

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05939

研究課題名(和文) 階層型制御系をもつモジュラーマトリックスコンバータの制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on the control scheme of the modular matrix converter with a hierarchical control system

研究代表者

三浦 友史 (MIURA, YUSHI)

大阪大学・工学研究科 ・准教授

研究者番号：90354646

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、交流/交流電力変換を行う大容量周波数変換器であるモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータ(MMMxC)に階層型制御系を適用することによって、1)セルの多段化への柔軟な対応、2)階層型制御系に対応した電力制御、キャパシタ電圧平衡制御、零相電圧抑制制御の検討、3)瞬時電圧低下時や電圧・電流不平衡時の運転継続性能の改善などを実現することを目的とし、回路シミュレーションと2 kVA級7レベルのミニモデルを用いた実験によって提案する手法の妥当性を確認した。これらの成果より階層型制御系を用いたMMMxCの大容量周波数変換器への適用の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Application of the hierarchical control system to the Modular Multilevel Matrix Converter (MMMxC) that is a member of Modular Multilevel Converter (MMC) family is investigated. The hierarchical control system enables 1) flexibility in the increase of the number of cells, 2) simplification of power control, zero sequence voltage suppression control and capacitor voltage balancing control, 3) improvement of Fault Ride-Through (FRT) capability against a voltage sag and voltage/current unbalance. In this research, these features were demonstrated through numerical simulation and experiments using a 2-kVA 7-level small-scale MMMxC. These results indicate that the MMMxC with the hierarchical control system is one of the promising high-capacity high-voltage frequency converters.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：モジュラーマルチレベル変換器 マトリックスコンバータ 階層型制御系

1. 研究開始当初の背景

(1) モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータ 高圧・大容量の電力変換器として、モジュラーマルチレベル変換器(MMC)が高圧の直流送電に適用する自励式の変換器として注目を集めていた。本研究で検討するモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータ(MMMxC)は、他のMMCと同様にHブリッジ回路をセルとして多数直列に接続することによってアームを構成し変換器の高圧化・大容量化を行うが、図1に示すように従来のマトリックスコンバータと同様に9本のアームから構成され交流/交流直接変換を行うところに特徴がある。そのため幅広い周波数領域で運転が可能で、可変速風力発電やモータ駆動への適用が期待されていた。

(2) 階層型制御系の必要性 MMCを高圧用途に適用するためには多数のセルを接続するため、制御計算の複雑化および計算量の増加が問題となっていた。また信号線の増加および通信の帯域幅制限も存在するため、集中制御で制御系を実現するのは困難である。そこで、各アーム、セル群ごとに制御を階層化し分散制御を行うことが求められ、それら制御系の構築と構成に対応した制御方法の開発もあわせて求められていた。また、セルのソート処理などを分散して行うことによる既存の制御の高機能化や、アームごとの自律分散制御により一部のセルが故障した場合の運転継続手法など新たな機能を付加することも期待された。

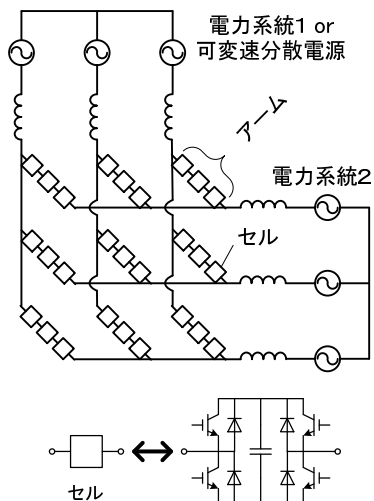


図1 セルが3段構成の7レベルMMxのセル

2. 研究の目的

(1) セルの多段化に対応した階層型制御システムの構築 図2に示すようなDSP・FPGAとマイコンを用いた階層型制御システムを構築し、制御系の簡略化、計算量・信号線の低減を図る。

(2) 電力制御・キャパシタ電圧平衡制御・零相電圧抑制制御の実現 階層型制御系に対応したMMxの制御手法を提案する。特に階層型であるために、通信に起因する信号の時間遅れを考慮した運転制御手法を検討する。

(3) セル故障時および瞬低時や電圧不平衡時の運転継続性能改善のための制御法の確立 セルの故障に対応したMMxの制御手法を検討する。また瞬低時・電圧不平衡時においても運転を継続できる制御手法を検討する。

