

⑩ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑪ DE 29 18 148 C 2

⑤ Int. Cl. 4:
H 02 K 55/02
H 02 K 9/193

⑰ Aktenzeichen: P 29 18 148.4-32
⑱ Anmeldetag: 5. 5. 79
⑲ Offenlegungstag: 20. 11. 80
⑳ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 4. 2. 88

DE 29 18 148 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:
Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 7500
Karlsruhe, DE

⑦② Erfinder:
Hofmann, Albert, Dipl.-Phys. Dr., 7500 Karlsruhe, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

US 40 82 967
US 40 56 745

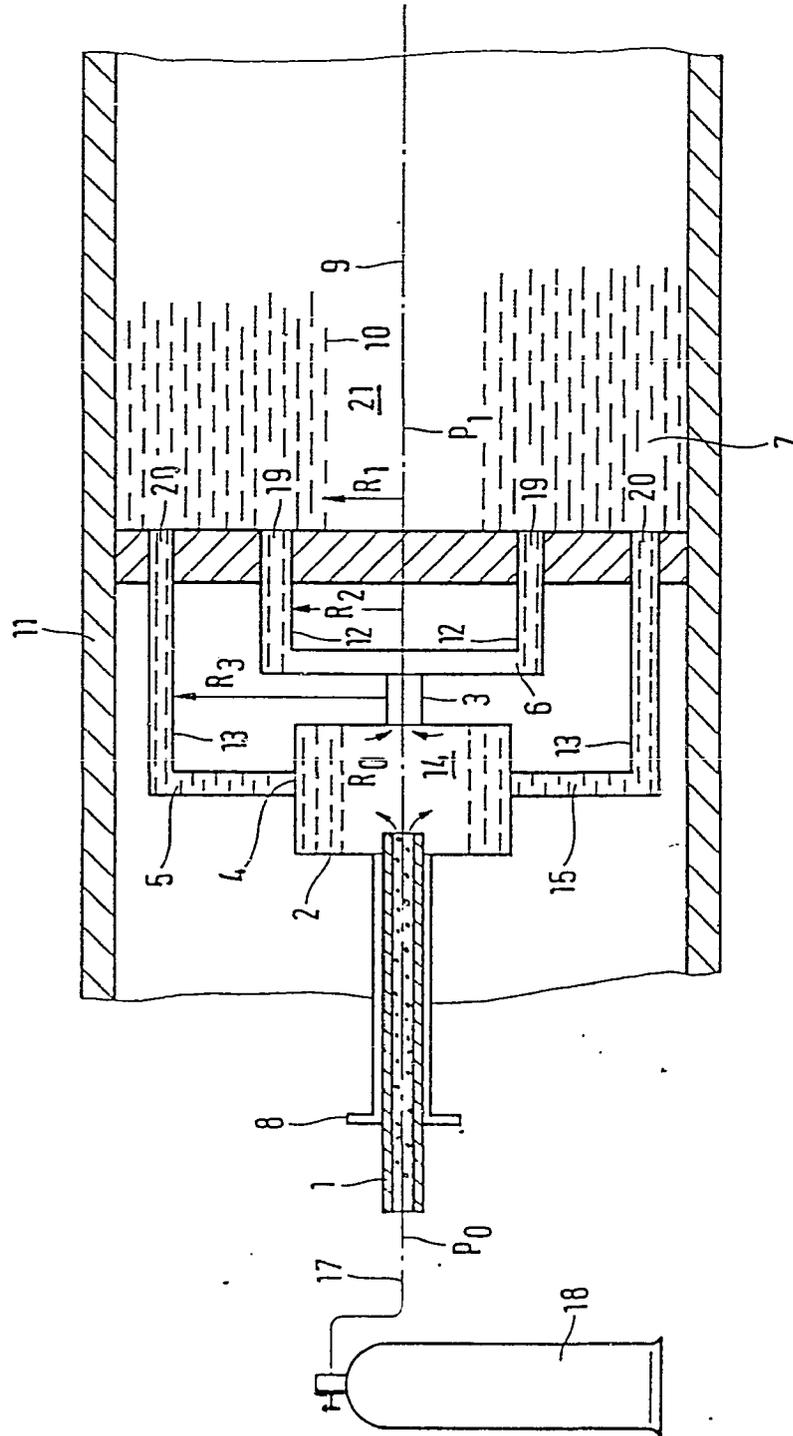
US-Diss. BEJAN, A.: Improved thermal design of the
cryogenic cooling system for a superconducting
synchronous generator, PHD-Thesis, MIT, Dez. 1974,
S. 145-167;

