVA HTSL-Rotor von GE wird mit 3000 Windungen beschrieben, als Größenordnung zum Vergleich: ein konventioneller Rotor dieser Leistung hat etwa 200 Windungen, alle in Serie. Mit einem Drahtstrom von 100A und einem Durchführungsstrom von 300A können 3 parallele Drähte geführt werden. Diese harte Parallelschaltung soll unter Beachtung von Auskreuzung kein Problem darstellen. Vermutlich werden in dem Falle zusätzlich zwei parallele Durchführungen verwendet, was dann unter dem Strich 6 parallele Drähte ergibt, resultierend in 500 Seriewindungen.

2.5 Elektrische Isolationsmaterialien

Die Situation bei den tieftemperaturfähigen Isoliermaterialien ist alles andere als trivial. Bedingt können Erfahrungen von Tieftemperatur-Supraleitern übernommen werden. Die Technologie bewegt sich zum einen im Gebiet von modifizierten gefüllten Epoxiden (gute Wärmeleitfähigkeit, Ausdehnung wie Leiter). Zum anderen gelangen Folien aus Polyimide (Kapton®), PVF (Tedlar®), PEEK und PTFE zur Anwendung, dies als Wickel oder als Email-Ueberzug, wie bei üblichen Wicklungsdrähten. Während Durchschlagsspannungen bei Tieftemperaturen zumeist besser sind muss auf viele andere Details geachtet werden, wie zum Beispiel:

- mechanisch: Sprödigkeit und Ausdehnungskoeffizient
- Wärmeleitfähigkeit: der isolierte Leiter wird auch thermisch isoliert und kippt schneller (Quench)

Windungsisolierungen werden heute noch mit einseitiger Applikation eines Isolierbandes (meist dünner Glas-Epoxy) auf den HTSL gemacht. Angaben zur Isolierung finden sich in [8] und [9].

2.6 Ausführungsformen

Ueber internationale Aktivitäten im Gebiet grosser elektrischer Maschinen mit HTSL-Technologie konnte ein ziemlich vollständiges Bild hergestellt werden. Sehr viel Aktivität ist im maritimen Antriebsbereich, und hier speziell im Gebiet der nautischen Wehrtechnik. Infolge kleiner Drehzahl (100..250U/min) sind diese Arbeiten aber von sekundärer Bedeutung für das interessierende Gebiet der schnelllaufenden Turbogeneratoren.

Prinzipiell gibt es zwei Stufen der Anwendung eines supraleitenden Rotors:

1. Der magnetische Hauptfluss wird in der Grösse von konventionellen Maschinen belassen. Das heisst, dass der Stator konventionell belassen werden kann. Mit anderen Worten kann hier ohne Aenderungen am Stator ein supraleitender Rotor in den Stator eingefügt werden. Der Nachteil ist, dass aus gegebenem Maschinenvolumen nicht mehr Leistung als konventionell herausgeholt werden kann. Ein erwünschter Kompromiss ist, dass die supraleitende Rotorwicklung in dieser Anwendungs-Stufe nicht überstrapaziert wird. Entwicklungsrisiko: mittel, auf Rotor beschränkt.

2. Der magnetische Hauptfluss wird erhöht. Der Stator muss angepasst werden, weil ohne Aenderung die elektrischen Verluste in den Zähnen zu gross werden. Der gängige Ansatz dazu ist der zahnlose Stator mit einer Stator-Luftspaltwicklung. Damit kann für ein gegebenes Maschinenvolumen mehr Leistung herausgeholt werden. Die Stator-Luftspaltwicklung ist aber als zusätzliches Risiko zu sehen. Mechanische Verankerung und (indirekte) Kühlung bedürfen einer experimentellen Absicherung. Entwicklungsrisiko: gross, Rotor und Stator.

Es seien hier die zwei wichtigsten fortgeschrittenen Referenzprojekte zu schnelllaufenden Generatoren charakterisiert, die in ihrer unterschiedlichen Ausführung recht gut eine Uebersicht über die konstruktiven Möglichkeiten geben. Beide wenden die Stufe 1 an.

General Electric 100MVA HTSL-Rotor

Im Bereich Kraftwerksgeneratoren ist derzeit ein 26MioUSD- Projekt von General Electric am Laufen, mit dem Ziel in 2006 ein 100MVA-Prototypgenerator (Turbogenerator, 3600U/min) auf dem Prüfstand zu testen. Der Hersteller macht neben den bekannten Vorteilen (Verlustsenkung um 40% und bessere Stabilität am Netz) auch die Freiheit von thermischen Zyklen im Rotor (bleibt konstant auf Kryotemperatur) als Kundenvorteil geltend. Der Hersteller konzentriert sich vorerst nur auf den neuen Rotor, dieser soll als „Alternativlösung“ in nur leicht angepasste Statoren eingebaut werden. Das Projekt weist eine beeindruckende R&D-Ressource auf: neben dem Research-Center in Niskayuna ist durch das DOE auch eine Beteiligung von den nationalen Laboratorien Oak Ridge und Los Alamos sichergestellt. Der Rotor besteht aus einem magnetischen Kern, um den ein Solenoid gewickelt ist (Fig.4) [10]. Das Solenoid ist mit einer einwindigen Kühlröhre versehen, welche mit Heliumgas von etwa 25K durchströmt ist. Um Spule und Kühlrohr schliesst sich ein Spulenkasten,

