共巻きコイルを用いた HTS コイルクエンチ検出の高感度化

高木 智洋^{*1,†}, 有山 隆紘^{*2}, 高尾 智明^{*2}, 塚本 修巳^{*2}

Sensitive Quench Detection of the HTS Coil using a Co-winding Coil

Tomohiro TAKAGI^{*1,†}, Takahiro ARIYAMA^{*2}, Tomoaki TAKAO^{*2} and Osami TSUKAMOTO^{*2}

Synopsis: The authors have studied the co-winding coil method (CW method) using the co-wound coil electrically insulated from the HTS coil. In this method, the quench is detected by the voltage difference between the coil of the HTS tape (HTS coil) and the coil of the normal conductor (CW coil). The voltage induced in the CW coil caused by the change of the magnetic field is almost the same as that in the HTS coil because the coils are magnetically coupled close to each other. Therefore, it is expected that the induced voltage will be canceled with high accuracy and that the resistive voltage in the HTS coil will be detected with greater sensitivity compared to the bridge balance method, which is used commonly. In this study, quench detection applying the CW method is demonstrated using an experimental double-pancake coil. A tape with the copper layer deposited on the polymer substrate was used as the insulated conductor wire to form the CW coil. An additional pancake coil was used to expose the experimental double-pancake coil to the external magnetic field asymmetrically. It was shown that the CW method can detect the resistive voltage with greater sensitivity even when the HTS coil was exposed to the changing asymmetric external magnetic field.

Keywords: REBCO coil, quench detection, bridge circuit voltage, co-winding circuit voltage

1. はじめに

REBCO、BSCCO などの高温超電導 (HTS) 線材を用いた風力発電機、船用推進電動機、SMES 等の電力機器用、高エネルギー粒子加速器用、さらに MRI 用のコイルの開発が世界各国で精力的に進められている。これらのコイルでは発生磁界を変化させる必要があり、そのため絶縁された線でコイルを構成し、コイル電流の制御により磁界の制御を行っている。従来、HTS コイルは温度マージンやクエンチエネルギーが大きく、低温超電導 (LTS) コイルに比べてクエンチが起きにくいと考えられていた。しかし実際にはクエンチが起き、コイルが損傷を受ける事例が報告されている¹⁻³⁾。HTS 線材では常電導部の伝播速度が LTS 線材に比べ非常に遅く、適切なコイル保護をしないとクエンチは焼損させてしまう可能性が高い⁴⁾。そのクエンチ保

護条件はむしろ LTS コイルよりも厳しいと言える。

コイルがクエンチする原因は、コイル線材の一部が何らかの原因で抵抗状態になり、その部分での発熱により線材の温度が上昇し抵抗部分が広がるためである。抵抗部分の電流が続くとその部分の温度はさらに上昇し、最後には線材が焼損する。最初に抵抗状態になった部分の温度が周りに比べ高くなる。その部分の温度はホットスポット温度と呼ばれている。このホットスポット温度が高くなり周囲に急峻な温度勾配が形成されると線材は不可逆的な損傷を受け、コイルは再使用できない状態になる。このようなコイルのクエンチによる損傷を防ぐには、抵抗状態の発生を検出し、コイルを電源から切り離し、コイルの蓄積エネルギーを速やかに外部に放出する方法 (検出/エネルギー放出法) が一般に用いられる⁵⁻⁷⁾。本研究は、抵抗状態の発生を早期に高い感度で検出するための方法として、共巻きコイルクエンチ検出法について検討したものである。

近年、絶縁を施さない線材で構成した no-insulation コイル (NI コイル) の研究が行われている^{8, 9)}。NI コイルでは、線材の一部が抵抗状態になると電流がその周りの線材に分流し、抵抗状態になった部分での発熱が抑えられる。その結果コイルのクエンチが抑制され、安定性の優れたコイルが実現できる。実際その優れた安定性も実証されている⁸⁾。さらに、絶縁層が省略されることから、巻線部の電流密度が向上するという利点もある。しかし NI コイルではコイ

Received July 21, 2016

^{*1} 古河電気工業株式会社 情報通信・エネルギー研究所
〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地
Telecommunication & Energy Lab, Furukawa Electric Co., Ltd.,
6 Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba 290-8555 Japan

^{*2} 上智大学 理工学部機能創造理工学科
〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1
Department of Engineering and Applied Sciences,
Faculty of Science and Technology, Sophia University,
7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

