

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月28日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560298

研究課題名（和文）

モジュラー・マトリックスコンバータによる直接形周波数変換器の大容量化に関する研究

研究課題名（英文）

Study on high capacity direct frequency converter using modular matrix converter

研究代表者

三浦 友史 (MIURA YUSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90354646

研究成果の概要（和文）：交流／交流直接電力変換器および異系統連系用周波数変換器などの大容量用途に適用することを想定して、モジュラー・マトリックスコンバータのマルチレベル化を検討した。双方向スイッチである単相フルブリッジセルの多段構成に適用可能な瞬時空間電圧ベクトルを用いた制御法と、各セルのキャパシタ電圧の平衡制御法を提案した。提案手法の妥当性を回路シミュレーションで確認するとともに 1 kW 級の実験装置によって基本動作を確認した。

研究成果の概要（英文）：Multi-level modular matrix converters for high capacity application such as ac/ac direct power converters and frequency converters were investigated. The power control method using instantaneous voltage space vectors and the balancing control method of capacitor voltage, which can be applied to multi-level structure composed of single-phase full-bridge cells, were proposed. The methods were verified through numerical simulation and basic operation was confirmed using a 1-kW class experimental circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パワーエレクトロニクス，分散電源，電力系統連系

1. 研究開始当初の背景

単相フルブリッジまたはチョッパをセルとして直列接続によってマルチレベル化することにより，トランスレスで電力変換器の大容量化・波形改善を実現するマルチレベル変換器(MMC)が近年注目されている。MMCは変換器の各アームをモジュールで構成する点に特徴があり，実装が容易であることから高圧用途に適する。これまで，直流送電を

目的とするハーフブリッジセルを接続したMMCや，無効電力補償装置や高圧のモータ駆動を目的とするフルブリッジセルを接続したMMCなどが検討されている。一方，MMCの中でも，単相フルブリッジセルを双方向スイッチとして，従来のマトリックスコンバータのように交流/交流直接変換を実現するモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータが提案されている。本研究では，

このモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータの大容量化技術に着目した。

交流/交流電力変換を目的とする一般のマトリックスコンバータは半導体素子スイッチを用いて構成されるが、通常の回路構成では高圧化が難しいという問題がある。そこでトランスを用いて多重化されたものが製品化されているが、トランスにより容積が大きくなるという欠点があった。スナバを付加することによってスイッチの直列接続を可能としたマトリックスコンバータも提案されているが、スナバキャパシタの短絡を避けるために制御範囲の制約や転流制御の複雑さを招くという欠点があった。我々もマトリックスコンバータによる分散電源の系統連系、電力系統の連系について検討してきたが、変換器の高圧化が課題であった。

モジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータは、従来のマトリックスコンバータとは異なり、単相フルブリッジセルを1つの双方向スイッチとみなして、これをマトリックス状に構成することによって交流/交流電力変換を行うものである。このセルを直列に接続することによって、スイッチの電圧責務を低減し変換器の高圧化が可能となる。また、周波数・電圧・力率の制御の自由度が非常に高いことに加え、従来のマトリックスコンバータとは異なり電圧利用率も高いという特長がある。したがって、①風力やフライホイールなど可変速交流出力である分散電源の系統連系用変換器や②異系統を連系する大容量周波数変換器およびループコントローラなどへの適用が期待されている。さらにモータや風力発電における極低周波運転においてもデイレティングの必要が無いなどの特長もある。

しかし、マトリックスコンバータ同様複雑な制御が必要で、特にマルチレベル化された場合の制御方法についての報告は海外を含めたいへん少なく、2段構成のための一制御法が報告されているだけであった。また各セルのキャパシタ電圧の平衡制御においても、その詳細は報告されていなかった。このような背景から本研究では、多段化されたモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータに適用可能な制御方法を検討することにより、マルチレベル化の基礎技術を確立し、将来の大容量電力変換器の展望を示すことを目的とする。

2. 研究の目的

本研究では、モジュラー・マトリックスコンバータの大容量化を目指し、セルを多段直列接続した場合についても適用可能な制御方法の検討を目的とする。また、異なる電力系統を連系する電力変換器および周波数変換器への適用を検討する。具体的には以下の

