

電流不連続モードを応用した降圧形アクティブバッファ付き単相系統連系インバータの制御法

櫻庭 友和*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Control Strategy for Single-phase grid-connected inverter
with Buck-Type Active Buffer Circuit Operated in Discontinuous Current Mode
Tomokazu Sakuraba, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

1. はじめに

従来のアクティブバッファでは、バッファキャパシタ電圧を制御するための追加回路が必要であり、変換器が大型となる⁽¹⁻²⁾。そこで著者らは、昇圧チョップの電流不連続モード(以下、DCM)を用いてバッファキャパシタ電圧を昇圧するDCMアクティブバッファを提案した⁽³⁾。しかし、昇圧形の回路方式では、高い耐圧のスイッチング素子が必要となるため、追加素子に低ON抵抗の素子を適用できない⁽⁴⁾。

そこで本論文では、GaN-FETなどの低ON抵抗素子の適用が可能で、尚且つ追加の磁気部品を必要としないDCM降圧形アクティブバッファを提案する。さらに実機実験により本回路の有用性を確認したので報告する。

2. 提案回路構成

図1に提案回路の構成を示す。本回路は、昇圧チョップの昇圧リアクトルを用いてバッファ電圧の制御を行うため、バッファ回路に追加のインダクタを必要としない。

本回路は、DCMアクティブバッファと同様に、昇圧チョップのDCMを用いて、バッファキャパシタの放電モードを実現する。昇圧形のDCMアクティブバッファでは、 C_{buf} と C_{dc} の短絡を防止するための追加素子S4を昇圧チョップの上側スイッチに逆直列接続する必要がある。これにより、S4で発生する導通損失が回路全体の効率を低下させる。一方、DCM降圧形アクティブバッファでは、S4をバッファ回路に接続するため、導通期間がバッファキャパシタの充放電期間のみである。これにより、S4の導通損失を低減できる。

3. 制御方式

(3-1) 単相電力脈動補償の原理

図2に入力電力 p_{in} と出力瞬時電力 p_{out} 、アクティブバッファ瞬時電力 p_{buf} の関係を示す。出力瞬時電力は、出力電圧と出力電流が正弦波で負荷率1とすると(1)式となる。

$$p_{out} = \frac{V_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega_{out} t) \dots\dots\dots (1).$$

ここで、 V_m と I_m はそれぞれ単相系統の電圧と電流の最大値、 ω_{out} は系統角周波数である。入力電力を一定に制御するために、アクティブバッファの瞬時電力を(2)式で制御する。

$$p_{buf} = \frac{V_m I_m}{2} \cos 2\omega_{out} t \dots\dots\dots (2).$$

アクティブバッファで電力脈動を補償した結果、入力電力は(1)式の第1項と一致し、一定値に制御できる。

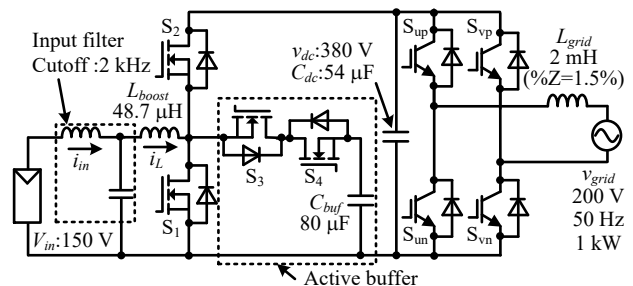


Fig. 1. Buck-type active buffer circuit operated in DCM.

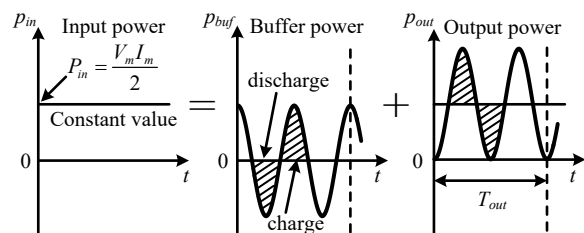


Fig. 2. Single-phase power pulsation compensation.

