

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03962

研究課題名(和文)高電圧・高電力密度モジュラーマトリックスコンバータの制御システム

研究課題名(英文)Control System of Medium-Voltage High-Power-Density Modular Matrix Converter

研究代表者

竹下 隆晴 (Takeshita, Takaharu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70171634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：大容量可変速モータの高電圧化が進む中で、高電圧交流モータ駆動装置として、電源変圧器を用いずに、商用周波数から直接、可変電圧可変周波数の高電圧を出力できる新たな小型高効率な電力変換器としてモジュラーマトリックスコンバータの開発が進められている。本研究では、モジュラーマトリックスコンバータの各制御の独立性をもつ簡単な制御法として、入力電流、モジュールコンデンサバランス、出力電圧の制御をそれぞれ、電源の正相、逆相、零相の制御系で実現できる制御法を提案した。研究室における試作機で提案制御法の有効性を実験で確認した。

研究成果の概要(英文)：The variable speed motors for large capacity and medium voltage are developed. The modular matrix converter for driving a medium voltage variable speed motor has merits of small size and high efficiency because of direct conversion of three-phase voltage to variable voltage without commercial-frequency transformer. In this research, the authors proposed the simple control scheme of the modular matrix converter. The proposed control scheme consists of three controls of input current, capacitor voltage balance and output voltage. These three controls are achieved by positive-, zero-, and negative-phase sequence components of the source currents. The effectiveness of the proposed control scheme was verified by the experiments using the laboratory prototype.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス モータドライブ 高電圧 省エネルギー

1. 研究開始当初の背景

産業分野では、電力の約7割が機械等を駆動するためのモータで消費されており、モータ駆動装置における省エネルギー、高効率、高密度化が、地球規模での環境問題からも重要になってきている。6.6kV以上の高電圧大容量モータ駆動装置では、多相多巻線変圧器を用いたマルチレベル電力変換器が主に用いられている。大型で高重量の多相多巻線変圧器を除去して信頼性を高めるための新しい変換器として、双方向チョッパ回路および単相フルブリッジ回路をそれぞれ多段直列接続したカスケードマルチレベルコンバータとモジュラーマトリックスコンバータの研究が進められている。カスケードマルチレベルコンバータは高周波駆動、モジュラーマトリックスコンバータは低周波駆動にそれぞれ適しており、パワーエレクトロニクスの国際会議では、多くのセッションが設定され、今後の高電圧大容量モータ駆動装置について議論がされている。

図1はモジュラーマトリックスコンバータの回路構成である。モジュラーマトリックスコンバータは、高電圧大容量の交流モータ駆動装置として、電源トランスを用いることなく、商用周波数から直接、可変電圧可変周波数の高電圧を出力できる新たな電力変換器として注目されている。電源相 R, S, T と出力相 U, V, W との間に、直流コンデンサ C を持つ単相フルブリッジ回路のモジュールが3段直列接続された9つのアームが接続されている。出力相 U に接続された3つのアームをまとめ、サブコンバータ U と呼んでいる。同一モジュールで構成されているので、モジュール数は多くなるが、簡単に回路を構成できる特徴がある。しかしながら、制御法については、様々な方式があり、理論の体系化がされていない状況である。

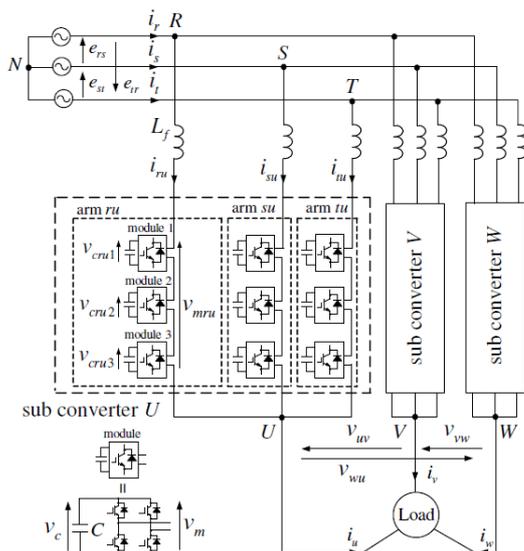


図1 モジュラーマトリックスコンバータ

2. 研究の目的

モジュラーマトリックスコンバータの制御には、入力電源電流、モジュールコンデンサ電圧、出力電圧の3つの制御があり、これら3つの制御を同時制御することは複雑で、標準的な制御法が確立されておらず、理論体系化が必要である。申請者は、モジュラーマトリックスコンバータの各制御の独立性と簡単な制御法として、サブコンバータの制御において、入力電流、モジュールコンデンサバランス、出力電圧の制御をそれぞれ、電源の正相、逆相、零相の制御系で実現できることを提案している。また、申請者は、モジュールで構成された9つのアームを双方向スイッチに置き換えた小容量の一般的なマトリックスコンバータの研究において、低損失化のためのスイッチング回数と出力高調波の低減を既に実現している。この一般的なマトリックスコンバータのスイッチング回数と出力高調波の低減法をモジュラーマトリックスコンバータの制御に適用することで、スイッチング回数を減らせ、スイッチング損失を低減できる。