通りである。

- (1) 単相フルブリッジセルを多段に直列接続した構成のモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータに適用可能な有効・無効電力制御手法を確立すること
- (2) 多段構成のモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータに適用可能な各セルのキャパシタ電圧平衡制御手法を確立すること
- (3) モジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータによって、異系統を連系し、周波数変換を行うことができることをシミュレーションによって示すこと
- (4) マルチレベル化による波形改善の効果を示すこと
- (5) 1 kW 級の試験装置を製作し、その基本動作を確認すること

3. 研究の方法

- (1) 図1に示すような多段構成のモジュラー・マトリックスコンバータに適用可能な瞬時空間電圧ベクトルを用いた有効・無効電力制御およびキャパシタ電圧平衡制御を検討し、回路シミュレーションプログラムによってその妥当性を確認し、マルチレベル化の基礎技術を確立する
- (2) 異なる配電系統を連系するループコントローラへのモジュラー・マトリックスコンバータの適用を回路シミュレーションによって検討する。また異なる周波数をもつ系統を連系する周波数変換器としての動作も検討する。
- (3) 1 kW 級の試験装置を、制御装置を含めて設計・製作し、三相多機能電源と接続し試験することによって、その基本動作を確認するとともに課題を抽出する

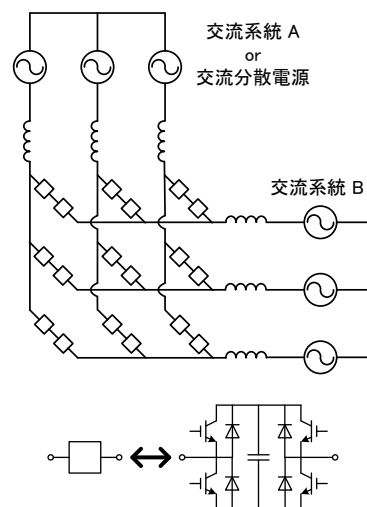


図1 モジュラー・マトリックスコンバータの構成(2段構成の例)

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を以下にまとめる。

- (1) 多段構成のモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータへ適用可能な瞬時空間電圧ベクトルを用いた制御法を提案し(図 2)、2 段構成、3 段構成の回路についてソフトウェア PSCAD/EMTDC を用いたシミュレーションを行い、その動作を確認した。従来の制御法では、一制御期間中にひとつのセルしかキャパシタを介して接続しなかったものを、複数のセルを接続できるように改善することによって、多段構成に適用可能な制御方法を提案した。その結果、直列接続されたセルを介して流れる循環電流を必要とせず、電圧形の動作によって、出力波形のマルチレベル化を実現できた。これによって、相間のリアクトルの小型化も可能としている。

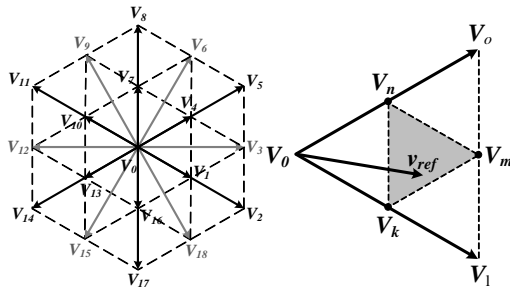


図 2 提案する手法で使用可能な空間電圧ベクトル V_n (2 段構成の場合) と指令値 v_{ref} の実現方法

- (2) 各セルのキャパシタ電圧の平衡制御について、下記の①～③の制御を提案し、2 段および 3 段構成のモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータについての回路シミュレーションを行い、キャパシタ電圧の偏差が指令値の 5% 以内に制御されることを確認し、その妥当性を示せた。

①キャパシタの平均電圧制御：全キャパシタ電圧の平均値を指令値に追従させることによって、各セルキャパシタ電圧を維持するとともに異系統を連係する入出力間の有効電力制御の整合をとることができた。また、2 段構成の場合は、他の制御法を適用することなく、キャパシタの平均電圧制御だけで自律的に直列に接続された 2 段のセル間の電圧平衡が実現できることを明らかにし、その理由についても定性的に考察した。

②キャパシタ電圧の各リンク間の平衡制御：モジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータにおいて、直列接続されているセルによって構成される、2 つの系統の入出力

