

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760255

研究課題名（和文） モジュラー・マルチレベル変換器を用いたモータドライブに関する研究

研究課題名（英文） Study on a motor drive using a modular multilevel converter

研究代表者

萩原 誠 (Hagiwara Makoto)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20436710

研究成果の概要（和文）：

本課題では、次世代型電力変換器であるモジュラー・マルチレベル変換器（MMC: Modular Multilevel Converter）を用いたモータドライブに関して検討を行った。その結果、直流リンク部に大容量平滑コンデンサを接続することなく、MMC の安定動作が実現できることを明らかにした。また、低速時の安定運転を可能とする制御法を提案し、その有効性は 400 V, 15 kW ミニモデルを用いた実験的検証により明らかにした。最後に、ベクトル制御や固定子電流振幅を調整する手法を適用することで、零速からの安定した始動を実現した。本研究成果は、21 世紀型省エネ社会の実現に多大なる貢献をするものである。

研究成果の概要（英文）：

This study has dealt with a modular multilevel converter (MMC) that is considered as one of the next-generation multilevel converters with a focus on its applications to medium-voltage motor drives. The study has shown that the MMC can operate without using any dc-link capacitors connected between the common dc terminals. Moreover, it has proposed a control method to achieve stable operation at low speed without inducing any overvoltage and/or overcurrent. Moreover, a stable startup from the standstill to the nominal speed has been achieved by applying the common-mode voltage injection method developed in this study. The validity of the motor drive has been confirmed by experiment using a 400-V, 15-kW downscaled model.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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・高圧モータドライブ

1. 研究開始当初の背景

(1) 現代社会の発展と高度情報化社会の進展に伴い、電力の利用分野は急速な広がりを見せている。その中で効率的な電力利用を可能にする半導体電力変換技術（パワーエレクトロニクス）は、地球資源の有効利用や地球温暖化防止の観点から今後益々重要になると思われる。半導体電力変換技術は、数 mW

（ミリワット）の小型電源から、数百 MW（メガワット）の大容量電力変換器まで幅広く適用できる。従来、数 MW 以上の大容量電力変換を行う場合、変換器に変圧器を使用することで大容量化を実現してきた。しかし、変圧器の使用は変換器重量・体積の増加を引き起こし、系統擾乱時に直流偏磁現象を引き起こすという問題がある。

このような背景の下、変圧器を用いずに大容量電力変換を実現するマルチレベル変換器に関する研究が、現在国内外問わず活発に行われている。各種マルチレベル変換器の中でも、モジュラー・マルチレベル変換器 (MMC: Modular Multilevel Converter) が次世代型電力変換器として今最も注目を集めている。

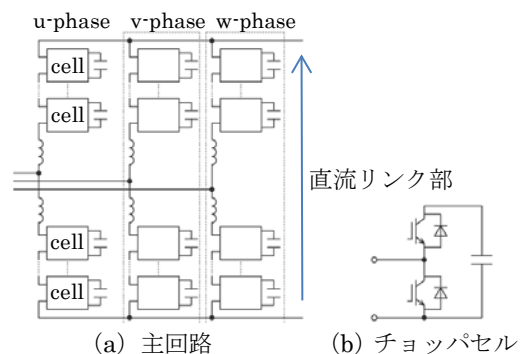


図1 MMCの回路構成

図1にMMCの回路構成を示す。MMCは変換器各アームをモジュールで構成する点に特長があり、各モジュールは図1(b)の双方向チョップパセルをカスケード接続している。MMCは実装が容易であることから高压用途に適しており、チョップパセル数を増加することで数10から数100 MWクラスの電力変換器にも適用でき、パワーエレクトロニクス分野の発展に多大なる貢献をすると考えられている。

(2) 次に、国内外におけるMMCの研究状況について言及する。上記の優れた利点を有するにも関わらず、現在MMCの実験的検証を行っているグループは少ない。これは、MMCが提案されて間もない回路という他に、制御の難しさが理由として挙げられる。MMCが正常に動作するためには、図1における複数の直流コンデンサの電圧均一化(電圧バランス)が必要不可欠である。しかし、数十個に及ぶ直流コンデンサの電圧バランスを制御により実現することは至難であり、当研究分野の関係者の間では実現不可能と考えられていた。