本申請では、機能ごとの独立制御にスイッチング回数低減法を適用し、モジュラーマトリックスコンバータの安定で簡単な制御系の確立と制御理論の体系化を実現する。

本研究成果により、トランスレスで小型、高電力密度の高電圧交流モータ駆動装置の実用化に貢献できる。

3. 研究の方法

本研究では、モジュラーマトリックスコンバータの簡単な制御系の確立と制御理論の体系化を目的として、具体的に以下の3項目を実施する。

(1) 機能ごとの独立制御による基本制御法の確立 電源の正相・逆相・零相回路でそれぞれ機能ごとの独立制御と同様に、負荷の正相・逆相・零相回路から得られる独立制御によりサブコンバータ間の連携制御を追加することで、両制御を融合した安定な基本制御法を確立する。

(2) スwitching損失低減制御法の確立 一般的なマトリックスコンバータのスイッチング回数低減法では、制御周期間に導通させないスイッチがある。この考え方をモジュラーマトリックスコンバータに適用して電流を流さないアームをつくり、そのアームのスイッチングを停止して、損失を低減する制御を確立する。

(3) 負荷周波数と電源周波数の同期時の制御法の確立 モジュラーマトリックスコンバータは、負荷周波数が電源周波数より低い場合に適しているが、負荷周波数が電源周波数に同期または高い周波数の制御ができれば、駆動範囲を拡大できる。そこで、負荷

周波数と電源周波数の同期時の制御において、モジュールコンデンサ電圧を一定値に保つための、循環電流制御を確立する。

#### 4. 研究成果

(1) 機能ごとの独立制御による基本制御法の確立 図1のモジュラーマトリックスコンバータのサブコンバータを、図2の(a)解析モデルとして表すと、重ね合わせの理を用いて、(b)正相、(c)逆相、(d)零相の各回路に分解でき、電源の正相回路で電源電流の制御を、逆相回路で各コンデンサ電圧のアンバランスを補正する制御を、零相回路で出力電圧制御をそれぞれ独立制御できることを示した。これによりモジュラーマトリックスコンバータの制御理論の体系化を図った。さらに、図3に示すように9個のアーム上のコンデンサ電圧偏差を平均値と、4組の正弦波で表現できることを示した。各々のコンデンサ電圧偏差をモジュラーマトリックスコンバータ内のみを流れる循環電流を4組用いることで、アーム間コンデンサ電圧バランス制御を構築するための図4の簡単な制御系を構築できた。図5は、提案制御法を用いたコンデンサ電圧バランス制御の実験結果で、点線で電圧バランス制御を適用したときに安定な収束特性が得られた。

