

Jahresbericht 2005, 2. Dezember 2005

Projekt

Elektrische Maschinen, insbesondere Generatoren: Supraleiter-Technologie im Wettbewerb mit verbesserter konventioneller Technologie

Autor und Koautoren	Reinhard Joho
beauftragte Institution	ALSTOM (Schweiz) AG
Adresse	Zentralstrasse 40, CH-5242 Birr
Telefon, E-mail, Internetadresse	056 466 6284, reinhard.joho@power.alstom.com , http://www.ch.alstom.com/
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100'649 / 151'576
Dauer des Projekts	Juni 2005 – Juni 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Das BFE-Projekt wurde erfolgreich mit einem Paper auf dem CIGRE-EPFL Kolloquium vom 7. September 2005 in Lausanne einem Publikum von internationalen Experten für grosse elektrische Maschinen vorgestellt. Von der internationalen Entwicklungsfront liegen zum einen ermutigende Signale vor (American Superconductor's SuperVar im Netzbetrieb und Tests an schnelllaufendem Kleingenerator von Siemens), zum anderen sind im wichtigen Referenzprojekt (General Electric 100MVA-Generator mit Austauschrotor) Technologieprobleme und damit einhergehend grosse Terminverzögerungen ersichtlich. Bezuglich Drahttechnologie sieht es zunehmend so aus, als würde auf den, auf Maschinenspezifikation besser passenden, Hochtemperaturspraleiter der zweiten Generation abgestellt.

Diese Studie, als Fortsetzung und Vertiefung im BFE-Projekt 100'649, wurde im Juni 2005 auf breiter Basis aufgenommen. Es wurden die möglichen Ertüchtigungsmassnahmen für einen konventionellen Generator aufgelistet, und anschliessend auf Gewinn (im wesentlichen für den Wirkungsgrad), auf den Entwicklungsaufwand und auf das Risiko hin untersucht. Unter diesen Massnahmen sind auch einige recht unkonventionelle, die natürlich dann dem konventionellen Generator ein gewisses Risiko aufzubürden. Zur Vervollständigung wurde auch die Anwendbarkeit auf den SL-Generator bewertet, auch wenn dies mit einer, kaum erwünschten, Risiko-Kumulation verbunden ist. Der Befund für die Ertüchtigung der konventionellen Generatortechnologie stimmt zuversichtlich und lässt eine Performancesteigerung bei deutlich geringerem Einführungsrisiko erkennen.

Mit dieser spannenden Ausgangslage ist die Basis für eine quantitative Evaluation im 2006 an noch zu bestimmenden Leistungsrepräsentanten gelegt. Aufgrund der Resultate werden dann konkrete Projektvorschläge erarbeitet.

Projektziele

Diese Studie ist eine Fortsetzung und Vertiefung im BFE-Projekt No. 100'649. Sie hat zum Ziel, einen Vergleich durchzuführen zwischen einem supraleitenden Generator und einem verbesserten konventionellen Generator. Als wichtiger Punkt soll dabei der Entwicklung des verbesserten konventionellen Generators ein Entwicklungsbudget zumindest in der Größenordnung des SL-Generators zugestanden werden. Am Ende der Studie soll ein Vergleich und Projektvorschläge für beide Vorgehensweisen vorliegen. Der Vergleich beleuchtet die Kriterien: technische Gewinne (Wirkungsgrad, Netzstabilität), Risiken (Entwicklung, Einführung, Betrieb), und das Marktpotential. Die Studie gliedert sich in drei parallel laufende Aktionen mit folgenden Zielen für das Berichtsjahr 2005:

Aktion 1

Verfolgung des internationalen Standes, Kommunikation des eigenen Standpunktes, Kontakte mit Partnern und internationalen Gremien. Ziel 2005: Am Ball bleiben, Kontakte weiterpflegen, wo nötig neue Kontakte aufbauen.

