

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	モジュラー・マルチレベル・カスケード 間接交流/交流変換システムを用いた高圧交流電動機の可変速駆動
Title(English)	
著者(和文)	岡崎佑平
Author(English)	Yuhei Okazaki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10470号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:赤木 泰文,安岡 康一,七原 俊也,千葉 明,藤田 英明,松本 康
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10470号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

モジュラー・マルチレベル・カスケード 間接交流/交流変換システムを用いた 高圧交流電動機の可変速駆動 —博士論文の要旨—

岡崎 佑平

高圧交流電動機は、オイル、ガス、水道、鉄鋼、炭鉱産業で使用されている。数 kV、数 MW クラスの高圧交流電動機として誘導電動機と同期電動機が使用されている。一般に電動機効率の観点から、誘導電動機は 40 MW 以下の電動機駆動に、同期電動機はそれ以上の電動機駆動に利用されている。電動機の回転子には、ファン・コンプレッサ、ポンプ、コンベアに代表される電動機負荷が接続される。ファン・コンプレッサ、ポンプ、コンベアはすべての電動機負荷の 85% を占めている。現在までに、最大定格電圧 13.8 kV の高圧電動機が実用化されている。これを、さらに高圧化する場合、発電所で用いられている発電機(同期電動機)の技術が適用できる。この理由として、発電機と電動機は基本的に構造が同一であるためである。高圧発電機の定格電圧は、誘導発電機で 13 kV、同期発電機で 27 kV 程度まで利用可能である。また、70 kV 級の超高圧同期電動機の開発も行われている。このように、現状の技術で高圧電動機が実現可能である。

電動機の高効率運転のためには、電動機の可変速駆動が必須である。電動機の可変速駆動には、電力システムの固定電圧、周波数の三相交流を可変電圧、電流の三相交流に変換する必要がある。上記を達成するためには、パワーエレクトロニクス技術を活用した三相交流/三相交流電力変換システムが必要である。三相交流/交流電力変換システムとして、直接三相/三相交流変換システムと直流あるいは単相交流リンクを用いる間接三相/三相交流変換システムがある。本論文では、後者に着目する。本論文で着目する高圧・大容量電動機の可変速駆動には、数 kV から数十 kV、数 MW クラスの間接交流/交流変換システムが必要である。

高圧・大容量の間接交流/交流変換システムの構成要素として、直流(単相交流)/交流変換器であるモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)に着目する。ここで、単位セルの種類、類似変換器と明確に区別をするために、本論文では、MMC を二重スター(チョッパ/ブリッジ)方式のモジュラ

一・マルチレベル・カスケード変換器と呼ぶ。以下では、英語名称の Double Star Chopper/Bridge Cell を略して DSxC(x は C または B)変換器と呼ぶ。電動機駆動用 DSxC 変換器について、2009 年以降、多数の学術論文が発表されてきた。多くの研究は、DSxC 変換器の制御自由度である循環電流と電動機のコモンモード電圧の両方あるいは片方を活用したコンデンサ電圧の管理、電動機の安定した始動、コンデンサ容量の低減について検討している。このほかにも、DSxC 変換器の高効率化や特殊な応用を目指した研究が行われている。その結果、本研究開始年の 2012 年には、DSCC 変換器を用いた誘導電動機の可変速駆動が達成された。2016 年には、中国の研究機関(Chinese academy of sciences)から 10 kV, 3.25 MW の電動機駆動、ドイツの研究機関(Siemens)から 6.9 kV, 15 MW の電動機駆動の試験結果が学術論文で報告されている。このように、現在では DSCC 変換器を用いた電動機駆動の技術は実用化レベルまで十分に達している。