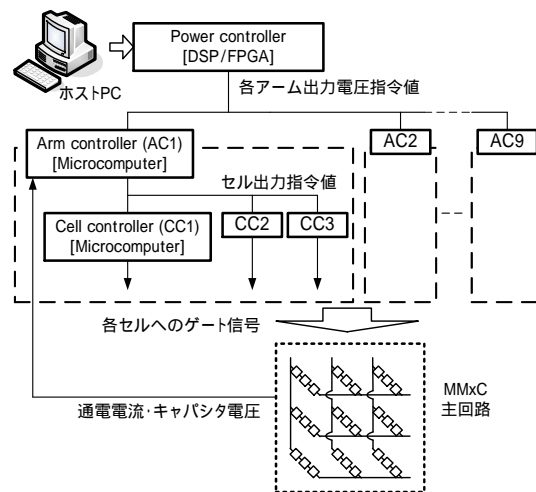


図2 MMxに適用する階層型制御系

3. 研究の方法

回路シミュレーションによって、制御の時間遅れも考慮した制御手法の検討を行った。また、図1に示す構成をもつ2kVA、7レベル(1アームに3個のセルを接続)のMMxのミニモデルを用いた実験を行い、制御手法の妥当性を確認した。実験装置の制御系には図2に示す構成を実現した制御系を適用した。

4. 研究成果

(1) 階層型制御システムの構築と時間遅れが与える影響の評価 図2に示す階層構造をもつ制御システムを設計・実装した。全体制御はDSPとFPGAで行い、各アームはそれぞれ1個のマイコンで制御する。各アームに接続されたセルはいくつかのグループごとにマイコンによって制御される。しかし、通信や比較的計算が遅いマイコンによって制御に時間遅れが発生する。この時間遅れが電流波形にどのような影響を及ぼすか、シミュレーションによって評価した(図3)。実験における時間遅れは110μsであり、測定された波形の総合ひずみ率(THD)はシミュレーションとほぼ同程度の6~8%で、評価が妥当であることを確認した。

(2) 9本のアームを導通させる制御手法 これまでわれわれは、セルを電圧源として扱

い、循環電流を低減するため9本のアームのうち5本だけを導通させる制御手法を用いてきた。本手法によれば循環電流がほとんど流れず、各アームの横流抑制インダクタを小さくできるという利点がある。しかし、導通する5本を選択するために、選択可能なアームのすべての組み合わせについて目的関数を計算する必要があり、計算量が多くなってしまふ。このため、階層型制御系を用いた場合に時間遅れの影響が大きくなってしまふ問題があった。この問題を解決するために、9本のすべてのアームを導通させる手法について新たに検討した。本手法によれば計算時間が短縮でき、そのため波形の改善が期待できる。しかし、循環電流は各セル間のキャパシタ電圧のアンバランスを解消する方向に自発的に流れるため、その電流量の評価が必要であった。そこで循環電流が増大する運転条件を想定し、シミュレーションおよび実験により循環電流の大きさを評価し、過大な電流が流れないことを確認した。また計算時間の短縮により時間遅れの影響を低減でき、波形の改善を確認できた。

本手法は、5本のアームを導通させる手法と同様に、零相電圧抑制制御も適用可能で、かつ幅広い周波数領域において運転が可能であるという特徴をもち、50 / 60Hz 変換(図4)だけでなく、一般に運転が難しい入出力が同一周波数となる 60 / 60Hz 変換、低周波数変換となる 5 / 60 Hz 変換運転を実験によって実証した。

(3) セル故障時の制御手法 セルが故障した場合においても運転を継続できる手法を検討した。アームにセルが多数接続されている場合、セルが1個故障しただけでアーム全体を切り離すのは設備利用率の観点から望ましくない。そこで図5のように故障したセルを短絡することによって主回路から切り離し、残されたセルの電圧を増加させることによって運転を継続する手法を5本のアームを導通させる手法において検討した。導通させるアームの組み合わせは短絡電流が流れないように選択するように工夫している。シミュレーションによって運転の継続を確認し、提案手法の妥当性を示した。

(4) 瞬低時、電圧不平衡時の制御手法 三相平衡の瞬低が発生した場合にも、出力電圧指令値を電圧低下にあわせて小さくする制御を用いることによって、導通アームが5本の手法および9本の手法どちらでも、過電流を抑制し運転が継続できることをシミュレーション、および実験において確認した。

また、電圧不平衡時にも過大な循環電流が流れることなく9本の手法によって運転を継続できることをシミュレーションにより確認した。

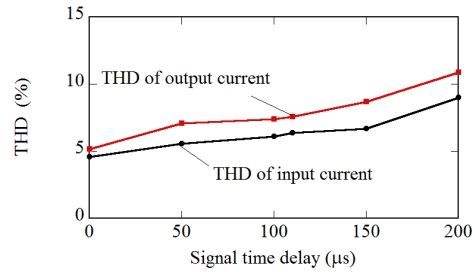
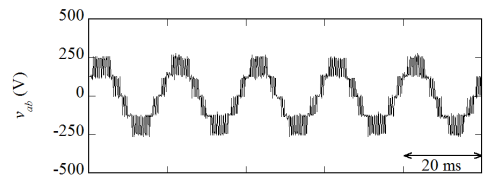
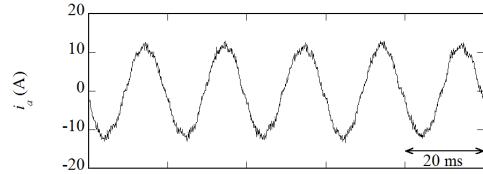