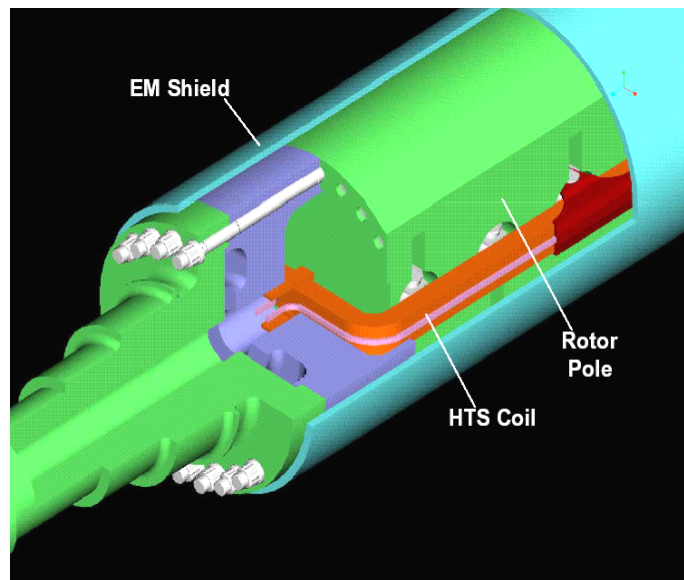


Fig. 4: HTSL-Rotor zum 100MVA-Generator mit magnetischem Rotorkern, Quelle [10]

welcher durch Zugbolzen im Rotorkern abgestützt ist. Die Wellen sind mit einer Ausnehmung für das Solenoid an den Rotorkern geflanscht (Fig.5) [11]. Die Herausforderung besteht aus:

- die Wicklung ohne mechanische Belastung im Spulenkasten abzustützen. Der verwendete Leiter vom Typ Bi-2223 mit vermutlich Stahldeckbändern von American Superconductor erträgt eine mechanische Dehnung von max. 0.35%, ein Ueberschreiten beeinträchtigt die Stromtragfähigkeit
- den Wärmeeinbruch über die Zugbolzen zu dämmen und trotzdem gute mechanische Stabilität zu gewährleisten
- den Raum um das Solenoid dauerhaft zu evakuieren um den Wärmetransfer klein zu halten. Ein übergestülpter Zylinder (EM-Shield/Dämpferzylinder) begrenzt nach aussen. Zylinder und Rotorkern sind ausserhalb des Kryo-Bereichs.
- die Kälteleistung ausfallfrei auf den Rotor zu übertragen.

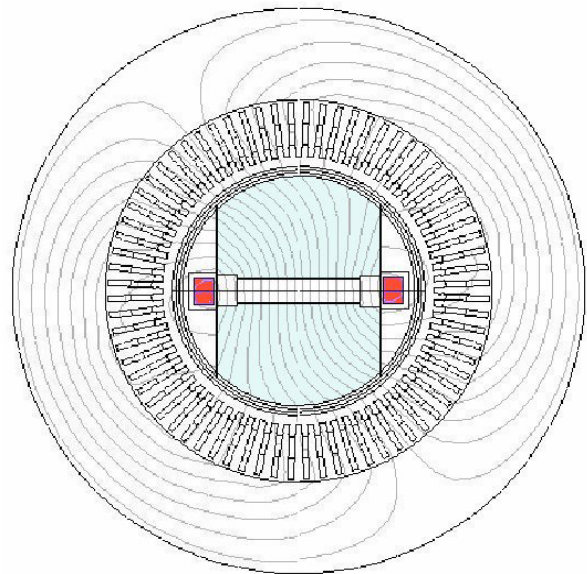


Fig. 5: Magnetisches Feld unter Last im 100MVA-Generator rot: HTSL-Solenoid, blau: magn. Rotorkern, Quelle [11]

Die erfolgreich abgeschlossenen Laufversuche an einem 1.5MW-Kleingenerator sind nach GE-Angaben positiv verlaufen, helfen aber nach unserem Wissen bestenfalls, um Berechnungstools zu eichen; sie sagen aber nur wenig aus über das Technologie-Restrisiko bei 100MVA. Informationen von der Technologiefrent sind auf sehr offene Art aus dem jährlichen "Wire Workshop" und "Peer Review" zur Supraleitung ersichtlich, welche das US-DOE veranstaltet [3], [12].