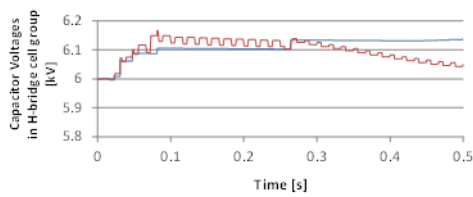
の各相を結ぶ枝回路をリンクと呼ぶ。一制御期間に各リンクを流れる電流によって生じるセルのキャパシタ電圧の変化を事前に計算し、変化後のキャパシタ電圧と指令値との誤差の二乗和を目的関数として、それを最小化する接続方法(パルスパターン)を選択することによって、リンク間の電圧の平衡を維持する制御法を提案し、その妥当性を確認した。また、本制御を実現するためには、各セルのキャパシタ電圧の測定と入出力各相の電流の測定が必要となることを示した。しかし、計算対象となる接続方法は、相間の短絡等が発生しないという制約のもとでは、段数が増加しても高々 45 通りしか存在しないことを明らかにした。

③キャパシタ電圧のリンク内の平衡制御：各リンクに直列接続されているセルの中で、最も指令値との誤差が大きいセルを優先的にスイッチングすることによって、リンク内のキャパシタ電圧の平衡を実現する制御方法を提案した。すなわち、キャパシタ電圧が指令値に比べ小さい場合には、電流がキャパシタを充電する方向に流れるようにスイッチングし、逆の場合には放電するようにスイッチングする方法であり、その妥当性を確認した。ただし、リンク内のすべてのセルをキャパシタ電圧の大きさに従ってソートする必要があり、計算量が増大する原因となることが明らかとなった。

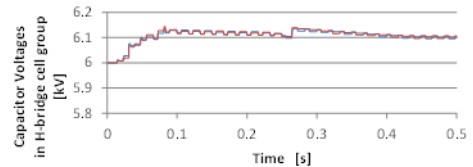
①～③の制御手法を、次項(3)に示す回路に適用しシミュレーションを行った。2 段構成の場合のリンク内の 2 つのセルのキャパシタ電圧を図 3 に示す。制御を適用することによって、電圧平衡が実現されていることがわかる。また、各リンクに接続されたセルのキャパシタ電圧の和を比較したものを図 4 に示す。リップルは存在するが、各値は指令値 12 kV に対し 5% 以内に制御できることを確認した。以上より、提案する制御を適用することによって、セルのキャパシタ電圧の平衡が実現されることを確認した。ただし、特に②と③の制御手法を実現するための計算量が、多段化すると大きく増加することがわかり、多数のセルを必要とする大容量モジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータの実現への大きな課題となることが明らかとなった。

(3) 異なる配電系統を、電力変換器を介して接続し、電力を融通することによって、分散電源の大量導入による電圧分布上昇などの問題を解決しようとする目的をもつループコントローラへのモジュラー・マルチレベルマトリックスコンバータの適用を検討した。図 5 に示す異なる 2 つの 6.6 kV/60 Hz の配電系統を連係する 1 MVA

級のループコントローラを想定し、各配電系統の有効電力・無効電力をほとんど干渉せず高速に制御できることを、回路シミュレーションによって確認した。また、マルチレベル化によって、電圧および電流の総合ひずみ率がそれぞれ 2.7%および 0.91%となり 5%以下に低減できることを示した。さらに、両系統の位相差が存在する場合においても、問題なく制御できることを示すとともに、一方の系統の周波数を 50 Hz にしても、良好な制御性能を得ることができることを確認した。