[†] E-mail: tomohiro.takagi@furukawaelectric.com
DOI: 10.2221/jcsj.52.44

ル電流の変化に対して発生磁界に時間遅れが生じ、磁界の制御性が損なわれる。さらに、磁界変動がある場合コイル中に渦電流が発生し、場合によっては大きな損失が発生する。このため、NI コイルは一定の磁界で直流または準直流運転が主となる NMR や実験用の高磁界コイルには適しているが、その他の応用分野には適していないと考えられる。したがって、通電電流を変化させる必要のある SMES、負荷変動に伴う磁界変動がある回転機、事故時には患者保護のために緊急な消磁が必要な MRI、ビーム制御のために磁界の制御が必要な粒子加速器用マグネットには、ターン間を絶縁されたコイルを用いることが望ましい。さらに、外部コイルのクエンチ等による大きな印加磁界変化が生じた場合には NI コイルでもクエンチする可能性があり、その場合 NI コイルは蓄積エネルギーを効率よく外部に放出することができない。そのため蓄積エネルギーの大部分をコイル内で消費することになり、小型コイルではともかく、大型コイルでは損傷を受ける可能性が高い。従って本論文で扱う検出/エネルギー放出法はより汎用性が高いクエンチ保護法と考えられる。

一般に HTS コイルのクエンチ検出は、コイルに生じる抵抗電圧を検出することにより行われる。ここで抵抗電圧は線材のフラックスフロー部および常電導転移部に生じる電圧であり、ジュール発熱を伴う。この抵抗電圧の測定はコイル端子電圧を測定することで行われるが、コイル端子にはその他に、コイルの自己磁界や外部磁界の変動に伴う誘導電圧が現れる。一般的に誘導電圧は抵抗電圧より一桁から数桁大きく、これを高い精度で打ち消す必要がある。その方法として、ブリッジ回路法と共巻きコイル法の2つの方法がある¹⁰⁾。それぞれの方法において構成される回路の模式図、および測定される電圧を Fig. 1(a)および(b)に示す。共巻きコイル法では、誘導電圧検出用の共巻きコイルと HTS コイルが同じ空間を占めている。従って両コイルに鎖交する磁束が同じになるので、両コイルの外部磁界

および自己磁界変動に伴う誘導電圧は高い精度で一致する。このため、両コイルの端子電圧の差をとれば、HTS コイルに生じる抵抗電圧を高精度、高感度で検出できる。ブリッジ回路法は、HTS コイルの中性点とコイル端子につないだポテンショメータとの差電圧を取り、ポテンショメータを調整し誘導電圧をキャンセルする方法である。この方法では、非対称な変動磁界にコイルがさらされたときは誘導電圧を精度よくキャンセルできないため、抵抗電圧検出の感度に制限がでてくる。ただし、共巻きコイル法を実施するためにはコイルに絶縁された導線を共巻きにする必要があり、そのことがコイルの電流密度を低下させてしまうという欠点がある。

以上述べた、共巻きコイル法の高感度クエンチ検出特性を検証すべく、ブリッジ回路法と共巻きコイル法の両方で抵抗電圧を測定できる HTS ダブルパンケーキ (DP) コイルを作製し、さらにその2つのパンケーキコイルに対して異なる外部変動磁界を作り出すための銅コイルを合わせた試験コイル系を作製した。そして抵抗電圧の検出実験を行った。その詳細を本稿にて報告する。

2. コイルの作製

2.1 DP コイルの作製

DP コイルを作製するための HTS 線材としては、Super Power 社製の REBCO 線材を用いた。線材の幅は 4 mm、厚さは 0.1 mm、液体窒素中での臨界電流はおよそ 100 A である。線材長は 27 m で、継ぎのない一本線を DP コイルに巻いている。ターン数は両パンケーキコイルとも 34 となった。コイル完成後に測定されたインダクタンスは 1.1 mH であり、実用的なコイルと比べればごく小さい。超電導コイルのクエンチは、コイルの大きさ、インダクタンスに関わらず、局所的に生じた抵抗部が広がるために起き、ホットスポット温度は抵抗部の電流、すなわち発熱の大きさで決まる。本実験ではクエンチ電圧検出後のコイル電流の減衰を制御電源によって模擬するので、その時定数は自由に設定可能である。従って、このような小さなコイルでも大規模コイルのクエンチ時のホットスポット温度の振る舞いを模擬することができる。

