中空超電導線の安定性

(送電ケーブルの場合)

玉 田 紀 治

電子技術総合研究所極限技術部 東京都田無市向台町 5-4-1

(1974年6月7日受理)

“Stability of Hollow Conductor”

(The case of superconducting power transmission line)

Noriharu TAMADA

Extreme Technology Division of Electrotechnical Laboratory
5-4-1 Mukodai-cho, Tanashi-shi Tokyo

(Received June 7, 1974)

Synopsis :

The stability of superconducting hollow conductor has been widely discussed, but almost all of them are concerned with the case of a superconducting magnet.

In this paper, the stability condition against pulsive heat inleak is ascertained by numerical computation for a realistic power transmission line model.

1. まえがき

中空超電導線は、大型超電導マグネットや送電ケーブルなどに使用されると考えられているが、なんらかの原因で局所的な常電導部分が出現した場合、マグネットでは隣接する中空超電導線も加熱されて常電導相になり、全体として長距離にわたる常電導相が現われることになる。したがってマグネットでは長距離にわたる常電導相が時間の経過に対しどのように変化するかを問題としなければならない。しかし送電ケーブルでは中空超電導線が隣接することはないので、短距離の常電導相がどのように変化するかを調べた結果を報告する。

またマグネットと送電ケーブルでは管径が大きく異なり、導体冷媒間の熱伝達係数は単純に管径の大きさに比例して大きくはならない。したがって大型中空超電導マグネットにおける超電導線の安定評価から単純に送電ケーブルの超電導線の安定性を推論することはで

きない。送電ケーブル超電導線の安定性を調べるには、どうしても管径の大きい場合の中空超電導線の安定性を調べておく必要がある。なおマグネットの場合の計算例は Morpurgo¹⁾、稲井氏²⁾ 等によつて求められており興味ある方は参照されたい。

2. 送電ケーブルの形状

送電ケーブルの管径は冷却ステーションの間隔、送電容量などによって変る。超電導送電が従来の送電線とくらべて経済的に有利であるためには 3~10 cm 内径のケーブルを冷却ステーション間隔 10 km 以上の長さにする必要があると言われている³⁾⁴⁾。

ここでは管径 5 cm の場合についての計算を進めてみたい。管径 5 cm のケーブルの例として Fig. 1 に示した。Fig. 1 のケーブルは直流送電方式であり、帰路のヘリウムについてはいろいろな考えがあるので、ここでは行きのみについて考えた。

Fig. 1 Crossection of superconducting power cable

3. 導体の特性

導体は超電導材と安定化材である銅によって構成されるが銅の電気抵抗，熱伝導度はその製造の方法によって大きく変る。Table 1⁵⁾に電気抵抗，Fig. 2 に各金属の熱伝導度の違い⁶⁾⁷⁾を示した。

銅の比熱はその純度にあまり依存しないで，ほぼ一定の温度変化を示す。Fig. 3 に各金属の比熱⁸⁾を示した。

計算では超電導材と安定化材を一体構成とし，熱伝導度および電気抵抗は特殊処理をしない普通の銅のデータに基いた (Fig. 2のd, Table 1 の Cu 01)。ケーブル導体に肉厚 5 mm の銅パイプを使うとすれば，安定化材の断面積は 8.635 cm² となり，単位長当りの抵抗Rはヘリウム温度附近で 1.1×10⁻⁹Ω・cm 程度である。この銅パイプの円周上に 0.6mm 肉厚の Nb-Ti をつければ，超電導材の断面積は 0.942 cm² となり，その断面積比mは約 9.2 である。

ケーブルの冷媒温度を 6 Kとすると，このケーブル

Table 1 Electric conductivity

Conductor	Sample	nΩ-cm	
		T=4.2K	T=20K
Ag	99.999% Silver	0.734	4.33
Cu01	Copper wire bar refined copper	8.01	9.19
CuO	Double electrolytically	0.834	1.93
Al 99.9	Pure aluminium	43.9	46.3

