

環境発電装置の改善についての研究

環境発電改善チーム（課題番号：157101）

研究期間：平成 27 年 7 月 28 日～平成 29 年 3 月 31 日

研究代表者：松本洋和 研究員：松本宇生（平成 28 年 8 月 4 日まで）

はじめに

環境発電 (energy harvesting) とは太陽光や風力、地熱などの自然に存在するエネルギーを使って発電することであり、化石燃料を消費しないことや新たに CO₂ を排出しないことなどから、環境にやさしい発電方式として近年注目を集めている。一方、発電効率の改善や発電装置の小型化及び環境発電特有の自然現象に対する対策等の技術的な課題も山積しており、より大規模な普及への足かせになっている。本研究では、これらの課題の中でも「太陽光発電用パワーコンディショナの小型・高効率化」に絞って研究を行う。

研究成果

1. パワーコンディショナの小型化

図 1 に従来の太陽光発電用パワーコンディショナの回路図を示す。系統電圧 V_g は一定振幅であるのに対し、太陽光パネル (PV) の出力電圧は日照量等によって変化する。そのため、一般のパワーコンディショナは安定的かつ効率的に発電電力を系統に送るため、電圧を上昇させるための昇圧回路 (dc-dc conversion circuit) を持つ。この昇圧回路はコイルを有するが、一般的にサイズが大きく、またエネルギー損失が大きいという問題がある。そこで本研究では、図 2 に示す回路構成を持つコンディショナを提案した。昇圧回路としてチャージポンプ回路 (charge-pump circuit) を採用することで、コイルレスの回路を実現できるため、従来のコンディショナと比べて小型化・効率化を図ることができる。なお、出力部のコイル L_f はフィルタ素子でありコンディショナと系統の間には必ず設置されるものである。チャージポンプ回路は、その内部に有するコンデンサ C_{cp} の電圧を太陽光の出力電圧に重畳することで直流電圧 v_{dc} 並びに出力 V_o

を昇圧することができる。一方、コンデンサ電圧を逆重畳することで電圧を下げる (降圧) 動作も可能である。この昇降圧動作は出力電圧の変動に応じて行われる。図 3 にその概念図を示す。まず系統電圧の変動に対応した直流電圧 v_{dc} をチャージポンプ回路が作り出す (図 3 (a))。次にインバータ回路 (H-bridge circuit) が、その電圧に極性を与えて交流電圧とする (図 3 (b))。その

