超電導電力ケーブルの試作とその通電試験

正員 伊 藤 登 (電総研)
 正員 名 取 尚 武 (電総研)
 正員 樋 口 登 (電総研)

1. は し が き

都市化の拡大ならびに過密化により、地中ケーブル送電の必要性は高まっている。特に、都市部における電力需要の高密度化に対処するため、ケーブル送電容量ならびに送電距離は、飛躍的に増加することが予想される。これに適応できる新しい電力ケーブルの開発が急務となっており、そのひとつとして超電導送電方式があり、その開発研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

超電導電力ケーブルが在来形ケーブル（例えば強制冷却方式の500kV OFケーブル）と経済的に競合し有利となる領域は送電容量3~5GVA、送電距離数十km以上と予測され⁽³⁾、上記のような適用分野で、利用される可能性がある。そこで筆者らは、早期に技術的可能性の実証を行なう必要があると考えて、超電導電力ケーブルの開発に着手し、超電導電力ケーブル実験装置、および各種構造のモデルケーブルを試作して、交流通電試験を行ない、超電導交流ケーブルの設計に対する指針が得られた。

本論文では、交流通電によって生ずる交流損失、残留磁界などの実験結果を中心とした交流通電特性について報告する。

2. 超電導電力ケーブル設計の考え方

〈2・1〉 単相交流ケーブル 超電導電力ケーブルは、基本的には内部強制冷却形であり、中空導体とすると導体表面磁界が低く抑えられ、かつ導体表面積を大きくとることができる。その基本構造を図1に示す。(a)図は製作の容易な円筒導体、(b)図は電流密度が大きくとれる多分割導体である。

構造上、固体形と可とう形が考えられる。前者は冷却パイプと安定材とを兼ねた良質な銅パイプ表面上に

図1 単相同軸ケーブル構造

Fig. 1. Single phase cable configuration.

Nb, Nb₃Snなどの超電導体を蒸着させて通電導体またはシールド導体とし、両者間にスペーサをそう入して導体保持および電気絶縁とする。通電導体の電流分布は軸方向に一樣となり、シールド導体の電流分布も同様と考えると、軸方向磁界および外部周辺磁界は存在しなくなり、交流損失の増加要因がなくなる。しかし、長尺のケーブル製造が困難なこと、また完全に同軸構成とすることは実際上むずかしく、偏心すると、交流損失増加要因となったり、電気特性に影響を及ぼすことがある⁽⁵⁾。可とう形ケーブルは、可とう性のあるケーブル軸に安定化された超電導テープをヘリカルに巻き通電導体として、絶縁テープ紙をその上に重ね巻きし、更に超電導面を内側にして超電導テープをヘリカルに巻いてシールド導体とする。

図2は可とう形ケーブルの導体部分と電流通過経路を示している。通電導体の電流は、密度 J_2 で中心軸に対する角度 ζ をもって流れ、その裏側では中心軸に垂直に密度 J_3 をもって流れる。シールド導体と通電導体表面を流れる電流密度は、導体全体に流れる電流を往き帰り等しく、これを $I(A)$ とすると、

シールド導体表面の電流密度

$$J_1 = (I/2\pi R_1) \sec \phi_1 \dots \dots \dots (1)$$

通電導体表面の電流密度

$$J_2 = (I/2\pi R_2) \sec \zeta \dots \dots \dots (2)$$

となる⁽⁶⁾。但し、 R_1 , R_2 はシールド導体および通電導体の半径、 ϕ_1 はシールド導体テープの巻き角度、 ζ は通電導体の電流通路とケーブル軸中心との作る角度であり、(3)式で与えられる。

$$\zeta = \tan^{-1}(R_2/R_1) \cdot \tan \phi_1 \dots \dots \dots (3)$$

Superconducting Power Cables and Time Current Tests. By Noboru Itoh, Member, Naotake Natori, Member & Noboru Higuchi, Member (Electrotechnical Laboratory).

伊藤 登: 正員, 電子技術総合研究所
 名取尚武: 正員, 電子技術総合研究所
 樋口 登: 正員, 電子技術総合研究所

図 2 可とう形ケーブル導体部

Fig. 2. Conductor part of flexible cable.