American Superconductor (AMSC) 8MVAr-Phasenschieber

AMSC hat für Tennessee Valley Authority (TVA) in USA einen rotierenden 8MVAr Blindleistungskompensator in Containerbauform entwickelt, (Fig. 6) [13]. Der Maschinenbau-Partner ist Ideal Electric. Nach anfänglichen Rückschlägen hat der Kompensator im zweiten Halbjahr 2004 erste Betriebsversuche gefahren. Wegen der relativ hohen Drehzahl von 1800U/min (4-poliger Rotor) ist das Projekt von Interesse. Der Rotor-design ist unterschiedlich von dem von GE: die Spulen sind pfannkuchenartig auf dem Rotorkern liegend. Der HTSL-Leiter vom Typ Bi-2223 ist natürlich aus dem eigenen Hause. Die Kühlung erfolgt mit flüssigem Neon bei 27K unter Verdampfung. Der Rotor wird mit einem Ponymotor angefahren. Bei grösserem Bedarf an Blindleistung werden mehrere Container parallel geschaltet. Folgebestellungen von TVA für fünf weitere Einheiten sind erfolgt. Das Projekt wird weiter beobachtet.

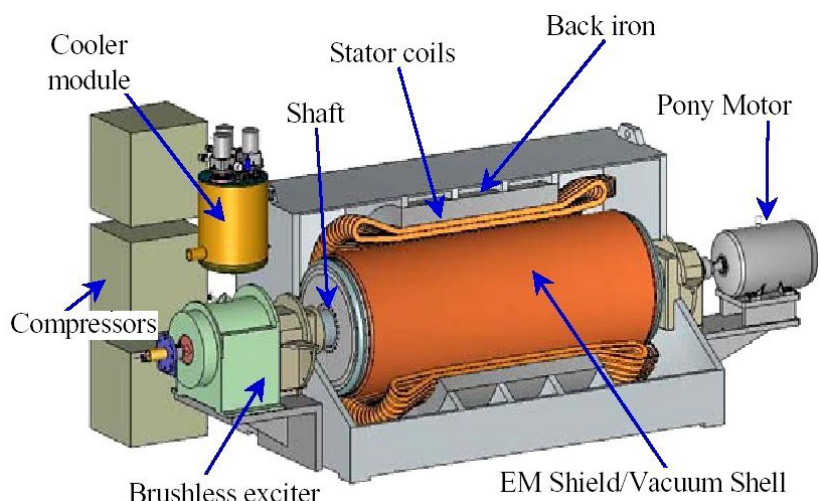


Fig. 6: Rotierender 8MVAr-Phasenschieber mit HTSL-Rotor, Spitze: 50MVAr während 170ms, Quelle [13]

3. Anwendungsarten

3.1 Betriebsverhalten am Netz

Supraleitende Generatoren weisen inhärent einen grösseren magnetisch wirksamen Luftspalt auf als herkömmliche Generatoren. Mit dem beschriebenen magnetischen Rotorjoch, welches sich bis zum Innenradius der Wicklung erstreckt, wird versteckt eine Optimierung unter drei Kriterien gemacht:

1. die Menge an benötigtem HTSL-Material wird minimiert und ist gerade noch vertretbar (Kosten, Platzbedarf)
2. der magnetische Kern gibt willkommene Krafteinleitung für das Drehmoment. Die Spule, und damit der Draht, werden kräftemässig entlastet
3. die synchrone Reaktanz ist allemal viel kleiner als heute üblich (Faktor 3-5). Dies mehr als "Geschenk", da wegen der Konstruktion (keine Nuten, Platz für Wärmeschild und Dämpferzylinder, etc) kein grösserer Rotorkern vorstellbar ist, und sich daher keine grössere synchrone Reaktanz einstellen lässt. Erzielte Werte sind $x_d=0.5pu$, statt konventionell $x_d=2.5pu$.

Supraleitende Synchrongeneratoren haben wegen der kleinen synchronen Reaktanz ein ausgeprägtes Verhalten zur Spannungsstabilisierung (siehe rotierender Phasenschieber AMSC). Dies kann in Inselnetzen stark erwünscht sein, im Netzverbund wird der Generator bei Netzspannungsänderungen übermässig strombelastet, deshalb sind spezielle Massnahmen zur schnellen Nachführung der Erregung nötig um Ueberlastungen des Generators bei Spannungsänderungen im Netz zu vermeiden.

Infolge der kleinen synchronen Reaktanz ist ebenfalls der Polradwinkel im Nennbetrieb viel kleiner als bei konventionellen Generatoren, was zu einer sehr grossen Reserve gegen Aussertrittfallen führt.

Bezüglich der Stosskurzschlussströme und der Wellenbeanspruchung bei Netzkurzschluss weist die Maschine ein vergleichbares Verhalten zu konventionelle Generatoren auf (etwa gleich grosse subtransiente Reaktanz). Bezüglich Inversbelastbarkeit (stationär und transient) sollen die HTSL-Rotoren ebenfalls die gängigen Normen erfüllen.

Wegen der grosszügigeren Rotoramperewindungen kann der Rotor auch in übererregtem Betrieb stärker ausgefahren werden. In anderen Worten: auf dem Kreisbogen des Power Chart kann der Generator mit konstantem Statorstrom, aber kleinerem Leistungswinkel gefahren werden.