このような状況の下、申請者はMMCの有効性・将来性にいち早く着目し、平均値制御とバランス制御を併用した電圧バランス法を下記論文において提案した。

萩原, 赤木: 「モジュラー・マルチレベル変換器のPWM制御法と動作検証」, 電気学会産業応用部門誌, 128巻7号, pp.1363-1373, 2008

提案した電圧バランス法の有効性は、単相ハーフブリッジ回路を用いた実験的検証よ

り確認している。

更に、平成21年度~22年度の科学研究費若手(B)研究課題「三相モジュラー・マルチレベル変換器の実験的検証」に選出され、MMCを用いたモータドライブに関して検討を行った。研究室で設計・製作した400V, 15kWミニモデルを用いた実験的検証を行い、MMCを用いたモータドライブの実験的検証に世界で初めて成功した。その結果、制御性・高調波電圧低減、トルク脈動低減等の観点から、従来の電力変換器では達成できない優れた特性を示すことを明らかにした。

2. 研究の目的

申請者は世界に先駆けてMMCを用いたモータドライブに関して検討を行い、その有効性は400V, 15kWミニモデルを用いた実験的検証により確認した。しかし、実用化の際には解決しなければならない問題が存在する。そこで本研究では、ミニモデルを用いて下記問題を解決することを主目的とする

(1) 直流リンク部の簡略化

MMCの直流リンク部(図1(a))には、通常平滑用電解コンデンサ、およびリプル電流除去用のフィルムコンデンサを接続する。上記コンデンサを接続することで回生運転時の直流リンク電圧変動低減や制御性向上に寄与する半面、装置の大型化・高コスト化を招くという問題がある。

そこで本課題では、直流リンク部を簡略化した場合におけるMMCの挙動に関して検討を行う。初めに、簡略化した場合直流リンク部にスイッチングリプル電圧が発生することを明らかにする。次に理論解析を行うことで、スイッチングリプル電圧の最大値を明らかにする。

(2) 低速時の安定動作実現

MMCの直流コンデンサ電圧変動は、出力周波数(回転速度)に反比例し、電流量に比例するという特性を持つ。換言すると始動を含む低速動作時(低周波数動作時)も大電流が発生するには、直流電圧変動が増加する可能性がある。

上記を解決する手段として、正弦波状のコモンモード電圧と循環電流を利用する方法(正弦波方式)が提案されている。

A. J. Korn, M. Winkelnkemper, and P. Steimer, "Low output frequency operation of the modular multilevel converter," in *Conf. Rec. IEEE-ECCE 2010*.

これは、コモンモード電圧と循環電流間で瞬時有効電力を形成することで、電圧変動量を低減する点に特長がある。循環電流が増加す

るため、結合リアクトルの大型化・高重量化、および半導体素子の損失増大を引き起こすという問題がある。共通モード電圧（実効値）を増加することで循環電流を低減できるが、重畳できる電圧量には制限がある。

本課題では循環電流低減を目的とし、方形波状の共通モード電圧と循環電流を利用する方法（方形波方式）を検討する。方形波は振幅（最大値）と実効値が等しいため、同一の振幅を想定した場合、正弦波方式と比較して実効値を1.4倍に増加できる。その結果、正弦波方式と比較し循環電流のピーク値を50%（理論値）低減できることを示す。

(3) 安定した始動の実現

MMCを用いたモータドライブの安定した始動を実現する。誘導電動機に代表されるモータの始動法としては、速度フィードバック制御に基づくベクトル制御を用いた始動法、速度センサを使用しない速度センサレス始動法が一般的である。しかし、MMCを用いたモータドライブの始動法に関する検討は、現在まで十分に行われていなかった。

本課題では、MMCを用いたモータドライブに適した始動法を検討する。具体的には、前述の方形波方式とベクトル制御、速度センサレス制御を併用することで、零速からの安定した始動を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、MMCを用いたモータドライブの有効性に関して実験的検証を行う。具体的には、研究室で設計・製作した400V、15kWミニモデルを使用する。