ケーブルコアにおける軸方向の交番磁束(ϕ_2)は、通電導体とシールド導体で互に逆方向の電流が流れていることから、(4)式で与えられる。

$$\phi_2 = \frac{\mu_0 I}{2} (R_2 \tan \psi_2 - R_1 \tan \psi_1) \dots\dots\dots (4)$$

但し、 ϕ_2 は通電導体テープの巻き角度、 μ_0 は真空の透磁率である。

この交番磁束の存在は、ケーブルコアの外側の冷却パイプなどの内部に円周方向の起電力を発生させ、うず流損の原因となるので、 $\phi_2=0$ 即ち、 $R_2 \tan \psi_2 = R_1 \tan \psi_1$ となるように、導体テープの巻き角度を選定すれば、ケーブル外周での交流損失の発生は抑えられる。この設計を零磁束設計という⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

ケーブル中心部における軸方向の交番磁界(H_z)の大きさは、(5)式で与えられる。

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_2} \tan \psi_2 - \frac{1}{R_1} \tan \psi_1 \right) \dots\dots\dots (5)$$

このような磁界の存在は、通電導体の内側の安定材あるいはフォーマ中のうず流損の原因となるので、 $H_z=0$ 即ち、 $R_1 \tan \psi_2 = R_2 \tan \psi_1$ となるように、通電導体とシールド導体の巻きピッチを等しくすれば、この損失は発生しない。この設計を零軸磁界設計という。

これらの設計条件は、ケーブルコアが極低温状態に冷却された条件で成立しなければならないので、常温状態で設計製作を行なうに当っては、この低温収縮の影響を考慮して、あらかじめ予想される巻き角度の変化分を加算する必要がある。

表 1 4,800MVA, AC 275kV, 10kA 超電導ケーブルの概要例

Table 1. Conceptual desing of 4,800MVA, AC 275kV, 10kA superconducting cable.

表面電流密度 (A/cm)	通電導体 外径 (cm)	単相ケー ブルコア外径 (cm)	ヘリウムパ イプ外径 (cm)	交流損失 (三相) (kW/km)	誘電体損 (三相) (kW/km)	電力損 (常温換算) (kW/km)	総熱損失 (kW/km)	総損失量 (kW/km)	100km 送電に おける送電効率 (%)
500	6.4	10.0	23.5	0.60	0.11	178.0	62.5	240.5	99.5
700	4.6	8.0	19.0	1.45	0.08	382.0	37.0	419.0	99.1

(注) 導体 Nb₃Sn (8~10 K で運転)、 $\epsilon \tan \delta = 2.2 \times 10^{-5}$ 、冷凍機効率 1/250 とした。

交流損失量を小さくするには、表面電流密度は小さい方がよい。一方、経済的な超電導ケーブルを設計しようとするれば、できるだけ表面電流密度を大きくとりケーブルを小さくするのが得策であって、両者の兼ね合いから 500~700 A/cm を一応の目安とする⁽¹⁰⁾。このような考え方から、4,800MVA, 275kV, 10kA 超電導ケーブルの概念設計をした結果のケーブルコア概略寸法および損失計算例を第 1 表に示す。現在製造しうる Nb₃Sn テープで 700 A/cm の表面電流密度を採用しても 100km 送電における送電効率は 99% 以上を達成しうる可能性がある。

〈2・2〉 三相交流ケーブル 基本的には、図 3 に示すように単相交流用ケーブルを 3 対用いて、各々のシールド導体を、共通接地する方法を採用するもの(三角配置形 3 心ケーブル)で、この場合、各心ケーブルの構造は、単相ケーブルの設計そのままよい。

各相導体コアにおいて、磁気シールドが完全になされていれば、交流損失は単相ケーブルの 3 倍であるが實際上、漏れ磁束が存在するので、3 倍以上になるものと予想される。

同軸上に配置された同心円筒形の三相ケーブルの構成を図 4 に示している⁽⁹⁾。このケーブルは 4 層の通電導体からなり、三相電流通路は同軸上に、配置された 4 層導体の内側および最外層に R 相、T 相の電流 I_R, I_T を流し、中間 2 導体で各々 R 相電流 I_R 、T 相電流 I_T と逆位相をもつ電流 I_{S2}, I_{S1} を流し、中間 2 導体をケーブル外部で接続して S 相電流を形成する。

図 3 三相交流超電導ケーブル断面

Fig. 3. Cross section of three phase ac superconducting cable.

