

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4174824号
(P4174824)

(45) 発行日 平成20年11月5日 (2008. 11. 5)

(24) 登録日 平成20年8月29日 (2008. 8. 29)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 B 12/06 (2006. 01)

H O 1 B 12/06 Z A A

H O 1 B 12/10 (2006. 01)

H O 1 B 12/10 Z A A

請求項の数 11 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2003-106953 (P2003-106953)	(73) 特許権者	000002130
(22) 出願日	平成15年4月10日 (2003. 4. 10)		住友電気工業株式会社
(65) 公開番号	特開2004-319093 (P2004-319093A)		大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号
(43) 公開日	平成16年11月11日 (2004. 11. 11)	(74) 代理人	100100147
審査請求日	平成18年3月23日 (2006. 3. 23)		弁理士 山野 宏
		(74) 代理人	100070851
			弁理士 青木 秀實
		(72) 発明者	湯村 洋康
			大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電
			気工業株式会社大阪製作所内
		(72) 発明者	綾井 直樹
			大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電
			気工業株式会社大阪製作所内
		審査官	青木 千歌子
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超電導ケーブル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

芯材の外側に複数の超電導線材を多層に巻き付けてなる超電導ケーブルであって、
前記超電導線材には、らせん状の超電導フィラメントを有するツイスト線材と、
直線状の超電導フィラメントを有する非ツイスト線材の両方が用いられており、
前記多層のうち、印加磁界が100gauss以上となる層がツイスト線材により構成され、印
加磁界が100gauss以下(但し、100gaussを除く)となる層が非ツイスト線材により構成され
ていることを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項 2】

前記超電導線材は、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層を形成し、
導体層のうち少なくとも最外層がツイスト線材で構成されていることを特徴とする請求項
1に記載の超電導ケーブル。

【請求項 3】

前記超電導線材は、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層を形成し、
導体層のうち少なくとも最内層が非ツイスト線材で構成されていることを特徴とする請求
項1または2に記載の超電導ケーブル。

【請求項 4】

前記超電導線材は、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層と、導体層上に形成される
電気絶縁層を介して多層に巻き付けられた磁気遮蔽層とを形成し、
磁気遮蔽層のうち少なくとも最内層がツイスト線材で構成されていることを特徴とする請

10

20

求項1～3のいずれかに記載の超電導ケーブル。

【請求項5】

前記超電導線材は、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層と、導体層上に形成される電気絶縁層を介して多層に巻き付けられた磁気遮蔽層とを形成し、
磁気遮蔽層のうち少なくとも最外層は非ツイスト線材で構成されていることを特徴とする請求項1～4のいずれかに記載の多層超電導ケーブル。

【請求項6】

前記超電導線材により構成される多層の超電導層のうち、ツイスト線材を用いた層の割合が全層の2/3以下であることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の超電導ケーブル。

10

【請求項7】

前記超電導線材のうち、ツイスト線材の本数が全本数の2/3以下であることを特徴とする請求項1～5のいずれかに記載の超電導ケーブル。

【請求項8】

前記超電導線材は、AgまたはAg合金からなるマトリックス中に高温超電導体材料からなるフィラメントが複数本埋め込まれた構成であることを特徴とする請求項1～7のいずれかに記載の超電導ケーブル。

【請求項9】

前記ツイスト線材における超電導フィラメントのツイストピッチは、10mm以上30mm以下であることを特徴とする請求項1～8のいずれかに記載の超電導ケーブル。

20

【請求項10】

前記超電導線材により構成される超電導層の各層は層間絶縁が施されていることを特徴とする請求項1～9のいずれかに記載の超電導ケーブル。

【請求項11】

前記超電導線材は、各層間の電流分布を均一化するために、少なくとも1層の巻きピッチが他層とは異なることを特徴とする請求項1～10のいずれかに記載の超電導ケーブル。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、超電導ケーブルに関するものである。特に、交流損失の低減が可能な高温多層超電導ケーブルに関するものである。

