有効電力法による高温超電導線材の交流損失の簡易測定

七戸 希[†], 大沢 利昭, 村瀬 暁, 金 錫範Simple Measurement of the AC Transport Current Loss for HTS Conductors
Using an Active Power Detection MethodNozomu NANATO[†], Toshiaki OHZAWA, Satoru MURASE and SeokBeom KIM

Synopsis: Reducing AC loss in superconducting apparatus is one of the most important issues, and the precise measurement and estimation of AC losses are essential to reduce them. The four-terminal method is universally used as an electric measurement method of AC losses for superconducting tapes and wires. In this method, noise and inductive voltage superposed on the terminal voltage of the superconductor are eliminated by a lock-in amplifier and cancel coil, respectively, and then measurement of very small resistive voltage is achieved. However, using this conventional method, a plurality of measuring instruments and apparatus are needed, and therefore the measuring system becomes complicated and much time is consumed in the calibration process. In this paper, we present a simple and precise measurement system based on an active power detection method, which is proposed as a quench detection method. The proposed system consists of a small number of instruments and apparatus and is less susceptible to noise. Its usefulness is verified by comparing the proposed method and the conventional four-terminal method in measuring the AC transport current loss of a Bi2223/Ag tape.

Keywords: AC loss, active power detection method, HTS conductors

1. はじめに

超電導体には無損失で直流電流を通電できる反面、交流電流を通電すると損失が発生する¹⁾。一般の電力機器の多くは交流電流および交流磁界中で使用されるため、超電導体を電力機器に応用する場合には、この交流損失が機器の効率を低下させる大きな要因となる。したがって、その対策を講じることが重要であるが、そのためにはまず交流損失を正確に測定し、その特性を把握する必要がある。

交流損失の測定法としては、通電法（電気的手法）である四端子法²⁾が一般的である。この場合、超電導線における交流損失相当の微弱な抵抗性電圧を測定するため、キャンセルコイルとロックインアンプを用いて誘導性電圧とノイズの除去を行い、正確な測定を実現している。しかしながら、複数の計測機器が必要となるため測定系が複雑になり、それらの微調整などで測定に時間と手間を多く必要とする傾向があった。

そこで、本論文では、通電法に基づく簡便な交流損失測定システムの開発を目的に、クエンチ検出法として開発した有効電力法³⁾を交流損失測定に適用して構築した交流損失測定システム⁴⁾を提案する。本システムは耐ノイズ性を有し、少数の計測機器にて構築でき、従来法と同等の高い精度を持ち、短時間での測定を実現できる。検証実験として、Bi2223/Ag テープ線材をサンプルとし、従来法と比較することで、その有効性を確認した。

2. 有効電力法

Fig. 1 に有効電力法に基づく交流損失測定用実験回路の概略を示す。同図の v は超電導線材の両端電圧、 i は通電電流である。ここで r を交流損失等価抵抗、 L を線材の自己インダクタンス、通電電流を

$$i = I \sin \omega t, \quad (I: \text{電流振幅}, \omega: \text{角周波数}, t: \text{時間}) \quad (1)$$

とすると、線材両端電圧は

$$v = ri + L di/dt = rI \sin \omega t + \omega LI \cos \omega t \quad (2)$$

となり、線材にて発生する瞬時電力 P は

$$P = vi = rI^2 \sin^2 \omega t + \omega LI^2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t \\ = rI^2/2 - rI^2/2 \cdot \cos 2\omega t + \omega LI^2/2 \cdot \sin 2\omega t \quad (3)$$

となる。ここで、(3)式右辺第1項は交流損失（有効電力）を、第2, 3項は無効電力をそれぞれ表している。同式において第1項の交流損失のみが直流信号であることに

Received July 4, 2005

岡山大学大学院自然科学研究科産業創成工学専攻
〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

Division of Industrial Innovation Sciences,
Graduate School of Natural Science and Technology
Okayama University

[†] E-mail: nanato@elec.okayama-u.ac.jp

Fig. 1 Configuration of experimental circuit for measuring AC transport current losses.