一方のパンケーキコイルの第 12 ターンのすぐ外側には、模擬クエンチを発生させるためのヒータが挿入されている。さらに、第 12 ターンの HTS 線材とヒータの間には温度測定タップが挿入されている。これは両面をカプトン®テープで絶縁処理した幅 5 mm の銅箔で、その突出部に温度測定用の熱電対 (銅-コンスタンタン) が取り付けられている。ヒータの加熱部位は長さが 25 mm あるが、構造上この温度測定タップが挿入されている 5 mm の領域が特に加熱されている。温度測定タップを挿入したことにより生じる段差を解消するためその周辺部にスペーサとしてカプトン®テープを挟み込んでおり、そのためこの領域では

Fig. 1 Two circuit diagrams to measure the resistive voltage of the HTS-DP coil. The bridge circuit voltage and co-winding circuit voltage are shown as (a) and (b), respectively. Resistive parts causing resistive voltage in the HTS coil are shown as the resistance next to the coil in both figures.

Fig. 2 Schematic structure of the co-winding conductive wire.

HTS 線材－ヒータ間の熱抵抗が高くなっているからである。その他、コイルの中性点となる両パンケーキコイルの渡り部となる線材の中央をはじめとする複数の部位に銅箔を挿入・はんだ付けし、電圧測定タップを設けている。

共巻きさせる絶縁導線としては、片面を銅メッキ処理されたポリイミドテープの両側をカプトン®テープで挟んだものを用いた。この絶縁導線の概略図を **Fig. 2** に示す。銅メッキテープは、東レ社がフレキシブル基板として市販しているものをテープに裁断してもらった。カプトン®テープは一方のみ粘着性のものを用い、絶縁導線全体の厚さは 0.11 mm である。当初は線材と同じ幅の銅メッキテープを 1 枚の非粘着カプトン®テープで絶縁処理して絶縁導線としていたが、コイル作製後に HTS 線材と絶縁導線とのショート不良が多発した。その原因としてパンケーキコイル底面（巻回された線材の側部が露出する部位）への導電性ゴムの付着などが考えられたことから、銅メッキテープの幅を線材の幅よりもやや狭め、なおかつ線材と同じ幅の粘着性カプトン®テープに貼り付けてその側部の絶縁を確実にした。その結果、HTS 線材とのショート不良は発生しなくなった。

FRP 製の巻き枠にこの絶縁導線と HTS 線材とを共巻きし、電極部材をはんだ付けした後、パラフィンの真空含浸処理を行った。この時両パンケーキコイルの空隙の 4 か所に銅製のスペーサを挟み、伝導冷却のための冷却板とした。

2.2 外部磁界形成コイル

この HTS-DP コイルに変動する外部磁界をもたらす機構として、銅条によるシングルパンケーキコイル（以下 Cu-SP コイル）を用意した。これは HTS-DP コイルのさらに下段に重ねられ、電流経路は HTS-DP コイルから完全に独立している。一般にコイルは、通電時にその導体を取り巻くようなトロイダル形状の磁界を形成する。そのため、HTS-DP コイルの下段に配置された Cu-SP コイルに通電すると、HTS-DP コイルの上下パンケーキコイルが異なる磁界にさらされることになる。

Cu-SP コイルを構成する銅条は幅 4 mm、厚さ 50 μ m で、厚さ 25 μ m のカプトン®テープ（非粘着性）と共巻きにされている。これを巻き枠の周りに 85 ターン分巻回した。Cu-SP コイルの外径は、HTS-DP コイルのそれとほぼ一致する。巻き枠は厚さ 5 mm の銅製で、渦電流が形成さ

Table 1 Characteristics of the coils

Coil	HTS coil	Cu-tape coil	Unit
Shape	Double pancake	Single pancake	-
Thickness	12	4	mm
Inner diameter	120		mm
Outer diameter	136	134	mm
Turns	34 x2 +1	85	-
Turn pitch	0.22	0.08	mm
Inductance	1.1	1.9	mH
Wire	REBCO-c.c.	Cu-tape	-
Width	4		mm
Thickness	0.1	0.05	mm

Fig. 3 Bird's-eye view of the coil system.

