

令和 4 年 5 月 10 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04348

研究課題名（和文）高効率・高力率・高調波抑制を並立する三相部分スイッチング整流回路の開発

研究課題名（英文）Development of a partial switching three-phase rectifier circuit improving efficiency, power factor and harmonic current in a good balance

研究代表者

飴井 賢治（AMEI, Kenji）

富山大学・学術研究部工学系・准教授

研究者番号：50262499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：単相エアコンに搭載されている「部分スイッチング」と呼ばれる波形改善の技術を三相の整流回路に導入した。筆者らは独自の単相部分スイッチング整流回路を提案しており、従来の整流回路に比べ、高力率・高効率・高調波低減を並立することを確認している。本研究では、この単相部分スイッチング整流回路を基に三相に拡張した回路構成を提案した。その後、更なる効率改善を目指して導通する素子数の削減を図った。スイッチング素子の接続位置を直流側から交流側へ移すことでダイオードを削減し、約0.5%の効率が改善された。さらに、2パルススイッチング技術を導入することで、低出力時の入力力率を最大で10%改善することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

部分スイッチング技術が導入された整流回路は、高力率・高効率・高調波低減を並立する回路方式であるが、単相回路にしか導入されていない。この技術は単相エアコンで実用化されているが、三相交流が利用される大容量のエアコンに対しては、部分スイッチングが導入された回路は未だに存在しない。そこで、本研究では部分スイッチング技術を三相整流回路に導入した。効率改善のための新たな回路構成と入力力率改善のための2パルススイッチング制御を導入し、その有効性を確認した。エアコンのみならず様々な三相整流回路に適用可能であると考えている。

研究成果の概要（英文）：The technique of the waveform improvement to be called "partial switching" equipped with by a single phase air-conditioner was introduced into a three-phase rectifier circuit.

Authors have already proposed original single phase partial switching rectifier circuit. And it was confirmed that the circuit realized a characteristic of high power factor, high efficiency, and harmonic reduction in comparison with a conventional passive rectifier circuit. In this research, triphasic circuit configuration was proposed based on this single phase partial switching rectifier circuit. The reduction of the number of elements was investigated for further improving the efficiency afterwards. Because the connection of the switching element was moved from DC side to AC side, the diode was reduced and approximately 0.5% of efficiency was improved. Furthermore, up to 10% of input power factor in the low power output was improved because 2-pulse switching technique was introduced.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：部分スイッチング 三相整流回路 高力率 高効率 2パルススイッチング 高調波抑制

1. 研究開始当初の背景

整流回路は、交流を直流に変換するための電力変換回路である。商用電力は送電線を介して交流の形態で送られてくるため、白熱電球や電気ストーブのような交流電力を直接利用する用途以外は、一旦直流に変換するための整流回路が必要である。

整流回路に求められる性能は、主として高効率、高力率、高調波抑制であり、用途によっては昇圧が求められる。部分スイッチング方式が提案される以前の整流回路は、パッシブ方式と呼ばれる受動素子で構成された倍電圧整流回路や、アクティブ方式と呼ばれる整流回路に昇圧チョップを組み合わせた回路が主流であった。しかし、前者は高調波発生量が多く低力率、後者は昇圧チョップの高周波スイッチングによる効率の低下が問題であった。それらの問題を解決するため、1999年に株式会社東芝から部分スイッチング単相倍電圧整流回路が発表された。この回路は、高力率と適度な高調波抑制能力に加え昇圧機能を備えながら、従来のアクティブ方式よりも効率を約2%改善できるバランスの良い回路である。この“ほどよい”バランスを持つ部分スイッチング方式の整流回路は、瞬く間に家電各社のエアコンに搭載された。さらに、部分スイッチング専用の半導体モジュールが開発されるようになり、エアコン以外の家電製品にも部分スイッチング方式が広く応用されるようになった。

