

小容量 DC キャパシタを有する単相系統連系インバータの 瞬低時の電圧変動に関する考察

学生員 中村 聡志 学生員 永井 悟司 正員 渡辺 大貴
上級会員 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Consideration of Voltage Overshoot for Single-phase Inverter with FRT Operation
Satoshi Nakamura, Student Member, Satoshi Nagai, Student Member, Hiroki Watanabe, Member,
Jun-ichi Itoh, Senior Member (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a Fault Ride-Through (FRT) operation for a single-phase grid-tied inverter with an active power decoupling capability. In order to compensate single-phase pulsation with a small capacitance, high overshoot voltages occur in a DC-link voltage when the grid voltage sag of the single-phase grid occurs, resulting in the interrupt of the FRT operation due to the overvoltage protection. The consideration of the overshoot amount of the DC-link voltage is conducted to solve this problem. In particular, the disturbance transfer function is derived to calculate the relation between the buffer capacitance and the voltage overshoot. As experimental results, it is shown that the DC-link voltage value follows the command value even during the voltage sag. Furthermore, the proposed control achieved both the FRT operation with the low voltage overshoot of 20% and the active power decoupling capability.

キーワード : DC-AC インバータ, FRT 動作, オーバーシュート, 直流中間電圧変動

Keywords : DC-AC Inverters, FRT Operation, Overshoot voltage, DC-link voltage fluctuation

1. はじめに

近年, 地球温暖化などの環境問題を解決するために太陽光発電 (PV) システムの導入がさかんに行われている。太陽電池を単相系統へ連系するために, 一般的にパワーコンディショナと呼ばれる昇圧チョップと系統連系インバータから構成される電力変換器が用いられる。

単相系統連系システムでは単相系統側で発生する系統周波数の 2 倍で現れる電力脈動が最大電力点追従 (MPPT) の制御性を悪化させる。そのため一般的には直流中間部に大容量のコンデンサを用いてこれを補償する必要がある。また, 直流中間コンデンサを小容量化した場合, 負荷急変といった外乱が発生した場合の応答性が悪化する可能性がある。

一方, PV システムを実際に運用する際には瞬時電圧低下 (瞬低) 時にも電力変換器の動作を継続させる Fault Ride-Through (FRT) 要件を満足する必要がある⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。特に外乱に対する応答性の悪化は過渡的な直流中間電圧のオーバーシュートの発生を招き, 過電圧保護により継続的な運転を阻害する恐れがある。

本論文では単相 DC/AC コンバータにおいて直流中間コン

デンサを小容量化した場合発生する系統瞬低時の電圧オーバーシュートについて検討する。具体的には外乱伝達関数からコンデンサ容量と電圧オーバーシュートの相間について導出し理論値と比較する。またパワーデカップリング回路を用いた場合の電圧オーバーシュート量について検討する。

2. 小容量キャパシタを用いた場合発生する電圧オーバーシュート評価

図 1 に一般的なパワーコンディショナの回路構成, 図 2 に昇圧チョップの制御ブロック図を示す。系統連系インバータは電圧形のため, 直流中間部にはコンデンサ C を並列に接続する。昇圧チョップは直流中間電圧 V_{dc} を常に系統電圧最大値以上に昇圧するための電圧制御 (AVR) が実装される。またマイナーループには昇圧インダクタ電流に対する電流制御 (ACR) があり, ACR の固有角周波数は AVR との干渉を防止するために十分高く設計する。

また本論文では FRT 動作に移行する際の過渡状態について検討する。FRT では系統擾乱時にも運転を継続するために瞬低期間中に無効電流を注入する。有効電力から無効電力に切り替える際, 変換器から見た負荷電流はステップ状

に変化する。この時の負荷変動を外乱とし、その時の直流中間電圧オーバーシュートを伝達関数モデルから評価する。

図 3 に昇圧チョップの外乱伝達関数モデルを示す。外乱伝達関数モデルより、瞬低発生による負荷変動が発生し、 I_{inv} がステップ変動するものとして直流中間電圧オーバーシュートの定式化を行う。インバータ入力電流 i_{inv} の外乱伝達関数は(1)式で表される。

$$G_{load}(s) = \frac{-\frac{1}{C_{buf}} s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで s はラプラス演算子、 ζ は減衰係数、 ω_n は AVR の応答角周波数である。直流中間電圧変動の最悪条件は(1)式の単位ステップ応答によって表される。インバータ入力電流 I_{inv} の単位ステップ応答 $H(t)$ は(2)式により表される。

$$H(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[G_{load}(s) \cdot \frac{1}{s} \right] = -\frac{1}{C\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}t) \dots\dots(2)$$

