Erste Hochspannungsgenerator am Netz : moderne Kabeltechnik erlaubt die Erzeugung von Spannungen bis 400 kV

Autor(en): **Leijon, Mats**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 21

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902126

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Mit heutigen Generatoren können Spannungen von maximal 30 kV erreicht werden. Ursache dieser Einschränkung sind elektrische Felder, die bei noch höheren Spannungen die Isolation der Statorwicklungen zerstören würden. ABB hat einen neuen Generator entwickelt, der dank der Verwendung hochspannungsfester Kabel für die Statorwicklung Spannungen von bis zu 45 kV erzeugen kann. Da derartige Kabel bis 400 kV verfügbar sind, könnte in Zukunft auf den Einsatz von Transformatoren zwischen Generator und Hochspannungsnetz verzichtet werden. Gegenüber herkömmlichen Generatoren erreicht der «Powerformer» einen um bis zu 1,5% besseren Wirkungsgrad.

Erster Hochspannungsgenerator am Netz

Moderne Kabeltechnik erlaubt die Erzeugung von Spannungen bis 400 kV

■ Mats Leijon

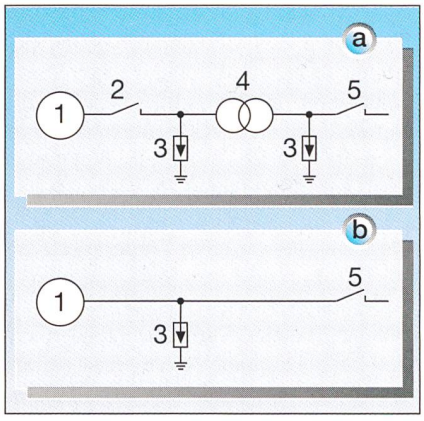

Bild 1 Schema eines konventionellen Kraftwerks mit Aufwärtstransformator (a) und gleiche Anlage bei Verwendung der neuen Technik (b)

1 Generator, 2 Generatorschalter, 3 Überspannungsableiter, 4 Aufwärtstransformator, 5 Hauptleistungsschalter

Mit Generatoren konventioneller Bauart liessen sich bisher Nennspannungen von höchstens 30 kV erzeugen. Zur Energieeinspeisung in das Hochspannungsnetz (Bild 1) war daher ein Aufwärtstransformator zur Spannungsanpassung erforderlich. Beim neu entwickelten Generator «Powerformer» sind dank Kabeln mit einer festen Isolation zwischen zwei halbleitenden Schichten deutlich höhere Spannungen möglich. Der erste Generator dieser Bauart ist im schwedischen Wasserkraftwerk Porjus in Betrieb und erreicht eine Nennspannung von 45 kV.[1]

Im Laufe dieses Jahrhunderts wurden schon mehrere Versuche unternommen, Hochspannungsgeneratoren zu entwickeln, die ohne Aufwärtstransformator direkt in das Hochspannungsnetz einspeisen können [1]. Das Konzept, das der hier beschriebenen Neukonstruktion zugrunde liegt, wurde ernsthaft ab 1991 in Erwägung gezogen. Die Herausforderung war, einen Generator zu konstruieren, der im Hochspannungsbereich arbeitet und zugleich in allen seinen Komponenten eine gleichmässige Materialbeanspruchung aufweist.

Am Anfang stand die grundsätzliche Frage, was an herkömmlichen Generatoren eigentlich zwingend ist. Aus diesem

Leicht überarbeitete Version eines Beitrags aus der Zeitschrift ABB Technik 2/98.

Adresse des Autors
Dr. *Mats Leijon*, ABB Corporate Research
S-72178 Västerås

[1] Der in diesem Beitrag verwendete Begriff «halbleitend» bezeichnet einen Werkstoff mit relativ hohem elektrischem Widerstand; in diesem Falle mit Kohlenstoff dotiertes VPE.

