

大型 CIC 超電導導体の 長時定数交流損失

浜島 高太郎 (電気電子工学科)
 島村 浩史 (電気電子工学科)
 角正 陽平 (電気電子工学科)
 津田 理 (電気電子工学科)
 原田 直幸 (電気電子工学科)

AC losses with long time constants in a large CIC superconductor

Takataro HAMAJIMA (Department of Electrical and Electronics Engineering)
 Hiroshi Shimamura (Department of Electrical and Electronics Engineering)
 Youhei KAKUSHO (Department of Electrical and Electronics Engineering)
 Makoto TSUDA (Department of Electrical and Electronics Engineering)
 Naoyuki HARADA (Department of Electrical and Electronics Engineering)

A large superconducting coil wound with Cable-in-Conduit (CIC) conductor caused an additional AC loss which cannot be estimated from short conductor sample test results. It was confirmed that the additional AC loss was generated by long current loops in the CIC conductor. We propose a mechanism forming the long loops. If one strand on the surface of a sub-cable contacts with the other strand on the surface of the adjacent sub-cable, the two strands must encounter each other again at LCM (Least Common Multiplier) distance of all staged cable pitches and thereby result in forming a pair of a long loop. The long time constants of long loops were calculated. We orderly labeled all strands in a real CIC conductor, disassembling carefully the cable after peeling the conduit. It was found that the strands in a triplex were widely displaced from their original positions, and thereby their contacting lengths became longer than calculated ones. This fact makes the time constant of loop longer and hence can explain the observed long time constants.

Key Words: AC loss, coupling loss, cable-in-conduit, twist pitch, long time constant

1. はじめに

大型の核融合装置や超電導電力貯蔵装置などには、一般的に大電流容量のケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体を使用される。この CIC 導体では、導体内電流分布の偏流現象が顕著に発生する場合があることが分かってきた^(1,2)。日本原子力研究所 (原研) での一連の DPC (Demonstrative Poloidal Coil) 試験 (DPC-U, US-DPC) 以来、偏流による超電導コイルの特性劣化現象が多く見つかってきた。その原因として次のようなことが考えられた。3 本を単位とするトリプレット構成の導体では、ケーブルのポイド率を低くして導体の

電流密度を高めるために、ケーブルをコンジットに納める最終工程で圧縮を加える。圧縮時に加わるケーブルの変形により、3 本を構成する各素線は正確にトランスポートされた状態から僅かに変移させられる。したがって、各素線の磁界と鎖交する面積が僅かに異なり、素線間でループが構成されると、磁界の変化により導体内部にループ電流が誘起される⁽³⁾。これらのループ電流は、導体内の電流分布に偏流を発生させることになる。また、これらのループは幾何学的にも長く、時定数でも長いものがあることが分かった。

また、US-DPC 試験で発生した Ramp Rate

Limitation(RRL)現象も偏流現象に基づくもので、最近の小型試験結果から、ループ電流の存在が示唆された^(4,5)。すなわち、導体内のループ電流が臨界電流を越すと、部分的なクエンチによる電圧スパイクが観測され、そのスパイクが初期通電電流と磁界に依存していることから、ループ電流の存在が証明された。

一方、CIC 導体で製作された SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) モデルコイル⁽⁶⁻⁸⁾や LHD (Large Helical Device) 用ポロイダルコイル^(9,10)では、交流損失の増大が観測された。この原因も導体内に発生した長時定数を有する電流ループによるものであると考えられる⁽⁶⁻¹⁰⁾。

ここでは、これらの現象、およびその原因となる長時定数ループの発生するメカニズムについて述べる。

2. 交流損失

交流損失は各パンケーキの出入口の温度と圧力からエンタルピー差を求め、それに流量を乗ずることにより入熱を計算し、さらに時間積分することにより、1 サイクル当たりの交流損失 (J) を算出する。時間は温度が初期の値に回復するまで十分に長くとる。

