

日本国有鉄道・新幹線962形電車用主変圧器

Traction Transformer for the Type 962 Electric Railcar for Shinkansen Network of JNR

佐藤 洋* Hiroshi Satoh・小野春雄** Haruo Ono・岩上守彦** Morihiko Iwagami

元起 巖*** Iwao Motoki・増田雄彦*** Takehiko Masuda

I. まえがき

日本国有鉄道では新しい新幹線を目指して、962形電車6両を設計製作し、東北新幹線・小山試験線（久喜－石橋間）において試運転を開始した。

962形電車は、山間多雪地帯の走行を想定した耐寒耐雪対策を初めとして、騒音低減、高調波電流低減など、種々の対策に革新技術が盛り込まれた車両である。

962形電車用TM200X形主変圧器は、これらの諸条件を十分配慮するとともに、先の961形電車用TM920形主変圧器の実績を踏まえて、シリコン油入ポリアミド絶縁システムを採用し、更に絶縁・冷却面の改善及び軽量化構造、保守取扱いなど、全面的な見直しを行って設計製作されたものである。

このたび当社は、初めて搭載用の本主変圧器を国鉄製の御指導の下に製作し、形式試験、実負荷試験などで良好な結果を得て納入することができた。

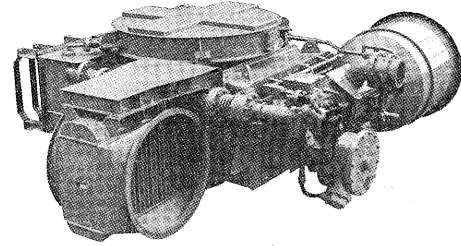
以下、本主変圧器の概要について報告する。

TM202X形主変圧器の外観を第1図に示す。

II. 仕様及び特長

本器の主な仕様を第1表に示す。

本器は、前述の962形電車の設計思想に基づき、性能、



第1図 TM202X形主変圧器

Fig. 1. TM202X traction transformer

構造のほか、今回採用した新技術など、次のような特長を有している。

1. 低Jp形の巻線構成の採用

誘導障害をもたらす一次高調波電流を低減するため、二次巻線を6不等分割し、各巻線間相互のリアクタンス結合を等価妨害電流(Jp)が最小となる巻線配置としている。設計段階での高調波電流、Jpの推定には、精度の高いリアクタンスマトリクス法による電算機解析法を開発適用した。

2. 静電しゃへい板の設置

高圧巻線間に静電しゃへい板を設置し、低圧側へのサージ移行電圧の低減を図っている。

3. 耐寒耐雪構造の強化

961形電車と同様に、電気機器は床下にボディマウントされており、かつ床下機器下面は防雪のため鉄製ふさぎ板で全閉されている。したがって、冬季は電気機器の耐寒性が要求され、夏季は電気機器自身の熱放散で床下機器室温度が上昇することが予想される。特に発生熱量の大きい主変圧器は、表面温度を低く抑えるよう配慮した。同時に、熱影響を受ける周辺部材は耐熱上の見直しを行った。

また、電気機器全般の熱ふく射抑制のため、床下機器塗装色は従来の黒色から灰色に変更された。

4. 軽量化の徹底

本器は耐雪構造、Jp低減対策などによる重量増加の要素があるが、電気装荷、磁気装荷の配分、タンク、中身及びびぎ装配線を考慮した引出端子位置、付属部品など総合的に徹底した軽量化対策が施されている。主な軽量化

第1表 TM202X形主変圧器仕様

Table 1. Specifications of TM202X traction transformer

項目	仕様			
形式	TM202X			
方式	外鉄形、シリコン油無圧密封式、送油風冷式			
絶縁種別	特別A種（ポリアミド絶縁）			
定格事項	1φ、50Hz、連続定格			
	一次	二次	三次	
容量	2,350kVA	2,100kVA	250kVA	
電圧	25,000V	2,590V(259V×2; 518V×4)	370V	
電流	94A	810A	676A	
絶縁階級 (車両用号)	一次線路側	一次接地側	二次側	三次側
	30	1	3	1
温度上昇限度	(ただし、一次線路側 AC 耐電圧 42kV, 10分間)			
	巻線 125℃(抵抗法) 油 85℃(温度計法)			
重量	3,090kg			

