研究論文

イットリウム系高温超電導薄膜限流素子の電流分布測定

下畑　賢司†，横山　彰一，稲口　隆，中村　史朗，小沢　保夫*

三菱電機（株）先端技術総合研究所　尼崎市塚口本町 8-1-1　(†E-mail: Shimohata.Kenji@wrc.melco.co.jp)
*Super-GM　大阪市北区西天満 5-14-10　梅田 UN ビル

(2002 年 4 月 1 日受理)

Current Distribution Measurement of YBCO Thin Film for Superconducting Fault Current Limiter

Kenji SHIMOHATA, Shouichi YOKOYAMA, Takashi INAGUCHI, Shiro NAKAMURA and Yasuo OZAWA*

Mitsubishi Electric Corporation, 8-1-1, Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661
*Super-GM, Umeda UN building, 5-14-10, Nishitenma, Kita-ku, Osaka 530-0047

(Received April 1, 2002)

Synopsis: Current distribution in the superconducting film for a resistive fault current limiter is important because it influences AC loss and a uniformity of S/N transition. The lateral current distribution of the film was reconstructed from the magnetic field distribution, which is measured by multiple Hall probes. The following results were obtained. (1) Non-uniform current distribution in the superconducting film was observed when the current was less than 1.3 times critical current (I_c). (2) The current in a superconducting film was uniform when the current was much higher than I_c. The current can be considered uniform when the film works as a fault current limiter because the S/N transition starts at about twice I_c. (3) The validity of the measurement was verified by the comparison with the electric circuit simulation.

Keywords: current distribution, HTS film, fault current limiter

1．はじめに

我が国が，地球環境保全という制約のもとで今後とも安定的に発展するにはエネルギーの電力化は不可欠とされ，電力の有効利用技術の確立は重要である．超電導限流器は，短絡電流を瞬時に抑制できることから，短絡電流の増加による遮断器リプレースのみならず，従来困難であった系統連係への適用，超電導ケーブルの保護用など電力系統への導入効果が検討されている[1~3]．超電導限流器としては，整流器型[4~6]，磁気遮蔽型[7]，抵抗型[8~11]など様々な方式の開発が進んでいる．

超電導発電関連機器・材料技術研究組合(Super-GM)では，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託した研究を分担し，「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」を平成 12 年度に開始した．本プロジェクトは電力の有効利用を可能にすると共に，電力系統の系統安定度向上を図れ，省エネルギーで地球環境にも優しい超電導電力機器を実現するための基盤技術の確立を目指している．電力機器は大電流，高電圧で動作しており，交流超電導電力機器実現に向けては，交流損失の低減技術，高電圧絶縁技術，大電流による電磁力対策技術，振動，冷却技術などのシステム側から決まる機器基盤技術の確立が不可欠である．

我々は，イットリウム系超電導薄膜の SN 転移を利用した抵抗型薄膜限流素子の大容量化，特に大電流化を目指した基盤技術研究開発を分担している．薄膜限流素子の容量は現状では小さいものの，過電流に対し

て瞬時に応答するなど動作特性が優れており，コンパクトな電力用限流器の実現可能性を有している．本プロジェクトでは電力用薄膜限流器実現の為の技術課題を明確にし，基幹系統用限流器に繋がる基盤技術の確立を目指す．そして，その最初のステップとして，配電系統にも応用可能な 6.6 kV，2 kA 級限流器の基盤技術の研究開発を行う．

大電流限流素子の実現のためには，並列数低減のため幅広の超電導薄膜を用いることが望ましい．この場合，超電導薄膜の幅方向に大きな偏流の発生が予想され，この偏流はクエンチ特性や通電損失に影響を与えると考えられる．このため，幅の広い超電導薄膜において，電流分布を測定することは重要である．

本報では，薄膜表面に配置した複数のホール素子で磁界分布を測定し，これから電流分布を計算する方法により，薄膜幅方向の電流分布を検討した結果を報告する．

2. 電流分布測定方法

超電導体の電流分布を測定した例としては，銀シース線材に一定電流を通電した状態でホール素子を空間的に走査して磁界分布を求め，測定した磁界分布を逆算して電流分布を求める方法が報告されている[12]．さらに，電流値をステップ状に上昇させて，電流依存性を測定している．また，超電導体が捕捉した磁界分布を 1 個のホール素子を 2 次元空間的に走査して磁界分布を得る方法が報告されている[13]．今回，交流通電時の電流分布の時間変化を測定することを主眼とした．このため，ホール素子を走査する方法ではなく，多数配置したホール素子で，磁界を同時に測定する方法を採用した．

Table1 Specifications of the YBCO film.