Wegen der kleineren synchronen Reaktanz kann der Generator auch im untererregten Betrieb weiter ausgefahren werden, ohne die Stabilität zu verlieren. Mit anderen Worten: die 5°-Begrenzungslinie kann weiter rausgeschoben werden. Hier ist aber vor Anwendung unbedingt vorgängig die Mehrerwärmung in der Endpartie des Stator-Blechkörpers zu überprüfen.

Das Verhalten im Erregerkreis ist anders, siehe Fig. 7. Dies hat zu zahlreichen Schaltungsinnovationen geführt. Es wird sich weisen, welche der Erregerstromübertragungsarten, Schleifringe oder rotierender Gleichrichter besser zum HTSL-Rotor harmonieren. Rotierende Gleichrichter haben den Vorteil, dass sich der Erregerstrom im rotierenden System

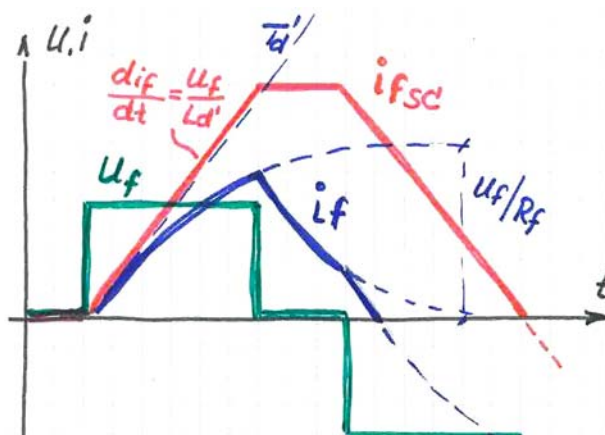


Fig. 7: Antworten im Erregerstrom auf Erregerspannung
blau: konventionell, rot: supraleitend Quelle: ALSTOM

schliesst und im stationären Betrieb nur ein geringer Ausgleichsstrom "zugemischt" werden muss. Im Störfall muss aber mit grossem Spannungshub eingegriffen werden.

3.2 Monitoring und Unterhalt

Der Betrieb eines supraleitenden Generators wird komplexer. Die Rotorwicklung selbst braucht eine Ueberwachung gegen Quench, d.h. einen störfallmässigen Uebergang der Rotorwicklung in den normalleitenden Zustand. Diese Ueberwachung muss auf kleine Grössen ansprechen und schnell reagieren. Vereinfacht ausgedrückt ist diese Rotorwiderstandserfassung heute meist auch vorhanden. Sie ermittelt den Quotienten aus Erregerspannung und -strom. Nur: die Erfassung mit HTSL muss kleine, lokale Spannungsanstiege messen können und dies auch bei variierendem Strom (störende induktive Spannungskomponente). Dazu müssen Messgrössen aus dem rotierenden System abgegriffen werden. Vermutlich wird als Frühwarnung, und zur Erregungsfreigabe beim Abkühlen auch der wahre Wert der Wicklungstemperatur erfasst werden müssen.

Des weiteren wird die Kälteanlage, auch wenn sie redundant ausgeführt ist, eine Ueberwachung benötigen.

Damit ist auch das Thema des Unterhalts, sei es planmässig oder nach einer Störung, angeschnitten. Heute erhältliche Kälteanlagen, sowohl Kompressor als auch Kaltkopf, brauchen routinemässige Wartung (Fig. 3). Redundante Systeme machen den Betrieb zwar sicherer, machen aber den Unterhalt nicht einfacher. Kaltköpfe, welche getrennt vom Generator angeordnet sind, sind natürlich einfacher zu warten. Hier muss man sich ein System vorstellen, in welchem mehrere Kaltköpfe auf das Rotorkühlmedium verbunden sind, und einzelne davon, ohne Unterbruch des Rests, gewartet werden können (siehe Cooler Module in Fig. 6, bestehend aus drei Kaltköpfen).

Auch zum Betriebsverhalten, aber auf der Kühlungsseite, gehört der Aspekt der Abkühlzeit nach Inbetriebnahmen/Revisionen. Bei grossen Generatoren ist hier mit mindestens 24 Stunden zu rechnen. Supraleitende Rotorwicklungen werden deshalb unabhängig vom Betrieb dauernd auf Kryotemperatur belassen. Die Hersteller münzen diesen Nachteil in einen Vorteil um: die thermische Zyklenbeanspruchung eines solchen Rotors sei viel kleiner als bei einem konventionellen (Lebensdaueraspekt).

Wegen der Komplexität und Reinheitsanforderungen werden HTSL-Rotoren nicht im Kraftwerk revidiert oder repariert werden können. Es müssen also dauernd Reserve-Rotoren verfügbar sein. Im Austausch-Rotorengeschäft kann natürlich angedacht werden, den konventionellen Rotor als Reserve zu behalten. Dies ist aber auch mit Tücken versehen, da z.B. die konventionelle Erregereinrichtung auch zurückgerüstet werden müsste.