結合損失は測定した全損失からヒステリシス損失を除いた分とした。結合損失 Q_c は、磁界の立ち上げ時間の関数である規格化損失 Q^* を用いて、次式で表すことができる¹¹⁾。

$$Q_c = Q^* \left(\frac{2}{\mu_0} \sum_i B_{mi} V_i \right) \quad (1)$$

ここで、 Q^* は単発台形波の場合次式で与えられる。

$$Q^* = \zeta \left\{ 2 + \zeta \left(1 - e^{-1/\zeta} \right) \left(e^{-1/\zeta - 1/\xi} - e^{-1/\xi} - 2 \right) \right\} \quad (2)$$

ただし、 $\zeta = \tau_c / t_1$, $\xi = \tau_c / t_2$, $\tau_c = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{\rho_{\perp}} \left(\frac{L_p}{2\pi} \right)^2 B_{mi}$,

V_i は i 番目の要素における最大磁界と体積を表し、体積要素は素線の体積を用いる。また、 t_1 は立ち上げ時間、 t_2 はフラットトップの時間、 L_p はツイストピッチを表す。

規格化損失 Q^* を磁界の立ち上げ時間の逆数(周波数)に対してプロットした結果を Fig. 1 に示す。測定は原研 (JAERI) と米国ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL) で行った結果である。凡例の電流値は通電最大電流値である。図中の実線は、台形波単パルス電流運転に対して、時定数が 0.22 s と 30 s の規格化損失を加え合わせたものである。

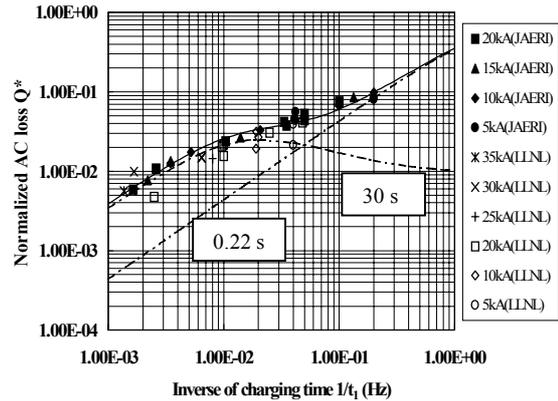


Fig.1. Normalized coupling loss as a function of inverse charging time.

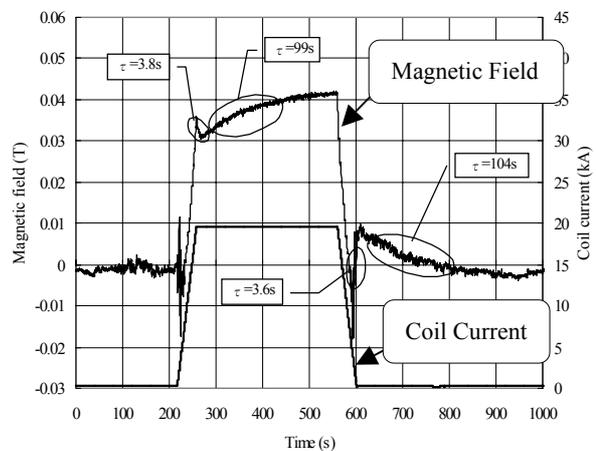


Fig. 2. Magnetic field detected by Hall probe and coil current waveform.

測定点は、実線で良く近似できることが分かる。

したがって、結合損失の時定数が一点鎖線で示す 0.22 s と、2 点鎖線で示す 30 s の 2 つの成分で構成されていることが分かる⁶⁻⁸⁾。

これらの時定数のうち、短時定数である 0.22 s は、短尺導体の交流試験結果から推測される通常の最終撚りピッチの 2 乗に比例した規則的な成分と同じである。他方の 30 s の長時定数はコイルになって初めて発生する長時定数ループによる不規則な交流損失である。

この長時定数ループの存在は、①コイルに取り付けたホール素子による磁界減衰波形測定⁽⁷⁾、②電圧端子による磁束の変化測定⁽⁸⁾、によって確認された。特に、Fig. 2 に示すホール素子による詳細な測定結果⁽⁷⁾から、長時定数は 4 秒から 100 秒程度の範囲にわたる時定数から構成されていることが分かった。それらの時定数の平均値は 30 秒程度であった。

