超 電 導 送 電

堀 米 孝*・伊 藤 登*

(昭和45年9月25日受理)

Superconductive Power Transmission

Takashi HORIGOME and Noboru ITO

Transport section Energy Division Electrotechnical Lab. 4-1,5 (Mukōdaimachi
Tanashi Tokyo)

(Received Sept. 25, 1970)

1. 大電力輸送の必要性

わが国における電力需要の増大は過去10年平均12%の伸び率を示し、今後もこの傾向が持続するものと予想されるので、発電機の拡充もこれに対応するものが必要である。又、大都市における負荷の伸び率の傾向は上記の傾向を大きく上まわり、15~18%であるから、現在送電容量1ルート100万kW(275kV, 35万kW×3回線)程度ですむものが、昭和60年には500万kW/ルートの送電容量をもつケーブルが必要になる。

ルート当りの送電容量を増大させる技術として、現状技術の延長として考えられるものは、高電圧化、太い導体による大電流化、強制冷却方式の採用などであるが、これらの対策のすべてを考慮しても、昭和60年において500kV, 2000A級の強制冷却ケーブルが期待できる程度であり、送電容量は、175万kW/回線となり、500万kWを送るには、1ルート当り3回線程度を必要とする。

一方、大都市における送電ルート用地の取得は、今後ますます困難となり、また狭い国土の有効利用、美観保持が国民の強い要請となつているので、狭い用地で送電容量の飛躍的増大をはかる革新的な技術の開発が待望されている。その方策として、極低温ケーブル**、超電導ケーブル***がある。この両者は送電容量200~500万kWの範囲で経済的に競合すると考えられるが、それ以上の

送電容量に対しては超電導ケーブルが技術的、経済的に有利になると考えられるので、超電導ケーブルの開発は極めて有望であろう。すなわち、このケーブルによれば数万A級の送電は比較的容易と考えられるので、500万kW/ルートの要請に対して直流±50kV, 50kA/回線または交流275kV, 10.5kA/回線で対処することが可能であり、さらに、高電圧大容量化の余裕をもっているものといえる。

2. 超電導送電とは何か

超電導送電とは、ある種の導電材料、例えばNbまたはこれを含む合金の極低温における超電導現象(オーム損が零)を利用した高電流密度の低損失大電力送電である。超電導送電による無損失送電への期待は、超電導現象が発見された当時から夢みられていた。

現実には、超電導現象が極低温(20°K以下)でしか生じないことと、直流では電気損失はないが、交流では交流損失(ヒステリシス損、誘電体損)が存在することによって、完全な無損失送電とはいえないが、低損失大電力送電の将来のにない手として実現への道を歩み始めたといつてよい。

超電導送電線は細長い魔法びんの中に、超電導線と冷却媒体(例えば液体ヘリウム, 4.2°K)を入れ、電気絶縁(有機物、或いは真空)、熱絶縁(真空或いはスーパーインシュレーション)をほどこした構造となる。常温から極低温部への熱の流入があるが、極低温を保つためには液化機を用いて気化した冷却媒体を再び液化する。この液化機の効率は4.2°Kにおいて極めて悪く、約1/500程度である。したがってオーム損失が零であっても、完全な熱しやへい材がないことを考えると、超電導送電に全

* 電子技術総合研究所エネルギー部(東京都田無市向台町)

** 導体に純度の高いAl或はCuを用い、液体N₂(77°K)又は液体H₂(20°K)温度に冷却し、ジュール損失を極めて軽減しうるケーブル。

*** 導体にNb或はその合金 b-Ti, Nb-Zrなどの超電導体を用い液体He(4.2°K)温度程度に冷却し、超電導状態即ち抵抗零の状態を使用するケーブル。

しかし、常温における架空送電線 (610mm^2) のACSR線に定格電流に相当する $1,000\text{A}$ を流した場合の電力損失 ($47.4\text{ kW/km} \times 2\text{ 本}$) に比べて、上記の超電導ケーブル (定格電流 10kA) の損失率は数十分の一になる。超電導送電の魅力は損失軽減とともに高電流密度送電にある。例えばACSR線の電流密度 $1.6 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ 程度に対して Nb (交流用) を用いた超電導線では $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, Nb・Zr (直流用) を用いた超電導線では $1.0 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 程度が可能である。