3.3 Der Austausch-Rotor

Der Austausch-Rotor wird von General Electric im 100MVA-Projekt als Lösung verfolgt. Es ist vorgesehen, für das Generatormodell 7A6 (Luftkühlung, 100MVA) und später das Generatormodell 7FH2 (Wasserstoffkühlung, 250MVA) einen supraleitenden Rotor bereitzustellen. Dieser kann dann in bestehende Anlagen nachgerüstet werden, mit einer damit verbundenen Erhöhung im Gesamtwirkungsgrad. Umzurüsten wären lediglich die Erregereinrichtung und der Spannungsregler (AVR). Selbstverständlich muss auch die Kälteanlage nachgerüstet werden. Ferner muss die Rotorwicklungsüberwachung in Schutz und Ueberwachung eingeschlaucht werden. Das Risiko eines längeren Totalausfalls ist gering, wenn, wie von GE nicht erwähnt, der konventionelle Rotor zur Sicherheit im Kraftwerk belassen wird.

Für Neuanlagen kann nach Kundenwahl für obengenannte Generatormodelle der entsprechende Rotor im Werk eingebaut, auf Kundenwunsch kann der Generator mit HTSL-Rotor in einem Running Test vorgeprüft werden.

Im übrigen sorgt eine Standardisierung der Drahthersteller dafür, dass später ohne Designänderung am Rotor auf den 2nd Generation YBCO-Draht gewechselt werden kann.

Es ist selbstredend, dass der Stator bei jedem neuen betroffenen Generatortyp sorgfältig geprüft wird. Das betrifft vor allem den Statorgaskühlkreis, der in Interaktion mit dem Luftspalt funktioniert. Der effektive geometrische Luftspalt (nicht der magnetisch wirksame) kann bei Umrüstung auf HTSL-Rotor kleiner werden und kann somit den Gasverteilvorgang im Luftspalt tangieren. Die in einem grossen Bereich angewendete Multi-Kammer Kühlung kann hier Vorteile aufweisen. Ein Nachstellen des Ventilator-Flügelwinkels, sei es für weitere Wirkungsgraderhöhung oder für eine Leistungserhöhung im Stator, ist zu prüfen.

4. Markt und Akteure

Die Diskussionen des Generatorherstellers mit Drahtlieferanten und Vertrauenskunden konnte in der Phase 2: "Benchmark" intensiv durchgeführt werden. Inhalt und Ergebnisse unterliegen einer Vertraulichkeitserklärung, sodass im folgenden nur summarisch berichtet wird.

4.1 Anreize

Der primäre Anreiz für den Kraftwerksbetreiber kommt natürlich von der Einsparung an Verlusten im Generator. Der Wirkungsgradgewinn von 0.3..0.5% (je nach Generatortyp) ist unbestritten. Die zusätzliche Leistung für das Kälteaggregat ist vernachlässigbar. Dabei weisen die Untersuchungen darauf hin, dass Einsparungen bei 50Hz generell höher liegen als bei 60Hz, und dass die grossen Gewinne von gegen 0.5% bei kleinen Generatoren (<50MVA) und bei grossen Einheiten (Wasserstoff >500MVA) auftreten. Bei grossen luftgekühlten Generatoren (300-500MVA) gehen die Vorteile gegen 0.2% zurück.

Mit 0.04 Fr/kWh Bonus und basierend auf einer 100MW Einheit mit 0.4% Gewinn im Wirkungsgrad und im Mittel 3000 Volllaststunden pro Jahr (Erfahrungswert) resultieren gerade mal Einsparungen von 50'000 Fr pro Jahr. Dies ist leider ein sehr bescheidener Anreiz in Anbetracht des sicher nicht kleinen Zusatzrisikos mit der neuen Technologie.

Ein normaler Rotor für 100MVA kostet ca 500'000 Fr. Beim heutigen Drahtpreis von 120Euro/kAm und einem benötigten 100A-Draht von 25km macht der Drahtpreis allein 460'000 Fr aus. Angenommen, der Fixanteil Rotor und Kälteanlage und Erreger mache zusammen 500'000 Fr aus. so wäre ein supraleitender Rotor 460'000 Fr teurer als ein normaler Rotor, mit dem obigen Energiebonus von 50'000 Fr wäre der Break Even in 9 Jahren erreicht; eine zu grosse Zeitspanne. Im Falle des "eingeschwungenen" Zustandes (frühestens 2010) wäre mit 25Euro/kAm der HTSL-Rotor um rund 100'000 Fr teurer, der Break Even würde auf ansprechende 2 Jahre zu liegen kommen.

Ein Vorteil kann im Zusammenhang mit einem Generator-Uprating zusammen mit der Turbine erwachsen. Ein Austauschrotor, wie er von GE propagiert wird, kann hier gewisse günstige Nebenefekte haben. Diese Massnahme steht natürlich teilweise in Konkurrenz zu diversen etablierten Uprating-Packages, welche viele Originalhersteller bereithalten.