れないように切れ目を入れている。その外径は HTS-DP コイルの巻き枠と同じ $\phi 120$ mm で、HTS-DP コイルの巻き枠と同じく 4 か所に固定用の穴が設けてある。最終的に両コイルは重ね合わされ、ベース板にボルトで固定される。ただしこの時に密着するのは両コイルの巻き枠底面のみで、ターン積層部にはわずかな空隙が存在している。HTS-DP コイルは、ヒータなどを仕込んだパンケーキコイルが上側に露出するように配置される。**Table 1** に両コイルの特性を記す。また **Fig. 3** に完成したコイル系の写真を示す。

3. 実験系

3.1 冷却機構とコイルの駆動機構

コイル系の冷却は、2 段の GM 冷凍機による伝導冷却で行っている。冷却ステージに取り付けられたヒータと温度センサにより、実験中冷却ステージ温度は 50 K に保持されていた。コイル系を乗せた銅製のベース板がこの冷却ステージにセットされ、4 か所の冷却板を介して HTS-DP コイルが冷却される。また、コイル各部位の温度測定用熱電対の基準点もこの冷却ステージにセットされた。コイル各部位の温度は冷却ステージ温度からの逸脱に応じた熱起電力として測定される。冷却ステージは輻射シールドを備えたクライオスタットに収められ、実験中その内部は真空状

態に維持される。

HTS-DP コイルの駆動は DC 制御電源で行う。PC 上の制御ソフトからのアナログ電圧出力により、その通電電流が制御される。クエンチ検出後の消磁もこの制御ソフトで行い、保護抵抗を含む回路で電流を漸減させることを想定した電流減衰挙動を模擬する。このとき、コイルと保護抵抗からなる回路における電位の関係は次のように表される。

$$L \frac{dI}{dt}(t) + RI(t) = 0 \quad (1)$$

ここで L はコイルのインダクタンス、 R は保護抵抗の抵抗値、 $I(t)$ は回路を流れる電流である。ただし駆動電源は電流を完全に遮断し、全電流が並列経路上の保護抵抗を流れているものとする。この微分方程式を解くと、電流は

$$I(t) = I(0) \exp\left[-t / \left(\frac{L}{R}\right)\right] = I(0) \exp\left[-\frac{t}{t_0}\right] \quad (2)$$

のように表され、指数関数的な減衰挙動を示すことが分かる。この t_0 が電流減衰の時定数であり、 L と R によって決まる。たとえば $L=2$ H、 $R=1$ Ω の場合、時定数は 2 秒となる。本実験系ではこの時定数を調整することにより、様々なコイルのインダクタンスや保護抵抗の大きさを模擬することができる。Cu-SP コイルの駆動にはパイボア電源を用い、電源のマニュアル操作による制御を行う。

3.2 シグナルの測定とクエンチ判定

本実験系では、HTS-DP コイルの駆動電流、各種の電圧、それにコイル各部位の温度が測定・記録される。これらのパラメータはすべて電圧として、PC に取り付けられたアナログ電圧の入出力カードによって測定される。しかしその測定精度は高くなく、シグナルの増幅が不可欠である。本実験系では、このシグナル増幅を前段の電圧測定機（ナノボルトメータ 2182A, KEITHLEY）と後段の作動増幅器の 2 段で行っている。作動増幅器はアナログ→アナログ変換であるためシグナルの遅延はほとんど生じないが、電圧測定機は内部で一度シグナルをデジタル化しており、そのせいで 0.1 秒程度の遅延が生じていることが確認されている。しかしながら、HTS コイルをシステムに組み込む際に信号処理の遅延が避けられないような状況を考慮して、本実験系ではあえてこのシグナル遅延を含める形で実験を行うこととした。

測定データの取得および記録は、HTS-DP コイルの駆動を制御する制御ソフトで行う。データの取得周期はおおよそ 3 ミリ秒である。本ソフトでは取得されたクエンチ検出電圧が 3 回連続して基準値を上回った場合に「クエンチ発生」と判定するアルゴリズムをとっているため、実際のクエンチ発生から消磁を開始するまでに制御ソフトのみで 10 ミリ秒程度を費やすことになる。

