

超電導主変圧器の実用化に向けた特性向上

車両制御技術研究部
主任研究員 上條 弘貴

1. はじめに

鉄道総研では、超電導技術の在来鉄道への応用研究として、鉄道車両用主変圧器の超電導化の可能性について、検討を進めている。2004年度までに、軽量化のための最適設計、巻線構造や冷却システムの検討などを行い、Bi2223系超電導線を用いた新幹線の架線電圧25kVに対応する超電導主変圧器を試作し、その基本特性の評価などを行った^{1),2)}。しかし、実用化に向けて超電導化のメリットである軽量化や効率向上のためには、交流損失を低減すること、大容量で軽量の冷凍機を含む冷却システムを確立することなどが、課題となっている。

本報告では、その課題への取り組みとして、巻線に発生する交流損失の低減対策、実用化に必要な1kW級の容量に対応する小型、軽量の冷凍システムの開発について紹介する。

2. 交流損失低減対策

2004年度に試作、試験した超電導主変圧器では、使用したBi系超電導線の特性として、臨界電流値が設計より小さい、交流損失が大きいといった課題があった。

2.1 交流損失低減対策

Bi系超電導線の交流損失を低減するためには、標準的な仕様である幅4.2mm、厚さ0.2mm程度に対して、(a)超電導線の幅を狭くする、(b)超電導フィラメントにツイスト(ひねり)を加える、(c)各超電導フィラメントを囲うバリア(絶縁、高抵抗)を導入するなど対策が考えられる。上記対策のうち(a)と(b)の効果を確認するため、超電導線の寸法(幅、厚さ、アスペクト比)および構造(ツイストピッチ、フィラメント数)を変えた60種類以上のBi系超電導線を試作し、評価した。

評価の結果、交流損失は、垂直磁界に対しては幅に、平行磁界に対しては厚さに、ほぼ比例して減少し、幅を狭くして厚さを薄くすることで交流損失を低減できることが分かった。また、幅狭にして薄くすることで、短いピッチでもきれいにツイストすることができ、臨界電流の大きな低下なく、ツイストの効果により交流損失低減の効果が見られた。一方、臨界電流密度がアスペクト比に比例して増加する傾向が見られ、高い臨界電流密度を得るためには15以上のアスペクト比が必要なことが分かった。

2.2 低交流損失超電導線

評価結果から、交流損失に一定の低減効果があり、高臨界電流密度を確保できて、機械的な特性低下が小さく巻線などへの影響が少ない、実用的な表1のような仕様のBi系高温超電導線を開発した。

表1 幅狭低交流損失超電導線材の仕様(標準値)

	従来型 (2004年度)	低交流 損失型
幅(mm)	4.2	2.3-2.6
厚さ(mm)	0.25	0.18
フィラメント数(本)	61	19、37
ツイストピッチ (mm)	-	8
臨界電流(A) 77K,自己磁界	120	47-48

2.3 低交流損失超電導線を用いた巻線

2004年度試作器の仕様を維持しつつ幅狭低交流損失 Bi 系超電導線を適用する場合、1本あたりの臨界電流が低下するため、通電容量を確保するにはより多くの導体を多並列化する必要があり、素線を必要枚数重ねる構造では巻線作業が困難、電流分流の均一化のため転位(重ねられた超電導線の上下位置の入れかえ)回数が増加するなどの問題が発生し、従来の巻線構造、方法の適用が難しい。そこで、巻線ごとに巻線構成、転位方法などを検討し、従来寸法に収まり所定の仕様が確保できると想定される巻線を製作した。

製作した巻線について、電流-電圧特性を測定し臨界電流値を確認した結果、各巻線とも表2のように測定値と計算値はほぼ一致しており、巻線構成に問題はなく、巻線作業による劣化などがないことを確認した。

表2 臨界電流値(77K)

	並列数	測定値	計算値
一次巻線	3枚重	54A	48A
二次内側巻線	12枚重×	502A	504A
二次外側巻線	2並列	509A	504A
三次巻線	4枚重×2 並列×2条	542A	480A

3. 冷却システムの開発

2004年度に試作、試験した超電導主変圧器では、市販の小型冷凍機に剣山方式の熱交換を取り付けた冷却システムを搭載したが、冷凍機の容量が小さく、冷媒である液体窒素を定格運転温度まで冷凍システムだけで下げることができないなどの課題があった。

3.1 冷凍機の開発

小型冷凍機には、GM 冷凍機、スターリング冷凍機、パルス管冷凍機などの蓄冷器と流体の間の熱交換を利用する蓄冷器式冷凍機が多く用いられているが、超電導主変圧器に必要な温度 65K で 1kW 級の冷凍能力があり、小型、軽量の冷凍機は製作されていなかったことから、COP(冷凍能力/入力電力)0.05 以上、消費電力 20kW 以下、重量 580kg 以下を目標に、開発を行った³⁾。