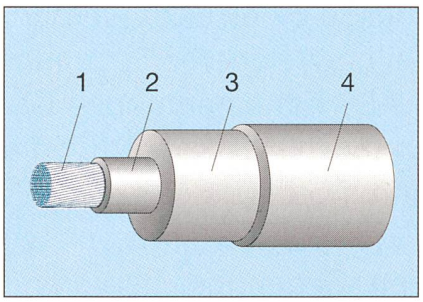

Bild 2 Starkstromkabel, das in der Statorwicklung des Powerformers verwendet wird

1 Einzelleiter des Kabels, 2 Leitschicht, 3 Feststoffisolierung, 4 Leitschicht

einfachen Ansatz ergab sich als Antwort eine grundlegend neue Konstruktionsweise, deren Eigenschaften und Folgen weitreichende Bedeutung für Wasser- und Wärmekraftwerke sowie andere elektrische Anlagen haben.

Eine Feststoffisolierung, eine neuartige Statorkonstruktion, basierend auf Nuten mit zylindrischen Bohrungen, sowie eine besondere Anordnung der Wicklung sind die Kernelemente des neuen Konzepts [2, 3].

Ein neues Energiesystem

Neugestaltetes Kabel

Ein wichtiges Merkmal des neuen Generators ist eine Wicklung aus Starkstromkabeln mit Feststoffisolierung, die beidseitig mit einer Halbleiterschicht versehen ist. Die äussere Leitschicht liegt dabei auf Erdpotential. Moderne Kabel wie zum Beispiel VPE/XLPE haben Leitschichten, welche diese Forderung erfüllen (Bild 2).

Der magnetische Kreis des Powerformers stellt hohe Anforderungen an die Wicklung. Der Innenleiter eines serienmässigen Starkstromkabels ist aus nichtisolierten Einzelleitern aufgebaut. Um Wirbelstromverluste zu verringern, enthält der neue Kabelleiter neben den nichtisolierten auch isolierte Teilleiter. Ähnlich wie bei den handelsüblichen Kabeln folgt darauf ein Mantel aus halbleitendem Material, die Feststoffisolierung und die äussere Leitschicht. Im Unterschied zu herkömmlichen Kabeln entfallen aber dann die Armierung und der zusätzliche Mantel. Die Wicklungskabel lassen sich daher leicht biegen, was ihre Handhabung und Montage erheblich vereinfacht.

Der runde Leiterquerschnitt erzeugt nach Maxwell ein elektrisches Feld mit der gleichmässigsten Verteilung. Damit ist die elektrische Beanspruchung der Isolation auf ein Minimum beschränkt. Zudem erlauben solche Kabel, den geblechten Schichtkern mit einer optimalen Zahn-Nut-Anordnung zu gestalten.

Stufenisolierung

Da das Potential entlang einer Wicklung mit jeder Windung steigt, erhöht sich die Beanspruchung der Kabelisolierung entsprechend. Daher ist es sinnvoll, für die ersten Windungen eine dünnere Isolierung und dann für die nachfolgenden eine immer stärkere zu verwenden – eine Anordnung, die Stufenisolierung genannt wird. Auf diese Weise lässt sich die Ausnutzung des Schichtkernvolumens optimieren (Bild 3).

Die Hochspannungskabel der Statorwicklung werden durch die runden Bohrungen der radial angeordneten Nuten geschlauft. Dieses Konstruktionskonzept vermeidet die üblichen Schwierigkeiten, die sich als Folge von Annahmen über den magnetischen Fluss einstellen – es sind keine Kompromisse notwendig. Die bei der Konstruktion verwendeten zylindrischen Formen gestatten exakte und nicht nur angenäherte Lösungen der Maxwellschen Gleichungen.

Für die Powerformer-Konstruktion gilt generell, dass das Kabel entweder im Werk oder am Montageort durch die Nuten geschlauft wird. Der Spannungspegel des Wicklungssegmentes ist massgebend dafür, welche Verbindungsart verwendet wird, um die verschiedenen Kabelabschnitte untereinander sowie den Generator mit dem Netz zu verbinden. Es können vorgefertigte, vulkanisierte und umwickelte Verbindungen zum Einsatz kommen.

