三相 - 単相直接周波数変換のミニモデル試験

櫻井 潤* 岡井 政彦 (東海旅客鉄道) 齋藤 真 (芝浦工業大学)

Mini model test of Three to single phase power conversion Jun Sakurai^{*}, Masahiko Okai (Central Japan Railway Company) Makoto Saito (Shibaura Institute of Technology)

A matrix converter system has merits in efficiency and size compared with a conventional converter-inverter system. This paper deals with a mini-model test of the three to single phase matrix converter system. The results of the test, simulation results and the proposed circuit for large capacity converters are described in the present paper.

キーワード:周波数変換、大容量、マトリックスコンバータ、三相/単相変換

(Frequency conversion, High capacity, Matrix converter, Three to single phase power conversion.)

1. はじめに

電気鉄道においては、新幹線鉄道における 50-60Hz 変換 など、パワーエレクトロニクスを活用した電力変換装置が 多くの設備に採用されている。

今後、電気鉄道のさらなる発展を考えた時、電力変換装 置の省エネルギー化は、重要な開発項目の一つであり、そ の有力な技術として、交流を交流に直接変換するマトリッ クスコンバータが挙げられる。マトリックスコンバータは、 交流 - 交流の直接変換であることから、電流の通過素子数 の低減により、原理的には従来のコンバータ・インバータ 方式の半分の損失で電力変換を行うことが期待できる。ま た、交流を周波数の異なる交流に直接変換するので、従来 の直流部のコンデンサ相当が不要であることから、省スペ ース化と回路のシンプル構成が期待できる。

マトリックスコンバータの電気鉄道への適用として、こ れまでに、高圧配電線路への適用について検討を行い、導 入への可能性を確認した。⁽¹⁾ 今回は、新幹線のき電回路へ 導入した場合の技術的課題を抽出し、適用への可能性を検 討し、比較的小容量のミニモデル試験装置にて実証試験を 行った。また、マトリックスコンバータの多重化(大容量 化)構成について基本検討を行った。

2. 鉄道設備への適用検討

(1) 主回路構成の検討

マトリックスコンバータの適用による省エネルギー化を 想定して、三相-単相直接変換マトリックスコンバータの 主回路構成について検討を行った。

三相-単相直接変換の場合には、原理上は図 1 の主回路 構成でも三相-単相変換が可能である。しかし、マトリッ クスコンバータはエネルギー蓄積要素を持たないため、単 相負荷の有効電力の脈動はそのまま電源側に流出し、波形 歪みが発生することや、高調波電流の補償を行うためには、 装置本体と同程度の蓄積容量のアクティブフィルタが必要 となるため、装置の大型化、高コスト化、性能低下の可能 性がある。



図1 三相-単相直接変換回路の構成

そこで、新たな主回路構成について検討を行い、図 2 の 主回路構成を考案した。この回路は単相側の変動分を並列 に接続したコンデンサ等の蓄積媒体で吸収し、入力側の変 動を補償するものである。⁽²⁾



この主回路方式には、蓄積媒体の違いによりコンデンサ 方式とリアクトル方式の2種類が考えられる。リアクトル 方式では、リアクトルに電流を流すことにより、単相変換 による不平衡分を補償するものである。また、コンデンサ 方式はリアクトル方式のリアクトルをコンデンサに変更し た方式であり、単相変換による変動分をコンデンサで吸収 する方式である。

負荷条件として、単相側負荷電力を 25MW(出力力率=1) とし、単相側の電圧、電流および周波数を $V_0 = 30$ kV、 I_0 max = 833A、f=60Hz として検討した場合、リアクトル方式で は、必要なリアクトル容量 L_c は式(1)より 0.095 H となる。

$$L_C = \frac{V_0}{2\pi f \cdot I_0 \max} \cdot \cdot \cdot \vec{\mathbf{x}}(1)$$

そして、このリアクトルを用いた場合のリアクトル部分 の損失について計算を行った。使用するリアクトルのQ値 を 30 に仮定すると(一般的な 25MW のC I 方式で活用され ているリアクトルの性能値)、リアクトルの等価直列抵抗 r 」は式(2)より、1.19Ωとなる。

$$r_L = \frac{\omega L_C}{Q} \cdot \cdot \cdot \vec{x}(2)$$

リアクトルに流れる電流を Iomax に設計しているので、 リアクトルでの電力損失 W_Lは式(3)より、825kW となる。 従って、25MW の負荷を供給するのに補償リアクトル部分 で 1MW 近く損失が発生することになり、低損失化という マトリックスコンバータの特徴を活かすことができない。