図3 導体配置の例

ルルートに沿って設置された冷却機で流入熱、冷却媒体の流動損失、絶縁体損失およびヒステリシス損失などを除去し、真空 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr) または Superinsulation (特性の良い熱しゃへい物) などの熱しゃへいにより、外部からの熱の流入を防止する構成となっている。導体間および導体と熱しゃへい、ケーブルの外被などとの間は真空 ($10^{-6} \sim 10^{-9}$ Torr) あるいはマイラー、ナイロン、プラスチックなどのような高分子物質により、電気絶縁されており、また導体の支持物も同様な絶縁物を使用されている。

3.1.2 導体構成要素の電気絶縁特性

超電導ケーブルの内部は極低温 (4.2°K 層, 77°K 層) に冷却されており、ケーブルを構成する材料の極低温における物理的特性、とくに電気絶縁と誘電特性は重要である。電気絶縁には高真空を用いる方法、液体 He などの冷媒を用いる方法およびナイロンやテフロンなどの固体絶縁物を用いる方法がある。真空絶縁は常温の場合と変化がなく (同一 Torr で) 有利と思われるが、直流の場合の安全真空度は 2×10^{-9} Torr, 交流の場合 $1 \sim 7 \times 10^{-6}$ Torr 必要といわれ、ケーブルの構造保守などの点を考慮すると、直流には適用が困難であろう。

液体 He の耐電圧は意外に低く、常温におけるコンデンサ油の耐電圧値 (直流破壊電圧 40kV/mm) の 0.5 倍、液体 N_2 の 0.4 倍である。

真空の絶縁耐力はギャップ長に敏感で、 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ Torr 程度で 1mm Gap 使用で 800kV/cm , 1cm Gap で 300kV/cm と考えてよい。真空を電気絶縁用として用い

る場合のスペーサとしてはポリプロピレン、ポリテトラフルオレチレンなどが用いられるが、この場合の真空の絶縁耐力低下は $30 \sim 40\%$ を見込む必要がある。固体絶縁材料は比較的よい耐電圧特性 ($50 \sim 140\text{kV/mm}$) を示すが、その構造により沿面放電を起す可能性があるのに注意を要する。また、極低温における収縮性についても、一般の金属と比べて著しく収縮する。例えば 4.2°K において常温に対する Nb の収縮率 0.15% , S.S. 0.18% Cu 0.3% に対し、ナイロンが 1.4% , テフロンが 2.1% といずれも大きく、金属と併用する場合にはクラックなどの生ずるおそれがあり注意を要する。

固体絶縁材の誘電特性では、ポリエチレン、ナイロン、ポリプロピレンなどがよい特性を示している。

なお、 $\tan \delta$ は液体 He 中では、大部分が常温値よりも一桁以下さがるが、誘電率 (ϵ) は温度にほとんど依存していない。

3.1.3 交流送電か、直流送電か

超電導ケーブルを AC にすべきか DC にすべきかは直流の場合の損失の主なもの、ケーブル内外の温度差による流入熱、冷却媒体の粘性損であるのに対し、交流では交流損失が加わることを考慮して決定される。交直変換器としては、現在の技術では常温部におかれた普通の直流送電用変換器が用いられることになるので、常温と極低温を結ぶ入力導線における熱の侵入も検討の対象になる。交流においては、変圧器の一方の巻線を極低温部に、他の巻線を常温部に置くことも可能であるので、常温と極低温部の接続問題は比較的容易と考えられる。なお変圧器の鉄心は鉄損の存在のため、常温部におかなければ不経済である。結局、直流にするか交流にするかは、どちらが経済的かによる。これについては後述する。

3.2 冷却システム

超電導送電における冷却システムは、低温の発生源にあたる冷凍機と低温真空容器そのものであるケーブル構造とにわけて考えられる。冷凍機としては大形超電導磁石の冷却用などで大形ヘリウム液化機の要求があり、ある程度の目安はついているが、ケーブル構造については、 100Km にも及ぶ細長い大形の低温真空容器はまだ存在していない。超電導線を冷却する方法、低温部への熱侵入を防ぐ熱絶縁法、高真空を維持する方法など未解決の点は非常に多い。