直流中間電圧のオーバーシュート量は(2)式を微分して 0 となる時間を代入することで求められる。単位ステップ量はインバータの平均入力電流 I_{inv_ave} であり(3)式で表され、直流中間電圧のオーバーシュート量は(4)式で表される。

$$I_{inv_ave} = \frac{1}{2} i_{inv} = \frac{|v_{ac} \sin \theta_{i_{ac}} \sin \theta|}{2v_{dc}} = \frac{P_{out}}{V_{dc}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\Delta V_{dc} = -\frac{\Delta I_{inv_ave}}{C\omega_n} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right)} = -\frac{\Delta P_{out}}{C\omega_n V_{dc}} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right)} \dots\dots\dots(4)$$

P_{out} は出力電力、 V_{dc} は直流中間電圧平均値である。

図 4 にインバータ平均電流 $I_{inv_ave}=2.5$ A、制動係数 $\zeta = 0.7$ の条件で(4)式にて導出した電圧オーバーシュート量の計算値とシミュレーション値の比較結果を示す。ここで AVR の応答角周波数は 50 rad/s から 200 rad/s まで変更した条件で検討した。まず計算結果とシミュレーション結果はほぼ一致していることを確認した。また、直流中間コンデンサを小容量化した場合、負荷急変時における電圧オーバーシュート量は増加することがわかる。一方で、直流中間電圧コンデンサを小容量化した場合の方が応答角周波数の増加による電圧オーバーシュート低減効果が期待できる。

3. アクティブパワーデカップリング(APD)

(3-1) APD 方式

図 5 に DC アクティブフィルタを付与した回路構成の一例を示す⁽⁶⁾。単相系統連系の場合、系統周波数の 2 倍で発生する電力脈動を補償するために、大容量の電解コンデンサが直流中間部に接続される。一方で、DC アクティブフィルタに代表されるアクティブパワーデカップリング回路では小容量キャパシタで電力脈動を補償できるため、直流中間コンデンサを小容量化できる。出力電圧と電流が正弦波のときの瞬時出力電力 P_{out} は(4)式で表される。

$$P_{out} = \frac{V_{out} I_{out}}{2} (1 - \cos 2\omega t) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 V_{out} は系統電圧最大値、 I_{out} は系統電流最大値、 ω は

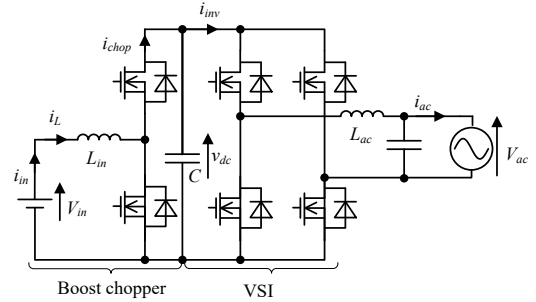


Fig. 1. Grid-tied inverter with boost chopper.

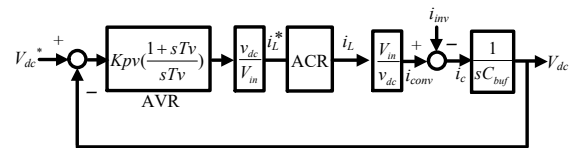


Fig. 2. Control block diagram of power decoupling side.

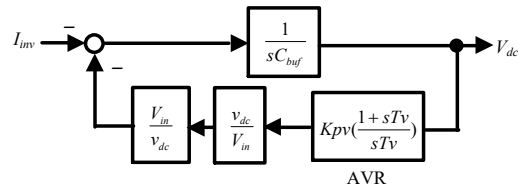


Fig. 3. Inverter current disturbance response of power decoupling controller.

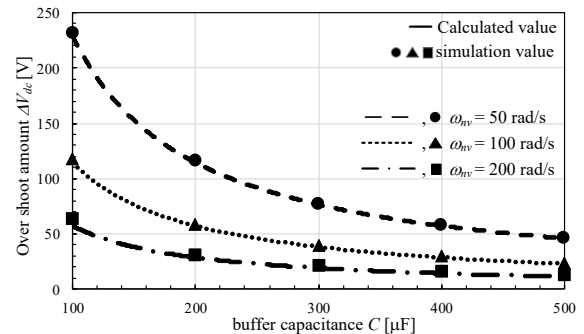


Fig. 4. Overshoot amount comparison between calculation formula and simulation value with boost chopper.