着目すると、低域通過フィルタ (Low-pass filter, LPF) を用いて第 2, 3 項の無効電力を除去し、交流損失のみを取り出すことができる。さらに、LPF によって測定系に混入するノイズも無効電力と同時に除去することができるため、高い SN 比にて交流損失を測定することが可能となる。以上が有効電力法の基本原理である。

これらの演算は IC やオペアンプなどを利用したアナログ演算回路でも実現できるが、交流損失信号は微弱であるため、アナログ回路の各演算部におけるオフセット電圧が大きな誤差として混入する可能性が考えられることから、デジタル処理にて行う。まず、 v と i をそれぞれデジタルデータ $v(k)$ と $i(k)$ として取得し、PC に保存する。次章の実験ではデジタルデータの取得にデジタルオシロスコープを用いた。なお、 k はデータ保存時のサンプル番号を表す。PC にて瞬時電力は、

$$P(k) = v(k)i(k) \quad (4)$$

と計算される。次に (4) 式のフィルタ処理であるが、本研究で用いたフィルタは、デジタル IIR フィルタ⁵⁾であり、中でも安定性が高いとされている双一次 Z 変換⁵⁾により、**Fig. 2** の回路で表される RC 型 LPF をデジタルフィルタとして設計した。その導出を以下に示す。同図において、 P_{in} は入力信号であり (3) 式左辺に相当し、 P_{out} は出力

Fig. 2 An RC-type low-pass filter.

信号であり定常状態にて同式右辺第 1 項の交流損失となる。ここで伝達関数である RC 型 LPF をラプラス変換にて表現すると、

$$\frac{P_{out}(s)}{P_{in}(s)} = \frac{1}{1+sT} \quad (5)$$

となる。ここで T は時定数 ($T=RC$) である。双一次 Z 変換では、(5) 式における s を次式にて Z 変換する。

$$s = \frac{2}{\Delta t} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (6)$$

ここで、 Δt はサンプリング周期であり、

$$z = \exp(s\Delta t) \quad (7)$$

である。(6) 式を (5) 式に代入し、

$$P(k)z^{-1} = P(k-1) \quad (8)$$

なる関係から整理すると、交流損失算出式は

$$P_{out}(k) = \frac{2T-\Delta t}{2T+\Delta t} P_{out}(k-1) + \frac{\Delta t}{\Delta t+2T} \{P_{in}(k) + P_{in}(k-1)\} \quad (9)$$

となる。この (9) 式の定常解 (収束値) が交流損失となる。

(ただし、(9) 式の時定数と (5) 式の時定数は 1 対 1 の対応ではないことに注意されたい⁵⁾。) なお測定時における Δt および T の設定は、測定精度を考慮して、 Δt は測定電圧 (または電流) 周期の 1/10 以下、 T は 1 s 以上程度の値とした。サンプリング周期は小さいほど測定精度 (離散データから復元される波形の正確性) は高くなるが、逆にサンプリング数が増大し、その結果、データ保存容量や計算時間の増加を招くため、 Δt は上記の値とした。また、 T を 1 s 以上程度としたのは、次章の検証実験において、交流損失の測定周波数範囲の最小値を 10 Hz とし、それ以上の周波数領域にて無効電力成分 ((3) 式右辺第 2, 3 項) を十分に除去できるようにするためである。**Fig. 3** に以上の計算手順のフローチャートを示す。

3. 検証試験

提案法の有効性を検証するため、Bi2223/Ag テープ線材 (**Table 1**) を用い、液体窒素浸漬冷却、自己磁場中における交流損失を前述の従来の四端子法と提案法にて測定し、その比較を行った。提案法の測定回路は **Fig. 1** である。同図において電源は発信器とバイポーラ電源より構成されており、電源ノイズを低減させるために変圧器を介して超電導線材に電流 i を供給している。本測定法では、原理的に v と i の瞬時波形を正確に測定することが非常に重

Fig. 3 A flowchart of the active power detection method. AC loss is equal to the convergence value of $P_{out}(k)$.

