

51

Int. Cl. 3:

H 02 K 9/193

19 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**



Behördenangabe

DE 29 23 496 A 1

11

Offenlegungsschrift 29 23 496

21

Aktenzeichen: P 29 23 496.6

22

Anmeldetag: 9. 6. 79

43

Offenlegungstag: 11. 12. 80

30

Unionspriorität:

32 33 31

—

54

Bezeichnung: Verfahren und Einrichtung zum Nachfüllen von Helium in den Rotor eines supraleitenden Generators

71

Anmelder: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 7500 Karlsruhe

72

Erfinder: Hofmann, Albert, Dipl.-Phys. Dr., 7500 Karlsruhe;
Schnapper, Christoph, Dr., 7515 Linkenheim-Hochstetten

DE 29 23 496 A 1

KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE GMBH

Karlsruhe, den 24. Mai 1979
PLA 7924 Ga/str

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Nachfüllen von flüssigem Helium aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Helium-Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und die flüssige Phase im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist wird, dadurch gekennzeichnet, daß die flüssige und die gasförmige Phase des Heliums in einem im Rotor (9) integrierten Phasenseparator (2) getrennt werden, und daß die gasförmige Phase aus dem Phasenseparator (2) herausgeführt wird.
2. Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß eine Durchführung (1,6) für die Einspeisung der beiden Phasen in den Phasenseparator (2) vorgesehen ist, und daß die Durchführung (1,6) als Koaxialleitung ausgebildet ist, durch deren Außenrohr (6) die gasförmige Phase aus dem Phasenseparator (2) abgeführt wird.
3. Einrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Leitung (4 und/oder 12) vom Phasenseparator (2) zum Heliumbad (5) im Abstand zur Rotationsachse (8) vorgesehen ist.

2.

2923496

KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE GMBH

Karlsruhe, den 25. Mai 1979
PLA 7924 Ga/str

Verfahren und Einrichtung zum Nachfüllen von
Helium in den Rotor eines supraleitenden Generators

-1-

030050/0539

Beschreibung:

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Einrichtung zum Nachfüllen von flüssigem Helium aus einem unter Umgebungsdruck stehenden Helium-Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und die flüssige Phase im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist wird.

Zur Erzielung hoher Zuverlässigkeit beim Betrieb elektrischer Maschinen mit rotierender supraleitender Erregerwicklung erscheint es erforderlich, die Einspeisung des flüssigen Heliums so vorzunehmen, daß ein ungestörter Betrieb auch bei einer Störung an der Kälteanlage gewährleistet ist. Diese "Entkopplung" der elektrischen Maschine von der Kälteanlage wird in einfacher Weise durch einen zwischengeschalteten Vorratsbehälter für flüssiges Helium gewährleistet. Der Druck in diesem Vorratsbehälter liegt zweckmäßigerweise bei Atmosphärendruck oder -zur Vermeidung von Verunreinigung des flüssigen Heliums aus der ungebundenen Atmosphäre - bei geringem Überdruck.

Die supraleitende Rotorwicklung wird - zur Erzielung einer hohen Stromdichte - zweckmäßigerweise mit Helium gekühlt, das unter vermindertem Druck von einigen Zehntel bar siedet und somit eine Siedetemperatur von $T < 4.2$ K hat. Dieser Unterdruck im Rotor kann in einfacher Weise durch zweckmäßige Führung des Abgasstromes aufrechterhalten werden (das Abgas verläßt nach Aufnahme der Verlustwärme den Rotor bei Umgebungsdruck. Zusätzliche Pumpen sind zur Erzielung eines Unterdrucks im kalten Teil des Rotors nicht erforderlich).

Es ist bereits vorgeschlagen worden (A.Bejan, "Improved Thermal Design of the Cryogenic Cooling System for a Superconducting Synchronous Generator", Thesis, MIT (1974); US-PS 4.056.745)

. 4 .

das ankommende Helium durch ein Drosselventil auf den im Rotor vorliegenden Unterdruck zu entspannen (Joule-Thomson-Entspannung). Das Ventil muß entsprechend dem im Rotor benötigten Heliumstrom aktiv geregelt werden.

