デジタル・シグナル・プロセッサを用いた 高速クエンチ検出システムの開発

犬飼 英吉, 中村 光一*, 阿部 良弘**

中部電力株式会社技術研究所 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

* 名古屋工業大学電気情報工学科 名古屋市昭和区御器所町

** 名古屋工業大学材料工学科 名古屋市昭和区御器所町

(1992年12月3日受理)

Development of the High Speed Quench-Detecting System
Using a Digital Signal Processor

Eikichi INUKAI, Koichi NAKAMURA* and Yoshihiro ABE**

Electric Power R & D Center, Chubu Electric Power Co., Inc., 20-1, Kitasekiyama, Ohdaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459

* Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466

** Department of Materials Science & Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466

(Received December 3, 1992)

Synopsis :

The conventional electric quench-detecting system of AC superconducting coil is vulnerable to the electromagnetic noise, so the systems have problems in quench-detecting sensitivity and reliability. Recently the systems combined with physically different methods for the purpose of increasing reliability were reported. If oxide superconductor in R & D are applied to current lead of superconducting coil, such type of current lead is supposedly composed of a simple bulk structure. It is potentially brittle and catastrophic under thermal shock by rapid temperature rise when quenching occurs. Moreover, because of thermal insulation, the fully stabilized design is not applied to the current lead. So, higher speed quench-detecting system is required. This paper presents the development of high speed quench-detecting system using personal computer and digital signal processor (DSP). The DSP is a processor to realize the fast calculation of addition (subtraction) and multiplication by pipe line processing. Basically the four-terminal method is used. The quench-detecting is performed by evaluation of the mutual correlation factor for current through the current lead and its potential difference. In the superconductive state the voltage is measured which leads by $\pi/2$ radians to the alternative current, then the factors is ideally equal to zero. On the other hand, in the quenched state the voltage is deformed due to superposing the resistive voltage component emerged, the evaluated factor results in having some non-zero values, and thus the quenching can be detected. In this paper, it is indicated that the calculation of the factor can be processed for every one cycle of current and voltage, and the quenching recognition is performed at least within 17 ms for current of 60 Hz. This value would be reasonable for the protection of the coil system from catastrophe. It was also discussed that the method using the mutual correlation factor can well recognize the quenching state, even if the higher harmonics due to the electromagnetic noise were included in the measured voltage.

1. はじめに

交流超電導コイルの電氣的クエンチ検出法は、現場

の信号回路に、超電導コイルの磁束変化により大きな誘導ノイズが入り、S/N比が小さく、検出感度、信頼性に問題がある。このため信頼性を上げるため、物

理的に全く異なった方法を組み合わせる等の工夫をした方法が発表されている²⁾。

近年、液体ヘリウム冷却の超電導コイルの電流リードに、外部からの熱侵入の小さい酸化物超電導体を使用した電流リードの研究開発が行われている。酸化物超電導体電流リードの実用化製品は、棒状あるいはパイプ状のセラミックスバルク体を使用した構造が予想される。これらは脆性材料であり、大きな熱衝撃によって破壊する。その上、大型超電導コイルは完全安定化設計ができるが、このような電流リードは、クエンチ電流を一時的にバイパスし、急激な常電導転移を起こさないようにする安定化材（銅等の熱伝導率の高い金属が使用されている）が熱絶縁上付加できない。したがって、クエンチによる温度上昇をより速く確実に検出するシステムが必要となる。

我々は、ノイズに影響され難く、しかもクエンチ検出時間が速い交流超電導コイルのクエンチ検出保護システムの開発を目指して研究を行っている。このシステムは波形ベースでデジタル計算によってクエンチを検出する方式であり、独自の発想に基づく高速演算素子 DSP（デジタル・シグナル・プロセッサ）を用いたシステムである。

この原理は超電導状態の機器がクエンチを起こすと超電導体内に抵抗が生じ、このため電流リード端子間の電圧波形が変化することを利用するものである。変化の評価は、電圧と電流の規約相互相関係数 ρ （以下、相関係数と略記する）を DSP により高速演算しながら常時監視し、 $|\rho|$ の大きさに基づいてクエンチを判定する方法である。