(1) 冷凍機の選定

普及している小型冷凍機について、消費電力、重量、騒音性、開発進度、メンテナンス性、熱交換器とのインターフェースなどより評価した結果、大容量、高効率において実績のあるアクティブバッファ方式の GM 型パルス管冷凍機が最も本開発に適していると判断した。

(2) パルス管冷凍機の試作、改良

軽量化を考慮した温度 65K、冷凍能力 1kW 級のパルス管冷凍機を試作し、バルブユニットや配管部分などを中心に調整、改良を行い、COP の向上を図った結果、図1のように冷凍能力 900W 強で、COP を 0.037 まで向上できた。さらに、試験用に複数の電磁弁で構成したバルブユニットをロータリーバルブなどで最適化することで、目標は達成できる見通しが得られた。

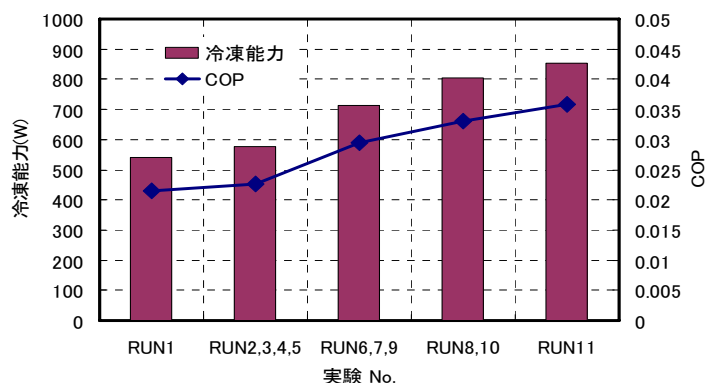


図1 冷凍機性能向上

3.2 冷却システム

開発を進めたパルス管冷凍機のもとに、低温容器に騒音が可能な大きさで、巻線をサブクール液体窒素温度領域に保持で

きる冷凍能力を有する冷凍機と 2004 年度試作で実績のある剣山方式の熱交換器を新たに製作し、液体窒素の自然対流による冷却システムを構成した。

4. 超電導主変圧器の組み立て、試験

低交流損失対策を施した巻線と、冷却システムを組み込んだ超電導主変圧器を組み立て、その電気的な特性を確認するための形式試験に準拠した評価試験、および実際に鉄道車両に搭載された場合を想定した主回路組み合わせ試験を実施した。

4.1 超電導主変圧器の組み立て

2004 年度試作器の低温容器を使用して、内鉄型二脚のうち片脚のみに内側から二次内側巻線、三次巻線、一次巻線、二次外側を設置し、他脚側の空間に剣山熱交換器を取り付けたパルス管冷凍機を組み込んだ。組み立てた超電導主変圧器と圧縮機などの冷却システム用関連機器は、図 2 のように 1 つの台車上にまとめて設置した。



図 2 超電導主変圧器

4.2 冷却特性

搭載した冷却システムにより、液体窒素の温度を大気圧における沸点 77K から、設計の定格運転温度である 66K 以下まで下げられ、巻線を冷却できることを確認した。

4.3 電気的特性に関する試験

組み立てた超電導主変圧器の電気的特性に関する評価は、2004 年度試作器と同様に JIS - E 5007「鉄道車両用主変圧器の試験方法」の形式試験に準拠し、超電導であることを考慮して、巻線抵抗測定など一部項目、内容を変更して実施した。

通電試験として、電源周波数 60Hz の交流電流を通電し、電圧、損失などの測定を行った。図 3 に、一次-二次内側、外側巻線直列時の交流損失測定結果を示す。二次側定格電流の 750A まで損失の極端な増加はなくほぼ超電導状態を維持できていることが確認でき、設計通り片脚分 2MVA の容量が達成できた。交流損失は、巻線間の組み合わせにより低減率は異なるが、2004 年度試作器の 1/2 以下に低減できることを確認した。容量 2.0MVA の定格電流を各巻線に通電した場合の全交流損失の解析値は、表 3 のように 1.99kW と算出され、冷却効率を考慮した効率は、98.2%程度に向上できた。

