(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
2. März 2006 (02.03.2006)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2006/021516 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
Nicht klassifiziert

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/053960

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. August 2005 (11.08.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2004 040 754.1 23. August 2004 (23.08.2004) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **FRANK, Michael** [DE/DE]; Erlanger Strasse 27 c, 91080 Uttenreuth (DE). **KUMMETH, Peter** [DE/DE]; Langenzenner Strasse 19, 91074 Herzogenaurach (DE). **KÜHN, Adolf** [DE/DE]; Wiesenstrasse 33, 90552 Röthenbach (DE). **MASSEK, Peter** [DE/DE]; Berliner Strasse 11, 91301 Forchheim (DE). **VAN HASSELT, Peter** [DE/DE]; Tennenloher Strasse 40, 91058 Erlangen (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

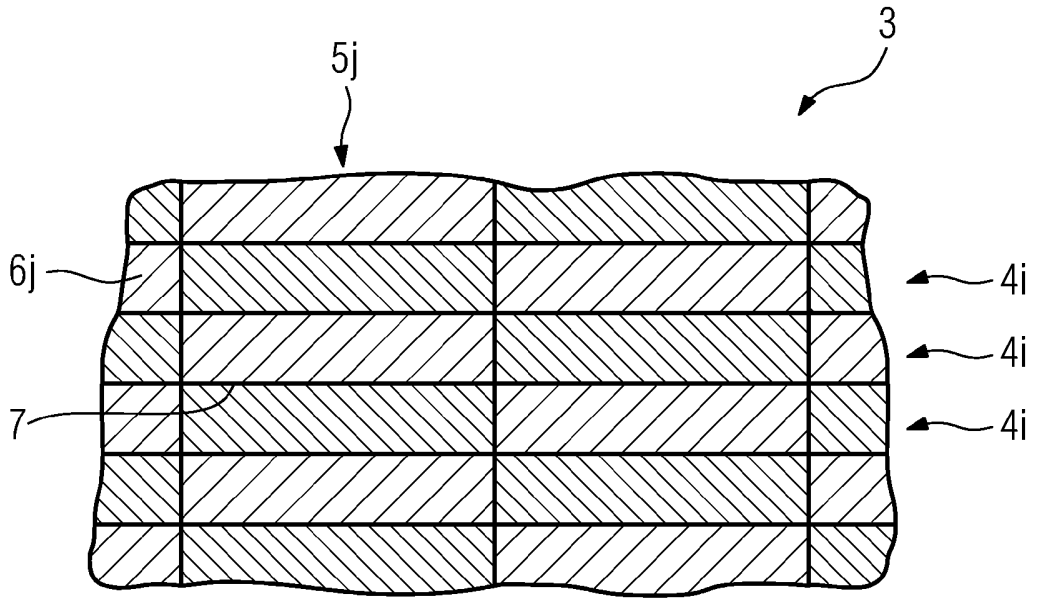
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: RECTANGULAR COIL MADE OF STRIP-SHAPED SUPERCONDUCTORS CONTAINING HIGH-T_C-SUPER CONDUCTOR MATERIAL AND USE THEREOF

(54) Bezeichnung: RECHTECKSPULE AUS BANDFÖRMIGEN SUPRALEITERN MIT HOCH-T_C-SUPRALEITERMATERIAL UND VERWENDUNG DERSELBEN



[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2006/021516 A2

TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Abstract: The invention relates to a rectangular coil comprising several successive windings (5j) which are made of a strip-shaped super conductor (6j), which contains at least one core which is embedded in a normal conductive matrix material and which is made of a high-T_c- super conductor material. The coil is made of a strip-shaped superconductor (6j) and does not have additional insulation means.

(57) Zusammenfassung: Die Rechteckspule hat mehrere aneinander liegende Windungen (5j) aus einem bandförmigen Supraleiter (6j), der wenigstens einen in ein normal leitendes Matrixmaterial eingebetteten Kern aus Hoch-T_c-Supraleitermaterial enthält. Die Spule soll einen Aufbau aus dem hergestellten bandförmigen Supraleiter (6j) ohne zusätzliche Isolationsmittel haben.