本研究は、酸化物超電導体試料により実験したが、この方法は、インダクタンス分が大きく、電磁誘導による誘導ノイズの影響を受けやすい交流超電導コイルのクエンチ検出にも適していると思われる。

この方法のメリットは次のとおりである。

① 規約化相関係数を用いるので、その相関係数は電圧、電流の振幅よりも波形の形状に強く依存した傾向を示す。したがって、波形の変化をパターン認識的に検出するので、電磁氣的ノイズにより誤動作し難いので、信頼性が高い。

② リアルタイムで波形の変化を相関係数というデジタル値で評価し、リアルタイムで処理する方法なのでクエンチの発生により二次的に起こる物理的現象、温度上昇、AE、液体ヘリウムの蒸発現象等を検出する方法より時間的に速くクエンチ現象を検出できる。

Fig.1 The voltage always leads the current by $\pi/2$ radians in superconducting state as illustrated by (a). If quenching occurs, the voltage waveform changes as shown in (b), due to superposing the resistive component with the same phase of current (see Fig.4).

その検出時間は酸化物超電導体の熱衝撃による破壊を防止するのに充分余裕のある値である。

③ 汎用のパソコンや、通常の電圧、電流測定装置等で構成できるので安価である。

2. DSP を用いた高速クエンチ検出システム

2.1 検出法の原理

起電導状態にある酸化物超電導体に、正弦波交流電流を流すと、通常は抵抗分は 0 であるが、リアクタンス分により位相が電流より 90 度進み、Fig.1(a) のような正弦波交流電圧が現れる。次に、電流が臨界電流以上になると、抵抗分が生じ、電流と同相の正弦波交流電圧が現れ、リアクタンス分による電圧に重畳し、Fig.1(b) のような電圧波形に変化する。これについては、次章 3.1 で実際の波形を分析した結果を説明する。

この電流波形に対する電圧波形の変化を電圧、電流の相関係数 ρ の変化でとらえる。すなわち、Fig.1(a)

Fig. 2 High-speed quenching detecting system using digital signal processor and superconductor current leads of oxide superconductor connected to superconducting coil.

Fig. 3 Flow chart of data processing and quenching detecting system. E: voltage, I: current, ρ : coefficient of correlation.

の場合は $\rho \approx 0$ であるが、同図 (b) の場合は $|\rho| > 0$ である。本システムは次のように機能する。

① 電流リードの電流と電圧のデジタルデータを DSP に転送する。

② DSP で 1 サイクル 波形に対する相関係数 ρ を演算する。

③ ρ が適当なしきい値以上になったら、クエンチと判断して、クエンチ保護装置に動作信号を与える。

2.2 システムのハードウェア構成

本システムは、例えば、Fig. 2 に示すように、上部は液体窒素により、下部は液体ヘリウムにより極低温に冷却されている電流リード端子電圧を検出する電圧検出器、電流を検出する非接触型電流センサ、およびこれらのアナログ値をデジタル値に変換する A/D 変換器、これらの電圧、電流データの相関係数を高速演算する DSP 拡張ボード、システム全体をコントロールするパソコンにより構成される。

DSP は積和演算の高速処理に優れたプロセッサで、ここでは富士通社製、MB-86220 を搭載した拡張ボードをパソコン(例えば PC-9801)の拡張スロットに接続して使用した。

2.3 クエンチ検出のソフトウェア

Fig. 3 はクエンチ検出に関するデータフローおよびシグナルフローを示す。

① クランプオン型電流センサからの電流信号、電

Fig.4 Voltage waveforms divided into reactive component and resistive component in quenching state of superconductor test piece.