Aktion 2

Technologiekonzept eines eigenen Generators mit HTSL-Errregerwicklung, Spin-Offs von Ideen aus Aktion 3 mitbewerten, Projektvorschlag. Ziel 2005: Technologiekonzept mit den bewerteten Spin-Offs.

Aktion 3

Entwicklungspotential konventionelle Technik, Ideenkatalog, Bewertung (Aufwand, Gewinn wo/wie gross?, Risiko). Projektvorschlag. Ziel 2005: Technologiekonzept mit bewerteten Ideen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Aktion 1

aus der Beobachtung weltweit laufender Projekte

Von **General Electric** wurde an der DOE Peer Review vom August 2005 erstaunlich offen über die gegenwärtigen Probleme der Technologie-Beherrschung im 100MVA-Projekt gesprochen [1]. Das Projekt wird vermutlich mindestens zwei Jahre in Verzug geraten. Dies bedeutet Prototyp-Tests in 2008 statt 2006. Aus der Präsentation kann entnommen werden, dass GE sich bei diesem Zeitrahmen einen Technologiewechsel auf 2nd Generation HTSL überlegt, welcher gegenwärtig unlösbare Probleme, wie z.B. Preis (Fig. 1) und Einfluss des mechanischen Stresses auf die kritische Stromdichte, reduzieren wird. Ebenfalls geht aus der Präsentation hervor, dass selbst einem Grosskonzern wie der GE die Abhängigkeit von Partnern (mit z.T. anderen Prioritäten) zusetzt (Fig. 2).

Man muss anerkennen, wie offen unter der Leitung von DOE über die Projekte berichtet wird. Vom DOE ist bekannt, dass es sich offen mit Überlegungen zur Lenkbarkeit und Verantwortungspflicht solch grosser Projekte beschäftigt.

**Until costs are
firmly below
\$25/kA-m, an HTS
generator remains
a difficult sell...**

Fig. 1: Zitat aus GE [1] zum Leiterpreis

**GE has no direct
control...**
**We will state our
needs...**

Fig. 2: Zitat aus GE [1] zu den Partnern

Von **Siemens** wurde im Berichtszeitraum einiges über ihr BMFE gesponsortes 4MVA HTSL-Generator Projekt kommuniziert. Wenn auch die Leistung am unteren Ende der beobachteten Leistungsklasse liegt, so zeichnet es sich doch durch einige sehr interessante Features aus: volltouriger Generator – 3600UpM, und Stator-Luftspaltentwicklung als Litzenwicklung. Lieferant der Leiter ist EAS, vormals Vakuumschmelze [2]. Ein Generator-Prototyp ist im 2005 im Werk Nürnberg Laufversuchen unterworfen worden (Fig. 3). Es wird versucht, im Laufe dieser Studie ein vervollständigtes Bild des Generators, insbesondere des Rotordesigns zu erhalten.



Fig. 3: 4MVA-Generator im Test (Siemens)

Aktion 2

Primär wird für ein eigenes Supraleitungsprojekt das im ersten Schlussbericht dargelegte Konzept zum Tragen kommen. Aus primär Gründen von Ressourcen und Marktrisiko wird auf die Entwicklung eines HTSL-Rotors zum Einbau in einen konventionellen Stator abgestellt (Austauschrotor). Für den HTSL-Rotor selbst sind im Berichtsraum keine Untersuchungen gemacht worden. Hingegen erscheint es fair, wenn die Ideen zum verbesserten konventionellen Generator auch auf Anwendung für den supraleitenden Generator geprüft werden. Es wird auf die gemeinsame Bewertungstabelle in Aktion 3 verwiesen.

Aktion 3

Es wurden in diesem Berichtsraum primär alle Möglichkeiten aufgelistet, welche dazu dienen, die Performance eines konventionellen Generators zu verbessern. Aus Gründen, die bereits in der letzten Studie erwähnt sind, wird hier auf den Wirkungsgrad abgestellt, andere anscheinende Vorteile der Supraleitungstechnik, wie das grösere Leerlaufkurzschlussverhältnis, werden, wegen nicht bezifferbarem Vorteil, nicht einbezogen. Jede Möglichkeit wurde daraufhin auf Realisierungschance und Potential geprüft. Bezüglich Potential wurde auch der Einsatz in einer supraleitenden Maschine aufgenommen. Tabellen 1 bis 3 geben das ermittelte Potential wieder. Die Möglichkeit zur Kumulierung besteht weitestgehend, dies ist aber nicht immer ganz „rückwirkungsfrei“.

