

平成 30 年 9 月 6 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05935

研究課題名(和文) 双方向スイッチを用いた単相13レベルインバータによる超高効率パワコンの開発

研究課題名(英文) The development of the super high efficiency power conditioner with single phase 13 levels inverter using the bidirectional switches

研究代表者

飴井 賢治 (AMEI, Kenji)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・准教授

研究者番号：50262499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、LCフィルタレス、PWM制御不要の単相13レベルインバータの高効率化と波形歪みの低減法を検討し、パワーコンディショナへの適用を試みた。まずは、パルス幅の最適化により、デッドタイムの増減によって出力電圧が影響されないことが確認された。また、出力電圧のフィードバック制御を導入し、階段状の出力電圧波形から実効値を算出して、一定に制御する方式を提案した。この制御により、電圧変動率は1%以下に抑えられた。

以上の結果より、波形歪みは3.1%に低減され、98.1%の効率が確認された。パワーコンディショナの自立運転時の動作が本回路によって実現可能であることが確認された。

研究成果の概要(英文)： In this research, high efficiency and reduction method of the waveform distortion were investigated for single phase 13 levels inverter that there is not an LC filter and, a PWM control is unnecessary. The application to a power conditioner was attempted. At first, by optimization of the pulse width, it was confirmed that output voltage was unaffected by the increase and decrease of the dead time. In addition, feedback control of the output voltage was introduced, and effective value was calculated by stepped output voltage waveform, and a method to control voltage constantly was proposed. The voltage regulation was suppressed in less than 1% by this control.

By the above-mentioned result, the waveform distortion was reduced to 3.1%, and 98.1% of efficiency was confirmed. It was confirmed that the operating of the grid independent operation of the power conditioner was feasible by this circuit.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：マルチレベルインバータ 単相 13レベル 双方向スイッチ 素子数低減 出力電圧制御 パワーコンディショナ 自立運転

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電システムに用いられるパワーコンディショナは、太陽光パネルから発電された直流電力を交流に変換して電力系統へ連系・売電する「系統連系」モードと、直流から交流に変換された後、接続された負荷に電力を供給する「自立運転」モードがある。

従来のパワーコンディショナは、直流/交流変換に高周波インバータが用いられている。このインバータは、IGBT 等の高速スイッチングデバイスを4素子用いた、単相ブリッジインバータで構成される。このインバータを用いて、系統連系時には交流側の電流を制御し電流源として動作させ、自立運転時には交流側の電圧を一定に制御し電圧源として動作させる。どちらの動作においても、出力電流・電圧波形は理想に近い正弦波に制御され、高調波歪みは極めて少ない。このようにして、パワーコンディショナに内蔵されるインバータは、電圧、電流を正弦波状に制御する能力が要求される。

また、太陽光発電は日射強度によって発電電力が変化するため昇圧チョッパ回路が搭載されていて、常に最大電力が取り出せるように直流電圧の昇圧が行われている。インバータおよび昇圧チョッパ回路は、波形制御性や低歪み化、騒音低減が考慮され、20kHz程度のスイッチング周波数が用いられる。そのため、スイッチング損失の発生が避けられず、電力変換効率は約94%に留まる。

従来のパワーコンディショナの構成に対して、効率を大幅に改善した回路構成が三菱電機から提案された。この装置で用いられている回路は階調制御と呼ばれるもので、直流電圧の異なる複数のインバータを直列接続して構成されている。それらから出力される振幅の異なる電圧を合成して正弦波電圧を出力している。この方式を用いたパワーコンディショナは98%の電力変換効率を達成している。ただし、昇圧が不要で系統連系に十分な発電条件においてのみ、この効率が得られる。

本研究では、従来の高周波インバータや階調制御などを用いずに13レベルのマルチレベルインバータによって、パワーコンディショナの高效率化を実現する試みである。自立運転時の電圧制御や系統連系時の電流制御が提案する回路で実現可能であるかを調査・検討する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高效率で低歪みのパワーコンディショナを構築することである。インバータの効率を高める方法として、