Beschreibung

Rechteckspule aus bandförmigen Supraleitern mit Hoch-T_c-Supraleitermaterial und Verwendung derselben

Die Erfindung bezieht sich auf eine Rechteckspule mit mehreren aneinander liegenden Windungen aus einem bandförmigen Supraleiter, der wenigstens einen in ein normal leitendes Matrixmaterial eingebetteten Kern aus Hoch-T_c-Supraleitermaterial enthält. Eine entsprechende Spule ist der WO 01/20756 A1 zu entnehmen.

Um bandförmige Hoch-T_c-Supraleiter (nachfolgend als „HTS-Leiter" bezeichnet) insbesondere in rotierenden elektrischen Maschinen wie gemäß der vorstehend genannten WO-A1-Schrift einsetzen zu können, ist es erforderlich, diesen Leiter zu Spulen zu verarbeiten. Bevorzugt werden hierfür planare Spulentypen, insbesondere vom so genannten Rechteck-Typ, vorgesehen. Hierunter werden alle Spulentypen verstanden, die zumindest annähernd eine rechteckige Grundfläche einnehmen, wobei sie auch abgerundete Ecken haben können. Rechteckspulen mit abgerundeten Ecken , die stirnseitig zusammen jeweils halbkreisförmige , gegebenenfalls durch gerade Bahnteile verbundenen Bogenteile bilden, werden auch als „Rennbahnspulen" (bzw. „Race track-Spulen") bezeichnet. Dabei geht man zum Aufbau entsprechender Spulen von in konventioneller Cu-Technik ausgeführten Spulen aus, die in sich und gegen die Umgebung elektrisch isoliert sind. Insbesondere wegen den Anforderungen der Beschleunigertechnik und der MR-Technik, wo hohe Anforderungen an die Feldqualität gestellt werden, die für den Strom nur Fehler im Sub-ppm-Bereich zulassen, werden bisher serienmäßig supraleitende Rennbahnspulen eingesetzt, die so hergestellt sind, dass ihre Leiter innerhalb der einzelnen Windungen und gegenüber Masse elektrisch isoliert sind.

Bekannte Rechteckspulen unter Verwendung von bandförmigen HTS-Leitern werden bisher mit isoliertem Leitermaterial er-

stellt. Derzeit existieren für die Isolation dreigängige Methoden, nämlich

a. eine Lackisolation, beispielsweise eine UV-Lackbeschichtung (vgl. EP 1 075 030 A2),
b. eine Kapton-Wrap-Umhüllung (vgl. DE 38 23 938 A1) oder
c. eine PEEK-Extrusionsbeschichtung (vgl. WO 01/61712 A1).

Entsprechende Verfahren sind jedoch verhältnismäßig aufwändig, erhöhen die Herstellungskosten der Leiter und bergen Gefahr von Leiterbeschädigungen.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es deshalb, eine Rechteckspule mit den eingangs genannten Merkmalen zur Verfügung zu stellen, bei der die vorgenannten Schwierigkeiten nicht gegeben sind.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den in Anspruch 1 angegebenen Maßnahmen gelöst. Dementsprechend soll die Rechteckspule mit den eingangs genannten Merkmalen einen Aufbau aus dem hergestellten bandförmigen Supraleiter ohne zusätzliche Isolationsmittel aufweisen. Entsprechende Spulen lassen sich bevorzugt für elektrische Maschinen verwenden.

Die Erfindung geht dabei von der Erkenntnis aus, dass es zum Aufbau von Rechteckspulen unter Verwendung von bandförmigen HTS-Leitern keiner besonderen Isolationsmittel bedarf. D.h., auf eine Zusatzisolation nach der Herstellung der Leiter soll verzichtet werden. Die Rechteckspule soll demnach aus einem unisolierten Leiter gewickelt werden. Der große Vorteil gegenüber einer Verwendung von isoliertem Leitermaterial liegt also zum einen in der Reduzierung des Beschädigungsrisikos durch den Isolationsprozess und zum anderen in einer Kostenreduzierung für den Leiter. Da mit solchen Leitern gefertigte Spulen nicht gegenüber Masse isoliert sein müssen, können auch die bisher hierfür notwendigen Isolationsprüfungen bei der Spulenfertigung entfallen. Dies führt ebenfalls zu einer entsprechenden Kostenreduzierung.

Vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Rechteckspule gehen aus den von Anspruch 1 abhängigen Ansprüchen hervor. Dabei kann die Ausführungsform nach Figur 1 mit den Merkmalen eines der Unteransprüche oder vorzugsweise auch denen aus mehreren Unteransprüchen kombiniert sein. Demgemäß kann die Spule noch folgendermaßen ausgebildet sein:

- Der hergestellte Supraleiter weist auf wenigstens einer Seite eine herstellungsbedingte Beschichtung aus einem oxidischen Material auf. Bei diesem Material kann es sich insbesondere um Al_2O_3 handeln.
- Alternativ kann der hergestellte Supraleiter in dem Aufbau an seinen Außenseiten herstellungsbedingte Verunreinigungen aufweisen, indem insbesondere der hergestellte Supraleiter einem Reinigungsprozess nicht unterzogen worden ist.
- Die Spule kann für eine maximale Verlustleistung von 10 W ausgelegt sein, wobei ein Nebenschlusswiderstand von mindestens 100 mΩ vorhanden ist.
- Bevorzugt kann ein Übergangswiderstand zwischen benachbarten Windungen von mindestens 10 μΩ, vorzugsweise 20 μΩ, gegeben sein.

Vorteilhaft ist die Verwendung der erfindungsgemäßen Spule in einer elektrischen Maschine. Wegen der fehlenden Isolation weist sie dabei eine entsprechend hohe Wicklungsdichte auf.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnung noch weiter erläutert. Dabei zeigen in jeweils schematisierter Darstellung

deren Figuren 1 eine Schrägansicht einer Rechteckspule vom Rennbahntyp

und

deren Figur 2 einen Ausschnitt aus der Wicklung dieser Spule.

Die in Figur 1 nur angedeutete, allgemein mit 2 bezeichnete Spule ist insbesondere zum Aufbau der Erregerwicklung einer elektrischen Maschine geeignet (vgl. die eingangs genannte WO-A1-Schrift. Sie soll vom so genannten Rechteck-Typ sein. Unter einer entsprechenden Rechteckspule sei in diesem Zusammenhang jede flache Spule oder (Teil-)Wicklung verstanden, die eine zumindest annähernd rechteckige Fläche einnimmt. Im Allgemeinen hat die Spule abgerundete Ecken. Die Spule 2 ist gemäß dem dargestellten Ausführungsbeispiel vom so genannten Rennbahn-Typ. Sie besitzt deshalb gerade Seitenteile 2a und 2b, die über beispielsweise halbkreisförmige, stirnseitige Bogenteile 2c und 2d ineinander übergehen. Die Spule soll mit mindestens einem bandförmigen Leiter aus einem der bekannten oxidischen Hoch-T_c-Supraleitermaterialien (HTS-Materialien) wie z.B. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ oder $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$ aufgebaut sein. Hierbei kann es sich um Leiter mit von einer normalleitenden Hülle oder Matrix wie z.B. aus Ag oder einer Ag-Legierung eingeschlossenen HTS-Mono- oder Multifilamenten handeln. Entsprechende, an sich bekannte Leiter haben ein hohes Aspektverhältnis (= Leiterbreite/Leiterdicke) von mindestens 3, vorzugsweise mindestens 10. Die HTS-Leiter sind insbesondere auf einem Temperaturniveau von höchstens 77 K (Siedetemperatur von LN_2), insbesondere aber darunter zu halten.

Außerdem sollen die bandförmigen HTS-Leiter zu den Windungen der Spule in ihrer „leichten Richtung", d.h. über ihre Breitseite gebogen sein. Auf diese Weise ist eine unzulässige Dehnung beim Biegen und eine damit verbundene Einbuße an Stromtragvermögen zu vermeiden. Entsprechende HTS-Leiter mit einem oder mehreren supraleitenden Leiterkernen (Mono- oder Multifilamentleiter) sind allgemein bekannt. Dabei sind Leiter mit einer Hülle aus einer Silberlegierung wie AgMg oder AgPd hinsichtlich der Wickeltechnik unempfindlicher. Die Leiter können in der Spule 2 mittels einer an sich bekannten Vergusstechnik unter Verwendung eines aushärtbaren Kunststoffes in mehreren Lagen von Windungen fixiert sein.