Verfolgungswerte Idee

Tabelle 1: Wirkungsgradsteigerung durch **Kühlkonzept**

Massnahme	Im konventionellen Generator			Im supraleitenden Generator		
	Gewinn	Aufwand	Risiko	Gewinn	Aufwand	Risiko
Absenkung Kühlmitteltemperatur z.B. vollständige Flüssigkeitskühlung bei -100°C mit synthetischen Oelen	++	-	0	na	na	na
Effizientere Kühlung z.B. Verdampfungskühlung	+	-	-	+ 1)	-	-
Senkung Reibungsverluste z.B. Druckabsenkung im Rotorraum, Glättung Oberflächen	+	-	0	+	0	+

1) Stator und Rotoroberfläche

Tabelle 2: Wirkungsgradsteigerung durch **elektrische Auslegung**

Massnahme	Im konventionellen Generator			Im supraleitenden Generator		
	Gewinn	Aufwand	Risiko	Gewinn	Aufwand	Risiko
Senkung Eisenverluste						
-Höhere Blechqualität	+	0	++	+	0	++
Senkung Zusatzverluste						
-Verfeinerter Roebelstab	++ 2)	-	0	++ 1)	-	-
-Magnetische Schilder Endpartie	+	-	-	+ 2)	-	-
Senkung Erregerverluste						
-Permanentmagnet-Erregung voll	++3)	--	-			
-PM-Erregung, unterstützend	+	-	0			

1) Als konventionelle Wicklung betrachtet (als Luftspaltwicklung eine Bedingung mit mehr Gewinn, aber mehr Risiko)

2) Für erhöhte Ausnutzung eine Bedingung

3) Gewinn wie SL, aber Blindleistungsvariator nötig

Tabelle 3: Wirkungsgradsteigerung durch **mechanische Auslegung**

Massnahme	Im konventionellen Generator			Im supraleitenden Generator		
	Gewinn	Aufwand	Risiko	Gewinn	Aufwand	Risiko
Senkung Lagerverluste						
-durch konstrukt. Massnahmen	0	0	-			
-durch Fluidwechsel	+	-	-			
-Systemwechsel (Magnetlager)	++	--	--	++	--	--

Die Highlights der Massnahmen

Kühlung: Das graduelle Absenken der Kühlmittelt-temperatur bei Generato- ren, welche in Rotorwick- lung und Statorwick- lung direkt flüssigkeitsgekühlt sind, hat etwas be- stehendes an sich und wurde zum ersten Mal in [3] erwähnt. Es kann auf die vorhandenen im Be- trieb erprobten Generatorkonzepte abgestellt werden (Fig. 4, Fig. 5). Die vorhandenen Kühlkreise sind alle mit rostfreien Stahlrohren gefasst. Statt wie üblich deionisiertes Wasser wird nun eine synthetisch Flüs- sigkeit (z.B. Silikonöl) bei z.B. -100°C durch diese Kühlkreise geschickt, die Wicklung im Betrieb liegt also ca. 200K tiefer als im konventionellen Betrieb. Im Unterschied zur Maschine mit supraleitendem Rotor kann der Benefit auch auf die Statorwicklung angewendet werden. Die inhärent vorhandenen elektrischen Isolationen wirken diesmal erwünscht als thermische Isolation und erlauben, dass Rotoreisen und Stator-Blechkörper im wesentlichen auf Normal-temperaturen bleiben. Der Gewinn im elektrischen