* 輸送特機事業部 技術部 ** 千葉工場 設計部 *** 中央研究所 第二部

項目は次のとおりである。

- (1) コンサベータベローズを従来の2個から1個へ低減、及び点検の容易化
- (2) 低圧側ブッシングに一体注型エポキシ端子板の採用による軽量化、構造の単純化
- (3) 巻線内冷却ダクトの合理的配置による冷却性能の改善
- (4) 内部配線の合理的縮小による油量低減

5. ぎ装, 点検

電動油ポンプ, 電動送風機を単独に着脱可能な構造とするとともに, 各継電器, 保護装置類を車端側へ集中し, 点検作業の容易化が図られている。

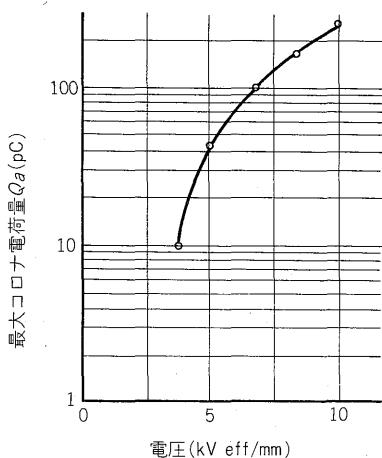
III. 絶縁構成

本器の主要巻線絶縁材料は, 油浸性の優れた#411アラミッド紙を用いている。

シリコン油浸ポリアミド絶縁システムについては, TM920形社内試作器で油浸性の優れた材料を開発適用し, 鉱油入プレスボード絶縁システムと同等の絶縁特性で, コロナフリーが実現できることを確認報告している^{(3),(4)}。

一般に高圧巻線端部は電界的に厳しくなるが, 電算機フィールドマッピングを行い, 最高電界を4kV/mmと十分低い値にしている。

一方, 車両運転時の巻線最高温度上昇を想定した高温時のコロナ特性は, 第2図のアラミッド紙単体特性から明らかなように, 実用上問題ないことが分かる。また, 前述のTM920形試作変圧器による高温時コロナ試験を行い, 100pC以下(at 250°C)であることを確認している。



第2図 アラミッド紙の高温コロナ特性
Fig. 2. Partial discharge characteristics of Aramid paper in high temperature silicone oil

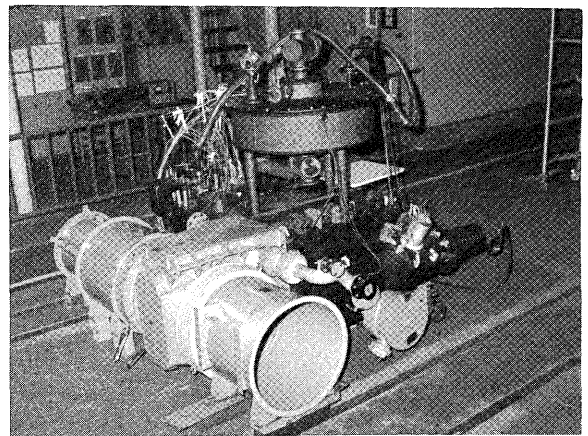
IV. 冷却

本器は可能な限り導体断面積を減じ, かつ鉄心窓内導

体占積率を向上させ, 軽量化を図っている。したがって, 巻線表面の冷却面積の確保及び局部的高温部(Hottest Point)の排除に対する配慮が重要である。

当社は基本計画段階において, 有限要素法による巻線主要部のマクロ的二次元油流分布の電算機解析, 及び油流可視法による油流分布測定を行い, 巻線冷却構造を決定した。更に万全を期すため, 実器と同一の供試変圧器を製作し, 巻線各部の温度上昇を把握するとともに, Hottest 温度が十分許容値内であることを確認した。