- a : Ag b : high purity copper
c : Copper, electrolytic tough pitch
d : Coalesied copper
e : Free-machinig tellurium copper

Fig. 2 Thermal conductivity

Fig. 3 Specific heat

の設計値では臨界電流は約 2×10⁵A である⁹⁾。このケーブルに 9×10⁴A の電流を流し送電電圧を 110 KV とすると，送電容量は 10 GW となる。この電流値についてはあとで検討する。

Nb-Ti の臨界温度を T_c(計算では 9 Kと仮定)，動

作温度 6 K における臨界電流を I_c とし、通電電流を I とすれば電流が安定化材に分流し始める温度は次のように表わせるとする。

$$T_r = T_c - (T_c - T_{op}) I / I_c \quad (1)$$

ただし T_{op} は動作温度で 6 K である。

また導体内に発生するジュール発熱は (2) 式に従うものとする。

$$\left. \begin{aligned} Q &= 0.0, \quad (\text{W/cm}) \quad T \leq T_r \\ Q &= R \cdot I \cdot \left(I - \frac{T_c - T}{T_c - T_{op}} \right), \quad (\text{W/cm}) \\ &\quad T_r < T \leq T_c \\ Q &= R \cdot I^2, \quad (\text{W/cm}) \quad T > T_c \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

4. 冷却特性

ケーブルを強制冷却する場合、冷媒と導体間の熱伝達率は無次元数の形で次のように表わせる。

$$Nu = C_1 \cdot Re^{C_2} \cdot Pr^{C_3} \quad (3)$$

ここに Re はレイノルズ数、 Pr はプラントル数、 Nu はヌセルト数である。 C_1, C_2, C_3 は実験値に合うように決めた定数である。冷媒に超臨界ヘリウムを使う場合 Pr の値がほぼ 1 に近い値なので ($P = 6 \text{ atm}$, $T = 6 \text{ K}$ で $Pr = 0.955$), C_3 の値は熱伝達特性に大きな影響を与えない (たとえば $Pr^{0.4} = 0.982$, $Pr^{1.2} = 0.946$ at $P = 6 \text{ atm}$, $T = 6 \text{ K}$)。しかし C_1, C_2 の値は超電導線の安定性を議論する場合極めて大きな影響がある。多くの実験結果から C_2, C_3 の値は 0.8, 0.4 と選ばれており信頼度が高い。しかし C_1 の値は管壁の状態 (たとえば壁面を平らにするか、波状にするか、また管壁の加工精度など) や冷媒の相 (気相にするか液相にするか、また超臨界相にするかなど) によって変わり、その範囲は 0.023~0.040 程度とされている⁹⁾。計算では C_1 の値として 0.026, 0.031, 0.036 の 3 つの場合について超電導線の安定性を比較してみた。

5. 計算式

ケーブル内に熱パルスが加えられた場合 (たとえば flux jump や電気絶縁の破壊による熱パルスなど)、どのように温度分布が変化するかを知るには、温度の時間的変化と距離的变化を両方考慮した偏微分方程式を解けば良い。

$$\left. \begin{aligned} C_{cond} \frac{\partial T_1}{\partial t} &= K_{cond} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \alpha (T_1 - T_2) \\ &\quad + P(t, x) + Q(T_1) + \dot{\gamma}(x) \\ C_{he} \frac{\partial T_2}{\partial t} &= K_{he} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - C_{he} V \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha \\ &\quad (T_1 - T_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに T_1 は導体温度、 T_2 は冷媒温度、 $P(t, x)$ は熱パルスを表わす (W/cm)。 $Q(T_1)$ は導体の温度上昇に伴い電流が安定化材に流れることによって生じるジュール発熱 (W/cm) で (2) 式に従う。 $\dot{\gamma}(x)$ は熱輻射や希ガスによる定常熱侵入を表わす。 C_{cond} は導体比熱 ($\text{W} \cdot \text{s/cm} \cdot \text{K}$)、 C_{he} は冷媒比熱 ($\text{W} \cdot \text{s/cm} \cdot \text{K}$)、 K_{cond} は導体熱伝導度 ($\text{W} \cdot \text{cm/K}$)、 K_{he} は冷媒熱伝導度 ($\text{W} \cdot \text{cm/K}$)、 V は冷媒流速 (cm/sec) である。冷媒に超臨界ヘリウムを使った場合 K_{he} は K_{cond} にくらべて極めて小さく $K_{he} \partial^2 T_2 / \partial x^2$ の項は無視しても結果に大きな影響はない。 α は導体と冷媒間の単位長当りの熱伝達率を表わし、(3) 式から導かれる。