$$W_L = (I_0 \max)^2 \cdot r_L \cdot \cdot \cdot \vec{x}(3)$$

次に、必要なコンデンサ容量の計算を行う。

コンデンサの両端の電圧を V_0 に設定すると、必要なコン デンサ容量 C_c は式(4)より、73.7 μ Fとなる。

$$C_C = \frac{I_0 \max}{2\pi f \cdot V_0} \cdot \cdot \cdot \vec{x}(4)$$

この結果から、本方式を採用すると、一般的な 25MW の C I 方式と比較して、コンデンサ容量を約 1/10 に低減する ことができる。

次に、リアクトルの場合と同様にコンデンサの部分の損 失について計算を行った。コンデンサの直列抵抗分に相当 する $\tan \delta \approx 0.1\%$ (新幹線のフィルタ用コンデンサの性能 値)に仮定すると、Cc の等価直列抵抗 r_c は式(5)より、0.036 Ωとなる。

$$r_{C} = \frac{\tan \delta}{\omega C_{C}} \cdot \cdot \cdot \vec{x}$$
(5)

また、コンデンサの電圧を Voとしているので、等価直列 抵抗分に流れる電流 Ic は式(6)より 832A であり、この時の コンデンサでの電力損失 Wc は式(7)より、25kW となる。

$$I_C = \omega C_C V_0 \cdot \cdot \cdot \exists (6)$$

$$W_{C} = I_{C}^{2} \cdot r_{L} \cdot \cdot \cdot \operatorname{t}(7)$$

これらの結果から、損失の面や蓄積媒体の寸法の面では、 コンデンサ方式が有利であると考えられる。

ただし、コンデンサ方式では双方向スイッチの投入時に 過渡電流の変化が大きく、その抑制制御が必要となるが、 リアクトル方式の場合はリアクトル自身が過渡的な電流変 動を抑制する動作を行う。そのため、制御の面では、リア クトル方式の方が比較的容易である。

今後、コンデンサ方式では、過渡電流を抑制できる高速 スイッチングの開発が、リアクトル方式では、小型化・低 損失化が進めば適用可能性が高まると考えられる。

ミニモデル試験による三相一単相直接変換の 検証

〈3・1〉 ミニモデル試験装置の主回路構成

変動補償の蓄積媒体としてコンデンサを用いた、三相-単相直接変換マトリックスコンバータについて、三相-単 相直接変換が可能であることの検討を行った。

ミニモデル試験装置の主回路構成を図 3 に示す。また、 ミニモデル試験装置の諸量を表 1 に示す。本装置では、単 相の脈動分を補償するコンデンサの容量を 200 µ F とした。 なお、入出力側のフィルタについては、高調波抑制の最適 設計は実施できていない。今後、各種諸量の最適化を行う 予定である。



図3 ミニモデル試験装置の主回路構成

表1 ミニモデル試験装置の諸量

パラメータ		記号	値
電源側 LC フィルタ	リアクトル	Lfs	1mH/35A
	コンデンサ	Cfs	20 µ F
負荷側 LC フィルタ	リアクトル	Lf	1mH/50A
	コンデンサ	Cf	50 µ F
変動補償用コンデンサ		Cc	200 µ F
マトリックスコンバータキャリア周波数		Fs	10kHz

第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010)

〈3・2〉 ミニモデル試験

三相-単相直接変換した場合の電源側の三相電圧 (rs 間 の線間電圧 Vrs)、電流の変化を図5に示す。図5より、電 源電流は三相正弦波化されていることがわかる。ただし、 入力フィルタの共振により、電流波形に歪みが発生してい る。これは、マトリックスコンバータに共振を抑制する制 御ループを付加していないことや、電源電圧の降圧化のた め、スライダックを用いたため、電源側のリアクタンス成 分が大きく、共振が生じやすくなっていたことが原因と考 えられる。

この電源電流の波形歪みの抑制は、三相-単相直接変換 の適用にあたって、大きな検討課題となる。出力側の単相 電圧・電流の波形を図 6 に示す。出力電圧は、歪みが残る ものの、正弦波化されている。また、負荷電流も正弦波化 されている。負荷は RL 負荷 (R=10Ω、L=5mH) である。 出力電圧の歪みの原因は、電源側 LC フィルタ共振によりフ ィルタコンデンサが振動している点、マトリックスコンバ ータの PWM パターンおよび転流シーケンスによる出力誤 差が考えられる。

今回のミニモデル試験により、三相-単相直接変換は可 能であるが、実設備への適用にあたっては、電源電流に波 形歪みが発生する等、検討課題が多いことがわかった。





図6 出力電圧·電流波形

〈3・3〉 三相一単相直接変換による波形改善

ミニモデル試験装置における波形改善のため、以下の対策 を実施した。対策実施後のミニモデル試験装置の各諸量を 表2に示す。

- ・入出力 LC フィルタの再設計と組みなおし
- ・変動補償用コンデンサの再設計と組みなおし
- ・過電流保護回路の追加
- ・PWM パターン生成および転流アルゴリズムの見直し
- 波形改善後のミニモデル試験の結果を図7、8に示す。LC

