素線間接触抵抗分布のある多重撚りケーブルの素線間結合損失

妹尾 和威[†], 福原 勝彦, 長谷川 満*三菱電機(株)先端技術総合研究所 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1 ([†]E-mail:Seo.Kazutaka@wrc.melco.co.jp)

* 三菱電機(株)本社 東京都中央区晴海 1-8-12 オフィスタワーZ

(2002 年 10 月 31 日受理)

Inter-strand Coupling Loss in a Multi-strand Superconducting Cable with Non-uniform Contact Resistance among Strands

Kazutaka SEO, Katsuhiko FUKUHARA and Mitsuru HASEGAWA*

Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation,

8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki, Hyogo 661-8661

*Head Office, Mitsubishi Electric Corporation, 1-8-12 Harumi, Chuou-ku, Tokyo 104-6215

(Received October 31, 2002)

Synopsis: Multi-strand superconducting cables are utilized for large superconducting machines and/or alternative or pulse current devices, such as fusion machines and superconducting magnetic energy storage (SMES) devices. In the numerical evaluation of AC loss, especially inter-strand coupling loss, it is important to establish a model for crossover contact resistance distribution among strands and/or sub-cables. For cables with multiple cabling stages, the contact resistance between two strands (or two sub-cables) changes along the conductor axis due to the related traces. Good contact is attained at locations where they crossover. On the other hand, when they are separated, there is no direct contact between them. The relationship between AC loss and contact resistance was evaluated for a short sample, a 3×3 twisted cable of Cr-plated Nb₃Sn strands. The AC loss was measured using the calorimetric method at LHe temperature. The contact resistance between the two strands was also measured for the same sample under the same condition. The contact resistance distribution, which was expected as the result of the contact resistance measurement, was adopted to a numerical model and the AC loss was calculated using the non-uniform constant electric circuit. By comparing the calculated and measured losses, the contact resistance variation model was modified suitably. Finally, the relation between inter-strand coupling loss and contact resistance distribution are discussed from the viewpoint of constitution of the cable using established numerical model.

Keywords: multi-strand superconducting cables, inter-strand coupling loss, contact resistance, distributed constant electric circuit

1. はじめに

多重撚り線ケーブルは交流損失, 特に素線間結合損失を低減しつつ, 局所的な常伝導発生時の電流再配分が速やかに起こるような条件で設計される. 電流再配分を妨げることなく, 素線間結合損失を低減するために, この種のケーブルの素線表面に対してクロムメッキや自然酸化などの, 銅母材が剥き出しの素線と比較

して, 接触抵抗を高くする表面処理が施される¹⁾. 多重撚り線ケーブルの中でも, ケーブルインコンジット導体(CICC: Cable in Conduit Conductor)において表面処理, 言い替えれば素線間の接触抵抗の設計は重要である. CICCにおいては, 流路内の冷媒量が制約されており, エンタルピー的な余裕が浸漬冷却に較べて小さい. そのため, 交流損失も低く抑えられなければならない. 冷媒量は導体内のボイド率できまり, 例えば

ITER 導体の場合で $\sim 36\%$ である¹⁾。交流損失が大きいことは温度マージンの低下につながるため、素線間の接触抵抗を調整して、交流損失を低減することは重要である。

素線間結合損失に関する解析は、複数の研究機関で成されている。しかし、それらのほとんどは、1次撚りケーブルに関するものである。また多重撚りのものに関しては、大規模なFEM(finite elemental method)解析になっている²⁾。この種の解析においては、モデルは非常に複雑になり、大量のCPU時間を必要とする。

本研究において、我々は多重撚りケーブルを分布定数系回路として扱った。解析における最大の特長は、多重撚りを構成する各素線間の距離の関数として接触抵抗をモデル化して、計算に適用したことである。素線間結合損失の解析において、接触抵抗のモデル化が最も重要な事項である。

はじめに、DC通電実験を行うことで素線接触コンダクタンスを実測した。ただし、ここで得られる値は、長さ方向に分布する接触コンダクタンスの平均値的なもの(以降、見かけの接触コンダクタンスという)である。周囲の素線の影響、すなわち複数の素線を渡って流れる電流経路も含んだ結果である。実験サンプルと同一な解析モデルを作成し、接触抵抗のモデル化の妥当性を検証した。次に、同一のモデルについて、素線間結合損失の数値解析を行った。同時に、カロリメトリック法により実験的に素線間結合損失を評価し、比較した。