Im übrigen wird der Generator an den bestehenden Normen und Grid Codes der Kunden gemessen. Darüber hinausgehende Parameter tun sich in der finanziellen Bewertung schwer. Dies gilt für den erweiterten Blindleistungsbereich (Leistungsfaktor) als auch für das erhöhte Leerlaufkurzschlussverhältnis. Beide unterstützen zwar die Stabilität, werden aber - wenn oberhalb der Standardanforderungen - dem Kraftwerkkunden kaum Mehreinnahmen bringen. Das Gegenteil wird der Fall sein: der Kunde muss den Nachweis erbringen, dass sein Exot sich harmonisch ins Netz einfügt, was vermutlich umfangreiche Studien und daraus resultierende ungewöhnliche Schutzmassnahmen nach sich zieht. Die Mehrkosten sind hier schwierig zu quantifizieren, vergrössern aber in jedem Fall die Pay-Back Zeit.

4.2 Risiken

Wie jedes neue Produkt wird die Einführung des HTSL-Generators mit anfänglichen Rückschlägen einhergehen. Der Kunde wird das kommerzielle Risiko auf den Hersteller wegbedingen.

Ferner ist aus heutiger Sicht die Grösse des Marktes und das interessierte Kundensegment nicht bekannt. Das Risiko besteht, mit dem neuen Generator alleine dazustehen. Das Einbeziehen von ein bis zwei Vertrauenskunden zur dauernden Bewahrung der Marktnähe ist empfehlenswert.

Für den Hersteller, vor allem wenn er nicht als erster in dieses Business einsteigt, besteht auch die Gefahr einer Technologie-Verminung durch Patente. Dies kann jedoch durch eine geschickte Partnerwahl reduziert werden.

4.3 Akteure

Akteure können nur Grosshersteller mit einem finanziellen Polster und einer Vernetzung mit Technologie-Instituten sein. Dies erstens zur Bewältigung der Entwicklung, und zweitens für die Rückstellungen und Lösungen für Anfangsschwierigkeiten. Weltweit sind dies General Electric (aktiv im 100MVA Projekt, hat Unterstützung durch Niskayuna-Corporate Research und div. staatliche Institute), Siemens (z.Z. aktiv im Kleinmaschinengeschäft, hat eigenen Corporate Research und auch das HTSL-Business im Hause), und die (vereinten) japanischen Hersteller (grosses Technologiepotential, aber z.Z. orientierungslos, siehe [14]). ALSTOM kann die Generalkompetenz mit dem Eingehen einer Partnerschaft erlangen.

4.4 Einstieg

Der von GE propagierte Austausch-Rotor in konventionelle Statoren, und dies zuerst bei kleinen Einheiten (100MVA) ist vermutlich der einzig gangbare Weg zur Technologieeinführung.

Die volloptimierte Supraleitungsmaschine, welche Luftspaltinduktionen aufweist, die über heute erprobte hinausgehen, wird erst zweite Priorität haben. Das Risiko mit der Neuheit im Rotor und einer gleichzeitigen Neuheit mit der Stator-Luftspaltwicklung würde "quadriert" und damit unakzeptabel.

Ein Einstieg eines zweiten Players mit differierender Technologie würde vom Markt, und vermutlich vom jetzigen alleinigen Akteur wohlwollend aufgenommen. Die Erfahrung hat nämlich gelehrt, dass ein Technologie-Endspurt im Alleingang selten zum Durchbruch am Markt führt.

Strategisch sind die Partnerschaften zu den wenigen HTS-Drahtherstellern, welche z.T. selber Maschinenbaupotential aufgebaut haben. Strategisch ist auch die Nähe zu einer staatlichen Förderung, die vor allem durch Wahl des Kerntechnologiebringers (Drahtlieferant) mitbestimmt wird.

Die Markteinführung ist kritisch. Ein Einstieg in den Markt kann, wie durch General Electric vorgesehen, über ein Austausch-Rotoren Geschäft erfolgen. Zu einem Standardgenerator, wie er in Gasturbinen und Kombikraftwerken üblich ist, wird in bestehenden Kraftwerken der Rotor des Generators durch einen HTSL-Rotor derselben Abmessungen ersetzt (vorteilhafterweise bleibt der konventionelle Rotor als „Ersatzteil“ im Kraftwerk). Eine Erweiterung im Blindleistungsregime ist dann sofort möglich, mit Massnahmen am Stator auch eine Erhöhung der Wirkleistung, was im Zuge des Upgrading-Geschäfts der Turbinen immer wünschenswert ist.

5. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale

Ein Gewinn an Baugrösse (für eine gegebene Leistung) ist nur mit radikaler Aenderung im Stator möglich. Bei Ausschöpfung des vollen Potentials an erhöhtem magnetischen Fluss würde es bei normalem Stator zu Ueberhitzung der Statorblech-Zähne kommen. Die Zähne werden also weggelassen und sogenannte Luftspaltwicklungen werden eingeführt. Ein innovatives Element, welches vom Berichter dazu entwickelt wurde, ist der gepresste Litzen-Roebelstab (Fig. 8), welcher eine Exponierung der Statorwicklung im Luftspaltfeld ermöglicht. Die Einführung dieser gesamtoptimierten Maschine ist natürlich mit über den neuen Rotor hinausgehenden Risiken verbunden.