US-Rep. Epri-Report EL-577, Superconducting
Generator Design, Nov. 1977, S. 3-262 bis 3-270;
US-Z. Cryogenics, 1977, S. 429-434;

⑤④ Einrichtung zum selbstregelnden Nachfüllen von Helium in den Rotor eines supraleitenden Generators

DE 29 18 148 C 2

Fig. 1



Patentansprüche

1. Einrichtung zum selbstregelnden Nachfüllen von Helium aus einem Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und beide Phasen im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist werden, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Phasen (14, 15) in einem Phasenseparator (2) im Bereich der Rotationsachse (9) voneinander getrennt werden, daß die Flüssigphase (15) in einem größeren Abstand (R_3) als dem Abstand (R_2) für die Einleitung der Dampfphase (14) zur Rotationsachse (9) eingespeist wird, und daß der Abstand (R_2) für die Einspeisung der Dampfphase (14) größer als der Abstand (R_1) ist, den die innere Oberfläche (10) des Heliumbades (7) zur Rotationsachse (9) einnimmt.
2. Einrichtung nach Anspruch 1 gekennzeichnet durch eine Heliumzuführung (1) in Form einer Drehdurchführung (8) zum Phasenseparator (2), durch ein peripheres Flüssigphasenführungssystem (13), welches vom Phasenseparator (2) abgeht, und durch eine Entnahmeleitung (3), die im Bereich der Rotationsachse (9) aus dem Phasenseparator (2) abgeht und zu dem Dampfphasenführungssystem (12) führt.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung zum selbstregelnden Nachfüllen von Helium aus einem Vorratsbehälter in ein bei Unterdruck siedendes Heliumbad des Rotors eines supraleitenden Generators, wobei ein Teil des Heliums bei der Überführung in Dampfphase übergeht und beide Phasen im Abstand zur Rotationsachse in das Heliumbad eingespeist werden.

Zur Erzielung hoher Zuverlässigkeit beim Betrieb elektrischer Maschinen mit rotierender supraleitender Erregerwicklung ist 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 mit z. B. 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 Abgasstroms aufrecht erhalten 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).

Zur Lösung dieses Problems sind im wesentlichen drei Verfahren bekannt. So schlagen Bejan ("Improved Thermal Design of the Cryogenic Cooling System for a Superconducting Synchronous Generator", Thesis, MIT (1974)) und Eckels (US-PS 40 56 745) vor, das ankommende Helium durch ein Drosselventil auf den im Rotor vorliegenden Unterdruck zu entspannen (Joule-Thom-

son-Entspannung). Das Ventil muß entsprechend dem im Rotor benötigten Heliumstrom aktiv geregelt werden.

Andere Autoren (US-PS 40 48 529, US-PS 40 82 967, "Superconducting Generator Design" EPRI-EL-577 (Nov. 1977)) gehen davon aus, daß das in den Rotor einströmende Helium infolge der thermischen Verluste in der Transferleitung einen relativ großen Gasanteil hat. Dann wird die rotierende Einspeiseleitung so ausgebildet, daß sich — zumindest in dem radial verlaufenden Teil der Einspeiseleitung — Flüssigkeit und Gas räumlich trennen. Der Druckverlauf in dieser Leitung wird durch die rotationsbedingte Kompression des Dampfes vorgegeben. 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.

