超伝導ケーブルが導入された 大都市送電系統全体の送電損失の評価

正員 加藤 丈佳 (名古屋大学)
 正員 埜 頼博 (名古屋大学)
 正員 早川 直樹 (名古屋大学)
 正員 松村 年郎 (名古屋大学)
 正員 鬼頭 幸生 (名古屋大学)

Evaluation of Total Transmission Loss and Refrigerating Energy to Operate Superconducting Cables in a Future Metropolitan Electric Power System.

Takeyoshi Kato, Member, Yorihiro Tao, Member, Naoki Hayakawa, Member,
 Toshiro Matsumura, Member, Yukio Kito, Member (Nagoya University)

The liquid-helium-cooled metallic superconducting cable can transmit a few giga-watts of electric power through a restricted small space. Although no resistive loss produces in it, a large amount of additional electric power is required to operate the refrigerators to keep it in the cryogenic temperature. This power must be included in the transmission loss of the superconducting cable. This is regarded as one of its large demerits. However, the superconducting cable would be operated in the established power system. Thus, its transmission loss should be evaluated together with the whole transmission loss of the system. In this paper, two types of a future metropolitan electric power system are supposed. In a "hybrid system", the superconducting cables transmit a large portion of electric power generated in a satellite power plant to a demand center directly, while, in a "conventional system", the future demand in this metropolitan area is supplied only by enhanced conventional transmission lines. It is verified through numerical simulations that the total transmission loss energy in kilowatt-hour is smaller in the "hybrid system" than that in the "conventional system" throughout a year. The total transmission loss in kilowatt is also smaller at a peak load period. These beneficial state would be sustained in a future long period when the electric demand would continue to increase.

キーワード：電力系統，超伝導ケーブル，冷凍機ペナルティ，年間損失電力量

1. まえがき

わが国の大都市地域は、高度情報化に伴いビジネスセンターとして社会活動の中核を担うようになり、大容量・高密度の電力消費地域を形成している。このような地域へ電力を高信頼度で供給するために、大都市送電系統では、通常、次のような構成をとっている。大都市の周辺部には500kV外輪線が建設されている。外輪線上の数ヶ所の拠点変電所では、遠隔地に偏在する大容量火力発電所や原子力発電所等から、500kV架空線などによって伝送される大電力を集約している。外輪線上の拠点変電所または都市近郊の湾岸火力発電所からは、都心部へ向かって架空送電線とこれに続いて地中ケーブルとが、多方向から求心的に設置されている[1]。電気エネルギーの次世代の2次エネルギーに占める比率が高まる反面、電力伝送手段に対して、社会が許容する空間は次第に小さくなっていく傾向にあり、地下空

間といえども新たな電力供給路を確保することは次第に困難な状況にある。したがって、将来に向けて、画期的な高密度・大容量送電線の導入を検討しておく必要がある。

その有力候補の一つとして、超伝導ケーブルが考えられている[2]。液体ヘリウム冷却による金属超伝導体の超伝導ケーブルの場合、1回線あたり5GW以上の送電容量が実現可能と考えられ[3]、高密度・大容量の電力供給におけるブレイクスルー技術として期待がよせられている。しかし、液体ヘリウム冷凍機は、超伝導ケーブルから発生する損失を除去するために、その損失の400~1000倍の電力を必要とすると言われている[4][5]。このため、超伝導ケーブルにおいては、冷凍機の電力を含めた意味での送電損失は、在来の架空送電線あるいは地中ケーブルと比較して非常に大きくなると懸念されている。このことが超伝導ケーブル導入における大きな問題の一つとなっている。しかし、このような評価は、同一送電間における超伝導ケーブル

と従来のケーブルとの単体での比較であって、電力系統の中での運用という側面が考慮に入っていない。

超伝導ケーブルは大都市電力システムの基幹送電線として導入されるとして、既設の在来送電線と複合的なシステムを構成して運用される。電力系統では既設送電線はそのような局面でもスクラップ・アンド・ビルトされることなく存続するからである。ここでは、例えば、超伝導ケーブルを湾岸火力発電所から都市中心部の拠点変電所まで導入することを考える。液体ヘリウム冷却による超伝導ケーブルならば、湾岸火力発電所で発生する数 GW の電力全てを都市中心部のビジネスセンターの高密度需要地に直接供給することができる。この電力の大部分は都心部で消費され、残りの電力は、既設ケーブル系統を通じて周辺市街地にも送電されることになる。このため、従来、都市中心部へ供給するために長距離の外輸線を経由していた電力潮流が軽減することになる。このように、超伝導ケーブルを基幹とする大都市電力システムにおける潮流分布は、従来の電力システムにおける潮流分布とは大きく異なってくる。