3.3 ブリッジ回路の調整

作製したコイル系を実験系にセットし、伝導冷却で 50 K まで冷却した。両コイルの電極および模擬クエンチ用ヒー

タはそれぞれの電源に接続され、温度測定用熱電対および電圧測定タップはそれぞれの電圧測定機に接続された。

HTS-DP コイル電圧を測定するブリッジ回路および共巻き回路は、基本的に Fig. 1 で示したものと同一である。ブリッジ回路を構成する抵抗はクライオスタットの外部にあり、そのうち一方は固定（1 k Ω ）、もう一方は可変である。ブリッジ回路法では、コイルの誘導電圧がコイルの各部位においてそのインダクタンスに比例して生じること、および抵抗電圧がインダクタンスに比例しないことを想定している。コイルを二分割する点、コイルと並列な経路にインダクタンスの比と同じ抵抗比を作る点を設けることでそれら 2 点を誘導電圧に関して等電位とし、そこからの電位の逸脱をモニタすることで抵抗電圧の発生を検出する。本 HTS-DP コイルでは両パンケーキコイルを結ぶ橋渡し部に電圧測定タップが取り付けられており、これを用いてブリッジ回路を構成する。とはいえ両パンケーキコイルのインダクタンスが完全に一致するとは限らず、ブリッジ回路を構成する可変抵抗を調整してできる限り精度良く抵抗電圧のみが検出されるようにしなければならない。

可変抵抗の値は、HTS-DP コイル自身の通電電流を変調させたときの誘導電圧が最も小さくなるように調整された。このときの HTS-DP コイルの変調電流は 50 ± 5 A で、振幅 5 A、周波数 2 Hz の正弦波を 50 A の定電流に重畳させた形である。そのときの電流および各種電圧の波形を Fig. 4 に示す。なおこのとき、Cu-SP コイルに誘導電流が流れないようにその回路は開いてあった。灰細線で示される電流（Ishunt）の変調に対して、灰太線で示されるコイル全電圧（Vcoil）の振動は位相が 1/4 波長分ずれており、その振幅は 43 mV である。これらの曲線は左側の縦軸に属する。一方、黒細線で示されるブリッジ回路電圧（Vbrdg）

Fig. 4 Behavior of the coil current and voltages without the external magnetic field. The coil current was modulated to 50 ± 5 A, 2 Hz, shown as the thin gray line. ‘Ishunt’ and ‘Vcoil,’ showing the measured coil current and voltage, respectively, belong to the longitudinal axis on the left side. ‘Vbrdg’ and ‘Vcow,’ showing the bridge circuit voltage and co-winding circuit voltage, respectively, belong to the one on the right side.

および黒太線で示される共巻き回路電圧 (V_{cow}) は右側の縦軸に属する。このなかで共巻き回路電圧のみ前段の信号増幅 (電圧測定機) を経由しており、それ以外のデータは後段の作動増幅器のみを介している。したがって、共巻き回路電圧はそれ以外のデータから 0.1 秒程度の信号遅延を含んでいる。

ブリッジ回路電圧では、可変抵抗の調整を行った結果ノイズの大きさ (レンジ) が 1.0 mV 程度まで低減した。コイル全電圧に見られる誘導電圧をノイズとするならば、ブリッジ回路電圧はノイズの大きさを 2 桁程度抑制できたことになる。ブリッジ回路電圧のノイズをよく見ると、誘導電圧と同じ 2 Hz の振動成分とそれよりも高周波の成分からなることが分かる。時間軸を拡大して見ると高周波成分は 50 Hz の振動を主成分としており、これはコイル電源に由来するノイズであると推測される。2 Hz の振動成分に注目すると、こちらは誘導電圧の振動から 1/4 波長分位相がずれており、符号を気にしなければ電流変調の位相に近い。理論的には、ブリッジ回路の抵抗側経路にインダクタンス成分が寄生しているとこれらのノイズが検出されることになる。本実験系では、ブリッジ回路の抵抗はクライオスタットの外側にあり、その間には熱伝導を抑えるために長く引き回された配線が存在している。この部分には小さいとはいえインダクタンスが存在しており、それがこのようなノイズを生み出しているものと推測される。

一方共巻き回路電圧を見ると、その変動幅は 0.04 mV 以下に収まっている。これはコイル全電圧の変動幅と比べて 2,000 分の 1 以下である。

4. 外部磁界変動による誘導電圧の評価

前節のようにブリッジ回路を調整した時、Cu-SP コイルの電流を変調して HTS-DP コイルの両パンケーキコイルに非対称な磁界を印加すると、ブリッジ電圧にも誘導電圧が生じる。まずはその大きさの計算を行う。