Ein anderes Verfahren ist in "Cryogenics" 17, 429 (1977) beschrieben. Hierbei wird reine Flüssigkeit durch eine radiale Einspeiseleitung eingeführt und an der Stelle in das unter Unterdruck siedende Helium eingespeist, wo gleiche hydraulische Drücke vorliegen. Der Radius, bei dem die Einspeisung erfolgt, ist größer als bei Einspeisung eines Dampf-Flüssigkeitsgemisches. 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 nunmehr darin, ein Nachfüllsystem zu gewährleisten, mit dem eine selbstregelnde Nachfüllung in den Rotor unabhängig vom Dampfanteil des einzuspeisenden Heliums und auch unabhängig von der Größe des zu versorgenden Rotors erfolgen kann.

Die Lösung ist in den Merkmalen im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 aufgeführt.

Das wesentliche Neue an der Erfindung ist darin zu sehen, daß die Flüssigkeit und das Gas des einströmenden Heliums in einem im Rotor integrierten Phasenseparator getrennt und jeweils an geeigneten Stellen in den Rotor eingespeist werden, daß die Stelle der Einspeisung in weiten Grenzen frei gewählt werden kann, und daß das System selbstregelnd ist und unabhängig von der Größe des Dampfgehalts im Helium funktioniert.

Die besonderen Vorteile der Erfindung bestehen in der hohen Betriebssicherheit durch Wegfall von aktiven Regelementen, in der Anpaßbarkeit an verschiedenartige Rotorkonzepte und in der klaren Trennung von Flüssigkeit und Dampf, wodurch eine zuverlässige Berechnung der einzelnen Abstände zur Einspeisung der einzelnen Phasen möglich wird.

Die Erfindung wird im folgenden an Hand eines Ausführungsbeispiels mittels der Fig. 1 und 2 näher erläutert.

Die erfindungsgemäße Einrichtung ist schematisch in Fig. 1 dargestellt. Das flüssige Helium 17 strömt durch die feststehende mit einem Vakuummantel isolierte Leitung 1 aus dem Helium-Vorrattank 18, der unter dem Druck p_0 ($p_0 \approx 1$ bar) steht, und mündet in einen mit dem Rotor 11 verbundenen Phasenseparator 2. Der Phasenseparator 2 besteht im wesentlichen aus einem (an verschiedene vorgegebene Konstruktionen anpaßbares) Verzweigungsstück für verschiedene Führungssysteme 12 und 13 mit einer Entnahmeleitung 3 für die Dampfphase 14, z. B. auf der Rotationsachse 9, und mindestens einem Ausgang 4 an der Peripherie für die Flüssigphase 15 zum Führungssystem 13. Infolge der Rota-

tion wird der in der Versorgungsleitung 1 anfallende Dampfanteil 14 von der Flüssigkeit 15 getrennt, so daß die Flüssigkeit bzw. Flüssigphase 15 sich an der Peripherie im Phasenseparator 2 ansammelt. Bei hinreichend hoher Drehzahl findet die Separation auch bei horizontal liegender Rotorachse 9 statt. Z. B. ist die Zentrifugalbeschleunigung bei der Betriebsdrehzahl eines Synchrongenerators von 50 Hz bereits in einem Abstand von 1 cm 100mal größer als die Erdbeschleunigung.

Flüssigkeitsphase 15 und Dampfphase 14 werden getrennt durch die Phasenführungsleitungen 5, 6 und 13, 12 in das zu versorgende Heliumbad 7 geführt, welches in der Nähe der Rotationsachse 9 bei dem Druck p_1 , der kleiner als p_0 ist, siedet. Die Flüssigphasen- und Dampfphasenführungssysteme können als aus im Winkel zueinander angeordneten Einzelröhren 6 und 12 bzw. 5 und 13, aus jeweils einem einzigen oder mehreren schräg zu den Einspeisungsstellen 19, 20 geführten Röhren oder in Form von Scheiben- und Ringkanälen ausgebildet werden.

