

モジュラー・マルチレベルコンバータ(MMC)を用いた 電気鉄道用パワーラインコンディショナの解析

An Analysis of the Active Power Quality Compensator using a Modular Multilevel Converter (MMC)

石倉 規雄**, アマラセーカラ オーシャダ***
Norio ISHIKURA, Oshadha AMARASEKARA

概要

日本における交流電気鉄道では、三相電力系統から受電し、スコット変圧器によって上りと下りの各方面に直交した二相の单相電力をき電している。しかしながら、電気車負荷はダイヤに従って加減速を繰り返すため系統が不平衡となる。さらに、サイリスタ位相制御車の場合、系統に対して無効電力および高調波電力を排出する。これらの影響を受けることにより、系統に接続される他の電機機器が電磁ノイズを受けて誤動作、故障する要因となる。この問題を解決するために、電気鉄道に対して並列にパワーラインコンディショナを接続する方法が提案されている。しかしながら、パワーラインコンディショナを構成する半導体スイッチを系統の高電圧(20kV あるいは 25kV)から保護するためにマッチングトランスが必要であり、体積と重量が増大する。そこで本研究では、MMC(Modular Multilevel Converter)を用いることでマッチングトランスが不要な、パワーラインコンディショナを提案している。本報告ではパワーエレクトロニクス用計算機シミュレータ(PSIM)を用いて、MMCを用いたパワーラインコンディショナの良好な動作を確認できたことを報告する。

1. 緒言

本研究の目的は、電気鉄道用の設備であるパワーラインコンディショナの小型・軽量化を提案することである。パワーラインコンディショナは、2000年代に国内で2箇所導入されており、電気鉄道用変電所へ順次導入が進むと考えられるが、変電所内の限られた空間へ設置するため、小型・軽量である必要がある。体積が大きくなる要因として、パワーラインコンディショナと電力系統を接続するためのマッチングトランスがある。本研究では、電気鉄道用パワーラインコンディショナとして新たな回路構成であるMMC(Modular Multilevel Converter)を用いて、マッチングトランスを必要としない小型・軽量の回路構成を提案する。

2. 従来の電気鉄道用パワーラインコンディショナと残された課題

図1に、実用化されている電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路構成図を示す。図1に示すように、電気車負荷と並列に、2組のフルブリッジインバータにより構成されるパワーラインコンディショナを接続する

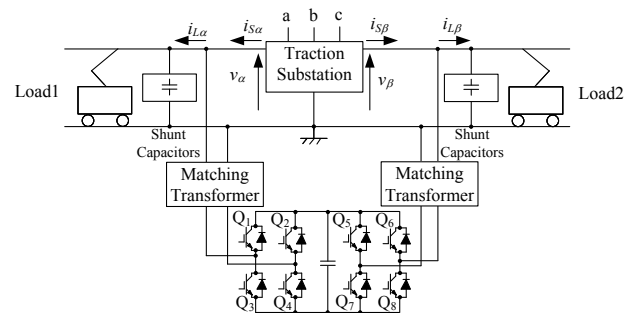


図1 実用化されている電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路構成図⁽¹⁾

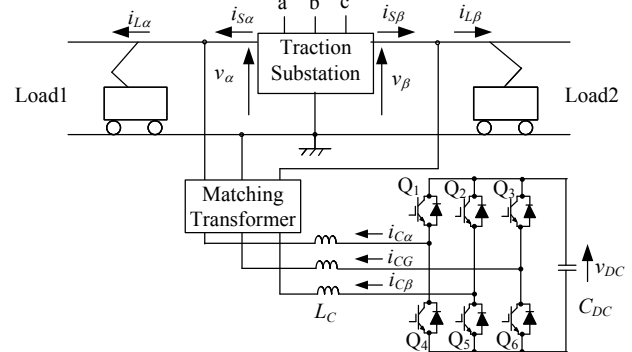


図2 3レグインバータを用いた電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路構成図⁽²⁾

* 原稿受理 平成25年12月6日

** 電気情報工学科

*** 電気情報工学科学生

ことで、二相交流の受電端における有効電流の不均衡分、無効電流、高調波電流が補償できることが明らかになっている⁽¹⁾。しかしながら、実用化されたパワーラインコンディショナは、構造上パワーデバイスの最低必要数が8となり、さらにマッチングトランスが必要となる。一方、3レグインバータを用いたパワーラインコンディショナが提案され、パワーデバイスの最低必要数を6へ低減できることが報告されているが、文献(1)と同様、マッチングトランスが必要となる⁽²⁾。

著者らは、これまでに3レグインバータを用いたパワーラインコンディショナの制御法について詳細に検討し、計算機シミュレーションと実験により、計算機負荷を低減する簡易な制御法、およびパワーラインコンディショナの容量を低減可能な制御法の有効性を示した⁽³⁾⁽⁴⁾。