(1) 直流リンク部の簡略化

初めに、直流リンク部に着目したMMCの等価回路を、適切な近似を用いることで導出する。その結果、直流リンク部に現れるスイッチングリップ電圧の最大値を導出する。次に、スイッチングリップ電圧を抑制するための手法を検討する。具体的には、小容量のフィルムコンデンサと低損失の抵抗から構成されるスイッチングリップ除去フィルタの適用を検討する。回路の伝達関数を求めることで、最適なフィルタ定数を選定する。次に、ミニモデルを用いた実験的検証を行うことで、スイッチングリップ電圧が低減できることを明らかにする。最後に、抵抗分の損失が変換器の定格容量と比較し十分に小さいことを明らかにする。

(2) 低速時の安定動作実現

低速時の安定動作を実現する手法として、先行研究において正弦波状の共通モード電圧と循環電流を利用する正弦波方式が提案されている。しかし、先行研究ではRL負

荷適用時の検討のみ行っており、モータ負荷適用時の検討は行っていない。そこで本課題では、モータ負荷適用時における正弦波方式の有効性を実験的に確認する。次に、循環電流低減を目的として方形波方式を提案・適用する。方形波方式を使用することで、循環電流のピーク値を理論上50%低減できることを示す。

(3) 安定した始動の実現

初めに、コンピュータシミュレーションによる検討を行う。シミュレーションには三菱社製「PSCAD Professional」を使用する。PSCADは電力系統用回路シミュレータとして信頼性の高いシミュレータであり、現在世界中の研究者・技術者により使用されている。

次に400V、15kWミニモデルを用いた実験検証を行い、安定した始動を実現する。各種制御法を比較し、MMCを用いたモータドライブに最適な始動法を確立する。

4. 研究成果

(1) 直流リンク部の簡略化

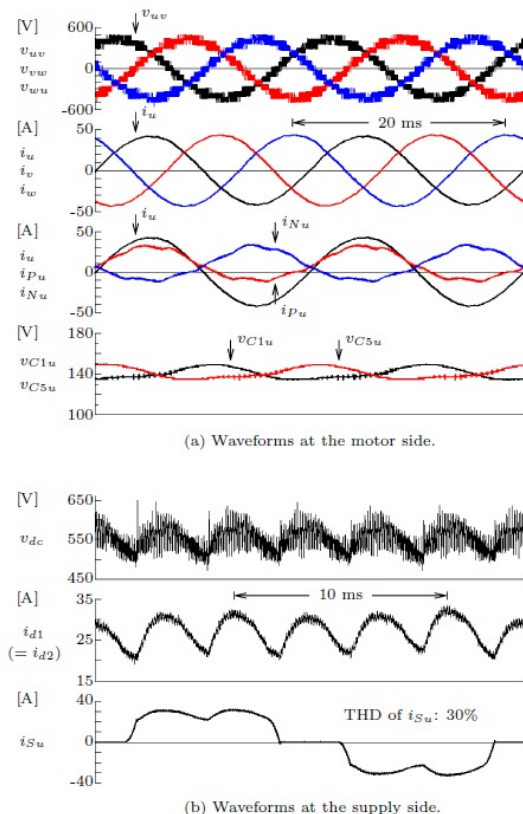


図2 モータ周波数50Hz、定格出力時の実験波形

図2に、モータ周波数50Hz、定格出力（15kW）時の実験波形を示す。図2(a)はモータ側の電圧・電流波形を、図2(b)は電源側の電圧・電流波形を表す。このとき、直流リンク

ク部にはコンデンサや直流フィルタを接続していない。

モータ電圧 v_{uv} に着目すると、マルチレベル波形となる。その結果、モータ電流 i_u は正弦波状となる。アーム電流 i_{pu} は直流分、基本波成分(50 Hz)、スイッチングリップ成分(8 kHz)の他に、ダイオード整流器に起因する6次成分を含む。直流コンデンサ電圧 v_{C1u} 、 v_{C5u} の直流分は指令値140 Vに良好に追従する。