本論文では、新しい視点として、そのような潮流分布の変化が系統全体の送電損失に及ぼす影響について、需要の伸び、電源の偏在化、超伝導ケーブルの線路長およびその構造をパラメータとして算定している。第一段階では、約 1 / 4 世紀将来の超伝導ケーブルを基幹とする大都市電力モデルシステムを構築し、超伝導ケーブルの冷凍機電力と在来線路群の送電損失との総和としてシステム全体の送電損失を評価している。他方、同一需要規模に対して、在来の送電線路のみの増強によって供給し続ける在来型電力システムモデルをも想定して、そこにおけるシステム全体の送電損失と比較検討している。第二段階では、系統の基幹部分に着目した簡略型モデルシステムについて、さまざまな系統状況を想定して同様の検討を行い、システム全体の送電損失からみた超伝導ケーブル導入のあり方について検討している。これらを総合すれば、将来予想されるような電源の偏在および需要の集中といった状況では、液体ヘリウム冷却の超伝導ケーブルの冷凍機電力の大きさは、システム全体の送電損失からみれば、通常懸念されているほど、導入に支障をきたすものではないことが明らかとなった。このことは、液体ヘリウム冷却の超伝導ケーブルの実現性を高めるものである。

2. 超伝導ケーブルを含む系統全体の送電損失の算出方法

送電損失は、電力システムの運用状況を評価する重要な指標の一つである。超伝導ケーブルを液体ヘリウム温度に維持するためには、冷凍機の運転に非常に大きな電力を必要とする。その値は、超伝導ケーブルから発生する損失の 400~1000 倍に達する [4][5]。この倍数を冷凍機のペナルティ kr といっている。ここでは、高効率の大型冷凍機の使用を前提として $kr=500$ としている。この冷凍機所要電力は、システム運用の面からみれば一種の損失と考えられる。そ

図1 超伝導ケーブルの断面概念図

Fig.1. Structure of a superconducting cable.

こで、本論文では、超伝導ケーブルの冷凍機所用電力を在来線路の抵抗損失等の送電損失と概念的に同じものとして扱うこととし、両者の総和を電力システム全体の送電損失とした。送電損失としては、送電線の種類ごとに以下のものを考慮している。

- 1.超伝導ケーブル：
(交流損失+誘電体損失+侵入熱) $\times kr$ ($kr=500$)
- 2.在来架空送電線：抵抗損失
- 3.在来地中ケーブル：
抵抗損失，誘電体損失，シース損失

各送電線の電力潮流を Newton-Raphson 法によって求め、それに基づいて在来送電線の送電損失を算出する。また、超伝導ケーブルの各損失の算出方法を付録1に示す。なお、上述の損失は電力潮流に依存するものとし、大別される。すなわち、超伝導ケーブルの交流損失、在来送電線の抵抗損失および在来地中ケーブルのシース損失は電力潮流に依存する損失であり、その他は電力潮流に依存しない損失である。

超伝導ケーブルとしては、およその構造として、図1に示すような三相一括タイプを想定している [6][7]。本論文では、基本的には、その概念設計においては、線路長 10km ごとに冷凍機を設置するものとして、冷媒の温度上昇:4度以下、圧力損失:6気圧以下 [7] となる範囲で、後述する各損失の総和が最小となる構造を採用している。さらに、4章において、超伝導ケーブルの構造パラメータを変更した場合の検討も行っている。

3. 超伝導ケーブルを基幹とする未来都市電力システム全体の送電損失

< 3・1 >大都市モデル系統 著者らは、日本の3大都市地域における電力系統の現状および近未来の形態を模擬した3種類のモデル系統を構築している [8]-[11]。本章では、そのうち、中間規模の系統をとりあげる。超伝導ケーブルの導入を想定した大都市モデル系統を『超伝導ケース』と呼ぶこととし、図2に示す。本モデル系統は4機58母線で構成され、154kV、275kV、500kVの電圧階級から成り立っている。これは、広さ 20km $\times$ 25km 程度の都市地

図2 超伝導ケーブルを基幹とする
未来都市モデル系統 (4機58母線)

Fig.2. Future metropolitan electric power model system with superconducting cables.