$$\alpha = Nu \cdot \frac{K_2}{D} \cdot S \quad (5)$$

ここに K_2 は冷媒である超臨界ヘリウムの熱伝導度、 D は管径、 S は管壁の周囲長である。ケーブルが円管の場合、 α は (6) 式で表わせる。

$$\alpha = \pi \cdot Nu \cdot K_2 \quad (6)$$

α に関しては 6 節で改めて詳しくのべる。

計算では超電導領域を破るために $R \cdot I^2 (\text{W})$ の熱で幅 $l = 10 (\text{cm})$ 、継続時間 $\tau = 0.01 (\text{s})$ なる熱パルスをケーブルに加えた。この熱パルスによってケーブルに常電導相を作り、この常電導相が時間の経過に従ってどのように変化するかを求めた。

6. 熱伝達率 α の計算

冷媒と導体間の熱伝達率は (3) 式で表わせることは 4 節でのべた。この式を具体的に表示すると (7) 式で表わせる。

$$Nu = \frac{H \cdot D}{K_2} = C_1 \cdot \left(\frac{DV\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\mu \frac{C_p}{K_2} \right)^{0.4} \quad (7)$$

ここに H は単位面積当りの冷媒と導体間の熱伝達率 ($\text{W/cm}^2 \text{K}$)、 K_2 は冷媒である超臨界ヘリウムの熱伝導度 (W/cmK)、 D は管径 (cm)、 μ は冷媒の粘性係数 ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$)、 ρ は冷媒密度 (g/cm^3)、 C_p は冷媒の定圧比熱 ($\text{W} \cdot \text{s/g} \cdot \text{K}$)、 C_1 は定数で 0.023~0.04 の値である。(7) 式から α を求めれば (8) 式で表わせる。

$$\alpha = C_1 \cdot \pi \cdot D^{0.8} \frac{K_2^{0.6} \cdot C_p^{0.4} \cdot \rho^{0.8}}{\mu^{0.4}} V^{0.8} \quad (8)$$

ここに α の次元は (W/cm K) である。

たとえば管径 D を 5.0 cm、流速 V を 30 cm/sec、温度を 6 K、圧力を 6 atm とすれば超臨界ヘリウムの物性値は次のようになる。

$$K_2 = 0.238 \times 10^{-3} \quad (\text{W/cm K})$$

$$\mu = 32.1 \times 10^{-6} \quad (\text{g/cms})$$

$$\rho = 0.1123 \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$C_p = 7.07 \quad (\text{W} \cdot \text{s/g} \cdot \text{K})$$

熱伝達率 α は次の値になる。

$$\alpha = 0.65 \quad (\text{W/cmK})$$

Fig. 4~Fig. 6 に管径 5 cm, 温度 6 K の場合圧力が 4, 6, 8 atm のときの流速と α の関係を示した。

7. 導体熱伝導度と常電導領域の初期伝播速度との関係

導体熱伝導度は銅の純度によって大きく変ることを前にのべたが温度によっても変化を示す。これを Fig. 7 に示した。Fig. 7 において K_{cond} は特殊処理をし

Fig. 4 α vs. flow velocity V

Fig. 5 α vs. flow velocity V

Fig. 6 α vs. flow velocity V

Fig. 7 Thermal conductivity of copper

ていない普通の銅を 2 節でのべた寸法で銅パイプにした場合の熱伝導度であり, K'_{cond} は単に K_{cond} を半分の値にした場合, K''_{cond} は K_{cond} を 2 倍にした値である。

