

超電導主変圧器の電気および機械特性試験

上條 弘貴* 福本 祐介*
 秦 広** 池田 和也***

Electrical and Mechanical Property Tests of Superconducting Traction Transformer for Railway Rolling Stock

Hiroki KAMIJO Yusuke FUKUMOTO
 Hiroshi HATA Kazuya IKEDA

We are developing a light weight and high efficiency superconducting traction transformer for railway rolling stock. We performed a conceptual design for optimization, and fabricated and tested high-Tc superconducting coils that simulate windings, and other components. Then we designed and fabricated a prototype superconducting traction transformer to be installed on the floor for Shinkansen rolling stock. In this study report, results of tests such as type test, system test and vibration test are presented. The type test which confirms basic electrical characteristics is performed based on JIS-E5007. In the system test, the transformer is tested by dynamic simulator for rolling stock. The vibration test is performed in accordance with JIS-E4031.

キーワード：超電導主変圧器，Bi系高温超電導，形式試験，主回路組み合わせ試験，振動試験

1. はじめに

鉄道総研では、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。これまでに、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実施し^{1) - 5)}、その成果をもとにBi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て、各種の評価試験を実施している^{6) - 8)}。

本稿では、電気的な特性を確認するため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た評価試験、超電導主変圧器が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および振動試験を実施したので報告する。

2. 超電導主変圧器の試作

これまでの設計検討の結果^{1), 2)}を受け、将来高温超電導線におけるフィラメント間の電磁氣的結合が抑えられて交流損失が理論値に近づき現状の1/5程度に低減された場合を前提として、最も軽量化が可能となる仕様をもとに詳細な設計を行い、図1のような実規模の試作器を製作した^{6), 7)}。設計時の仕様を表1に示す。なお、今

* 材料技術研究部（超電導応用）
 ** 車両制御技術研究部
 *** 浮上式鉄道研究部（低温システム）

回は検討の第一段階として、床上設置の構成の超電導主変圧器とした。

2.1 超電導線・巻線

使用した超電導線および巻線の仕様を、表2に示す。設計検討の段階では、高い臨界電流値を有するAMSC製の高臨界電流型Bi系超電導線の使用を前提とした^{1), 2)}が、製作の時点では特許の関係からこの超電導線の入手が困難であったこと、住友電工が臨界電流特性を向上させた加圧焼結法の超電導線を開発したことから、住友電工製のBi2223系超電導線を使用した。しかし、この超電導線では、寸法が幅4.3～4.5mm、厚さ0.27mm以内と設計検討より幅が広くなる。さらに、臨界電流値が77Kの自己磁界中において110A程度で、66Kに冷却しても

表1 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
パーセントインピーダンス	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

特集：材料技術

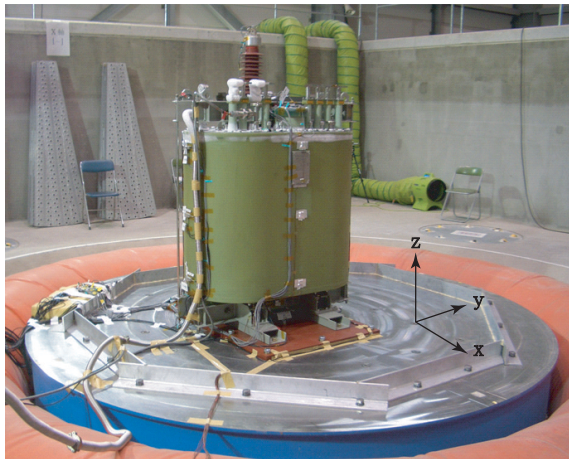


図1 超電導主変圧器（振動試験時）

設計検討時に想定した200A以上の特性はなく、設計容量の達成は難しい。また、製作費低減の観点から、4つある二次巻線のうちの1つには、構造、特性について評価するために以前に試作した従来の大気圧焼結法により製