各点 $\vec{r}$ における磁界 $\vec{B}(\vec{r})$ は、下記ビオ-サヴァールの式によって求められる。

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{J}(\vec{r}') \times \frac{\vec{R}}{R^3} d^3\vec{r}' \quad (3)$$

ここで μ_0 は真空透磁率、 $\vec{J}$ は電流密度、 $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ は微小領域 $d^3\vec{r}'$ を基準とした位置ベクトルである。HTS-DP コイルの下パンケーキコイルは Cu-SP コイルより 5 mm 上方、上パンケーキコイルは同 13 mm 上方に位置しており、それぞれのコイルの中央高さにおける磁界分布の軸方向成分の計算結果を Fig. 5 に示す。ただし Cu-SP コイルの銅条における均一電流分布を仮定した。両パンケーキコイルとも軸に垂直な単一の平面内に収まっているため、本コイル系では磁界の軸方向成分のみを考えればよい。この計算結果から両パンケーキコイルを貫く延べの磁束強度が計算され、

Fig. 5 Calculated distribution of the axial component of the magnetic field caused by the Cu-SP coil. The axial base ($z=0$) was adapted to the median level of the Cu-SP coil. The black series and dark series represent the distribution at the level of the lower pancake coil ($z=5$) and the upper pancake coil ($z=13$), respectively.

Cu-SP コイルの通電電流で規格化した値は下パンケーキコイルで 0.61 mWb/A、上パンケーキコイルで 0.42 mWb/A となる。ただし両パンケーキコイルの巻き数を 35 としている。そして、これらの差である 0.19 mWb/A がブリッジ回路に誘導電圧を生じさせることになる。

これらの計算結果を検証するために、50 K に冷却されたコイル系の Cu-SP コイルに振幅 0.75 A、周波数 4.0 Hz の正弦波電流を通電した。このときの各種電圧の挙動を Fig. 6 に示す。Cu-SP コイル電流の変化速度の最大値は電流振幅 A と振動数 f により $2\pi fA$ と表され、この場合その値は 18.8 A/s と計算される。コイル全体の誘導電圧は磁束の変化速度と一致し (ファラデーの法則)、先述の磁界の計算結果から両パンケーキコイルを貫く磁束は 1.03 mWb/A、これに電流変化速度を乗じた 19.4 mWb/s、すなわち 19.4 mV がコイル全体の誘導電圧の振幅となる。ブリッジ回路電圧に生じる誘導電圧も先述の磁界の計算結果から同様に求められるが、中間点の電圧を見ているため係数 0.5 をさらに乗じる必要がある。計算するとその値は 1.8 mV とな

Fig. 6 Behavior of the coil current and voltages with the external magnetic field modulated at 4 Hz. The coil current was held as 0 A. The reading of the lines is same as Fig. 4.

る。一方測定されたコイル全電圧およびブリッジ回路電圧における誘導電圧の振幅はそれぞれ 25 mV、2.0 mV であり、計算値よりも 1～2 割程度高い。これは、GM 冷凍機の蓄冷材などコイル周辺にある磁性体の影響によるものではないかと推測される。

5. クエンチ電圧の検出実験

5.1 ブリッジ回路法によるクエンチの誤検出

続いて、クエンチ検出機構を作動させて HTS-DP コイルに DC 通電を行った。通電電流は 100 A としたが、模擬クエンチ用ヒータで加熱しない限りこの電流で実際にクエンチが発生することはない。クエンチ検出のために監視するクエンチ電圧として、はじめにブリッジ回路電圧を設定した。クエンチを判定する基準値は 2 mV とした。ブリッジ回路電圧の絶対値が 2 mV を超えると制御ソフトが「クエンチ発生」と判断し、所定の時定数で HTS-DP コイルの通電電流を減衰させる制御に入る。

ここで、Cu-SP コイルの変調通電を開始した。そのとき

(a) Full voltage range

(b) Magnified voltage range

Fig. 7 Behavior of the coil current and voltages with the oscillating external magnetic field. The frequency was changed from 3 Hz to 4 Hz just before 0 second of relative time. At 0 second the bridge circuit voltage shown as 'Vbrdg' reached 2 mV of the quench criteria in the circle inserted in the graph (b), and the simulated demagnetization process had started.