HTS film	
Width	20 mm
Length	60 mm
Surface of metal	Au, 50 nm
Critical current	
Length	42 mm
I_c(1 μ V/cm)	167 A
I^*(0.1 mV/cm)	210 A
n-value	20
Hole probe	
Position	Center of long direction
Number	10 (2 mm pitch)

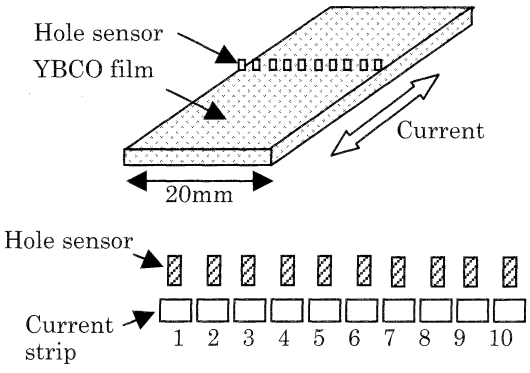


Fig.1 Schematic drawing of sample for current distribution measurement.

Table 1 に電流分布測定を行った超電導薄膜の仕様を示す．幅 20 mm，長さ 60 mm のイットリウム系超電導薄膜の表面に金を蒸着している．両端に電流供給の接続端子を設けており，接続部を除く有効長は 42 mm である．また，電流分布測定と同時に，直流 4 端子法により測定した 1 μ V/cm 基準での I_c は 167 A，n 値は 20 であった．0.1 mV/cm 発生時の電流(I^*)は 210 A である。

Fig. 1 に電流分布測定の模式図を示す．ホール素子を，YBCO 薄膜の長さ方向中央に，幅方向 2 mm 間隔で 10 個設置した．ホール素子は，東芝製 THS122 で，パッケージサイズは幅 1.5 mm，長さ 1.7 mm，厚み 0.6 mm である．磁界の検出領域は 0.3 mm 角であり，パッケージのほぼ中心部にある．このホール素子は，低温用ではないため，液体窒素温度に冷却すると熱収縮で素子が損傷する場合があると同時に，磁界出力係数が常温とは異なる．このため，あらかじめ液体窒素中に冷却して選別した後，外部磁場中で磁場較正して使用した．また，磁場分布の測定精度は電流分布の測定精度に大きく影響する．電流源のドリフト等の影響を避けるため，ホール素子を直列に接続し，電流は電池から供給した．

超電導膜に交流を通電し，表面の磁界分布をトランジェントレコーダで測定した．測定は液体窒素中で行い，通電毎に昇温することにより，超電導内に捕捉された電流を減衰させ，初期状態からの測定とした．

測定した 10 箇所の磁場に対し，対応する幅 2 mm の電流ストリップをそれぞれ想定した．以降，各ストリップの電流を，ストリップ電流と呼ぶ．得られた磁界分布とストリップ電流には，(1)式の関係がある．

$$\begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdot & \cdot & a_9 \\ a_{-1} & a_0 & & & & \\ a_{-2} & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ a_{-9} & & & & & a_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{10}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1(t) \\ B_2(t) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{10}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで，$I_i(t)$はストリップ iでの電流，$B_j(t)$はホール素子 jでの磁界，a_{ij}はストリップ電流 iが作るホール素子 j位置での磁界係数である．a_{ij}は，磁界計算で求めることができる．この関係式を逆変換することにより，電流分布の時間変化を求めた．

なお，測定のパラメータは，交流電流の振幅と周波数とした．

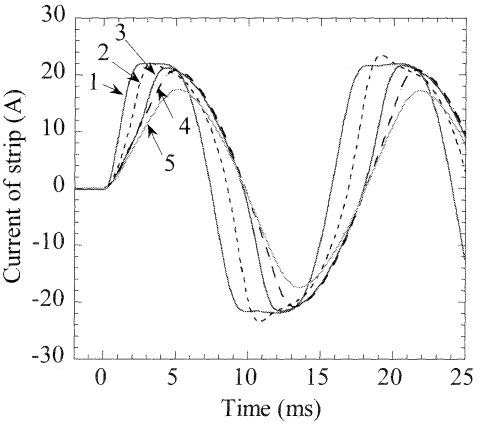


Fig.2 Examples of the results of current distribution measurement (I_{max}=210 A, f=60 Hz).

