最少構成要素で動作するインバータの解析と効率改善

松井 景樹^a、大石 英司^a、梅野 正義^a、安林 幹翁^b、内田 秀雄^b、長谷川 勝^b

^aみんな電力 株式会社-世田谷ものづくり学校、^b中部大学

1. まえがき

小容量の太陽光発電などではパワーコンディショナー (PCS) 等の回路構成の検討において、より低コスト化の追求されている^(1,2)。モジュール化などコンパクト化でのコスト削減の努力はなされてきたが構成そのものはこれ以上改善することはできないとの認識から単純化への努力はなされていない。一般に PCS では直流電圧を昇圧して使う用途が多く、一段目に昇圧チョップ (BC) を用い二段目にインバータ (INV) を用いている^(3,4)。

このように回路を 2 段構成として BC と INV を一体化した方式が報告されている^(5,6)。2, 3 の変形で検討を行ったが、この過程で最少構成要素で済む新しい回路方式の着想に至ったので、その概要を報告する。

2. 回路構成と動作概要

2.1 並列型構成 (Buck Boost Inverter)

Fig. 1 は種々検討回路のうち負荷並列型の回路構成を示している。既に報告されているハーフブリッジを昇圧し高

Fig. 1. Proposed Circuit with Parallel Loads.

Fig. 3. Buck Inverter.

周波を整流して直流を得る DC-DC コンバータ⁽¹²⁾と比べ構成要素数で同列と考えられるが、提案方式の長所があり、これらに関して述べる。図において負荷は並列型である。直列型では負荷正弦波に関して検証したが並列型では正弦波負荷を得る事はできない。単一パルスの高周波がより有効である。

はじめスイッチ S_2 がオンの時電源より負荷 R および並列のインダクタ L に電力が供給される次に S_2 がオフになり S_1 がオンになると L に蓄えられた電力が R に供給されるとともに余剰電力が補助キャパシタ C に伝送される。期間後半には L の供給電力は減少するためその不足分は C より供給される。

Fig. 2 において電力伝送のフローチャートを示している。伝送における電力が大きい線路は太線で表している。細い線は電力が小さいことを表す。 L からの伝送電力は構成全体を通じ伝送に主要な働きで寄与している。一方 C を経由する伝送電力は L の伝送の補助的機能であり、 $L \rightarrow R$ に直接伝達される電力は主要電力であるが、 C を経由する $L \rightarrow C \rightarrow R$ の経路で伝送される電力は電流リプルによって異なるが割合は小さい。主たる伝送は直接接続された $E \rightarrow R$ および $E \rightarrow L \rightarrow R$ の主伝達経路であり、 $L \rightarrow C \rightarrow R$ の経路で電力伝送がなされ、負荷電流波形の補助的なフィルタ機能を果たしている。

Fig. 2. Power Flow for Parallel Loads.

2.2 バックインバータへの展開

要素最少化の更なる方式として Fig. 3 にその成図を示す。 S_1, S_2 の交互のオン、オフで電源 E より負荷 R に交流電力が供給される。 R と直列にインダクタ L を接続すると正弦波インバータを駆動することも可能であるが、ここでは方形波インバータを念頭に置いている。補助キャパシタン C への不平衡充電が懸念される。しかしながら以下のような検証で平衡充電がなされる。定常状態では

・ S_1 オン時 $E - v_c(0) = Ri^+$

S_1 オフ時 $v_c(0) = Ri^-$

但し、 $v_c(0)$; 動作時の C の 充電電圧、 i^+ ; 充電電流、 i^- ; 放電電流、とする。

・ 定常状態では $i^+ = i^-$ であるため

Fig. 4. Flowchart of Buck Inverter.

$$vc(0) = E/2$$

となり電源電圧の 1/2 の値に C は充電される。

・過渡状態では

$$S_1 \text{ オン時 } E - vc(t) = RC \cdot dvc(t)/dt$$

$$S_1 \text{ オフ時 } vc(t) = -RC \cdot dvc(t)/dt$$

C の傾き $dvc(t)/dt$ が等しくなった時、 $E = vc(t)/2$ が成立し C は E/2 に充電される。

C. バックインバータのフローチャート

Fig. 3 において S_1 がオン (S_2 オフ) すると負荷 R に給電するとともに同じ電流で C への給電も行われる。 S_1 がオフすると (S_2 オン) C からの電力が R に給電される。E から供給される電力の半分は直接負荷 R に給電され効率向上において利点があることを示している。

3. 電力変換構成の特性の比較

電力変換構成要素数の段数の多少で変換効率は大きい影響を受ける。段数を考慮して効率の目算値求め変換器全体の性能の良否を評価し検証する。概算を求めるについて以下の仮定を設ける。

- 各変換要素間の種類に関係せず一定変換効率値とする。
- 線路抵抗等回路損失は考慮しない。
- $\tau_{on} = \tau_{off} = 1/2$ となる理想的方形負荷波形とする。

3.1. 提案並列負荷方式 (Fig. 1) 効率はフィルタキャパシタを経由する電力の割合の大小で多少異なる。L が大きいと C を経由する電力は少なくなる。把握を容易にするため各変換効率を一段につき $\eta = 90\%$ と仮定する。

・L が十分大きい場合 C を経由する電力は殆ど無い。即ち、 $E \rightarrow R (\eta \times \tau_{on} = 45\%)$, $E \rightarrow L (\eta \times \tau_{on} = 45\%)$, $L \rightarrow R (\eta \times \tau_{off} \times \eta = 40.5\%)$ 。これらを伝送電力を総合して求めることができる。

$$(\eta \times \tau_{on} = 45\%) + (\eta \times \tau_{off} \times \eta) = \underline{\underline{85.50\%}}$$

3.2. 電力変換構成の特性の比較

Table 1 Characteristics of Variable Converter.