3. 長時定数ループ

この平均的な時定数 30s を用いて、長時定数ループの横方向抵抗が規則的な結合損失の横方向抵抗と同じと仮定すると、ループの特性長として約 4.2m が得られる⁽⁶⁾。この特性長は、各撚り次数のツイストピッチ長の最小公倍数 3.6m に近い値である。次のことを考慮すると、長時定数ループは撚りピッチの最小公倍数に関連した値であると推定される。すなわち、最終撚りの一段前のサブケーブル外周に現れる素線が、隣のサブケーブルの外周に現れた素線と接触すると、各次数のケーブルの撚りピッチ長の最小公倍数の距離で再度接触を繰り返すこととなる。このようにして構成されるループは、規則的に繰り返されるため、交流損失として測定できる程度にループ数も多くなることが予想される。さらに、比較的ループ長が長く、したがって、インダクタンスも大きくなる。また、接触点の抵抗との比でループの時定数が決まるため、この場合には比較的長い時定数となることが予想される⁽¹²⁾。

ここで提案したループ形成のメカニズムの妥当性を確立するために、導体を構成する素線の軌跡を求め^(12,13)、それを基に長時定数ループの電気定数は以下の推定方法によって求め、特性を比較検討する。

(1) 等価横方向抵抗率の推定：

コイルの短時定数から次式に従って等価横方向抵抗率 ρ_{\perp} を推定する。

$$\rho_{\perp} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{\tau_c} \left(\frac{L_p}{2\pi} \right)^2 \quad [\Omega \text{ m}] \quad (1)$$

ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 τ_c は短時定数、 L_p は最終撚りピッチである。これらに値を入れると、 $9.4 \times 10^{-9} [\Omega \text{ m}]$ が得られる。

(2) ループのインダクタンスとコンダクタンス：

本 CIC 導体は断面とループの長さを比較すると、圧倒的にループの長さが長いので、ループはほぼ平行導線とみなすことができる。また、コンダクタンスは、CIC 導体断面の約 65%の空間を素線で埋め尽くしているために、素線間がほぼ連続的に横方向抵抗で構成されていると考えて、次式で求める。

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l_L}{\pi} \ln \frac{d-a}{a} \quad [\text{H}] \quad (2)$$

$$G = \frac{\pi \cdot l_c}{\rho_{\perp} \ln \frac{b-a}{a}} \quad [\text{S}] \quad (3)$$

ただし、 a はフィラメント領域の半径、 d はサブケーブル間の平均距離、 b は素線の直径、 l_L はル

ープ長、 l_c は接触長さである。

インダクタンスの長さ l_L は、各撚りピッチの最小公倍数の長さとして 3.6m を採用する。コンダクタンスは、素線の軌跡解析結果から、素線がお互いに接触している距離 l_c を求めることができるので、その接触距離を用いる⁽¹²⁾。

5 次撚りサブケーブルの外周に現れる素線と、隣り合うサブケーブルの外周に現れる素線とが接触して作るループが最も大きなループとなるので、これらのループを対象に検討する。素線同士が接触しているかどうかはそれぞれの素線の重心間距離が素線の直径以内に入っているかどうかにより判断する。その結果、5 次撚りサブケーブルの外周に現れる素線と、隣り合うサブケーブルの外周に現れる素線とが接触して作るループ数は約 20,000 であった⁽¹²⁾。

(3) 長時定数ループの接触長さと固有時定数：

全てのループの接触長さの和はほぼ 80,000mm であり、平均的な接触長さとして約 4mm となった⁽¹²⁾。各ループは各撚りピッチの最小公倍数の長さを持ち、その両端にそれぞれの接触長さを有すると仮定したときの固有の時定数を次式で与える。

$$\tau = \frac{L}{2R} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

ただし、接触抵抗 R はコンダクタンス G の逆数である。

このようにして解析したループ時定数のスペクトル結果を Fig. 3 に示す。最多のループ時定数は約 10s で、平均のループ時定数は約 18s で、図 1 に示した実測から推定された平均長時定数 30s より僅かに少ない。最大の時定数は 150s 程度であるから、実験でホール素子の出力波形から観測された 4s から 110s 程度の長時定数^(7,8)を発生するメカニズムの有力な候補と思われる。