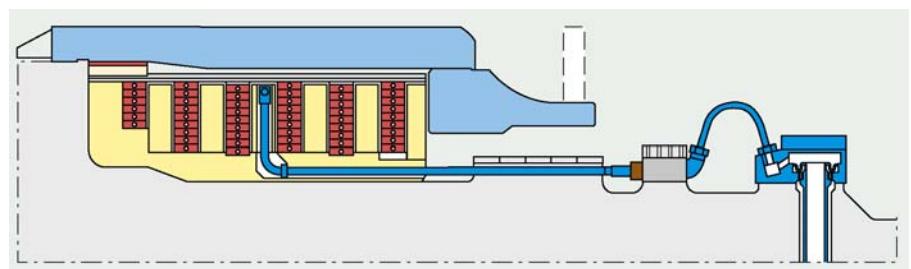


Fig. 4: Wassergekühlte Rotorwicklung (ALSTOM)

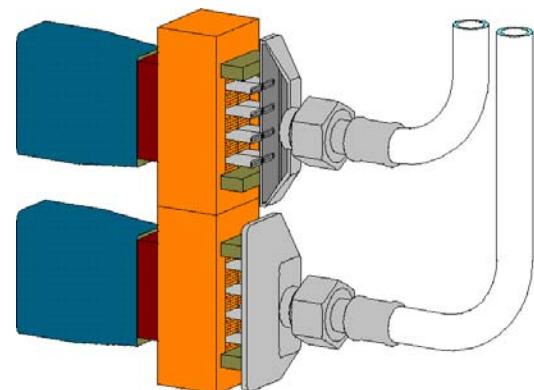


Fig. 5: Wassergekühlte Statorwicklung (ALSTOM)

Widerstand wird verstärkt durch den geknickten Temperaturverlauf des elektrischen Widerstandes vom Leiterkupfer (Fig. 6). Zu überprüfen sind natürlich, wie beim positiven Temperaturexkurs, alle Fragen der Differenzdehnungen, evtl. auch der Brüchigkeit von Materialien. Kälteaggregate sind kommerziell erhältlich. Um 1MW Verlustleistung aus der Wicklung von -50°C auf -100°C zu bringen sind ca. 300kW elektrische Anschlussleistung nötig. Viel eleganter, aber aufwändiger, kann die Aufgabe mit einer Absorptions-Kälteanlage unter Verwendung von Abwärme aus dem Turbinenbereich gelöst werden. Fragen der Verfügbarkeit und eventueller Redundanz müssen noch untersucht werden. Generell kann gesagt werden, dass ein solcher Generator eigensicher arbeitet, das heisst, dass selbst bei Ausfall des Kälteaggregats auf das immer vorhandene Sekundärkühlwasser von ca. 30°C abgestellt werden kann; der Generator kann also mit einem gewissen Derating weiterarbeiten.

Als Beispiel kann hier auch die Vernetzung mit anderen Massnahmen aufgeführt werden. Die Zusatzverluste in der Statorwicklung steigen bei tiefer Temperatur (und damit besserer Leitfähigkeit). Dies ist natürlich kontraproduktiv. Die Tieftemperatur-Statorwicklung muss deshalb mit einem feineren Teilleitersystem als heute, z.B. nach Art des Litzenstabes (Fig. 7) ausgeführt werden.

Elektrische Bauteile: Die Verwendung eines Kunststabes, in der Ausgestaltung eines gepressten Litzen-Roebelstabes (Fig. 7) führt zu einer deutlichen Senkung der Zusatzverluste in der Statorwicklung, bei einem geringfügigen Anstieg der ohmschen Verluste, wegen des etwas geringeren Netto-Kupferquerschnitts. Ferner bringt ein Litzen-Roebelstab eine neue Freiheit bezüglich Auslegungsregeln, z.B. lässt sich der Litzenstab nahe der Bohrung platzieren. Damit lassen sich bessere Kupferfüllungen erzielen (noch höherer Wirkungsgrad oder höhere Leistungsausnutzung). Ferner ermöglicht der Litzenstab eine Anwendung in Luftspralwicklungen wie sie in grossen Supraleitenden Generatoren in einer nächsten Reihe zur Anwendung kommen könnten. Im übrigen ist der Litzenstab eine sinnvolle Ausgestaltung in einer tiefgekühlten Wicklung (siehe Kühlung).