Die Dampfphase 14 wird bei dem Radius R_2 in das Heliumbad 7 eingespeist und die Flüssigphase 15 bei dem Radius R_3 . Der Radius R_0 , der sich für den Dampfphasenraum 14 im Phasenseparator 2 ausbildet und R_1 in dem nachzufüllenden Bad 7 stellen sich so ein, daß an den Einspeisestellen 19, 20 der Leitungen 12 und 13 jeweils die gleichen hydraulischen Drücke vorliegen wie in dem Heliumbad 7.

In Fig. 2 ist angegeben, wie sich die Drücke in den Leitungen 12 und 13 in Abhängigkeit vom Abstand R zur Rotationsachse 9 und in Abhängigkeit von den Radien der Phasengrenzen R_0 und R_1 verändern. Das Beispiel beschreibt typische Verhältnisse in einem großen supraleitenden Turboläufer mit 50 Hz Drehzahl und 1 m Durchmesser. Im Zentrum des Rotors 11 wird ein Druck von 0,41 bar, wie er sich z. B. infolge des Selbstpumpeffekts im Abgaskreis einstellen kann, angenommen.

Die gestrichelte Kurve (a) beschreibt den Druckverlauf in rotierendem gesättigtem Dampf mit einem Zentrumsdruck von $p_0 = 1$ bar und die ausgezogene Kurve (b) ist die entsprechende Kurve für den Druck $p_1 = 0,41$ bar. Die anderen Kurven beschreiben die Drücke in den Flüssigphasen, die sich außerhalb der Radien R_0 und R_1 an diese Dampfphasenräume anschließen. Diese Kurvenscharen geben an, in welchen Grenzen die Radien R_0 , R_1 , R_2 und R_3 variiert werden können.

Als Beispiel wird in Fig. 2 angenommen: Einspeisung der Flüssigphase 15 bei $R_3 = 0,4$ m und Einspeisung der Dampfphase 14 bei $R_2 = 0,23$ m. Dann stellen sich die Phasengrenzen ein bei $R_0 = 0,195$ m und $R_1 = 0,200$ m. Die Temperatur an der Peripherie des Rotors 11 ist um so niedriger, je kleiner der zentrale Dampfraum 21 ist. D. H.: Unter diesem Gesichtspunkt ist möglichst kleiner Dampfraum 21 mit $R_1 = R_2 = 0$ ergibt sich aus den Schnittpunkten der oberen gestrichelten und ausgezogenen Kurven der optimale Flüssigkeitseinspeiseradius zu $R_{3\text{ opt}} = 0,33$ m und der dazugehörige Dampfseinspeiseradius $R_{2\text{ min}} = 0,098$ m.

Aus der u. a. Rechnung ist zu erkennen, daß diese Art der Nachfüllvorrichtung selbstregelnd wirkt. Bei Absinken des Heliumstandes im nachzufüllenden Bad 7 (Zunahme von R_1) nimmt der Druck sowohl am Ende der Flüssigkeits- wie auch der Dampfseinspeiseleitung 13 bzw. 12 ab. Somit wird dann automatisch Flüssigphase 15 aus der stationären Leitung 1 nachgeliefert. Der Druck p_0 kann so hoch gewählt werden, daß durch die Drehdurchführung 8 keine Verunreinigung aus der Um-

gebungsatmosphäre angesaugt werden kann.

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 Zentrifugalbeschleunigung stark ändert. Dem Helium wird in den Einspeiseleitungen 12 und 13 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

$$h(R) - h(0) = \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (1)$$

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

$$\int_{r_0}^{r_1} \frac{dp}{\rho_s} = \frac{1}{2} \omega^2 (r_1^2 - r_0^2), \quad (3)$$

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

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 2