スイッチング素子の電圧降下を低減

スイッチング損失の低減

導通素子数の削減

が考えられる。は、使用するスイッチング素子の特性によるものであり、IGBTの場合、コレクタ・エミッタ間飽和電圧、MOS-FET

の場合、ドレイン・ソース間オン抵抗に注目して素子を選択しなければならない。は、ターンオン時、ターンオフ時に発生するスイッチング損失の抑制法についてであり、1回のスイッチング当たりの損失の抑制と、スイッチング回数の低減の2つのアプローチがある。については、電流が流れる素子数をなるべく減らすことによって、導通時に発生する損失を低減することである。

そして、パワーコンディショナとして実用化するためには、系統連系と自立運転の動作を少ない波形歪みで行えることが重要である。つまり、インバータを正弦波状の電流源、および電圧源として動作させることであり、出力電流、電圧を検出し、それらを指令値の通りに制御できるか否かがパワーコンディショナとしての要求性能を満たす上で重要である。

このようにして、本研究では、高精度な電流源、電圧源としての制御性の確立と、それらを高效率で動作させるための回路構成、制御方式等を検討し、新しいパワーコンディショナを構築することが研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 高效率と低歪みを両立する主回路の構成

電力変換の高效率化を検討するとき、主回路構成は非常に重要である。殆どのパワーコンディショナに用いられている4素子フルブリッジインバータは、高い制御性を備えており、歪みの少ない電圧、電流を出力することができるため、現在の主流となっている。この製品の効率を改善するには、研究の目的の章で述べたように ~ の3つの手法がある。この手法に沿って、高效率化を検討した。

(2) 駆動回路や制御回路の見直しとデッドタイムによる出力電圧への影響

本回路の波形制御性は各素子のスイッチング位相の精度に依存するため、素子を駆動するドライブ回路の遅れ時間にばらつきが生じないことが要求される。

また、13の電圧レベルを切り替える際に同時にオンすると短絡回路を構成するスイッチの組み合わせがあるため、デッドタイムを挿入する必要がある。ここでは、ドライブ回路のスイッチング時間の均一化とデッドタイムによる出力電圧、歪みへの影響を検討した。

(3) 出力電圧フィードバック制御の検討

パワーコンディショナの動作には、定常時に系統に連系して発電電力を系統へ逆潮流する系統連系動作と、停電時や特に必要な時に発電電力を交流に変換して負荷へ供給する自立運転動作がある。まずは、自立運転動作時の電圧制御法について検討した。

自立運転時には、インバータは商用周波数電源と等しい電圧値を出力する電圧源となる。本回路は、電圧レベルの多段化により出

力電圧の波形歪みを 3% 程度に制御できることが確認されており、高周波スイッチングを行わないことから LC フィルタレス化が実現された。そのため、自立運転時には、リアクトルを介さずに負荷へ電力を供給することができ、リアクトルによる電圧降下が発生しない。このため、出力電圧を制御するための厳密なフィードバックが不要になる。これは、開ループで簡単に制御できるだけでなく、LC 共振による制御の不安定が無関係になり、常に安定的に動作させることができることを意味する。まずは、シミュレーションによって出力電圧の一定制御について検討した。開ループ制御の状態では負荷電流を変化させたときの電圧低下を測定した。次にスイッチング素子のオン抵抗(MOSFET)や V_{CE} 飽和電圧(IGBT)による電圧降下を加味し、同様に負荷電流の変化に対する電圧低下を調べた。13 レベルインバータを用いた開ループ制御では、負荷電力が 200W から 1000W において、102.9V ~ 99.8V まで低下し、低下度は 3.0%であった。