域を対象としており、約1/4世紀将来を想定した電力需要に対応できるように構築したものである。本モデル系統における最大電力需要は11GWである。

4機の電源 G1(4GW)、G2(2GW)、G3(2GW) および G4(3GW) は、地理的にも容量的にも北方と南方とに分散している。また、外輪線上には、A点～E点までの5ヶ所の500kV 拠点変電所がある。超伝導ケーブル (送電電圧: 275kV, 送電容量: 5GW/回線×2回線) は、都市中心部に最も近い外輪線上の拠点変電所Aと都市中心部の拠点変電所Mとを結ぶ全長20kmの区間に導入されている。これにより、都市中心部の拠点変電所Mに5GWの大電力が一括送電される。このとき、拠点変電所Mで消費しきれない電力は、既設の地中ケーブル系統によって図中の2点鎖線で囲んだ範囲まで送電されることになる。

比較の対象として、超伝導ケーブルを導入せず、在来送電線のみを拡充して、1/4世紀後の需要に対処しようとする場合の電力システムを『在来ケース』とする。在来ケースでは、外輪線上の拠点変電所Bから都心部へ向かう3ルート为主体として、外輪線上の各変電所から求心的に都市中心部への電力供給を行っている。なお、筆者らは、ここで構築したモデル系統においては、母線電圧、短絡容量、超伝導ケーブル事故時の代替送電路の確保およびその時の過渡安定度など、電力系統として成立するための技術的要件を満たしていることを確認している [8]–[11]。

<3・2>最大負荷時の送電損失 モデル地区の年間を通じての最大負荷時について、超伝導ケースおよび在来ケースの潮流計算を行い、システム全体の送電損失を算定した。その結果を図3に棒グラフで示す。同図より、超伝導ケースの送電損失は55MWである。これに対し、在来ケ

図3 最大負荷時の送電損失

Fig.3. Total transmission loss at a peak load period.

ースの送電損失は80MWであり、その差は25MWに達している。このように、液体ヘリウム冷却の超伝導ケーブルを導入した場合でもシステム全体としての損失が在来ケースのそれよりも低減する場合があることが判明した。これは従来の通念とは異なる結果であり、注目に値する。これは、超伝導ケーブルが都市中心部に大電力を一括送電することにより、周辺部の在来線路群の電力潮流が大幅に低減されるためである [10]。特に、都市地域をとり囲む外輪線上において電力潮流の減少が目立つ。この外輪線を中心に、在来線路部分の送電損失が著しく減少することにより、超伝導ケーブルの冷凍機電力を考慮に入れても、最大負荷時についてみれば、システム全体としての送電損失が低くなっている。

さらに、両ケースの送電損失の差: 25MWは、平均的な水力発電所1ヶ所分の最大出力に匹敵する大きさである。すなわち、超伝導ケースでは、在来ケースと同一発電設備であっても、最大負荷時において、水力発電所1ヶ所分の供給予備力が增加することになる。

<3・3>年間損失電力量 電力需要は年間を通じて大きな変動がある。本節では、このことを考慮して、超伝導ケースおよび在来ケースにおいて、1年間を通じての損失電力量、すなわち『Wh』の損失について検討を行う。通常の電力系統では、年間損失電力量は最大負荷時の損失電力に損失係数と年間の時間数とを乗じて求められる [12]。しかし、超伝導ケースの場合、システム全体の送電損失に対して電力潮流に依存しない誘電体損失等の占める割合が大きい。この場合、これらの損失にも損失係数を乗ずるのは適当でない。そこで、システム全体の送電損失を電力潮流に依存する損失と依存しない損失とに分け、次式によって年間損失電力量を算出することにする。

年間損失電力量

$$= (\text{電力潮流に依存する損失} \times \text{損失係数} \times 24 \times 365)$$

$$+ (\text{電力潮流に依存しない損失} \times 24 \times 365) \text{ (Wh)} \quad (1)$$

ここで、

$$\text{損失係数} = 0.3 \times (\text{年負荷率}) + 0.7 \times (\text{年負荷率})^2 \quad (2)$$

$$\text{年負荷率} = 0.59 \quad (3)$$

図4 年間損失電力量

Fig.4. Total transmission loss energy throughout a year.