3.2.1 冷却媒体

外部からの熱侵入、導体内部などで発生するジュール熱、冷却媒体の摩擦熱などを考え、しかも導体を超電導状態に保つためには、Nb を利用するには少なくとも $6 \sim 7^\circ\text{K}$ まで冷却しなければならない。したがって He を

図4 超電導ケーブルの構成例

外は考えられない。しかし、Heは高価なので冷却後のHeを回収する必要がある、冷凍機にもどすという循環方式を採用する。

常温と極低温の間に数層の熱シールドを設け、この熱シールドの温度を中間温度（例えば、液体窒素、液体酸素などで、それぞれ77K、20K）に維持することによって、浸入熱の大部分を比較的高い温度で排出し、総合効率を上げることが有効で、取り扱い、安全性、価格などの面から中間層の冷媒として液体窒素が用いられる。

3.2.2 ヘリウムシステム

超電導送電ではその経済性のために冷凍機ステーションをあまり数多くおくことが出来ないから、冷凍能力が数kW以上の大型冷凍機が必要となるのでターボ膨脹機2~3段用いた形式の冷凍機が用いられよう。図5は代表例として800t/hrの大型液化機の系統図を示す。

ヘリウム液化機は、一般に圧縮器、熱交換器、膨脹弁(J-T弁)からなる。この冷凍機とケーブルの冷却システムの組み合わせも種々考えられている。

図6は、それを図示したもので、Heを液体として用いるか、気体として用いるか、それぞれの長短がある。

その他、超臨界状態で使用する冷却システムも考えられているが、ケーブルの場合、長距離にわたる冷却で冷媒の圧力降下、温度勾配などを考慮すると超臨界状態での使用がよさそうである。ケーブルを運転状態にするまでの初期冷却では、多量の熱量（気化潜熱を含む）をとり去る必要がある。例えば、定常運転時の損失が100W/km(4.2°K)のケーブルでは、初期冷却には 4×10^9 J/kmの熱量をとり去らなければならない、いろいろ工夫しても冷却に15日程度を要するとの報告がある。

3.2.3 真空システムと熱絶縁

極低温装置は熱絶縁の方法によってその優劣が決められることが多い。断熱の方法としては、高真空断熱、多層断熱、粉末断熱などがあり、超電導ケーブルではその構造上、高真空多層断熱が最良の方法と思われる。真空断熱をした低温装置での熱侵入は、気体の熱伝導によるもの、支持金具によるもの、輻射によるものなどがあり、単なる高真空断熱では、気体による熱損失は減少しても、輻射による熱損失は変化しない。そこで液体N₂で冷却した中間温度層や多層断熱、粉末断熱などを用いる。

図7に直流及び交流ケーブルにおいて真空、液体He

図 5 大型液化機システム図

各種の冷却システム

図 6 各種の冷却システム

及びこれを併用した絶縁システム（電気・E, 熱・T）の構成を、表 1 にそれを行うに必要な真空度を示している。交流ケーブルでは電気、熱絶縁ともに $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr あればよいが、直流ケーブルの電気絶縁はものにより、 2×10^{-9} Torr の高真空度が要求されるので、熱絶縁（ 10^{-6} Torr 程度必要）だけに真空を用いた方がよいであろう⁴⁾。

排気系を計画する時、大気圧から目的の圧力にするまでの初期排気と、目的の圧力を維持するための定常排気とに分けて考える必要がある。超電導ケーブルでは、普通の真空装置と異なり、初期排気は初期冷却と同じく余り数多くない（定期点検或いは破壊事故復旧時のみ）から、この目的のために強力な排気系を設けることは得策ではない。むしろ、排気時間がかかっても定常運用の排気系に間に合わすべきであろう。

初期排気に要求される圧力は冷却開始可能な 10^{-3} Torr で充分である。ケーブル外表面が極低温まで冷却されれば、この冷却面がクライオポンプとなり、大気中の主成分である窒素、酸素、水蒸気等は完全に排気してしまう。超電導ケーブルではクライオポンプを用いた排気系を主体に考えればよい。図 8 はその一例を示している。