しかし、大容量の負荷に電力を供給する場合や、三相の発電機から発電された交流電力を直流電力に変換するには、三相の整流回路が必要となる。三相の整流回路は、単相回路と同様にパッシブ方式やインバータで構成されるアクティブ方式が主流であるが、部分スイッチング方式の導入例は未だ確認されていない。

2. 研究の目的

本研究は、三相整流回路に部分スイッチング方式を導入して、整流動作における変換効率を飛躍的に改善することを目的としている。我々の研究グループは、株式会社東芝から1999年に発表された部分スイッチング方式の単相倍電圧整流回路を基に改良を施し、新しい回路構成による単相整流回路を提案して、効率を94%から97%まで向上させることに成功した。この技術を基に三相化の実現と高効率化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 三相部分スイッチング整流回路の主回路の構築、動作特性の検証

コンピュータシミュレーションにより三相部分スイッチング整流回路の主回路構成や動作原理を見直し、良好な特性が確認された後に回路を試作した。その回路を用いて実験を行い、パルス幅の調節や負荷の増減に対する効率、力率、高調波、昇圧比などの諸特性を観測し、主回路の性能評価を行った。

(2) 同期整流の導入とその効果の確認

直流コンデンサからの逆流防止のために挿入されているダイオードをMOS-FETに置き換え、同期整流技術を導入して効率改善を試みた。

(3) 交流側に双方向スイッチを配置した新たな回路構成の検討

直流側に配置していたスイッチを交流側に移し、スイッチを双方向スイッチに置き換えた回路構成について検討した。交流側にスイッチを移すことによりスイッチをオンしたときの電流経路にあったダイオードを削減することができ、更なる効率の改善を図った。

(4)2パルススイッチング技術の導入による力率改善

新たな回路の動作特性をシミュレーション及び実験で検証した。特に低出力時における入力力率の低下に対して、単相の部分スイッチング整流回路で導入されている2パルススイッチング技術を適用した。

4. 研究成果

(1)三相部分スイッチング整流回路の主回路の構築、動作特性の検証

単相部分スイッチング整流回路を基に三相に拡張した主回路構成を図1に示す。本回路は、三相のダイオード整流回路の直流側の各相に直列接続されたスイッチング素子と逆流防止用のダイオードが接続された回路で構成される。

図2に交流側の入力線間電圧と線電流波形を示す。このときの出力電力は3kWであり、スイッチング素子を相電圧の零クロス点から2.0msだけオンさせている。効率率は97.3%であり、力率は約96%であった。

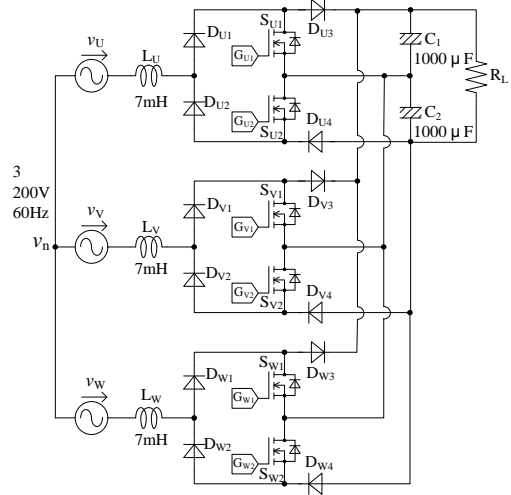


図1 部分スイッチング整流回路の三相化

(2) 同期整流の導入とその効果の確認

図1の回路は、スイッチング素子がオンする際に直流側の電解コンデンサに蓄えられた電荷が逆流するのを防ぐためダイオードが接続されている。スイッチがオフした際にそのダイオードを介して電流が流れるため、ダイオードで発生するオン電圧降下に起因する損失が無視できない。そこで、ダイオードをMOS-FETに置き換え、同期整流動作を行うことで、効率改善を図った。