とした[13]。この損失係数の定義式((2)式)は、通常、在来送電線において使われている経験式である。

このようにして算出した各ケースの年間損失電力量を図4に示す。同図において、超伝導ケースおよび在来ケースの年間損失電力量は、それぞれ282GWhおよび315GWhであった。このように、液体ヘリウム冷却の超伝導ケーブルを基幹とする大都市電力システムでは、在来ケースと比較して、最大負荷時だけでなく1年間の損失電力量でも下回ることがわかった。

4. 超伝導送電を基幹とする簡略型モデルシステム全体の送電損失の動向評価

<4・1>簡略型モデルシステム 前章では、液体ヘリウム冷却の超伝導ケーブルが導入された電力システムでも、システム全体としての送電損失は、在来送電線のみを拡充したシステムの場合より低減される可能性があることを示した。ただし、前章における検討は、電力システムの形態的にも電力需要の量的にも、ある一時点の評価である。そこで、本章では、図2に示した大都市電力システムの基本的構造の特徴を集約した簡略型の電力システムを構築し、それを用いて年々の電力需要の増加に対して、発電所の出力分布、超伝導ケーブルの導入距離などをパラメータとし、超伝導ケーブル導入システムの年間損失電力量の評価を試みる。

超伝導ケーブルを基幹とする大都市電力システムの簡略型モデルシステムを図5に示す。本モデルシステムの最大電力需要を10GWと想定した。この電力需要を支える各発電所は、それぞれG1:5GW, G2:2.5GW, G3:2.5GWを発生するものとし、全体の出力分布をG1に若干偏在させている。また、モデルシステムを構成する各送電線は、簡単のため、拠点変電所間の主要送電線のみを考慮している。各送電線の線路定数[14]を同図に併せて示す。ただし、架空送電線は地上に設置されるため、最短距離では導入できないことを考慮して、線路長に冗長性をもたせている。

超伝導ケーブルの導入ルートを以下のように想定した。まず、超伝導ケーブルの受端を都心部の拠点変電所Mと

図5 簡略型の超伝導送電基幹型電力システム
Fig.5. Simplified electric power system model with superconducting cables.

図6 簡略型の在来型電力システム

Fig.6. Simplified conventional electric power system model.

する。送端を発生電力の最も大きいG1とする。この2地点間を最短距離20kmで結ぶルートに超伝導ケーブル(送電電圧: 275kV, 送電容量: 5GW×2回線)を導入する。これにより、G1の発生電力5GWは、都心部の拠点変電所Mに供給される。そこで消費しきれない電力は地中ケーブルによって図の点線の範囲へ逆送される。

比較の対象として、在来送電線のみを拡充して10GWの電力需要に対処するものを在来ケースと呼ぶこととし、それを図6に示す。在来ケースでは、外輪線にある4ヶ所の拠点変電所から、架空送電線と途中からは地中ケーブルによって都市中心部へ求心的な電力供給を行っている。

両簡略型モデルシステムにおいて、G1, G2およびG3は便宜上発電所と呼ぶこととしたが、これらは遠隔地からの電力を集約する外輪線上の拠点変電所とみなすこともできる。両簡略型モデルシステムの相違点は、外輪線よりも内側における送電経路にあり、外輪線までの送電経路は同一であると

図7 年間損失電力量の推移 (G1, G2, G3 均等増強)

Fig.7. Transition of annual transmission loss energy. (Power up of G1, G2, G3)

想定する。なお、これらの両簡略型モデル系統も、それらが電力系統として成立するための技術的要件を満たしていることを確認している [8]–[11]。

このように構築した簡略型モデル系統の超伝導ケースおよび在来ケースにおいて、最大電力需要が 10GW の場合の年間損失電力量を算出した。その結果、超伝導ケースにおける年間損失電力量は 163GWh であり、在来ケースの 171GWh に対して 8GWh の低減となった。

< 4・2 > 需要増加に対する年間損失電力量の推移

ここでは、両ケースの電力需要が 2%/年の割合で増加する場合を想定し、年間損失電力量の推移を評価した。電力需要の増加に対しては、G1, G2, G3 が等容量ずつ増強されるものとした。また、超伝導ケーブルの送電電力は系統規模にかかわらず一定 (5GW) としている。このことは、超伝導ケースの場合、系統規模の増加に伴い、都心部母線から地中ケーブルによって周辺市街地へ逆送される電力が減少するので、その逆送範囲が小さくなることを意味している。

