永久電流スイッチの不安定性原因

影山 優, 栢島 成治, 前田 秀明*

浦田 昌身*, 小田勇一郎**

東京工業大学総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町 4259

* 株式会社総合研究所エネルギー機器研究所 川崎市川崎区浮島町 4-1

** 昭和電線電纜 川崎市川崎区小田栄 2-1-1

(1991 年 1 月 16 日 受理)

Instability of Persistent-current Switch

Masaru KAGEYAMA, Shigeharu KABASHIMA, Hideaki MAEDA*,
Masami URATA* and Yuuichirou ODA**

Tokyo Institute of Technology, Department of Energy Sciences, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

* Toshiba Research & Development Center, 4-1 Ukishima, Kawasaki 210

** Showa Electric Wire & Cable Co., Ltd., 2-1-1 Odasaka, Kawasaki-ku, Kawasaki 210

(Received January 16, 1991)

Synopsis:

Persistent Current Switch (PCS) is one of the important part of persistent current mode magnet system. The PCS has some degradation: it quenches at far below the critical current. Magnet system is restricted by the PCS quench. This paper studies the characteristics of PCS wound by a thinner CuNi matrix conductor such as 0.3 mm in diameter for various magnetic field. It is obtained that its quench currents decrease with current sweep rate. In order to explain this dependence of current sweep rate, following instability model is developed: self-field AC losses increase PCS winding temperature thus PCS is quenched when current reaches its critical current determined by PCS's temperature. Numerical calculation on the model was performed and its result agreed with the experiment data.

1. ま え が き

超電導マグネットを永久電流モードで使用すれば電源を切り放しても電流が減衰せず一定磁界を保持できるので、磁気共鳴イメージング装置 (MRI) や磁気浮上列車等で使用されている。永久電流スイッチ (以下 PCS と記す) は、この種の回路に使用される無誘導巻き超電導コイルで、主コイルと並列に接続される。励磁中は高抵抗常電導状態に保ち、定常電流値に到達後、超電導状態にして永久電流回路が作られる¹⁾。PCS は常電導抵抗を高くするために超電導線の母材に CuNi を用いているので、従来から不安定性が問題になっている。

一般に、PCS のクエンチは random に発生するので系統的な知見を得ることは難しいといわれ、またク

エンチの原因には、高抵抗母材に特有な不安定性、断熱構造に伴う発熱昇温等が重畳し、更にこれらの原因が線径、磁界、通電速度等に依存するために現象が複雑になっている。

従来の経験によれば、PCS は線径が大きくなるほど (例えば 1 mm 以上) 低磁界不安定性が顕著になる。これは、線径が大きいほどさまざまな不安定性要因が重畳して現れるからである。実際に使用される PCS では、通電容量から見て 1 mm 程度の線径が必要になることが多いが、はじめからこの種の複雑な問題を扱っても結果の解析が困難である。そこで我々は、PCS 安定化の研究を進めるに際し、次の 2 段階に分けて研究を進めることにした。

(1) 従来の経験から不安定現象が比較的単純で、少数の現象が重畳していると推測される細い線材 (0.31

mm 径) を巻いた PCS について不安定現象を明らかにする。

(2) この結果に基づいて、更に現象の複雑な太い線材を巻いた PCS について研究し、その不安定性の原因を明らかにする。

ここでは、(1) の段階の研究において得られた知見について報告する。

2. 実 験

試作した小型 PCS は、厚さ 5 mm の FRP 巻棒に 0.31 mm 径の Cu-30 wt% Ni 母材 PCS 線を無誘導巻きして製作した。PCS off 時のヒータ入力を低く抑えるために、外周を 5 mm 厚の FRP 円筒で断熱した。作製した PCS の諸元を Table 1 に示す。クエンチ場所を同定できるように、巻線中に多数の電圧タップを取り付けた。この PCS に一定磁場下で通電し、電流-電圧信号を X-Y レコーダで、電圧タップ信号、AE 信号をトランジェント・レコーダで測定した。