第3図に温度試験状況を示す。



第3図 TM 202X 形供試変圧器の温度試験
Fig. 3. Temperature rise test for traction transformer

V. 構造

本器は耐寒耐雪, 軽量, 保守性, 信頼性など十分配慮されており, 主な特長は次のとおりである。

1. 鉄心

鉄心は良質の方向性けい素鋼板を45°接合した矩形断面で, 車両の振動, 衝撃などによるたるみのない構造である。

2. 巻線

巻線は, アラミッド紙絶縁平角銅線の矩形成形コイルである。

二次コイルは特に転位渡り部, 口出部など, 短絡時の衝撃荷重に十分耐え得る構造である。

3. 中身組立

本器は鉄心, 巻線及びタンクが一体のいわゆるフォームフィット構造で, 巻線, 鉄心を下部タンクに組み立て, 上部タンクを挿入する。上下タンクは溶接接合されている。

タンクと巻線, 鉄心間はライナ, くさびにより十分強固に締め付けられており, 振動・衝撃に十分耐え得る構造である。

4. タンク

タンクは高張力鋼板を使用し, 軽量化を図っている。

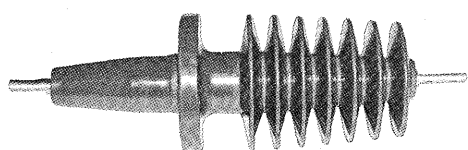
完成したタンクは水圧試験、ガス漏れ試験により十分な強度であることを確認している。

5. 主要付属品

1) 高压ブッシング

本器に適用した一次ブッシングを第4図に示す。主な仕様は次のとおりである。

- 定格 : 单相25kV, 200 A, 50/60 Hz
- 絶縁階級 : 車両用30号 (AC 70kV, インパルス175kV)
- 最高温度 : 140℃

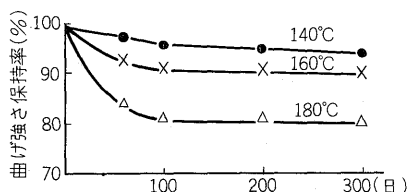


第4図 一次ブッシング
Fig. 4. HT epoxy resin molded bushing

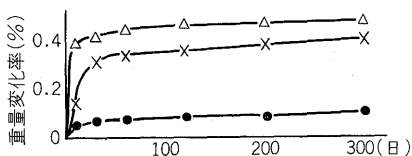
本ブッシングは、高温シリコン油中で使用され、かつ耐寒性の考慮も必要である。また当然、絶縁特性、耐振性など長期の運転に耐える十分な信頼性が必要である。

(1) エポキシ注型樹脂の耐熱性

本器のブッシングは耐熱耐寒性に優れ、強じんてなければならない。第5図に使用最高温度以上の条件によるシリコン油中における樹脂特性を示す。



(a) 曲げ強さ保持率



(b) 重量変化率

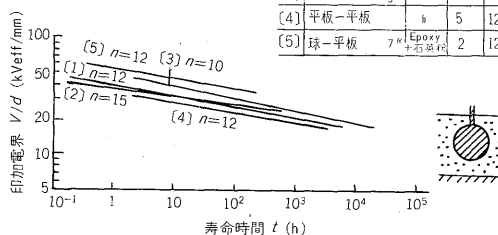
第5図 シリコン油中浸漬エポキシ樹脂特性
Fig. 5. Characteristics of epoxy resin mold immersed in silicone oil

注型樹脂の強度は140℃、300日で曲げ強さ保持率93.8%であり、重量変化もほとんどなく、樹脂特性は非常に良好な結果を示している。一方、樹脂を浸漬したシリコン油の諸特性もほとんど変化なく、樹脂材料がシリコン油の性状に影響を与えないことが確認できた。