年間損失電力量の推移を図 7 に実線で示す。太い実線が超伝導ケース、細い実線が在来ケースである。両実線を互いに比較すると次のことが言える。2%/年の負荷増加に対して、年間損失電力量は、超伝導ケースでは約 2.7%/年、在来ケースでは約 3.5%/年の割合で増加しており、両ケースの差は年々拡大している。すなわち、超伝導ケースの年間損失電力量は、超伝導ケーブルが導入された時点だけでなく、それ以降も在来ケースより小さく保たれることがわかる。なお、同図の太い破線は超伝導ケーブル長が 30km の場合の超伝導ケースを示しており、これについては < 4・4 > 節において検討を行う。

< 4・3 > 電源偏在の影響 電力需要の増加に対して出力増加する発電所の組み合わせとして、(1) G1, G2, G3 が増強される状況 (前節の場合) の他に、(2) G1, G2 が増強され、電源の偏在が進展する状況、および (3) G2, G3 が増強され、電源の偏在が解消される状況を想定し、同様の検討を行った。その結果を図 8 および図 9 に示す。図中の

図8 年間損失電力量の推移 (G1, G2 のみ増強)

Fig.8. Transition of annual transmission loss energy. (Power up of G1, G2)

図9 年間損失電力量の推移 (G2, G3 のみ増強)

Fig.9. Transition of annual transmission loss energy. (Power up of G2, G3)

線の種類は前節と同様である。

図 8 の電源偏在進展の場合では、在来ケースにおける損失の増加は特に著しい。これは、在来ケースで電源の偏在が進展するような状況では、長距離の外輸線を経由する電力が増大し、外輸線における損失の増加量が超伝導ケースと比較して非常に大きいためである。他方、図 8 の太い実線に示すように、超伝導ケースでは、システム全体の年間損失電力量の年々の増加は低く抑えられている。実際の電力系統においても、湾岸火力発電所の再開発や、遠隔地における原子力発電所の建設などにより、電源の偏在がさらに進展することも予想される。したがって、そのような状況において電力の集中した 2 地点間の大電力伝送路として超伝導ケーブルを導入することは、液体ヘリウム冷凍機の所要電力を損失として考慮しても、システム全体の損失が低減する可能性が最も高いと考えられる。

逆に、電源の偏在が解消される場合、多方向から都心部へ電力供給を行う在来ケースでは、外輸線の潮流が緩和される。このため、図 9 の細い破線で示すように、年間損失電力量の増加は小さく、両ケースにおける年間損失電力量の増加推移は同程度となっている。

<4・4>超伝導ケーブルの線路長 超伝導ケーブル単体の送電損失は非常に大きい。このため、従来の送電線とは異なり、超伝導ケーブルの導入距離がシステム全体の送電損失に与える影響は非常に大きい。仮に、図5に示したモデルシステムにおいて、超伝導ケーブルが最短距離で敷設することができず、全長が30kmになった場合を想定する。この時の年間損失電力量の推移を図7～図9に太い破線で併せて示す。全系の電力需要が10GWの場合(横軸原点に相当)、超伝導ケースの年間損失電力量は223GWhであり、在来ケースの約1.3倍の大きさとなった。しかし、このような場合でも、図8に示した電源偏在進展化の場合では、最大電力需要が12GW程度の時点で、システム全体の年間損失電力量は在来ケースよりも逆に小さくなった。すなわち、長距離の超伝導ケーブルを導入する場合でも、それが使用される期間全体の損失の推移を考慮すれば、在来ケースに対し損失面で優位性がでてくる可能性があるといえる。

5. 送電損失からみた超伝導ケーブルの設計仕様

超伝導ケーブルの送電損失は、その電圧階級、設計仕様などにより異なってくる。しかも、その変化がシステム全体の損失に与える影響は非常に大きい。そこで、ここでは送電損失からみて、大都市電力システムの導入に適した超伝導ケーブル設計仕様について検討する。

