部分有効電力検出法による高温超電導及び 交流用金属超電導コイルのクエンチ検出

学生員 七戸 希 (名古屋工業大学)

正 員 中村 光一 (名古屋工業大学)

Quench Detection of HTS Coil and AC LTS Coil by Partial Active Power Detecting Method

Nozomu Nanato, Student member, Koichi Nakamura, Member
(Nagoya Institute of Technology)

Excessive ohmic heating may damage superconducting wires when a quench occurs in a superconducting coil and hence it is necessary to detect the quench as fast as possible in order to protect the superconducting coil. We have proposed a new quench detecting method, which can detect an active power after a quench with high precision.

In this paper, in order to investigate the usefulness of the proposed method for HTS (High Temperature Superconducting) coils, quench detection tests of a small HTS coil are carried out and the results are presented. In general, HTS coils are not necessarily self-protective because quench propagation velocities in high T_c superconductors are slower than those in low T_c superconductors. Therefore a quench detecting method with high precision and fast response is required for HTS coils. Through the quench detection tests of a small Ag/Bi-2223 HTS coil, the usefulness of the proposed method is investigated. In addition, through the off-line quench detection tests of AC LTS (Low Temperature Superconducting) coils by the numerical simulation, the usefulness of the proposed method for AC LTS coils is also discussed.

キーワード: クエンチ検出, 部分有効電力検出法, 高温超電導コイル, 交流用金属超電導コイル

Keywords: quench detection, partial active power detecting method, HTS coil, AC LTS coil

1. まえがき

超電導コイルにクエンチが生じると巻線抵抗で過大な発熱が起こり超電導線の焼損・劣化等が生じる可能性があるため、クエンチを早期に検出しコイルを保護する技術は不可欠である。そこで著者らは精度の高い超電導コイルのクエンチ検出法として「部分有効電力検出法」を提案し、試験用 NbTi 金属超電導小コイルを用いたクエンチ検出実験結果から次のような特長を報告した^{[1][2]}。①クエンチ後に生じた巻線抵抗で消費される有効電力を検出することでクエンチ検出を行う、②ノイズ（電磁誘導ノイズなど）に対する耐性があり、ノイズによるクエンチの誤判定を回避できる、③交流・直流どちらを通電している場合でもクエンチ検出が可能である。

上記報告では、金属超電導小コイルで提案法の有効性を確認したが、本論文では、オンラインクエンチ検出実験による高温超電導コイルに対する提案法の有効性検証及びオフライン数値シミュレーションによる交流用金属超電導コイルに対する提案法の原理検証を行う。近年高温超電導線材、特に Ag/Bi-2223 テープ線材の開発が進んでおり、コイルの試作も行われるようになった。高温超電導線材（コイル）では金属超電導コイルに比べてクエンチ伝播速度が遅いためクエンチが局所的に起こりやすくクエンチ後の上昇温度も大きくなる^[3]。よって、より速く確実にクエンチを検出する必要がある。そこで提案法を用いて、Ag/Bi-2223 高温超電導小コイルのクエンチ検出実験を行い、その結果を報告する。実験では、単相 PWM (Pulse Width Modulation) インバータからクエンチ電流以上の振幅を持った様々な周

波数の正弦波電流を突発的に数サイクル通電した場合とヒータを用いた場合においてオンラインでクエンチ検出を行い、上記課題について検証した。また、交流用金属超電導コイルに対しては、クエンチ波形データ（クエンチ前後のコイル両端電圧、電流波形）を用いたオフライン数値シミュレーションにより、提案法の原理検証を行った。以下の各章を通じてこれら実験結果に関する検討を行う。

2. 部分有効電力検出法

図1に部分有効電力検出法の説明図を示す。コイルの両端および中間に電圧端子を取り付け、電圧 v_1 、 v_2 および電流 i を検出する（文献[1][2]に比し、クエンチ検出回路に入力される電圧 v_1 をさげるために同図のように電圧を検出することとした）。

ここで、

$$P = (v_1 + v_2) i \quad \dots \dots \dots (1)$$

と定義すると、超電導状態において

$$P = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

となり、常電導状態（クエンチ時）において

$$P = (r_1 - r_2) i^2 \quad \dots \dots \dots (3)$$

となるため、(2)、(3)式から理論的には P （瞬時有効電力）を観測することでクエンチを検出できることがわかる。し

r_1, r_2 : Winding resistance emerged with the quench
 α : Constant (≈ 0.5), L : Inductance

図1 部分有効電力検出法説明図

Fig. 1. Explanation for a partial active power detecting method.