直流リンク電圧 v_{dc} には直流分(540 V)、6次成分、リップ成分から構成される。リップ電圧の最大値は150 Vとなる。

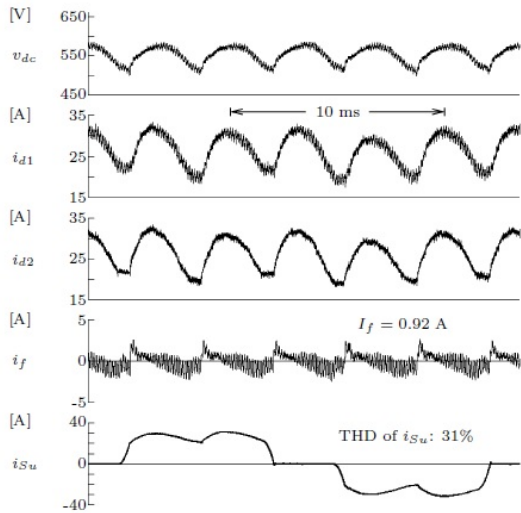


図3 直流フィルタ接続時の実験波形

図3に、直流フィルタ接続時の実験波形を示す。実験波形より、直流フィルタを接続することで、 v_{dc} に含まれるスイッチングリップ電圧を1/10以下に抑制できる。このとき、直流フィルタにおける損失分は、定格電力(15 kW)の0.03%と十分に小さいことを明らかにした。

(2) 低速時の安定動作実現

低速時の動作特性を検討するため、回転数は定格回転数(1500 min^{-1})の10%(150 min^{-1})で検討を行った。

図4に正弦波方式適用時の実験波形を示す。ただし、負荷トルクは定格トルクの40%とした。モータ電圧 v_{uv} に着目すると、低速運転時にもマルチレベル波形となり、高調波電圧を低減できる。その結果、モータ電流 i_u は正弦波状となる。

アーム電流 i_{pu} には、図2(a)の実験波形と異なり、45 Hzのコモンモード成分が存在する。その結果、アーム電流の最大値はモータ電流の最大値以上となる。コモンモード成分の増大は、変換器損失の増大や変換器に使用しているインダクタの重量・体積を増大させる要因となるため、できる限り抑制する必要がある。

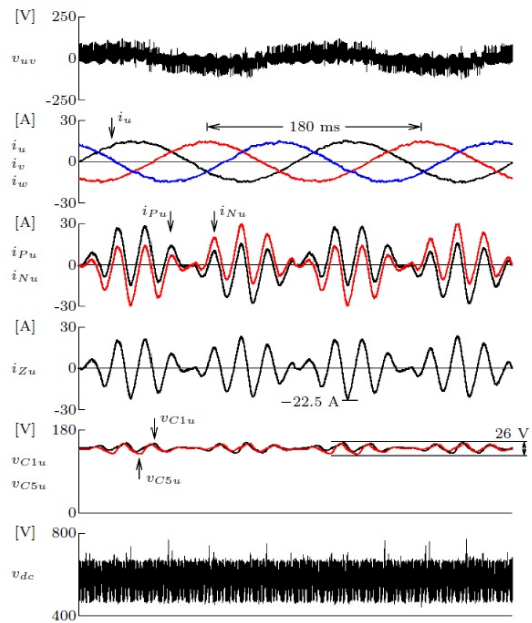


図4 正弦波方式適用時(150 min^{-1})の実験波形

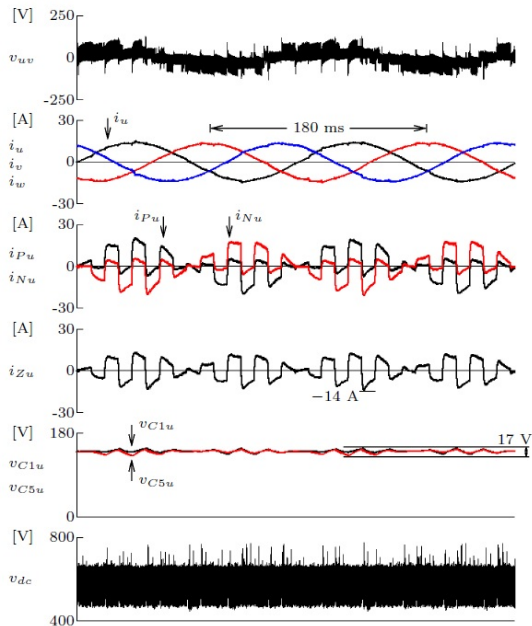


図5 方形波方式適用時(150 min^{-1})の実験波形

図5に、本課題で提案した方形波方式適用時の実験波形を示す。重畳するコモンモード成分以外の実験条件は、図4と同様である。実験波形より、循環電流 i_{zu} のピーク値を正弦波方式と比較し62%に低減できる。理論値50%との差異は、電流制御系の制御遅れに起因する。

