

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25年 5月21日現在

機関番号： 12501
 研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2010～2012
 課題番号： 22560264
 研究課題名（和文）
 集積化を指向した低ノイズ高パワー密度フライングキャパシタコンバータ
 研究課題名（英文）
 Low-Noise High Power Density Flying Capacitor Multi-Level Converters
 for Circuit Integration
 研究代表者
 佐藤 之彦（SATO YUKIHIKO）
 千葉大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号： 50205978

研究成果の概要（和文）：

フライングキャパシタ方式のマルチレベルコンバータは、キャパシタを小型化できる可能性を持つことから、実用化に向けた集積化に適している。本研究では、この方式に関して、キャパシタ電圧の挙動について詳細に解明し、これを安定に保つための条件を明らかにした。さらに、電磁ノイズの発生機構とその低減に向けた指針を明らかにするとともに、集積化に適したゲート回路方式やその絶縁電源の構成法を明らかにし、これらに基づいて試作回路を製作し、最近の2レベルインバータと同等以上のパワー密度（体積あたりの変換器出力）が得られることを実証した。

研究成果の概要（英文）：

Flying capacitor multi-level converters are suitable for circuit integration due to their possibility in reduction of size of capacitors. In this research, behavior of the capacitor voltage is analyzed in detail and a method for stabilizing the capacitor voltage is proposed. Furthermore, generation mechanism and guideline for reduction of electromagnetic noise are clarified, and an implementation of gate driver circuit and their floating power supply suitable for the circuit integration are established. Based on these investigations, several prototypes of the flying capacitor multi-level converter have been constructed. The prototypes have achieved higher output power density than state-of-the-art 2-level inverters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	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： 電力変換器，マルチレベル，高パワー密度，高調波低減，集積化

1. 研究開始当初の背景

近年、二酸化炭素排出量削減やエネルギー資源の有効利用の観点から、エネルギーの有効

利用や再生可能エネルギーの導入に対する要求がこれまで以上に高まってきている。こうした動きに responding していくためには、エネルギー

一の流れの高度な制御が可能でシステム全体でのエネルギー損失を極限まで削減できること、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの導入が容易に行えること、高効率の熱源としてのヒートポンプの利用拡大に対応できることなどの観点から、電気エネルギーを中心とする社会に移行していく必要性が指摘されている。こうした電気エネルギー利用の拡大に伴って、直流電源から任意の電圧、周波数、位相の交流電力を発生することのできるインバータの果たすべき役割は、さらに拡大していくと考えられる。すなわち、モータを利用した多様なシステムを高効率運転する場合や、太陽光発電や燃料電池などの環境に配慮したエネルギー源から得られる直流電力を交流電力ネットワークに供給する場合など、これまでより広範囲の用途でインバータを利用可能にしていく必要がある。このようなインバータの利用範囲を飛躍的に拡大していくためには、これまでインバータの導入を阻んできた、電磁雑音、高調波、設置スペース、コストなどの問題を解決していく必要がある。

本研究は、このうち、高調波や電磁ノイズの発生を原理的に低減できるマルチレベル方式のインバータについて、出力レベル数を大きく増やすことにより、飛躍的な高調波や電磁ノイズの低減を実現するとともに、回路を集積化することにより、小容量のインバータにおいてもマルチレベル回路方式の導入を容易にし、インバータの利用範囲の一層の拡大を実現する。

インバータの出力の含まれる高調波の影響を軽減するには、スイッチング周波数を高めることが有効である。昨今のパワー半導体素子の高速化の動きにも加速されて、インバータを高いスイッチング周波数で動作させようとする検討が進められている。申請者も関連プロジェクトへの参画や、科学研究費補助金による研究などを通して、高スイッチング周波数のパルス幅変調(PWM)制御技術について研究を行ってきた。従来型のインバータの出力電圧波形は、2値的なパルス列であり、多量の高調波成分を含み、スイッチングによる電圧の変化幅が大きいことから、電磁ノイズの発生が大きい。これに対して、マルチレベル方式のインバータの出力電圧波形は階段状の波形であり、スイッチングによる高調波が少なく、電圧の変化幅が小さいため電磁ノイズの発生も少ない。このため、本質的にクリーンなインバータを実現する上で有力な方式であり、本研究は、この点に着目して立案したものである。