しかし、本研究開始年の 2012 年には、次の 4 つの課題について未解決であった。

- (1) 環電流を使用しないコンデンサ容量の低減
- (2) 高圧・高速同期電動機の駆動
- (3) 高圧電動機の電気制動
- (4) 複数台の電動機駆動

第 1 の課題は、敷地面積に制約のあるような電動機の応用で要求されている。これは、コンデンサが単位セル体積の 70%程度を占めることに起因する。2012 年時点では、循環電流を活用するコンデンサ容量の低減方法が提案されていた。2016 年現在も多数の研究者がこの課題に取り組んでいる。しかし、パワーデバイスの電流容量の増加なしでコンデンサ容量を低減可能な方法は検討されていなかった。

第 2 の課題は、液化天然ガスやオイルパイプラインで使用されるコンプレッサの用途で要求されている。2013 年まで、高圧・大容量の同期電動機駆動について報告されていなかった。現在(2016 年)製品化されている DSCC 変換器には、顧客の依頼に応じて同期電動機駆動の機能を提供している。しかし、同期電動機の零速ロック時や低出力時の運転特性に関して未検討であった。

第 3 の課題は、大容量・大慣性のファンやコンプレッサの応用で定期点検や緊急停止のために要求される。ドイツの研究機関から発表された学術論文では、DSCC 変換器を 2 台使用する Back-to-Back システムを用いた場合の電動機の制動方法についてシミュレーションで検討している。しかし、DSCC 変換器の制御についての詳細が記述されておらず、実験検証も行われていない。また、ドイツの研究機関(Siemens)より実用化されている DSCC 変換器には、電動機の制動をオプション機能として追加できることを明記している。しかし、DSCC 変

換器の制動についての詳細が記述されていない。また、上記文献と製品では DSCC 変換器の直流リンクに制動抵抗を集中して配置する方法を検討している。DSCC 変換器の単位セルに制動抵抗を分散して配置する方法については未検討であった。

第4の課題は、水道局のポンプや炭鉱用のコンベアの用途で要求されている。ドイツの研究機関から発表された特許では、DSCC 変換器を用いた多相システムが報告されている。これは、複数台の電動機駆動用として直接使用可能である。しかし、同特許は変換器トポロジーに関するもので制御や運転特性に関する詳細な記述はされていない。また、筆者の知る限り、DSxC 変換器を使用する複数台の電動機駆動に関する学術論文は、本研究の成果をまとめた論文まで報告されていなかった。

本論文は、DSxC 変換器を用いたモジュラー・マルチレベル・カスケード間接交流/交流変換システムに着目し、上記4つの未解決課題の一解法を提示することを目的とする。本論文では従来着目されていなかった DSxC 変換器の次の特長に着目する。

「DSxC 変換器の2端子側の瞬時電力と3端子側の瞬時電力は、その平均値が一致していれば瞬時値は必ずしも一致する必要がない」

上記は、DSxC 変換器の単位セルにエネルギーバッファとなるコンデンサを含むためである。これは、2端子側の電圧・電流と3端子側の電圧・電流の振幅、位相、周波数が独立に制御できることも意味する。本論文はこの特長を活用した変換器構成と制御法を検討する。検討する変換器構成と制御の妥当性は、Mathematica を用いた数値解析、PSCAD/EMTDC を用いた回路シミュレーション、400 V, 15 kW, 16 段/レグの DSCC インバータを用いた実験のすべてあるいは2つを用いて確認する。

本論文は、次の7章と付録 A, B, C で構成する。

第1章 序論

本章は、本論文の背景となる高圧交流電動機駆動の課題と、電動機の可変速駆動システムの高圧化についてまとめる。そして、本論文の着眼点と目的について明確化する。

第2章 高圧間接交流/交流変換システム

本章は、高圧間接交流/交流変換システムの現状の技術動向をまとめる。始めに、間接交流/交流変換システムについて、変換器構成、機能、利点と欠点についてまとめる。次に、本論文で着目するモジュラー・マルチレベル・カスケード間接交流/交流変換システムの構成と機能を示す。最後に、本研究で使用する DSxC