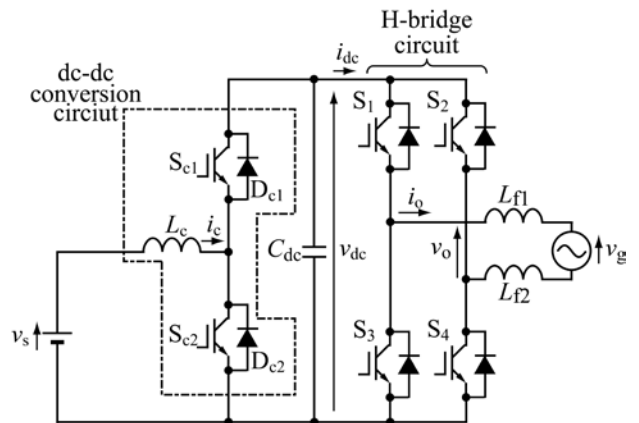


図 1 従来のパワーコンディショナの回路構成

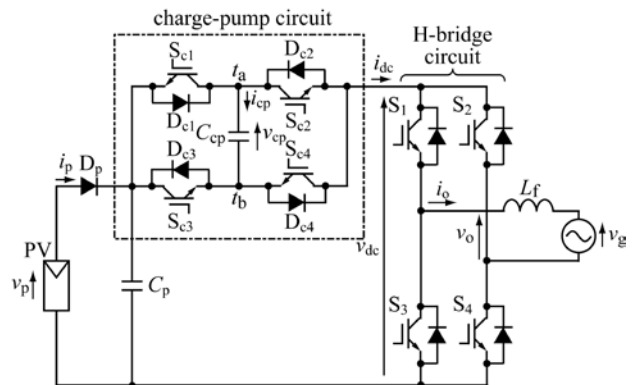


図 2 提案するパワーコンディショナの回路構成

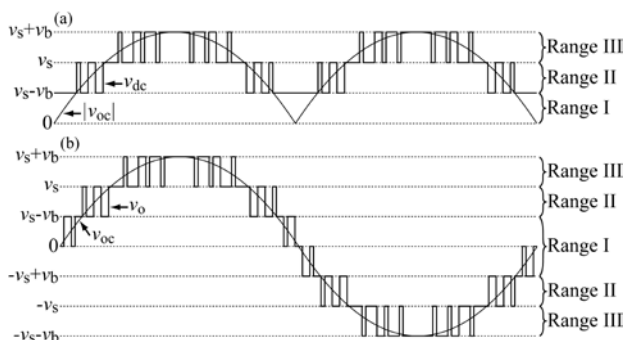


図3 動作概念波形

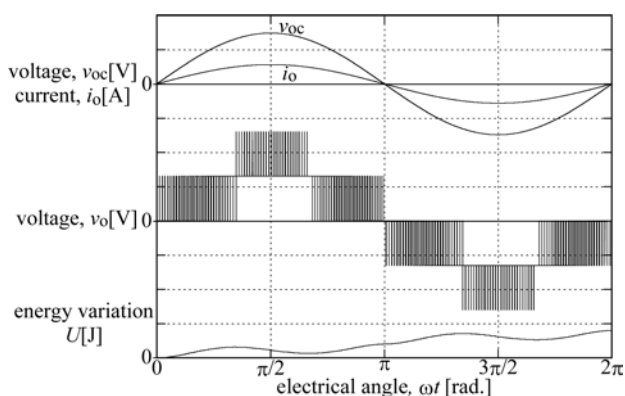


図4 チャージポンプ回路改善前のシミュレーション波形

結果、電圧は複数の電圧レベルからなるパルス幅変調波形となって出力される。ところでチャージポンプ回路が v_{dc} を昇降圧することで、コンデンサの充放電（昇圧時に放電，降圧時には充電）が行われる。コンデンサの充放電動作が等しく実行されれば、コンディショナの昇降圧動作は恒久的に持続可能であるが、実際には昇圧比の増加は過放電に帰結するため、昇圧比には限界がある。この最大昇圧比の理論値は、コンデンサの充放電モデルを基にして求めたところ1.27であった。図4に回路シミュレーションの結果を示す。出力電圧 v_o のピークが系統電圧（ここでは v_{oc} ）に比べて高いことが分かる。これは、回路素子の高耐圧化の必要性を示唆しており、素子の大型化やコストの上昇が懸念される。そのためこの電圧ピークを抑制できるチャージポンプ回路の構成を新たに提案した（図5）。新たな回路は、ダイオードと2つのコンデンサを有し、その動作はコンデンサ C_{cp1} と C_{cp2} が充電時には並列、放電時には直列に連なる。この動作は、放電時の出力電圧を充電時の半分とし、過剰な電圧ピークを抑制する。図6はチャージポンプ改善後のシミュレーション波形を示す。出力電圧 v_o のピークが低減されていることが分かる。また、 U はコンデンサのエネルギー変動を示している。改善後と改善前で全く同じカーブを描いて変動していることから、昇圧性能に関して、両者は同等であることが分かる。さらに両者に関して行った比較実験では、改善後の装置は100W出力時