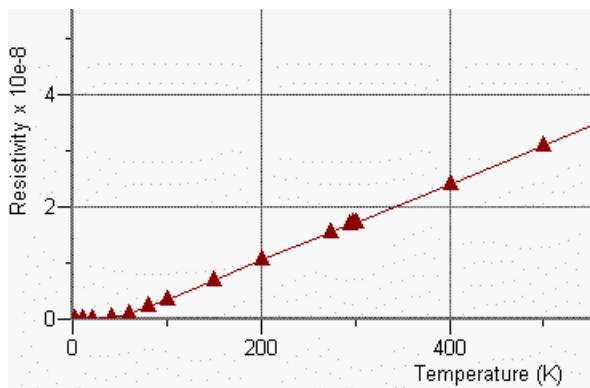


Fig. 6: Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Kupfer

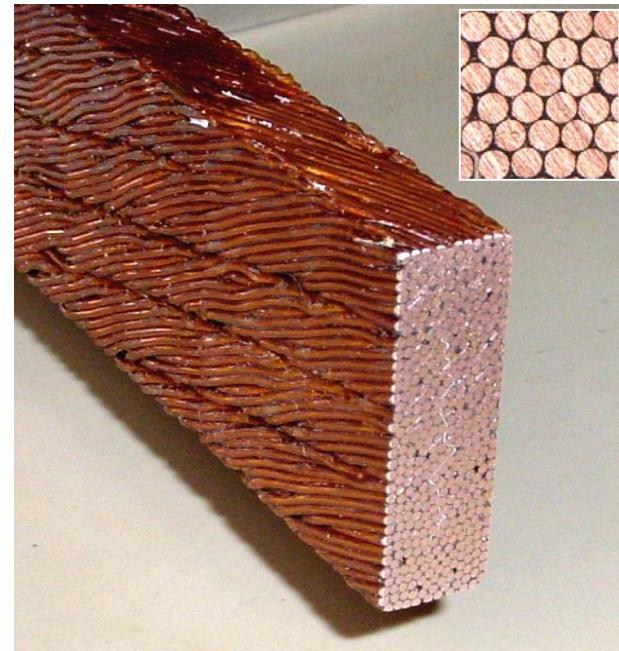


Fig. 7: Litzen-Roebelstab für indirekte Stabkühlung (ALSTOM)

Die Ausführung des Rotors mit Permanentmagnet, oder zumindest zur Unterstützung der konventionellen Erregerwicklung (Fig. 8) ist eine interessante Alternative zum supraleitenden Rotor. Mit einer Unterstützung würde die Regelbarkeit via die Feldwicklung erhalten bleiben, und im Nennlastfall die Verluste in der Erregerwicklung in etwa halbiert (Fig. 9). Von der Technologiefront der Raren-Erde Permanentmagnete wird laufend über Neuerungen berichtet. Leider sind die leistungsfähigen NdFeB-Magnete brüchig und korrosionsanfällig, und diejenigen mit dem grössten

Energieinhalt sind am meisten temperaturmässig begrenzt (auch eine Art Quench). Es wird also bezüglich Platzierung und Kühlung im Rotor, und auch bezüglich Montage (grosse magnetische Kräfte) einiges an Entwicklungsarbeit zu leisten sein.