そこで、電圧低下度を抑制し安定した一定電圧を出力するため、フィードバック制御を検討した。13 レベルインバータの出力は、正負 6 レベルと零電圧レベルの計 13 レベルの階段状の電圧で出力されるため、サンプリングのタイミングによって検出される電圧の変化が大きい。そこで、瞬時値での演算を行う前に定常値で周期毎に制御する方法を検討した。

4. 研究成果

(1) 高効率化と低歪み化を両立する主回路の構成

研究の目的の章で述べた ~ の 3 つの手法に沿って、高効率化を検討した。以下に結果を記す。

のスイッチング素子の電圧降下については、低耐圧・低オン抵抗の Si のパワー MOS-FET(型名: RJK2511DPK、耐圧: 250V、オン抵抗: $R_{on}=0.028\Omega$) で実験を行い、良好な動作を確認した。しかし、今後スイッチング時のサージ電圧等による素子破壊の恐れや、単相 3 線系統への連系を考慮するとき、

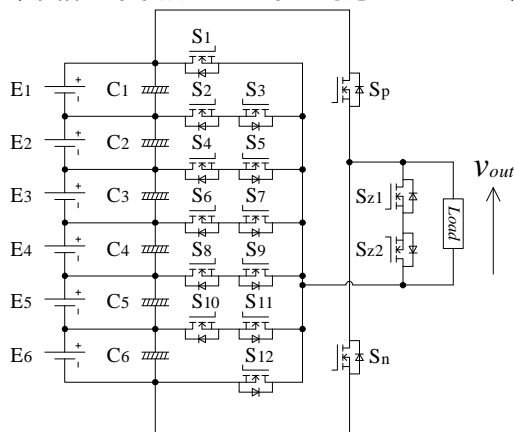


図 1 単相 13 レベルインバータの主回路構成

低オン抵抗の SiC への移行を検討すべきであると考え。

のスイッチング損失の低減については、従来の PWM 制御を用いた高周波インバータではなく、電圧レベル数が 13 レベルのマルチレベルインバータで検討した。図 1 に主回路構成を示す。本回路は、通常のフルブリッジインバータの電圧レベルが 3 レベルであるのに対し、13 レベルまで多段化し、PWM スwitching なしで波形歪みの改善を図った。なお、レベル数として 13 レベルを選択したのは、出力電圧歪み率を 3% 以下に抑制することができるレベル数だからである。これにより、スイッチング周波数は、6 レベル $\times 2 \times 60\text{Hz} = 1.44\text{kHz}$ となつて、スイッチング損失を大幅に低減できる。

の導通素子数の削減については、双方向スイッチを用いたマルチレベルインバータを提案することで対応した。従来の NPC 型のマルチレベルインバータで 13 レベルの電圧を出力するには、1 レグに 12 個のスイッチング素子が直列に接続され、2 レグで計 24 個のスイッチング素子で構成される回路が必要になる。この回路から最大電圧を出力するには、電流が 12 素子を通るため、素子による電圧低下と導通損が非常に大きい。我々が提案している双方向スイッチを用いたマルチレベルインバータの場合、極性切り替えに 1 素子と電圧レベル選択に 1 素子の計 2 素子ですべての電圧レベルを出力することができ、素子による電圧低下が少なく、導通損も大幅に削減できる。

このようにして、パワーコンディショナの高効率化と低歪み化を両立できるインバータを構築した。自立運転動作を模擬して電圧源として特性試験を行ったところ、インバータ単体での効率は出力電力 1,000W 時において 98.1% となり、良好な効率が実現された。

(2) 駆動回路や制御回路の見直しとデッドタイムによる出力電圧への影響

ドライブ回路のスイッチング遅延時間は、実測によると約 500ns であり、フォトカプラ (TLP350、東芝) の伝達遅延時間が影響していることが確認された。フォトカプラのデータシートによると伝達遅延時間のバラツキは最大で 350ns であり、ドライブ回路のスイッチング遅延時間である 500ns の 70% に相当し、遅延時間のバラツキの少ない個体を選んで使用することにした。