図 4 同心円筒形三相交流超電導ケーブル

Fig. 4. Coaxial type three phase ac superconducting cable.

このようにすれば特別な電磁シールド導体を必要とせず、三相導体コア外側に磁束が漏れないので、外側パイプ内のうず流損を軽減しうる利点がある。このうち R 相/ S_2 相導体コアを並列配置形三心ケーブル(図3)の1相分とすれば、 S_1 相/ T 相導体コアが他の二相分相当以内の導体サイズであれば、使用される導体材料が節減できることになる。 R 相導体の直径を d 、絶縁層の厚さを P 、 S_1 相と S_2 相間のヘリウム通路間隔を g とすると、概略 $d > p + 2g$ であれば、同心円筒形三相ケーブルの方が並列配置形三心ケーブルより少ない導体材料ですむ。例えば 275kV, 10kA 級のケーブルでは表面電流密度設計値 700 A/cm, 耐電圧設計値 100kV/cm の有機絶縁物を用いるとして、 $d = 45$ cm, $p = 1.6$ cm, $g = 0.6$ cm となる。これは上記の条件を満たし、経済的なケーブル設計といえる。この条件は 275kV 級以下の電圧階級で、送電容量の小さいケーブルでは、同心円筒形三相ケーブルにした方が有利であることを意味する。

3. 超電導ケーブルの試作

〈3・1〉 零軸磁界設計 (5)式において $H_z = 0$ するために、通電導体とシールド導体の巻きピッチを各々同一とする。ケーブルコアの設計に当っては、低温収縮によるストレスのかかり方、巻きピッチの変化などを考慮して導体テープの巻き角度を選定するようにした。

試作したケーブルコアの概要は次の通りである。

(1) ケーブルフォーマ 超電導テープを巻きつける元管であって、脱酸継目無し銅管を使用し、超電導テープなどの冷却効果を高めるために任意の個所に穿孔してある。銅パイプをフォーマとした理由は、超電導テープの巻きつけおよび保持に都合が良かったためである。Nb₃Sn テープを用いたケーブルの場合は、フォーマ中でのうず流損発生を防止するために、ベークライトパイプをフォーマとした。

(2) 通電導体 超電導テープは交流通電を目的としているので Nb/Cu テープ、Nb₃Sn/Cu テープを使用した。Nb/Cu テープの場合、安定材に無酸素平角銅テープ(幅 4~6mm, 厚さ 500~900 μ m)を使用しその上に Nb テープ(厚さ 50~200 μ m)を接着した。Nb₃Sn/Cu テープは、厚さ 50 μ m の Cu テープの間に Nb₃Sn+ Nb (各 25 μ m) をサンドイッチ状にしたものである。超電導テープの巻きつけは、Nb 面を外向きにして決められた軸角度でフォーマへ右巻きに巻きつける。

(3) 導体しゃへい 厚さ約 150 μ m のポリエチレン合成紙あるいは厚さ約 200 μ m のカーボン紙を2枚巻きとした。

(4) 絶縁体 極低温における耐電圧特性の良いポリエチレン合成紙(含有水分 1% 以下のもので厚さ約 130 μ m)を決められた厚さに均整に重ね巻きとした。

(5) 絶縁しゃへい 厚さ約 150 μ m のポリエチレン合成紙を2枚巻きとした。

(6) シールド導体 使用した超電導テープは通電導体と同一のものとした。超電導テープの巻きつけは、Nb 面を内向きに絶縁しゃへい上に通電導体と同じピッチ長で、右巻きに巻きつけた。

(7) バインダーおよびスキッドワイヤ ケーブルコアの導体テープを十分におさえつけるために布テープを重ね巻きし、その上に外径 1mm の黄銅線をスキッドワイヤとして巻きつけた。

以上のようにケーブルコアを試作したが、その概念構造図を図5に示している。零軸磁界設計においては使用する超電導テープの種類、構成の違い、ケーブルコア寸法による違いなどのケーブル通電特性上への影響を明らかにする目的で、ケーブルコア6種類を試作した。その構成要素詳細を表2に示している。

〈3・2〉 零磁束設計 (4)式で $\phi_2 = 0$ とするために、通電導体とシールド導体は各々異なった巻きピッチを持ち、 $R_2 \tan \phi_2 = R_1 \tan \phi_1$ となる様各々の導体テープの巻き角度を選ぶものとする。ケーブル概念構造は、零軸磁界設計と同じである。それぞれの構成概要

図 5 同軸形超電導ケーブルコア概念図

Fig. 5. Conceptual figure of superconducting cable core.