30

【0002】

【従来の技術】

コンパクトかつ大容量送電の可能な超電導ケーブルの開発が進められている。一般に、超電導ケーブルは、芯材（フォーマ）の周りに超電導テープ線材を多層スパイラル巻きにした多層ケーブル構造を有する。超電導テープ線材には、Bi系高温超電導フィラメントがAgマトリックス材に埋め込まれたBi系Agシーステープ線などが用いられる。

【0003】

このような多層ケーブル構造では、例えば各テープ線を同一ピッチで巻き、かつ巻き付け方向を層ごとに交互に変えただけでは、各層のインピーダンスの相違から偏流が生じる。すなわち、インピーダンスの小さい外層側ほど流れる電流が大きく、内層側ほど流れる電流が小さくなる。このような偏流が生じると、電磁気的にはあたかも各層が1つの塊のように振舞い（モノブロックモデルという）、交流損失が大きくなり、多層化した意味がなくなる。

40

【0004】

交流損失を低減するためには、この偏流現象を抑制する必要がある。その対策として、各層のインピーダンスの均一化が採用されている。具体的には、各層の巻き付けピッチや巻き付け方向を調整することで、各層のインピーダンスを均一化し、電流分布を均流化する方法である（例えば特許文献1）。この結果、均流化後の交流損失は、偏流が生じている場合のほぼ1/層数まで低減することが可能である。

50

【 0 0 0 5 】

また、テープ線における超電導フィラメントをツイストすることにより、テープ線自体の交流損失を低減し、このツイスト線材をケーブルに用いることでさらにケーブルの低損失化を図ることも提案されている（例えば特許文献2）。

【 0 0 0 6 】

【特許文献1】

特開平9-45150号公報

【特許文献2】

特開平7-105753号公報

【 0 0 0 7 】

10

【発明が解決しようとする課題】

しかし、テープ線材の巻き付けピッチ調整により各層を均流化して低損失化が図れるのは、各層が一体化して一つの塊とみなした場合の交流損失のほぼ1/層数が限界である。

【 0 0 0 8 】

また、ケーブルにツイスト線材を使用した場合は、さらに低損失化が可能となるが、超電導線材にツイスト加工を施すと臨界電流（ I_c ）の低下やフィラメントの断線等による歩留まり低下を招き、ケーブルの通電電流特性の低下やコストアップを招くという問題がある。

【 0 0 0 9 】

従って、本発明の主目的は、電流特性の低下とコスト増を抑えて交流損失を効果的に低減することができる超電導ケーブルを提供することにある。

20

【 0 0 1 0 】

【課題を解決するための手段】

本発明は、限定的にツイスト線材を用いることで上記の目的を達成する。

【 0 0 1 1 】

すなわち、本発明超電導ケーブルは、芯材の外側に複数の超電導線材を多層に巻き付けてなる超電導ケーブルであって、前記超電導線材には、らせん状の超電導フィラメントを有するツイスト線材と、直線状の超電導フィラメントを有する非ツイスト線材の両方が用いられていることを特徴とする。

【 0 0 1 2 】

30

非ツイスト線材では、磁界が印加された場合にフィラメントとマトリックスに流れる結合電流の流路が非常に長い（基本的には線材長の両端部を介した流路）ため、電流の減衰が遅く、多芯線が電磁氣的に結合し、あたかも単芯線のように振舞う。これに対して、ツイスト線では、結合電流の流路がツイストピッチの1/2の長さとなり、結合電流が速やかに減衰し、多芯化した効果が現われる。

【 0 0 1 3 】

高磁界領域の交流損失は、一般的にフィラメントの厚さに比例するため、電磁氣的に多芯化された状態（各フィラメントが電磁氣的に分離された状態）となることで交流損失を低減することができる。その結果、ツイスト線材を用いることで交流損失を低減することができる。