(2) ブッシングの構造

外観は第4図のように一括注型単一形ブッシングであ

記号	電極	材料	d(mm)	n
(1)	半球棒-平板	50φ Epoxy 25φ 右左板	2.7	12
(2)	円筒-平板	15φ Epoxy	3	15
(3)	半球棒-平板	10φ 5φ	1	10
(4)	平板-平板	h	5	12
(5)	球-平板	7φ Epoxy 右左板	2	12



第6図 空隙や著しい電界集中のない場合のV-t特性
Fig. 6. V-t characteristics of epoxy resin molds without void and field concentration

る。取付寸法の制約から、ブッシング保護カバーを含めた合理的電極配置について、電算機による同軸円筒三次元電界解析を行い最適形状、寸法を設定した。

一般のエポキシ樹脂 V-t特性は第6図のとおりで、8~10kV/mmで絶縁寿命は10年以上である。樹脂内及び外部の電位傾度は、十分な安全率を見込むとともに、電界集中の少ない各部形状として絶縁寿命信頼性を確保している。

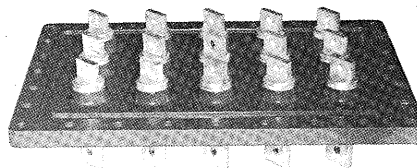
(3) 無コロナ構造

中心導体と樹脂との密着性を上げ、広い温度範囲の冷熱サイクルに耐える構造としている。

2) 低压端子板

低压端子板の外観を第7図に示す。主な仕様は次のとおりである。

- 定格 : 3kV, 1,000 A, 50/60 Hz
- 端子数 : 15
- 最高温度 : 140℃



第7図 低压端子板
Fig. 7. LT epoxy resin mold terminal plate

高压ブッシングと同様、車両運転条件、主変圧器使用条件が十分考慮されている。特に大形の注型品であるため、各端子に加わる荷重、タンク内圧に対する強度、油密性などに注意を払い製作した。

(1) エポキシ注型樹脂

樹脂の諸特性は、前述の高压ブッシングと同等に優れている。

(2) 注型

多端子構造端子板の製作には、高度の注型技術と管理が必要である。当社は従来から蓄積してきた多端子注型

技術及び今般の注型条件を十分に検討し、取付面平滑度、機械的強度が十分得られる注型法により製作した。

3) オイルクーラ

全アルミ合金製の冷却性能の優れたコルゲートフィンクーラを採用し、冷却風入口側接続風道内に整風格子を設け、冷却性能の低下を防止している。

4) 電動油ポンプ

国鉄で実績のある軸方向空隙形油ポンプで、パッキンなどの改良により耐寒性を向上させている。

5) 風道

風入口・出口風道、接続風道は金属製に統一されており、耐寒耐雪、不燃化及び保守作業性の向上が図られている。

VI. 乾燥, 油処理

シリコン油中に水分が多い場合、アラミッド絶縁紙の熱劣化が促進され、更にシリコン油自身の絶縁特性の低下を招くことになり、中身本体の乾燥、シリコン油の脱気脱水はもちろん、シリコン油注入前の特性検査など十分に注意を払った。特に今回は、注油後の特性変化の把握及び今後の採油検査時の比較データを得るために、出荷直前の封入油特性調査及びガス分析を行い、異常のないことを確認し万全を期した。