図2 検出回路のブロック線図

Fig. 2. A block diagram of the quench detector.

かしながら、実際上はノイズ（電磁誘導ノイズ等）の重畳により、超電導状態においても P は 0 にならず、クエンチが誤判定される可能性がある。そこで、(3)式に直流成分が含まれている（ P が電流自乗に比例することに依る）ことに着目し、LPF（low pass filter）を用いてノイズを除去する。すなわち、LPF によってノイズは減衰するが直流成分は減衰せず通過するため S/N 比の高い信号を得ることができ、精度の高いクエンチ検出が可能となる。 P をフィルタリングしたものを P' と定義し、これを部分有効電力と呼ぶこととしクエンチ検出パラメータとして用いる。なお、ここでは $\alpha = 0.5$ の場合を例に説明したが、必ずしもそうである必要はない。 $\alpha \neq 0.5$ のときは、 v_1 もしくは v_2 に適切な係数を乗じることで(1)式右辺の括弧内（電圧の和）が 0 になるように調整すればよい^[1]。

図2にクエンチ検出回路のブロック線図を示す。この回路はオペアンプ等の電子回路で構成され最も簡易で外乱の影響を受けにくい構造となるように設計した。同図に示された過程で P' が算出され、クエンチ判定は比較器で閾値比較によりなされる。なお、以下の実験では、LPF の遮断周波数は 10Hz（一次）である。

3. Ag/Bi-2223 高温超電導コイルのクエンチ検出

<3.1> 実験概要 高温超電導コイルのクエンチ検出実験には図3に示す Ag/Bi-2223 高温超電導小コイル（株）昭和電線電纜製）を用いた。その諸元を表1に示す。このコイルは二層構造の二つのコイルがグレーディング（コイル中心が同じ位置になるように配置）された構造になっており、内側コイルの電圧が v_1 、外側コイルの電圧が v_2 に相当するように電圧端子を設けた。なおコイルは液体窒素浸清冷却されている。図4に示す単相 PWM インバータからクエンチ電流以上の振幅を持った様々な周波数の正弦波電流が突発的に通電されるように電圧を印加した場合およびコイル（内側コイル）に取り付けたヒータ（10mm×100mm, 0.1W）を使用した場合の二通りでクエンチを起こした。なお、ヒータを用いた実験のときには、差分法（ブリッジ回路による電圧差分から抵抗性電圧を検出するクエンチ検出法）^[4]と提案法との比較を行うために、差分電圧（ $v_1 + v_2$ に相当）の観測も同時に行った。

<3.2> 実験結果 図5に過電流によるクエンチ実験結果の4例を示す。これらは、同図(a)から(d)の順に 30Hz から 10Hz きざみで 60Hz までの周波数を持った電流を通電した場合における結果である。電流波形にひずみが生じているのは、突発的に電圧を印加したことによる過渡状態（誘導成分）の影響である。いずれの場合においても P' はクエンチ後急激に変化しており、明確にクエンチが検出されている。 P' はクエンチ後下向きに変化していることから、クエンチは外側コイルで生じている。本実験の場合、インバータによるスイッチングノイズが多量に電圧波形 v_1 、 v_2 に混入しておりかつクエンチ直後にコイルで消費される有効電力も数 mW と微小であったが、 P' はほとんどノイズを含ま

図3 Ag/Bi-2223 高温超電導コイルの外観
Fig. 3. Photograph of Ag/Bi-2223 HTS coil.