最近、高い安定性と低コストを両立する目的で、銅線(segregated copper)が超電導線とともに撚り込まれたケーブルがある³⁾。例えば、低磁場領域では銅線の量を増やし、高磁場領域では銅線を含まないことで同一寸法のケーブルを用いながら、グレーディング巻き線が可能になる。また、銅線はクエンチ時のホットスポット温度低減の目的で撚り込まれることもある。事実、ITER CS (Central Solenoid) モデルコイルの、外層モジュールではCS-II 導体とよばれる銅線を含むケーブルが使用されている。この種のケーブルにおいては、超電導素線の量が少ないために、全ての素線が超電導である場合と比較して温度マージンが小さい。従って、銅線を含んだ状態における素線間結合損失を正確に推定する必要がある。

さらに、偏流は素線間結合損失の増大に寄与するといわれている。同一のモデルを用い、偏流を発生させた時の素線間結合損失についても、開発した計算手法

および解析モデルを用いて検討した。

2. 実験

2.1 サンプル

Table 1 および Fig. 1 に、サンプルの諸元および概観写真を示す。ケーブルはクロム(Cr)メッキされた外径0.81mmのNb₃Sn素線で構成されており、撚り構成は3×3である。ケーブルの横方向に圧縮しながら、Nb₃Snの生成熟処理を施した。ここで、圧縮方向は実際のコイルでは磁場方向であり、電磁力方向とは異なる。加圧により、素線が鎖交する箇所、点接触的にシンタリング(熱処理によるCr同士の固着)が起ると見込まれる。圧縮の目的は、接触コンダクタンスを大きくすることで、素線間結合損失測定を容易にするためである。圧縮の効果がどの様に現れたかについては、実験、解析の章で述べる。

Table 1 Major parameters of the 3×3 cable sample.

Superconductor	Nb ₃ Sn
Strand diameter of the strand	φ 0.81 mm
Copper ratio	1.5
1st cabling pitch	30 mm
2nd cabling pitch	60 mm
Cable length	0.2 m

Fig. 1 Sample for inter-strand conductance and AC loss measurements.

2.2 素線間接触抵抗測定

交流損失測定の前に、見かけのコンダクタンスの測定を実施した。方法は、液体ヘリウム中で、1本の素線から別の素線に直流電流 20A を流すことで行った。ここで得られるのは、見かけのコンダクタンスであり、通電している2本の素線間のコンダクタンスそのものではない。電流は、2本の間の接触箇所を直接流れる以外に、その他複数の素線間の接触抵抗を渡って流れる。Fig. 2 に、見かけの素線間接触コンダクタンスの測定結果を示す。3×3 撚り線において、通電する2本を同一サブケーブルから選択した場合には、単位長さあたりの見かけの接触コンダクタンスは $\sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ S/m}$ 、別のサブケーブルから選択した場合 $\sim 0.55 \times 10^{-8} \text{ S/m}$ であった。

2.3 交流損失測定

カロリメトリック法により、交流損失を測定した。印加磁場は正弦波状で、最大片振幅およそ 100 ガウスである。Fig. 3 は、1 周期あたりの規格化交流損失を示す。単純に、1 周期損失の実測値を、 B^2/μ_0 および、素線体積で割ったものである。 μ_0 は真空透磁率で

Fig. 2 Contact conductance between two strands. The conductance between two strands in different sub-cables is larger than that between in the same sub-cable.

Fig. 3 Frequency dependence of normalized one-cycle AC loss. Rectangular symbols are measurements. The calculated result of the point contact model shows better agreement with experimental result.

ある。四角印が実測値で、それ以外は解析値である。数値解析モデルや方法については後述する。ここで、1 周期あたりの規格化交流損失が最大、言い替えば最もケーブルを効率よく誘導加熱できる周波数を、特性周波数(f_c)と定義する。図中、特性周波数 f_c は、 $\sim 10 \text{ Hz}$ である、結合電流時定数 $\tau (=1/2 \pi f_c)$ は 16 ms になる。

3. 解析

3.1 解析モデル

実験サンプルを模擬した分布定数系回路モデルを作成した。分布定数系回路モデルは、2 素線間の接触抵抗分布の不均一性をモデル化するのに適している⁴⁾。多重撚り線ケーブルの電磁現象をシミュレートするためには、素線あるいは素線間 a) 自己、相互インダクタンス分布や b) 素線間接触抵抗分布を適切にモデル化する必要がある。