(3-2) 提案回路の動作原理

図3にDCMの昇圧リアクトルの電流波形、図4に制御ブロックを示す。本制御は、昇圧リアクトル電流制御をマイナーループとし、DCリンク電圧制御とバッファキャパシタ電圧制御で構成される。1スイッチング周期内にゼロ電流期間を設けることで、それぞれの電圧制御を非干渉化する。この結果、昇圧リアクトル一つで両電圧を制御できる。

(3-3) 昇圧リアクトル電流制御

図3における昇圧リアクトルの平均電流 i_{L_ave} は、DCリンク電圧を制御する電流 $i_{L_ave_dc}$ とバッファ電圧を制御する電流 $i_{L_ave_buf}$ の和となる。ここで、各動作モードに対するデューティを $d_1 \sim d_4$ と定義する。本回路では、DCリンク電圧が一定となるように制御するため、単相電力脈動補償制御を適用しない場合、昇圧リアクトル電流が系統周波数の2倍周波数で脈動する。よって、DCリンク電圧を制御する平均電流は、

$$i_{L_ave_dc} = \frac{i_{peak}}{2} (d_1 + d_2) = \frac{P}{V_{in}} [1 - \cos(2\omega_{out} t)] \dots\dots\dots (3),$$

となる。ここで、 P は定格電力である。昇圧リアクトルの平均電流を一定に制御するために、バッファ電圧を系統周波数の2倍周波数で制御し、単相電力脈動を吸収する。(3)式の脈動成分を打ち消すために、バッファ電圧を制御する平均電流を(4)式で制御する。この結果、昇圧リアクトル電流

の平均電流を一定値に制御できる。

$$i_{L_ave_buf} = \frac{i_{peak}}{2} (d_3 + d_4) = \frac{P}{V_{in}} \cos(2\omega_{out}t) \dots\dots\dots (4).$$

〈3・4〉 電圧制御

図4において、DCリンク電圧指令値 v_{dc}^* は、インバータ出力電流 THD の悪化を避けるために一定値に制御する。電圧制御のPI制御器出力部にインバータ入力電流 i_{inv} をフィードフォワードする。これにより昇圧チョップからDCリンクに供給する電流とインバータ入力電流が等しくなるため、DCリンク電圧を一定に制御できる。

バッファキャパシタ電圧 v_{buf} は、単相電力脈動を補償するために系統周波数の2倍周波数で振動させる。電流指令に充放電電流指令 i_{buf}^* を加算することで、キャパシタの充放電電力を制御する。これにより、電圧制御系は電圧平均値に対してのみPI制御器で制御すればよいため、制御応答を十分遅く設計できる。充放電電流指令 i_{buf}^* は、昇圧リアクトル電流が(4)式となるように、

$$i_{buf}^* = \frac{P}{v_{buf}} \cos(2\omega_{out}t) \dots\dots\dots (5),$$

で与える。最後に、生成したデューティ $d_1 \sim d_4$ をのこぎり波キャリアと比較して、ゲート信号 $S_1 \sim S_4$ を作成する。

4. 実機実験による入力電流リプル評価

提案回路の動作を確認するために、RL負荷を用いた定格電力1kWの実機実験を行った。ここで、昇圧リアクトルの電流リプルを最小とするために、本回路が最大デューティ時に臨界モードで動作するようにインダクタンス値を設計する。したがって、スイッチング周波数を20kHzとした場合に、インダクタンス値を48.7μHに設定した⁽³⁾。バッファキャパシタ電圧は、入力電圧以上、DCリンク電圧以下となるように平均電圧250V、電圧変動幅160V_{peak-peak}に設定した。これにより、バッファキャパシタは静電容量80μFで単相電力脈動を吸収できる。

図5に実験結果を示す。図5(a)より、単相電力脈動補償を行わない場合、入力電流はインバータ出力電流の2倍周波数で脈動する。一方で図5(b)より、提案制御を適用することにより、入力電流の2次成分(100Hz)を90.2%低減できることを確認した。ここで、DCリンク電圧の2次成分に関しても、単相電力脈動補償制御の有無に関わらず、直流成分に対して0.6%以下で制御できていることを確認した。以上より、提案回路による単相電力脈動補償の有用性を確認した。さらに、実機実験により、提案回路の最高効率が出力電力600W時に96.0%となることを確認した。