表1 Ag/Bi-2223 高温超電導コイルの諸元
Table 1. Specifications of Ag/Bi-2223 HTS coil.

Wire	
Width	1.5mm
Thickness	0.2mm
Ratio of silver	3.5
Filament number	37
Critical temperature	109.2K
Critical current(1μV/cm) at 77K	6.9A
Inner Coil	
Inner diameter	φ113.7mm
Outer diameter	φ115.7mm
Height	106.0mm
Number of turns	104
Inductance	0.9mH
Outer Coil	
Inner diameter	φ117.4mm
Outer diameter	φ119.3mm
Height	104.2mm
Number of turns	100
Inductance	0.9mH
Coil	
Inductance	3.5mH

図4 実験装置
Fig. 4. Experimental setup.

(a) 30Hz

(b) 40Hz

(c) 50Hz

(d) 60Hz

図5 過電流時の高温超電導コイルのクエンチ検出実験結果

Fig. 5. Experimental results of the quench detection of a HTS coil in the over current.

ず高いS/N比を持った信号として観測でき、その検出の精度は通電電流周波数に依存することもない。また、本実験から、使用した高温超電導コイルのクエンチ電流は2A前後であったが周波数によって多少の差異を示すことが観測された。交流損失などの要因が考えられるが、本論文の主目的はクエンチ検出であるため、ここでは事実だけを述べることにし今後の検討事項としたい。

次に、図6にヒータを用いた場合における実験結果を示す。同図(a)、(b)は直流2Aを通電したときの実験結果である。ヒータ投入後、(a)からクエンチ後に生じた抵抗が微小であったため電流はほとんど減衰していないことがわかるが、(b)より P' は急激に立ち上がりおりクエンチが検出されていることがわかる。同図(c)、(d)は60Hz、1.4Apeakの交流電流を通電したときの実験結果である。(a)、(b)と同様、クエンチ後に生じた抵抗は微小であるが、クエンチは明確に検出されていることがわかる。図4に示すように、ヒータは内側コイルに取り付けられているため、クエンチ後 P' は上向きに変化しており、内側コイルでクエンチが生じたことを示している。図5、6から提案法は高温超電導小コイルのクエンチ検出に有効であることが予想される。なお、本実験に用いた高温超電導コイルに対するクエンチ検出回路の閾値は、様々な周波数の実験結果からコイル保護に十分なクエンチ検出時間を見定める $\pm 5\text{mW}$ と経験的に設定した。

<3.3> 差分法との比較 提案法と同様に電氣的にクエンチを検出する手法として差分法がある。電氣的クエンチ検出は応答が速くかつ簡単なシステムで実現できるといふ利点があり、差分法は信頼性の高い検出法として一般的に用いられている。本節ではその差分法との比較検討を行うことで提案法の有効性を検証する。

図7に前節のヒータ実験(図6)のときに観測した差分電圧を示す。同図(a)は直流電流通電時の差分電圧である。差分電圧はクエンチに伴って立ち上がりを示しているが、本実験ではインバータから多量のスイッチングノイズが発生しているため、多量のノイズが差分電圧に混入しており、S/N比が提案法に比べ低い信号となっている。また、差分電圧の立ち上がりの大きさも P' に比べて緩やかである(差分電圧は電流に比例し P' は電流自乗に比例することに依る)ため、フィルタ処理等によって差分電圧のノイズを除去したとしても、提案法はより速くクエンチを検出できると考えられる。同図(b)は交流電流通電時の差分電圧である。クエンチに伴い抵抗性交流電圧が発生しているが、同図(a)と同様多量のノイズが混入している。また、信号が交流であるため、フィルタ処理をするとノイズとともにクエンチ信号(抵抗性交流電圧)も減衰するのでフィルタ処理によるノイズ除去は難しい。よって抵抗性交流電圧を検出するにはロックインアンプを用いて同期信号として検出するのが一般的であろう。しかしながら提案法の場合は、瞬時有効電力(3式)をクエンチ検出パラメータとして用いており、そのクエンチ信号は直流成分を持っているため、フィ

(a) DC current (2A)

(b) P' (DC)

(c) AC current (1.4Apeak, 60Hz)

(d) P' (AC)

図6 ヒータ使用時の高温超電導コイルのクエンチ検出実験結果

Fig. 6. Experimental results of the quench detection of a HTS coil in the use of the heater.