	Eff %	Num.	Load V	Max.current
Buck-Boost Inv	85.5	8	E	I
Buck-Half-Bridg	81.5	9	E	I
Buck Inverter	85.5	7	E/2	I* 2
Half Bridge Inv.	85.5	8	E/2	I* 2

Table 1 は以上の各種コンバータを効率の概算を基に構成要素数からの各種特性を中心に比較して提示している。上 2 段と下 2 段はそれぞれ類似の構成である。まず Buck-boost Inverter と次段の BHB を比べると負荷電圧には大きい電源電圧 E が印加でき、提案の負荷並列型 Buck-boost Inv. は BHB と比べ素子数が 9→8 へと 1 個減少しこれが若干の効率向上をもたらしている。次に下 2 段の比較において短所は

負荷には電源電圧の 1/2 の電圧印加となり負荷電流は上 2 段と比べ 2 倍となるの短所であるが素子の電流耐量は負荷電流以上の電流は流れないメリットがある。Buck Inverter においては Half Bridge Inverter と比べ構成要素数は 1 個減少するメリットがある。

全般を通して前述のフローチャートからわかるように下 2 段は直接 $E \rightarrow R$ へ電力伝送される期間が長く効率改善に役立っている。

4. まとめ

構成要素最少化インバータと称し前発表の BC・INV (チョップとインバータを一体化) インバータ回路から構想を得た方式を提案した。従来の最少化方式はインバータ枝路が組みのハーフブリッジはフィルタ L や負荷などを含む全構成要素が 9 個であるのに対し提案方式では 8 個ですむ。また第 2 方式として提示した Buck-Inverter 方式は負荷電圧は 1/2 に低下するものの効率向上が期待でき、構成要素数は従来の方式 (Half Bridge Converter) の 8 個から 7 個に減少することができる。これらが構成要素最少化と称する所以である。

下 2 段の比較において得られた回路構成を検証するとハーフブリッジ回路の従来 2 個ある電源補助キャパシタのうち提案では一方のキャパシタを取り除いた構造になっていることは構形成態として興味深いことである。

謝辞

本研究は、NEDO-独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構による「太陽光発電多用途化実証プロジェクト」に係わる研究支援により行われました。関係者の各位に対しまして謝意を表します。

文 献

- (1) Minsoo Jang and Vassilios G. Agelidis; "A minimum power processing stage fuel-cell energy system based on a boost-inverter with a bidirectional backup battery storage", *Trans. On Power Electronics*, vol.26, pp.1568-1577,2011
- (2) Minsoo Jang,Takyun Kim,Vassilios G. Agelidis; "Design and Implementation of a 200kHz Single-Phase Boost-Inverter Using Silicon Carbide Semiconductors",*Proceedings of IEEE IECON 2015 Yokohama*, pp.2241-2246, 2015-11
- (3) P.Sanchis,A.Ursaea,F.Gubia and L.Marroyo;"Boost DC-AC inverter: a new control strategy",*Trans. On Power Electronics*,vol.20, pp.343-353,2005
- (4) C.-M. Wang;"A novel single stage full bridge buck-boost inverter", *IEEE Trans. on Power Electronics*,vol.19, pp.150-159,2004
- (5) C.-M. Wang;"A novel single stage series resonant buck-boost inverter", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*,vol.52, pp.1019-1108,2005
- (6) 松井景樹、大石英司、河田恭孝、安林幹翁、梅野正義、内田秀雄、長谷川勝:" コミュニティ型ペランダソーラにおける構成と技術"第1報、電気学会電力・エネルギー部門大会電気学会電力技術部門大会、1-76 (2014-9)
- (7) 仁野新一: "チョップ型インバータ回路"、特開 2006-174653(2006-6)
- (8) Fang Zheng Peng:"Z-Source Inverter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 2, pp.504-510, March/April 2003
- (9) Keiju Matsui, Eiji Oishi, Yasutaka Kawata, M.Yasubayashi, M.Umeno, H.Uchida,Masaru Hasegawa: "Pursuit of Simple PCS for Photovoltaic Power Generation - Optimum Waveforms",*IEEE-Intelec2015*,pp.915-920, 2015.10
- (10) 松井景樹、大石英司、安林幹翁、梅野、内田、長谷川勝:" チョップとインバータを一体化したPCSの提案"、電気学会産業応用部門大会、1-75, pp.1-253~2561 (2016-9)
- (11) 海野洋、林賢知、松田善秋: "高効率低電圧出力 DC/DC コンバータ", *電子情報通信学会信学技 EE2000-58*,pp.41-48,2001-2