超電導線材節約巻線の一方方法

海 保 勝 之

電子技術総合研究所 東京都田無市向台町 5-4-1

(1975年10月13日受理)

A Method of Saving the Winding of Superconducting Magnet

Katsuyuki KAIHO

Electrotechnical Laboratory 5-4-1 Mukodai chyo, Tanashi shi, Tokyo

(Received Oct. 13, 1975)

Synopsis :

Maximum current of a superconducting magnet is restricted by maximum magnetic field. Therefore current density in low magnetic field regions becomes much smaller than critical current density in those magnetic field. This means that the superconductors are used inefficiently. A most simple way to use the superconductors more efficiently is to divide the magnet into several components according to their magnetic field strength.

A principle of dividing method to minimize the winding volume of the superconducting magnet is described on the basis of some approximation.

超電導電磁石の大形化に伴いそのコストの大部分を占める超電導線をできるだけ減らす必要がある。これにより、平均電流密度も大きくなり、装置の小形化も同時に達成されるようになる。

一般に超電導線の臨界電流は磁界の増加につれて減少する。このため超電導電磁石を運転する場合は最大磁界によって通電電流が制限されてしまう。このため磁界が小さい所にある超電導線は未だ通電電流を増す余裕がある。したがって、超電導電磁石を磁界の強さに応じて適当に分割し、各分割電磁石ごとに超電導線の線径を変えれば、より線材の使用量を減らせる。この場合、どのような点で分割するのが有利であるかを決定する簡単な方法について述べる。

1. 超電導体の使用量を最小とする分割方法

一般的な形状の電磁石については論ずるのが困難であるから、問題を簡単にするため次の仮定を設ける。

- (1) 軸長無限大のソレノイド形巻線

- (2) 超電導線の占積率は一定
(3) 半径方向の分割数が与えられている
(4) ソレノイドの内半径 R および中心磁界 H_m は一定

Fig. 1 はソレノイド巻線の中心軸と平行な断面を示す。図に示すようにソレノイドを半径方向でいくつかに分割し、外側から k 番目の分割層の厚みを d_k とする。また、各分割層内の電流密度はその分割層内の最大磁界によって決まる値で一定とし、外側から k 番目の分割層内の値を J_k とする。すると、中心磁界 H_m 、および全超電導体の厚み D は次式のように書くことができる。

$$H_m = \sum_k J_k d_k \lambda \quad \dots\dots (1)$$

$$D = \sum_k d_k \quad \dots\dots (2)$$

超電導体の必要量を最小とするためには当然 D の値を最少とすれば良い。

- (1) 式の関係は J_c - H 曲線の上で示すと Fig. 2 の

ようになる。Fig. 2 から明らかなように Fig. 2 に示す θ_k と d_k は次式の関係がある。

$$d_k \lambda \propto \cot \theta_k \quad \dots (3)$$

したがって(2)式は次のように書ける。

$$D \propto \sum_k \frac{1}{\lambda} \cot \theta_k \quad \dots (4)$$

Fig. 3 は Fig. 2 を拡大したものである。Fig. 3 において d 点は H_m より立てた垂線と J_c-H 曲線の交点であり、a d は d 点を通り横軸に平行な直線である。

Fig. 1 Cross section of superconducting magnet divided into several components.

Fig. 2 Magnetic field characteristics of superconducting magnet with several components.

直線 fe は k 分割目のソレノイドの load line であり、 eh は e 点を通り縦軸に平行な直線である。

b 点、 c 点はそれぞれ ad と fe および eh の交点である。

cg は c 点を通り fe に平行な直線である。 fg , gh の長さをそれぞれ l_{k2} , l_{k1} とすると(4)式は次式のように書くことができる。 J_m を H_m に対する臨界電流密度とすれば

$$D \propto \sum_k \frac{1}{\lambda} \frac{l_{k1}}{J_m} \quad \dots (5)$$

$$= \frac{1}{\lambda J_m} \left\{ \overline{ad} - \sum_k l_{k2} \right\} \quad \dots (6)$$

したがって、 D を最少にするためには l_{k2} の総和を最大にすれば良い。ところで、Fig. 3 において l_{k2} の値は線分 bc の長さと同しい。結局、各分割ソレノイドの load line 上の線分 bc に相当する長さの総和を最大にすれば D の値は最小となり、所要超電導体の量も最も少なくて済むことになる。

2. 分割点を求める作図法

(2-1) 2 分割の場合

Fig. 4 (a) に示す l の値を最大にする H_1 を求める。その分割を与える H の値 H_1 を外側巻線の作る最大磁界とすれば良い。内側と外側の超電導を全く同じ線を使った場合は励磁電流の値をそれぞれの最大磁界

Fig. 3 Principle to reduce the winding volume of superconducting magnet.