40

【 0 0 1 4 】

一方、低磁界領域においては、ツイスト線は非ツイスト線よりも交流損失が大きくなる。また、ツイスト線はツイスト加工による通電特性の低下、あるいは線材の歩留まり低下によるコストアップを引き起こす可能性がある。

【 0 0 1 5 】

そこで、ツイスト線と共に非ツイスト線も用いることで、低交流損失化を図り、かつ通電特性の低下、ケーブルコストアップを抑制することができる。特に、印加磁界が大きくツイスト化による低損失効果が期待できる層にツイスト線材を適用し、その他の層には非ツイスト線材を使用することが効果的である。より好ましい形態としては、印加磁界が100gauss以上となる層をツイスト線材で構成したり、あるいは印加磁界が100gauss以下となる

50

層を非ツイスト線材で構成することが挙げられる。

【0016】

ここで、前記超電導線材は、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層を形成し、導体層のうち少なくとも最外層がツイスト線材で構成されていることが好ましい。導体層の最外層は最大磁界が印加されるため、誘導電流も大きくなる。そのため、少なくとも最外層をツイスト線材で構成することにより、交流損失の低下を効果的に実現できる。

【0017】

逆に、導体層のうち少なくとも最内層は非ツイスト線材で構成することが好ましい。印加磁界の小さい最内層は、ツイスト線材を使用すると逆に交流損失が増加するため、最内層はツイストされていない線材で構成することで交流損失を抑制できる。

10

【0018】

超電導線材は導体層のみならず、磁気遮蔽層にも適用できる。すなわち、超電導線材で、芯材の外側に多層に巻き付けられた導体層と、導体層上に形成される電気絶縁層を介して多層に巻き付けられた磁気遮蔽層とを形成する。そして、磁気遮蔽層のうち少なくとも最内層をツイスト線材で構成することが好ましい。磁気遮蔽層においては、少なくとも印加磁界の大きい最内層をツイスト線材で構成することにより、ツイスト線材使用による低損失効果を得ることができる。

【0019】

一方、磁気遮蔽層のうち少なくとも最外層は非ツイスト線材で構成することが好ましい。印加磁界の小さい最外層はツイスト線材を使用すると逆に交流損失が増加するため、最外層は非ツイスト線材で構成することで効果的に低損失化することができる。

20

【0020】

また、超電導線材により構成される多層の超電導層のうち、ツイスト線材を用いた層の割合が全層の2/3以下であることが好ましい。一般にツイスト線は、ツイスト加工を施すため製造工程が増え、さらにフィラメントの断線に伴う歩留まり低下が発生し、線材のコストアップを招く。加えて、磁場の小さい層については、ツイスト線材を使用することにより交流損失がアップすることが考えられる。そこで、ツイスト線材の使用割合を限定することで、コストアップの抑制と効果的な交流損失の低減化を実現することができる。

【0021】

例えば、導体層：4層、磁気遮蔽層：2層からなる超電導層を有するケーブルで考えると、ツイスト線は導体層の2～4層目（最内層が1層目）と磁気遮蔽層の1層目に適用するのが好ましい。より好ましい割合は1/2以下である。同様の理由で、超電導線材のうち、ツイスト線材の本数が全本数の2/3以下であることも好ましい。

30

【0022】

超電導線材は、マトリックス中に高温超電導体材料からなるフィラメントが埋め込まれた構成が好適である。マトリックス材料としては、AgまたはAg合金が好適である。Ag合金には、Ag-Au合金、Ag-Mg合金、Ag-Sb合金、Ag-Mn合金が好ましい。フィラメントを構成する超電導体はイットリウム系、ビスマス系、タリウム系などの酸化物超電導体が好ましい。中でもAgまたはAg合金からなるマトリックス中にビスマス系高温超電導体材料からなるフィラメントが複数本埋め込まれた構成が好適である。線材の断面形状は特に限定されない。断面が矩形のテープ状でも良いし、丸線でも良い。