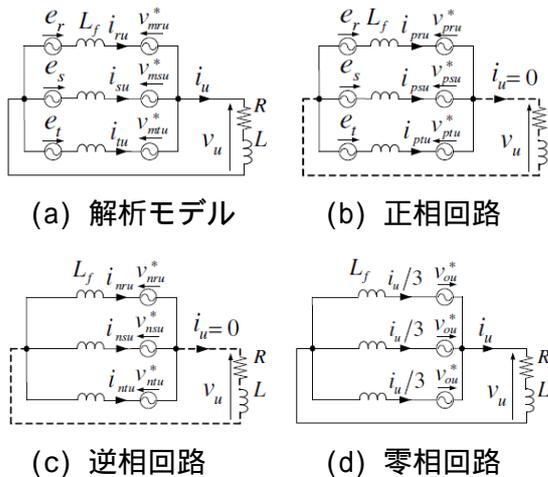


図2 サブコンバータの各制御法

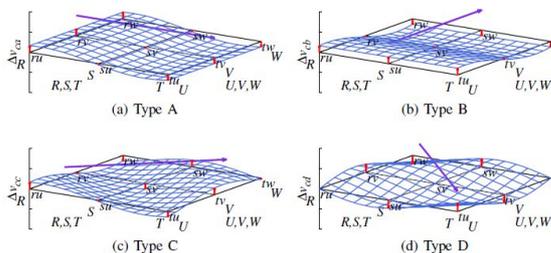


図3 コンデンサ電圧偏差の4組の正弦波表現

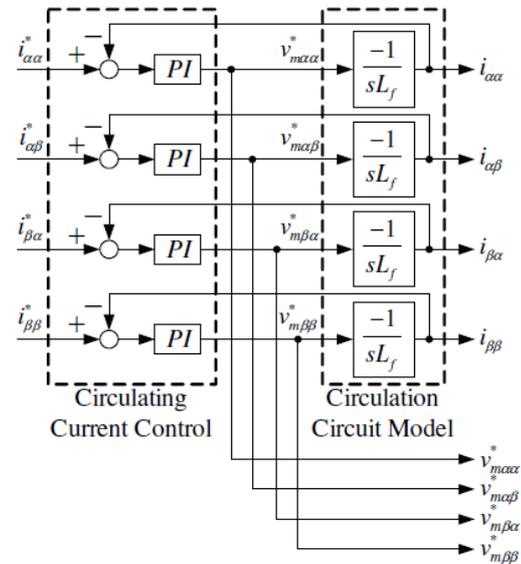


図4 コンデンサ電圧バランス制御系

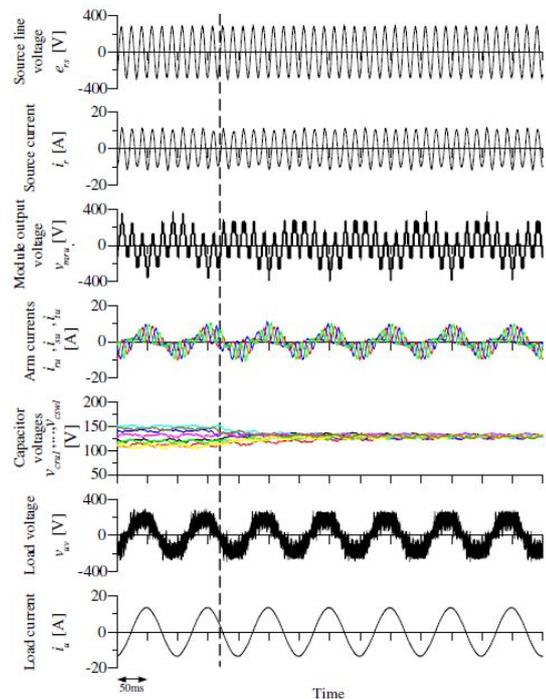


図5 コンデンサ電圧バランス制御の実験結果

#### (2) スイッチング損失低減制御法の確立

図6は、モジュラーマトリックスコンバータにおいて、2アームを動作させないときの回路モデルである。動作させないアームでは、スイッチングしないので損失を低減できる。電源電圧およびモータ電圧の大小関係が変わった時点において動作させないアームも切り換わるが、このとき、切り換わるアームの電流が零になる制御法を提案している。図7は2アーム停止時の実験結果であり、図7の Truoff の区間はモジュール出力電圧が最大電圧を出力しておりアーム電流  $i_{ru}$  が零であり、提案制御通りに動作している。

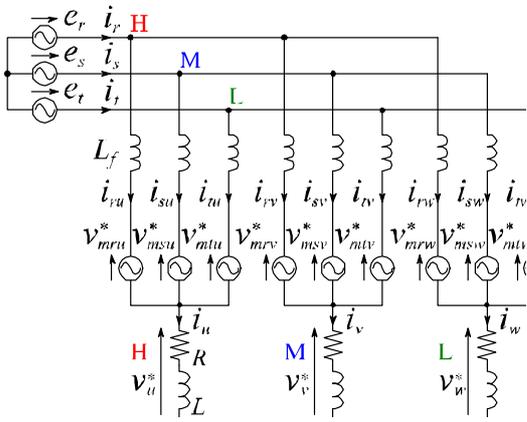


図6 2アーム停止時の回路モデル

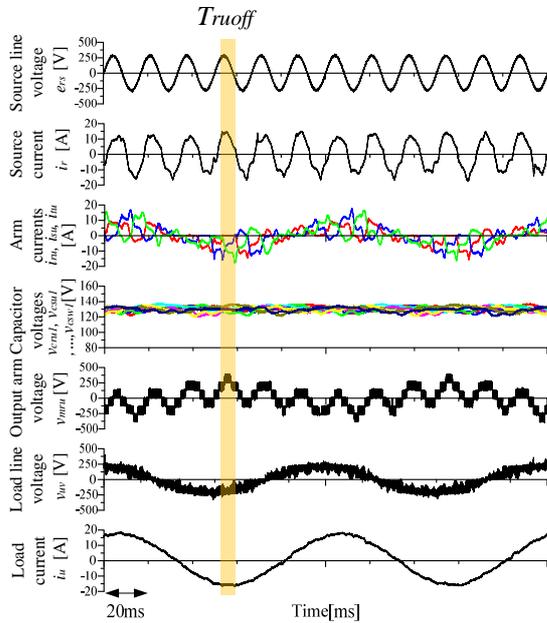
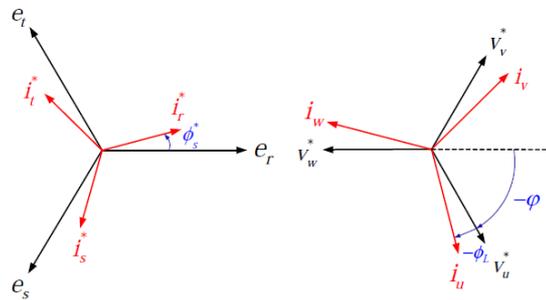