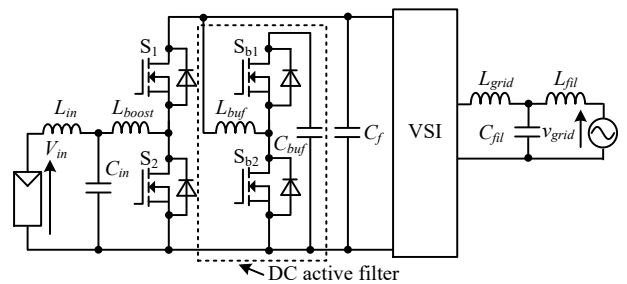


Fig. 5. Conventional boost-type active buffer circuit.

系統の角周波数である。(4)式における第 2 項が電力脈動成分に相当する。また単相脈動補償を補償するためのキャパシタ容量 C_{buf} は(5)式で表される⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$C_{buf} = \frac{2P_c}{\omega(V_{Cmax}^2 - V_{Cmin}^2)} \dots\dots\dots (5)$$

P_c はキャパシタの充放電電力、 V_{Cmax} と V_{Cmin} はそれぞれ許容電圧変動の最大値と最小値、 ω は電源系統の角周波数である。よってアクティブパワーデカップリング方式ではバッファキャパシタ電圧を大きく変動させることでキャパシタ容量を小さくすることが可能となる。しかし、アクティブパワーデカップリング回路は第 2 章で検討した昇圧チョップ同様に大容量のエネルギーバッファを有さないため、負荷急変といった過渡時に電圧オーバーシュートの発生が想定される。そこで昇圧チョップを基本回路としたアクティブパワーデカップリング回路によって電圧オーバーシュートを検討する。

図 6 に昇圧チョップを応用したパワーデカップリング回路の構成図を示す。本回路は小容量キャパシタ C_{buf} によって単相電力脈動を補償する。また、本回路は PV 入力電圧の昇圧を同時に達成可能であり、図 5 の DC アクティブフィルタのように追加素子を必要とせず、回路の基本構成、および制御方式も次節に述べる単相電力脈動補償のフィードフォワード補償が追加されるのみで制御ブロックもほぼ変わらず図 1 の昇圧チョップとほぼ同等となる。図 6 の小容量キャパシタを適用したパワーデカップリング回路を適用することで電力脈動を補償しつつ、瞬低時の直流中間電圧オーバーシュートについて考察する。

〈3・2〉 制御方式

図 7 に制御ブロック図を示す。本回路の制御は昇圧チョップの制御にパワーデカップリング用の制御を付与した構成となる。単相電力脈動補償は、直流中間電圧制御の出力にバッファコンデンサ電流指令をフィードフォワードすることによって実現される。バッファコンデンサの充放電電流 i_c は(6)式で表される。

$$i_c = \frac{P_{out}}{v_c} \cos(2\omega t) \dots\dots\dots (6)$$

電圧型インバータ(VSI)の制御は、PLL (Phase Locked Loop) による系統電圧との位相同期、および出力電流制御によって構成されている。瞬低期間中には出力電流の位相を 90 度進ませることで無効電流を注入し、系統の復帰時には徐々に位相を無効成分から有効成分に戻すことで出力を回復させ、系統復帰を支援している。

4. APD 回路を用いた場合の直流中間電圧オーバーシュート評価

図 8 にパワーデカップリング回路における(4)式で導出した電圧オーバーシュート量の計算値とシミュレーション値の比較結果を示す。ここで AVR の応答角周波数は 50 rad/s

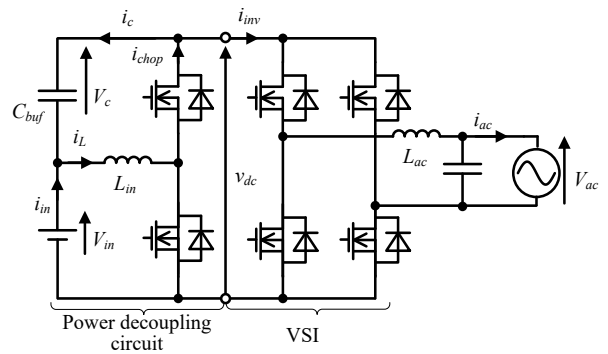


Fig. 6. Grid-tied inverter with power decoupling circuit.

