

鉄道車両用超電導主変圧器の開発

上條 弘貴

材料技術研究部(超電導応用 室長)

秦 広

車両制御技術研究部(部長)



かみじょう ひろき



はた ひろし

1. はじめに

鉄道総研では、新幹線を初めとする交流電車に搭載されている鉄道車両用主変圧器について、軽量化と損失の低減によるエネルギー効率の向上を目的に、超電導化の可能性について検討しています。

主変圧器では、重量を減らす方策の一つとして、巻線の材質を銅からアルミに変えることで、軽量化を達成しました。一方、軽量化のために、一般の電力用変圧器に比べて、効率が低くなっています。さらなる軽量化と効率の向上のため、損失が少なく、たくさんの電流を流すことができる超電導線を巻線に応用することが考えられます。

2. 高温超電導線

液体窒素温度(−196℃)以上の臨界温度をもつ高温超電導体が1987年に発見され、その線材化とともに、電力機器への応用研究が進められてきました。米国では、すでにビスマス系超電導線を使用した送電用超電導ケーブルが、短距離ですが実証実験として世界で初めて実用の送電路に導入される段階にまで開発が進んでいます。

このビスマス系超電導線は、銀および銀合金中に超電導体のフィラメントが埋め込まれたテープ状の構造で、幅4mm程度で、厚さが0.2~0.3mmのものが標準的です。液体窒素冷却における臨界電流値(超電導状態で流せる電流値)は、数年前まで100A程度でしたが、現在では200Aを超え、さらなる向上が期待されています。この電流値は、銅線に比べると100倍以上の電流密度になります。

3. 超電導主変圧器

新幹線をはじめとする交流、交直流電車に搭載される主変圧器は、架線から受けた電力を、車両を駆動する主回路や空調装置などの補助回路に供給する重要な機器です。しかし、搭載機器の中では最重量物の一つで、軽量化に対す

る要求が高い機器です。特に、高速鉄道では、高速化、エネルギー消費の観点はもとより、地上設備への影響からも、車両の軽量化が重要なテーマであり、主変圧器の軽量化は重要な研究開発要素となっています。

新幹線の主変圧器では、コイル導体のアルミ化、部品類の軽量化などにより、容量あたりの質量が、初期(0系)の2kg/kVAから、700系では0.74kg/kVAと1/3近くに減少していますが、さらなる軽量化と効率の向上のため、巻線を超電導化することが考えられます。

超電導化の研究は、鉄道総研において1990年代初めに金属系超電導線を用いた場合を検討しましたが、交流損失が大きく、冷凍機重量が大きくなるなどメリットが見いだせませんでした。しかし、高温超電導線の開発が進んだことから、1990年代後半から高温超電導線を用いた超電導主変圧器の研究開発が、日本およびドイツで進められてきました。

鉄道総研では、九州大学、富士電機システムズ、大陽日酸などの協力を得て、1990年代後半から新幹線への搭載を前提に、ビスマス系超電導線を用いた超電導主変圧器の

表1 車両用高温超電導主変圧器の仕様

一次巻線	4MVA, 25kV, 160A
二次巻線	3.6MVA, 1.2kV×4巻線, 750A
三次巻線	400kVA, 440V, 909A
%インピーダンス	現状(20%程度)と同程度
リアクタンスマトリクス	現状(対角要素0.8mH程度, 非対角要素0.1mH程度以下)と同程度
試験方法	JIS鉄道車両用主変圧器の試験方法による。 なお、二次巻線短絡時間は0.1秒。
設置箇所	床上

研究開発を進めています。表1のような仕様の超電導主変圧器について、軽量化のための最適設計を行った結果、従来の高温超電導線では交流損失が大きく、効率の向上は見込めども質量は4tを超え従来器より重くなるが、交流損失が理論値に近づき現状の1/5程度に低減されたと仮定すれば、効率は99%を超え質量も2.4tと従来器より20%程度の低減が期待できることなどを明らかにしました。設計した超電導主変圧器のイメージを、図1に示します。設計した超電導主変圧器では、発生する損失を低減して高効率化および軽量化するため、従来の主変圧器における鉄心、巻線構造である外鉄型から、二脚鉄心に円筒状の巻線を巻く内鉄型構造にして、鉄心は室温に配置しました。

4. 超電導主変圧器の試作

3.で紹介した設計検討の結果をもとに、2004年に実規模で床上配置の超電導主変圧器を試作しました。

試作した高温超電導主変圧器の外観を、図2に示します。巻線配置は、リアクタンスマトリックスおよび%インピーダンスを従来の主変圧器に合わせるとともに絶縁隔離などを考慮して、各脚とも内側から「二次巻線-三次巻線-一