フィルタ定数の再設計、PWM パターンおよび転流シーケン ス実装アルゴリズムの再構築、LCフィルタ共振抑制アルゴ リズムの追加により、電源電流の振動が大幅に抑えられ、 出力電圧・電流波形の改善も図れた。ただし、電源電流波 形には波形歪みが残留しており、今後も改善に向けて取り 組む必要があると考えている。

表 2	ミニモデル	試験装置の諸量	(対策前後)

バラメ	-9	記号	対策前	対策後
電源側 LC フィルタ	源側LCフィルタ リアクトル Lfs	Lfs	1mH/35A	1mH/35A
	コンデンサ	Cfs	20 µ F	10 µ F
負荷側 LC フィルタ	リアクトル	Lf	1mH/50A	1mH/30A
	コンデンサ	Cf	50 μ F	15 µ F
変動補償用コンデンサ		Cc	500 μ F	200 µ F
マトリックスコンバー	-9	Fs	13kHz	10kHz



凶8 田刀黾庄·龟爪孜形(以苦馁)

大容量三相-単相マトリックスコンバータの 検討

〈4・1〉 インダクタンス方式を用いた大容量化

将来的に新幹線や在来線を問わず、現実の鉄道電力回路 にマトリックスコンバータを適用するためには、大容量化 が課題である。三相/単相回路を単位コンバータとして、 これを多重化した大容量三相-単相マトリックスコンバー タの主回路構成案を図 9 に示す。図の点線内のマトリック スコンバータユニットをトランス多重と単位ユニットの直 列接続を行うことで大容量化(高電圧化、大電流化)を図 るものである。変動補償に使用する蓄積媒体については、 大容量化した場合に、ひげ状のスイッチングサージ電圧が コンデンサ回路にとって問題となる可能性があることか ら、今回はインダクタンス方式にて検討を行った。



図9 多重化した主回路構成案

〈4·2〉 動作原理

図 9 のインダクタンス回路は、三相側の有効電力脈動補 償と無効電力補償を担当する「アクティブフィルタ」とし て動作する。出力回路、インダクタンス回路に使用される マトリックスコンバータの制御は、それぞれ1台の仮想コ ンバータモデルで行い、この仮想モデルのゲート信号を回 路のゲート信号に変換してやることで、動作が可能となる。 図 10 に動作原理の概要図を説明する。



図10 動作原理の概要図

〈4・3〉 多重化の検証

大容量化の検証を行うため、三多重のマトリックスコン バータについて検証を行った。シミュレーション結果につ いて、電源側(50Hz)電圧電流波形例を図 11 に示す。高 調波はいずれもキャリア周波数に依存する側帯波であり、

第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010)

これについては、各段のキャリア周波数の位相ずらしと適切な LC フィルタの設計で除去は可能であると考える。図 11 の結果より、多重化した場合においても、適切なゲート 信号を制御することで、マトリックスコンバータとしての 有効動作が可能であると見込まれる。



4. まとめ

変動補償の蓄積媒体としてコンデンサを用いたマトリッ クスコンバータについて、ミニモデル試験装置で検証した。 また、大容量三相-単相マトリックスコンバータの構成を 提案し、シミュレーションにて検証を行った。

(1)鉄道設備への適用について検討を行い、蓄積媒体として、コンデンサ方式とリアクトル方式の2種類を検討した。
(2)変動補償の蓄積媒体としてコンデンサを用いた、マトリックスコンバータについて、ミニモデル試験で確認を行い、三相-単相直接変換が可能であることがわかった。各電流波形の歪みも入出力フィルタや変動補償用コンデンサの再設計、転流アルゴリズムの見直し、インダクタンス回路を使用したアクティブフィルタ等により改善できることが証明され、適切な制御回路設計を行うことで、三相-単相直接変換マトリックスコンバータが実現できることを証明した。

(3) 三相-単相直接変換方法マトリックスコンバータの大 容量化構成について提案し、シミュレーションにより、可 能性を証明した。

マトリックスコンバータは、大きな可能性を秘めている が、大容量化や不平衡負荷による波形歪みの発生等、検討 課題も多い。今後もこれらの検討課題解決と鉄道設備への 適用可能性について調査を継続していきたい。

文 献

(1)「マトリックスコンバータの高圧配電線路への適用に関する検討」電気学会全国大会、Ter 10·39、LD·10·28、2010年7月
 (2)齋藤:「リアクティブストレージ方式三相/単相マトリックスコンバータ」,平成20年電気学会産業応用部門大会,1・05・4 (2008年)