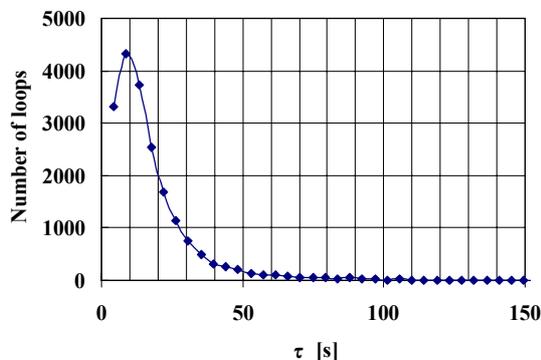


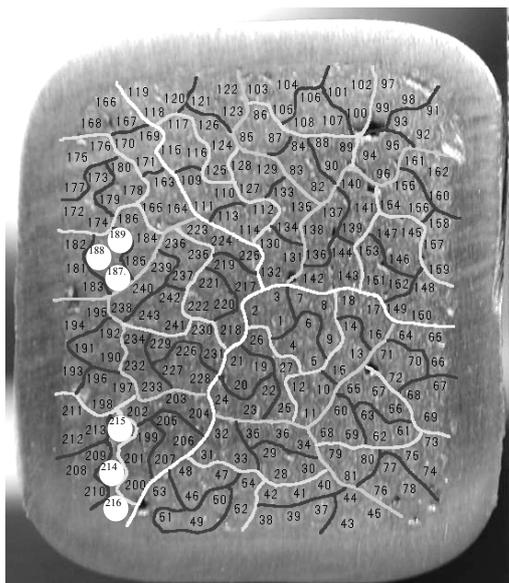
Fig. 3. Spectrum of calculated time constants.

4. 実際の導体断面内の素線配置

今回開発した素線のコンジット内での配置解析と、実際の CIC 導体における素線配置との比較を行うために、CIC 導体内の素線に順序立てて番号付けを行った。その結果を図 4 に示す^{14,15)}。図中の番号は写真右と左で同じ素線の 1m 離れた地点での導体断面内の位置を示す。図中の線はサブケーブルの単位の境界を示す。

図を詳細に観察すると、本来 1 次撚り線の各素線は 3 本が近傍にまとまって一体化していると予想されていたにもかかわらず、所々で、実際の 3 本撚り線配置が崩れて、各素線が飛び飛びに点在する。これらの 3 本撚り線は、1m 程度離れると再度元来の 3 本撚りの一体化した配置となる。特に、その様子がわかる 3 本撚り線の組の例を図中の白抜きで示した。すなわち、1 次撚り線の組 (187,188,189) は右図で素線 189 番が飛び出して配置されているが、左図で一体化しているのが分かる。反対に、(214,215,216) の組は左図で離れ離れになっているが、右図で一体化しているのが分かる。

これらの飛び飛びの素線は、隣り合うサブケーブルの外周に現れた素線と点クロスで交差するのでなく、長い距離に渡って接触することが推測できる。したがって、解析で予想するより低い接触抵抗となり、長い時定数が発生する可能性がある。また、このような飛び飛びの位置は、解析した位置と異なるので、解析ではこれらの現象も考慮できるように工夫する必要がある。



5. 素線の接触抵抗

ループの実際の時定数を検討するために、素線間の接触抵抗を測定して調べた。超電導電力貯蔵装置に用いた酸化被覆素線をクロスさせ、クロス接触点を液体ヘリウム中に浸漬し、直流電流を増加させて、そのクロス点の電圧を測定した。その結果を図 5 に示す。図中の丸数字は電流の上昇順番を表した。すなわち、①にしたがって、最初に電流を上昇させると、接触抵抗は高い抵抗特性を示す。その後、②に示すように、約 0.2 [V]程度の閾値に達すると、電流を上昇してもほぼ一定値になる。電流を 40 [A]程度から下降させると、初期