Fig. 8-(a), (b) にケーブルに熱パルスを加えてから導体温度の分布が時間の経過に伴ってどのように変化するかを示した。Fig. 8-(a), (b) から導体温度が T_c (9 K) になる点の移動する速度を求めれば,

Fig. 8 Propagation of normal zone by local pulsive heat inleak at $C_1 = 0.026$, thermal conductivity = K_{cond} , specific heat = C_{cond}

Fig. 9 The relation between v and α for two values of thermal conductivity K

この速度が常電導相の伝播速度である。通電電流を $8.5 \times 10^4 \text{ A}$, $9.0 \times 10^4 \text{ A}$ の場合、種々の α に対する常電導相の初期伝播速度を Fig. 9, Fig. 10 に示した。Fig. 9, Fig. 10 において注目すべき点は、 α が小さ

Fig. 10 The relation between v and α for three values of thermal conductivity K

い場合導体熱伝導度の大きい方が小さい場合よりも初期伝播速度が速い。しかし α が大きい場合は逆転して導体熱伝導度が小さい場合の方が大きい場合より伝播速度は速くなる。これは次のように説明できる。導体内を伝わってくる熱は α が小さいと冷媒に吸収されにくく、導体を暖めてしまい発熱が生じて伝播速度が大きくなる。しかし α が大きい場合は伝導してきた熱は容易に冷媒に吸収されるため導体は暖まりにくい。このことは導体熱伝導度が小さい場合はあまり顕著に現われないが、大きいと顕著に現われるからである。

また Fig. 8-(a), (b) を見ると上流側における常電導相の伝播する速さと、下流側における常電導相の伝播する速さにはあまり違いは見出されない。これは管径 5 (cm) に対して熱パルス幅が 10 (cm) と短く、また常電導相が現われてからごく短い時間内での現象を観察しているからである。もし常電導相が広がるような不安定な場合、十分長い時間を経過した状態を観察すれば、明らかに上流側と下流側の常電導相の伝播する速さに違いが生じると予想され、その時の導体温度分布は Fig. 11 に示すような形になり、常電導相の温度は下流側における温度の方が上流側における温度より高くなると予想される。このような状態における常電導相の伝播の様子は超電導マグネットの場合として稲井氏等の報告があり興味ある方は参照してほしい。

Fig. 11 Temperature profile of unstable case

しかし、ここでの送電ケーブルにおける計算目的は、熱パルスが侵入するような場合でも、常電導相が必ず超電導相にもどる安定な状態がいかなる条件下で達成できるかを求めることであり、常電導相の伝播速度はあくまでも附随して出てくる結果にすぎないことを強調したい。

8. 導体比熱の違いによる初期伝播速度の変化

導体の比熱はヘリウム温度附近では極めて小さな値になり、導体温度の時間的な変化に重要な影響を及ぼす。このことは導体比熱が常電導相の初期伝播速度に重要な影響を及ぼすことを意味する。Fig. 12 に導体比熱を示した。同図において C_{cond} は普通の銅を2節でのべた寸法で銅パイプにした場合の導体比熱であり、 C'_{cond} は C_{cond} の半分の値、 C''_{cond} は C_{cond} を2倍にした値である。

Fig. 13 に導体比熱の変化に対する常電導相の初期伝播速度の変化を示した。Fig. 13 の常電導相の伝播速度は下流側における速度であるが、上流側における速度もほとんど違いはない。これは7節でのべたように熱パルスの幅が短いこと、および常電導相が現われてからごく短い時間内での現象を観察しているからである。