次巻線-二次巻線」の配置とし、一次と三次巻線は両脚の巻線を並列接続に、二次巻線はそれぞれ独立した構成にしました。

超電導線を冷却するため液体窒素を入れる低温容器は、鉄心を室温に配置するため、電磁気的な影響のない繊維強化プラスチック製の真空容器で、レーストラック状の断面に鉄心を通すための2個の穴を設けた複雑な形状となります。また、蒸発する液体窒素を再び液化するための冷凍機としては、実際に超電導主変圧器が実用される際には、1kW級の小型・軽量冷凍機を搭載する必要がありますが、今回の試作では開発期間、費用などの面から搭載が難しいと判断し、80Kで200Wの冷凍能力をもつ市販の冷凍機を搭載しました。

寸法は、幅1.2m、奥行き0.7m、高さ1.9m(圧縮機を除く)で、質量が1.71t(液体窒素を含む、冷凍機、圧縮機を除く)となり、製作時に行った詳細設計の通りでした。なお、交流損失が1/5程度に低減された場合を想定すると、66K、1kW級の冷凍機、圧縮機を含めた質量は2.32t程度と推測でき、見積もり通り従来の主変圧器より20%程度の軽量化を見込むことができます。

5. 超電導主変圧器の試験

(1) 電気的特性に関する試験

鉄道車両に搭載される主変圧器の電気的特性に関する評価試験は、JIS - E 5007「鉄道車両用主変圧器の試験方法」に定められています。

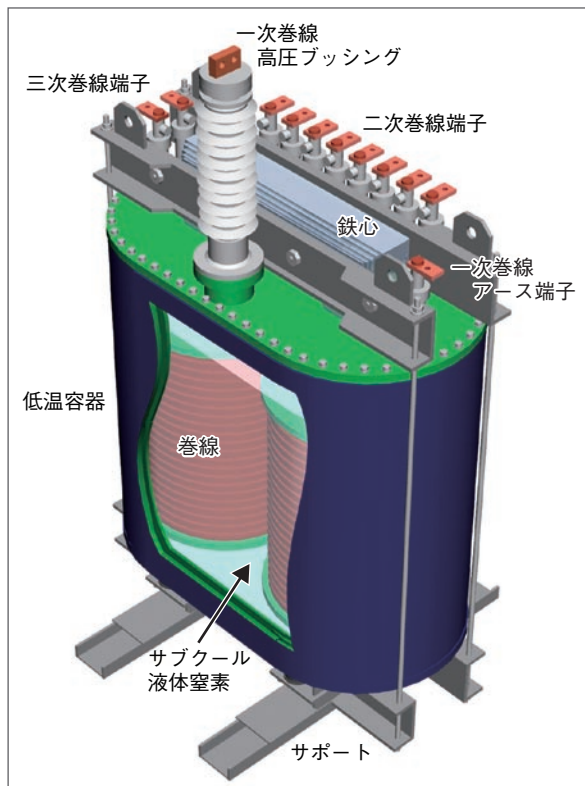


図1 超電導主変圧器のイメージ
(冷凍機、圧縮機を除く)

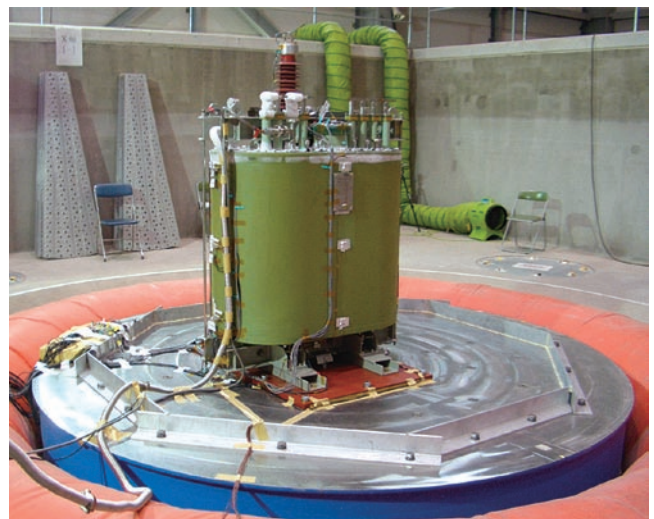


図2 試作した超電導主変圧器
(振動試験機に設置された状態)

そこで、試作した超電導主変圧器についても、このJIS - E 5007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実施項目、内容を変更して試験を行いました。なお、今回の試作では、高温超電導線の特徴が設計検討の想定より低い、搭載した冷凍機の冷却容量が小さい、さらに二次巻線の一つは旧製法で製造された臨界電流の小さい高温超電導線を使用しているため、試験条件、方法が一部制約されました。