表 2 零 軸 磁 界 設 計
Table 2. Zero axial field design.

項 目	ケーブル A	ケーブル B	ケーブル C	ケーブル D	ケーブル E	ケーブル F
フ ォ ー マ 材 質	銅パイプ	銅パイプ	銅パイプ	銅パイプ	銅パイプ	ベークライト
内 径 (mm)	21.0	19.2	40.0	41.0	20.2	20.0
厚 さ (mm)	1.0	1.5	1.0	2.0	1.0	1.5
通 電 導 体	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb ₃ Sn
超電導体						
平角線厚さ (mm)	1.2	1.0	1.2	1.0	0.6	0.172
幅 (mm)	5.0	4.1	5.0	6.2	5.0	5.0
ピ ッ チ (mm)	155.0	272.2	155.0	271.2	260.0	270.0
平角線数	13	17	19	20	13	14
導体しゃへい 厚 さ (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
絶 縁 体 厚 さ (mm)	3.0	2.9	3.0	2.9	10.0	2.5
絶縁しゃへい 厚 さ (mm)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
シールド導体	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb	Nb ₃ Sn
超電導体						
平角線厚さ (mm)	1.2	1.0	1.2	1.0	0.6	0.172
幅 (mm)	5.0	4.1	5.0	6.2	5.0	5.0
ピ ッ チ (mm)	155.0	271.8	155.0	272.0	260.0	272.0
平角線数	17	23	21	23	18	17
スキッドワイヤ 外 径 (mm)	1.0	2.0	—	—	1.0	—
バ イ ン ダ 厚 さ (mm)	0.3	0.3	—	—	0.3	0.2
概 算 外 径 (mm)	38.0	37.8	57.0	57.8	48.0	30.0
概 算 重 量 (g/m)	2,550	2,640	5,300	5,620	2,880	705
設 計	電 総 研	電 総 研	電 総 研	電 総 研	電 総 研	電 総 研
製 造	古河電工	昭和電線	古河電工	昭和電線	古河電工	電 総 研

表 3 零磁束設計
Table 3. Zero total flux desing.

項 目	ケーブル G
フ ォ ー マ 材 質	銅パイプ
内 径 (mm)	20.2
厚 さ (mm)	1.0
通 電 導 体	Nb
超電導体	
平角線厚さ (mm)	0.9
幅 (mm)	5.0
ピ ッ チ (mm)	150.0
平角線数	12
導体しゃへい 厚 さ (mm)	0.3
絶 縁 体 厚 さ (mm)	3.0
絶縁しゃへい 厚 さ (mm)	0.3
シールド導体	Nb
超電導体	
平角線厚さ (mm)	0.9
幅 (mm)	5.0
ピ ッ チ (mm)	299.0
平角線数	18
スキッドワイヤ 外 径 (mm)	1.0
バ イ ン ダ 厚 さ (mm)	0.3
概 算 外 径 (mm)	33.2
概 算 重 量 (g/m)	2,370
設 計	電 総 研
製 造	古河電工

を表 3 に示している。

〈3・3〉 パイプ形ケーブル (固体形ケーブル) 通電導体は、冷却パイプと安定材を兼ねた良質の銅パイプの表面に Nb 薄膜を爆着させたものを使用する。

シールド導体は良質の銅テープ表面に Nb 薄膜を爆着させて、Nb 面を内側にしてシームレスパイプ状としたものを使用する。両導体共に Nb 面を機械研磨して、Nb 表面状態を良好なものとしている。通電導体保持は穿孔したテフロンリングにより、偏心せぬよう注意深く行なった。試作したパイプ形ケーブルの外観を図 6 に示し、その構成概要を表 4 に示している。