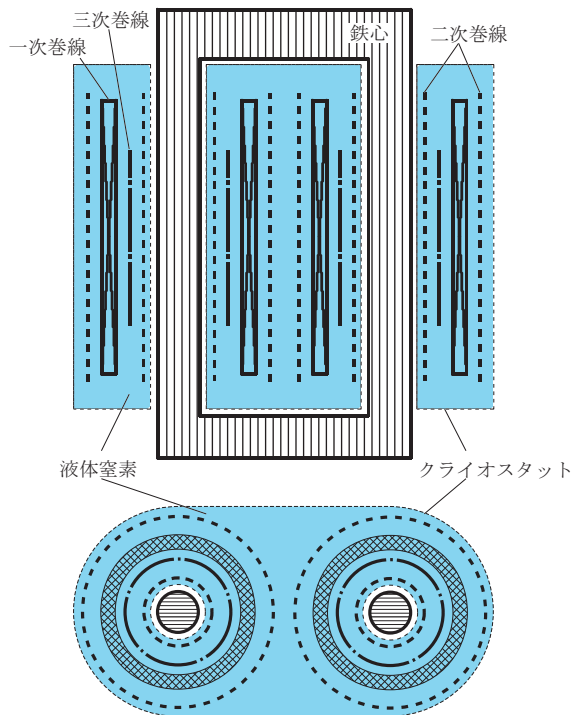


図2 超電導主変圧器の巻線構成

表2 超電導線および巻線の仕様

	超電導線				巻線		
	材質	断面	絶縁	並列数	定格電圧	定格電流 (設計)	巻数
一次巻線	Bi2223 Ag/Mn 合金母材	4.5mm × 0.27mm 以内	ポリイミドテープ	1	25kV	160A (2 コイル 並列接続)	125 ターン × 16 層 = 2000 ターン
二次巻線		4.3mm × 0.27mm 以内	PVF	8 重	1.2kV	750A × 4 コイル	96 ターン × 1 層 = 96 ターン
三次巻線							

作されたBi2223系超電導線の巻線⁵⁾を組み込んだため、臨界電流値が低く、容量はさらに制約される^{6) - 8)}。

超電導主変圧器の構造は、軽量化と効率向上のために従来の主変圧器のような外鉄型ではなく、二脚鉄心にソレノイド状の巻線を同心円上に配置する内鉄型の巻線構造とすることが、超電導線に印加する垂直方向磁界を低減できて有利であることが分かっている。

巻線配置は、リアクタンスマトリックスおよびパーセントインピーダンスを従来の主変圧器に合わせ、絶縁隔離などを考慮して検討した結果、図2のように各脚とも内側から「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た。

2.2 クライオスタット・冷凍機

クライオスタットは、内鉄型で鉄心を室温に配置するため、電磁気的な影響のないGFRP製真空容器のレーストラック状断面に、鉄心を通すための2個の穴を設ける複雑な形状である。熱絶縁のため、内槽と外槽の間に真空層を設け、その中に薄いアルミ膜を多数配置するマルチレイヤーインシュレーション構造とした。

冷凍機は、現状の線材の交流損失レベルに対応することを考えると5kW以上のものが becoming necessary, これでは超電導主変圧器としてのメリットが見出せない。超電導化のメリットを出し実用化されるときには1kW級の小型・軽量冷凍機を搭載する必要があるが、こうした仕様の小型冷凍機は費用、開発期間などの面から搭載が難しいと判断し、今回の試作では市販の80Kで200Wの冷凍能力をもつGM型冷凍機を搭載した。

2.3 寸法・重量

寸法は、幅1.2m、奥行き0.7m、高さ1.9m(圧縮機を除く)である。質量は、1.71t(液体窒素を含む、冷凍機、圧縮機を除く)で、製作時に行った詳細設計通りであった。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程度と推測され、詳細設計の見積もり通りに従来器より20%程度の軽量化が達成できる。

3. 電気的特性に関する試験

試作した超電導主変圧器の電気的特性に関する評価は、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実施項目、内容を変更した。なお、今回の試作では、2章で述べたように、搭載した冷凍機の冷却容量が小さい、高温超電導線の特性が設計検討の想定より低い、さらに二次巻線の1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た^{6) - 8)}。

3.1 巻線抵抗測定

JIS-E 5007で定められた常温での室温抵抗測定に加え、超電導主変圧器であることを考慮して、冷却温度77Kにおいて鉄心を取り外した状態で巻線毎に電流-電圧特性を測定した。

測定結果の一例として、二次巻線の1つにおける測定結果を図3に示す。各巻線とも単線の特性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は認められなかった。また、JIS-E 5007に準拠した一連の試験後に再度測定を行ったが、測定値に変化はなく、試験による劣化がないことも確認した。