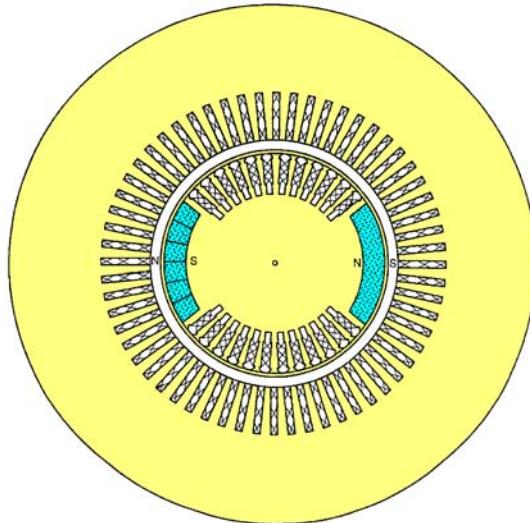


Fig. 8: Unterstützende Permanentmagnete (blau) in Rotor-Polzonen des Turbogenerators (US-PS 6'509'664)

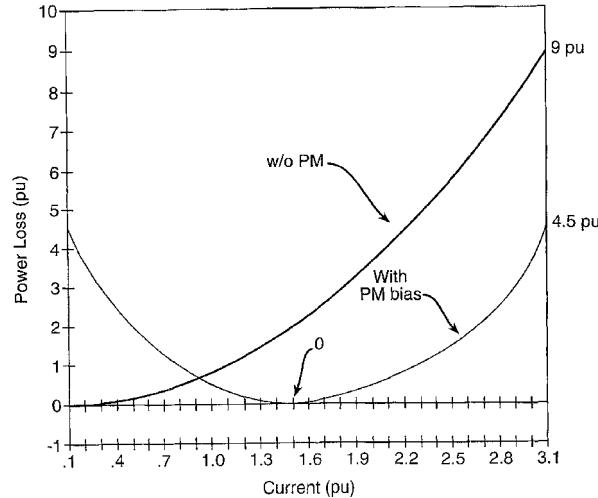


Fig. 9: Betriebsweise einer Erregerwicklung mit Unterstützung durch Permanentmagnete

Nationale Zusammenarbeit

Durch Teilnahme am Status-Seminar “Energietechnische Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung” vom 23. November 2005 in Bern wurde das Projekt im nationalen Rahmen vertreten.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationalen Kontakte waren im Berichtszeitraum sehr rege, und nahmen damit einen beträchtlichen Teil der Arbeit in Anspruch.

Das CIGRE-EPFL Kolloquium vom 7. September in Lausanne. Eingebettet in das Meeting der CIGRE Gruppe A1 „Grosse elektrische Maschinen“, welches dieses Jahr in der Schweiz stattfand, wurde durch Prof. Jean-Jacques Simond von der EPFL in Zusammenarbeit mit dem Berichter ein eintägiges Kolloquium über aktuelle Themen grosser elektrischer Maschinen durchgeführt (Fig. 10). Im Themenkreis „New Designs“ wurden zwei Beiträge zur Anwendung von Supraleitung gebracht.



Fig. 10: CIGRE-EPFL Kolloquium mit Beteiligung internationaler Experten aus dem Generatorenbereich

Das **Paper von American Superconductor** befasste sich mit der ersten realen Betriebserfahrung des rotierenden 8MVAr-Blindleistungs-kompensators „SuperVar“ [4] (in der ersten BFE-Studie beschrieben). Das Paper wurde vom Leiter der Maschinenentwicklung bei AMSC, Swarn Kalsi vorgetragen. Der Bericht beschreibt das Betriebsverhalten der ersten supraleitenden Maschine im Netz. Dies ist vergleichbar mit Generatoren, und deshalb von Wichtigkeit für die vorliegende Studie. Der Kompensator wird direkt neben einem Lichtbogenofen im Netz der TVA betrieben. Im Einbrennvorgang eines Lichtbogenofens treten stochastisch grosse Blindleistungssprünge und Inverskomponenten auf, welche vom SuperVar im nun $\frac{1}{2}$ -jährigen Betrieb bestens bewältigt wurde, womit zu einer bedeutenden Flicker-Reduktion im Netz verholfen werden konnte. TVA hat weitere 5 Einheiten bestellt. Weitere Anwendungen, wie das Stützen von Windfarm-Netzen beim Fortschalten von Leitungskurzschlüssen, wurden erwähnt.