マルチレベル変換器は、回路の素子数が多くなるデメリットがあり、変換器全体の定格電圧に対して素子の所要耐圧を低くできるメリットを享受できる比較的容量の大きい

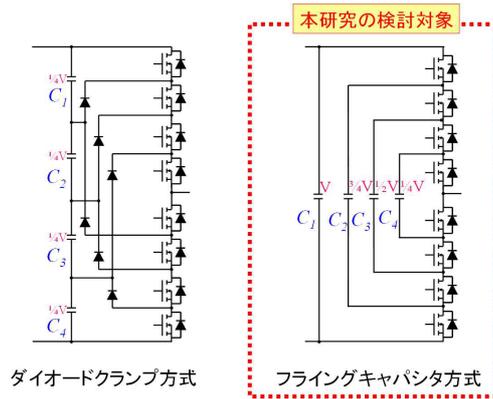


図1 マルチレベルインバータの回路方式

インバータに用いられている技術であり、種々の方式が検討されている。本研究では、小容量の用途でもマルチレベル方式を導入することを目的に、素子数が多くなることによるデメリットを抑えるべく、主回路の集積化を視野に入れる。また、この集積化により、個別素子での構成が実用的に困難な超多レベルのインバータの実現も可能となる。このため、変圧器などの集積化が困難な要素を用いない方式として、図1に示すダイオードクランプ方式と、フライングキャパシタ方式を候補に絞った。このようなマルチレベルインバータの集積化を将来の目標として、申請者らは2006年より一連の研究を開始しており、その成果の一部については、論文発表や特許出願などを行ってきた。

図1では、それぞれの方式について5レベルの場合について、1相分を示している。当初は、3レベルで実用化されているダイオードクランプ方式を最有力の候補として検討を進めてきたが、分圧コンデンサのうち中心に位置するC2, C3と、上端、下端に位置するC1, C4の電圧間にアンバランスを生じ、これを解消するためにバランス回路を付加する必要があり、その処理電力がインバータの出力の半分程度になることが分かった。一方、フライングキャパシタ方式は、欧米で検討例が見られるが日本国内では検討例の報告がなく技術的に不安があることから、当初は検討の候補に加えなかった。申請者が、平成21年度に予備検討を行った結果、位相差を持つ搬送波で各スイッチ素子をPWM制御を行うと、補償回路や特別な制御を施さなくても分圧コンデンサC1~C4の電圧が規定値で平衡することが実験的にも示された。このような利点から、フライングキャパシタ方式を有力な候補の一つとして、詳細に検討する必要が生じた。

2. 研究の目的

フライングキャパシタマルチレベルイン

バータは検討例が少なく、基本的な特性に関してさえも十分明らかになっていない点がある。本研究では、フライングキャパシタ方式の集積化マルチレベルインバータとしての可能性を評価するために、以下の点を理論的、実験的に明らかにすることを目的とする。

- ・分圧コンデンサの電圧の平衡が保たれるメカニズムを明らかにし、その負荷条件（電流、力率など）依存性について解明する
- ・主回路の動作による主回路各部電位の複雑な変化に起因する問題点について明らかにし、その軽減に向けた主回路実装上の指針を明らかにする
- ・分圧コンデンサの所要容量の設計法を確立する

以上の理論検討結果を三相インバータの実験装置を構築して確認する。

3. 研究の方法

本研究は、研究分担者を置くことなく申請者が研究代表者として単独で実施し、研究機関の3年間において常時3名以上の大学院生を含む5名程度の学生を研究協力者とする実施体制を組み、当研究室の主要な研究テーマとして遂行した。

本研究で構築するフライングキャパシタマルチレベルインバータの主回路は、平成22年度は第一次実験装置として三相5レベルインバータを製作し、その経験を踏まえて、平成23年度以降には、第二次および第三次実験装置として三相7レベルインバータを製作した。第二次、第三次試作においては、表面実装のMOSFETやキャパシタなどを使用し、パワー密度を高めることの具体的な検討も目的として研究を進めた。各年度の研究計画・方法は以下のとおりである。

平成22年度 これまでのフライングキャパシタ方式のマルチレベルインバータに関する予備的研究で蓄積した制御や回路動作に関する知見をもとに検証用の第一次実験装置を構築することを中心に以下の段階を追って実施した。

- [1] パワーエレクトロニクス回路用シミュレーションソフトPSIMを用いてシミュレーションモデルを構築した。その際、これまでの検討において、理論的動作解析結果で実験結果が説明しきれていない部分の解明を目指し、回路の寄生パラメータやパワーデバイスの損失なども考慮し、精度の高いシミュレーションモデルを構築した。
- [2] 前項の結果も踏まえて、理論的検討結果や構築した設計法の妥当性を検証するための第一次原理検証システムとして、小容量の第一次実験装置を製作した。インバータとしての諸現象を解明するために回路は三相インバータとし、分圧点