変換器の実験システムと制御法についてまとめる。

第 3 章 電動機電流の位相を活用したコンデンサ容量の低減

本章は、高圧誘導電動機と同期電動機を駆動する DSCC インバータのコンデンサ容量低減に着目する。本章の制御は、電動機の電流位相を活用することでコンデンサ容量を低減する点に特長がある。制御の妥当性は、理論、数値解析、400 V, 15 kW, 16 段/レグの実験システムを用いた実験により検証する。本章の内容は、後述する発表論文の項の学術論文誌[1]と[2]に該当する。

第 4 章 零/低出力領域におけるコンデンサ電圧バランス制御性能の向上

本章は、第 3 章の同期電動機制御を適用した場合に課題となるコンデンサ電圧のバランス制御について検討する。本章のバランス制御は、同期電動機の電流位相を活用することで、電動機無負荷時あるいは低出力領域時にすべてのコンデンサ電圧を均一化する。制御の妥当性は、数値解析と実験により検証する。本章の内容は、後述する学術論文誌[3]に該当する。

第 5 章 ダイオード整流器を使用した電動機駆動用 DSCC インバータの発電制動

本章は、ダイオード整流器を使用する電動機駆動用 DSCC インバータの発電制動について検討する。本論文では、集中制動抵抗を使用した電動機の発電制動を「集中発電制動」と呼び、分散制動抵抗を使用した発電制動を「分散発電制動」と呼ぶ。本章の発電制動時の制御は、DSCC インバータの直流リンク電圧と電流の振幅制御を活用することで、交流遮断機を開極せずに系統からの電力を遮断できる点に特長がある。分散発電制動の回路構成により、発電制動のみでなくコンデンサ電圧の直流過電圧保護も実現する。検討した回路と制御の妥当性は、数値解析、シミュレーション、実験により検証する。本章の内容は、後述する学術論文誌[6]に該当する。

第 6 章 複数台の交流電動機を駆動する DSBC システム

本章は、DSBC 変換器を使用した複数台の高圧電動機を駆動するシステムについて検討する。本章のシステムは、1 台の系統連系 DSBC 変換器と複数台の DSBC 変換器の共通リンク電圧と電流の振幅、位相、周波数の自由度を活用することで単相中間周波交流リンクを形成する。これにより、従来の DSCC 変換器と比較して大幅なコンデンサ容量の低減が実現できる。検討するシステムの妥当性は、数値解析とシミュレーションにより検証する。本章の内容は、後述する学術論文誌[4]に該当する。

第 7 章 結論

本論文における成果を要約し、今後の課題についてまとめる。

付録 A 高圧三相交流/交流変換システムを用いた電動機駆動の数値比較

本付録では、4 種類の次世代高圧電動機システムのコンデンサ容量とパワーデバイスの電流容量に関する数値比較を行う。本付録では、商用周波数で駆動する電動機と低速・大トルクの電動機について着目する。本付録は、第 1 章、第 2 章に関連する。

付録 B DSCC インバータを用いたシステムの系統電流高調波抑制

本付録では、12 パルスダイオード整流器を使用する DSCC インバータシステムの系統電流高調波について検討する。このシステムは、2 台の DSCC インバータの直流リンク電流の自由度を活用することで、系統側にフィルタ回路を一切使用せずに系統電流を正弦波状に制御できる。システムと制御の妥当性は、シミュレーションにより検証する。本付録は、第 2 章と後述する国内会議[7]に関連する。

付録 C 誘導電動機電流を活用した速度センサレス制御

本付録では、誘導電動機電流を活用した簡易な速度センサレス制御を検討する。速度センサレス制御は、負荷トルクや速度変化が緩やかなファンやコンプレッサの駆動に適している。制御の妥当性は、400 V, 15 kW, 8 段/レグの DSCC インバータを用いた実験により検証する。本付録は、第 3 章と後述する学会論文誌[1]の内容に関連する。