図3にダイオードをMOS-FETに置き換えた主回路構成を示す。図1で直流側に接続された6つのダイオードが図3ではMOS-FETに置き換えられている。まず、 S_{X1} 、または S_{X2} (XはU,V,Wのいずれか)のMOS-FETがオンしてリアクトルにエネルギーを蓄え、オフしたときに S_{X3} 、または S_{X4} をオンさせて電流をMOS-FETのソースからドレインへ流して電解コンデンサ C_1 または C_2 へエネルギーが転送される。

同期整流を適用することによって、出力電力が500W~3kWの全域に於いて効率が約0.5%向上することがシミュレーションで確認され、有効な効率改善手段であることが分かった。

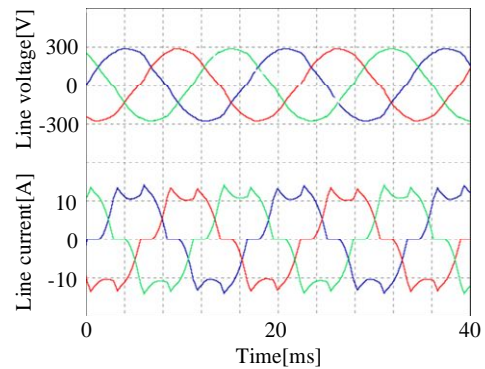


図2 入力相電圧、線電流波形(実験)

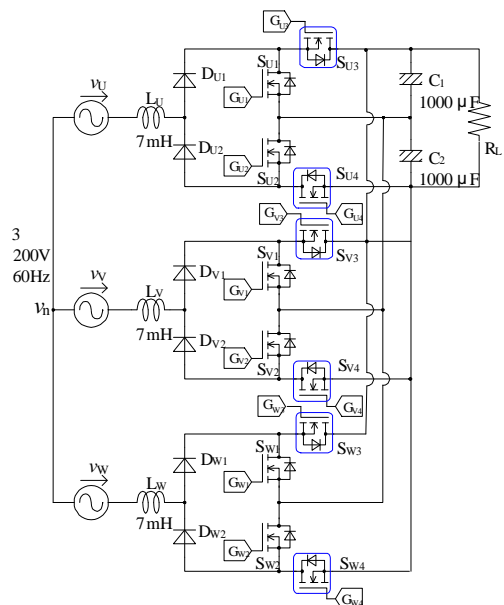


図3 同期整流の追加

(3)交流側に双方向スイッチを配置した新たな回路構成の検討

図3の回路構成を基に、更なる素子数の削減を検討した。図1の回路では、整流用のダイオードに加えて逆流防止用のダイオードを介して電流が流れるため、ダイオード3個分の損失が発生していた。そこで同期整流を適用し、ダイオード1個分の損失を低減した。しかし、スイッチング素子が直流側に接続されている以上、少なくとも2個のダイオードを電流が流れるため、これ以上の損失低減は困難であった。

そこでスイッチング素子を交流側に配置した回路構成を考案した。その回路を図4に示す。本回路はスイッチング素子を逆向きに接続した双方向スイッチで構成されており、スイッチがオンした際にはスイッチング素子が1個とダイオードが2個、オフした際にはダイオード2個しか電流が流れなくなるため、効率改善が見込まれる。本回路についてシミュレーションと実験を行った。

図5に提案する回路の入力相電圧、線電流波形を示す。このときの出力電力は2.7kWで、パルス幅は1.6msである。図2と比較すると、電流波形の頂点が異なっていることが分かる。入力力率や全高調波歪み率 THDは、従来回路と同等であった。図6に提案回路と従来回路の効率特性を示す。提案回路の効率は最高で98.7%に達し従来回路に比べ0.5%~0.8%改善されており、素子数を削減したことによる改善効果が確認された。