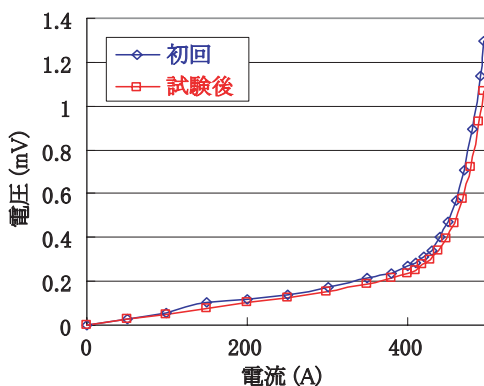


図3 電流-電圧特性

(巻線：二次-外側巻線 (S3-S4), 冷却温度：77K)

3.2 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た。無負荷試験時の励磁電流および損失の測定結果を図4に示す。一次巻線に定格電圧25kVを励磁したときの無負荷損失は0.71kWであった。

3.3 通電試験

JIS-E 5007では、独立した複数の二次巻線や三次巻線を有する主変圧器の損失測定の方法として、巻線毎に通電して損失を測定し、加算することで総損失を求めることになっている。しかし、超電導主変圧器においては、

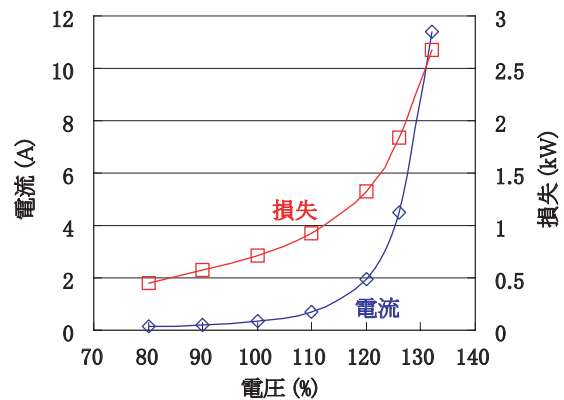


図4 無負荷試験結果

巻線毎の通電では巻線に印加する磁界分布が異なり、実際の損失を測定できない。そこで、いくつかの条件で損失測定を行うとともに、巻線部分の磁界分布と高温超電導線の磁界-交流損失特性をもとにした解析で評価した。

損失測定は、電源周波数60Hzにおいて、一次巻線を短絡し4つの二次巻線を直列に接続して500Armsまでの通電、加圧焼結法超電導線により巻かれた二次巻線を配置した片脚の2つの二次巻線のみを直列に接続して設計時の二次定格電流値である750Armsまでの通電などを行い、キャンセル法により損失を測定した。

加圧焼結法超電導線により巻かれた片脚の2つの二次巻線のみを直列接続して通電した結果を図5に示す。二次巻線の通電電流が650Armsまでは、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650Arms、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909Armsとすると、容量3.5MVA相当となる。このときの交流損失の解析値は、表3のように全交流損失が6.16kWとなり、効率は96.8%である。さらに、二次巻線に設計時の定格電流750Armsを通電すると抵抗分による損失が大きく増加

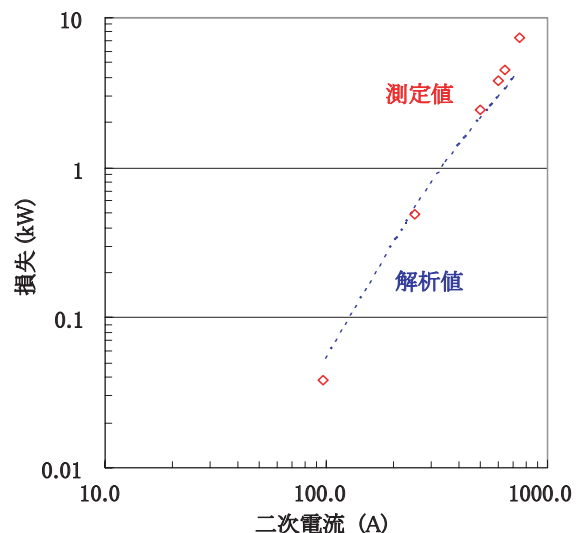


図5 交流損失特性 (冷却温度：66K)

特集：材料技術

表3 交流損失（容量：3.5MVA時）

	容量 (MVA)	電流 (Arms)	交流損失 (kW)
一次巻線	3.52	140.8	3.06
二次巻線	3.12	650×4	2.63
三次巻線	0.40	909	0.47