解析において、これらは素線間距離の関数として決定した。実際は、回路モデルは、約 1000 の線分要素に分割されている。Fig. 4 に解析モデルの一部を示す。インダクタンスや接触抵抗は、素線に沿った積分路で連続的に積分して、代表値を離散化された線要素あるいは節点に与えている。交流損失の原因になる誘導起電力は、外部印加磁界としてケーブル横方向磁場だけを想定しているため、素線のケーブル横方向位置の関数とした。

離散化された各線分要素の自己インダクタンス L_m

[H]は、1式より求められる⁵⁾。添字 m は素線番号を示す。式中 Δx [m] は線分要素の長さ、 a [m] は電流の流れている領域(ここではフィラメントバンドル部)の直径である。

$$L_m = \frac{\Delta x}{2\pi} \left[\frac{\mu}{4} + \mu \left\{ \text{Log} \left(\frac{2\Delta x}{a/2} \right) - 1 \right\} \right] \quad (1)$$

線分要素間の相互インダクタンス M については、ノイマンの式を連続的に積分している。しかし、すべての領域において磁気結合を考えるわけにもいかないため、Fig. 4 のように、隣接する線分要素、および線長方向の前後の線分要素区間について磁気結合を考慮した。

例として、線分要素 m の線分要素 n に対する相互インダクタンス M_{mn} [H] は、2式のように求められる⁵⁾。与式では、2本の線分要素中の微小区間 ds_m と ds_n の間の距離を r_{mn} 、角度を θ として線分間の相互インダクタンスを求め、線分要素の長さ方向に、各要素長さ (Δx , $\Delta x'$) 分だけ積分している。

$$M_{mn} = \frac{\mu}{4\pi} \int_0^{\Delta x'} \int_0^{\Delta x} \frac{\cos \theta}{r_{mn}} ds_m ds_n \quad (2)$$

接触抵抗についても、線分に沿って接触コンダクタンスを積分し、代表値を線要素間の節点に与えている。Table 2 に、解析を実施した条件を列記する。カッコ内の図番号は、結果のグラフを示す。

Fig. 4 Schematic illustrations of the self and mutual inductances of the electric circuit.

Table 2 Cases in the calculation.

1) Line contact model	(Fig. 3)
2) Point contact model	(Fig. 3)
3) Point contact and periodical boundary conditions	(Fig. 8)
4) Point contact in each 1st sub-cable (Insulated between sub-cables)	(Fig. 8)
5) Point contact + non-uniform induced voltage (One sub-cable was moved by 0.81 mm in the transverse direction)	(Fig. 9)
6) One segregated copper wire in each sub-cable	(Fig. 10)
7) Two segregated copper wires in each sub-cable	(Fig. 10)
8) All strands are copper wires	(Fig. 10)

3.2 素線間接触抵抗モデルの検証

Fig. 5 に示す電気回路モデルについて、見かけの接触コンダクタンスの計算を行い、接触抵抗モデルの評価を行った。素線間の接触点の抵抗を、素線間距離の関数としてモデル化した。素線が隣接している時接触抵抗は小さい(コンダクタンス換算で 10^8 S/m)とした。一方、素線間が離れているときには、接触抵抗無限大とした。1本の素線から他の素線に、電圧 1mV を印加して電流を評価し、見かけの接触コンダクタンスを求めた。電流を電圧で割ることで、単位長さあたりの見かけの接触コンダクタンスを得ることが出来る。Fig. 6 に解析結果を示す。Fig. 6a は、素線 1-1 から素線 3-3 に電流を流した時の、ケーブル長さ方向に流れる電流および電圧の長さ方向分布を示す。

接触状態として、線接触(line contact)と点接触(point contact)を仮定した。接触抵抗の模式図を Fig. 7 に示す。Fig. 7a は線接触、Fig. 7b を点接触を示す。線接触条件においては、接触抵抗は単純な素線間距離の関数とした。一方、Fig. 7b に示す点接触モデルにおいては、接触抵抗を隣接し、且つ加圧方向に交鎖している場合においてのみ低抵抗になるようにモデル化されている。これは、実験サンプルにおいて加圧されている様子を模擬している。

Fig. 5 An electric circuit for average contact resistance calculation. The current flows from strand 1-1 to 3-3, in different sub-cables.