40

【0023】

ツイスト線材も非ツイスト線材も、パウダーインチューブ法などにより製造することができる。例えば、テープ状のツイスト線は、次の工程により得ることができる。超電導体の原料粉末または超電導体の粉末を第1パイプ中に充填し、これを伸線加工して単心線とする。単心線を複数本用意し、これらを第2パイプに挿入して再度伸線加工し、多芯線とする。多芯線に所要のピッチで捻り加工を施し、さらに軽く伸線加工を施してから、圧延加工（一次圧延）してテープ状とする。非ツイスト線材の場合、この捻り加工を省略する。通常は、このテープ線に1回目の焼結（一次焼結）を行った後、もう一度圧延加工（二次圧延）を施して、2回目の焼結（二次焼結）を行ってテープ状超電導多芯線材を得る。

50

【0024】

超電導体の原料粉末の一例としては、Bi2212相を主相とする前駆体（最終焼結後にBi2223相が形成される）が挙げられる。第1・第2パイプには、銀または銀合金パイプなどを利用すれば良い。フィラメントの数は、最終的なフィラメントの厚さ、テープ状超電導多芯線材のサイズに応じて決定する。通常は、7～127芯程度とする。テープ状超電導多芯線材とした場合の最終的な厚さは0.1～0.4mm、アスペクト比（幅/厚さ）は10～20程度が好ましい。

【0025】

ツイスト線材における超電導フィラメントのツイストピッチは、10mm以上30mm以下であることが望ましい。フィラメントのツイストピッチは、一般に短ピッチの方が損失低減に有効であるため、上限値は30mm以下とすることが好ましい。一方、極端に短ピッチのツイスト線を得ようとしても、フィラメントの断線などが生じやすく、長ピッチの方が加工が容易である。そのため、主に加工性やIc特性低下の観点からツイストピッチの下限は10mm以上が好ましい。

10

【0026】

超電導線材により構成される超電導層の各層は層間絶縁が施されていることが好適である。層間絶縁を設けることにより、低交流損失効果を十分に発揮することができる。

【0027】

さらに、超電導線材は、各層のインピーダンスの均一化が図られていることが好ましい。これにより、各層間の電流分布を均一化することができる。インピーダンスの均一化には、少なくとも1層の巻きピッチが他層とは異なることが望ましい。ツイスト線の使用による低交流損失効果を十分に発揮するためには、各層素線の電流が均流化されていることが望ましいからである。

20

【0028】

均流化するためのより具体的な手段としては、例えば、特開平9-45150号公報に記載の構成が挙げられる。つまり、外径dの芯材に超電導線材を巻きつける場合、巻回ピッチを次式で示される最大有効ピッチPmax以下としたり、超電導線材の巻回ピッチを内層側よりも外層側の方を短くすればよい。

$$P_{\max} = 22.0 \times d \text{ (m)}$$

【0029】

その他、例えば特開2001-266668号、同2001-265845号公報に記載の手段を用いることが好適である。この手法によれば、任意の芯材抵抗、任意の導体サイズ、任意の螺旋巻き方向、任意の螺旋巻きピッチを有する超電導ケーブルの電流分布、交流損失が詳細に解析でき、交流損失を極小化するテープ状超電導多芯線の巻回ピッチを決定することができる。超電導線の巻き付け方向は、各層ごと又は所定の複数層ごとに逆向きとすることが好ましい。

30

【0030】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を説明する。

（ケーブル構造）

図1は本発明超電導ケーブルにおけるコアの端部構成を示す斜視図である。

40

【0031】

このケーブルコアは、中心から順に、フォーマ10、導体層20、電気絶縁層30、磁気遮蔽層40、保護層50および層間絶縁層60を有している。これらの各層のうち、導体層20と磁気遮蔽層40に超電導線材が用いられる。