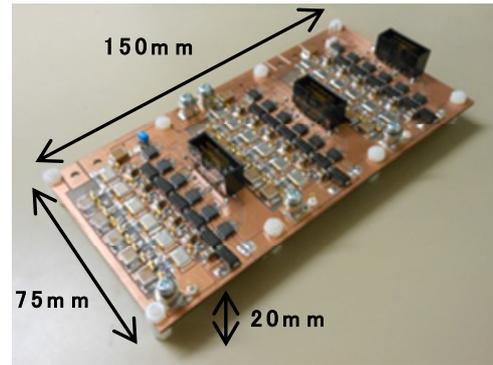


図2 試作したフライングキャパシタ方式マルチレベルインバータ

電圧に関する現象を再現するための最小レベル数である5レベルインバータとして構築した。

- [3] 以上の理論的、実験的結果を整理し、フライングキャパシタ方式のマルチレベルインバータの基礎特性を系統立てて明らかにした。その結果を、IEEEの国際会議ECCEや電気学会の大会や研究会で発表した。さらに発表内容に関して、国内外の研究者や主要メーカーの技術者と意見交換を行い、次年度以降の研究計画に反映した。
- [4] 回路の浮遊インダクタンスやキャパシタンス、パワーデバイスの損失分などを考慮した分圧点電圧の変動のメカニズムを明らかにし、第二次実験装置の構築の際に役立つ知見を得た。

平成23、24年度 平成22年の検討で得られた知見を活かして、モータ駆動が可能な程度に容量を増やした第二次実験装置の構築を中心に以下の段階を追って実施した。

- [1] 購入した試作用部品を使用して、1.5kWの誘導電動機を駆動できる3kVA程度の規模で、第二次実験装置として、実証用の三相7レベルのフライングキャパシタマルチレベルインバータを試作した。200Vの三相誘導電動機を駆動するインバータとして、特性の優れた耐圧100V以下のMOSFETを使用することを想定し、レベル数を7レベルとした。装置構築の際には、平成22年度に製作した第一次実験システムにおける知見を活用した。
- [2] 第二次実験装置を用いて、種々の負荷状態について、設計パラメータを変更した場合の分圧点電位の変動や回路の損失などを観測・測定した。以上を踏まえ、平成22年度の理論的な検討結果の妥当性を検証した。
- [3] 第二次実験装置における理論的、実験的検討結果を中心にして国際会議論文を取りまとめ、IEEE ECCEや電気学会の大

会や研究会などで継続的に成果発表を行った。

- [4] 平成24年度は、3年間の研究成果を総括し、検討の集大成として第三次実験装置を構築して検討を進めた。また、ダイオードクランプ方式など他のマルチレベル方式との比較を行い、その結果を踏まえて、フライングキャパシタ方式マルチレベルインバータの超多レベル化を実現する技術としての有効性について検討した。さらに、これらの研究成果を、国内外の関連の論文誌などに投稿する準備を進めており、一部は投稿を完了している。
- [5] 本研究の成果を踏まえ、マルチレベルインバータの集積化を実際に行う場合の問題点と、その解決策の指針を明らかにする。さらに、その指針をもとに、集積化の実証研究を具体的に立案につなげる。

4. 研究成果

3年間の研究期間における研究成果は、以下のように要約できる。

- [1] コンピュータシミュレーションによりフライングキャパシタ方式マルチレベルインバータの動作解析を行い、直流電圧変動に関する現象解明を行った。その結果、ゲート駆動信号の伝達遅延の素子ごとの差異が主たる影響を及ぼしていることを理論的に明らかにした。平成22年度に理論的に解明したフライングキャパシタ電圧の変動に関して、検証実験を実施し、構築した理論の妥当性を実証した。
- [2] 第一次原理検証システムとして、小容量の第一次実験装置としてフライングキャパシタ方式の5レベル三相インバータを試作し、基礎特性に関する実験データを取得した。また、動作条件に対する損失および効率の変化についてのデータを取得し、高効率化に向けた指針を明らかにした。第二次実験装置として、出力500Wのフライングキャパシタ方式の7レベル三相インバータを試作し、基礎特性に関する実験データを取得した。この試作装置では、主回路スイッチ素子の所要耐圧が低くできることから低耐圧で低オン抵抗の表面実装タイプのMOSFETを採用することにより、高効率を実現すると同時に放熱器を不要とすることができ、集積化の実現可能性を明確にすることができた。第三次実験装置として、出力800Wのフライングキャパシタ方式の7レベル三相インバータを試作し、基礎特性に関する実験データを取得した。この試作装置では、第二次試作

装置と同様に主回路スイッチ素子の所要耐圧が低くできることから低耐圧で低オン抵抗の表面実装タイプのMOSFETを採用することにより、高効率を実現すると同時に放熱器を不要とすることができ、集積化の実現可能性を明確にすることができた。さらに、第二次試作装置に比較して高効率化と小型化を向上させ、最高効率99.0%、パワー密度3.56W/ccを実現した。