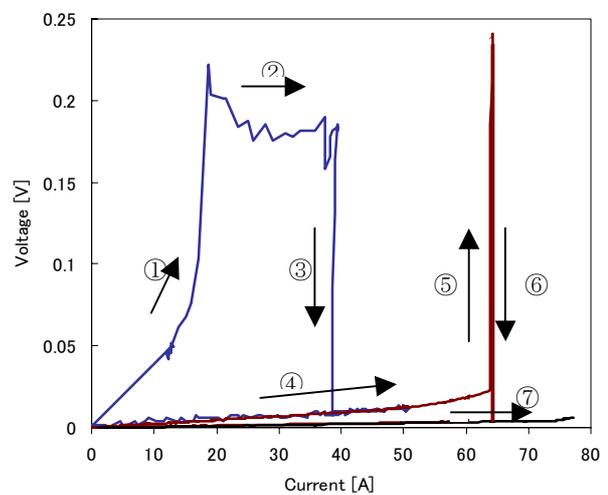


Fig. 5 Cross contact resistance of strands with oxidized surface.

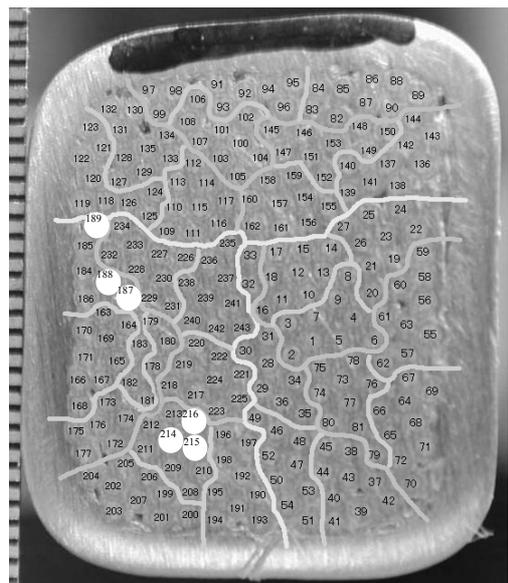


Fig. 4. Photographs of both side cross sections of CIC conductor with 243 strands and 1m long. Labeled numbers are well ordered corresponding to fabrication. Some first sub-cables with widely displaced strands are indicated with white marks.

の抵抗値と異なり、極めて低い抵抗値に下がる。次の電流上昇時は、④に示すように、低い抵抗値の状態である。この抵抗値は、最大の電流値が高くなるほど、不可逆的に低くなる傾向にある。このように、ループに流れる結合損失電流が大きくなるに伴い、極めて小さな抵抗値が予想される。

これらの結果は、長時定数のループを発生するメカニズムの重要な一つと考えられる。

6. まとめ

CIC 導体では、通常の規則的な交流損失のほかに、長時定数の不規則な交流損失があることが多くの実測データから直接的・間接的に実証された。この長時定数の発生するメカニズムとして、最終ケーブルの1次前のサブケーブル外周に現れる素線と、その隣のサブケーブル外周の素線が接触すると、各撚りピッチの最小公倍数の位置で再度接触してループを構成するメカニズムを提案した。

このループの妥当性を検討するために、各素線のコンジット断面内の配置と導体長手方向の軌跡を、導体の製造工程を考慮した適切な仮定の基に解析して、ループの時定数を調べた。解析した長時定数の平均値は、実験で得られたそれより僅かに短かった。これは、実際の素線の断面内位置を詳細に調べた結果、本来一体化していると予想していた1次撚り線の中の各素線が、飛び飛びに点在する場合は比較的多く観測され、その場合には、隣り合うサブケーブルの外周に現れる素線同士が相当の距離に渡って接触していると推定できるためである。

素線の断面を詳細に観察した結果、素線が所々で飛び飛びに点在することが分かった。素線の点在が長時定数に関係する要因の一つと思われるので、他のCIC導体についても断面観察を進めて検討していく予定である。