【0032】

<フォーマ>

フォーマ10には、金属線を撚り合わせた中実のものや、金属パイプを用いた中空のものが利用できる。中実のフォーマの一例としては、複数の銅素線を撚り合わせたものが挙げられる。撚り線構造のフォーマとすることで、交流損失の低減と過電流での温度上昇抑制を

50

同時に実現できる。すなわち、導体層と磁気遮蔽層とからなる超電導層の各層の巻きピッチが異なるピッチ調整型導体ではコア軸方向の磁界が発生する。この軸方向磁界によりフォーマに渦電流が流れ損失（渦電流損失）が生じる。この渦電流損失を低減するためには、▲ 1 ▼材料の抵抗を上げ生じる渦電流を小さくする、▲ 2 ▼構造材の外径を小さくし渦電流のループを小さくする、の2通りの方法が考えられる。そのうち、前者▲ 1 ▼は過電流が流れた場合にフォーマの電流分担が期待できなくなるため適用は難しい。そこで、素線絶縁された小径の銅素線をより合わせた撚り線フォーマを採用することで、電流ループを小さくして渦電流損失低減を図り、かつ過電流が流れた際にフォーマが電流を分担することを可能にして、ケーブルの温度上昇を抑制する。一方、中空のフォーマを用いた場合、その内部を冷媒の流路にすることができる。

10

【 0 0 3 3 】

< 導体層 >

導体層20には、ビスマス系超電導体などの酸化物高温超電導フィラメントを銀シースで被覆したテープ線材が好適である。このテープ線材をフォーマの上に多層に巻回して導体層20を構成する。ここでは、導体層20のうち印加磁界が小さい最内層（1層目21）に非ツイスト線材を用い、印加磁界が比較的大きい2～4層目22,23,24にツイスト線材を用いた。非ツイスト線材は、複数本の直線状の超電導フィラメントがマトリックス中に埋め込まれた線材で、ツイスト線材は、複数本のらせん状の超電導フィラメントがマトリックス中に埋め込まれた線材である。

【 0 0 3 4 】

この導体層20は、各層で超電導線材の撚りピッチが異なっている。加えて、2層ごとに巻き方向を変えることで、各層に流れる電流の均流化を図っている。

20

【 0 0 3 5 】

< 層間絶縁層 >

導体層20における最内層の超電導層とフォーマ10との間、導体層20を構成する各層の間ならびに磁気遮蔽層40を構成する各層の間には、層間絶縁層60が形成される。この層間絶縁層60は、クラフト紙を導体層20の各層あるいは磁気遮蔽層40の各層の外周に巻回して構成する。この層間絶縁層60により、導体層20および磁気遮蔽層40の各層を層ごとに電氣的に独立した構成とすることができる。

【 0 0 3 6 】

< 電気絶縁層 >

導体層20の外周には電気絶縁層30が形成される。この絶縁層30は、例えばクラフト紙にポリプロピレンなどの樹脂フィルムをラミネートしたもの（住友電気工業株式会社製PPLP：登録商標）などを用い、導体層20の外周に巻回して構成することができる。

30

【 0 0 3 7 】

< 磁気遮蔽層：シールド層 >

交流用の超電導ケーブルの場合は、絶縁層30の外側に磁気シールドのための磁気遮蔽層40を設ける。磁気遮蔽層40は、絶縁層30の外側に超電導線材を巻回して形成される。この磁気遮蔽層40に導体層20とほぼ同じ大きさで逆方向の電流が誘導されることで外部への磁界の発生をキャンセルすることができる。ここでは、磁気遮蔽層40のうち印加磁界が大きい最内層（1層目41）にツイスト線材を用い、印加磁界が比較的小さい2層目42に非ツイスト線材を用いた。

40

【 0 0 3 8 】

< 保護層 >

さらに磁気遮蔽層40の上には保護層50が形成されている。この保護層50は、磁気遮蔽層40よりも内側の構造を機械的に保護するもので、磁気遮蔽層40上にクラフト紙や布テープを巻きつけることで形成される。