- [3] マルチレベル化による出力波形改善効果を定量的に明らかにするために、出力電圧波形の理論解析を行った。さらに、その結果を踏まえて、交流側に接続するフィルタのパラメータを考慮した出力電流高調波の算定を行い、出力電圧高調波の理論解析結果が、変換器のレベル数の設定や出力フィルタの設計を行う際の有力な指針となりえることを実証した。
- [4] フライングキャパシタ周辺の寄生インダクタンスや主回路スイッチ素子の特性に起因して発生する電磁ノイズの発生機構について詳細に検討し、逆並列ダイオードの逆回復現象による電磁ノイズが支配的であること、マルチレベル化により、その逆回復現象に起因する電磁ノイズの低減が可能であることを理論的、実験的に解明した。
- [5] 以上の理論的、実験的結果に関して、電気学会産業応用部門大会、電気学会全国大会で口頭発表を行うとともに、電気学会産業応用部門誌に論文を発表した。さらに、平成23年に米国フェニックスで開催されたIEEE ECCE (Energy Conversion Conference and Exposition)、平成24年に米国ローリーで開催されたIEEE ECCEにおいて研究成果を発表しており、平成25年に米国デンバーで開催されるIEEE ECCEにおいても発表論文が採択されている。また、本研究の主要な研究成果の一部については電気学会産業応用部門誌に投稿済みであり、現在採否の決定を待っている。また、前述のIEEE ECCEでの発表内容についてはIEEE Transactions on Power Electronicsへの投稿を準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- [1] 小原 秀嶺, 釜我 昌武, 伊藤 拓巳, 佐藤 之彦, 「フライングキャパシタマルチレベル変換器におけるキャパシタ選定指針に関する検討」, 電気学会論文誌 D, vol.131-D, No.2, pp.1393-1400, 2011, DOI:10.1541/ieejias.131.1393

〔学会発表〕(計12件)

- [1] 小原 秀嶺, 佐藤 之彦, 「フライングキャパシタマルチレベルインバータの高パワー密度化に向けた試作と評価」, 平成25年電気学会全国大会, 2013年3月22日, 愛知, 名古屋大学
- [2] 小原 秀嶺, 小栗 寛司, 佐藤 之彦, 「マルチレベルインバータにおけるPWM出力電圧高調波の理論解析」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2013年1月26日, 京田辺, 同志社大学
- [3] Yukihiko Sato, "Approaches to Realize High Power-Density Power Converters," 2012 Taiwan-Japan Symposium on Power Conversion, 2012年11月24日, 台湾, 台北, 国立台湾科技大学
- [4] Hidemine Obara, Yukihiko Sato, "An investigation of harmonics in output voltage of flying capacitor multi-level converters," 2012 Korea-Japan Joint Technical Workshop on Semiconductor Power Converter, 2012年11月2日, 韓国, 浦項, POSTECH
- [5] Hidemine Obara, Yukihiko Sato, "Development of High Power Density Flying Capacitor Multi-level Converters with Balanced Capacitor Voltage," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2012, 2012年9月17日, 米国ノースカロライナ州ローリーコンベンションセンター
- [6] 小原 秀嶺, 佐藤 之彦, 「フライングキャパシタマルチレベルインバータのゲート駆動回路絶縁方式に関する一検討」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, 2012年8月21日, 千葉, 千葉工業大学
- [7] 小原 秀嶺, 小栗 寛司, 佐藤 之彦, 「マルチレベルインバータの出力電圧高調波に関する一検討」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2012年7月30日, 奈良, 奈良高専
- [8] 小原 秀嶺, 佐藤 之彦, 「マルチレベル変換器の高パワー密度化に向けた実装を考慮した体積評価」, 平成24年電気学会全国大会, 平成24年3月, 広島, 広島工業大学
- [9] 大塚 浩司, 小原 秀嶺, 佐藤 之彦, 「フライングキャパシタ変換器におけるスイッチング時の過電圧解析」, 平成24年電気学会全国大会, 平成24年3月, 広島, 広島工業大学
- [10] Hidemine Obara, Yukihiko Sato, "Theoretical Analysis of Self-Balancing Function of Capacitor Voltages in Flying Capacitor Multi-level Converters," IEEE Energy Conversion Conference and Exposition, 平成23年9月, 米国アリゾナ

州フェニックスコンベンションセンター

- [11] 小原 秀嶺, 佐藤 之彦, 「フライングキャパシタマルチレベル変換器のキャパシタ電圧バランスに関する基礎検討」, 平成23年電気学会産業応用部門大会, 平成23年9月, 沖縄, 琉球大学
- [12] 小原秀嶺, 釜我昌武, 伊藤拓巳, 佐藤之彦, 「フライングキャパシタマルチレベル変換器における高パワー密度化のためのキャパシタ選定指針に関する検討」, 平成22年電気学会産業応用部門大会, 平成22年8月24日, 東京, 芝浦工業大学豊洲キャンパス

〔その他〕

ホームページ: <http://ps.tm.chiba-u.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 之彦 (SATO YUKIHIKO)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50205978