図7 2アーム停止時の実験結果

(3) 負荷周波数と電源周波数の同期時の制御法の確立 モジュラーマトリックスコンバータは、負荷周波数が電源周波数と同じ場合には、アーム電流やアーム電圧が直流になり、アーム電力が正または負となり、モジュールのコンデンサ電圧を一定値に保てなくなり、制御ができない。全てのアームの電圧と電流の位相を  $90^\circ$  とし、無効電力だけを発生することで、直流電圧を一定値に保つ制御法を提案した。具体的には、図8に示すように電源の力率角  $\phi_s$  と負荷力率角  $\phi_L$  において  $\phi_s = -\phi_L$  と制御すれば良いことを導出した。図9は、逆相負荷電圧時において、負荷周波数  $f_L$  を 54 Hz から徐々に増加させ、60 Hz で一定値にし、その後、再び 66 Hz まで増加させた実験波形である。負荷周波数  $f_L$  が 57 Hz



(a) 電源ベクトル (b) 負荷ベクトル  
図8 電源と負荷のベクトル図

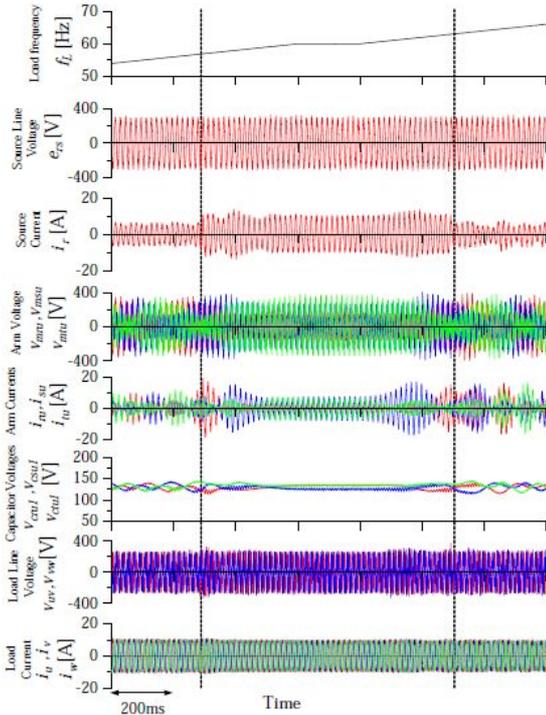


図9 電源と負荷の周波数同期時の実験結果

~ 63 Hz では、指令電源力率角を負荷力率角と等しく与え、 $f_L < 57$  Hz,  $63$  Hz  $< f_L$  では、電源力率角  $\phi_s = 0$  として電源力率 1 に制御している。安定した各部動作波形が得られた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

中森俊樹, 林佑磨, 竹下隆晴:「負荷周波数が電源周波数に同期したときのモジュラーマトリックスコンバータ制御」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 審査有, Vol.135, No.12, pp.1168-1180 (2015)  
DOI:10.1541/ieejias.135.1168

Yuto Yamada, Takaharu Takeshita: "Distribution and Balancing Control of Capacitor Voltages among Arms of a

Modular Matrix Converter," 2016 8th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia (IPEMC 2016-ECCE Asia), 審査有, pp.1-8 (2016)  
DOI: 10.1109/IPEMC.2016.7512428

[学会発表](計 4件)

山田悠登, 竹下隆晴:「モジュラーマトリックスコンバータのアーム間のコンデンサ電圧偏差の分布とバランス制御」, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会資料, SPC-15-144, MD-15-115, pp.77-82 (2015)

Atsushi Ootani, Yuto Yamada, Takaharu Takeshita: "Disconnected Arm Technique for Loss Reduction of a Modular Matrix Converter," The 3rd Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC), 審査有, ps1-28, pp88-89 (2016)

大谷惇司, 竹下隆晴:「零電流アームを用いたモジュラーマトリックスコンバータの制御」, 電気学会 産業応用部門大会講演論文集 1-41, pp.1 243-246 (2017)

Atsushi Otani, Takaharu Takeshita: "Zero Arm-Current Control of a Modular Matrix Converter Based on Source Line Voltages," The 4th Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC), 審査有, JP1, pp.1-2 (2017)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹下 隆晴 (TAKESHITA Takaharu)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70171634