圧検出器からの電圧信号を A/D 変換器により、デジタル信号に変換する。採用したサンプリング周波数は 3 kHz であるので、1 サンプル時間は 333 μ s となる。したがって、60 Hz の 1 波形から 50 個のサンプル値が得られる。

② 負から正に変わる電流のゼロクロスを検出したときのみ、DSP に転送されてきた 1 サンプルの電流、電圧データと、それ以前に記憶している 49 個と合わせたそれぞれ 50 個のデータについて、(1) 式により、相関係数 ρ を演算する。この演算時間は約 100 μ s で、次の 1 サンプルデータが転送されるまでの時間の 1/3 以内である。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n V_i I_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2 \sum_{i=1}^n I_i^2}} \quad (1)$$

③ 相関係数 ρ の絶対値 $|\rho|$ をしきい値 α と比較する。(電流、電圧が理想的な基本波のみの正弦波ならば、超電導時は $\rho=0$ 、クエンチ時は $|\rho|>0$ となる。ここでは、現場での歪波交流、ノイズを考慮して、 α に適当な値を与えることにする。)

④ $|\rho|>\alpha$ となれば、クエンチ検出信号を出す。

⑤ このクエンチ検出信号をカウントする。

⑥ カウント数が設定値に達したら保護装置に動作信号を出す。

3. 試験結果および考察

3.1 クエンチ発生時の電圧波形の分析

検出法の原理を理解するため、クエンチ発生時の電

Fig.5 Mutual correlation factor ρ calculated in quenching state of another superconductor test piece.

圧波形の変化を実測し、その波形の分析を試みる。Bi 系酸化物超電導体を用いた酸化物超電導体試料 (パイプ型 Bi 超電導体, $J_c=80$ A/cm², 長さ 103 mm, 外径 15 mm, 内径 14 mm) に電流を流し、クエンチ発生時の電流、電圧波形を観測したところ、Fig.1 (b) のようになった。この実測電圧波形から、電流リードの実測リアクタンスに角周波数 ω と電流の 90 度進み成分を掛け合わせた電圧成分 (Reactive component voltage) を差し引いた残余の成分は抵抗分電圧波形であり、Fig.4 のように分離できる。この電圧波形が電流値 0 付近で少し変形しているのは、電流が臨界電流値以下になると、超電導状態に復帰するので抵抗が 0 となるためである。

Fig. 6 The figure illustrates the calculation results of the mutual correlation factor for waveforms including higher harmonics corresponding to pseudo noise.

3.2 クエンチ発生時の相関係数とノイズの影響

同じ形状の試料に電流を流し、超電導状態の電圧波形 Fig. 5(a) とクエンチ発生時の電圧波形同図(b), (c), (d)との相関係数 ρ を計算すると、各図に示すような結果が得られた。同図(a)では相関係数が0でないのは、電圧増幅器の位相遅れ特性が影響しているものと考えられる。同図(b), (c), (d)のようにクエンチが進展するに従い相関係数の絶対値が大きくなることがわかる。

また本システムの実用に際しては、交流磁束の変化によって、電圧波形に大きな電源高調波ノイズが入ると思われる。そこで基本電圧波形に、それと同一振幅の高調波を加えた模擬電圧波形に対し、相関係数を求

め比較した。

Fig. 6(b)に示すような超電導のインダクタンス分のみによる電圧に、実際のノイズを模擬した基本波の100倍および300倍の高調波を重畳した電圧に対し、相関係数は $\rho = 2.56 \times 10^{-18} \approx 0$ となった。このときのサンプル時間は1周期の2/10,000とした。

また Fig. 6(b') は同図(b)の波形を1周期40個でサンプルしたデータで、この場合の相関係数は $\rho = 28.40 \times 10^{-20} \approx 0$ となった。

Fig. 6(b)の電圧にさらに、Fig. 6(c)に示すようなクエンチを模擬した抵抗分による電圧 $(\sin \omega t - 0.2)^2$ を重畳した場合、相関係数は $\rho = 0.203$ となった。また同図(c')は1周期40個のサンプルデータに対応する

もので、相関係数は $\rho=0.122$ となった。

このように比較的大きなノイズが重畳しても、クエンチにより基本波が少しでも変化すれば、相関係数もそれに対応して変化するので、クエンチ現象を明確に判別できることがわかる。