一方、直流コンデンサ電圧 v_{C1u} 、 v_{C5u} に着目すると、低速時においても直流分は指令値140 Vに良好に追従する。また、直流リンク電圧 v_{dc} には、スイッチングリップ成分が存在する。しかし、スイッチング成分はMMCの低速動作に影響しない。

(3) 安定した始動の実現

一般的な2レベル変換器を用いたモータドライブの始動法としては

- 速度センサを用いたベクトル制御による始動法
 - 速度センサを使用しない始動法
- がある。そこで、本課題では上記の2制御法をMMCに適用することで、始動特性を評価した。

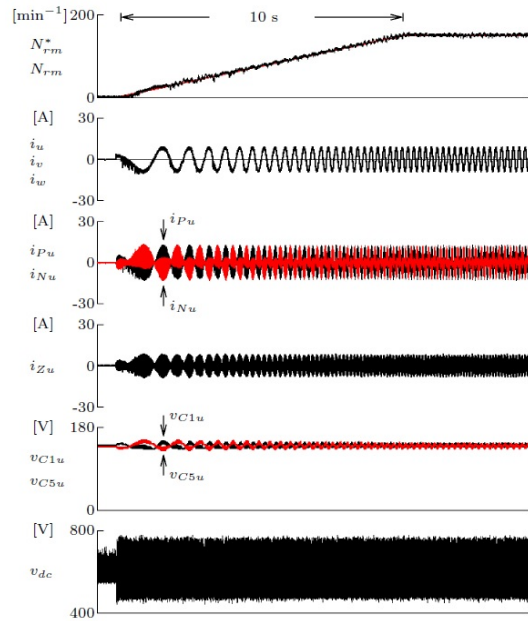


図6 ベクトル制御を用いた始動特性(無負荷時)

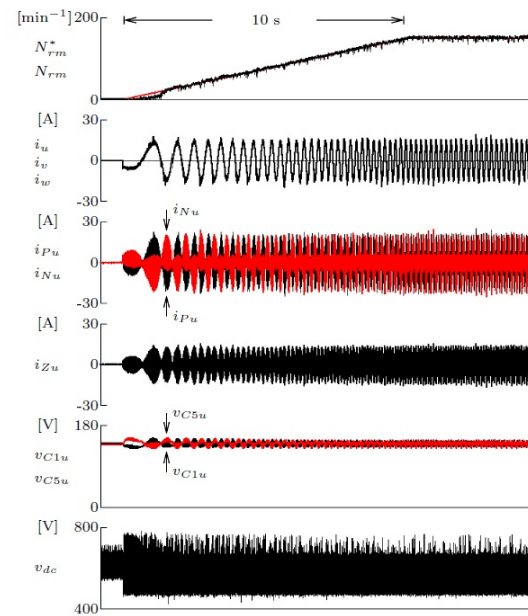


図7 ベクトル制御を用いた始動特性(負荷時)

図6に、ベクトル制御を用いた始動特性を示す。ただし、回転速度指令値は0から150 min^{-1} までランプ関数状に増加させた。また、負荷トルクは無負荷とした。実験波形より、

ベクトル制御を用いることで回転速度は指令値に対して良好に追従する。モータ電流 i_u は極低速運転時においても正弦波状となり、トルク脈動を低減できる。アーム電流 i_{pu} には循環電流成分が存在するが、ピーク値は定格(15 kW)時の30 A以下に抑制できている。直流コンデンサ電圧は始動時においても、直流分は140 Vに良好に追従する。また、交流分も直流分に対して20%以下と十分に小さい。