<5・1>電圧階級 これまでの検討では、超伝導ケーブルの電圧階級を275kVとしてきた。これは、超伝導ケーブルが受端側で接続する既設の地中ケーブルシステムの電圧階級:275kVと等しい場合である。他方、超伝導ケーブルは大電流化を指向しているため、66kVの低い電圧階級を想定したものも報告されている[6][7]。そこで、第2章で示した概念設計の方針に基づき、図1に示した基本的構造の超伝導ケーブルを電圧階級66kV、154kV、275kVの3種類について想定した。各電圧階級の超伝導ケーブルにおいて、最大負荷時の送電電力が5GWの場合について、1冷却区間10kmあたりの年間損失電力量を計算した。その結果を図10に示す。同図より、電圧階級が低いほど交流損失の占める割合が大きくなり、逆に、電圧階級が高いほど誘電体損が全体の多くを占めている。電圧階級:154kVおよび275kVの場合の年間損失電力量はともに約6GWh/kmである。この値は、電圧階級:66kVの場合の50%程度である。また、ケーブルの最外径も、66kVが最も大きく、逆に275kVの場合が最小となっている。これは、66kVの場合、ケーブルから発生する損失が大きく、これを除去するための冷媒容量が大きいためである。以上の結果、超伝導ケーブルが1ルートあたり5GW程度の送電電力を要求されるとすれば、損失面から見た場合、電圧階級としては154kVまたは275kVが望ましいと考えられる。

<5・2>誘電体損失対策 超高压の在来型電力ケーブルの場合、意図的に大きな絶縁厚を採用することによって電界強度を緩和し、誘電体損失を低減するという考え方があり[15]。本論文で概念設計した275kV超伝導ケーブルの

図10 各電圧階級における超伝導ケーブルの年間損失電力量(2回線, 最大送電電力5GW)
Fig.10. Annual transmission loss energy of superconducting cables at each voltage class.

図11 275kV超伝導ケーブルの年間損失電力量に対する絶縁厚の影響(2回線, 最大送電電力5GW)
Fig.11. Effect of insulation thickness on annual transmission loss energy of 275kV superconducting cables.

場合、内部導体径に対して必要となる最小絶縁厚(t_{min})は29mmである。そこで、絶縁厚を t_{min} の2倍までの範囲で変化させ、年間損失電力量を比較した。その結果を図11に示す。同図より、絶縁厚が t_{min} の2倍になると年間損失電力量は78%まで低減する。このように、超伝導ケーブルの場合についても、絶縁厚を意図的に大きくとる設計とすることにより、年間損失電力量はさらに低減できる可能性がある。ただし、絶縁厚を t_{min} の2倍以上にすると、誘電体損失の低減分がケーブル最外形の増大による侵入熱の増加分によって相殺されるようになる。その結果、年間損失電力量はほとんど低減しなくなり、さらに3倍以上にすると、逆にそれまでよりも増大し始めることを確認している。

6. あとがき

大都市電力システムにおける液体ヘリウム冷却超伝導ケーブルの導入形態として、大都市中心部の拠点変電所と周辺部の大容量発電所とを直結し、数GWの電力伝送を行うことが考えられる。本論文では、このような局面を想定し

た約1/4世紀後の大都市モデル系統の種々の形態について、システム全体の送電損失の評価を行った。その結果、以下のことが示された。

1. 超伝導ケーブルが都心の過密需要地域へ大電力を一括送電することにより、大都市電力システム全体の電力潮流は、外輪線を中心に小さくなる。
2. 在来送電線部分の送電損失は大幅に低減されることになり、超伝導ケーブルの液体ヘリウム冷凍機における非常に大きな冷却損失が相殺されることになる。
3. 超伝導ケーブルの液体ヘリウム冷却に要する電力を含めても、電力システム全体としての損失は、同一需要環境に対し、在来送電線のみを増強していく場合の損失よりも小さくなる可能性がある。
4. 超伝導ケーブル導入後の負荷増加に対し、電力システム内の発電電力分布が偏在化していく状況では、システム全体の送電損失低減に関して、超伝導ケーブル導入の効果が高い。

最後に、本論文では、超伝導ケーブルを含む電力系統について、系統全体の送電損失のみを評価した。実際の電力系統では、負荷増加に対して送電設備を増強して運用する場合、送電損失だけでなく送電設備の建設費用も重要な評価対象である。したがって、超伝導ケーブルが導入された電力系統についても、その建設費用を含めた検討を行うことが今後の課題になると考えられる。

(平成6年3月25日受付)