Der neue Stator

Die Konstruktion der Nuten und Zähne im Magnetkreis spielt bei der Optimierung einer rotierenden elektrischen Maschine eine entscheidende Rolle. Die Nuten sollten die Spule möglichst eng umschliessen, gleichzeitig sollten die Zähne auf jeder radialen Ebene so breit wie möglich sein. Dadurch verringern sich die Verluste in der Maschine und desgleichen der Erregungsbedarf.

Der Stator des Powerformers weist einen aus Elektroblechen aufgebauten Schichtkern auf. Er kann sowohl für hori-

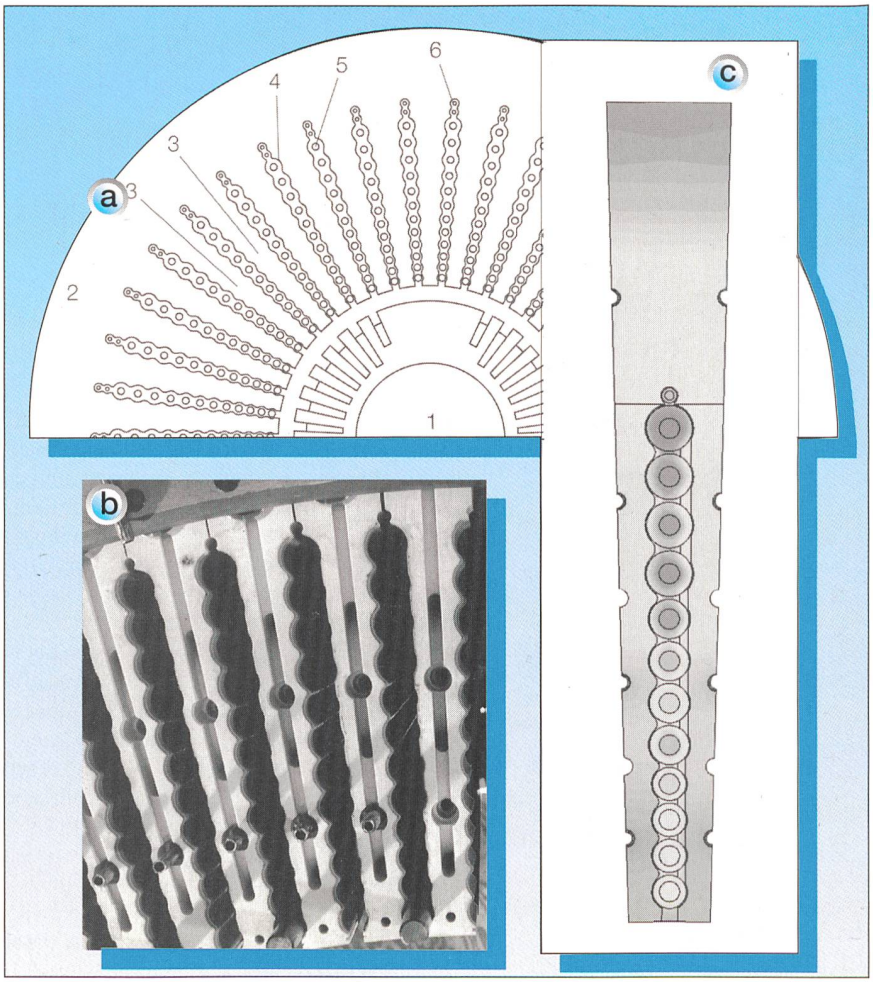

Bild 3 Schnitt durch den Stator eines Powerformers (a), Detail des Stators ohne Kabel (b) und berechnete Temperaturverteilung um die Statornut herum (c), dunkle Töne entsprechen hohen Temperaturen