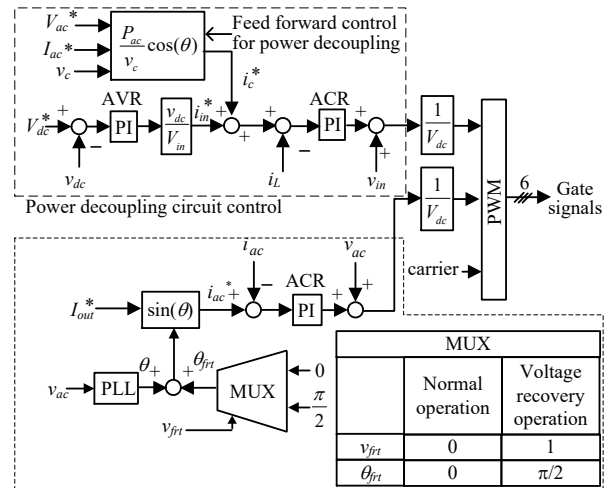
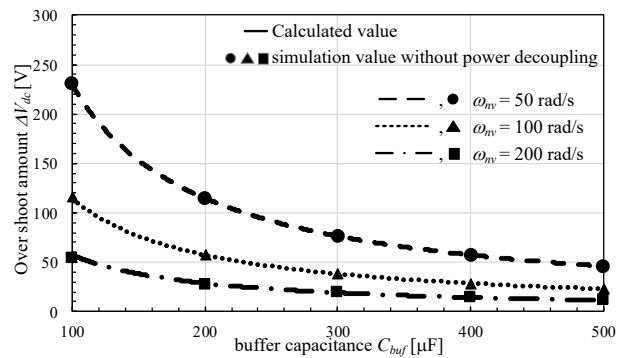
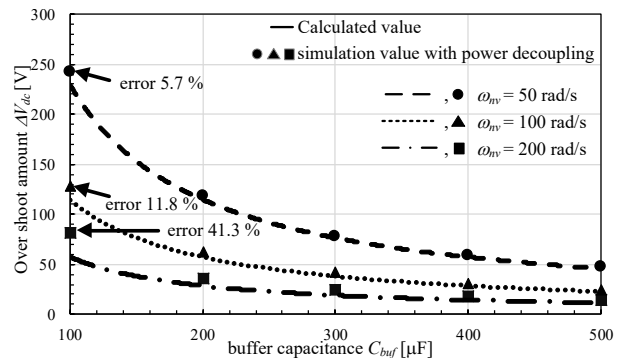


Fig. 7. Control block diagram of active power decoupling circuit.



(a) without power decoupling



(b) with power decoupling

Fig. 8. Overshoot amount comparison between calculation formula and simulation value

から 200 rad/s まで変更した条件で検討している。まずパワーデカップリング動作を行わない場合、計算結果とシミュレーション結果はほぼ一致していることを確認した。これにより、パワーデカップリング回路において昇圧チョップのモデルと同様に検討できることを確認した。一方で、パワーデカップリング制御を適用した場合は計算値に対して電圧オーバーシュート量が増加する。これはパワーデカップリング制御と電圧制御の干渉が原因である。パワーデカップリング制御では(4)式で示すフィードフォワード補償により 100 Hz (625 rad/s)の電流をキャパシタに流す必要がある。しかし、本デカップリング回路では VSI 側の電圧制御の対象としてもバッファキャパシタを利用している。そのため AVR の応答角周波数が高くなるほど単相電力脈動のフィードフォワード補償と干渉し、理論値とシミュレーション結果が剥離する。したがって、アクティブパワーデカップリング方式において電圧オーバーシュート量を正確に把握するためには電圧制御応答とパワーデカップリング制御の干渉を考慮した制御器設計が重要となる。デカップリングコンデンサとインバータが並列に入る APD 方式では同様の結果となる。