4. 端末機器の技術的問題

超電導送電線はその端末において、変圧器あるいは発電機や負荷と接続しなければならない。これらの設備は一般に常温で使用されるので、超電導ケーブルの端末は常温の導体と接続せざるを得ない。超電導体が常温への引き出し導体と液体 He 温度中で接続された場合、引き出し導線による熱の流入および通電電流によるジュール熱の和は、気化の冷却効果を考えると長距離送電線の場合、全損失に比してあまり大きな比率とはならない。なお交流送電の場合は超電導ケーブルの端末を変圧器とし、変圧器の 1 次（または 2 次）を超電導線で巻いて液体 He 温度にしておき 2 次（または 1 次）を普通の導線で巻いて常温部におき、1 次・2 次間を熱しゃへいすると端末における熱の問題を解決することができる。一方、交直変換器の極低温化は原理的に困難であるから、端末機器に関しては交流が有利と思われる。

今後の技術的問題として、電気、熱絶縁を中心とした極低温技術、真空技術、真空技術の確立が必須となる。

図 7 ヘリウムシステム

- (a) dc. 真空絶縁
 (b) dc. He "
 (c) ac. 真空 "
 (d) ac. ハイブリッド (V, He "
 (e) ac. He "
 L: 線路, E: 大地帰路 (dc)
 R, B, Y: 各相 (ac) E: 大地電位 (ac)
 ハッチは超電導線
 S: 熱シールド (77°K)
 C: 冷却ダクト (g: "go", r: "return")
 番号は排気スペースを示す。

5. 超電導送電の経済性

超電導ケーブル送電の場合には、線路の電気損失は極めて小さいが（直流の場合には零）、反面線路の冷却のための費用が大きくなり、また、従来のケーブル送電の場合には線路の電気損失は大きくなるが、冷却費はほぼ零である。従って簡単に考えて両者の経済性は、従来ケーブルの電気損失費と超電導ケーブルの冷却費との競合になり、電気損失費は送電電力のほぼ2乗に比例して増大するが、冷却費は送電電力の $(1 \sim 1/2)$ 乗に比例して増大すると考えられるため、送電電力が大きくなれば、超電導ケーブル送電の方が経済的になると予想される。

このような考えから、超電導方式には従来方式との経済的平衡送電電力があり、これ以下の送電容量では経済的に有利とならず、この平衡点は冷却設備費、両方式の(kW・km)当りの設備費および年損失費の差、償却年数などで決まる。これらの経済比較の一例として直流ケーブルの場合を図9に示す。

図9は、超電導ケーブルと液体水素ケーブルおよび従来ケーブルの[設備費+10年間運転費]を送電容量に対して示したもので、斜線を施した部分が従来方式ケーブルでも実現可能と予想される部分である。このことから超電導ケーブル送電は2~3GW以上の超大容量送電領域において現在考えられているいずれのケーブル送電方式よりも経済的となり、また液体水素ケーブルは超電導送電技術が確立されるまでの中間段階として価値ある送電方式と言えよう。なお超電導交流ケーブル送電では誘電体損失などのために、ケーブル損失が直流の場合に比して増加し、ケーブル設備費および運転費ともにコスト高となるが、従来の交流ケーブルも直流ケーブルに比して高価なため、超

図 8 超電導ケーブル排気系の一例

表 1 He システムにおける直空度

Design	Duct	Classification	Maximum pressuer P_L (Torr)	Distance 2L between pumps (km) Detection limit for leaks	
				10^{-7} Torr $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$	4×10^{-11} Torr $\text{cm}^3 \cdot \text{sec}^{-1}$
a	1	E (電気)	2×10^{-9}	0.002	0.1
	2	T (熱)	1×10^{-6}	0.08	4.0
b	1	I	7×10^{-5}	0.05	3.2
	2	T	1×10^{-6}	0.07	3.3
c	1	U	—	—	—
	2	E	7×10^{-6}	0.44	22
	3	E	7×10^{-6}	0.56	28
	4	E T	1×10^{-6}	0.81	40
d	1	U	—	—	—
	2	I	2×10^{-4}	0.66	33
	3	E T	1×10^{-6}	0.69	34
c	1	U	—	—	—
	2	I	1.5×10^{-1}	0.52	26
	3	T	1×10^{-6}	0.76	—38