PCS に一定電流掃引率で電流を流していくと、Fig. 1 に示すような、インダクタンス電圧に重畳した漸増電圧 V_1 が現れる。低電流領域では電圧は電流と共に線型に増加するが、電流が臨界電流に近づくと電圧は急増する。通電速度が速いほど電圧は大きい。クエンチ電流以下の電流値まで電流を増減させた後、再通電すると低い電圧 V_2 が観測される。

低磁界下 (3.0 T) において、電流通電速度を変えて通電した際のクエンチ電流 I_q を Fig. 2(a) に示す。ここで各通電に先立ち、PCS を加熱して磁束履歴を消去した。通電速度が速くなるに従って I_q は急に低

Fig. 1 The longitudinal voltage signals observed during ramping up the transport current. Solid line: experiment values. Broken lines: calculated values for Eqs. (1) and (2).

下するが、10 A/秒以上ではほぼ一定値 (約 85 A) になる。通電を十分遅くすると、 I_q は短尺臨界電流値 (152 A) に近づいていく。クエンチ時に測定した AE および電圧タップ信号より、クエンチは熱的性格を持ち、PCS 中央部から発生していることがわかった。

同様な測定を、高磁界下 (7 T) で行った結果を Fig. 2(b) に示す。印加磁界が高いと、通電速度が変化してもクエンチ電流があまり変化しない。

3. 検 討

臨界状態モデルによれば超電導線に外部から電流を流すと導体外周に優先的に電流が流れ、通電電流を増

Fig. 2 The quench current as a function of the current sweep rate. ○: quench current for 1st run, □: quench current for following run, Solid line: calculated value. The magnetic field was 3 T for (a); 7 T for (b).

Table 1 Parameters for the P.C.S.

Conductor	
Conductor diameter	0.31 mm
Insulation	Formar coating
Matrix	Cu-30 wt% Ni
Filament number	931
P.C.S.	
Winding form	F.R.P.
Winding inner diameter	20 mm
Winding outer diameter	40 mm
Winding length	40 mm
Layer number	26
Conductor length	193 m
Winding	Bifiler wound

やすと外周部の臨界電流領域が徐々に内部に浸透する²⁾。この過程で磁束が動き、線材内部に電界が発生するので発熱が生じる（自己磁界交流ロス）。Duchateau ら³⁾によれば、この時線材表面に現れる電圧 V_1 は次のように表される。

$$V_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot L \cdot \frac{dI_t}{dt} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{I_t}{I_c}} \right) \quad (1)$$

ここで L は線材長、 I_t は通電電流、 I_c は臨界電流である。

クエンチさせずに電流を増減させると線材内部に磁束が残る。磁気拡散による磁束の減衰に要する時間を計算すると、減衰時間は $\tau_m = (4L^2)/(\pi^2 D_m)$ [s] で求まり約4時間となる ($D_m = \rho/\mu_0$ で磁気拡散係数を表す)。Fig. 1 に示す再通電試験は電流増減後数分して行ったので、再通電時に磁束がほとんど消えずに残っている。この時の電圧 V_2 は次のように表される³⁾。

$$V_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot L \cdot \frac{dI_t}{dt} \ln \left(\frac{2}{2 - \frac{I_t}{I_c}} \right) \quad (2)$$

(1), (2) 式より求めた電圧 V_{1e} , V_{2e} を Fig. 1 に破線で示す。計算値は、実験値と比較的よく一致しており、実験で得られた電圧信号のヒステリシス効果をよく説明できる。

この種の交流ロスが発生すると PCS 内部の温度が上昇する。この温度上昇を見積るために、PCS を多層円筒としてモデル化し、熱伝導方程式を有限差分法を用いて解いた。この計算で、(i) コイル部で (1) 式のロス発生を仮定した。(ii) 材料比熱と臨界電流密度の温度依存性を考慮した。(iii) 液体ヘリウムと FRP 内外円筒間の熱伝達係数を核沸騰時の $h=10,000$ W/m²·K とした。

