

# 小型連系インダクタを有する三相系統連系インバータの FRT 動作時の電流オーバーシュート抑制ベクトルに関する 一検討

永井 悟司\*, 渡辺 大貴, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Current Overshoot Suppression Vector during FRT Operation for Three-phase Grid-tied Inverter with Minimized Inductor

Satoshi Nagai, Hiroki Watanabe, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

系統連系インバータを小型化するための一手法として、高周波駆動による連系インダクタンスの低減がある。しかし、本手法では瞬時電圧低下(瞬低)時にインダクタ電流のオーバーシュートにより運転継続(Fault Ride Through: FRT<sup>(1)</sup>)が困難となる。従来の FRT 制御法として、瞬低時に直流中間電圧を制御する手法<sup>(2)</sup>や電圧振幅と出力電力制御を適用した手法<sup>(3)</sup>などが提案されているが、瞬低発生時の電流オーバーシュートに対しては深く評価がされていない。これに対し、著者らは小型連系インダクタを有する三相インバータにおいて、瞬低時の出力電流ベクトルに対して、逆方向の電圧ベクトル(カウンタ電圧ベクトル)を出力し電流オーバーシュートを抑制した FRT 動作を提案している<sup>(4)</sup>。しかし、本方式のベクトル操作については更なるオーバーシュート低減検討の余地がある。

本論文では、三相インバータにおいて FRT 時に電流オーバーシュートを低減できる電圧ベクトルについて評価する。実験結果より、カウンタ電圧ベクトル量の調整により復帰時の電流オーバーシュート量を 21%低減したため報告する。

## 2. FRT 時における電流低減ベクトルの検討

図 1 に三相系統連系インバータの回路図を示す。本論文では 3 相 2 レベルインバータで検討する。ここで、三相インバータの電圧電流方程式はインダクタの抵抗分を無視すると、(1)式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL & \omega L \\ -\omega L & pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ac} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $v_p, v_q$  はインバータ出力の瞬時有効電圧と無効電圧、 $i_p, i_q$  はインダクタの瞬時有効電流と無効電流、 $L$  は連系インダクタンス、 $v_{ac}$  は系統電圧、 $\omega$  は系統電圧の角周波数、 $p$  は微分演算子であり、力率 1 の動作とする。また、本論文では系統電圧 0 V の瞬低における検討を行う。

**<2.1> 瞬低発生時のベクトル操作** 瞬低発生時は(1)式の系統電圧  $v_{ac}$  が 0 V となる。このとき、インダクタ電流  $i_p, i_q$  は(2), (3)式で表される。

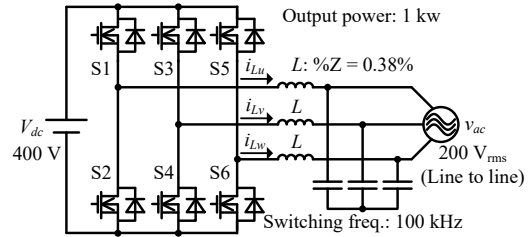


Fig. 1. Three-phase grid-tied inverter with minimized inductor.

$$i_p = \frac{v_p}{\omega L} \sin \omega t - \frac{v_q}{\omega L} (1 - \cos \omega t) + i_p(0) \cos \omega t - i_q(0) \sin \omega t \quad (2)$$

$$i_q = \frac{v_p}{\omega L} (1 - \cos \omega t) + \frac{v_q}{\omega L} \sin \omega t + i_p(0) \sin \omega t + i_q(0) \cos \omega t \quad (3)$$

ここで、 $t$  は時間、 $i_p(0), i_q(0)$  は定常時のインダクタ有効電流と無効電流である。 $i_q = 0$  で力率 1 の定常動作から瞬低した場合、電流オーバーシュートの傾きは  $i_p$  が正方向、 $i_q$  がほぼゼロとなる。この電流を最大限低減するには  $i_p$  の傾き  $di_p/dt$  が負方向に最大、 $i_q$  の傾き  $di_q/dt$  がゼロとなり、(4), (5)式が成り立つインバータの瞬時有効電圧  $v_{pfrt}$  と無効電圧  $v_{qfrt}$  を出力すればよい。

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{v_{pfrt}}{L} \cos \omega t - \frac{v_{qfrt}}{L} \sin \omega t - \omega i_p(0) \sin \omega t - \omega i_q(0) \cos \omega t = -\infty \quad (4)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_{pfrt}}{L} \sin \omega t + \frac{v_{qfrt}}{L} \cos \omega t + \omega i_p(0) \cos \omega t - \omega i_q(0) \sin \omega t = 0 \quad (5)$$