表 2 交流用金属超電導コイルの諸元

Table 2. Specifications of AC LTS coils.

Coil A			
Strands and cables			
Strand diameter	0.112mm ϕ	Space factor	1/4.28
Filament diameter	0.63 μ m ϕ	Twist pitch	0.98mm
Filament spacing	0.145 μ m	Strand insulation	none
Number of filaments	7381	Structure	3X3X3X3X3
Matrix	Cu-10wt%Ni		
Coil			
Diameter	10cm ϕ	Number of turns	17
Coil B			
Strand			
Diameter	0.25mm ϕ	Twist pitch	1.25mm
Filament diameter	0.136 μ m ϕ	Twist pattern	Z
Number of filaments	597102	Insulation	none
NbTi/CuNi/Cu	1/4.3/0.12		
Cable			
Structure	6+1	Central core	SUS
Diameter	0.75mm ϕ	Central core insulation	none
Cabling pitch	7.53mm	Cable insulation	none
Cabling pattern	Z		
Coil			
Number of layers	8	Rated capacity	283 kVA-50Hz
Number of turns	800	Rated voltage	1885Vrms
Inner diameter	94mm ϕ	Rated current	150Arms
Outer diameter	152mm ϕ	Rated maximum magnetic field	1.17Tpeak
Height	150mm	Inductance	39mH
Coil C			
Strand			
Matrix	Cu-2.5wt%Si	Number of filaments	164730
Ratio of Nb and Ti	Nb-50wt%Ti	Twist pitch/pattern	1.9 mm/S
Strand diameter	0.203mm ϕ	NbTi/CuSi/Cu	1.0/10.31/1.08
NbTi filament diameter	0.14 μ m ϕ	Strand insulation	none
Filament spacing	0.14 μ m		
Strand length	2560m, 2000m, 1250m		
Cable			
Structure	6+1(SUS316L)	Length	815m
Cabling pitch/pattern	6.7mm/Z	Insulation	Tetron(60mm Thick)
Coil			
Inner diameter	45.0mm ϕ	Number of turns	1905.5
Outer diameter	111.5mm ϕ	Inductance	0.143H
Height	70.3mm	Number of layers	20
Induction field constant at maximum point			24.6mT/A

(a) DC

(b) AC

図 7 差分電圧

Fig. 7. Resistive voltage signals.

ルタ処理によって容易にノイズを除去できる、すなわち直流通電時と同じ処理でクエンチ検出できる。これらの結果から、提案法は一般的に信頼性が高いとされている差分法に比べて耐ノイズ性があり、検出速度が速く、汎用性のあるクエンチ検出ができることが期待できる。

本章および文献[1][2]のオンラインクエンチ検出実験結果から、中間端子を取り付けることのできるコイル（直流用コイル、小型コイルなど）であれば提案法を用いることで速く確実なクエンチ検出が簡易なシステムで実現可能であることが予想される。

4. 交流用金属超電導コイルのクエンチ検出

<4.1> 数値シミュレーションによる部分有効電力検出法の原理検証 表 2 に三種の交流用金属超電導コイル（A, B, C すべて液体ヘリウム浸清冷却）[5]–[7]の諸元を示す。これらのコイルには中間端子が設けられていないため、ここではクエンチ波形データ（クエンチ前後のコイル両端電圧、電流波形）を用いて、これらのコイルに中間端子が設けられていることを仮定したオフライン数値シミュレーションによるクエンチ検出から提案法の交流用金属超電導コイルに対する有効性について検討する。提案法は瞬時皮相電力中の交流損失及び無効電力を抑制しクエンチ後のコイル巻線抵抗で消費される有効電力のみを検出する手法で

図 8 数値シミュレーションのフローチャート

Fig. 8. A flow chart of the numerical simulation.