1 Rotor, 2 Schnitt durch den Stator, 3 Zähne, 4 Nuten, 5 Hauptwicklungskabel, 6 Kabel für Ersatzleistung

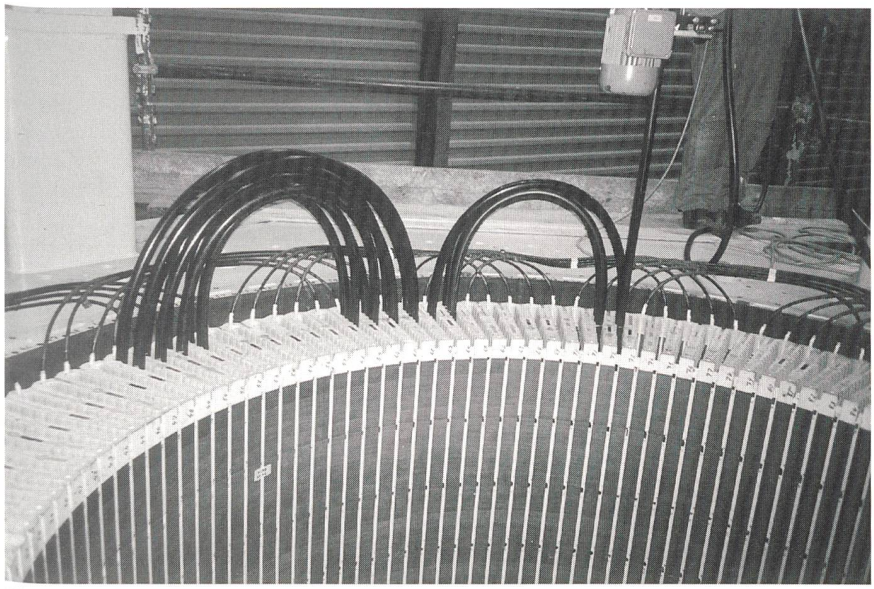

Bild 4 Stator für das Wasserkraftwerk Porjus – hier wird das Kabel durch die Bohrungen geschlauft.

zontale als auch vertikale Maschinen gebaut werden. Die Wicklung liegt in den von den Zähnen gebildeten Nuten. Die Zähne im äusseren Abschnitt zeigen nach innen zum Rotor hin (Bild 3a und 3b).

Die Ausführung der Statornuten richtet sich nach dem Querschnitt des Wicklungskabels. Die Nuten bestehen aus radial angeordneten zylindrischen Bohrungen, die axial durch den Stator verlaufen und durch enge Teilnuten miteinander verbunden sind (Bild 3c).

Unter Ausnutzung der Stufenisolierung verringert sich der Querschnitt der Nuten zum Rotor hin. Jede Nut weist in Abständen runde Bohrungen auf, die zwischen den Wicklungslagen enge Einschnürungen bilden. Die dabei entstehende Form erinnert an eine Fahrradkette.

Bei der grossen Anzahl von Wicklungslagen stellt sich die Frage der Kabelabmessungen. Im gezeigten Beispiel werden drei verschiedene Kabelgrössen eingesetzt. Die Statorzähne können so gestaltet werden, dass die radiale Breite der Nut auf ihrer gesamten Länge weitgehend konstant ist. Dadurch wird die Beanspruchung des Statorzahns ausgeglichen.

Vorteile der neuen Konstruktion

Die beschriebenen Merkmale des Powerformers bieten mehrere Vorteile:

- Die Stufenisolierung stellt ungeachtet der radialen Ausladung eine praktisch konstante Zahnbreite sicher.
- Der gesamte Aussenmantel des Kabels kann auf Erdpotential gelegt werden.
- Das elektrische Feld ausserhalb der äusseren Leitschicht liegt im Wickelkopfbereich bei annähernd Null. Da der Aussenmantel auf Erdpotential liegt, ist eine Steuerung des elektrischen Feldes nicht notwendig (bei herkömmlicher Technik muss das Feld an mehreren Stellen pro Windung gesteuert werden). Dadurch werden Feldkonzentrationen im Kern, in den Wickelkopfbereichen und im Übergang zwischen diesen vermieden.
- Die Herstellung der Wicklung ist einfach; das Starkstromkabel wird durch die zylindrischen Nuten im Statorblechpaket geschlauft (Bild 4).