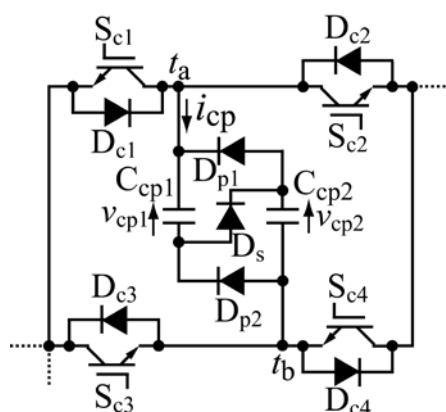


図5 チャージポンプ回路改善後の回路構成

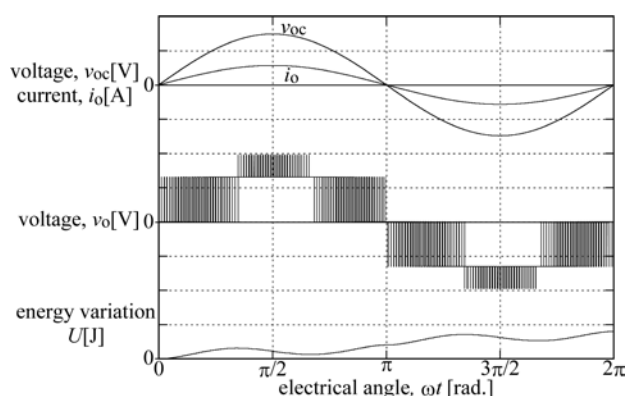


図6 チャージポンプ回路改善後のシミュレーション波形

に最大で5%強の効率改善効果が得られることを確認した。図7に太陽電池パネル（最大出力289W at 127V）を用いて行った過渡特性検証実験時の波形を示す。本実験では、改善後のチャージポンプ回路を用いているが、期待通りの動作を行っていることが確認できる。また最大電力追従制御にも対応でき、昇圧比をコンディショナで変更することで太陽光パネルから最大電力を引きだせることを確認できた。一方、実験における昇圧比の最大値は1.15程度と理論値に比べ低下することが確認された。これは、回路上の損失やフィルタ素子における電圧降下が起因しているものと考えられる。

2. パワーコンディショナの効率化

以上のように先に提案したコンディショナはコンパクトであるが、昇圧比に限界があるため適用できる条件に限りがある。そこで新たに図8に示す回路構成を持つコンディショナを提案した。この回路はチャージポンプ回路とdc-dcコンバータを有し、従来のものに比べて回路素子が多いが、後に述べるように幾つかのメリットを有する。このコンディショナのdc-dcコンバータは過放電したチャージポンプ回路のコンデンサ C_b を充電する役割を果たす。その充電動作はチャージポンプ回路の動作モードに関係なく行うことができるため、理論的に昇圧