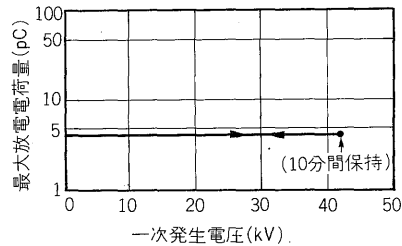
VII. 形式及び特殊試験

1. TM 202 X 形変圧器

本器は国鉄規格、その他関連規格に基づき試験を実施し良好な結果を得た。主な試験項目を第2表に示す。

第2表 TM202 X 形主変圧器の主な試験項目
Table 2. Testing items of traction transformer

形式試験	特殊試験
(1) 巻線抵抗測定	(1) 騒音試験
(2) 極性試験	(2) 振動試験
(3) 変圧比試験	(3) サージ移行電圧試験
(4) 絶縁抵抗測定	(4) 励磁突流試験
(5) 誘電体損失, 静電容量測定	(5) 特殊温度上昇試験
(6) 絶縁耐力試験 { 加圧試験 誘導試験 インパルス試験	(6) 特殊冷却試験
	(7) 流動帯電試験
	(8) 短絡強度試験
(7) 部分放電試験	
(8) 無負荷試験	
(9) インピーダンス試験	
(10) 温度上昇試験	
(11) 冷却特性試験	
(12) 補機試験	
(13) 構造検査	
(14) 油密試験	



第8図 主変圧器の部分放電特性
Fig. 8. Partial discharge characteristics of traction transformer

1) 絶縁耐力試験及び部分放電試験

一次巻線は誘導加圧法により42kV 10分間加圧し、全く異常のないことを確認し、同時に部分放電試験を実施した。第8図に部分放電特性を示す。最大部分放電電荷量は、加圧試験電圧42kVまで5pC以下と極めて優れた絶縁特性を有していることがわかる。

2) 雷インパルス試験

一次巻線接地側及び他の巻線を接地し、線路側ブッシングに標準波 $1 \times 40 \mu s$ 175kV、さい断波200kVを印加し、いずれも問題のないことを確認した。

3) リアクタンス及び抵抗測定

車両運転特性に影響するリアクタンス及び実効抵抗値は、許容範囲内にあり計画を満足した。

4) 温度上昇試験

冷却装置を定格運転して温度上昇を測定し、巻線、油とも規格値に対して十分余裕があることを確認した。

5) 騒音試験

油ポンプ、電動送風機を運転し、定格電圧、定格周波数で無負荷励磁の状態での騒音は従来より大幅に低減されていることを確認した。

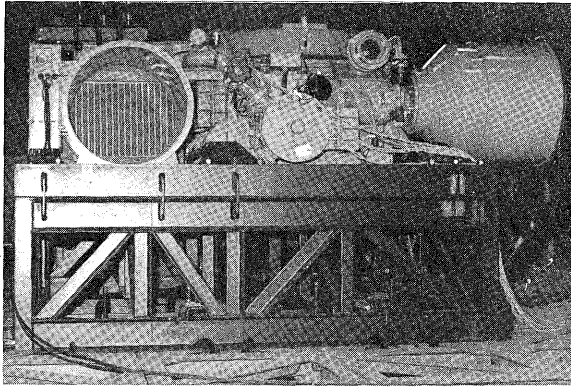
6) 振動試験

主回路の電源である主変圧器は、車両振動、衝撃に対していかなる不具合も生じてはならない。機器の耐振性は、機器はり、及びこれを取り付ける車体を含む振動系として取り扱うべきであるが、同一条件で試験を行うことは不可能に近い。

当社は過去にTM917形・TM920形主変圧器を試作し、振動試験を実施し、耐振性に関する検討を行ってきたが、今回はこれらの実績を踏まえ、主変圧器を機器はりに取り付けた状態で試験を実施した。第9図に試験状況を示す。

試験においては、機器はりの振動モードの調査、機器はりを基準とした共振特性、応力特性について本体固定用金具、重量物付属品の取付金具などの溶接部を重点に測定した。

試験の結果、通常の車体振動周波数領域に対しては、共振倍率、発生応力とも許容値に対し余裕があり、振動



第9図 振動試験状況
Fig. 9. Vibration test of traction transformer

耐久試験においても満足すべき結果を得た。

(1) 共振試験

第9図の試験装置により、車両進行方向、車幅方向、車両上下方向の三方向について実施した。

新幹線電車走行時の振動周波数は10 Hz 前後といわれているが、主変圧器及び付属品の共振点は十分大きな値で全く問題ないといえる。

(2) 応力測定

動ひずみ計により各部の動的発生応力を測定した。

通常の車両振動領域での応力値は、使用鋼材の動的応力許容限度に対して十分余裕があることを確認した。

(3) 振動耐久試験

主変圧器の固有振動周波数において加振した後、加圧試験にて異常のないことを確認した。

これらの試験結果から、主変圧器は車両振動に対して十分な耐振性を有することが確認できた。

7) サージ試験

一次巻線にサージが侵入した場合の主変圧器各巻線に発生する電位(差)を検証するため、主変圧器及びRS 202 X形主シリコン制御整流装置を接続し、サージアナライザ試験を行った。