ある。その際に提案法では中間端子を使用するが、上述のように、表 2 に示したコイルは中間端子を持っていないので図 8 に示す数値シミュレーションにより提案法を模擬した。すなわち、

1. コイル両端電圧 v と通電電流 i を乗じて瞬時皮相電力を求める

2. 交流損失等価抵抗 r_L をクエンチ前の平均電力

($r_L \int_0^T i^2 dt$) から求める (T: 電流周期)

3. 電流微分, インダクタンスおよび電流の積から無効電力を求める

4. 1 から 2 と 3 を減じて巻線抵抗 r で消費される有効電力を求め, フィルタ処理 (10Hz) する

という過程で, 三種のコイルに対する提案法の適用を模擬した。この数値シミュレーションでは(3)式のような差分が算出されないため厳密には提案法を適用した場合とは異なるが, クエンチが起こった瞬間に生じる抵抗は(3)式の r_1 もしくは r_2 のどちらかであることを考慮すれば, クエンチ直後であれば差分を考慮する必要はない。よってクエンチ検出の場合のように, クエンチ直後の波形を取り扱うことに関してはこの数値シミュレーションは提案法の模擬として問題はない。

図 9, 10 にシミュレーション結果を示す。図 9 は各コイルのクエンチ前後の電流・電圧波形である。図 10 は図 9 のそれぞれの電流・電圧波形に対する P' の波形である。両図において(a)はコイル A (電流周波数 48Hz), (b)はコイル B (同 53.04Hz), (c)はコイル C の実験結果 (同 69.03Hz) である。図 10 から, いずれのコイルにおいても明確にクエ

ンチが検出されていることがわかる。また, 各コイルの結果を比較すると P' の立ち上がり方に違いが生じている。これはコイル巻線に用いられている線材の銅比と通電電流値の違いによるものである。A→B→C の順で銅比が大きくなり電流値が小さくなっているため, 順に線材の抵抗が小さくかつ常電導伝播速度が遅くなり^[8], それに伴って電流の減衰の仕方が緩やかになる。そのため P' の立ち上がりも緩やかになっているのである。したがって, 銅比が高いほどクエンチ検出が遅れることになる。しかし逆に, 銅比が高ければコイルの安定度が高く (急激な常電導転移を起こさない) なり, 急激な温度上昇が生じにくくなることを考慮すれば, この遅れは問題ではない。このことから, 表 2 のコイルに中間端子を取り付ければ提案法によりクエンチ検出が可能であると予想される。

5. まとめ

本論文では新しいクエンチ検出法として提案した部分有効電力検出法による Ag/Bi-2223 高温超電導小コイルのオンラインクエンチ検出実験による提案法の有効性検証および三種の交流用金属超電導コイルを用いたオフライン数値シミュレーションによる提案法の原理検証を行った。高温超電導コイルの実験結果から, クエンチ後に生じる有効電

(a)Coil A (48Hz)

(b)Coil B (53.04Hz)

(c)Coil C (69.03Hz)

図 9 電流・電圧波形

Fig. 9. Waveforms of the current and voltage.

(a)Coil A (48Hz)

(b)Coil B (53.04Hz)

(c)Coil C (69.03Hz)

図 10 P' 波形

Fig. 10. Waveforms of P' .