発表論文

学術論文誌

- [1] Y. Okazaki, M. Hagiwara, and H. Akagi, “A speed-sensorless start-up method of an induction motor driven by a modular multilevel cascade inverter (MMCI-DSCC),” *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 50, no. 4, pp. 2671–2680, Jul./Aug. 2014.
- [2] 岡崎 佑平, 松井 仁志, M. M. Muhoro, 萩原 誠, 赤木 泰文: 「モジュラー・マルチレベルDSCC インバータのコンデンサ電圧変化幅を最小化する誘導電動機の制御法:二乗低減トルク負荷への応用」, 電学論D, vol. 136, no. 5, pp. 336-345 (2016-5).
- [3] Y. Okazaki, H. Matsui, M. M. Muhoro, M. Hagiwara, and H. Akagi, “Capacitor-voltage balancing for a modular multilevel DSCC inverter driving a medium-voltage synchronous motor,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 5, pp. 4074–4083, Sept/Oct. 2016.
- [4] 岡崎 佑平, 赤木 泰文: 「複数台の高圧電動機を駆動する中間周波数絶縁形モジュラー・マルチレベル・DSBC 変換器システムの検討」, 電学論D, vol. 136, vol. 12, pp. 1005-1014 (2016-12).
- [5] Y. Okazaki, W. Kawamura, M. Hagiwara, H. Akagi, T. Ishida, M. Tsukakoshi, and R. Nakamura, “Experimental comparisons between modular multilevel DSCC inverters and TSBC converters for medium-voltage motor drives,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1805–1817, Mar. 2017.
- [6] 岡崎 佑平, 塩田 駿, 赤木 泰文: 「モジュラー・マルチレベル・DSCCインバータを使用する誘導電動機の発電制動」, 電学論D, vol. 137, no. 2, pp. 175-182 (2017-2).

国際会議

- [1] Y. Okazaki, M. Hagiwara, and H. Akagi, “A speed-sensorless start-up method of an induction motor driven by a modular multilevel cascade inverter (MMCIDSCC),” *Proc. IEEE-ECCE*, Sept. 2013, pp. 1473–1480.
- [2] Y. Okazaki, M. Hagiwara, and H. Akagi, “A speed-sensorless start-up method of an induction motor driven by a modular multilevel cascade inverter (MMCIDSCC)—Applications to quadratic-torque loads like fans, blowers, and compressors—,” *Proc. IEEE-IFEEEC*, Nov. 2013, pp. 471–475.
- [3] Y. Okazaki, H. Matsui, M. Hagiwara, and H. Akagi, “Research trends of modular

multilevel cascade inverter (MMCI-DSCC)-based medium-voltage motor drives in a low-speed range,” *Proc. IEEE-IPEC*, May 2014, pp. 1586–1593.

[4] Y. Okazaki, H. Matsui, M. Hagiwara, and H. Akagi, “Design considerations on the dc capacitor of each chopper cell in a modular multilevel cascade inverter (MMCI-DSCC) for medium-voltage motor drives,” *Proc. IEEE-ECCE*, Sept. 2014, pp. 3393–3400.

[5] Y. Okazaki, H. Matsui, M. M. Muhoro, M. Hagiwara, and H. Akagi, “Enhancement on capacitor-voltage-balancing capability of a modular multilevel cascade inverter for medium-voltage synchronous-motor drives,” *Proc. IEEE-ECCE*, Sept. 2015, pp. 6352–6359.

[6] Y. Okazaki, M. Hagiwara, and H. Akagi, “Multiple medium-voltage motor drives using modular multilevel cascade converters with medium-frequency transformers,” *Proc. IEEE-IFEEC*, Nov. 2015, pp. 1–6.

[7] Y. Okazaki, W. Kawamura, M. Hagiwara, H. Akagi, T. Ishida, M. Tsukakoshi, and R. Nakamura, “Which is more suitable for MMCC-based medium-voltage motor drives, a DSCC inverter or a TSBC converter?,” *Proc. IEEE-ICPE*, Jun. 2015, pp. 1053–1060.

