III. 超電導マグネットの AE

6. コイル模擬状態での AE 特性

近 葉 實 雄

近畿大学九州工学部電気工学科 福岡県飯塚市柏ノ森11-6

(1986年11月5日受理)

III. Examples of AE from Superconducting Magnets

6. Characteristics of AE from a Single Layered Coil in Coil-Simulation-Arrangement

Jitsuo CHIKABA

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering (Kyushu), Kinki University
Kayanomori, Iizuka, Fukuoka 820

(Received November 5, 1986)

Synopsis :

Fundamental mechanisms of winding motions during charging superconducting test coils are discussed under coil simulation conditions. The winding motion is detected by AE techniques and plane strains of the thin layer test coils. The plane strains can be divided into the tensile strain which is along a circumferential direction of the coil and the compressive strain which is in the axial direction of it.

Mechanical dissipation energy densities in both the directions are estimated and compared with AE energy. It is found that the compressive strain is an influential source on the AE signal and the coil instability.

1. はじめに

超電導コイルの監視診断に AE 技術を応用する場合、不安定性の主因の一つと考えられている電磁力による巻線運動の詳細な機構説明が必要である。すなわち、超電導コイルにおける局所的かつ瞬時的な巻線運動による摩擦損失が常電導転移を誘起し、ひいてはクエンチに至ることは周知のとおりであるが^{1,2)}、一般にこのような巻線運動は AE 法と電圧測定法³⁾によって検出される。しかしこの二つの方法のみから、クエンチを予知することは不十分であり、またいくつかの問題がある。まずクエンチはしばしば何らかの前駆的な電圧スパイク³⁾を伴わずに起こる場合があること。さらに AE 信号については、コイルの励磁電流の低い時には突発型であるが、常電導転移やクエンチに近づくにしたがって連続型になり、局所的な摩擦エネルギーの推定や位置標定が困難となることなどである。

以上の理由から、コイルの不安定性に関係ある巻線運動とはどのような性質のものであろうか、またその摩擦エネルギーの定量化をいかにすべきか、というこ

ころまで問題点を吟味する必要が生じてきた。

ここで考えられる基本的な巻線運動としては、コイル軸方向の圧縮応力と半径方向の膨張すなわち引張り応力によるものが挙げられ、これらの応力による不安定性と AE との関係の解明が課題となっている。ここではテストコイルとして単層、二層などの薄肉密巻コイルおよび密巻多層コイルを用い、外部磁界を加えてのコイル模擬状態での巻線運動を、ひずみゲージと AE センサで同時に測定し、その結果と不安定性との関係について述べる。

2. 機械的ひずみと AE 信号との関係

励磁時の基本的な巻線運動を解析するために三種の層数、軸長の異なる薄肉テストコイルを用いた (Table 1 参照)⁴⁾。また SMU-50100 (VMC) は主として外部磁界用とした。

AE センサとしては共振周波数が 50KHz, 1 MHz, および広帯域 (100KHz~1MHz) の三種を取り付けたが、励磁時の AE 周波数スペクトルは 50KHz~100KHz にピーク値があり⁵⁾、50KHz センサによる AE 信号が

特徴的である。また AE 信号としては AE 平均電圧 (AE-RF 信号の包絡線) が AE 事象率に比べ、よりエネルギーに対応している。

ひずみ測定については、ケージ有効長の方向をコイルの軸方向と円周方向に分け取り付けた。ここで軸方向のひずみを ε_a (コイルの中心付近では圧縮)、円周

Table 1 Superconducting Test Coils

Superconducting Test Coils	Features
SM-1	1 layer, 189 turns, $l=225\text{mm}$, I. D= $89.3\text{mm}\phi$ $Go=6.0\times 10^{-4}\text{T/A}$
SM-2	2 layers, 26 turns, $l=15\text{mm}$, I. D= $76\text{mm}\phi$ $Go=1.1\times 10^{-3}\text{T/A}$
SM-3	10 layers, 51 turns, $l=6\text{mm}$, I. D= $60.5\text{mm}\phi$ O. D= $85\text{mm}\phi$, $Go=4.5\times 10^{-3}\text{T/A}$
SMU-50100 (VMC)	29 layers, 5,722 turns $l=230\text{mm}$, I. D= $110.0\text{mm}\phi$ O. D= $174.3\text{mm}\phi$ $Go=2.63\times 10^{-2}\text{T/A}$

l : length of the axial direction of the coil.
I. D: inner diameter, O. D: outer diameter. The superconducting wires used are FM NbTi wires ($1.2\text{mm}\phi$) in all test coils. The coil frames are SUS 301 stainless steel.