Bei anderen Vorschlägen (US-PS 4,085,529 und 4,082,967) wird davon ausgegangen, daß das in den Rotor einströmende Helium infolge der thermischen Verluste in der Transferleitung einen relativ großen Gasanteil hat. Die rotierende Einspeiseleitung wird so ausgebildet, daß sich - zumindest in dem radial verlaufenden Teil der Einspeiseleitung - Flüssigkeit und Gas räumlich trennen. Der Druckverlauf in dieser Leitung ist durch die rotationsbedingte Kompression des Dampfes gegeben. Diese Leitung mündet an der Stelle in die bei Unterdruck siedende Flüssigkeit, wo deren hydraulischer Druck gleich dem in der Dampfsäule ist. Dieses Nachfüllsystem ist selbstregelnd, solange der Dampfanteil nicht zu gering wird. Um auch bei großem Heliumstrom sicheren Betrieb zu gewährleisten, wird erwogen, durch eine Heizung in der Transferleitung bei Bedarf den erforderlichen Dampfanteil zu erzeugen.

Ein anderes Verfahren ist in "Cryogenics 17,429 (1977) beschrieben. Hierbei wird eine Flüssigkeit durch eine radiale Einspeiseleitung eingeführt und an der Stelle in das bei Unterdruck siedende Helium eingespeist, wo gleiche hydraulische Drücke vorliegen. Der Radius, bei dem die Einspeisung erfolgt, ist größer als bei Einspeisung eines Dampf-Flüssigkeitgemisches. Bei einem 50-Hz-Rotor muß er z.B. größer als 0,33 m sein. Ein weiterer Nachteil ist, daß durch die radiale Einspeiseleitung nur reine Flüssigkeit gefördert wird.

Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe besteht darin, ein Nachfüllverfahren und Einrichtungen hierzu zu bieten, die eine Nachfüllung eines unter vermindertem Druck siedenden rotierenden Heliumbades unabhängig vom Dampfteil des einzuspeisenden Heliums und auch unabhängig von der Größe des zu versorgenden Rotors ermöglichen.

030050/0539

Die Lösung dieser Aufgabe ist in den Merkmalen der Ansprüche 1 und 2 beschrieben. Die Merkmale des Anspruches 3 geben eine vorteilhafte Weiterbildung der erfindungsgemäßen Einrichtung wieder.

Die Erfindung wird im folgenden anhand eines Ausführungsbeispiels mittels der Fig. 1 und 2 näher beschrieben, wobei die Fig. 1 den schematischen Aufbau eines Generators darstellt,

Das flüssige Helium strömt durch die feststehende mit einem Vakuummantel 10 isolierte Leitung 1 (Fig. 1) aus einem nicht näher dargestellten Helium-Vorratstank, der unter dem Druck p_0 ($p_0 \approx 1$ bar) steht, und mündet in einen mit dem Rotor 9 verbundenen Phasenseparator 2. Der Phasenseparator 2 besteht im wesentlichen aus einem Verzweigungsstück 11 für verschiedene Rohrleitungen 4 und 12 mit mindestens einem Ausgang 3 an der Peripherie. Infolge der Rotation um die Rotationsachse 8, zu der der Phasenseparator 2 konzentrisch steht, wird der in der Versorgungsleitung 1 anfallende Dampfanteil von der Flüssigkeit getrennt, so daß die Flüssigkeit 13 sich an der Peripherie ansammelt. (Bei hinreichend hoher Drehzahl findet die Separation auch bei horizontal liegender Rotorachse 8 statt. Z.B. ist die Zentrifugalbeschleunigung bei der Betriebsdrehzahl eines Synchrongenerators von 50 Hz bereits an einem Abstand von 1 cm 100 mal größer als die Erdbeschleunigung).

Die Flüssigkeit wird durch die Leitung 4 und/oder 12 in das zu versorgende Heliumbad 5 - mit einer Oberfläche im Abstand R 1 zur Achse 8 - geführt, welches in der Nähe der Drehachse 8 bei dem Druck p_1 , der kleiner als p_0 ist, siedet. Der im Phasenseparator anfallende Dampf wird durch die Koaxial-Außenleitung 6 aus dem Rotor 9 bzw. Phasenseparator 2 herausgeführt. Der Radius R_0 des Dampfraumes 11 in dem Phasenseparator 2 wird durch den Niveauregler 7 bei einem vorzugebenden Wert gehalten. Das Flüssigkeitsniveau in dem Phasenseparator 2 muß aktiv geregelt werden. Derartige Niveauregler 7 sind hinreichend bekannt. Als Niveauregler 7 dienen z.B. temperaturabhängige Meßfühler (Kohlewiderstandsthermometer oder supraleitende Detektoren). Der Niveauregler 7 kann entweder durch Druckänderung im Heliumspeicher oder durch Druckänderung am Gasaustritt erfolgen. Es handelt sich hierbei um die gleiche Technik wie bei nicht-rotierenden

Systemen.