その他、絶縁抵抗試験、極性試験、変圧比試験、耐電圧試験、インピーダンス電圧測定など JIS - E 5007 に定められた条件で電気的な特性を試験した結果、絶

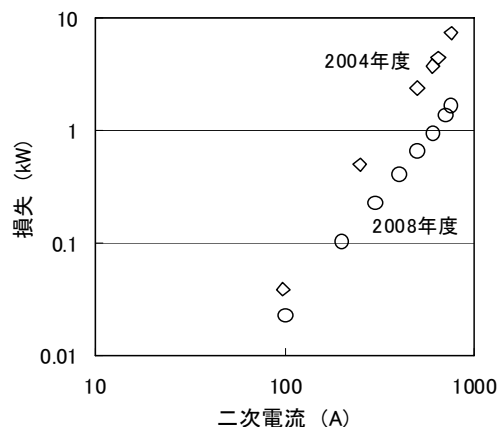


図 3 交流損失特性

縁破壊はなく電気絶縁に問題がないこと、電氣的係数が設計値通りであることを確認した。

4.4 主回路組合せ試験

試作した超電導主変圧器が、新幹線の主回路に組み込まれた場合を想定し、一次側に25kV 入力、二次側に主変換装置、主電動機の負荷を接続した場合の動作特性について確認した。

試験は、実負荷規模の回転慣性を有し、実車と等価の性能試験が可能なダイナミックシミュレータを使用した。一次側に定格電圧 25kV を入力し、4 つある二次側巻線のうちの 1 つを主変換装置、主電動機に接続した。

力行・ブレーキ試験では、従来の主変圧器と同様に、起動、加速、定速走行、回生、減速、停止の一連の操作を行い、主変換器および主電動機が制御通りに問題なく動作することを確認した。また、セクション模擬通過装置により、一次側入力電圧 25kV を一時的にしゃ断、再投入を行い、セクション通過を模擬した。しゃ断時にサージ電圧が発生し、再投入時には一次巻線で励磁突入電流が発生するが、超電導主変圧器に問題はなく、主変換装置、主電動機もセクション通過後、正常に動作していることを確認した。

また、走行模擬試験として、超電導主変圧器に実負荷を接続し、複数回の加速、減速、停車の負荷変動を伴う走行パターンで、運行を模擬した 2 時間半以上の連続運転を行った。なお、電流、速度、加減速、ノッチなどは、実際の走行パターンを模擬しておらず、フルパワーの運転ではない。図 4 に、走行時間 2 時間 40 分、途中の 5 駅での停車を模擬した場合の結果を示す。この走行模擬では、速度は最大 200km/h 相当、二次側電流は定常時 300A 程度、加速、停止時には最大 630A 程度で、低温容器内の全部位を 68K 以下のサブクールに保持できた。

表 3 交流損失(解析値)

	容量 (MVA)	定格電流 (A)	交流損失 (kW)
一次巻線	2.0	80	1.15
二次内側巻線	0.9	750	0.31
二次外側巻線	0.9	750	0.41
三次巻線	0.2	455	0.12
合計	—	—	1.99

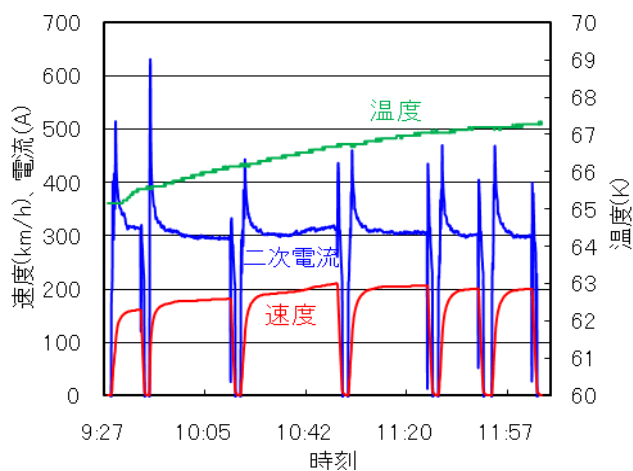


図 4 主回路組み合わせ試験結果

5. おわりに

超電導主変圧器の特性を向上するため、交流損失の低減、冷却システム開発に取り組み、低交流損失超電導線による効率の向上、大容量で軽量の冷凍機を含む冷却システムの見通しを得た。実用化に向けては、交流損失のさらなる低減による効率 99%以上の達成や、COP0.05 以上の冷凍機と高効率な熱交換器による冷却システムの確立など、引き続き研究、開発が必要である。

参考文献

- 1) 秦広他：車両用超電導主変圧器の試作、鉄道総研報告、第 19 巻 5 号、2005.5
- 2) 上條弘貴他：車両用超電導主変圧器の電気および機械特性試験、鉄道総研報告、第 22 巻 4 号、2008.4
- 3) 池田和也他：パルス管冷凍機による超電導主変圧器用冷却システムの開発、鉄道総研報告 第 21 巻 9 号、2007.9