図7に、負荷トルクを定格の40%とした場合の始動特性を示す。実験波形より無負荷時同様に安定した始動を実現できている。

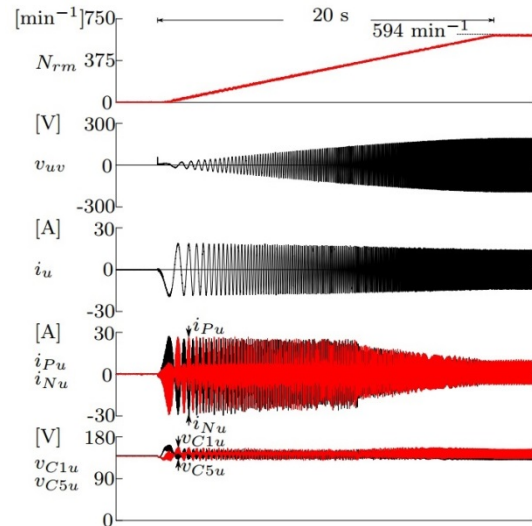


図9 速度センサを使用しない制御法を適用時の始動特性

図9に、速度センサを使用しない制御法を適用時の始動特性を示す。速度センサを使用しないため、速度センサを使用したベクトル制御適用時と比較し低コスト化が期待できる。本制御法は固定子電流(モータ電流)制御を利用する点に特長がある。具体的には、固定子電流の振幅を調整し、周波数はランプ関数状に増加させる。その結果、速度センサを用いることなく零速から安定した始動を実現できる。

図9では、モータ周波数を0 Hzから20 Hzまでランプ関数状に増加させている。また、負荷トルクは定格時の40%とし、固定子電流の振幅は定格時の40%とした。実験波形より、回転速度はランプ関数状に増加する。すべりが発生するため回転数の最終値は594 min^{-1} となる。アーム電流についても定格電流(32 A)以下に抑制できている。直流コンデンサ電圧の交流電圧変動幅は最大34 Vであり、直流分140 Vに対して十分に小さい。

以上より、MMCを用いたモータドライブが直流リンク部の簡素化(コンデンサレス化)、安定した低速運転、零速からの始動が実現できることを確認した。

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 4 件)

- ① 萩原 誠, 長谷川 勇, 赤木 泰文:
“Startup and Low-Speed Operation of an Electric Motor Driven by a Modular Multilevel Cascade Inverter (MMCI)”, IEEE Transaction on Industry Applications, 2013 年掲載予定, 査読有
- ② 萩原 誠, 長谷川 勇, 赤木 泰文:「モジュラー・マルチレベル・カスケードインバータ (MMCI-DSCC) を用いたモータドライブの低速運転」電気学会産業応用部門誌, 132 巻, 1072-1079, 2012, 査読有
- ③ ペンヒュイ, 萩原 誠, 赤木 泰文:
“Modeling and Analysis of Switching-Ripple Voltage on the DC Link Between a Diode Rectifier and a Modular Multilevel Cascade Inverter (MMCI)”, IEEE Transaction on Power Electronics, 28 巻, 75-84, 2013, 査読有
- ④ 萩原 誠, ペンヒュイ, 赤木 泰文:「モジュラー・マルチレベル・カスケードインバータ (MMCI-DSCC) の共通直流リンクに発生するスイッチングリップル電圧の検討」電気学会産業応用部門誌, 131 巻, 1424-1432, 2011, 査読有

[学会発表] (計 2 件)

- ① 萩原 誠, 長谷川 勇, 赤木 泰文, Startup and Low-Speed Operation of an Adjustable-Speed Motor Driven by a Modular Multilevel Cascade Inverter (MMCI),” Proceedings of 2012 IEEE 4th Energy Conversion Congress and Expo (ECCE2012), 査読有, pp.718-725, Raleigh, 2012.09.15~20
- ② 岡崎 佑平, 萩原 誠, 赤木 泰文, モジュラー・マルチレベル・カスケードインバータ (MMCI-DSCC) を用いた誘導電動機の世界速度センサレス始動法, 平成 25 年電気学会全国大会, 4-047, 2013.03.20~22

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩原 誠 (Hagiwara Makoto)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 20436710