Fig. 13 において注目すべき点は、伝播速度0を与える点の熱伝達率 α が導体比熱に依存することである。これは次のように説明できる。導体比熱が小さい場合は熱パルスの侵入とともに比熱が大きい場合より広い範囲まで常電導相が出現する（この現象は外部より強制的に熱を加えたためである）。つまり熱パルスが消滅する時間 τ における導体の状態は、比熱の小さい場合の方が比熱が大きい場合より常電導相が広い範囲に存在することになる。このことは同じ熱パルスを加えても比熱の小さい方が常電導相が広い分だけ発生する熱

Fig. 12 Specific heat of copper

Fig. 13 The relation between α and v for three specific heat of copper

が多いことになる。このため周りの超電導相や冷媒を暖めてしまい、常電導相の伝播速度が0になる点の熱伝達率 α は導体比熱の小さい方が大きな値になるのである。

しかし浸漬冷却の場合ではたとえ広い範囲に常電導相が現われても、冷媒は全く暖たまらないという仮定があるから伝播速度が0になる点の熱伝達率 α は導体比熱の大きさにかかわらず必ず一定になる。この点が浸漬冷却と内部冷却における冷却特性の違いである。

9. 検 討

2 節でのべた寸法のケーブルを使う場合、熱パルスを 10 cm とすると常電導相が超電導相に回復できるための電流と管壁と冷媒間の熱伝達率 α の関係を Fig. 14 に示した。また超電導材と安定材である銅との断面積比 m を変えた場合常電導相が超電導相に回復できる領域を計算して求めると Fig. 15 のようになる。

一般的にケーブルの冷媒流速は 20~30 cm/sec 程度と言われている。この値は冷凍機のコンプレッサー容量及び圧力損失などから決まってくる値で、2 節の寸法のケーブルでは圧力 6 atm、温度 6 K とするとコンプレッサー容量は約 1,500 Nm³/h となる。あまり大きな流量にすると冷凍機が大きさが膨大になり経済的な利点がなくなる。したがって超電導送電ケーブルが経済的に有利であるためには、2 節でのべた寸法のケーブルでは 30 cm/sec と考えられる。またこのときの熱伝達率 α は (3) 式の C_1 を 0.026 とすると約 0.7 (W/cm K) であり、Fig. 14 から通電電流を 7.7×10^4 A 以下にすればよいことになる。

Fig. 14 で安定な領域 (たとえば上記の条件下で電流を 5×10^4 A にした場合) では、ケーブルに加えた熱パルスが冷媒をどれだけ暖めたかが問題になる。このような十分安定な領域で過大な熱パルスを加えた場合の計算例としては、超電導マグネットの場合 Morpurgo の報告⁹⁾がある。送電ケーブルの計算例としては文献¹⁰⁾に記載してあるので、ここでは割愛した。

最後に、ここでのべた結果は幅の短い熱パルスを加えることにより常電導相を発生させ、この常電導相が超電導相に回復することを確認し、その時の条件を超電導線が安定であるための条件と定義したわけだが、真の安定であるための電流の限界値は長時間の観測を必要とし、ここでは得られていない。長時間の観測を行った場合の結果については別報に載せるつもりである。

参 考 文 献

- 1) M. Morpurgo; CERN 69-25, Nuclear Physics Division 22 September (1969)
- 2) Y. Mori, N. Inai; 5th International Cryogenic Engineering Conference, 010-1 (1974)
- 3) 伊原征治郎, 堀米孝, 電気学会雑誌, Vol. 91, No. 5
- 4) S. Ihara, T. Horigome; 5th International Cryogenic Engineering Conference, G-5 (1974)
- 5) 超電導ハンドブック: 電気学会 331
- 6) R. B. Scott: Cryogenic Engineering 344
- 7) N. B. S. monograph 29 (1961)
- 8) 平沢健彦: 低温工学 8, No. 4 (1973)
- 9) 米満博夫: 低温工学 4, No. 6 (1969)
- 10) 等々力達, 玉田紀治, 塚本修己: 低温工学, Vol. 9 No. 1 (1974)

Fig. 14 The relation between α and joule heat RI^2

Fig. 15 Stability criterion against cross section area ratio m