のコイル電流および各種電圧の挙動を Fig. 7(a)および(b)に示す。Fig. 7(b)は Fig. 7(a)の電圧軸スケールを拡大し、ブリッジ回路電圧および共巻き回路電圧の挙動をフォーカスしたものである。はじめ変調条件を振幅 0.75 A、周波数 3.0 Hz の正弦波としたところ、HTS-DP コイルの両端に振幅 20 mV の誘導電圧が検出された。この誘導電圧を生み出す磁界はコイルの位置関係により両パンケーキコイルに対して非対称に形成される。ブリッジ回路はこの非対称な磁界による誘導電圧をキャンセルすることができず、振幅 1.6 mV の振動ノイズが現れた。振動の位相はコイル全体の誘導電圧と同相である。振幅だけを見るとこの時のブリッジ回路のノイズ抑制率は 1/12 であるが、ブリッジ回路は検出すべき抵抗電圧の大きさを 1/2 にしてしまうことを考慮すると、S/N 比に基づく実効的なノイズ抑制率はこのとき 1/6 まで低下していたことになる。ここで Cu-SP コイルの駆動電流の変調速度を 4.0 Hz に増大させたところ、ブリッジ回路電圧の振幅が 2 mV を超え、Fig. 7 両グラフの相対時刻 0 秒にてクエンチの誤検出が発生した。

5.2 共巻きコイル法によるクエンチの前兆検出

次に、クエンチ電圧として共巻き回路電圧を監視するように設定を変更した。クエンチ判定基準電圧は 0.1 mV、クエンチ検出後の電流減衰における時定数は 2.0 秒とした。そして、先ほどと同じく Cu-SP コイルに 4.0 Hz の振動電流を通電した。このときのコイル電流および各種電圧の挙動を Fig. 8 に示す。Cu-SP コイルの変動磁界による共巻き回路電圧のノイズは 0.1 mV よりも十分小さく、クエンチの誤検出は発生しなかった。

ここで、模擬クエンチ用のヒータでコイルの局所加熱を行った。加熱部温度が 76 K まで上昇した時（線材自体の温度はそれよりやや低いと推測される）、共巻き回路電圧に抵抗電圧と見られる電圧が検出され始めた。すぐにそれは 0.1 mV を上回り、「クエンチ発生」と判断されて電流減衰モードへと移行した。時定数の設定は 2 秒としている。

Fig. 8 Behavior of the coil current and voltages with the oscillating magnetic external field with a frequency of 4 Hz. The co-winding voltage shown as 'Vcow' was monitored to detect the quench, and the judgment criterion was set as 0.1 mV.

Fig. 9 Behavior of the coil current and voltages, and the temperature at the heater in the coil with the oscillating magnetic external field with a frequency of 4 Hz. The co-winding voltage, shown as ‘Vcow,’ was monitored to detect the quench, and the judgment criterion was set as 0.4 mV.

電流の減衰と共に抵抗電圧と見られる電圧も収まり、コイルの急激な温度上昇は抑制できた。なお、模擬クエンチ用ヒータはクエンチ検出後に手で加熱を停止している。クエンチ検出の後ヒータの加熱を停止するまでには 1 秒程度のタイムラグがある。それを考慮すると、今回のケースでは抵抗電圧と見られる電圧が十分に収まるまでの間もヒータは加熱を続けていたことになる。

続いて、クエンチ判定基準電圧を 0.4 mV に引き上げて同様の実験を行った。ただしコイル通電電流を 80 A に下げている。このときのコイル電流、各種電圧および加熱部温度の挙動を **Fig. 9** に示す。ここで灰太線 (Theater) が加熱部温度の挙動を表す。加熱部温度が 80 K を超えたあたりで抵抗電圧と見られる電圧が出始め、すぐに 0.4 mV を超えて「クエンチ発生」と判断された。しかしその後時定数 2 秒の電流減衰モードへ移行しても電圧は収まらず、加熱部の線材温度の急激な上昇が発生したが、最大 107 K までで収まった。このときコイルの損傷は起きなかった。

6. まとめ

クエンチ検出のためにブリッジ回路電圧と共巻き回路電圧を測定することのできる HTS-DP コイルを作製し、両電圧によるクエンチ検出特性の違いを評価した。ブリッジ回路電圧に関して自己磁界の変動による誘導電圧を打ち消すように調整すると、コイルの駆動電源に由来するとみられる 50 Hz の電圧ノイズはある程度残ったが、コイル全体に生じる誘導電圧を 1/100 以下に抑えることができた。しかし、両パンケーキコイルに非対称な外部変動磁界が印加された場合、ブリッジ回路電圧はそれに由来する誘導電圧を十分に打ち消すことができず、S/N 比に基づく実効的なノイズ抑制率は 1/6 まで低下した。一方共巻き回路電圧では非対称な外部変動磁界に由来する誘導電圧も十分に打ち消され、コイルが非対称な外部変動磁界を受けた状態でも 0.1 mV の抵抗電圧を検出することができた。