Go : Coil Constant (Tesla/Ampere)

VMC: Vacuum Metallurgical Co., Ltd. Japan

Fig. 1 Plane strains vs. charging current in SM-1.

方向のひずみを ε_c (引張り) で表わす。

Fig. 1 に外部磁界 $B_0=1\text{T}$ の場合の単層コイル (SM-1) の第一回目と二回目の励磁に対する AE と、ひずみ ε_a , ε_c の関係を示す。ここで AE 平均電圧は AE アンプ (70dB) の出力電圧である。まず ε_c は電磁力による引張り応力 $\sigma_c = BJR (P_a)$ によるもので引張りひずみとなり、弾性的で励磁順序および回数にほとんど依存しないのが特徴である。また層数の影響も少ない。ここで B は外部磁界+コイル磁界 (T), J は励磁電流密度 (A/m^2), R はコイル半径 (m) である。

一方、軸方向ひずみ ε_a は圧縮応力 σ_a によるもので励磁と減磁過程で大きなヒステリシスを示し、励磁順序および回数に大きく依存する。ここで σ_a は近似的に $\sigma_a = B^2/2\mu_0(P_a)$ で表わされ、 μ_0 は真空透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}\text{H}/\text{m}$) である。

巻線運動に対して何らかの障壁がある場合は、Fig. 1 の A 点のようにひずみの跳躍として現れ、この時の変化は $\Delta\varepsilon_a = 1.7 \times 10^{-4}$ 程度である。ひずみゲージの有効長を 3.2mm として計算するとコイル軸方向のすべり距離 δl は $0.5\mu\text{m}$ となりいわゆるマイクロスリップである。

さらに外部磁界 $B_0=5\text{T}$ でクエンチが起こった場合を Fig. 2 に示す。クエンチ点に近づくとき AE 平均電圧の上昇は大きくなるが、両ひずみ ε_a , ε_c には何らかクエンチの前駆的变化は認められない。また円周方向の引張りひずみ ε_c には励磁、減磁の際のヒステリシスはなく、また励磁順序にも関係しない。

圧縮応力によって巻線はコイルの中央方向に次第に寄せ集められる形になり、このためにクエンチの危険性の高い箇所はコイルの両端近傍になると考えられ

Fig. 2 Circumferential strain ε_c and axial strain ε_a vs. charging current characteristics near the quenching points in SM-1.

る。したがってクエンチの危険性はコイルの長さや室温での円周方向の pre-tension および軸方向の pre-compression に密接に関係してくることになる。実際、実験終了後コイル SM-1 の終端付近での巻線間隔は大きいところで $\sim 1.2\text{mm}$ まで広がり、ひずみ測定から推定された値と同程度になっている⁴⁾。

ここでコイル軸長 l とクエンチとの関係をまとめると次のようになる。各コイルの初回励磁において最初のクエンチを起こす時の引張り応力を σ_{CQ} とすると、 $l=225\text{mm}$ (SM-1), $\sigma_{CQ}=29.6\text{MPa}$; $l=15\text{mm}$ (SM-2), $\sigma_{CQ}=68.7\text{MPa}$; $l=6\text{mm}$ (SM-3), $\sigma_{CQ}>90\text{MPa}$ ($B_0=5\text{T}$, $I=400\text{A}$ でクエンチは起きない): となり σ_{CQ} は l に密接に関係している。

3. AE および機械的消散エネルギー密度について

コイル軸方向ひずみ ε_a は励磁順序および回数に強く依存していることは既に述べたが、これは励磁を繰り返すことによるいわゆるトレーニング効果を意味する。すなわち AE 平均電圧は励磁回数を重ねるごとに減少し、また軸方向ひずみの励磁、減磁の際のヒステリシスも次第に減少する。なおこの場合特にクエンチを伴わなくても減少する。

よくトレーニングされてくるとヒステリシス特性は Fig. 3 のように擬弾性⁵⁾を示すようになる。この状態になると局所的に異常な巻線運動はなく、円滑な摩擦による損失になると考えられる。このようによくトレーニングされた後の応力 σ -ひずみ ε 特性から得られた消散エネルギー密度および AE エネルギー密度と励磁速度 $\dot{I}(\text{A/s})$ との関係を Fig. 4 に示す⁴⁾。

テストコイル全体から放射される AE エネルギーは

Fig. 3 Hysteresis curves during charging and discharging in test coils.