文 献

- [1] 七戸, 川田, 中村: “超電導コイルクエンチ検出のための部分有効電力検出法の提案”, 電学論 B, 119 巻 11 号, pp. 1174-1180 (1999)
- [2] 柳下, 他: “DSP を用いた部分有効電力検出法による超電導コイルのリアルタイムクエンチ検出”, 高速信号処理応用技術学会誌, 第 2 巻 4 号, pp. 11-16 (1999)
- [3] R. H. Bellis and Y. Iwasa: “Quench propagation in high Tc superconductors,” Cryogenics, vol. 34, No. 2, pp. 129-144 (1994)
- [4] 低温工学協会: “超伝導・低温工学ハンドブック”, オーム社, p. 603
- [5] 鳥居, 他: “1kA 級トリプレックス交流超電導燃り線導体の特性”, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-92-58/RM-92-121 (京都), pp. 113-118, 1992 年 12 月
- [6] 鳥居, 他: “エポキシ充填固定交流超電導巻線の通電特性”, 電学論 B, 116 巻 7 号, pp. 798-803 (1996)
- [7] H. Kasahara, S. Akita and S. Torii: “Development of 100kVA AC Superconducting Coil Using NbTi Cables with a CuSi Alloy Matrix”, IEEE Trans. Magn. vol. 32, No. 4, July, pp. 2751-2755 (1996)
- [8] 電気学会: “超電導工学 (改訂版)”, オーム社, pp. 90-93 (1988)

力が微小であり且つインバータからスイッチングノイズが多量に発生している環境でも高い S/N 比を持ったクエンチ信号を得ることができ, その特性は電流の振幅, 周波数にも依存しないため, 提案法は高精度且つ汎用性のある手法であると言える。またオフライン数値シミュレーションによる交流用金属超電導コイルのクエンチ検出結果から, 中間端子を取り付ければ提案法はこれらのコイルに対しても有効であることが予想される。これらより, 提案法は中間端子を取り付けることのできるコイルであればどのようなコイル・運転状況に対しても精度よくクエンチ検出可能であることが期待できる。

しかしながら, 一般的には交流用コイル (大型, 実用機) では電圧対策から中間端子を設けることやコイルから多くの計測線を引き出すことは難しい^[4]。本文中の数値シミュレーションがオンライン化できれば中間端子を設けずに有効電力検出できるが, 交流損失等価抵抗は結果から得たパラメータであり, 微分演算はノイズ等の外乱を拡大するため, これをオンラインシステムとして構築することは難しいと考えられる。よって今後は中間端子を必要としない電氣的クエンチ検出について検討していく予定である。

謝辞 最後に, 高温超電導コイルの作製をしていただきました (株) 昭和電線電纜の大谷望氏, データの提供等していただきました電力中央研究所の鳥居慎治氏, 秋田調氏, (株) 東芝の関係各位, 研究にご協力いただきました名古屋工業大学システムマネジメント工学科助教授の鶴飼裕之氏, 同電気情報工学専攻修士課程 2 年の柳下正弘君に謝意を表します。

本研究の一部は科学研究費補助金 (特別研究員奨励費, 課題番号 2053) によるものであり謝意を表します。

(平成 12 年 11 月 13 日受付, 平成 13 年 2 月 14 日再受付)

七戸 希

学会の各会員。

(学生員) 1975 年 4 月 6 日生まれ。2000 年 3 月名古屋工業大学大学院工学研究科電気情報工学専攻博士前期課程修了, 同年 4 月同後期課程入学, 現在に至る。超電導コイルのクエンチ現象に関する研究に従事。平成 12 年 4 月～15 年 3 月, 日本学術振興会特別研究員。低温工学協会, 高速信号処理応用技術

中村 光一

研究に従事。1982 年電気学会論文賞, 1989 年電気学会進歩賞, 1998 年日本大気電気学会学術研究賞。日本大気電気学会, 電気設備学会, 低温工学協会, 高速信号処理応用技術学会, IEEE の各会員。

(正員) 1942 年 3 月 7 日生まれ。1965 年 3 月名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。1966 年同助手。1988 年同助教授, 1997 年同システムマネジメント工学科教授, 現在に至る。1983～84 年クラークソン大学客員研究員。工学博士。電力系統解析, 高温超電導の電力応用, ロケット誘雷に関する研究に従事。1982 年電気学会論文賞, 1989 年電気学会進歩賞, 1998 年日本大気電気学会学術研究賞。日本大気電気学会, 電気設備学会, 低温工学協会, 高速信号処理応用技術学会, IEEE の各会員。