するものの、短時間の通電は可能であった。

3.4 耐電圧試験

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，冷却温度66Kにおいて以下の通り実施した。

(1) 商用周波耐電圧試験（50Hz）

一次巻線：4kV × 1分

二次巻線：10kV × 1分

三次巻線：4kV × 1分

他巻線，鉄心，フレーム等は接地

(2) 誘導耐電圧試験

一次巻線：開放

4つの二次巻線：直列

鉄心，フレーム等は接地

二次巻線側から一次巻線に42kVを10分間誘起

(3) 雷インパルス試験

電圧印加端子（一次ブッシング）以外接地

低減全波：75kVpeak & 全波：150kVpeak

すべての試験において，JIS-E 5007に定められた試験条件で，異常のないことを確認した。

4. 主回路組み合わせ試験

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以下の動作特性について確認した。

(1) 力行・ブレーキ試験

(2) セクション通過模擬試験

(3) 高調波測定試験

4.1 試験方法

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ーを使用した。超電導主変圧器の一次側に新幹線の架線電圧である定格電圧25kVを入力し，4つある二次側巻線のうちの1つに主変換装置，主電動機の負荷を接続した。その他の二次端子は開放とし，三次巻線は位相監視用に使用した。冷却は，減圧により液体窒素の温度を66K程度まで低下させて，冷凍機を運転してサブクール液体窒素温度

を保持した。

4.2 試験結果

試験結果の一例として，図6にセクション通過模擬試験時の波形を示す。

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。

セクション通過模擬試験では，力行およびだ行において一次側入力電圧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。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。

高調波測定試験では，二次側に主変換装置が接続された場合の高調波の影響を測定した。スペクトル解析の結果，三次高調波成分が最大で，一次巻線電流に10%程度，二次巻線電流に20%程度重畳されていたが，騒音の増加，冷却特性への影響はほとんど見られなかった。

主回路組み合わせ試験の結果，超電導主変圧器が主回路に組み込まれても，従来の主変圧器と同様に主変換装置，主電動機の制御，駆動ができており，問題ないことを確認した。

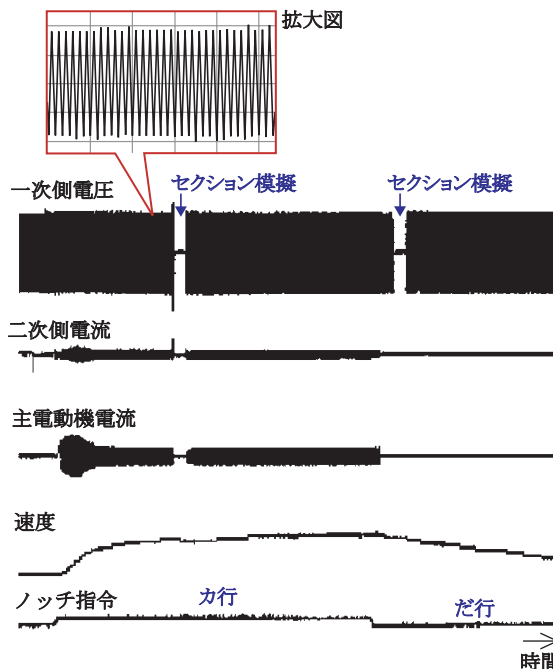


図6 セクション通過模擬試験結果

5. 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

る。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った。

5.1 試験条件, 方法

JIS-E 4031「鉄道車両部品の振動試験方法」で定められた以下の試験項目, 条件で実施した。なお, 試験条件は, 車種および取り付け部分別で分類されており, 今回試作した超電導主変圧器が床上設置で新幹線の車体に搭載する想定であるため, 旅客車の車体に取り付けられる部品を対象にした 1 種とした。

(1) 共振試験

部品の特定部分に対し共振の有無を調べ, その共振振動数を求める共振試験は, 振動数を連続的に上昇および下降させて共振振動数を同定する。1 種の試験条件は, 表 4 に示すように, 振動の大きさが低振動数範囲では全振幅を一定とし, 高振動数範囲では加速度全振幅を一定とする。

(2) 振動機能試験

振動を与えているときおよび振動を与えていないときの部品の機能を比較する振動機能試験は, 振動数を連続的に上昇および下降させて行うもので, 共振試験と併せて同時に行っても良いことになっており, 今回は共振試験と同時に行った。