Table 1 Specifications of the Bi2223/Ag tape

Ratio of Silver	2.2
Width	4.1 mm
Thickness	0.21 mm
Length	120 mm
Number of filaments	55
I_C (at 77 K, 0 T)	90

要である。特に v の測定に使用するアンプでは、測定する電圧の周波数範囲内において応答の遅れや各周波数に対する増幅率の誤差が生じないようにする必要があるため、それらを考慮して設計した自作のアンプ（1000 倍）を使用した。また、 i の測定には CT（HIOKI ユニバーサルクランプオン CT）を用いた。次に、従来の四端子法に基づく測定回路を Fig. 4 に示す。ロックインアンプより電源に指令信号を送信し、変圧器を介して線材に電流を通电する。線材の電圧はキャンセルコイルにて誘導性電圧を除去し、アンプによって増幅してロックインアンプにて測定した。通電電流はシャント抵抗にて測定した。また、両測定結果と Norris の損失評価式⁶⁾との比較も行った。Norris の評価式を以下に示す。

$$P_h = \frac{I_C^2 \mu_0}{\pi} \left\{ (1-i) \ln(1-i) + \frac{i(2-i)}{2} \right\} \quad (10)$$

$$i = I_p / I_C$$

ここで、 i は負荷率であり、臨界電流値 I_C に対する通電電流振幅値 I_p の割合を示している。

Fig. 5 に提案法の原理を確認するために、後述の Fig. 6 および Fig. 7 を算出する時に測定された通電電流波形、端子間電圧波形、および LPF の出力波形（(9)式左辺）の一例を示す。これらは、周波数 200 Hz、負荷率 0.3 にて測定された結果である。同図(a)は電流波形、(b)は電圧波形であるが、両波形の位相差より、多くの誘導性電圧が重畳しており、また電圧波形からノイズが重畳していることがわかる。これらの離散データより(9)式に基づいて算出された P_{out} が同図(c)である。なお、サンプリング周期は 0.1 ms、時定数は 1 s である。同図より、1.6 s 以降にて P_{out} は一定値（0.23 mW）に収束していることがわかる。提案

Fig. 4 A schematic view of the conventional system.

法ではこのようにして適切にサンプリング周期および時定数を選定することで、誘導性電圧（無効電力）およびノイズを除去し、損失値を求めることができる。なお、損失値 0.23 mW の単位を後述の Fig. 6 および Fig. 7 のように規格化すると、測定電圧端子間距離 5 cm、周波数 200 Hz、 $I_C=90$ A より損失値は 2.84×10^{-9} J/m/cycle/A² となる。

Fig. 6 に従来法および提案法にて測定した交流損失の周波数に対する測定結果を Norris の評価式とともに示す。

(a)Current

(b)Voltage

(c) P_{out} **Fig. 5** Examples of measured current and voltage waveforms and P_{out}

(a) Conventional four-terminal method

(b) Active power detection method

Fig. 6 Frequency characteristics of the measured AC transport current loss for a Bi2223/Ag tape using the conventional method and the active power detection method at 77 K, 0 T.

同図(a)は従来法、同図(b)は提案法であり、ともに負荷率 $i=0.3, 0.4$ にて 10–1000 Hz の周波数範囲にて測定した結果である。また、**Fig. 7** に負荷率に対する測定結果を Norris の評価式とともに示す。Fig. 6 と同様に Fig. 7(a) は従来法、同(b)は提案法であり、ともに、周波数は 50 Hz, 100 Hz および 200 Hz にて 0.15–0.80 の負荷率範囲にて測定を行った。Figs. 7, 8 とともに従来法と提案法はよく一致しており、Norris の評価式からの乖離傾向も同等である。これらより、提案法にて、従来法と同等の測定精度を、ロックインアンプとキャンセルコイルを用いない簡易な測定システムで実現できると言える。さらに、計測機器の微調整などを必要としないため、常に安定した誘導電圧低減効果とノイズ低減効果が得られるとともに、従来法と比べ、短時間にて測定を行うことができる。本実験の場合、測定時間を約 1/3–1/5 に低減することができた。以上より、提案法の有効性は大きいと考えられる。

(a) Conventional four-terminal method

(b) Active power detection method

Fig. 7 Normalized current characteristics of the measured AC transport current loss for a Bi2223/Ag tape using the conventional method and the active power detection method at 77 K, 0 T.