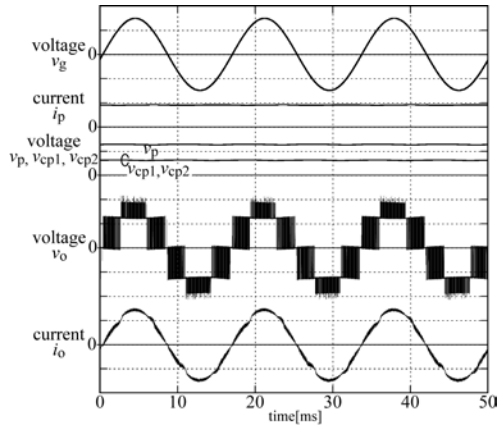


図7 実験波形

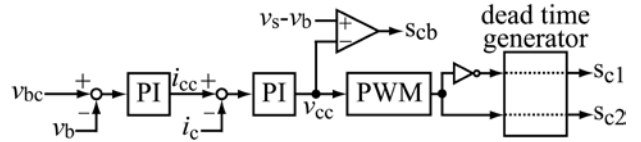


図10 dc-dcコンバータの制御ブロック

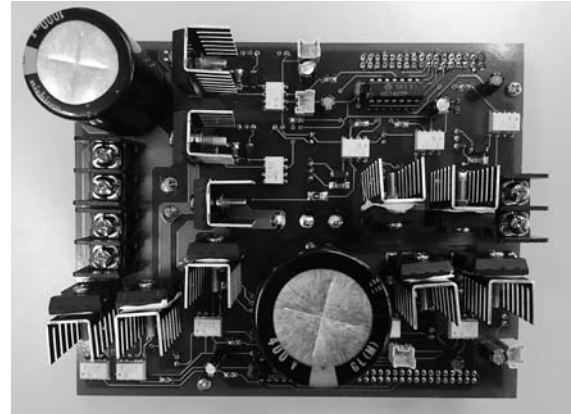


図11 試作機

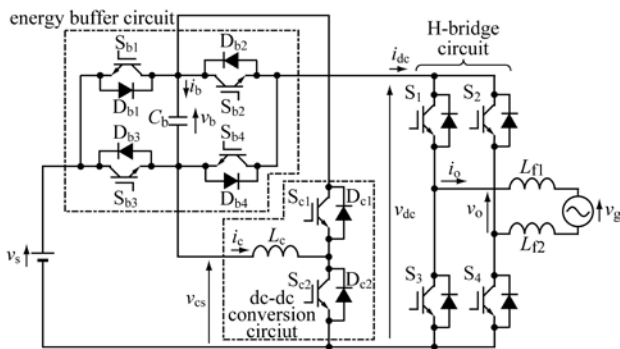


図8 提案するパワーコンディショナの回路構成

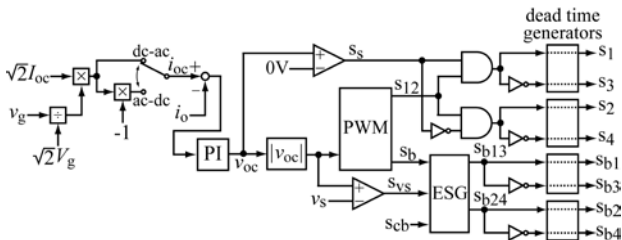


図9 チャージポンプ回路とインバータ回路の制御ブロック

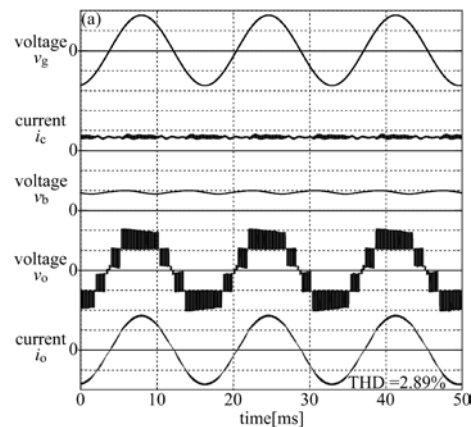


図12 実験波形

表1 図8中のESGブロックの真理値表

input			output		Mode of energy buffer circuit
S _b	S _{vs}	S _{cb}	S _{b13}	S _{b24}	
0	0	0	1	0	Mode 1
0	0	1	1	0	
0	1	0	0	1	Mode 3
0	1	1	0	1	
1	0	0	0	0	Mode 2
1	0	1	1	1	
1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	

限界は存在しない。一方、回路素子数(特にスイッチ)の増加により、制御アルゴリズムは非常に複雑なものとなった。図9と10及び表1はその制御ブロック図とデジタル回路の真理値表を示したものである。本報告書では詳しい説明は割愛するが、dc-dcコンバータの動作が

チャージポンプ回路の動作に干渉しないよう工夫されている。図11は試作機であり、これを用いて行った実験波形が図12である。電流 i_o が系統電圧 v_g に同期した正弦波となって出力されていることから、チャージポンプ回路及びインバータ回路の協調制御が期待通りの動作を行えていることが分かる。また電流 i_c がほぼ一定に制御されていることからdc-dcコンバータが安定動作出来ていることが分かる。また従来のコンディショナとの比較実験を行い、次の特長を明らかにした。

- (1)スイッチング周波数における出力電圧の高調波を60%低減できる。
 - (2)出力電圧高調波の低減により、フィルタ容量を半分にできる。
 - (3)変換効率を500W出力時には約5%, 100W出力時には約10%改善できる。
- さらに回路サイズを算出したところ、提案コンディショ

ナでは 343cm^3 であったのに対し、従来コンディショナでは 314cm^3 という結果が得られた。このように、提案コンディショナは回路素子数が増えるものの、従来コンディショナとほぼ同サイズであることができるのは、変換効率の向上によりヒートシンクを小型化できるためである。

まとめ

以上本研究では2つのコンディショナを提案したが、それぞれが従来コンディショナと比べて優れた特長を持つことを明らかにした。

研究業績

- (1) Matsumoto, H. et al., “A PV Inverter With Charge-Pump Circuit Topology,” Proc. of the 19th International Conference on Electrical Machine and Systems, Nov. 2016.
- (2) Matsumoto, H. et al., “Single-Phase Inverter with Energy Buffer and dc-dc Conversion Circuits,” IEEE Transactions on Power Electronics, 2017.