Ein wiedererwachendes Nukleargeschäft könnte ein Anreiz in ferner Zukunft sein (> 5 Jahre). Bei einer Einheitsleistung von 1800MW und einem grossen Wirkungsgradgewinn von 0.5% ergibt sich bei 0.04 Fr/kWh und 7000h Vollast / Jahr (Erfahrungswert) ein Bonus von 2.5 Mio Fr pro Jahr.

In jedem Fall ist das Einsparpotential von der Anzahl gefertigten Rotoren abhängig. Prototypen sind immer teurer, und spätere voll spezialisierte Rotoren-Fabriken bedürfen eines Mindestumsatzes zur Erzielung vernünftiger Herstellkosten.

6. Projekt-Realisierung, Alternativen

6.1 Projekt-Realisierung, Investitionen

Die Einstiegsinvestition und die Durchlaufzeit muss in der Grössenordnung des GE-Rotorprojekts angesetzt werden: 20Mio Euro - 4 Jahre. Dies unter der Bedingung, dass bezüglich Technologie nicht auf der grünen Wiese begonnen wird. Die nötige Technologie-Unterstützung durch einen kompetenten Partner könnte im Europäischen Raum gefunden werden. Vorteilhafterweise würde der Partner neben der Drahttechnologie auch Rotortechnologieerfahrung im Kleinen mit sich bringen.

Vorstellbar wäre als Alternative ein Technologierisiko-Splitting unter Generatorherstellern. Nur als Beispiel wäre es denkbar, dass ALSTOM als Partner für einen Stator mit Luftspaltwicklung eine Allianz mit einem Hersteller des HTSL-Rotors eingeht. Nach kompetenten Einschätzungen sind nämlich die Risiken bei beiden Komponenten durchaus vergleichbar.

Es ist wichtig, sich bewusst zu sein dass die Basis, auf die man sich bezieht, sich als „Moving Target“ verhält. Die Kenntnis über Lokalisierung und Richtung dieser Basis ist wichtig um die Erfolgchancen abzuklären. Dies gilt für Technologie und Markt (Produkte, Märkte: z.B. Nuclear Revival in China).

6.2 Alternativer Ansatz: verbesserte konventionelle Technik

Unter verbesserter konventioneller Technologie wird verstanden, zumindest grössenordnungsmässig die Forschungsgelder für eine fundamentale Weiterentwicklung der bestehenden konventionellen Generatortechnologie zu investieren. Zwischenzeitlich hat es hier noch nicht publizierte Fortschritte konventioneller Art gegeben, die die Betrachtung der HTSL-Technologie relativieren werden. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt im kalkulierbaren Zusatzrisiko. Dieser Weg scheint heute vom Markt ermöglicht und akzeptiert zu werden. Eine Vielzahl von gezielten Innovationen in Technologie, aber auch im Design, kann zu einer spürbaren Performance-Steigerung, insbesondere im Wirkungsgrad (erwartet zwischen 0.1 und 0.3%), führen. Detaillierte Ausarbeitungen müssen noch im Konzept zusammengestellt werden. Als Beispiel für eine Anwendung zur Verlustsenkung und Ausnutzungssteigerung auch in konventioneller Anwendung kann der Litzen-Roebelstab aus Fig. 8 stehen.

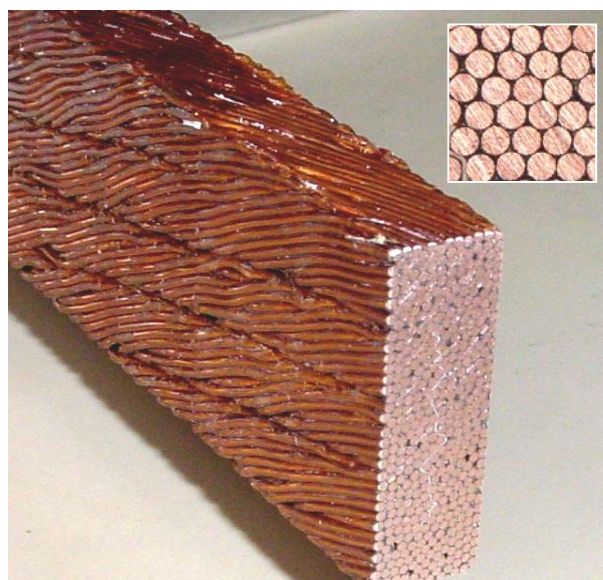


Fig. 8: Muster eines gepressten Litzen-Roebelstabs
Quelle: ALSTOM

7. Schlussfolgerungen, Ausblick

Laufende Entwicklungsprojekte mit schnellaufenden HTSL-Rotoren sind der 100MVA-Austauschrotor von General Electric und der rotierende 8MVAr-Phasenschieber von American Superconductor. Diese Projekte brauchen den kommerziell erhältlichen HTSL der ersten Generation vom Typ Bi-2223 in einer mechanisch verstärkten Spezialausführung. Möglicherweise wird für eine breite Markteinführung auf Leiter der zweiten Generation gewartet (verfügbar 2008...2011), welche mehr Auslegungsspielraum erlauben werden. Die Projekte müssen weiterhin beobachtet werden.