4. 超電導ケーブルの通電試験装置

通電試験装置の使用目的は次の通りである。

(a) 超電導交流ケーブル通電特性の評価 導体要素内の電流通路の実証、各部電流密度の実測、交流磁界のふるまい、最大通電容量の実証など。

(b) 実効電流通電時の交流損失評価 ケーブル導体の表面電流密度と交流損失の関係、実効電流通電時の交流損失と誘導電流通電時の交流損失との関連、ケーブル状態での交流損失実測など。

(c) ケーブル電気定数の実測 作用インダクタンスの実測、三相電流通電時の電流分担の実測など。

図 6 パイプ形ケーブル

Fig. 6. Pipe type cable.

表 4 パイプ形ケーブル

Table 4. Pipe type cable.

項	目	ケーブルH
フオーマ	材 質	銅パイプ
	内 径 (mm)	12.2
	厚 さ (mm)	1.0
通 電 導 体	超電導体 安 定 材	Nb フオーマ兼用
絶 縁 体		液体ヘリウム
ス ペ ー サ		テフロンリング
シールド導体	超電導体 安 定 材	Nb
	内 径 (mm)	銅パイプ 22.0
	外 径 (mm)	25.0
概 算 重 量	(g/m)	1,460
設 計		電 総 研
製 造		古 河 電 工

(d) 機械的特性の評価 低温収縮時のひずみ、ストレスのかかり方、通電特性に及ぼす影響を明確にするなど。

超電導ケーブル通電試験装置は、電流供給用電源設備、電流供給端末部実験装置(縦形クライオスタット)および超電導ケーブル部実験装置(横形クライオスタット)の3要素から成立っている。ケーブル部実験装置は、超電導ケーブルの予想される実際構造を模擬して製作されたもので、その概要は次の通りである。

超電導ケーブルがそう入される円筒状ヘリウムそうを中心として、その周囲に高真空多層断熱を施し、二次冷却のための液体窒素冷却されたシールドがこれを囲む。最外層はステンレス鋼製の外装管である。全体の断面構造は3重管構造となっており、各々の円筒管は熱伝導度の低いテフロン棒4本で支持される。各管を冷却する際に生ずる低温収縮に対して、テフロン棒の先端に小可動車輪を取付け、各々の管に過度のストレスがかからない構造としている。図7(a)に超電導ケーブル部実験装置の断面構造を示している。

電流供給端末部は超電導ケーブルへ電流を供給するもので、室温状態の電流供給母線と極低温状態の超電導ケーブル間の電気的接続をする。ここで使用される

(a) 超電導ケーブル部実験装置断面

(a) Cross section of superconducting power cable part of the test equipment.

(b) 超電導送電実験装置

(b) Super conducting power cable test equipment.

図 7

Fig. 7.

電流リードは、三相交流の各相ごとに1本使用し、1本あたり約2万本のホルマール線(0.2mmφ)の編組構造で、その素線間を超電導ケーブル冷却で蒸発したヘリウムガスを通して冷却している。ケーブルへの通電電流に応じて、ヘリウムガス流量を制御し、熱侵入および電気損失の制御を行なう。電流供給は、三相変圧器および三相誘導電圧調整器により、0~10kA(連続定格)の通電ができる。図7(b)に超電導送電実験装置の全景を示しており、液体ヘリウム冷却による10m長のケーブル通電試験ができる構造である。

5. 超電導交流ケーブルの通電試験

〈5・1〉 単相交流通電試験 交流モデルケース(全長2.5m)の通電試験は、液体ヘリウムにて直冷された状態で運転され、蒸発ヘリウムガス冷却の電流リード(全長2m)を通して、電流供給用変圧器から電流は供給される。交流電流実効値の測定は、校正されたログスキャイル出力によって行ない、併せて同軸シャント出力(10kA, 100mV)をデジタル電圧計にて直読し電流モニタとしている。

図8は供試ケーブルBの単相交流通電試験における電流通電状況の一例を示す。他の供試ケーブル(A, C~H)も、ほぼ図8に準じた電流供給によって通電試験を行なっている。

図 8 単相交流通電試験 (50 Hz)

Fig. 8. Single phase ac current test.