(3) 振動耐久試験

振動に対する部品の耐久性を調べる耐久性試験では, 試験時間, 振動試験機的能力などにより, 試験条件が A から C 種までに分類されているが, 原則 B 種で実施することが規定されている。また, 共振がある場合とない場合により試験条件が分けられている。B 種では, 共振がない場合は, 振動数 10Hz, 全振幅 1.75mm (参考: 全加速度振幅 6.86m/s² {0.7G}) で, 試験時間として前後および左右方向が 2 時間, 上下方向が 4 時間の加振を行う。一方, 共振がある場合は, 共振振動数において, 全振幅 2.8a (2a: 表 4 に示す全振幅または共振振動数での加速度全振幅に対応) で試験時間として前後および左右方向が 0.5 時間, 上下方向が 1 時間の加振を行い, 引き続き共振がない場合の全振幅によって試験時間として前後および左右方向が 1.5 時間, 上下方向が 3.5 時間の加振を行う。

表 4 共振試験の条件

種類: 1 種	
振動数範囲 (Hz)	振動の大きさ
1 ~ 5 未満	全振幅 5mm
5 ~ 30	加速度全振幅 4.9m/s ² {0.5G}

試験は, 油圧サーボ式振動台を使用し, 図 1 のように直径 3.5m の加振台テーブルに超電導主変圧器の下部フレームをボルト締めすることで固定した。振動台の性能は, JIS-E 4031 の 1 種 B 種に準拠した試験が実施できる性能を有している。振動方向は, レーストラック型をした超電導主変圧器の短軸方向を X 軸, 長軸方向を Y 軸として, 前後および左右方向の試験条件を適用し, 上下方向を Z 軸と整理した。

振動の状況は, クライオスタット, 鉄心, ブッシング, フレームなど 16 箇所に加速度計を取り付け, 3 方向の加速度を測定した。また, 流量計による蒸発量や液面計による液面高さの測定に加え, 異常時などの監視用にクライオスタットおよび上部フランジの表面に熱電対を取り付けて温度を測定した。

冷却温度は, 大気圧液体窒素による冷却の 77K とし, 冷凍機は振動対策が施されていないため, 取り外した状態で試験を実施した。

5.2 試験結果

共振試験および振動耐久性試験の結果をまとめると, 以下の通りである。

(1) 共振試験

測定した振動波形からフーリエスペクトルを求め, スペクトルのピークから共振振動数を同定した。

各加振方向に対する共振振動数は, X 軸方向の加振で 10Hz, Y 軸方向の加振で 13Hz 付近に共振振動数が見られたが, Z 軸方向の加振に関しては 30Hz 以下に共振振動数は見られなかった。

(2) 振動耐久試験

共振試験結果をもとに, X 軸および Y 軸方向については, 共振振動数の 10Hz および 13Hz において 0.5 時間の加振後, 引き続き 10Hz においての 1.5 時間の加振を行った。一方, 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ため, 10Hz において 4 時間の加振を連続して行った。

超電導主変圧器の状態は, 加振開始 1 分後に測定した振動波形データを基準に, 振動時間の中間および終了 1 分前に測定した振動波形データの応答比を算出して変動を比較することで評価した。

測定結果の一例として, Z 軸方向の振動耐久性試験における鉄心上部, ブッシング先端, クライオスタット側面中央, 下部フレームおよび振動台テーブルの応答比を図 7 に示す。各部位とも応答比の変化は最大でも 1.5 以下程度に収まっており, 大きな変化は見られない。Z 軸方向以外の X 軸および Y 軸方向の振動耐久性試験においても, 図 7 と同様に応答比に大きな変化はなかった。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たが, クライオス