Classification of ducts ;

U : unoccupied tube, T : thermal insulation inside heat shield,

I : thermal isolation between helium streams

E : electrical insulation

電導交流ケーブルと従来の交流ケーブルとの経済的平衡電力も直流方式とほぼ同じく2~5GWと報告されている²⁾。

超電導交流ケーブルと直流ケーブルの経済性は交流ケーブルの交流損失費及びこの損失を汲み出す冷却費増分と直流ケーブルに必要な変換器費用との競合となり、送電電力、送電距離によってどちらが経済的となるかが決められる。すなわち、ある一定送電距離（経済的平衡送電距離）以上の送電においては、交直変換器費用より、交流損失費等が上まわり、直流超電導ケーブルが経済的となる。その1例を図10に示す。

図10は、超電導ケーブルとして同心円筒デュワー型とし、直流は2本、交流は3本用いるものと仮定し、変換器コストは現在予想されるコストの平均値 15千円/kW と仮定して、送電容量に対する経済的平衡送電距離を算出した。これらから超電導送電が経済的と考えられる送電電力における交流及び直流の経済的平衡送電距離は100km以下と考えられる³⁾。

6. 内外の研究開発状況

英国では早くから超電導送電に関心を示しており、とくに BICC社では1961年から研究が行なわれて来たが、1965年に CEGB（中央電力庁）と3相750 MVA の超電導ケーブルの技術的可能性を研究するための設計について契約を結んだ。この送電線は Nb を用い、Al を Backing Metal として使用する設計であ

図 9 超電導ケーブルの経済性

る。BICC 社ではこのため、モデル用超電導送電リンク（長さ 2.7m、直径 3.5cm と 5.5cm の同軸 Nb 導体）を製作し、1967年11月にその試運転を行なった。

ドイツにおいては、交流並びに直流超電導ケーブルの

図10 超電導送電の経済的平衡送電距離

開発の可能性を机上で検討している段階である。

フランスでは EdF が中心となって超電導送電の一般的問題の検討を行なっている。直流による超電導送電の可能性が、交流によるものよりも強いと考えているようである。又、C.G.E 社では、直流 20kV、4kA 低温ケーブルの開発を進めている。

米国では ERC (政府・民間共同機関で主なメンバーは TVA, BPA, EEI 傘下の電力会社、メーカー) が大容量地中送電研究開発プロジェクトを 1967 年より 6 年計画で開始しているが、その中に低温ケーブルおよび超電導ケーブルの研究が含まれている。

1968 年、RP 78 として発表されているこのプロジェクトは、6 年間で約 898 万ドルを支出する国家的なものであり、そのうち低温ケーブル開発に 105 万ドル、超電導ケーブルの研究に 20 万ドルを投ずる。E. E. I. の委託により、S. W. C. C. 社は 18ft の低温ケーブルモデル (AC 230kV、80°K 運転) を試作し、研究を行なっている。

なお、わが国においては超電導マグネットの研究は、電子技術総合研究所をはじめ、各所で盛んに行なわれているが、超電導送電に関しては、電子技術総合研究所で

基礎的研究が進められて来た他は机上計算、文献調査が行なわれているにすぎなかったが、最近、その開発研究の扉が開かれようとしている。

電子技術総合研究所では、官民一体となってわが国独自の超電導送電技術の研究開発を行うべく今後 8 年間の研究開発計画を発表し、その基礎研究を意欲的に進めている。

最後に、真空技術者にとって本解説が、将来、大きく脚光を浴びるであろう超電導送電技術についての御理解の一助となれば、幸いである。

【文 献】

- (1) 電気試験所電力部・超電導送電調査グループ：超電導送電の研究開発 (昭 44.9)
- (2) 伊原、堀米：超電導送電の経済性について (低温工学 Vol.5 No.1 1970)
- (3) 伊藤：超電導直流送電の経済評価 (昭和 45 年電気学会東京支大 No. 274)
- (4) M. Fox: The production & maintenance of Vacuum in Superconducting power cables, Vacuum 20 (1970 March) 97.