Fig.6a は、線接触条件での解析結果を示す。Fig. 6a において、素線 1-1 と素線 3-3 間の平均的な接触コンダクタンスは $5.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ である。図中、抵抗ゼロの超電導素線に沿っては電圧の分布がない様子が示されている。Fig. 6b は、ケーブル横方向にプレスされている場合を模擬した、点接触モデルの解析結果を示す。プレス方向は、交流磁場印加方向と同じである。Fig.6b 中、周期的な電流分布変動が、線接触モデルの結果(Fig. 6a)ほどなめらかではない。

3.3 交流損失解析

Fig. 3 に、規格化交流損失の解析結果を示す。規格化された素線間結合損失の解析値に 0.2 が単純に加えられている。これは、ヒステリシス損失に相当する。ヒステリシス損失は、Fig. 3 の実測結果を低周波側に外挿することで得ている。もちろん、素線内結合損失も発生するが、適用した Nb_3Sn 素線の素線内結合損失時定数が 2 ms 以下と予想されており、素線間結合損失と比較して素線内結合損失は小さいために無視した。点接触を仮定した場合、線接触の場合と比較して解析結果は実測結果とよりよい一致を示した。Fig. 3 中、特性周波数は約 10 Hz である。特性周波数が実験と解析で異なる理由は、実験サンプルと解析モデルで接触抵抗分布が異なるためと思われる。例えば、Fig. 2 中、どの素線の対を選択するかによって、見かけの接触抵抗は大きくばらついている。

Fig. 6 Current and voltage distributions along the strands (1-1, 1-2 and 3-3). a) line contact model and b) point contact one. Straight lines with smaller marks indicate voltages along strands.

Fig. 7 Schematic illustrations of the line contact and point contact models.

Fig. A1 a) は、ケーブル長さ方向に流れる素線間結合電流分布を示している。Real は $|dB/dt|$ が最大になる時間を示し、Imaginary は磁場 B の絶対値が最大、 $(|dB/dt|=0)$ の時間を示している。Fig. A1 a)-d) に示す様に、周波数 1Hz の条件(f_c 以下の周波数)では、結合電流は $|dB/dt|$ 最大の時(Real phase)大きくなる(Fig. A1 a)。反対に、周波数 1kHz の条件(f_c 以上の周波数)では、結合電流は $|B|$ 最大の時(Imaginary phase)大きくなる(Fig. A1 d)。

a) ケーブル長の影響

周期的境界条件を仮定した無限長モデルの損失と電流分布を解析し、有限長のものと比較した。Fig. A1 e) に示す様に、長さ 0.2 m の有限長ケーブル(Fig. A1 a)に比べ、無限長ケーブルでは電流分布は連続的になっている。しかし、Fig. 8 に示す様に、単位長あたりの素線間結合損失はほぼ同一になっている。長さ 0.2m は最終撚りピッチの約 3.3 倍であり、この程度のサンプル長があれば十分にケーブルの損失が評価できていることが判る。

図中、サブケーブル間を絶縁した場合の損失も示している。この結果より、1 次よりサブケーブル内の損失は、サブケーブル間の損失に比べて小さい(特性周波数が、高い)ことが判る。

b) 電流偏流の影響

次に、素線間結合損失におよぼす偏流の影響について評価した。1 本のサブケーブルが 0.81mm だけケーブル横方向に変位し、誘導起電力のアンバランスが故意に導入されたことを想定した。Fig. 9 に、素線間結合損失の周波数依存性を示す。ケーブル本来の素線間結合損失の特性周波数 20Hz の他に、周波数 0.8Hz に損失のピークが存在する。これが、いわゆる長時定数損失の特性周波数に対応する。偏流がある場合、低周波(f_c 以下、例えば 0.1Hz)における 1 周期規格化損失は、偏流のない場合(Case 2)の 3 倍になっている。

c) 銅線の影響

最後に、銅線を含むケーブルの素線間結合損失の解析結果を示す。Fig. 10 に、1) 1 本の銅線が各サブケーブルに含まれている場合(Case 6)、2) 2 本の銅線が含まれる場合(Case 7)、および 3) 3 本の素線がすべて銅線の場合(Case 8)の解析結果を示す。

Fig. 8 Frequency dependences of normalized one-cycle AC losses. The parameter was model length.

Fig. 9 Frequency dependences of normalized one-cycle AC losses. The parameter was non-uniform current distribution.

図中、全交流損失(記号付き線)、およびその内のヒステリシス損失と銅線のジュール損失の和(記号無し線)の周波数依存性が示されている。銅線が含まれた場合、 f_c 以下の低周波で交流損失が低減されていることが判る。

ケーブルの臨界電流 I_c を同一として、ヒステリシス損失として 0.2 が、すべてのケースにおいて加算されている。1 本の銅線を含むサブケーブルでは、超電導素線の本数は 3 本から 2 本になる。超電導体の体積は $2/3$ になる。もとのケーブルと I_c を同一にするためには、臨界電流密度 J_c は $3/2$ 倍でなければならない。同じく、1 本のサブケーブルに 2 本の銅線を含む場合は、超電導素線の I_c はもとの素線の 3 倍でなければならない。ヒステリシス損失は J_c に比例することから、何れのケースにおいても、同量のヒステリシス損失を加算した。

Fig. 10 Frequency dependences of normalized one-cycle AC losses. The parameter was the number of segregated copper wires. Lines indicate joule loss and hysteresis one in the cable. Lines with symbols indicate total AC losses.