【 0 0 3 9 】

< 断熱管 >

なお、図示していないが、コアは二重管構造の断熱管内に収納される。通常、この断熱管

50

は、コルゲート内管とコルゲート外管とで構成され、内外管の間が真空引きされると共に、スーパーインシュレーション（商品名）が配置された構造である。

【0040】

（超電導線材の作製）

上記の本発明ケーブルを得るため、以下の条件により、ツイスト線材と非ツイスト線材を作製した。

【0041】

超電導体の原料粉末を銀パイプ中に充填し、これを伸線加工して単心線とする。単心線を複数本用意し、これらをAg-Mn合金パイプに挿入し、再度伸線加工して多芯線とする。この断面が円形が多芯線に所要のピッチで捻り加工を施し、さらに1パスのダイス伸線を行ってから、圧延加工（一次圧延）してテープ状とする。非ツイスト線材の場合、この捻り加工を省略する。このテープ線に820-850 の温度領域で焼結（一次焼結）を行い、さらに2次圧延を行い、再度820-840 の温度領域で焼結（二次焼結）を行ってテープ状超電導多芯線材を得る。ここでは、ツイストの有無、ツイストピッチを変えたものの合計6種類のサンプル（線材Aから線材F）を作製した。

10

【0042】

得られたサンプル線材の諸元を表1に示す。表1において、「Ag比」は超電導体に対するマトリックス（AgおよびAg-Mn合金）の断面積比である。「ツイストピッチ」は線材の最終段階における超電導フィラメントのピッチを示している。また、「n値」は電流I-電圧V曲線の立ち上がりを $V = I^n$ と表したときのnのことである。一般に、「n値」は線材中の超電導フィラメントの健全性を評価する尺度として使用され、フィラメントにダメージ（長手方向の凹凸やクラックなど）があるとn値は小さくなり、低電流領域から微弱電圧が発生する。全6層の超電導層中、ツイスト線を用いた層数の割合は2/3（約0.67）、全114本の超電導線材中、ツイスト線の本数の割合は約0.63である。

20

【0043】

【表1】

	線材 A	線材 B	線材 C	線材 D	線材 E	線材 F
超電導体	Bi2223	Bi2223	Bi2223	Bi2223	Bi2223	Bi2223
マトリックス	Ag/Ag-Mn 合金	Ag/Ag-Mn 合金	Ag/Ag-Mn 合金	Ag/Ag-Mn 合金	Ag/Ag-Mn 合金	Ag/Ag-Mn 合金
フィラメント数	61	61	61	61	61	61
Ag 比	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
幅	3.7mm	3.7mm	3.7mm	3.7mm	3.7mm	3.7mm
厚み	0.24mm	0.24mm	0.24mm	0.24mm	0.24mm	0.24mm
ツイストピッチ	なし	5mm	10mm	15mm	30mm	45mm
加工時の断線	なし	断線多発	断線あり	なし	なし	なし
Ic	60A	30A	55A	58A	60A	62A
n 値	20	8	15	17	19	20
交流損失 (500Gauss, 50Hz)	440J/m ³	250J/m ³	290J/m ³	310J/m ³	350J/m ³	420J/m ³
規格化ロス (線材 A 基準)	1.00	0.57	0.66	0.70	0.80	0.95

【 0 0 4 4 】

(超電導線材の評価)

作製したサンプル線材に対してIc測定および交流損失測定（印加磁界：500gauss、周波数：50Hz、磁場方向：線材面に対して平行）を行い、線材の評価を行った。その結果も併せて表 1 に示す。

【 0 0 4 5 】

非ツイスト線材Aに比べて、ピッチが5mmと短いツイスト線材Bでは、ツイスト加工時に断線が多発し加工性に問題があり、Ic（臨界電流値）も1/2と大きく低下することがわかつ