Das **Paper von Alstom** präsentierte die Resultate der schweizerischen Studie über einen supraleitenden Generator [5]. Die Unterstützung von BFE wurde ausdrücklich erwähnt. Die zahlreichen Einflussfaktoren, mit denen sich ein neuer Akteur im internationalen Umfeld befassen muss, wurden dargelegt. Die Variante der Vertiefung in verbesserte konventionelle Generatortechnologie wurde anhand einer ausgewählten Komponente (Litzen-Roebelstab) erklärt. In der Diskussion wurde auf die Komplexität der Anwendung von HTSL in Maschinen hingewiesen, aber auch auf die nicht zu unterschätzende Komplexität von neuen Technologien im konventionellen Bereich.

Im Rahmen der **CIGRE Gruppe A1** ist eine permanente Verfolgung der laufenden Projekte von supraleitenden Grossmaschinen in Arbeit. Am CIGRE Meeting der Gruppe A1 in Lausanne wurde durch S. Kalsi von AMSC eine Uebersicht gegeben. Durch die Mitgliedschaft des Berichters kann auch diese Information in die Studie einbezogen werden.

Im Rahmen der gegenwärtigen **Revision der Norm IEEE115 „Test Procedures of Electrical Machines“** wird zum ersten Mal versucht, supraleitende Maschinen einzubeziehen. Die Aktion wird nicht einfach sein, da auf die subjektive Information weniger engagierter Akteure abgestellt werden muss, und tunlichst vermieden werden muss, via Normen Monopolstellungen aufzubauen. Der Berichter ist Mitglied in dieser Arbeitsgruppe (Leiter: H. Karmaker, GE Canada).

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Erfolge 2005:

- Vorstellung des BFE Projekts mittels Paper am CIGRE-EPFL Kolloquium
- Die Ideen zum verbesserten konventionellen Generator sind bewertet und bereit zur quantitativen Erfassung.
- Der aktuelle Stand der internationalen „Referenz“-Projekte ist ziemlich gut bekannt

Rückstände 2005:

- Eigenes Supraleitungskonzept zuwenig fortgeschritten (Design, genauer Wirkungsgradgewinn mit Austauschrotor für verschiedene Generatorgrössen und Frequenzen). Beabsichtigt: Referenztyp 300MVA Luftkühlung und 1600MVA H₂-H₂O.
- Infolge rascher Entwicklung: Update über HTSL der zweiten Generation (Roadmap, Preise, Daten) von Lieferanten verlangen

Ausblick 2006:

- Festlegen Referenztypen, Quantifizieren der Vor- und Nachteile HTSL und konvent.-verbessert
- Projektvorschläge ausarbeiten

Innovationen:

Solche werden nicht in Grundsätzen erwartet, sondern mehr aus neuartigen Detail-Konzepten und Betriebsweisen.

Referenzen

- [1] J. Fogarty: ***Design and Development of a 100MVA Generator for Commercial Entry***, 2005 DOE Annual Peer Review, August 2-4, Washington, DC, USA, <http://www.energetics.com/supercon05.html>
- [2] ***EAS Delivers SC Technology for the Worlds First HTS Generator for Marine Markets***, EAS Press Release 16 August 2005, <http://www.advancedsupercon.com/news>
- [3] J. Grünenwald, H. Pohl, R. Joho: ***Rotor Water Cooling in Turbogenerators Leads the Way to a New Design Concept***, CIGRE Session Paris 1980, Paper 11-07
- [4] S. Kalsi: ***Results of On-Grid Operation of Superconductor Dynamic Synchronous Condenser***, CIGRE-EPFL Colloquium on Large Electrical Machines, 7 November Lausanne, Switzerland, <http://lme.epfl.ch/>
- [5] R. Joho: ***Highlights of a Superconducting Generator Study***, CIGRE-EPFL Colloquium on Large Electrical Machines, 7 November Lausanne, Switzerland, <http://lme.epfl.ch/>