3.3 クエンチ検出時間

前述したように、酸化物超電導体の破壊を防止できるクエンチ検出時間を超電導コイルも含めた機器の許容最長時間と考えて、本システムのクエンチ検出時間を考察した。

筆者らは、酸化物超電導体がクエンチにより抵抗を生じたとき、その消費電力と温度上昇の関係を報告した³⁾。それによると、交流の電流が相対的に小さい場合、臨界電流値を一時的に上回って超電導体素子に磁束流抵抗と称する抵抗が発生しても、超電導体が臨界温度以下ならば、電流が小さくなると、磁束流抵抗は消滅して再び超電導に復帰する。それが周期的に繰り返される。しかし、一度臨界温度を超えると、新たに生じた常電導抵抗によるジュール熱が加わり、さらに素子温度は上昇するため、超電導状態への周期的復帰が困難になることがわかった。そして液体窒素温度から素子の臨界温度までに断熱的に上昇に要したエネルギーを臨界累積エネルギー P_c と定義し、77 K の超電導体が臨界温度 T_c に達するまでの時間 τ を算出する式を実験的に導出した。それによれば、

$$\tau = 2n^2 P_c / J_c^2 k^2 \rho \quad (2)$$

ここに、 P_c : 臨界累積エネルギー (J/cm^3)、 J_c : 電流リード負荷電流 (A/cm^2)、 k : 短絡電流/負荷電流、 ρ : 臨界温度における抵抗率 ($\text{m}\Omega/\text{cm}$)、 n : 素子の臨界電流を負荷電流の波高値で除した値。

ここに P_c は素子の密度 m と比熱 C によってほぼ一義的に決まり、Y 系超電導体、Bi 系超電導体のように $m=5\sim 6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $C=120\sim 130 \text{ J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ の素子ならば、 P_c は大略 $15 \text{ J}/\text{cm}^3$ の例が得られている。いま $J_c=100 \text{ A}/\text{cm}^2$ 、 $\rho_M=0.17$ 、の素子で負荷電流は臨界電流の $1/2$ 、すなわち $n=1/2$ とする。この負荷電流通電時に、何らかの原因により電流リードのみにクエ

ンチが発生した場合を考えると、 $k=1$ である。素子温度が 77 K から $T_c=89 \text{ K}$ に断熱的に上昇すると仮定し、その時間 τ を計算すると、 $\tau=4.4 \text{ s}$ を得る。この値はクエンチが起きても、負荷電流を遮断すれば液体窒素の冷却効果により再び超電導状態に復帰できる許容最長時間であり、かつクエンチ検出許容最長時間でもある。つまりこの時間内にクエンチを検出し電流を遮断すれば、電流リードのクエンチ現象の進展をくい止め、電流リードの熱的破壊を未然に防止できる。

またこの間の温度変化速度を求めると $12 \text{ K}/4.4 \text{ s}$ である。またこの程度の温度変化速度、熱衝撃 (温度差 Δt で表す) は、電流リードの厚さ等形状にもよるが、問題は無いものと思われる。

今回開発した高速クエンチ現象検出システムによれば、60 Hz 交流ならば少なくとも 17 ms 程度で検出できる。したがって前記温度変化速度から熱衝撃 Δt は 0.05 K 程度と推定される。設定値に裕度を取り、保護装置の動作時間を加算しても、許容最長時間内に電流を遮断し、クエンチによる機器の破壊を充分保護できると思われる。

4. おわりに

最後にこの研究に色々ご教示をいただいた株式会社電力・核融合開発技術部藤岡 勉主査に厚く御礼申し上げます。またご協力いただいた名古屋工業大学電気情報工学科梅野正義教授、材料工学科春日敏宏助手、同電気情報工学科大学院生千葉浩明君、卒研究生加藤進君、武蔵工業大学電気電子工学科曾禰元隆教授、卒研究生八重崎政志君に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、吉田 清: 低温工学 **24** (1989) 276
- 2) 例えば、A. Ninomiya, Y. Kanda, Y. Uriu, T. Ishigohka, T. Mito, K. Takahata, M. Sakamoto and J. Yamamoto: 1992 Applied Superconductivity Conference, Chicago, Aug.
- 3) 中村, 伊藤, 川島: 電気学会論文誌 B, **111** (1990) 1121