その結果、Nb テープ使用の場合、ケーブル設計法の差異（例えば供試ケーブル A と G）に拘らず、また電気絶縁層を厚く（ケーブル E）しても、冷却さえ十分ならば、定常電流通電は最大表面電流値換算で 820 A/cm までは安定して通電できることが判明した。Nb₃Sn テープを用いた供試ケーブル F では、最大表面電流密度 872 A/cm（通電電流 6,300 A）までの通電試験を安定して行なうことができ、更に、最大表面電流密度 886 A/cm（通電電流 6,400 A）にて交流損失に基づく導体温度上昇により、部分的な S-N 転移が生じて、焼損に到っている。パイプ形超電導ケーブル H の通電試験においては、0~797 A/cm（通電電流 3,650 A）で十分安定した特性が得られたが 800 A/cm のとき、超電導ケーブル H を電流リードに接続する超電導テープ部分の S-N 転移で、接続部焼損に到っている。単相交流通電試験から、超電導ケーブルの可能通電容量は、使用する超電導材料のもつ固有の臨界磁界を与える最大表面電流密度で決まり、ケーブル設計法、使用テープの製造法、運転電圧階級などには、あまり影響されないことが判った。但し、これらの要因はケーブルの冷却過程に影響を及ぼすので、導体温度への影響は無視しえないと考えられる。

〈5.2〉 磁界のふるまい ケーブルコア中心軸方向磁界およびケーブルコア外周部分の磁界を測定するために、各供試ケーブルには、中央部、端部などには数個の検出コイルを取付けた。コイルは 1 G の検出感度を持ち、かつできるだけ計装に都合よく小さいものとした。供試ケーブルの中央部分における軸方向磁界 (A/cm 表示) とその最大表面電流密度 H_{max} (A/cm) に対する比率を表 5 に示す。

零軸磁界設計（ケーブル A~F）では、 H_{max} の 0.8 ~ 7% であり、ケーブル製造過程で十分注意すれば、1% 以下にすることが可能である。これに対し、零磁束設計（ケーブル G）では、大きな磁界が残留してお

表 5 軸方向残留磁界の大きさ

Table 5. Magnitude of axial field.

ケーブル 項	A	B	C	D	E	F	G	H
H_z/H_{max} (%)	7.0	0.8	5.0	1.5	4.0	2.0	22	0

表 6 ケーブル内残留磁界の大きさ

Table 6. Magnitude of residual field in the cable core.

ケーブル 項	A	B	C	D	E	F	G	H
H_ϕ/H_{max} (%)	17.5	10.6	15.7	13.9	8.0	—	1.8	0

り、ケーブルの交流損失が著しく増加する一因となっている。ケーブル H では、軸方向磁界は検出されていない。

供試ケーブルの中央部分におけるケーブルコア内の残留磁束から換算した残留磁界の大きさ H_ϕ (A/cm) の H_{max} に対する比率を表 6 に示す。これによれば零磁束設計ケーブル G ではかなりよくシールド導体電流によって磁束が打消され、 H_{max} の 1.8% であるのに対し、零軸磁界設計ケーブル、例えば A では 17.5%、E でも 8% と大きく残留していることが判明した。なお、パイプ形ケーブル H では、検出されず、理論的に存在しないことが実証された。

〈5.3〉 交流損失実測 損失測定には、いわゆる EW 法⁽⁷⁾の原理を採用したが、被試験試料に実電流を通電させるので、損失検出コイル電圧の大部分を占める誘導電圧成分の補償には細心の注意を払い、図 9 に示すように、2 段補償回路とロックイン増幅器を使用した測定回路構成としている。

図 10 は Nb を素材とした各種ケーブルの最大表面電流密度に対するケーブル表面積あたりの交流損失実測結果を示したものである。但し、ケーブル C、D の交流損失は、ケーブル A および B の損失曲線内に入るので省略した。図 10 および表 5 から、電気絶縁の厚いケーブル E を除けば、ケーブル軸方向の残留磁界が大きいほど交流損失は大きく表われている。ケーブル E は絶縁が厚いこと、安定材の平角線厚さが他のものより薄いことなどで、他のケーブルの損失と直接比較はできないが、使用した導体テープの薄い平角線のエッジ効果が大きく影響し、その上ケーブルコア内の残留磁界の影響により大きな交流損失が実測されたと考える。従って、パイプ、サポートなどにうず電流が発生しないような材料を選び、かつ超電導ケーブルの交流損失を減少させるには、その軸方向残留磁界を可

図 9 交流損失測定回路

Fig. 9. Schematic diagram of ac loss measuring circuit.