3．試験結果

Fig.2 に，最大電流を 210 A とし，周波数を 60 Hz とした電流分布測定結果を示す．図中の数値はストリップ電流の番号を示し，幅方向半分の領域を示した．電流増加時は端部のストリップに多くの電流が流れ，端部のストリップ電流は 22 A 程度で一定となった．その後，中央部の電流の増加割合が大きくなった．交流通電時に電流が一定となるストリップ電流と，直流通電において 0.1 mV/cm 発生時の電流 210 A を幅 2 mm に換算した値，すなわち 21 A がほぼ等しい結果となった．通電電流の減少時は，端部のストリップから電流が減少し，−22 A 程度で一定となった後，中央部の電流が遅れて追随するする様子がわかる．これは，電流

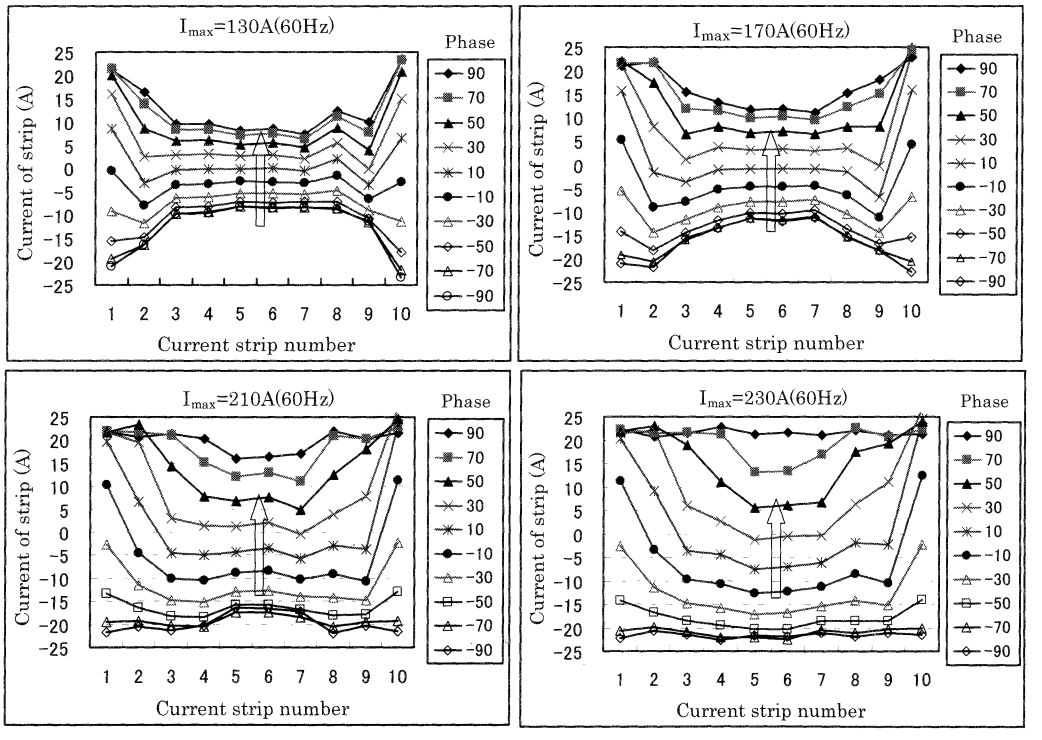


Fig.3 Results of the current distribution measurement (60Hz)

が小さい場合の電流分布はインダクタンスで決まり，各領域の電流が大きくなると抵抗性電圧で電流変化が抑制されるためであり，測定結果は妥当と考えられる．

Fig.3 に，電流位相－90 度から 90 度までの電流分布を，電流位相をパラメータにして示す．周波数は 60Hz とし，通電電流の最大値を，130 A，170 A，210 A，230 A とした．これらは，それぞれ 1 μV/cm 基準で定義した I_c である 167 A の 78 %，102 %，125 %，138 % に相当する．通電電流が全体の I_c 以下の 130 A の場合でも，端部のストリップ電流はストリップあたりに換算した I_c(17 A)を超えており，大きな偏流を観測した．ほぼ全体の I_c に等しい 170 A を通電した場合でも，大きく偏流する状況は同様である．全体の I_c の 1.4 倍程度の電流を通電すると，電流が最大となる位相－90 度または 90 度では，各ストリップの電流が均一となる．電力系統事故時に限流器として動作時する際は，I_c の約 2 倍の電流でクエンチする．このため，限流器として動作する際の電流分布は均一とみなしてよいことがわかる．