5. まとめ

本論文では、アクティブバッファに追加磁気部品を必要とせず、低耐圧素子を適用可能なDCM降圧形アクティブバッファを提案した。さらに定格電力1kWの実機実験により、DCM降圧形アクティブバッファにより入力電流の2次成分を90.2%低減可能であることを確認した。

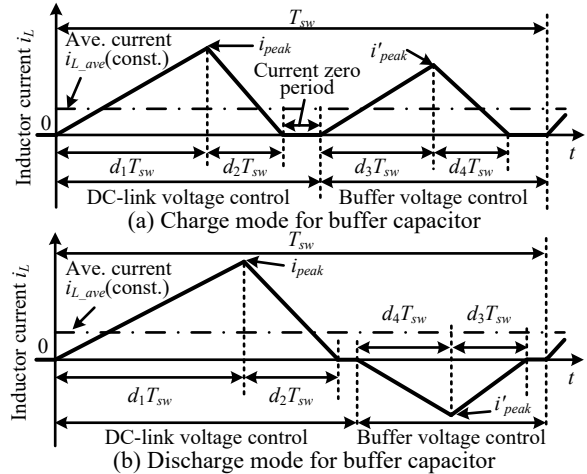


Fig. 3. Boost inductor current waveform in DCM.

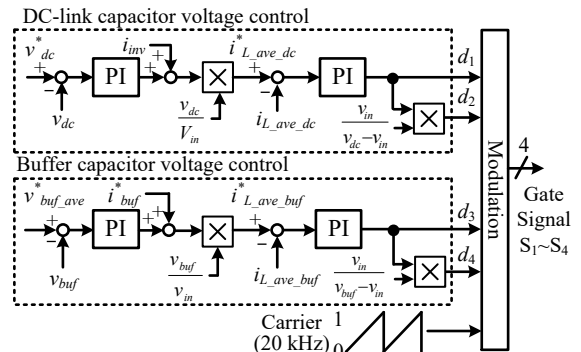
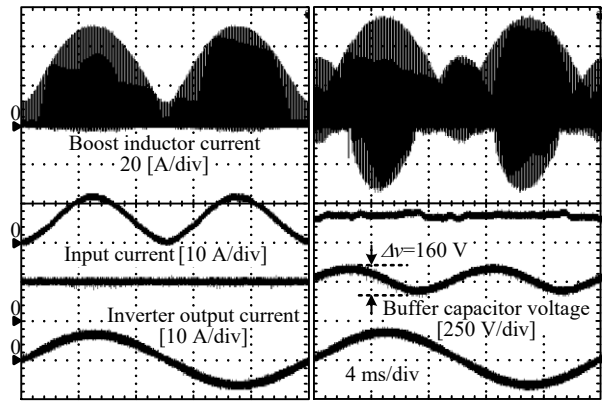


Fig. 4. Control block for DC link voltage and buffer voltage.



(a) Without power decoupling (b) With power decoupling
Fig. 5. Experimental waveforms.

文 献

- (1) S. Qin, Y. Lei, C. Barth, W. Liu, R. C. N. Pilawa-Podgurski : "A High-Efficiency High Energy Density Buffer Architecture for Power Pulsation Decoupling in Grid-Interfaced Converters", IEEE ECCE, pp.149-157 (2015)
- (2) 外山佳祐, 清水敏久 : "パワーデカップリング機能を持つ高効率単相系統連系インバータとその制御法", 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 2, pp. 147-154 (2015)
- (3) 櫻庭友和, レホアイナム, 伊東淳一 : "電流不連続モードで動作する昇圧形アクティブバッファを用いた単相系統連系インバータの実機検証", 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, No. JB-1, 1-55(2016)
- (4) A. S. Morsy, P. N. Enjeti : "Comparison of Active Power Decoupling Methods for High-Power-Density Single-Phase Inverters Using Wide-Bandgap FETs for Google Little Box Challenge", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 3, pp. 790-798 (2016)