特集：材料技術

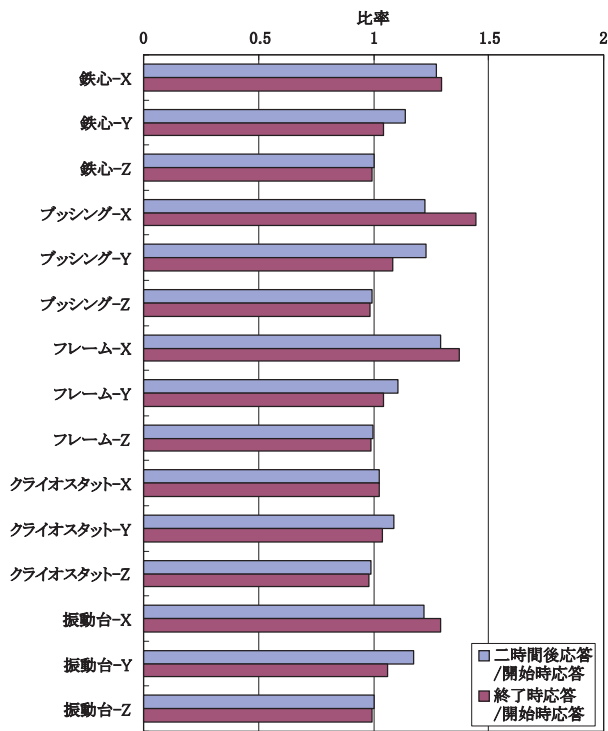


図7 振動耐久性試験結果

タット、巻線などに破壊などの大きな問題は見られなかったことから、今回試作した超電導主変圧器がJIS-E 4031に定められた振動耐久性を有していると考えられる。

6. まとめ

試作した超電導主変圧器について、各種の評価試験を実施した結果、以下のような知見が得られた。

電気的な特性を確認するため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た試験を行い、通電特性や耐電圧特性などについて確認した。

主回路に組み込まれた場合を想定した主回路組み合わせ試験により、負荷側に主変換装置、主電動機が接続された場合の特性を確認した結果、超電導主変圧器が主回路に組み込まれても、従来の主変圧器と同様に主変換装置、主電動機の制御、駆動ができており、問題ないことを確認した。

振動特性を確認するため加振台を用いて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、共振振動数を確認するとともに、振動耐久性についても一部ネジのゆるみなどが見られたが、クライオスタット、巻線などに破壊などの大きな問題はないことを確認した。

なお、本研究は国土交通省からの補助金を受けて実施した。

謝辞

本研究にあたり、ご指導いただいた九州大学 船木和夫教授、岩熊成卓准教授、ご協力いただいた富士電機システムズ株式会社、富士電機アドバンステクノロジー株式会社、大陽日酸株式会社の関係者の皆様に謝意を表します。

文献

- 1) H. Hata, H. Kamijo, H. Fujimoto, K. Matsumura, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Study of superconducting transformer for shinkansen rolling stock," *Railway traction systems conference, Italy*, pp. 87-98, 2001.
- 2) 上條弘貴, 秦広, 藤本浩之, 坊野敬昭, 井上亮二, 伊賀吾朗, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用4MVA高温超電導主変圧器の設計, 電気学会静止器/超電導応用電力機器/リニアドライブ合同研究会資料, SA-03-30/ASC-03-13/LD-03-13, 2003
- 3) 上條弘貴, 秦広, 藤本浩之, 坊野敬昭, 山田尚生, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用超電導変圧器のモデル巻線, 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-02-57, 2002
- 4) H. Kamijo, H. Fujimoto, H. Hata, T. Bohno, K. Sakaki, H. Yamada, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Fabrication of winding model of high-Tc superconducting transformer for railway rolling stock," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 13, No. 2, pp. 2337-2340, 2003.
- 5) H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, K. Ikeda, T. Herai, K. Sakaki, H. Yamada, Y. Sanuki, S. Yoshida, Y. Kamioka, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Fabrication of Inner Secondary Winding of High-TC Superconducting Traction Transformer for Railway Rolling Stock," *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 15, No. 2, pp. 1875-1878, 2005.
- 6) 秦広, 上條弘貴, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也, 岩熊成卓, 船木和夫, 山田尚生, 上森賢悦, 吉田茂: 車両用超電導主変圧器の試作, 鉄道総研報告, 第19巻, 第5号, pp.5-10, 2005
- 7) 上條弘貴, 秦広, 藤本浩之, 長嶋賢, 池田和也, 讃岐育孝, 富岡章, 山田尚生, 上森賢悦, 吉田茂, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用超電導主変圧器の試作と試験, 平成17年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.47-11~12, 2005
- 8) 上條弘貴, 秦広, 池田和也, 福本祐介, 讃岐育孝, 富岡章, 山田尚生, 上森賢悦, 岩熊成卓, 船木和夫: 鉄道車両用超電導主変圧器の試験, 電気学会超電導応用電力機器研究会資料, ASC-06-38, 2006