に対応した臨界電流を流すことになるが、それぞれの臨界電流が等しくなるように超電導線の線径を変えれば電源は一台で済む。

(2-2) 3分割の場合

Fig. 4 (b) を参照して

(1) 始めに H_m より小さい磁界 H_1 を任意に決める。

(2) 2分割巻線により H_1 なる磁界を発生させる場合に最も線材が少なくて済む分割点 H_2 を求める。

方法は2分割巻線の場合と同じで、この場合には線分 a_2c_1 上で直線 ob_1 , b_1h_2 によって囲まれる線分の長さを最小とするように H_2 を決める。

(3) H_2 なるバイアス磁界が加わっている状態で $H_m - H_2$ なる磁界を2分割巻線によって発生させると考えれば良い。したがって h_2 なる点を原点と考えて、 $H_m - H_2$ なる磁界を発生させる場合に最も線材が少なくて済む分割点 H_3 を求める。この場合には線分 a_1d 上で直線 h_2c_2 , c_2h_3 によって囲まれる線分の長さを最小とするように H_3 を決める。

(4) 以下同じ方法を繰り返し、 H_{2N-1} , H_{2N} の収束点および H_m を各分割巻線の最大磁界とすれば良い。

3分割巻線でこのようにして決めた巻線と異なる分割をしたものは、より多くの線材が必要となることは明らかである。

(2-3) 4分割の場合

Fig. 4 (c) を参照して

(1) 始めに H_m より小さい磁界 H_1 を任意に決める。

(2) 3分割巻線により H_1 なる磁界を発生させる場合に最も線材が少なくて済む分割点 H_2 , H_3 を決

Fig. 4 Drawing method to reduce the winding volume of superconducting magnet with two components (a), three components (b), four components (c).

める。

(3) H_3 なるバイアス磁界が加わっている状態で 3 分割巻線により H_m-H_3 なる磁界を発生させると考える。したがって、 h_3 なる点を原点と考えて、 H_m-H_3 なる磁界を発生させる場合に最も線材が少なくて済む分割点 H_4, H_5 を求める。

(4) 以下同じ方法を繰り返し、 $H_{3N-2}, H_{3N-2}, H_{3N}$ および H_m を各分割巻線の最大磁界となるようにすれば良い。

(2-4) n 分割の場合

以上の方法を順次進めてゆく。

手続のめんどろな点を考えると本方法は実用上 3 分割の場合迄が便利であろう。

3. 分割により減らせる線材の量

必要な超電導体の量 V は軸方向単位長当り (6) 式を使って次式のように表わすことができる。

$$V = 2\pi \left(R + \frac{D}{2} \right) D \lambda \quad \dots\dots (7)$$

(7) 式において、巻線の内半径 R が大きく $R \gg \frac{D}{2}$ の場合は次式のように近似することができる。

$$V \propto 2\pi R \frac{H_m}{J_m} \left\{ 1 - \frac{1}{ad} \sum_k l_{k2} \right\} \quad \dots\dots (8)$$

(8) 式において分割を施さない場合は lk_2 の総和は零となるから分割によって減らすことができる超電導体の量は次式となる。

$$\text{分割により減る率} = \frac{\sum_k l_{k2}}{ad} \quad \dots\dots (9)$$

図の上では (9) 式の値は例えば Fig. 3 においては線分 ad に対する線分 bc 等の総和となる。

4. 特性の異なる線材を組合わせて使う場合

以上に述べた方法を応用すると、異なる特性を有す

Fig. 5 Drawing method to minimize the winding volume of superconducting magnet made by the several different superconductors.

る線材を組合わせてソレノイドを設計する場合に線材の選択が容易となる。例えば 3 種類の線材 A, B, C を使って、3 分割したソレノイドを作る場合、Fig. 5 に示すように、各線材の J_c-H 特性を描き、 J_c の最も大きい線をつなぐ(太線)。この太線に関して前記の方法を適用し、分割点 H_1, H_2 を求める。 H_m, H_1, H_2 から立てた垂線と太線との交点を与える特性を有する線材により各磁界を発生させる。つまり、Fig. 5 の場合、最も外側の巻線では超電導線 C によって H_2 なる磁界を発生させる。中間の巻線では超電導線 B によって H_1-H_2 なる磁界を発生させる。最も内側の巻線では超電導線 A によって H_m-H_1 なる磁界を発生させる。