Die Diskussionen des Generatorherstellers mit Kunden und Drahtlieferanten zeigt keine eindeutigen Marktanreize eines HTSL-Rotors. Das erhöhte Betriebsrisiko überwiegt die Betriebskosteneinsparung durch kleinere Verluste. Die über die Normen hinausgehenden Vorteile (Leerlaufkurzschlussverhältnis, $\cos\phi$) werden z. Zt. vom Markt nicht honoriert. Das Leitermaterial ist noch zu teuer, doch wird für das Jahr 2010 mit einem Rückgang auf ca. $\frac{1}{4}$ des heutigen Preises gerechnet. Generatoren mit HTSL-Rotor, kombiniert mit einer Stator-Luftspaltwicklung erzielen zwar höhere Ausnützung, der dazu benötigte neuartige Stator birgt aber eigene, zusätzliche Risiken.

Bezüglich Markteinführung bei Grossgeneratoren scheint der Austauschrotor ein geeigneter Ansatz mit vertretbarem Risiko zu sein. Eine Partnerschaft mit Aufteilung Maschine-Leitermaterial oder eventuell Stator-Rotor ist fast unabdingbar. Verschiedene Elemente eines neuartigen Stators sind bei ALSTOM in Abklärung und können in eine solche Partnerschaft eingebracht werden.

Ein paralleler Ansatz „verbesserte konventionelle Generatoren“ könnte voraussichtlich Vorteile des HTSL-Generators schrumpfen lassen und würde ein spürbar kleineres Einführungsrisiko mit sich bringen. Es drängt sich deshalb auf, in einem Folgeprojekt das Potential einer HTSL-Lösung mit dem Potential einer verbesserten, konventionellen Maschine zu vergleichen. In dem Folgeprojekt könnte auch die zeitliche Einführung der Optionen vertieft werden, um Investitionen in Entwicklungsbemühungen optimal zu lenken.

8. Quellenverzeichnis

- [1] <http://www.amsuper.com/>
- [2] James Bray: **Generators YBCO Specification**
2003 DOE Wire Development Workshop, January 21-22, St. Petersburg, FL, USA, Session IV
<http://www.electricity.doe.gov/documents/4-bray-ge.pdf>
- [3] Kathleen Amm: **100MVA HTS Generator Development Update**
2005 DOE Wire Development Workshop, January 19-20, St. Petersburg, FL, USA, Session II
<http://www.energetics.com/wire05.html>
- [4] <http://www.cryomech.com/>
- [5] Ray Radebaugh: **Refrigeration for Superconductors**
Proc. IEEE, vol. 92, no. 10, October 2004, pp.1719-34
- [6] ORNL: **Program for High Temperature Superconducting Generator**
2004 DOE Annual Peer Review, July 27-29, Washington, DC, USA
<http://www.energetics.com/supercon04.html>
- [7] Joe Waynert et al: **Design and Development of a 100MVA HTS Generator**
2004 DOE Annual Peer Review, July 27-29, Washington, DC, USA
<http://www.energetics.com/supercon04.html>

-
- [8] D.R. James, I. Sauers: **Electrical Insulation Materials for Superconducting Coil Applications**
Session on Advances in Superconducting Machinery, 8 June 2004
2004 IEEE-PES General Meeting, Denver, CO, USA
- [9] C.M. Rey, M.J. Gouge: **Electrical Insulation for Superconducting Applications**
2005 DOE Wire Development Workshop, January 19-20, St. Petersburg, FL, USA, Session IV
<http://www.energetics.com/wire05.html>
- [10] James Fogarty: **Development of a 100MVA High Temperature Superconducting Generator**
Session on Advances in Superconducting Machinery, 8 June 2004
2004 IEEE-PES General Meeting, Denver, CO, USA
- [11] James Bray: **Design and Development of a 100MVA Generator for Commercial Entry**
2003 DOE Annual Peer Review, July 24, Washington, DC, USA
<http://www.energetics.com/supercon03.html>
- [12] James Fogarty: **Design and Development of a 100MVA Generator for Commercial entry**
2004 DOE Annual Peer Review, July 27-29, Washington, DC, USA
<http://www.energetics.com/supercon04.html>
- [13] D.T. Bradshaw: **"Super" Reactive Power for the Power System through SuperVAR™ High temperature Superconductor Dynamic Synchronous Condensers**
Session on Advances in Superconducting Machinery, 8 June 2004
2004 IEEE-PES General Meeting, Denver, CO, USA
- [14] Superconductivity Web21, July 15, 2004 (Summer 2004-Extra)
<http://www.istec.or.jp/index-E.html>