一方、MMCを用いた変換器が提案され、マッチングトランスを用いることなく変換器を高耐圧化可能であることが明らかになっている⁽⁵⁾。ただし、これまでMMCは三相交流システムを対象としており、二相交流である電気鉄道システムに適用されていない。

そこで本研究では、MMCを電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路として用いることにより、電気鉄道の変電所におけるマッチングトランスが不要となり、パワーラインコンディショナの体積を低減できることを提案する。

3. MMC(Modular Multilevel Converter) を用いた電気鉄道用パワーラインコンディショナ

3.1 主回路構成

図3に、MMCを用いた電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路構成を示す。三相側から受電し、□相と□相の直交した二相交流に変換した後、上りと下りの各電気車負荷へ電力を供給する。電気車負荷は無効電流を系統へ放出する不平衡な電流源とした。電流の不均衡分と無効電力を補償するためにMMCを用いたパワーラインコンディショナを負荷に並列接続する。MMCの主回路は、チョップパセルとバッファリアクトルによって構成され、各チョップパセルは直流キャパシタと二組の半導体スイッチ(IGBT)から構成されている二端子回路である。ただし、本報告におけるチョップパセルの直流キャパシタの制御電圧は150Vとした。

3.2 チョップパセルにおける直流電圧一定制御

MMCの出力電流を制御するため、また、チョップパセルの異常電圧を防ぐためにチョップパセルの直流キャパシタ電圧を制御する必要がある。MMCのチョップパセルの

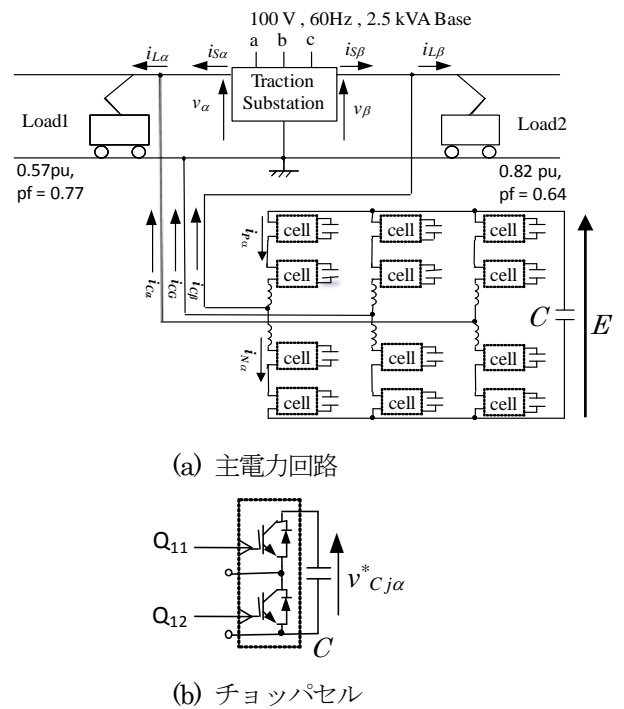


図3 MMCを用いた電気鉄道用パワーラインコンディショナの主回路構成図

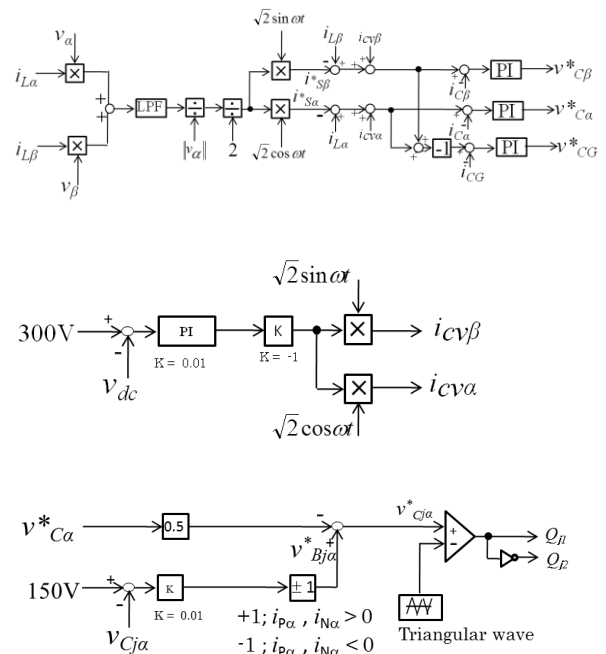


図4 キャパシタの直流電圧制御ブロック図

直流キャパシタ電圧一定制御法として、平均値制御 (Averaging control) 法とバランス制御(Balancing control) 法が提案されている⁶⁾。本報告では、バランス制御法のみを用いて MMC の直流キャパシタ電圧を制御する。