Vorteile für den Konstrukteur

Bei diesem neuen System können verschiedene Aspekte der Konstruktion, beispielsweise die thermische und elektrische Auslegung, unabhängig voneinander behandelt werden. Dadurch erhält der Konstrukteur wesentlich mehr Spielraum bei der Optimierung der Maschine. Die unabhängige Behandlung wird einerseits durch die runden Leiter möglich, die eine gleichmässige Feldverteilung und somit eine minimale Beanspruchung des Isoliermaterials sicherstellen, und andererseits durch die Leitschichten auf jeder Seite der Feststoffisolierung, die das elektrische Feld auf die Wicklung beschränken. Indem sichergestellt wird, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient der Isolierung und der Leitschichten fast gleich ist, kann die Gefahr eines Schadens durch Wärmeausdehnung der Wicklungen ausgeschlossen werden.

Vorteile für die Betreiber

Eine nach diesem neuen Konzept gebaute rotierende elektrische Maschine bietet für die Betreiber zahlreiche Vorteile gegenüber Maschinen mit herkömmlicher Technik. In ihrer Gesamtheit können diese Vorteile die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Kraftwerks wesentlich verbessern.

Direkter Anschluss an das Hochspannungsnetz

Der Powerformer kann direkt an alle Stromversorgungsnetze angeschlossen werden, die mit Spannungen betrieben werden, für die derzeit Kabel lieferbar sind. Deshalb ist kein Aufwärtstransformator erforderlich, auch nicht bei Netzen, die mit 20 kV oder höher betrieben werden. Dies löst das Problem des Platz-

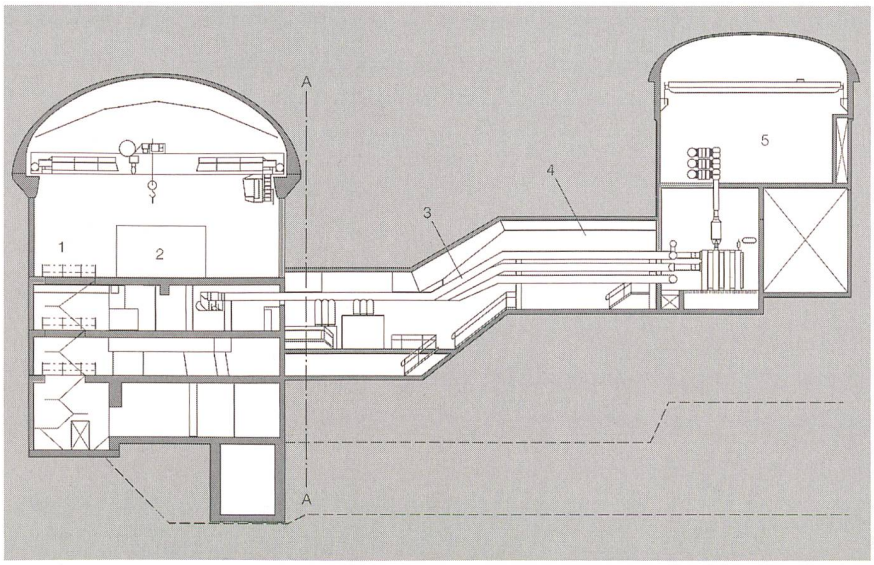

Bild 5 Schnitt durch ein konventionelles Wasserkraftwerk. Mit der neuen Technik entfallen alle Anlagenteile, die rechts der Schnittebene A–A liegen.

1 Generatorkaverne, 2 Generator, 3 Sammelschienensystem, 4 Tunnelsystem, 5 Transformatorkaverne

bedarfs, beispielsweise in Wasserkraftwerken, die oft in aus Felsen gehauenen Kavernen untergebracht sind. Zudem wird die Sicherheit beträchtlich erhöht, weil keine Öltransformatoren vorhanden sind und somit keine Brandgefahr besteht.

In Anlagen, in denen der Transformator bisher oberirdisch aufgestellt war, ermöglicht die neue Technik kürzere Sammelschienen und eine einfachere Verlegung. Da in diesen Sammelschienen oft Ströme in der Grössenordnung von 10 bis 20 kA fliessen, hat die einfachere, direkte Verbindung eine Senkung der Leitungsverluste zur Folge.

