

直流饋電システムへの超電導ケーブルの導入

Introduction of Superconducting Cables to the Feeding Network for DC Electric Railways

大柴 満春（電気電子情報工学科），山中 利史（電気電子情報工学科）

Mituharu OOSHIBA , Tosifumi YAMANAKA

交通・電力・環境システム研究室

指導教員 高木 亮 准教授

1. はじめに

従来の直流饋電システムでは、変電所間隔が長いと饋電抵抗により電圧降下が発生する。逆に間隔が狭いと変電所数が増え、変電所機器利用率が低下し、更に回生車の回生が変電所によって妨げられ回生失効の原因となる。

近年、高温超電導体を線材に加工する技術が開発され、様々な場面で活用され始めた。筆者らはこの高温超電導ケーブルを直流饋電システムに導入することにより電気鉄道の省エネルギー化を図る検討を行っている。

2. 超電導ケーブルを用いた直流饋電システム

超電導ケーブルには以下のような特性がある。

- ・定常時、超電導ケーブル上は全て同電位
- ・電気抵抗が $0[\Omega]$

図 1 を用いて解説すると、超電導ケーブルの端末ではどの地点で定常時、同電位であるので電流の回り込みが発生せず、（周囲に回生車がない場合）力行車に隣接した端末 B 及び C より電流が供給される。

よって、饋電経路が最短距離となるので饋電損失が低減される。また、回生時も同様に回生車に隣接する（周囲に力行車がない場合）超電導ケーブルに回生電流が流れる。

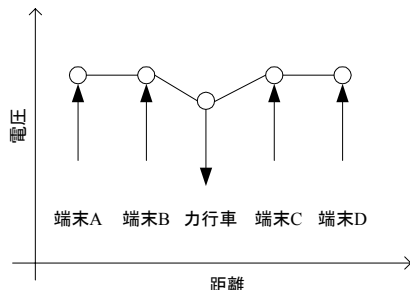


図 1 超電導饋電線を用いた場合の饋電線電圧分布

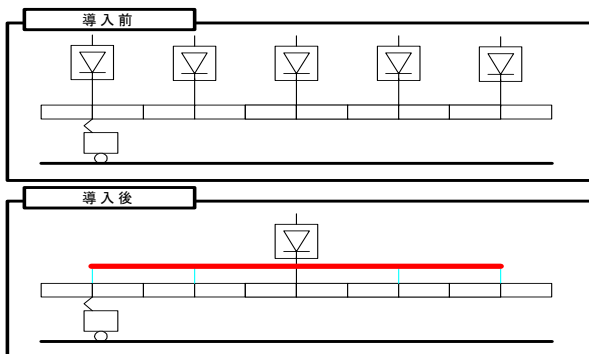


図 2 超電導ケーブルによる変電所の集約

更に超電導ケーブルは電気抵抗が $0[\Omega]$ である特性を生かして、図 2 のように直流饋電システムの路線にある複数の変電所を 1 つの変電所に集約し、既存の直流饋電システ

ムの問題点である機器利用率の低さを克服することが出来る。

一方、ケーブルの超電導状態を維持するため、列車が運行していない時間帯も含めて常時ケーブルを冷却することが必要で、このためのエネルギー損失が発生する。従って、超電導ケーブル導入による省エネルギー効果はこの冷却損失を上回らなければ、導入する意味がない。

3. シミュレーションに用いた路線パラメータ

以下の路線モデルにおいて超電導ケーブルを導入し、既存の直流饋電システムと比較した。

線路長：26.577[km]（複線），

変電所数：8 箇所（全てシリコン整流器）

運行間隔：5 分

SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SS7	SS8
1.5[km]	5.2[km]	8.5[km]	11.4[km]	14.8[km]	17.9[km]	21.7[km]	25.2[km]

図 3 仮定した変電所位置

比較のための従来システムでは、全ての変電所をダイオード変電所とした。一方、超電導ケーブルを導入する際には以下のシミュレーションを行った。

（1）饋電用変電所の集約化

変電所の集約化のケースによって 2 つのシミュレーションを行った。

ケース A) 変電所 SS1 から SS8 を 1 ヲ所に集約。

ケース B) 隣接変電所のペアを集約。すなわち、SS1・SS2、SS3・SS4、SS5・SS6、SS7・SS8 をそれぞれ集約し、4 変電所とした。

（2）超電導ケーブルと従来の饋電線との接続間隔の検討

$$P = \left[\{ (l \times C1) + (C2 \times n) \} \times \frac{1}{K} \right] \times 24 \quad \dots(1)$$