各巻線端子に発生する対地電位、端子間電位差に対して、本変圧器が十分な絶縁強度を有することを確認した。

またVCBの投入・しゃ断時に発生する多重サージによるノイズの影響については、主変圧器内及び主整流器回路などの異常は全く認められなかった。

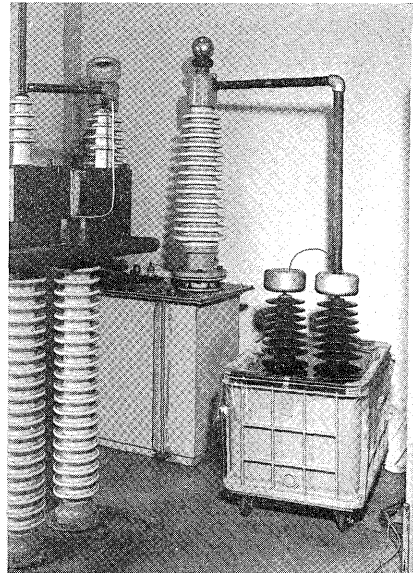
2. エポキシブッシング

高圧ブッシング及び低圧端子板について、形式・特殊試験を行い、良好な結果を得た。以下、主な試験項目について述べる。

1) 部分放電試験

ブッシングの良否の判定基準の一つである部分放電特性を、冷熱、振動、長期課電の各試験後に測定した。いずれもコロナの発生は認められなかった。

2) 長期課電試験



第10図 高圧ブッシングの長期課電試験状況
Fig. 10. Life test of HT bushing

交流50kVを印加した。3,000時間までのコロナ電荷量は0.7pC以下で、試験前後の変化はなく、エポキシ樹脂のV-t特性から推定すると、車両耐用期間を十分超えたコロナなしの寿命を有するといえる。第10図に試験状況を示す。

3) 汚損試験

等価汚損付着物を塗布、RH 98%の恒温槽中で交流を印加してせん絡電圧を測定した。

高圧ブッシング、低圧端子板ともに基準値以上までせん絡に至らず、十分余裕があることを確認した。

4) ヒートサイクル及びヒートショック試験

車両の運転条件を考慮した温度条件で実施し、割れ、気密異常、コロナ変化など全くなく、耐寒・耐熱性が極めて優れていることを確認した。

5) 低圧端子板の温度上昇試験

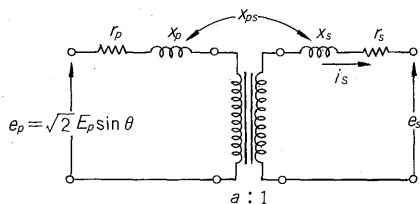
低圧端子板は、外部が保護カバーで覆われ、更に車両床下の周囲温度の影響を受けるため、実装を模擬して、冷却油を循環しながら温度上昇試験を行い、ブッシング各部が許容温度を超えることがないことを確認した。

その他、高低温における振動試験、乾燥せん絡電圧試験、雷インパルス試験、機械的強度試験などを実施し、全く異常のないことを確認した。更に各ブッシングの長期加熱試験を継続中で、現在まで良好な経過を示している。

(5)~(7)

VIII. リアクタンスマトリクス

二巻線変圧器の等価回路は、第11図のように理想変圧器を介して一次と二次が漏れリアクタンスによって結合していると考えられることができる。したがって二次電圧と二次電流の関係は、次式で表すことができる。