また、スイッチング信号を出力する制御回路は、任意の位相においてスイッチング素子をオン/オフできるような制御の自由度が必要になる。現状の回路では、制御用マイコンとして H8-3052F(ルネサスエレクトロニクス、16bit、25MHz) を用いている。固定小数点型であるためデッドタイムのような微小時間の設定が困難であり、波形制御性において不利であると予想された。そこで、3 レベルインバータと 13 レベルインバータにおいて、

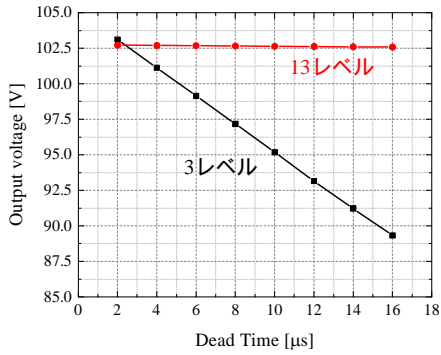


図 2.1 デッドタイムによる出力電圧値への影響 (3 レベルと 13 レベルの比較)

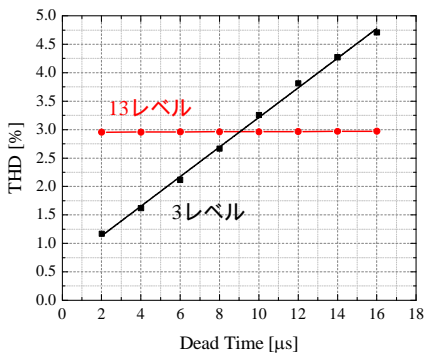


図 2.2 デッドタイムによる THD への影響 (3 レベルと 13 レベルの比較)

デッドタイムによる出力電圧値、および THD への影響をシミュレーションによって比較した。その時の結果をそれぞれ図 2.1、図 2.2 に示す。従来のデッドタイムを $2\mu\text{s}$ から $16\mu\text{s}$ まで変化させると出力電圧値は、3 レベルが 13.8V 低下したのに対し、13 レベルは 0.1V しか低下しなかった。また THD については、同様にデッドタイムを増加させると 3 レベルの場合、 3.55% 増加したが、13 レベルインバータの場合、殆ど変化しなかった。従って、13 レベルインバータはデッドタイムの変化に対し出力電圧値、および THD の変動が極めて少ないことが確認された。そのため、安価な H8-3052F を使用しても問題なく制御できることが確認された。

今後、FFT 演算やデジタルフィルタなどの複雑な演算が必要になったときに、H8-3052F の後継機種となる浮動小数点演算が可能な RX-62T (ルネサスエレクトロニクス、32bit、100MHz) への移行を検討する。

(3) 出力電圧フィードバック制御の検討

検討したフィードバック制御法

図 3.1 に出力電圧フィードバック制御のブロック図を示す。出力電圧を A/D 変換器を介して取り込み、実効値を算出する。その実効

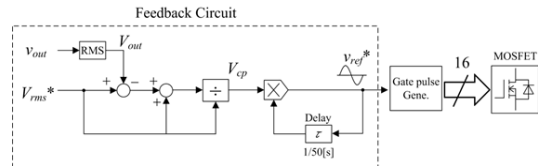


図 3.1 出力電圧フィードバック制御のブロック図

値と出力電圧指令値 (実効値) を比較し、補正値を算出する。その値と 1 周期前の信号波を乗算し、現周期の指令値 (瞬時値) を算出する。この方式は、実効値演算を行って、指令値 (瞬時値) に相対的に補正を与える方法であり、1 周期ごとに補正値が更新される。こうして、出力電圧の実効値が周期的に一定値に制御される。