4. まとめ

本論文では、通電法に基づく簡易な交流損失測定システムの開発を目的に、クエンチ検出法として提案している有効電力法を交流損失測定に適用して構築した交流損失測定システムを提案し、Bi2223/Ag テープ線材を用いて、従来の四端子法および Norris の評価式との比較を行った。その結果、提案法ではロックインアンプとキャンセルコイルを用いないことから測定系の簡素化を実現でき、従来法に比べて安定した誘導電圧の低減効果とノイズ低減効果が得られることから、簡易な装置で従来法と同等の測定精度が得られることを示した。さらに、計測機器の微調整などを必要としないため、測定に要する手間・時間を低減できることを示した。今後は、磁場中における測定、YBCO や MgB_2 などの他線材を対象とした測定を行い、それらに対する有効性を検証していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 電気学会：「超電導工学（改訂版）」オーム社，東京（1999）122-142
- 2) For example, Satoshi Fukui, Osami Tsukamoto: “Verification of effectiveness of spiral loop arrangement on AC transport current loss measurement in high temperature superconducting tape,” T. IEEE Japan, **121-B** (2001) 652-661 (in Japanese)
例えば，福井聡，塚本修巳：「スパイラルループ法による高温超電導テープ線材の交流損失測定の有効性の検証」電気学会 B 部門誌 **121** (2001) 652-661
- 3) N. Nanato, 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
- 4) T. Ohzawa, et al.: “Measurement of AC transport current Loss for HTS conductors by the active power detection method,” Abstracts of CSJ Conference **72** (2005) 2 (in Japanese)
大沢利昭ら：「有効電力検出法を用いた高温超電導線材の交流損失測定」第 71 回 2005 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2005) 2
- 5) 例えば，CQ 出版社：「フィルタ設計入門と DSP 活用」，インターフェース **11**, No.126 (1987) 256-288
- 6) W.T.NORRIS: “Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets,” J. Phys. D: Appl. Phys. **3** (1970) 489-507

七戸 希

1975年4月6日生。2002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後期課程修了。2000年4月-2002年11月日本学術振興会特別研究員，同年12月より岡山大学工学部電気電子工学科助手。超電導応用，超電導特性の測定・評価等に関する研究に従事。低温工学協会，電気学会会員。博士（工学）。

大沢 利昭

1982年10月2日生。2005年3月岡山大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学院自然科学研究科電子情報システム工学専攻入学，現在に至る。主として交流損失に関する研究に従事。低温工学協会会員。

村瀬 暁

1946年7月19日生。1971年3月名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月（株）東芝総合研究所勤務。1999年1月東北大学大学院工学研究科教授。2001年3月より岡山大学工学部電気電子工学科教授。主に酸化物系・金属系超電導材料とその応用開発研究に従事。低温工学協会，電気学会，日本物理学会，プラズマ核融合学会，日本金属学会会員。工学博士。

金 錫範

1962年6月24日生。1997年3月早稲田大学大学院電気工学専攻博士課程修了。1996年4月早稲田大学理工学部助手，1998年4月超電導工学研究所主任研究員，2001年7月ソウル大学電気工学部助教授，2003年10月より岡山大学工学部電気電子工学科助教授。2000年6月より早稲田大学理工学総合研究センターの客員研究員。主に高温超電導線材および超電導応用機器開発研究に従事。低温工学協会，電気学会会員。工学博士。