10

20

30

40

50

た。ツイストピッチが10mmのツイスト線材Cでは、断線が発生するものの、その頻度は線材Bに比べ少なく、また I_c も非ツイスト線材Aに対して大きな低下がないことが確認できた。さらにピッチの長いツイスト線材D、E、Fにおいては加工時の断線はなく、 I_c 低下もほとんどないことを確認した。

【0046】

一方、交流損失に関しては、ツイストピッチが短いサンプルほど小さくなることがわかった。しかしながら、ピッチが45mmのツイスト線材Fにおいては、非ツイスト線材Aに対して、約95%の交流損失となっており、5%程度の交流損失低減効果しか認められない。これらの結果から、加工特性、 I_c および交流損失の観点を総合的に考慮すると、ツイストピッチは10mm以上30mm以下が好ましいことがわかる。

10

【0047】

次に、ツイスト線材Eに対して印加磁場を変えて交流損失測定を行った。その結果を図2に示す。図2は磁界の強度と線材Aに対する交流損失の比率との関係を示すグラフである。このグラフより明らかなように、50gauss以下の低磁界領域においては、ツイスト線材は交流損失が増大することが明らかとなった。この結果から、交流損失低減のためにツイスト線材をケーブルに用いる場合は、100gauss以上の磁場が印加される部分(層)にツイスト線を配置することが好ましいことが判明した。ツイスト線材のより好ましい配置箇所は、100gauss以上500gauss以下の印加磁界が加わる部分である。

【0048】

(実施例1)

20

上記サンプル線材を用いて、図1に示す構造のケーブル導体を試作した。表2に試作したケーブルの諸元を示す。ケーブルは、素線絶縁されたCu素線を撚りあわせた撚線フォーマの上に、導体層：4層、絶縁層(厚み7mm)、磁気遮蔽層：2層を具える。導体層および磁気遮蔽層を構成する超電導線材の撚りピッチおよび撚り方向については、通電電流が均流化されるように調整されている。

【0049】

各層に使用する超電導線材は、最大磁界が100gauss以下の層には非ツイスト線材Aを用い、最大磁界が100gauss以上の層にはツイスト線材Eを用いた。具体的には導体層の2、3、4層目および磁気遮蔽層の1層目にツイスト線材を用いた。

【0050】

30

【表2】

	フォーマー	導体層 1 層目	導体層 2 層目	導体層 3 層目	導体層 4 層目	シールド層 1 層目	シールド層 2 層目
使用材料	絶縁 Cu 素線 撚線	線材 A (非ツイスト線)	線材 E (ツイスト線)	線材 E (ツイスト線)	線材 E (ツイスト線)	線材 E (ツイスト線)	線材 A (非ツイスト線)
外径 (mmφ)	16.5	17.5	18.4	19.4	20.3	34.5	35.4
素線本数	—	14	15	16	15	26	28
撚りピッチ (mm)	—	160	390	420	125	340	520
撚り方向	—	S	S	Z	Z	S	S
Bmax (@1kArms)	0gauss	81gauss	154gauss	219gauss	279gauss	164gauss	80gauss

【 0 0 5 1 】

(比較例 1)

比較例 1 として、ケーブルの構造は実施例 1 と同様で、導体層および磁気遮蔽層の全超電導線材を非ツイスト線材で構成したケーブルを作製した。

【 0 0 5 2 】

(比較例 2)

10

20

30

40

50

比較例 2 として、ケーブルの構造は実施例 1 と同様で、導体層および磁気遮蔽層の全超電導線材をツイスト線材で構成したケーブルを作製した。

【 0 0 5 3 】

(試 験 例)

試作した3つのケーブルサンプル(実施例1、比較例1、比較例2)について、交流損失測定を行い、評価を行った。その結果を表3に示す。

【 0 0 5 4 】

【表 3】

項目	実施例 1	比較例 1	比較例 2
構成	導体層 1 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
	導体層 2 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
	導体層 3 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
	導体層 4 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
	シールド層 1 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
	シールド層 2 層目	非ツイスト線材	ツイスト線材
AC ロス (@1kArms) [W/m]	導体層	0.37	0.53
	シールド層	0.15	0.22
	導体層+シールド層	0.52	0.75