(4)2パルススイッチング技術の導入による力率改善

入力電流に含まれる低次高調波成分を低減する手法として、2パルススイッチング法が単相部分スイッチング回路において既に提案されている。そこで、本研究においても2パルススイッチング法を適用し、改善効果を比較した。図7に力率特性を示す。1パルススイッチングに比べ2パルススイッチングを適用すると、出力電力が2kW以下の低出力時において力率が約5%~10%改善された。入力電流の高調波は、特に第5次、第7次の低次高調波が1/3程度に減少し、全高調波歪み率 THDは、出力電力900W時において10%低減した。三相の部分スイッチング整流回路に於いても2パルススイッチング法による有効性が確認された。

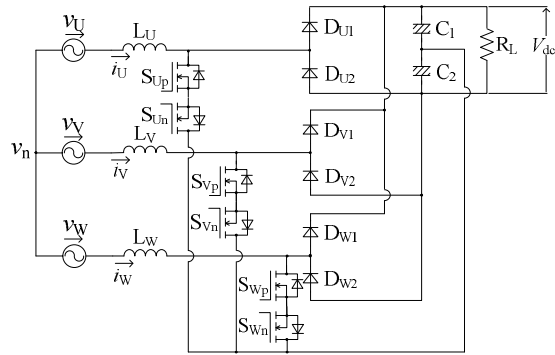


図4 素子数を削減した主回路構成

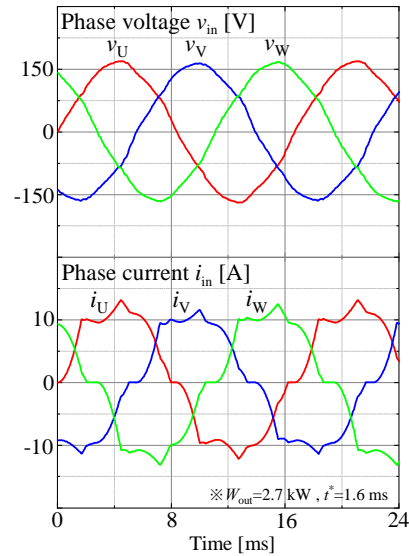


図5 提案回路の電圧・電流波形

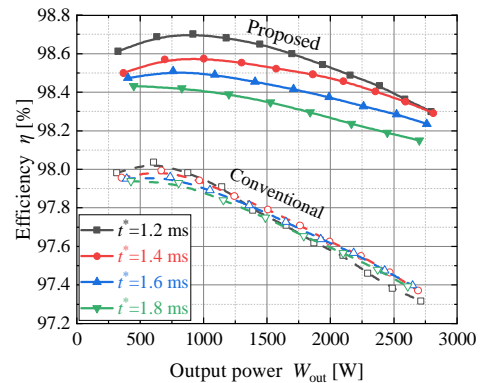


図6 効率特性

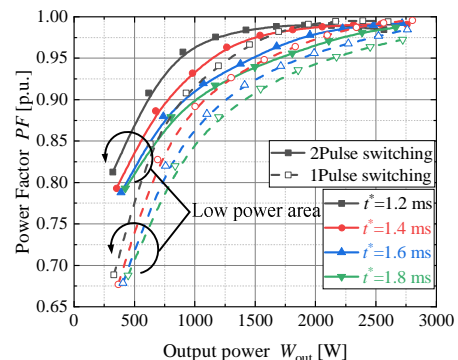


図7 力率特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 古川莉久、飴井賢治、清田恭平、大路貴久
2. 発表標題 双方向スイッチを用いた三相部分スイッチング整流回路の高効率化
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会、Y-2
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小畑 和貴, 飴井 賢治, 大路 貴久
2. 発表標題 2パルス制御による三相整流回路の力率改善
3. 学会等名 電気・情報関係学会 北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Amei, Riku Furukawa, Kazuki Obata and Takahisa Ohji
2. 発表標題 High Efficiency and the Harmonic Reduction of a New Three-Phase Rectifier Circuit using the Partial Switching Strategy
3. 学会等名 The International Council on Electrical Engineering Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------