主な試験結果は、以下の通りです。

(a) 巻線抵抗測定

常温での抵抗測定に加え、超電導主変圧器であることを考慮して、冷却温度77Kにおける巻線毎の電流 - 電圧特性を測定しました。結果の一例として、一つの二次巻線における測定結果を、図3に示します。各巻線とも単線の特徴をもとに算出される電流 - 電圧特性を示しており、製作時の劣化、巻線構造上の問題などないことを確認しました。また、一連の試験の後にも測定しましたが、変化はなく試験による劣化がないことも確認できました。

(b) 無負荷試験

冷却温度66Kにおいて、一次および三次巻線を開放し、4つの二次巻線を直列接続して励磁しました。励磁電流および損失の測定した結果、定格電圧25kVにおける無負荷損失は0.71kWでした。

(c) 通電試験

冷却温度66K、電源周波数60Hzにおいて、一次巻線を

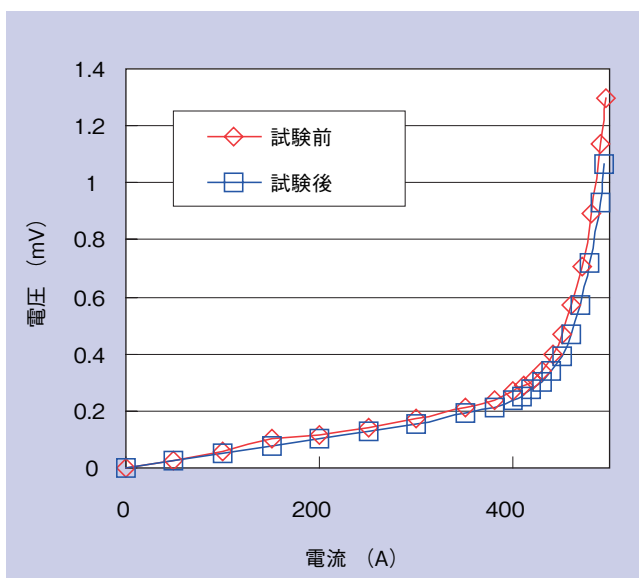


図3 電流-電圧特性(二次巻線, 冷却温度:77K)

短絡して、二次巻線を直列に接続して通電を行い、通電状況の確認、損失や騒音などの測定を行いました。

試験の結果、二次巻線の通電電流が650Aまでは、抵抗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から、試作した主変圧器の容量は、二次巻線の定格電流として超電導状態を維持した650A、並列数が多く臨界電流値に余裕がある三次巻線の定格電流を設計値の909Aとして、容量3.5MVA相当になりました。さらに、二次巻線に設計時の定格電流750Aを通電すると抵抗による損失が増加するものの、短時間の通電は問題ありませんでした。

(d) 耐電圧試験

冷却温度66Kにおいて、商用周波耐電圧試験、誘導耐電圧試験、雷インパルス試験をJIS - E 5007に定められた試験条件で行いました。すべての試験において、異常のないことを確認しました。

(2) 主回路組み合わせ試験

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の入力、二次側に主変換装置、主電動機の負荷を接続した時の動作特性について確認する主回路組み合わせ試験を行いました。

試験は、実車と等価の性能試験が可能なダイナミックシ

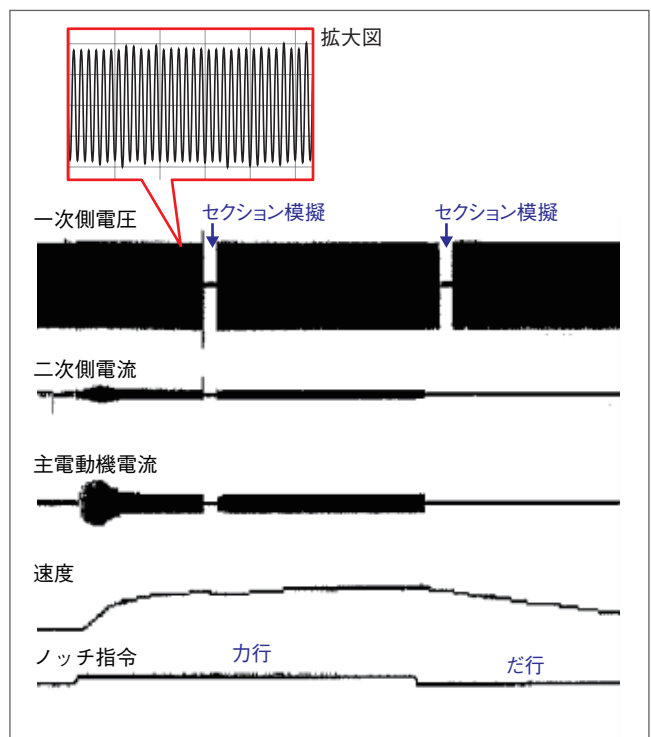


図4 セクション通過試験

ミュレーターを使用して、超電導主変圧器の一次側に新幹線の架線電圧である25kVを入力し、二次側巻線の一つに主変換装置、主電動機の負荷を接続しました。

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、減速、停止の一連の操作を行い、主変換装置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ました。