計算によれば、FRP の断熱構造により液体ヘリウム冷却が妨げられ、PCS 巻線部の温度が上昇し中央部分が最も高くなることがわかった。PCS 内の温度勾配は巻線部では比較的小さく、FRP 部で液体ヘリウムとの間に温度差がつく。Fig. 3 に示すように、内部温度は電流と共に徐々に増加する。この図で、温度上昇曲線と臨界電流⁴⁾との交点がクエンチ電流を与える。このようにして求めたクエンチ電流値を、Fig. 2 (a)(b) に実線で示し、実験結果を○および□で示す。両磁界強度で計算値は実験値とよく一致していることから、Fig. 2 に示すクエンチ電流の通電速度依存性は、自己磁界交流ロスによると考えられる。

Fig. 3 The peak temperature in the P.C.S. as a function of the transport current for various current sweep rates. The solid line gives the temperature dependence of the critical current. 1, 400 A/s; 2, 200 A/s; 3, 40 A/s; 4, 20 A/s; 5, 6.7 A/s; 6, 3.3 A/s; 7, 1.7 A/s; 8, 1.1 A/s; 9, 0.6 A/s.

交流ロスによる単位体積当りの発熱は内部電界と臨界電流密度の積で表されるから、高磁界では臨界電流密度が小さいので発熱が少なくなり Fig. 2 (b) に示すようにクエンチ電流が通電速度に依存しなくなるものと推測される。

Fig. 2 (a) に□で示すように、電流をいったん増減した後クエンチ試験を行うと、 I_q は virgin 状態からの通電より高くなる。これは、通電履歴によりロス量が低減されるからである。このことから、クエンチ電流に及ぼす自己磁界ロスの効果が立証できる。

PCS の電流掃引をいったん止め、数分間一定電流に保持する実験を行うと、Fig. 4 (a)(b) のように、電流掃引停止直後にゆるやかな電圧減衰が現れ、通電再開後もゆるやかな電圧増加が現れる。これらの現象は、臨界状態モデルからは説明がつかないものである。Turck らは⁵⁾、臨界電流が内部電界の $1/n$ 乗に比例することを踏まえた新しいモデルを提唱し、この種の時定数を説明している。Fig. 3 の温度上昇計算には臨界状態モデルを仮定したが、更に厳密な計算には、Turck らによるこの補正が必要になるものと思われる。

本論文では、400 A/秒までのクエンチ電流の通電速度依存性の結果をまとめた。通電速度が更に速い場合、Fig. 2 (a) の実線からの逸脱が見られたので、原因を検討している⁶⁾。

Fig. 4 (a) Gradual decrease of PCS voltage after quitting current ramp at 100 A. (b) Voltage increases gradually after restart current sweep.

4. ま と め

細い線材で巻かれた PCS に現れる通電時の漸増電圧、クエンチ電流の通電速度依存性、クエンチ電流の

ヒステリシス効果等が、自己磁界交流ロスに起因することを明らかにした。

同様な現象は、太い線材を巻いた PCS にも生じるはずである。実際には、他の要因が重畳するので、この種の現象がわかりにくくなる（例えば、0.9 mm 線 PCS では、低磁場での I_q の明確な通電速度依存性が見られない⁶⁾）。今後は、更に太い線材を用いた PCS の不安定性要因の検討を進め、PCS の一般的な安定化手法を確立していく。

参 考 文 献

- 1) 荻原宏康編：応用超電導，日刊工業新聞社，東京（1986）
- 2) M.N. Wilson: *Superconducting Magnets*, Clarendon Press, Oxford (1983)
- 3) J.L. Duchateau, B. Turck, L. Krempasky and M. Polak: *Cryogenics* 16 (1976) 97
- 4) C.R. Spencer, P.A. Sanger and M. Young: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-15** (1979) 76
- 5) B. Turck, M. Wake and M. Kobayashi: *Cryogenics* 17 (1977) 217
- 6) H. Maeda, M. Urata, M. Kageyama, S. Kabashima and Y. Oda: A.S.C. in Snowmass (1990)