第11図 二巻線変圧器等価回路

Fig. 11. Equivalent circuit of transformer with 2 windings

$$e_s = \frac{\sqrt{2} E_p \sin \theta}{a} - \left(\frac{x_p - 2ax_{ps}}{a^2} + x_s \right) \frac{di_s}{d\theta} - \left(\frac{r_p}{a^2} + r_s \right) i_s \dots\dots\dots(1)$$

これを今般の車両用主変圧器のような二次多分割変圧器に拡張すると、式(2)が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ \vdots \\ e_{sn} \end{bmatrix} = \sqrt{2} E_p \sin \theta \begin{bmatrix} 1/a_1 \\ \vdots \\ 1/a_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{11} \cdots X_{1n} \\ \vdots \\ X_{n1} \cdots X_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} di_{s1}/d\theta \\ \vdots \\ di_{sn}/d\theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{11} \cdots R_{1n} \\ \vdots \\ R_{n1} \cdots R_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{s1} \\ \vdots \\ i_{sn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $a_i = n_p / n_{si}$ (n_p : 一次巻数, n_{si} : 二次 i 巻線巻数)

$$X_{ij} = \frac{x_p - a_i x_{psi} - a_j x_{psj}}{a_i a_j} + x_{sij}$$

$$R_{ii} = \frac{r_p}{a_i^2} + r_{si}, \quad R_{ij} = \frac{r_p}{a_i a_j}$$

式(2)のリアクタンス X_{ij} を要素としたマトリクスをリアクタンスマトリクスと称する。今般の TM202X 形主変圧器では、巻線配置とその巻線番号に対応したリアクタンスマトリクスが、式(3)として得られる。

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{16} & X_{17} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{26} & X_{27} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ X_{61} & X_{62} & \cdots & X_{66} & X_{67} \\ X_{71} & X_{72} & \cdots & X_{76} & X_{77} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

このマトリクスを用いて整流器を含む回路動作解析を行うことにより、多巻線変圧器における複雑な挙動が正確に把握でき、誘導障害低減のための適切な巻線配置、定数が検討された。今般の主変圧器は、この手法により、

サイリスタ整流器負荷用として大幅な誘導障害低減が図られている。

IX. あとがき

新幹線車両として多くの革新技術が盛り込まれた 962 形電車で用いた TM202X 形主変圧器を製作し、良好な試験結果を得て納入した。

当社は、国鉄における 951 形電車で用いた主変圧器の設計検討に参画する機会を得てから後、961 形電車及び今回の 962 形電車に至る中で、主変圧器の製作経験を積むと同時に、各車両の要求に基づいた設計、製造、試験などの技術確立及びシリコン油、絶縁材などの基礎研究、技術開発に努力してきた。当社初の搭載器である今般の TM202X 形主変圧器は、これらの成果を十分に反映するとともに、当社各部門の総力を結集して製作されたものである。更に本器における経験をもとに、今後の新しい計画に向けて、材料、構造などの技術改良はもちろん、新幹線車両としての新しいニーズに対応した技術開発、車両用シリコン油入絶縁システム技術向上になお一層努力する所存である。

終わりに、主変圧器の設計検討に機会を与えられ、長年にわたる御指導及び本器の設計・製作並びに各種試験にあたり終始御指導を賜った日本国有鉄道・車両設計事務所の関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 谷野：962 形新幹線電車完成，交通技術 No. 416 (昭54)
- (2) 柿沼：962 形試作電車，電気車の科学 32, No. 4 (昭54)
- (3) 小野ほか：シリコン油入車両用主変圧器の試作，富士時報 46, No. 10 (昭48)
- (4) 倉橋ほか：シリコン油入絶縁システム，富士時報 46, No. 10 (昭48)
- (5) 柿沼ほか：交流電車で用いた多巻線変圧器の定数と等価妨害電流，昭53電気学会全国大会 No. 758
- (6) 柿沼ほか：電算機による車両用主変圧器二次多分割制御車のシミュレーション，鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム第15回 No. 501
- (7) 鉄道電化協会報告書 N 76-10 (昭和52年度)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。