Fig.4 に，最大電流を 230 A とし，周波数を 1 Hz，

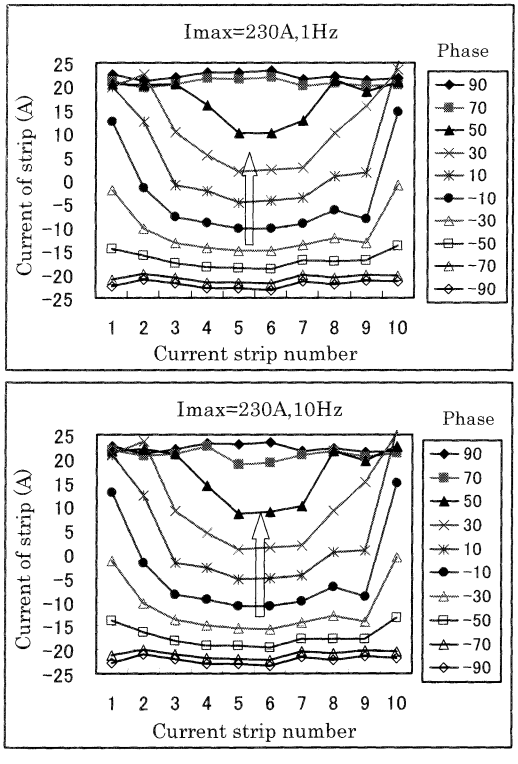


Fig.4 Measured frequency dependence of the current distribution.

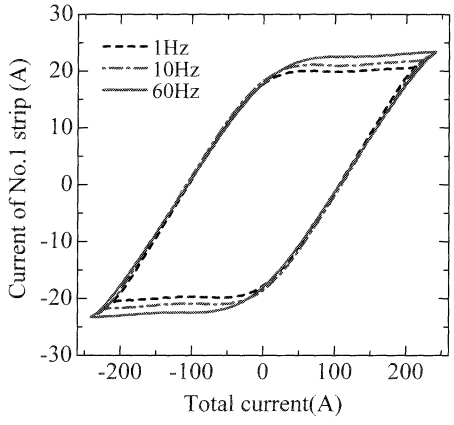


Fig.5 Measured frequency dependence of current distribution at the edge element of the film.

10Hz と変えた結果を示す．60 Hz の結果は，Fig.3 に示している．電流分布に顕著な周波数依存性は見られない．しかし，電流位相 70 度で比較すると，周波数が低い場合のストリップ電流は均一であるが，周波数が高くなると中央部のストリップ電流が低くなっている．これは，電流分布に周波数依存性があることを示している．Fig.5 に，最も端のストリップ(#1)電流の周波数依存性を示す．周波数が高くなると，電流が一定となるストリップ電流がわずかに増加した．これは，周波数が 10 倍になるとインダクタンス分の電圧も 10 倍になるが，抵抗性の電圧は電流の n 乗に比例して増加するため，電流が一定となるストリップ電流にわずかな差しかないためと考えられる．

4．考　察

電流分布の測定において，大きな偏流を観測できた．この妥当性を検証するため，電流分布の計算を行った．Fig.6 に，電流分布計算回路モデルを示す．薄膜を幅方向に 10 分割した電流ストリップを想定し，それらが並列に接続されているとした．各ストリップの抵抗は，1 μV/cm 基準での I_c を 17 A，n 値を 20 として，電流の n－1 乗に比例するとした．電流経路は集中定数で扱い，自己インダクタンス L，相互インダクタンス M_i を考慮し，L_{ex} を系統インピーダンス，$V_0 \sin \omega t$ を印加電圧すると，Fig.6 で示すモデルは，式(2)で表せる．

$$\begin{pmatrix} L & M_1 & M_2 & \cdot & \cdot & M_9 \\ M_1 & L & & & & \\ M_2 & & \cdot & & & \\ \cdot & & & \cdot & & \\ \cdot & & & & \cdot & \\ M_9 & & & & & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dI_1/dt \\ dI_2/dt \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ dI_{10}/dt \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 I_1 \\ R_2 I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{10} I_{10} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix} (V_0 \sin \omega t + L_{ex} \sum_{i=1}^{10} I_i) \qquad (2)$$

これは，連立１次微分方程式であるので，ルンゲクッタギル法[14]により，数値的に解くことができる．

Fig.7 に，周波数 60 Hz で I_cを大幅に越える電流を通電した場合の電流分布の計算結果を測定結果と比較して示す．端部のストリップの電流が、約 22 A で一定になると，順次中央部のストリップの電流変化が増加する計算結果となり，試験結果とほぼ一致した．Fig.8 に，最も端のストリップ電流の周波数依存性を示す．周波数の増加に伴い，一定となるストリップ電流がわずかに増加し，Fig.5 で示した試験結果と一致した．これらより，測定・シミュレーションの妥当性を検証できた．