以上、本実験で、小型コイルを用いた共巻コイル法により、自己磁界の変動、および外部変動磁界の印加による誘導電圧を有効にキャンセルし、コイル線材に発生する抵抗電圧を感度良く検出できることを示した。より大型のコイルでは誘導電圧はさらに大きくなるが、共巻コイルのターン数を数分の一ターンレベルまで調整すれば誘導電圧を抑えることが可能である。共巻法の欠点は、コイル巻線中に常電導テープを巻き込む必要があり、その分巻線部の電流密度が低下することである。しかしブリッジ回路法に比べクエンチ検出感度が向上し、その分クエンチによる損傷を抑え運転電流を増すことができるため、実質的にはこの欠点を克服できる。従って、共巻コイル法は大型コイルへの適応性があると考えられる。

参考文献

- 1) A. Shoykhet and D. Umans: “Quench in high-temperature superconducting motor field coils: computer simulations and comparison with experiments”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1623-1628
- 2) G. Celentano, et al.: “Quench behavior of a conduction cooled YBa₂Cu₃O_{7-x} tape pancake coil”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 2234334
- 3) O. Tsukamoto, Y. Fujimoto and T. Takao: “Study on stabilization and quench protection of coils wound of HTS coated conductors considering quench origins – Proposal of criteria for stabilization and quench protection”, Cryogenics **63** (2014) 148
- 4) Y. Terao, et al.: “Analysis of an abnormal event in a 3-T MRI magnet wound with Bi-2223 tape conductors”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 2285278
- 5) E. Inukai, K. Nakamura and Y. Abe: “Development of the high speed quench-detecting system”, TEION KOGAKU **28** (1993) 316-321 (in Japanese)
犬飼英吉, 中村光一, 阿部良弘: 「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」, 低温工学 **28** (1993) 316-321
- 6) N. Nanato and K. Nakamura: “Quench detection method without a central voltage tap by calculating active power”, TEION KOGAKU **38** (2003) 166-170 (in Japanese)
七戸 希, 中村光一: 「有効電力算出による中間電圧端子を用いないクエンチ検出法」, 低温工学 **38** (2003) 166-170
- 7) A. Ishiyama, et al.: “Stability criterion and quench detection/protection methods for HTS coils”, TEION KOGAKU **48** (2013) 141-150 (in Japanese)
石山敦士ら: 「高温超電導コイルの安定性評価基準とクエンチ検出・保護」, 低温工学 **48** (2013) 141-150
- 8) S. Hahn, et al.: “No-Insulation (NI) HTS inserts for > 1 GHz LTS/HTS NMR magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4302405
- 9) Y. Yanagisawa, et al.: “Basic mechanism of self-healing from thermal runaway for uninsulated REBCO pancake coils”, Physica C **499** (2014) 40-44
- 10) (社)低温工学協会 編: 「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社, 東京 (1993)

高 木 智 洋

1998 年京都大学理学部卒業。2000 年同大学院理学研究科博士前期課程（物性物理専攻）修了。2001 年古河電気工業株式会社入社。ISTEC への出向を経て、現在高温超電導機器の開発に従事。低温工学・超電導学会会員。

有 山 隆 紘

2015 年上智大学理工学部機能創造理工学科卒業。現在、同大学院修士課程在学中。HTS コイルのクエンチ特性についての研究に従事。

高 尾 智 明

1987 年横浜国立大学工学部電気工学科卒業、1992 年横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了、同年上智大学理工学部専任講師、2003 年教授、現在に至る。超伝導コイルの研究、超伝導応用機器開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。工学博士。

塚 本 修 巳

1970 年 3 月東京大学工学系大学院博士課程修了。工学博士。1970 年 4 月横浜国立大学工学電気工学科講師。1971 年 4 月同助教授。1984 年 4 月同教授。2007 年 3 月同定年退職、同名誉教授。2007 年－2012 年 3 月同特任教授。2008 年 6 月より上智大学客員教授、現在に至る。専門分野：電気機器工学、超電導工学。