国内会議

[1] 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センサレス始動法」, 平成25年電気学会全国大会, 4-047, pp. 82-83 (第4 分冊) (2013-3).

[2] 岡崎佑平, 萩原誠, 赤木泰文: 「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器 (MMCI-DSCC) を用いた誘導電動機の世界センサレス始動法-全速度領域に亘る始動特性-」, 平成25 年電気学会産業応用部門大会, 1-65, pp. 1-285-288 (2013-8).

[3] 岡崎佑平, 松井仁志, 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) を用いた高圧モータドライブの二乗低減トルク負荷への応用」, 平成26 年電気学会全国大会, 4-048, pp. 77-78 (第4 分冊) (2014-3).

[4] 岡崎佑平, 松井仁志, 萩原誠, 赤木泰文: 「高圧・大容量モータドライブ用モジュラー・マルチレベル・カスケード・インバータ (MMCI-DSCC) の高効率制御法-ファン, ブロア負荷への応用-」, 平成26 年電気学会産業応用部門大会, 1-030, pp. 161-166 (第4 分冊) (2014-8).

[5] 岡崎佑平, 松井仁志, M. M. Muhoro, 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) を用いた交流電動機の世界駆

動時における最適循環電流波形選定」, 平成27 年電気学会全国大会, 4-121, pp. 202-203 (第4 分冊) (2015-3).

[6] 岡崎佑平, 萩原誠, 赤木泰文: 「複数台の高圧・大容量電動機を駆動する高周波交流リンクモジュラー・マルチレベル・カスケード・コンバータ(MMCC)」, 平成27 年電気学会産業応用部門大会, I-139-144 (2015-8).

[7] 岡崎佑平, 赤木泰文: 「12 パルス整流器とモジュラー・マルチレベルDSCC インバータを使用する電動機駆動システムの系統電流高調波の抑制」, 平成28 年電気学会全国大会, 4-149, pp. 248-249 (第4 分冊) (2016-3).

共著論文

[1] 松井仁志, 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) を用いた同期電動機の実験検証」, 平成26年電気学会全国大会, 4-047, pp. 75-76 (第4 分冊) (2014-3).

[2] 松井仁志, 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) の直流コンデンサ電圧変動を最小化する交流電動機制御」, 平成26 年電気学会研究会, MD2015, pp. 31-36 (2015-1).

[3] 川村弥, 岡崎佑平, 萩原誠, 赤木泰文: 「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器を用いた高圧大容量モータドライブ: DSCC とTSBC の比較」, 平成26 年電気学会産業応用部門大会, 3-S1-3, pp. III-11-16 (2014-8).

[4] 松井仁志, 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) を用いた同期電動機駆動における直流コンデンサ電圧変動幅の解析と実験」, 平成27 年電気学会全国大会, 4-120, pp. 202-203 (第4 分冊) (2015-3).

[5] 塩田駿, 岡崎佑平, 赤木泰文: 「モジュラー・マルチレベル・DSCC インバータを用いた高圧誘導電動機の発電制動」, 平成28 年電気学会産業応用部門大会, 3-1, pp. III-89-94 (2016-9).

表彰等

[1] IEEE IAS 2013 IPCC Third Prize Paper Award (学会誌論文[1]).

[2] IEEE ECCE 2014 Student Presentation Winner (国際会議[4]).

[3] IEEE IAS 2015 IPCC Third Prize Paper Award (学会誌論文[3])

[4] 平成27 年度電気学会産業応用部門大会優秀発表賞(部門表彰)

(国内会議[6])

[5] 平成28 年度電気学会全国大会優秀発表賞 (国内会議[7])

[6] 日本学術振興会特別研究員DC2 (2015/04-2017/03)

[7] Internship, ABB corporate research center Sweden
(2016/04-2016/07)