【 0 0 5 5 】

表 3 に示すように、全層を非ツイスト線材で構成した比較例1に対して、全超電導線材をツイスト線材で構成した比較例2では交流損失が増加し、ツイスト線材を適用した効果が見られない。これは、低磁界領域となる導体層の1層目および磁気遮蔽層の2層目にツイスト線材を配置しているため、交流損失が増大する結果を招いたと考えられる。

【 0 0 5 6 】

これに対して、ツイスト線材を磁界が大きな部分のみに配置した実施例1では、交流損失

が比較例1に対して約75%に低減することができた。このように、高磁界領域のみにツイスト線を配置し、低磁界領域には非ツイスト線材を配置することで、効果的に交流損失の低減が実現できる。

【0057】

なお、一般にツイスト線材はツイスト加工が必要なため製造工程が増える。また、超電導フィラメントの断線発生により歩留まりが低下し、線材のコストアップにもつながる。本発明では、ツイスト線材の配置箇所を限定することで、低損失化を達成するとともに、ツイスト線を用いた場合のケーブルコストアップも抑制することができる。

【0058】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明超電導ケーブルによれば、次の効果を奏することができる。

【0059】

ツイスト線材を用いることで、マトリクスとフィラメント間に流れる結合電流の流路がツイストピッチの1/2ごとに分断され、速やかに結合電流が減衰されることにより、高磁界領域では交流損失が低減される。その結果、全超電導線材をツイスト線材で構成する場合に比べて交流損失を小さく抑えることができる。

【0060】

また、ツイスト線材と共に非ツイスト線材も用いることで、ツイスト線材の適用による通電特性の低下、あるいはケーブルのコストアップを抑制することができる。

【0061】

特に、印加磁界が大きくツイスト化による低損失効果が期待できる層にツイスト線材を適用し、その他の層には非ツイスト線材を使用することで、より効果的に交流損失を低減し、かつケーブルの通電特性の低下も抑制することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明ケーブルの端部構成を示す斜視図である。

【図2】磁界の強度と線材Aに対する交流損失の比率との関係を示すグラフである。

【符号の説明】

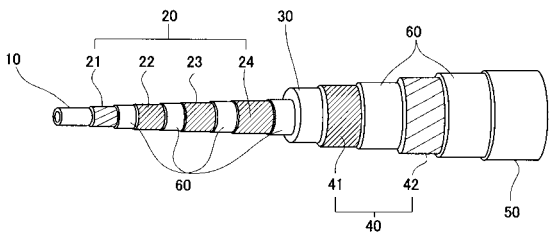
- 10 フォーマ
- 20 導体層
- 21 1層目
- 22 2層目
- 23 3層目
- 24 4層目
- 30 電気絶縁層
- 40 磁気遮蔽層
- 41 1層目
- 42 2層目
- 50 保護層
- 60 層間絶縁層

10

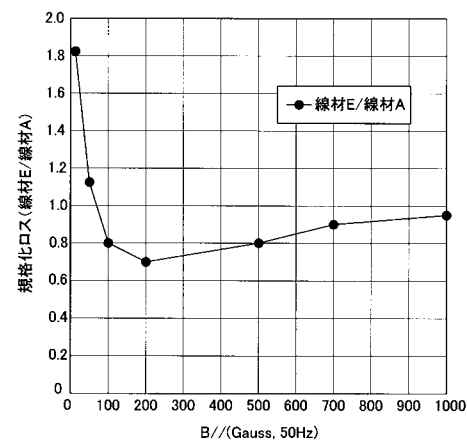
20

30

【図 1】



【図 2】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 1 0 - 0 5 0 1 5 3 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 1 0 0 2 4 9 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 0 7 5 0 7 8 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H01B 12/00-13/00