本制御による実験の結果

本制御を導入して実験を行った。図 3.2、図 3.3 に出力電圧特性、THD 特性を示す。制御なしの場合、負荷電力 $200\text{W} \sim 1,000\text{W}$ において電圧低下度は 3.0% であった。本制御を導入すると、電圧の変動幅は 1% 以下に抑制され、良好な結果が得られた。しかし、電圧歪み率は、制御なしの場合 2.98% から 3.18% まで徐々に増加するのに対し、制御ありの場合

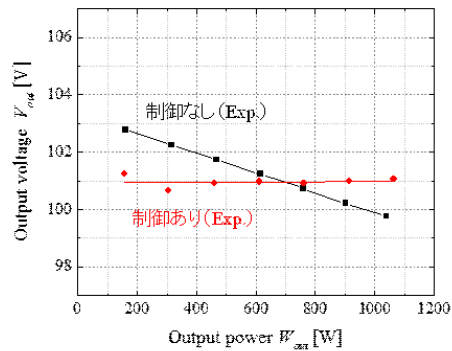


図 3.2 出力電圧特性 (フィードバック制御有無の比較)

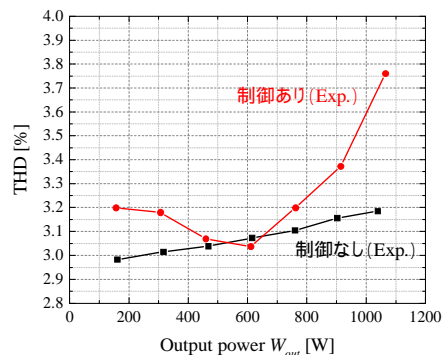


図 3.3 出力電圧 THD 特性 (フィードバック制御有無の比較)

3.20%から約3%まで低下した後に3.77%まで増加する結果となった。この原因として、制御なし時は、予め計算された高調波歪み最小化パルスを選択していたが、電圧一定制御を施すことで最適パルスから逸脱したため、高調波が増加したものと考えられる。また、高調波の補正能力を有していないこともその要因に挙げられる。

本制御の問題点と対策案

A/Dでサンプリングされた電圧はスカラー量の実効値に変換される間に位相情報を欠如している。これにより高調波含有量を制御装置内で認識できなくなっている。また指令値(瞬時値)は常に正弦波であり、波形歪みに対する補正能力を有していない。したがって、この制御はあくまでも実効値を一定にするだけの制御と言わざるを得ない。

この問題の対策として、高調波歪み最小化パルスを複数用意しておき、常に選択できるようにする方法がある。この方法により、電圧の偏差を検出したら、それに合った高調波歪み最小化パルスに切り替えることで、電圧制御と高調波低減の両立が可能になる。本研究期間において、使用していた制御装置がこの方式に対応不可であったため導入できなかったが、今後、装置を刷新してこの方式を導入し、改良を加えていく予定である。

おわりに

当初の研究計画では、自立運転に向けた電圧制御を行い、その後、系統連系に向けた電流制御を実施する予定であった。しかし、階段状の出力電圧を如何に取り込み、制御を施すかという問題で予想以上に時間を要し、期間内に計画を完遂することはできなかった。しかし、本回路は効率において揺るぎない優位性を維持しており、完成に導くことは超高効率のパワーコンディショナを構築する上で、非常に意義があると考えられる。従って、今後も本研究を継続して実施し、学会等で発表すると共に製品化を模索し、社会貢献に尽力したいと考えている。

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)

[学会発表](計2件)

(1)本江隆人、鮎井賢治、大路貴久、作井正昭、「双方向スイッチを用いた単相13レベルインバータの低歪み化」、平成28年電気学会全国大会講演論文集、4-143、p.240(2016)

(2)本江隆人、鮎井賢治、大路貴久、作井正昭、「双方向スイッチを用いた単相13レベルインバータの電圧制御法」、平成28年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集、2016巻、A3-28(CD)(2016)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鮎井 賢治 (AMEI, Kenji)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・

准教授

研究者番号：50262499