Fig. 4 Charging rate dependence of AE energy density and mechanical dissipation energy density.

$E = K \int V_a^2 dt (\text{J})$ で表わされる。ここで V_a は AE アンプ出力の AE 平均電圧 (V) で K は次の定数を含む。すなわち、AE センサの厚み (t)、ならびに電圧出力係数 $g (\text{V} \cdot \text{m/N})$, AE アンプの増幅度、さらに極低温コイル系の質量、音速などを含むものである。

結果の特徴としては、まず AE エネルギーは $\dot{I}$ に比例するが円滑な摩擦による消散エネルギー密度は $\dot{I}$ に依存することなく一定である。AE エネルギーを推定する場合、前述のように多数の定数が必要であるという問題があるが、Fig. 4 での実験よりさらに低い励磁速度で AE エネルギーが励磁速度に依存しないという実験結果が得られれば定数 K が求められる可能性がある。これについては今後検討されるべきであろう。

次に軸方向の σ_a - ε_a 特性から得られた消散エネルギー密度と円周方向での消散エネルギー密度を比較すると次のようになる。(i) 単層で軸長の長い SM-1 では明らかに軸方向の消散エネルギー密度は円周方向のエネルギー密度に比べて 4 倍程度大きい。(ii) 10 層で軸長の短い SM-3 では円周方向の消散エネルギー密度は単層の場合よりも大きい。これは半径方向の層間摩

擦損失を意味していると考えられる。また軸方向については単層も10層もほぼ同程度となり、これはよくトレーニングされているということの意味している。以上の二点と前述の円周方向のひずみは励磁順序および回数にほとんど依存しないという実験結果から、半径方向の巻線層間摩擦運動は比較的円滑かつ均一なため直接的にはコイルの不安定性には影響を及ぼさず、軸方向の不均一な異常運動が不安定性の主因となっている。

4. おわりに

ある一定の外部磁界の下でテストコイルを励磁するというコイル模擬状態での実験から、軸方向の圧縮ひずみによる巻線のマイクロスリップはAE信号となり、これが励磁順序および回数に依存し、不安定性に密接に関係することが明らかになった。

一方、多層コイルでの半径方向の層間巻線スリップは円滑で直接的には不安定性の原因にはならない。しかしコイルがよくトレーニングされた後でも励磁速度いかんによっては、例えばパルスコイルなどの場合には円滑な摩擦運動による損失も不安定性の原因となるのでさらに今後広範囲の励磁速度にわたって検討を重ねる必要がある。

最後にAEとひずみ測定を併用する方法からはクエンチの前駆的現象を捉えることはできないが、AEエネルギーの励磁速度依存性と機械的消散エネルギーとの関係から、コイルに装着したAEセンサーの近似的なエネルギー校正法の可能性が検討されるであろう。

参 考 文 献

- 1) H. Maeda, O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *Cryogenics* **22** (1982) 287.
- 2) O. Tsukamoto and Y. Iwasa: *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 997.
- 3) O. Tsukamoto, J. F. Maguire, E. S. Bobrov and Y. Iwasa: *Appl. Phys. Lett.* **39** (1981) 172.
- 4) J. Chikaba, F. Irie, K. Funaki, M. Takeo and K. Yamafuji: *ASC 1986 Preprint* p. 58
- 5) J. Chikaba, F. Irie, M. Takeo, K. Funaki and K. Yamafuji: *Proc. of MT9, Zürich*, (1985) 834.
- 6) J. Chikaba, F. Irie, M. Takeo, K. Funaki and K. Yamafuji: *Proc. of Inter. Pinning Conf. Fukuoka* (1985) 297.