図 4に、直流キャパシタ電圧一定制御のブロック図を示す。このとき、電源電流の指令値 $i_{s\alpha}^*$, $i_{s\beta}^*$ は、各相の負荷電流に含まれる有効電流の和を半分ずつ分担させた値となるため、

$$i_{s\alpha}^* = \frac{\sqrt{2}}{2\|v_a\|} \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_\alpha \cdot i_{L\alpha} dt \right) \cos \omega t$$

$$i_{s\beta}^* = \frac{\sqrt{2}}{2\|v_\beta\|} \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_\beta \cdot i_{L\beta} dt \right) \sin \omega t$$

ただし、

$$\|v_a\| = \|v_\beta\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_\alpha^2 dt}$$

となる。チョップセルの直流キャパシタ電圧一定制御に必要な有効電流を $i_{Cv\alpha}^*$, $i_{Cv\beta}^*$ とすれば、補償電流の指令値 $i_{C\alpha}^*$, $i_{C\beta}^*$, i_{CG}^* は

$$i_{C\alpha}^* = i_{L\alpha} - i_{s\alpha}^* + i_{Cv\alpha}^*$$

$$i_{C\beta}^* = i_{L\beta} - i_{s\beta}^* + i_{Cv\beta}^*$$

$$i_{CG}^* = -(i_{C\alpha}^* + i_{C\beta}^*)$$

となる。

α 相と β 相の制御法は、位相が 90° 異なること以外は同じであるため、本報告では α 相のみ説明する。バランス制御では、各チョップセルの直流電圧 $v_{Cj\alpha}$ を均一化する。ここで、 $v_{Bj\alpha}^*$ はバランス制御の電圧指令値である。チョップセルのキャパシタの充放電を制御するために、キャパシタに流出入する有効電流を制御する必要がある。しかしながら、チョップセルのアーム電流は、正と負の両方を取り得る。そのため MMC のアーム電流の極性によって $v_{Bj\alpha}$ の極性を変化させる。上段のキャパシタ電圧制御の操作量 $v_{Bj\alpha}^*$ は以下の式となる。

$$\begin{aligned} v_{Bj\alpha}^* &= k(v_C^* - v_{Cj\alpha}) \quad [i_{N\alpha} \dot{i}_{P\alpha} \geq 0] \\ v_{Bj\alpha}^* &= -k(v_C^* - v_{Cj\alpha}) \quad [i_{N\alpha} \dot{i}_{P\alpha} \leq 0] \end{aligned}$$

さらに、各チョップセルの電圧指令値 $v_{j\alpha}^*$ のブロック図における上段・下段の出力電圧指令値は次式で与えられる。

$$v_{j\alpha}^* = \pm v_{Bj\alpha}^* - \frac{v_{C\alpha}^*}{2}$$

表 1 計算機シミュレーションに用いた回路定数

DC Bus Line Voltage	E	300V
Buffer inductance	l	600uH
DC capacitance	C	100mF
DC capacitor voltage	V_c	150V
Carrier frequency	f_c	2.4kHz
Equivalent switching frequency	$4f_c$	9.6kHz

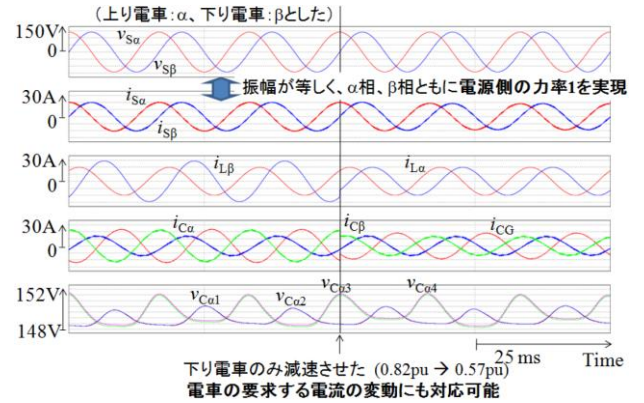


図 5 計算機シミュレーション結果

4. 計算機シミュレーション結果

図 5に、計算機シミュレーション結果を示す。計算機シミュレーションには、PSIM(Myway 技研社製)を用いた。シミュレーションに用いた定数は表 1とした。シミュレーション波形は、上から電源電圧 $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, 電源電流 $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, 負荷電流 $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$, パワーラインコンディショナの出力電流 $i_{C\alpha}$, $i_{C\beta}$, i_{CG} , チョップセルの直流キャパシタの電圧 $v_{C\alpha1}$, $v_{C\alpha2}$, $v_{C\alpha3}$, $v_{C\alpha4}$ である。負荷電流 $i_{L\alpha}$, $i_{L\beta}$ は不平衡であり、無効電流を含んだ電流とした。シミュレーション結果より、電源電圧と電源電流は位相差が低減されており、提案する MMC を用いたパワーラインコンディショナにより、負荷電流に含まれる無効電流が電源側では補償されていることがわかる。また、電源電流 $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ の振幅がほぼ等しいため負荷電流に含まれる不平衡分が電源側では補償されていることがわかる。さらに、MMC にバランス制御を加えることによってチョップセルの直流キャパシタ電圧は 150V 一定になっていることが確認できた。このとき、電源側の力率は α 相、 β 相ともに 0.9 以上となり、電気供給約款の参考値「力率 0.9 以上」⁶⁾を実現でき、良好な結果を得られた。また、半導体デバイス一つあたりに印加される電圧は 150V であり、直流バスライン電圧の半分であった。この結果は、半導体デバイス 1 つ当