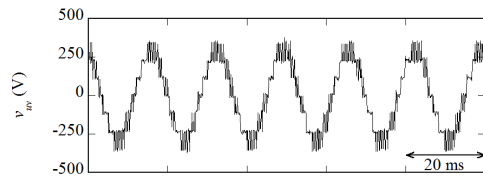
図3 信号の時間遅れと電流波形の総合ひずみ率の関係(シミュレーション)



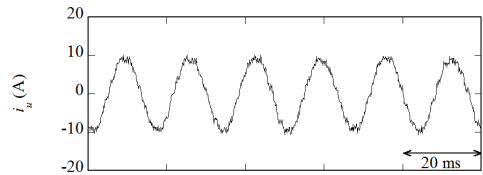
(a) 50Hz 側線間電圧  $v_{ab}$



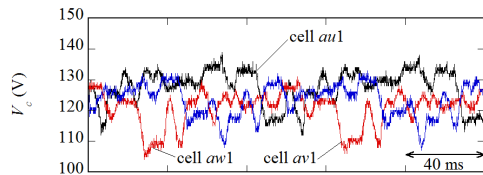
(b) 50Hz 側電流  $i_a$



(c) 60Hz 側線間電圧  $v_{uv}$

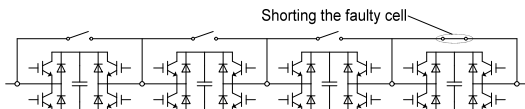


(d) 60Hz 側電流  $i_u$

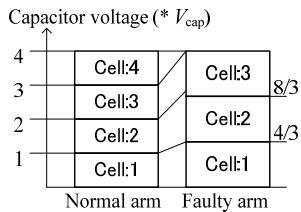


(e) キャパシタ電圧波形  $V_c$

図4 50 / 60Hz 変換における実験波形



(a) 故障セルの外部スイッチによる短絡



(b) 他の健全セルのキャパシタ電圧の増加  
図5 セル故障時の運転手法

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6件)

Yushi Miura, Keiji Inubushi, Tomoaki Yoshida, Takuya Fujikawa, Toshifumi Ise, "Zero sequence voltage suppression control with capacitor voltage balancing for a modular multilevel matrix converter," EPE '15 ECCE-Europe 2015, 1-10

DOI:10.1109/EPE.2015.7309433

Yushi Miura, Keiji Inubushi, Tomoaki Yoshida, Takuya Fujikawa, Toshifumi Ise, "Operation of modular matrix converter under close input and output frequency by using voltage space vector modulation," IEEE IECON 2015, 5136-5141

DOI:10.1109/IECON.2015.7392906

Yushi Miura, Tomoaki Yoshida, Takuya Fujikawa, Takuma Miura, Toshifumi Ise, "Operation of modular matrix converter with hierarchical control system under cell failure condition," IEEE ECCE 2016, 1-8

DOI:10.1109/ECCE.2016.7855315

Yushi Miura, Takuya Fujikawa, Tomoaki Yoshida, Toshifumi Ise, "Control scheme of the modular multilevel matrix converter using space vector modulation for wide frequency range operation," IEEE ECCE 2017, 1084-1091

DOI:10.1109/ECCE.2017.8095908

藤川拓也, 吉田知明, 三浦友史, 伊瀬敏史, パワーエレクトロニクス学会誌, 「瞬時電圧低下時のモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの過電流抑制制御」, 41 巻, 2016, 151

中島尊仁, 三浦友史, 伊瀬敏史, パワーエレクトロニクス学会誌, 「モジュラ

ーマルチレベルマトリックスコンバータの1セル故障時のセル短絡制御とアーム切り離し制御の特性比較」, 43 巻, 2018, 170

〔学会発表〕(計 6件)

藤川拓也, 吉田知明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「瞬時電圧低下に対応したマルチレベルモジュラーマトリックスコンバータの制御」, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 2015, 167-170 (大分)

藤川拓也, 吉田知明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータのアーム間過電流抑制制御」, 平成28年電気学会全国大会, 2016, 236-237 (仙台)

吉田知明, 三浦卓磨, 藤川拓也, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「階層的な制御構成を持つモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータのセル故障時の動作」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2016, SPC-16-028, 55-60 (草津)

藤川拓也, 吉田知明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「キャパシタ電圧リップルを低減したモジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの制御方式」, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, 2017, SPC-17-040, 1-6 (吹田)

三浦卓磨, 藤川拓也, 吉田知明, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータのアーム故障時の運転」, 電気関係学会関西連合大会, 2016, G4-16 (大阪)

中島尊仁, 三浦友史, 伊瀬敏史, 「モジュラーマルチレベルマトリックスコンバータの正常運転から故障時継続運転への切替時の制御法」, 平成29年電気学会産業応用部門大会, 2017, 247-248 (函館)

## 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)連携研究者

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