Weitere wichtige Vorteile, die der direkte Anschluss an das Hochspannungsnetz mit sich bringt, sind:

- Die Verluste in den Wicklungen sind wegen der höheren Spannung niedriger.
- Die Gefahr eines zwei- oder dreiphasigen Kurzschlusses ist bei Hochspannungskabeln viel geringer.
- Es sind weniger elektrische Komponenten notwendig, so dass die Schutzmassnahmen verringert werden können.
- Es gibt mehr Möglichkeiten des Anschlusses an verschiedene Spannungsebenen. So kann beispielsweise die Eigenbedarfsversorgung des Kraftwerks in den Powerformer integriert werden.

Diese Merkmale können die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Kraftwerks wesentlich verbessern. Der bessere Wirkungsgrad allein führt zu einer Senkung der Betriebskosten um bis zu 1,5%. Eine weitere Reduktion der Kosten ist eine Folge der geringeren Anzahl an verwendeten Komponenten, da dadurch der Wartungsbedarf geringer und die Zuverlässigkeit höher werden.

Vorteile für den Kraftwerksbau

Einfachere Gesamtkonzeption

Die verschiedenen Vorteile des neuen Konstruktionskonzeptes werden am Beispiel eines konventionellen Wasserkraftwerks in Bild 5 deutlich. Die Transformatorkaverne ist in einiger Entfernung von der aus massivem Fels herausgearbeiteten Generatorkaverne angeordnet. Der Generator ist mit dem Transformator über ein Sammelschienensystem verbunden, das in einem Tunnel verläuft.

In einem Wasserkraftwerk, bei dem die neue Technik zum Einsatz kommt, werden die Ausrüstungen und Gebäude rechts von der Schnittebene A–A nicht gebraucht, während die Grundfläche der Generatorkaverne unverändert bleibt.

Selbst in einem Wasserkraftwerk, in dem der Generator zusammen mit allen Nebenanlagen in einer einzigen Kaverne untergebracht ist, ist der Raumbedarf beträchtlich geringer als bei konventionellen Lösungen.

Der erste nach dem neuen Konzept gebaute Generator ist für 11 MVA, 45 kV und 600 min^{-1} ausgelegt. Er wurde im Frühjahr 1998 im Wasserkraftwerk Porjus in Nordschweden in Betrieb genommen.

Ausblick

Die Vorteile dieser neuen Technologie sind keineswegs nur das Resultat einer Weiterentwicklung bestehender Technik. Der Powerformer revolutioniert das jahrhundertealte Konzept der Stromerzeugung grundsätzlich. Er stellt einen Quantensprung der Elektrotechnik dar, mit weitreichenden Konsequenzen für die Elektroenergiewirtschaft.

Literatur

[1] *M. Leijon et al.:* Breaking Conventions in Electric Power Plants. CIGRE 1998, paper 11/37.

[2] *M. Leijon:* Rotating Electrical Machines with Magnetic Circuit for High Voltages and Method for Manufacturing Same. Patent No. WO 97/45919.

[3] *M. Leijon:* Transformer and Reactor. Patent No. WO 97/45847.

Premier alternateur à haute tension raccordé au réseau

Une technique des câbles moderne permet de générer des tensions jusqu'à 400 kV

Des tensions maximum de 30 kV sont atteintes avec les alternateurs actuels. Cette limitation est due aux champs électriques qui, à des tensions encore plus élevées, détruiraient l'isolation des enroulements du stator. ABB, grâce à l'utilisation de câbles plus résistants aux hautes tensions pour les enroulements du stator, a développé un alternateur qui peut générer des tensions jusqu'à 45 kV. De tels câbles étant disponibles jusqu'à 400 kV, un renoncement à l'utilisation de transformateurs entre l'alternateur et le réseau de haute tension serait possible à l'avenir. Par rapport aux alternateurs classiques, le rendement de ce «powerformer» s'améliore de jusqu'à 1,5%.