たりに印加される電圧が1アーム当たりのセルインバータの数(本報告では2)に反比例することを示しており、セルインバータの数を増やすことによってマッチングトランスを介することなくパワーラインコンディショナと系統を接続できることを示している。

さらに、 β 相上の電車が減速した場合を想定して、Load 2 を 0.82pu から 0.57pu へと急変させた場合の結果を示す。負荷急変時においても、電源電流の波形はバランスした力率 0.9 以上の正弦波であり、MMC を用いたパワーラインコンディショナが正常に動作していることを確認した。さらに、負荷急変における直流キャパシタ電圧の変動は 3.0% であり、変動が 10% 以内となる良好な電圧一定制御が機能していることを確認した。

5. 結言

本報告では、電気鉄道用パワーラインコンディショナの構成として MMC を用いる方法を提案し、縮小モデルを用いた実験を行う前段階として、計算機シミュレーションを行い良好な結果を確認した。はじめに、従来の電気鉄道用パワーラインコンディショナと、残されている課題について述べた。さらに、計算機シミュレーションを用いて、MMC により構成した電気鉄道用パワーラインコンディショナの動作を解析した。計算機シミュレーション結果より、電源電流の振幅が等しく力率 0.9 以上とすることができ、提案するパワーラインコンディショナにより、電源側の不平衡と無効電流を補償可能であることを確認した。さらに、電気鉄道の加減速を模擬した負荷急変に対して、直流キャパシタ電圧の変動が 10% 以下となり、良好な直流電圧一定制御の応答を示した。また、パワーデバイス 1 つあたりに印加される電圧は、1 つのアームに接続されるセルインバータの数に反比例して小さくなり、マッチングトランスが不要となる。

今後は、電気車負荷の定数を再検討し、サイリスタ位相制御車を模擬した高調波負荷を用いて、系統側における高調波制御が可能となることを、計算機シミュレーションにより確認し、縮小モデルを用いて実験を行う予定である。

本研究成果の一部は、第 15 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集⁽⁷⁾および第 19 回高専シンポジウム講演要旨集⁽⁸⁾に収録されている。

for Shinkansen, "Electrical Engineering in Japan, Vol. 162, No. 4, 2008.

- (2) Zhuo Sun, Xinjian Jiang, Dongqi Zhu and Guixin Zhang, "A Novel Power Quality Compensator Topology for Electrified Railway," in *IEEE Trans. on PE.*, Vol. 19, No. 4, pp. 1036–1042, 2004.
- (3) N. Ishikura, K. Ishibashi, E. Hiraki, T. Tanaka, "A constant DC voltage control-based strategy for an active power quality compensator in electrified railways with improved response" *IEEJ Trans. on E. E. E.*, Vol. 7, No. 3, pp. 316-321, 2012.
- (4) 石倉規雄, 平木英治, 田中俊彦:「変換器容量低減を目的とした電気鉄道用パワーラインコンディショナの制御法」, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 129, No. 9, pp. 907-913, 2009.
- (5) 萩原誠, 赤木泰文:「モジュラー・マルチレベル変換器(MMC)のPWM制御法と動作検証」, 電気学会論文誌 D 分冊, Vol. 128, No. 7, pp. 957-965, 2008.
- (6) 中国電力株式会社:「電気供給約款」, p. 45, 2008.
- (7) アマラセーカラ オーシャダ, 石倉規雄:「モジュラー・マルチレベル変換機(MMC)を用いたマッチングトランスレス電気鉄道用パワーラインコンディショナの動作解析」, 第 15 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム論文集, pp. 123-124.
- (8) アマラセーカラ オーシャダ, 石倉規雄, 宮田仁志:「MMC を用いたトランスレス電気鉄道用パワーラインコンディショナのインバータ車両に対する計算機シミュレーション」, 第 19 回高専シンポジウム in 久留米講演要旨集, A-8, p. 78.

文献

- (1) T. Uzuka, S. Ikedo, K. Ueda, Y. Mochinaga, S. Funahashi, K. Ide, "Voltage Fluctuation Compensator