(a) 平衡制御無し



(b) 平衡制御あり

図 3 2 段構成の場合のリンク内の 2 つのセルのキャパシタ電圧

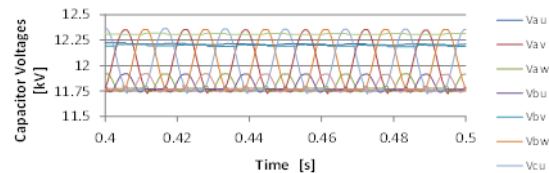


図 4 各リンクのセルのキャパシタ電圧の和

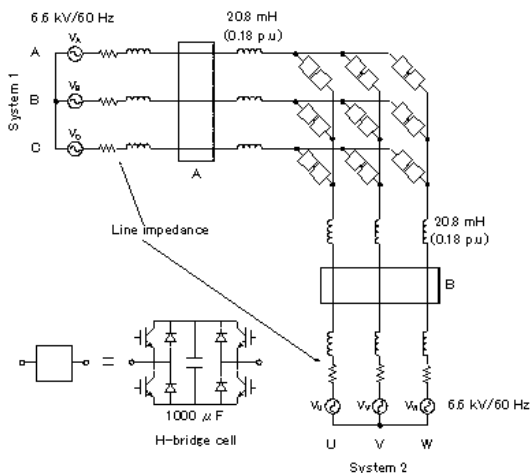


図 5 ループコントローラへの適用を想定したシミュレーション回路

(4) 1 段構成の 1 kW 級モジュラー・マトリックスコンバータの試験装置を製作した。4 個の IGBT とダイオード、1 個の電解コンデンサから構成される単相フルブリッジセルを 9 個接続することによって、モジュラー・マトリックスコンバータの主回路を構成している。制御系は、DSP によって有効電力・無効電力制御を実現し、FPGA によって各セルのパルスパターンを計算している。オン・オフ信号は光信号によってそれぞれのセルの制御回路に送られ、各 IGBT を駆動するものとした。製作した試験装置の一方を三相電源に、他方を三相抵抗負荷に接続し、スイッチングパターンが適切に出力されていること、正弦波出力が得られることなど、基本動作について確認した。

今後の課題としては、①さらなるマルチレベル化を目指した計算量の低減手法、②デッドタイムの影響の評価と補償、③キャパシタ電圧の微小な不平衡による循環電流の低減手法、④試験装置による系統連系、周波数変換試験などが挙げられる。

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 6 件)

1. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「3 段モジュラーマトリックスコンバータのキャパシタ電圧バランス制御法」, 電気学会全国大会講演論文集, 4-018 (2012) 査読無
2. 山西雄世, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「瞬時空間ベクトルを用いた 2 段モジュラーマトリックスコンバータの制御法」, 半導体電力変換研究会研究資料 SPC-12-031 (2012) 査読無
3. 山西雄世, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「H ブリッジセルが 2 段接続されたモジュラーマトリックスコンバータの空間ベクトル制御法」, 平成 23 年電気関係学会関西連合大会講演論文集, P-10 (2011) 査読無
4. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「3 段モジュラーマトリックスコンバータのマルチレベル空間ベクトル変調法」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.37, p.237 (2012) 査読無
5. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「空間電圧ベクトルを用いた 2 レベルモジュラーマトリックスコンバータのキャパシタ電圧制御」, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 1-172 (2011) 査読無
6. 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「配電系統のループ運用のためのモジュラーマトリックスコンバータの制御方式に関する研究」

平成 22 年電気関係学会関西連合大会講演論文集, 4A203-17 (2010) 査読無

〔学会発表〕 (計 6 件)

1. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「3 段モジュラーマトリックスコンバータのキャパシタ電圧バランス制御法」, 電気学会全国大会, 2012 年 3 月 21 日, 広島工業大学
2. 山西雄世, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「瞬時空間ベクトルを用いた 2 段モジュラーマトリックスコンバータの制御法」, 半導体電力変換研究会, 2012 年 1 月 28 日, 大阪大学
3. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「3 段モジュラーマトリックスコンバータのマルチレベル空間ベクトル変調法」, パワーエレクトロニクス学会第 191 回定例研究会, 2011 年 12 月 17 日, 関西大学
4. 山西雄世, 水谷友哉, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「Hブリッジセルが 2 段接続されたモジュラーマトリックスコンバータの空間ベクトル制御法」, 平成 23 年電気関係学会関西連合大会, 2011 年 10 月 29 日, 兵庫県立大学
5. 水谷友哉, 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「空間電圧ベクトルを用いた 2 レベルモジュラーマトリックスコンバータのキャパシタ電圧制御」, 電気学会産業応用部門大会, 2011 年 9 月 8 日, 琉球大学
6. 山西雄世, 三浦友史, 伊瀬敏史: 「配電系統のループ運用のためのモジュラーマトリックスコンバータの制御方式に関する研究」平成 22 年電気関係学会関西連合大会, 2010 年 11 月 13 日, 立命館大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 友史 (MIURA YUSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90354646

(2) 研究分担者

伊瀬 敏史 (ISE TOSHIFUMI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00184581

(3) 連携研究者

なし