5. 実験結果

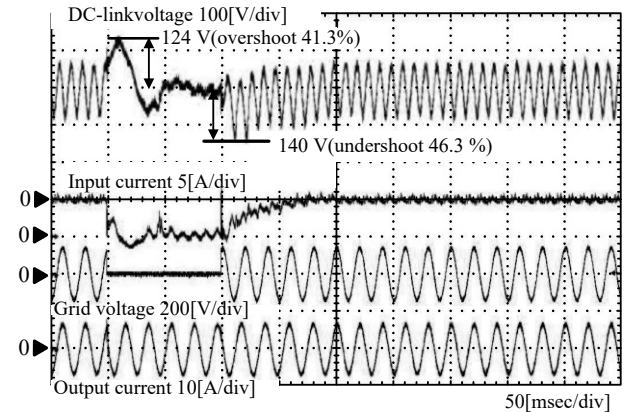
図 9 に 100 V 連系での FRT 動作を示す。瞬低中でも電圧を維持するのに必要なエネルギーが入力側から供給されるため、直流中間電圧値がオーバーシュート発生後に指令値に追従している。AVR 応答角周波数 100 rad/s での瞬低時における直流中間電圧のオーバーシュートと系統回復時のアンダーシュートはそれぞれ、直流中間平均電圧(300 V)に対して 41.3% (124 V) および 46.7% (140 V) である。直流中間電圧最小値は、系統電圧最大値よりも常に高い状態を維持している。従って、FRT 動作時に入出力電流に歪みが発生していない。瞬低時に発生するオーバーシュート量について、(7)式を用いると 139 V となり、実験値と計算値との誤差率は 10.8%となる。AVR 応答角周波数 200 rad/s 時では同様に計算すると 69.5 V、実測値が 92 V となり、誤差率は 33.2%である。この誤差は AVR 応答が脈動補償の 100 Hz 成分と干渉するため発生する。AVR 応答角周波数を上げると、系統回復後のアンダーシュートも減少する。また、AVR の応答角周波数を高くするほど誤差率が大きくなることを実験より確認した。

6. まとめ

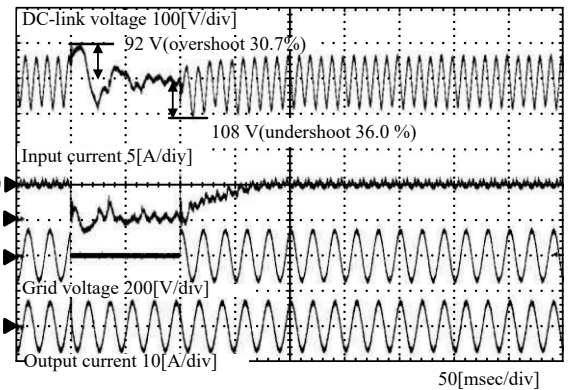
本論文では、小容量キャパシタを用いた単相 DC/AC インバータにおける、負荷変動を考慮した瞬低時の電圧オーバーシュート量について考察した。結果より、直流中間電圧のオーバーシュート抑制には電圧制御応答とパワーデカップリング制御の干渉を考慮する必要があることを明らかにした。今後は AVR 制御設計について検討を行う。

Table 1. Experimental conditions.

Quantity	Symbol	Value
Input voltage	V_{in}	100 V
Output voltage	V_{out}	100 V
Rated power	P	500 W
boost inductor	L	3 μ H
buffer capacitor	C_{buf}	55 μ F
DC-link voltage	v_{dc}	300 V
Interconnected inductor	L_{ac}	6 μ H
Switching frequency	f_{sw}	20 kHz



(a) AVR response angular frequency ω_{mv} is 100 rad/s.



(b) AVR response angular frequency ω_{mv} is 200 rad/s.

Fig. 9. FRT operation during grid voltage sag at 100 V grid-connection.

文献

- (1) Taiki Onodera, Toshihisa Shimizu "Fault-Ride-Through (FRT) Characteristics of a Power-Decoupling-Type Photoinverter System" IEEE APEC 2019, pp.3207-3212, (2019)
- (2) M. Tsili S. Papathanassiou: "A review of grid code technical requirements for wind farms", IET Renew. Power Gener. Vol. 3, Iss. 3, pp. 308-332 (2009)
- (3) Ben Liu, Teruo Yoshino, and Atsuo Kawamura "Seamless Control of Grid-Connected Inverter during Single Phase Disconnection after Single Phase Fault in a Weak Grid," IEEE J. Industry Applications, vol. 7, no. 6, pp. 506-516, (2018)
- (4) 系統連系専門部会編:「系統連系規程 JEAC9701」, (2016)
- (5) 渡辺大貴, 小岩一広, 伊東淳一, 大沼喜也, 宮脇慧: 「昇圧形アクティブバッファを有する電解コンデンサレス太陽光発電系統連系インバータの開発」, 電気学会論文誌 D, Vol. 135, No. 5, pp. 467-474 (2015)
- (6) 伊東淳一, 櫻庭友和, レ ホアイ ナム, 渡辺大貴, 日下佳祐: 「電流不連続モードで動作する昇圧型アクティブバッファを用いた単相系統連系インバータ」, 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 5, pp. 453-462 (2018)