線路モデルは同様の物を利用し、ココでは変電所を一ヶ所に集約して、超電導ケーブルと従来の饋電線との間隔を変えたケースを想定する。

ケース C) 接続間隔を 4 ヲ所にする。

以上のケースで行う。

超電導ケーブルの冷却損失は以下の式で求めることが出来る。

P : 冷却消費電力, l : 超電導ケーブル長,
 $C1$: ケーブル部熱侵入量, $C2$: 端末部熱侵入量
 n : 端末数, K : 冷凍効率

4. シミュレーション結果

前記のパラメータを用い、饋電特性シミュレータ RTSS

(1)(2)を用いて評価を行った。

比較対象となる従来システムと、超電導饋電線を用いたシステムとについて、変電所でみた総合入力エネルギーを求め、その差分から1日当たりの省エネルギー効果を算出し、これと超電導ケーブルの冷却損失とを比較した。一日の運行時間を18時間と仮定した。

なお、冷却損失は式(1)において：

ケース A)

$$l : 25.2(SS8) - 1.5(SS1) = 23.7[km], \\ C1: 0.9[kW/km], C2: 0.22[kW/端末] \\ n : 9 \text{ 箇所}, K : 0.1$$

ケース B)

$$l : 13.2[km], \\ C1: 0.9[kW/km], C2: 0.22[kW/端末] \\ n : 12 \text{ 箇所}, K : 0.1$$

をそれぞれ代入し、超電導ケーブル1本分の冷却損失は

ケース A) $P = 5594[kWh/d]$

ケース B) $P = 3484[kWh/d]$

と計算された。実際には正負両側に超電導ケーブルが必要と考えられるため、これを2倍した値を評価に用いる。

<4-1>饋電用変電所の集約化

表 1 饋電用変電所集約化の評価結果

ケース	省エネ効果 [kWh/d]	1本分の 冷却損失[kWh/d]	2本分の 冷却損失[kWh/d]
A	15772	5594	11188
B	7255	3485	6969

ケースBに比べて、ケースAの方が省エネ効果は高いものの同様に超電導ケーブルの冷却損失も高いことが分かる。また、両ケースにおいて従来の饋電システムに比べて回生失効率が減少し、省エネルギー効果がみられた。

<4-2>超電導ケーブルと従来の饋電線との接続間隔の検討

まず、各ケースの冷却損失を考える。各ケースの冷却損失は、

ケース C)

$$l : 25.2(SS8) - 1.5(SS1) = 23.7[km], \\ C1: 0.9[kW/km], C2: 0.22[kW/端末] \\ n : 5 \text{ 箇所}, K : 0.1$$

を代入し、値は、

ケース C) $P = 5383[kWh/d]$

となった。集約化の時と同様に正負に両側に超電導ケーブルが必要と考えられるので、この値を2倍した値を評価に用いる。

比較対象となる従来システムと、超電導饋電線を用いたシステムとについて、変電所でみた総合入力エネルギーを求め、その差分から1日当たりの省エネルギー効果を算出し、これと超電導ケーブルの冷却損失とを比較した。一日の運行時間を18時間と仮定した。ここでは、<4-1>のケースAとケースCで比較する。

表 2. 接続間隔の検討結果

ケース	省エネ効果 [kwh/d]	1本分の 冷却損失 [kwh/d]	2本分の 冷却損失 [kwh/d]
C	10390	5383	10766

ケースAと比較して、ケースCは接続点が減少するので、冷却損失がそれに伴い減少するが、同時に饋電損失が上昇する。今回のシミュレーション結果では、ケースAと比較するとケースCではケースAを下回り、ケーブル2本分の冷却損失をも下回った。一般的に、超電導ケーブルと常電導饋電線の接続間隔は、路線の列車密度や饋電抵抗などにより異なる値が最適値となると考えられる。

5. まとめ

以上のように、饋電特性シミュレーションを用い、実路線において超電導饋電線を用いた場合の省エネルギー効果について、定量的に明らかにすることができた。

変電所の集約化(<4.1>)についての検討では、ケースBの結果より直流饋電システムの一部に超電導ケーブルを導入するだけでも省エネルギー効果があることが分かった。

接続間隔を減らした結果、接続点が少なくなると冷却損失は減少するが、饋電損失が増加する効果もあるため、省エネルギー効果は小さくなる。しかし、接続点を多くすればコストが高くなるため、接続間隔が長く、接続点が少ないシステムとすることができれば、より低コストに導入することが可能になると考えられる。

文 献

- (1)高木 亮:「直流饋電系と列車群制御の統合インテリジェントシステム化」, 東京大学 (学位論文) (1995).
- (2)高木 亮, 曾根 悟:「直流鉄道電力システムシミュレーションプログラム RTSS」, 日本シミュレーション学会 第12回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス, 4-3, pp. 121-124 (1993).