Erfindungsgemäß soll ein entsprechender bandförmiger HTS-Leiter nach seinem Herstellungsprozess keinem besonderen Isolationsverfahren unterzogen werden, bevor mit ihm die Rechteckspule erstellt wird.

Figur 2 zeigt in einem Querschnitt einen Teilbereich des allgemein mit 3 bezeichneten Aufbaus einer mit mindestens einem solchen HTS-Leiter hergestellten Rechteckspule. Die Spule weist in mehreren übereinander liegenden Lagen 4i mehrere Windungen 5j aus dem oder den bandförmigen HTS-Leitern 6j auf. Bevorzugt können zum Wickeln der Rennbahnspule ungereinigte HTS-Bandleiter verwendet werden. Es ist dann davon auszugehen, dass zwischen benachbarten Bandleitern 6j wie z.B. an Grenzflächen 7 verhältnismäßig hohe Nebenwiderstände ausgebildet sind. Dies kann insbesondere auch darauf zurückzuführen sein, dass entsprechende HTS-Bandleiter herstellungsbedingt auf einer Seite mit einem Trennmaterial wie z.B. einer Al_2O_3-Beschichtung versehen sein müssen, um so ein Aneinanderbacken von benachbarten Windungen des Leiters in einem Ofen während des erforderlichen Glühvorgangs zu vermeiden. Zu einer Kontaktierung an den Wicklungsenden sind dann die Leiter erst von dieser isolierenden Schicht zu befreien. Sieht man außerdem eine Imprägnierung mit einem aushärtbaren Kunststoff, beispielsweise einem Harz vor, das bei einer Nasswickeltechnik zur Erstellung der Spule und/oder deren Fixierung innerhalb einer Maschine verwendet wird, so ergibt sich dann eine Beschichtung der Leiter, die eine hinreichend gute Isolierung der Windungen untereinander und gegenüber Masse gewährleistet.

Für eine Beurteilung des mit den erfindungsgemäßen Maßnahmen verbundenen Effektes seien nachfolgend einige Abschätzungen vorgenommen: Bei einer typischen Anwendung z.B. für die Läuferwicklung einer Synchronmaschine beträgt der Läuferstrom 100 A. Ein Fehlerstrom von 1 %, also von 1 A, kann hierbei im Allgemeinen durch eine Stromerhöhung aus einer Erregermaschine leicht ausgeglichen werden, und die durch den Fehlerstrom

hervorgerufenen Felder sind für motorische Anwendungen irrelevant. Im Betrieb befinden sich die Spulen im supraleitenden Zustand. Aus ökonomischen Gründen wird bei realistischen Ausführungsformen für die Spulen gemäß dem vorstehend angesprochenen Anwendungsfall eine Verlustleistung von maximal 10 W zugelassen. Daraus ergibt sich dann ein Spannungsabfall von 100 mV über die gesamte Länge der Läuferwicklung. Der sich eventuell durch die Verwendung von unisoliertem Leiter ergebende (Kurzschluss oder Neben-)Widerstand sollte deshalb den Wert von 100 mΩ nicht unterschreiten. Eine komplette Läuferwicklung besteht z.B. aus etwa 25 Teilspulen. Über jeder Teilspule steht dann eine Spannung von etwa 4 mV, so dass der (Kurzschluss- oder Neben-)Widerstand den Wert von etwa 4 mΩ je Teilspule nicht unterschreiten darf. Geht man davon aus, dass jede dieser Spulen aus etwa 100 Windungen besteht, dann reduziert sich der zulässige Widerstand zwischen zwei benachbarten Windungen auf etwa 40 µΩ. Auf alle Fälle sollte in der Spule ein Übergangswiderstand zwischen benachbarten Windungen 5j von mindestens 10 µΩ, vorzugsweise 20 µΩ gegeben sein. Wenn diese Widerstände nicht unterschritten werden, dann fließt durch den sich daraus ergebenden Nebenschluss ein Strom von etwa 1 A. D.h., dieser Nebenschlussstrom liegt in der zulässigen Größenordnung.