図 10 モデルケーブルにおける交流損失実測値

Fig. 10. Ac loss data on model superconducting cable.

能な限り小さくするケーブル設計が望ましい。

次に使用する超電導テープ自身の交流損失と、これを超電導ケーブルコアとした場合のケーブル交流損失量がどのように変わるかを示したものが図 11 である。図はある最大表面電流密度に対するテープ状での単位面積あたりの交流損失とケーブルでの交流損失との比(交流損失比という)の形で表現している。これによれば、可とう形ケーブルでは導体テープをヘリカルに巻くことにより、安定材の一部に電流が流れたりケーブルフォームにうず電流が誘導されることが原因となって、交流損失がかなり増加することが判る。図 10 の

図 11 ケーブル化に伴う交流損失増加

Fig. 11. AC loss enhancement by cable manufacturing.

損失曲線が表面電流密度のほぼ 2 乗に比例して増加していることから、ケーブル状での交流損失の大部分はうず流損失であって、超電導テープ固有のヒステリシス損失の割合は小さいといえる。

図 11 の結果から零軸磁界設計では、交流損失比は 2.5~5.5 に対し、零軸束設計では約 10 と大幅な増加を示している。これは軸方向の残留磁界が H_{max} の 22% も存在することに原因すると考えられる。

一方、パイプ形ケーブルは、その構造上、テープ自身に対応する小試片とケーブルとは、ほとんど変化しないので、交流損失比はほぼ 1 であった。

〈5.4〉 三相交流通電試験

供試三相ケーブルコアは図 4 に示すような断面構造をもったもので、これを直径の異なる 2 対の単相用ケーブルコアとして製造し(例えばケーブル A と C)、大きな直径のケーブルコアの中空部に小さな直径はケーブルコアをそう入し、組合せて三相用ケーブルとした。大小ケーブルコア各々零軸磁界を達成し得るように超電導テープの巻きピッチを総て等しくした。

三相交流通電試験は、ケーブル A, C および B, D を組合せて、二つの三相モデルケーブルで行なった。各々のケーブルにおいて、ケーブル終端部を短絡状態で通電した場合、各相間のインピーダンスにばらつきがあるので、各相電流にばらつきが生じたが、三相の平均電流で 5,700A までの通電に成功した。通電電流のばらつきは 6% 以内である。しかし、単相通電試験では 6,300A にて S-N 転移が発生しているのに比べ、その約 90% の電流値で S-N 転移が始まったのは、ケーブルの組合せにより内部導体部分の冷却が効

果的に行なわれず、交流損失によるわずかの発熱により、導体温度が上昇したことによると考えられる。

表7は残留磁界および磁束の三相通電時変化を示したものである。各相間不平衡電流により、单相電流通電時には小さかった軸方向残留磁界が、三相電流通電時に互いに打消し合うことができず、大きく残留している。

軸方向残留磁界が大きくなることは、ケーブル全体の交流損失軽減の観点から好ましくないもので、三相用ケーブルでは大小径のそれぞれの巻きピッチ変化を十分考慮する必要がある。

6. 交流磁界の交流損失への影響の検討

超電導テープを一層巻にした可とう形ケーブルでは中心軸方向の残留磁界が存在し、シールド導体が完全に磁界を打消すのはむずかしいといえる。超電導ケーブルの運転電圧が高く、電気絶縁層が厚くなればなるほど、低温収縮の影響がでて、残留磁界が大きくなる傾向がある。この主な原因は超電導テープと電気絶縁紙との低温収縮率に1けた異なる著しい差(4.2Kにおける低温用ひずみゲージによる収縮率の実測値は、各々0.3%および2.8%である)があるためである。