今回、酸化被覆素線の接触抵抗を測定した結果、ループに流れる電流が大きくなるにしたがって、接触抵抗が低くなり、長時定数のループの発生メカニズムの一つと考えられる。今後、接触抵抗を詳細に測定して検討していく予定である。

参考文献

- 1) N. Koizumi, K. Okuno, Y. Takahashi, H. Tsuji, M. Nishi, et al., "Experimental results on instability caused by non-uniform current distribution in the 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U)," *Cryogenics*, Vol. 34, pp.155-162, 1994
- 2) N. Koizumi, K. Okuno, Y. Takahashi, H. Tsuji and S. Shimamoto, "Stabilized operation of 30 kA NbTi Demo Poloidal Coil (DPC-U) with uniform current distribution in

- conductors," *Cryogenics*, Vol. 34, pp.1015-1022, 1994
- 3) N. Koizumi, Y. Takahashi, M. Nishi, T. Isono, H. Tsuji, M. Ono, T. Hamajima and T. Fujioka, "Ramp-rate limitation due to current imbalance in a large cable-in-conduit conductor consisting of chrome-plated strands," *Cryogenics*, Vol. 37, pp.441-452, 1997
- 4) S. Jeong, J. Schultz, M. Takayasu, V. Vysotsky, P. Michael, W. Warnes and S. Shen, "Ramp rate limitation experiments using a hybrid superconducting cable," *Cryogenics*, Vol.36, pp.623-629, 1996
- 5) M. Takayasu, V. Vysotsky, S. Jeong, P. Michael, J. Schultz and J. Minervini, "Spike voltages seen during "quick charge" ramp limitation tests on Nb3Sn cable-in-conduit conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.7, pp.150-154, 1997
- 6) 浜島高太郎, 嶋田守, 小野通隆, 瀧上浩幸, 花井哲, 他, "SMES モデルコイルルーパルス通電特性," *低温工学*, Vol.33, pp492-400, 1998
- 7) 浜島高太郎, 花井哲, 和智良裕, 京藤誠, 嶋田守, 他, "SMES モデルコイル交流損失," *低温工学*, Vol.34, pp286-292, 1999
- 8) T.Hamajima, S.Hanai, Y.Wachi, M.Kyoto, M.Shimada, et al., "AC loss performance of the 100kWh SMES model coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.10, pp.812-815, 2000
- 9) T. Mito, K. Takahata, A. Iwamoto, R. Maekawa, N. Yanagi, T. Satow, et al., "AC loss measurements of the experiments on a single inner vertical coil (EXSIV) for the Large Helical Device," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.7, pp.330-334, 1997
- 10) T. Mito, K. Takahata, A. Iwamoto, R. Maekawa, N. Yanagi, T. Satow, et al., "Extra AC loss for a CICC coil due to the non-uniform current distribution in the cable," *Cryogenics*, Vol. 38, pp.551-558, 1998
- 11) 船木和夫, 住吉文夫: 多芯線と導体, 産業図書, 東京 (1995) 35
- 12) T. Hamajima, M. Yoshida, H. Shimamura, N. Harada, M. Tsuda, S. Hanai, T. Satow, "A mechanism causing an additional AC loss in a large CICC Coil" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.11, pp.1860-1863
- 13) Y.J. Chen and J.P. Freidberg, "A method for modeling the winding pattern of large scale superconducting cable," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.5 (1996) pp.5145-5147
- 14) 浜島高太郎, 津田理, 島村浩史, 原田直幸, 佐藤隆, 高畑一也, "大型CIC超電導導体の長時定数ループの特性," 第64回2001年度春季低温工学・超電導学会D3-10, p238
- 15) 浜島高太郎, 津田理, 吉田基延, 島村浩史, 原田直幸, 佐藤隆, 高畑一也, "大型超電導コイルにおける長時定数不規則交流損失," *電学論 B*, Vol. 121, pp.1270-1275, 2001

(平成13年12月25日受理)