文 献

- [1] 中村：「都市の電力需要の伸びにどう応える」，電学誌，113 345～348 (平5-5)
- [2] E.B.Forsyth and R.A.thomas, "Performance Summary of the Brookhaven Superconducting Power Transmission System", Cryogenics, Vol.26, pp.599-614 (1986)
- [3] 丸茂：「超高压大容量ケーブル」，電学誌，113 359～364 (平5-5)
- [4] 小山：「超伝導技術」，pp.25-27, 電気書院 (1988)
- [5] 柳井諒正：「低温工学の展望—極低温生成(ヘリウム冷凍機)」，昭和60年度低温工学シンポジウムテキスト
- [6] 原・中村：「ビーンモデルによる高温超伝導ケーブルの試算評価と大都市系統への適用検討」，電学論B，110 58～66 (平2-1)
- [7] 星野・樋口・石井・淵野：「Nb₃Snおよび酸化物超伝導体を用いた1～3GVA級超伝導ケーブルに関する考察」，電学論B，108 431～438 (昭63-9)
- [8] 鬼頭・松村・加藤・早川：「極低温大容量送電線が導入された都市電力系統に関する一考察」，電学論B，106 390～396 (昭61-4)
- [9] 早川・松村・鬼頭：「極低温大容量送電線の導入が予想される国内大都市の将来送電システムモデルの構築」，電学論B，108 355～362 (昭63-8)
- [10] 早川・松村・鬼頭：「極低温大容量送電線導入に適合した大都市送電系統構成に関する一考察」，電学論B，110 102～110 (平2-2)
- [11] 早川・鬼頭・松村：「極低温大容量送電線の事故脱落時における大都市送電系統の電力動揺解析」，電学論B，110 834～840 (平2-10)
- [12] 電気学会：「電気工学ハンドブック」，p.1118 (1988)
- [13] 電気事業連合会統計委員会：「電気事業便覧(平成3年版)」，pp.250-251, 日本電気協会
- [14] 鬼頭：「精解演習 電力工学[I]」，p.8, 廣川書店
- [15] 電気協同研究：「絶縁設計の合理化」，第44巻 第3号 pp.221-224 (1988)

付 録

付録1. 超伝導ケーブルの送電損失(3相分)の算出式

・交流損失：

$$W_H = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I^3}{3J_C \pi^2 D^3} (2D - \lambda) f \times 3 \quad (\text{kW/km}).$$

・誘電体損失：

$$W_C = 2\pi f C \frac{V^2}{3} \tan \delta \times 3 \quad (\text{kW/km}).$$

・侵入熱：

$$W_I = \frac{\pi D_R}{100} \times W_{in} \quad (\text{kW/km}).$$

I : 通電電流 (A), V : 送電電圧 (kV),
 D : 導体径 (内部導体 D_1 および外部導体 D_2),
 λ : 磁束侵入深さ ($\sqrt{2}I/(\pi D J_C)$) (cm),
 J_C : 臨界電流密度 (10^6 A/cm²),
 $\tan \delta$: 絶縁体の誘電正接 (10^{-4}),
 C : キャパシタンス (μ F/m), f : 系統周波数 (60Hz),
 D_R : 冷媒復路管径 (cm), W_{in} : $0.1(\text{W/m}^2)$ 。

加藤 文佳 (正員) 1968年5月7日生。1993年3月名古屋大学大学院博士課程前期課程修了，同年4月同後期課程進学，現在に至る。主として，超伝導電力システムに関する研究に従事。

埜 頼博 (正員) 1969年4月23日生。1992年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程進学，1994年3月同課程終了。同年4月川崎重工(株)入社。主として，超伝導電力システムに関する研究に従事。

早川 直樹 (正員) 1962年9月9日生。1990年3月名古屋大学大学院工学研究科満了。同年4月同大学助手，現在に至る。工学博士。主として，超伝導送電システムに関する研究に従事。IEEE会員。

松村 年郎 (正員) 1951年5月1日生。1979年3月名古屋大学大学院工学研究科満了。同年4月同大学助手，1987年2月同講師。1989年3月京都大学講師，1992年1月名古屋大学助教授，現在に至る。工学博士。主として大電流遮断・電気エネルギーの有効利用に関する研究に従事。

鬼頭 幸生 (正員) 1933年3月12日生。1960年3月名古屋大学大学院工学研究科満了。同年4月同大学助手，1974年同教授，現在に至る。工学博士。主として，高気圧中大電流アークの研究，超伝導送電システムに関する研究に従事。1988～89年電気学会調査理事。1990年電気学会電力賞受賞。IEEE Fellow。