今回の一連の試験結果から、残留磁界を通電導体の最大表面電流密度の1%以内に抑えれば、ケーブル製作による交流損失増加を3倍程度に抑制できることがわかった。もちろん、ケーブルを製作しても交流損失が増加せぬことが理想であるから、低温収縮に起因する残留磁界を完全に補償できる方法あるいは、使用する超電導導体の構造を変えて残留磁界が存在しない方式などの考案が更に必要となる。

いずれの設計法でも、残留する磁界が比較的小さいために、ケーブルの通電電流容量はほとんど影響を受けていない。むしろ低温収縮差を考慮しないで残留磁界補償に重点を置いてタイトにケーブルを作ると部分的に超電導テープに異常なストレスがかかり、これによる通電電流容量の減少(臨界電流の低下)および交流損失の増加が大きいと予測される。

実験に用いた数m程度のモデルケーブルでは、ケーブル冷却過程での低温収縮によるケーブルひずみをう

表 7 同心円筒形三相ケーブルの磁界変化

Table 7. Field enhancement of coaxial 3 phase cable.

磁 界	供試ケーブル	A' → A+C (单相) → (三相)		B → B+D (单相) → (三相)	
H _z /H _{max}	(%)	7.0 → 50.6		0.8 → 14.6	
H _φ /H _{max}	(%)	17.5 → 14.1		10.6 → 3.0	

まく吸収しており、超電導導体の特性を損なう結果は実測されなかった。しかし、ケーブルが長尺となれば冷却過程でのケーブルの部分的あるいは全体的な曲りは当然生じ、これをうまく吸収しなければ、超電導導体の特性劣化は避けられないであろう。従って、特にヒートサイクルにおける低温収縮に起因するストレスとケーブル特性への影響については、10m以上の長尺モデルケーブルによる詳細な実証が必要である。

7. む す び

可とう形およびパイプ形超電導ケーブルを試作し、液体ヘリウム冷却により、交流通電試験を行ない、使用した材料固有の臨界表面電流密度に相当する電流までの通電に成功した。現在、製造可能な交流用超電導テープまたは超電導パイプ導体では、高効率送電の観点から許容交流損失レベルに到っておらず、特に可とう形ケーブルでは、ケーブル製造により数倍以上も交流損失が増加することが判った。実用ケーブルを開発するには、今後、更に交流損失増加原因の一つである残留磁界を除く設計法の確立および高電流密度が得られかつ交流損失の小さい超電導導体の開発と長尺ケーブル製作による実証試験が必要となる。

最後に本開発研究を進めるに当たり、終始援助下さった当所次長等々力 達氏、エネルギーシステム部長相山義道氏、エネルギー部長堀米 孝氏、エネルギー輸送研究室長佐藤弘之氏ほか研究室員各位、当所低温技術研究室並びに高エネルギー研究室の各位に深く感謝致します。

(昭和55年3月28日受付, 同55年11月29日再受付)

文 献

- (1) 電子技術総合研究所論:「超電導送電技術に関する調査報告(第一報)」, 327 (昭50-10)
- (2) K. G. Lewis, et al.: "Current tests on a flexible superconducting core for a 2 GVA ac cable" *Cryogenics*, 18, 3 (1978)
- (3) 資源エネルギー庁論: 新送電方式研究委員会報告, 105 (昭50-3)
- (4) 伊藤, 他: "The Superconducting Power Cable" *Bul. Electrotech. Lab.* 39, 5, 345 (1975)
- (5) 樋口, 他: 「各種超電導ケーブルの電気特性比較について」, 昭51電気学会大会, No. 1111
- (6) J. Sutton & D. A. Ward: "Design of flexible coaxial cores for ac sc cables" *Cryogenics*, 17, 9 (1977)
- (7) G. Morgan & E. B. Forsyth: "Considerations of voltage drop and losses in the Design of sc power cables" *BNL Report* 17, 9 (1975)
- (8) M. Garber, et al.: "Studies of helical conductor models for SC AC power transmission" *IEEE Trans. Magnetics* MAG-13 (1977)
- (9) E. C. Rogers & D. R. Edwards: "Design for a 750 MVA sc power cable" *Electrical Review* 8, 348 (1967)
- (10) 樋口, 他: 「完全同軸型超電導ケーブルの開発」, 昭52電気学会大会 No. 1238