4. 考 察

先に述べたように、磁場方向にサンプルをプレスしたモデル、すなわち Fig. 7b に示した点接触モデルで実験結果と良い一致が示された。Fig. 3 に示すように、点接触の条件の方が、 f_c が小さく、時定数大きい。その理由は、線接触条件の方が、結合電流回路のインダクタンスが小さくなるためである。Fig. 7b に、模式図を示す。線接触モデル(Fig. 7a)においても、周波数が高くなれば、結合電流が素線間の交鎖位置に向かって集中していく。しかし、結合損失の特性周波数付近での電流分布は、接触抵抗分布が均一であると仮定すれば、極端な偏りを生じておらず比較的一様に素線間を渡って流れている。この時の電流の電気的中心線を模式的に示したのが Fig. 7a の矢印である。

次に偏流に関しては、3本の素線である1次サブケーブルの平均的な位置ずれは0.81mmよりも小さいはずである。しかしながら、実際の導体では外径は非常に大きい。ITER導体の場合で $\sim 40\text{mm}^1$ である。この場合、サブケーブルあるいは素線の変位は大きいであろうし、例えば角形に断面整形された導体の場合には変位はさらに大きいであろう。この論文で述べたようなサブケーブル間結合損失に加え、大きな偏流はその他の損失につながる。それらは、常伝導あるいはフラックスフロー電圧による損失や電流再配分時の接触抵抗

による発熱である⁶⁾。

銅線の影響については、サブケーブル間接触抵抗が増加するために結合損失が低減する。しかし、超電導素線同士の直接接触は減少するが、銅線を介した電気接触は依然存在するため、損失の低減効果はわずかである。

5. 結 論

分布定数系回路解析により、多重撚りケーブルの素線間結合損失の解析を行った。素線間の電気接触に関して、点接触モデルを仮定した場合で、実験結果と解析結果の良い一致が示された。

本解析手法ならびにモデルを適用して、偏流発生時の長時定数損失も解析可能であった。銅線を含むケーブルについても、素線間結合損失はそれほど抑制されないことが明らかになった。このことは、銅線を含んだ場合でも、サブケーブル間接触抵抗はほとんど変化しないことを示唆している。

以上より、本研究の解析手法およびモデルは、多重撚りケーブルの定性的な素線間結合損失解析に有効であることが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) P. Bruzzone, N. Mitchell et. al.: Conductor fabrication for the ITER model coils, IEEE Trans. Magn. **32**(1996) 2300
- 2) T. Kawashima, T. Yoshida, F. Sumiyoshi et. al. : 3D Analysis of coupling losses of superconducting CIC conductor, Proceedings of MT 15(1998) 1331
- 3) P. Bruzzone, A. M. Fuchs, B. Stepanov, G. Vecsey, E. Zapretilina: Test results of SeCRETS, a stability experiment about segregated copper in CICC, presented at ASC conference, September 18, 2000
- 4) F. Bellina and M. Ghin: Methods for the analysis of the joints between superconducting cables, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**(1999) 189
- 5) 後藤憲一, 山崎修一郎: 電磁気学演習, 共立出版(1970)
- 6) K. Seo, M. Morita et. al. : Numerical analyses for ramp rate limitation from the standpoint of heat generation during current redistribution, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**(1999) 591

付録

Fig. A1 は3×3 ケーブルの結合電流の分布を示している (Case 2 and 3). 実際の解析モデルは線要素であるが, 図は, コンタープロット用の立体要素の上に解析結果を表示している. Real は正弦波状に変化する印加磁場の dB/dt の絶対値が最大の瞬間を示す. Imaginary は $|dB/dt|$ が 0 の時である. $|B|$ の最大片振幅は 100 ガウスである.

Fig. A1 Contours of current distributions. Maximum and minimum values of the contour level are shown in the figures. a) Case 2, frequency (f)= 1 Hz, real phase, b) Case 2, f = 1 Hz, imaginary phase, c) Case 2, f = 1 kHz, real phase, d) Case 2, f = 1 kHz, imaginary phase and e) Case 3, f = 1 Hz, real phase.