セクション通過模擬試験では、力行およびだ行において入力電圧の一時的なしゃ断、再投入を行い、セクション通過を模擬しました。結果の一例を、図4に示しました。力行の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しましたが、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ました。

(3) 振動試験

鉄道車両に搭載される超電導主変圧器は、電力用などの地上設置の変圧器とは異なり、走行に伴い振動が加わります。そこで、試作した超電導主変圧器の振動特性を評価するため、鉄道車両の車体、台車などに取り付ける機器および部品の振動試験方法を定めたJIS - E 4031「鉄道車両部品の振動試験方法」に準拠した試験を行いました。

共振の有無を調べ、その共振振動数を求める共振試験では、振動数を連続的に上昇および下降させたて振動波形を測定、解析して共振振動数を同定したところ、前後、左右方向で10Hzおよび13Hz付近に共振振動数が見られましたが、上下方向では30Hz以下に共振振動数は見られませんでした。

振動に対する耐久性を調べる振動耐久性試験では、JIS - E 4031の試験条件に合わせて、前後、左右方向については共振振動数で0.5時間、10Hzにおいて1.5時間の加振を、Z軸方向については30Hz以下には共振振動数が見られなかったので10Hzにおいて4時間の加振を行いました。そして、加振開始1分後の振動波形を基準に、振動試験の中間および終了1分前の振動波形を比較した結果、図5のように大きな変化は見られませんでした。また、加振試験終了後に外観および内部の巻線などを検査した結果、一部ネジのゆるみなどが見られましたが、低温容器、巻線などに破壊などの問題はありませんでした。

6. おわりに

超電導主変圧器の試作および試験を行い、質量の見積も

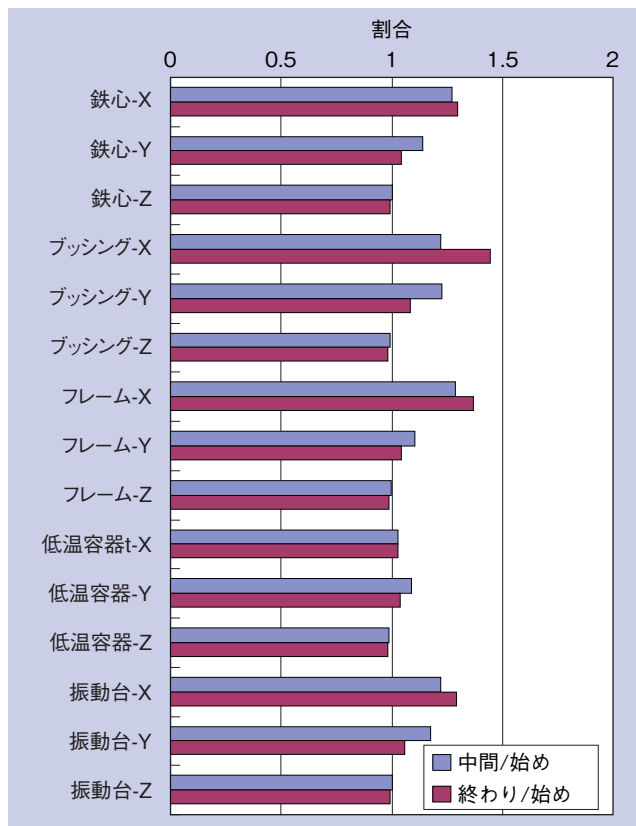


図5 振動耐久性試験結果(上下方向加振時)

り、絶縁特性の確認など設計の妥当性を確認するとともに、組み合わせ試験や振動試験でも問題は見られず、実用化の可能性を示しました。しかし、高温超電導線の交流損失低減などの特性向上、小型軽量の大容量冷凍機の開発、床下に設置できるようにするなどの課題もあり、さらに研究開発に取り組んでいます。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて実施しています。[RRR]

文献

- 1) 上條弘貴, 藤本浩之, 秦広: ビスマス系高温超電導コイルの車両用主変圧器への適用, RRR, 第60巻第12号, p.28-31, 2003
- 2) 秦広, 上條弘貴, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也: 超電導線材を用いた車両用主変圧器, RRR, 第62巻第7号, p.26-29, 2005
- 3) 秦広: 車両の省エネルギー技術, RRR, 第64巻第8号, p.10-13, 2007