In dem nachzufüllenden Bad 5 stellt sich die Phasengrenze R_1 so ein, daß an der Einspeisestelle 14 der Leitung 4 und 12 der gleiche hydraulische Druck vorliegt wie in dem Heliumbad 5.

In Fig. 2 ist angegeben, wie sich die Drücke in der radialen Leitung 4 und 12 (es ist auch eine zylindrische Zuführungsleitung möglich) und in dem Heliumbad 5 in Abhängigkeit vom Abstand R zur Rotationsachse 8 und in Abhängigkeit von den Radien der Phasengrenzen R_0 und R_1 verändern. Das Beispiel beschreibt typische Verhältnisse in einem großen supraleitenden Turboläufer 9 mit 50 Hz Drehzahl und 1 m Durchmesser. Im Zentrum des Rotors 9 wird ein Druck von 0,41 bar, wie er sich z.B. infolge des Selbstpumpeffektes im Abgaskreis einstellen kann, angenommen.

Die strichlinierte Kurve (a) beschreibt den Druckverlauf von $p_0 = 1$ bar und die ausgezogene (b) Kurve für den Druck $p_1 = 0,41$ bar. Die anderen Kurven beschreiben die Drücke in den Flüssigkeiten, die sich außerhalb der Radien R_0 und R_1 an diese Dampf Räume anschließen. Diese Kurvenscharen geben an, in welchen Grenzen die Radien R_0 , R_1 und R_2 variiert werden können.

Um zu zeigen, in welchem Bereich die Dampf- und Einspeiseradien variieren können, sind in Fig. 2 drei Beispiele angegeben. Es wird jeweils gefordert, daß sich im Heliumbad ein Dampf radius von $R_1 = 0,1$ m einstellt. Wenn die Einspeisung an den Stellen $R_{2A} = 0,2$ m, $R_{2B} = 0,35$ m oder $R_{2C} = 0,45$ m erfolgt, muß das Niveau im Phasenseparator auf die Radien R_{aA} , R_{oB} oder R_{oC} eingeregelt werden.

Bei der Rechnung, die zu dem in Fig. 2 dargestellten Ergebnis führt, muß berücksichtigt werden, daß sich der thermodynamische Zustand des Heliums bei der Kompression infolge der Zentrifugal-

. 7.

beschleunigung stark ändert. Dem Helium wird in der Einspeiseleitung 4 und/oder 12 keine Wärme zugeführt oder entzogen. D.h. diese Leitungen müssen vorzugsweise aus Material mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (z.B. Edelstahl) hergestellt werden. Die Druckerhöhung in der einphasigen Flüssigkeit wird berechnet aus der Zustandsänderung

$$h(R) - h(o) = \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (1)$$

und

$$s = \text{const}, \quad (2)$$

wobei h die spezifische Enthalpie und s die spezifische Entropie ist. Der Dampf wird längs der Phasengrenze im Zustandsdiagramm komprimiert, so daß gilt

$$\int_{p(r_o)}^{p(r_1)} \frac{1}{\rho_s} dp = \frac{1}{2} \omega^2 (r_1^2 - r_o^2), \quad (3)$$

wobei ρ_s die Dichte des Sattedampfes ist. Die Beziehungen: (1), (2) und (3) sind auch experimentell verifizierbar.

Die wesentlichen Vorteile der Erfindung bestehen darin, daß die Flüssigkeit und das Gas des einströmenden Heliums in einem im Rotor 9 integrierten Phasenseparator 2 getrennt werden. Die Flüssigkeit wird an geeigneter Stelle 4 und/oder 12 in den Rotor 9 eingespeist und das Gas durch eine separate Leitung 6 zurückgeführt. Die Stelle der Einspeisung 4 und/oder 12 kann in weiten Grenzen frei gewählt werden. Das System funktioniert unabhängig von der Größe des Dampfgehaltes im Helium. Hieraus ergeben sich die weiteren Vorteile der hohen Betriebssicherheit,

. 8 .

der Anpaßbarkeit an verschiedenartige Rotorkonzepte und der klaren Trennung von Flüssigkeit und Dampf.

- 9 -
Leerseite

Fig. 2