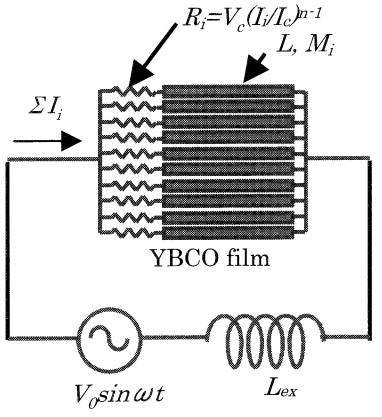


Fig.6 Calculation circuit of the current distribution.

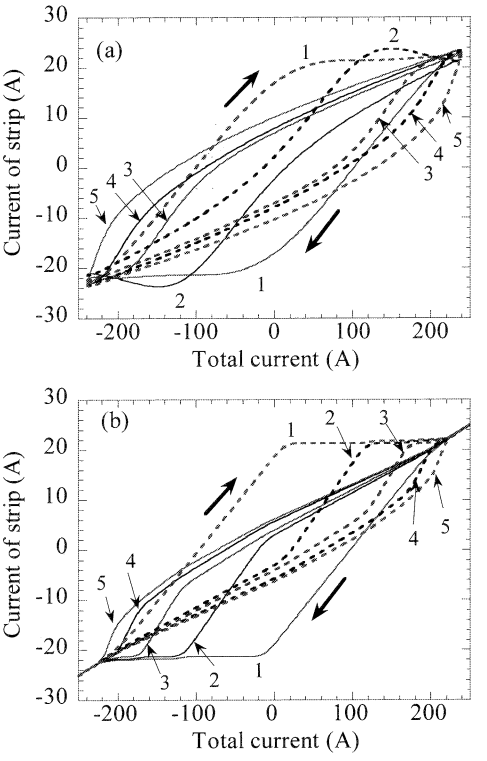


Fig.7 Comparison of the experimental and calculated results of current distribution (f=60Hz).
(a) Experiment, (b) Calculation

5. まとめ

イットリウム系高温超電導薄膜において，複数のホール素子による磁界分布測定法により交流通電時の幅方向電流分布測定を実施した．その結果，以下のことがわかった．

(1) I_cの 1.3 倍程度以下の電流において，超電導膜内の偏流を観測した．

(2) I_cの 1.4 倍程度の電流を通電すると電流分布は一様となった．電力系統事故時に限流器として動作を開始する電流は I_cの 2 倍程度であるので，この場合の超電導膜の電流分布は均一とみなせる．

(3) インダクタンスと，電流のｎ乗に比例する抵抗による電気回路シミュレーションを行い，測定・シミュレーションの妥当性を検証した．

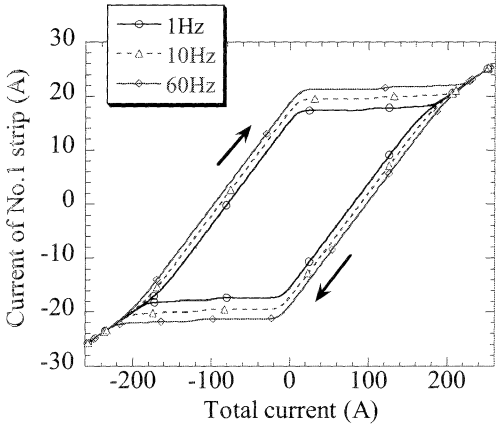


Fig.8 Calculated results of current at the edge current strip depending on frequency.

本研究は，経済産業省産業技術環境局のプロジェクト「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託により実施したものである．

参考文献

1) 橋本　安雄ら：電学論 **B 111** (1991) 344
2) 杉本　重幸ら：電学論 **B 117** (1997) 1403
3) 郭　育紅ら：電学論 **B 120** (2000) 791
4) 大熊　武ら：電学論 **B 119** (1999) 474
5) 大熊　武ら：電学論 **B 120** (2000) 858
6) E. M. Leung, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 985
7) H. Kado, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 993
8) B. Gromoll, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 655
9) J. Noudem, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 664
10) 工藤由紀ら：電学論 **B 122** (2002) 33
11) K. Shimohata, et al.: Physica C **372** (2002) 1663
12) P. Usak: Physica C **316** (1999) 229
13) H. Kamijyo, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** (2001) 1816
14) 小島紀男ら：FORTRAN 基礎数値計算，東海大学出版会　港北出版印刷 (1997)