Um die vorstehend skizzierten Nebenschlusswiderstände in einem Aufbau 3 nach Figur 2 einschätzen zu können, sei zum Vergleich auf eine bekannte 2 mm-Steckverbindung für 6 A verwiesen, die Durchgangswiderstände bis etwa 6 mΩ aufweist. Wenn man Schaltkontakte z.B. für Relais betrachtet, so treten dort Kontaktwiderstände von einigen 100 mΩ auf. Bei diesen bekannten Einrichtungen wurden zudem noch spezielle Maßnahmen ergriffen, um die Kontaktwiderstände möglichst gering zu halten. Trotzdem liegen sie in der Größenordnung, die nach der vorstehenden Abschätzung lediglich einen Fehler von etwa 1 % im Strom verursachen würde. D.h., bei dem erfindungsgemäßen Aufbau der Spule kann unter Weglassung besonderer Reinigungsmaßnahmen ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass hin-

reichend hohe Nebenschlusswiderstände zwischen benachbarten Windungen 5j vorhanden sind.

Patentansprüche

1. Rechteckspule mit mehreren aneinander liegenden Windungen aus einem bandförmigen Supraleiter, der wenigstens einen in ein normalleitendes Matrixmaterial eingebetteten Kern aus Hoch-T_c-Supraleitermaterial enthält, gekennzeichnet durch einen Aufbau aus dem hergestellten bandförmigen Supraleiter (6j) ohne zusätzliche Isolationsmittel.

2. Rechteckspule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der hergestellte Supraleiter (6j) auf wenigstens einer Seite eine herstellungsbedingte Beschichtung aus einem oxidischen Material aufweist.

3. Rechteckspule nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das oxidische Material Al_2O_3 ist.

4. Rechteckspule nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der hergestellte Supraleiter (6j) in dem Aufbau (3) an seinen Außenflächen herstellungsbedingt verunreinigt ist.

5. Rechteckspule nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der hergestellte Supraleiter (6j) nach dem Herstellungsprozess einem Reinigungsprozess nicht unterzogen ist.

6. Rechteckspule nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine maximale Verlustleistung von 10 W und einem Nebenwiderstand von mindestens 100 mΩ.

7. Rechteckspule nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Übergangswiderstand zwischen benachbarten Windungen (5j) von mindestens 10 µΩ, vorzugsweise 20 µΩ.

8. Verwendung der Rechteckspule nach einem der vorangehenden Ansprüche in einer elektrischen Maschine.

FIG 1

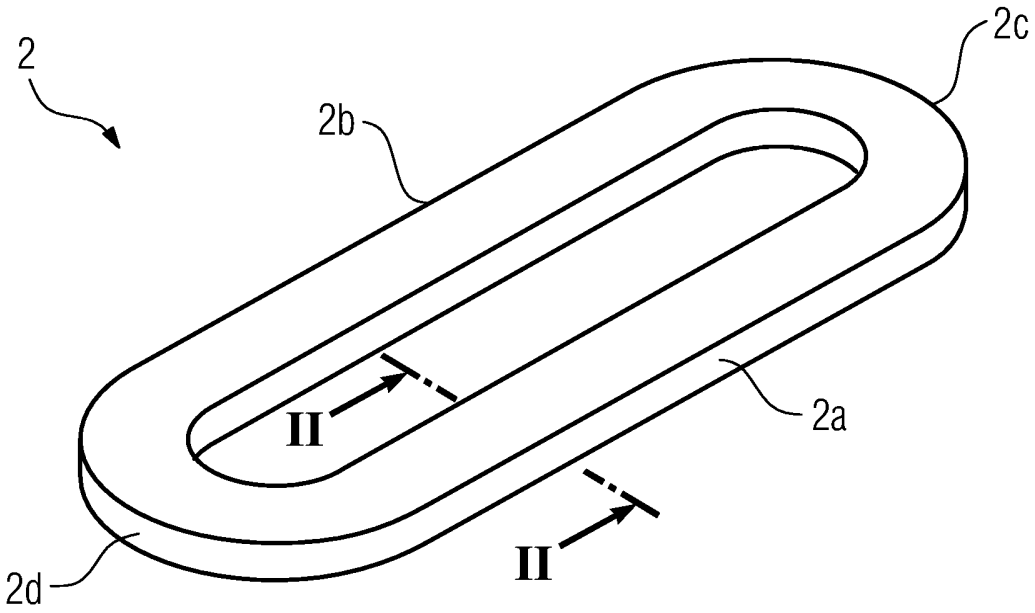


FIG 2