(4), (5)式より  $v_{pfrt} = -\infty$ ,  $v_{qfrt} = -\omega L i_p(0)$  と導出できるが、インバータ出力電圧は直流中間電圧  $V_{dc}/2$  に制限され、 $v_{qfrt}$  は 0 に等しい値なので  $v_{pfrt} = -V_{dc}/2$ ,  $v_{qfrt} = 0$  のときに電流低減量が最大となる。これはカウンタ電圧ベクトルと同等である。

**<2.2> 瞬低復帰時のベクトル操作** 瞬低復帰時は有効電流  $i_p$  が負方向に最大のときに系統電圧が逆ベクトルの方向に復帰する場合がインダクタ電流オーバーシュート量最大となる条件である。このとき、(1)式の電圧電流方程式において系統電圧  $v_{ac}$  が 0 V から  $v_{ac}$  に復帰するため、このときのインダクタ電流  $i_p, i_q$  は(6), (7)式に示される。

$$i_p = \frac{v_p}{\omega L} \sin \omega t - \frac{v_q}{\omega L} (1 - \cos \omega t) - \frac{v_{ac}}{\omega L} \sin \omega t + i_p(0) \cos \omega t - i_q(0) \sin \omega t \quad (6)$$

$$i_q = \frac{v_p}{\omega L} (1 - \cos \omega t) + \frac{v_q}{\omega L} \sin \omega t - \frac{v_{ac}}{\omega L} (1 - \cos \omega t) + i_p(0) \sin \omega t + i_q(0) \cos \omega t \quad (7)$$

このとき、インダクタ電流オーバーシュートの傾きは  $i_p$  が負方向、 $i_q$  がほぼゼロとなる。よって、インダクタ電流を最大限低減するには  $i_p$  の傾き  $di_p/dt$  が正方向に最大、 $i_q$  の傾き  $di_q/dt$  はゼロとなればよいので(8)、(9)式が成り立つインバータの瞬時有効電圧  $v_{pfrt}$  と無効電圧  $v_{qfrt}$  を出力すればよい。

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{v_{pfrt}}{L} \cos \omega t - \frac{v_{qfrt}}{L} \sin \omega t - \frac{v_{ac}}{L} \cos \omega t - \omega i_p(0) \sin \omega t - \omega i_q(0) \cos \omega t = \infty \quad (8)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{v_{pfrt}}{L} \sin \omega t + \frac{v_{qfrt}}{L} \cos \omega t - \frac{v_{ac}}{L} \sin \omega t + \omega i_p(0) \cos \omega t - \omega i_q(0) \sin \omega t = 0 \quad (9)$$

(8)、(9)式より  $v_{pfrt} = \infty$ 、 $v_{qfrt} = -\omega L i_p(0)$  と導出できるが、インバータ出力電圧は直流中間電圧  $V_{dc}/2$  に制限され、 $v_{qfrt}$  は 0 V に等しい値なので  $v_{pfrt} = V_{dc}/2$ 、 $v_{qfrt} = 0$  のときに電流低減量が最大となる。これはカウンタ電圧ベクトルと同等である。

### <2.3> 過渡応答を考慮したベクトル操作

カウンタ電圧ベクトル適用時は、電流を瞬時的に低減するため、カウンタ電圧ベクトル解除後に過渡応答による電流オーバーシュートが発生する。上記問題を抑制するため、電流傾きがゼロとなるベクトル操作を行う。(8)、(9)式より電流傾きがゼロとなる電圧ベクトルを導出すると  $v_{pfrt} = v_{ac}$ 、 $v_{qfrt} = 0$  となる。このとき、デッドタイムによる還流時にインバータ出力に直中間電圧の逆電圧が出力されるため、 $v_{ac}$  からデッドタイム誤差電圧を減算したベクトルを出力する。

図 2 に提案する電流オーバーシュート抑制ベクトルを示す。瞬低時は電圧低下率によって、インダクタ電流傾きをゼロとするベクトルの調整が必要のため、カウンタ電圧出力で対応し、カウンタ電圧出力期間に系統電圧検出値と文献(4)における外乱オブザーバの積分器をゼロに初期化する。復帰時は定常電圧に復帰し系統位相検出ズレが無いことを仮定すると、系統電圧  $v_{ac}$  と同等のインバータ出力電圧が出力できればインダクタ電流の傾きはゼロになる。このとき、系統電圧検出値を瞬低前の系統電圧値に更新し、外乱オブザーバの積分器をゼロに初期化する。これにより過渡応答を考慮せずオーバーシュート抑制ができる。

## 3. 実験結果

図 3 に従来のカウンタ電圧ベクトルを適用した FRT の実験結果を示す。カウンタ電圧ベクトル適用により復帰時の電流オーバーシュートを低減できているが、ベクトル操作解除後に過渡応答により電流オーバーシュートが発生する。

図 4 に提案インバータ電圧ベクトル操作を適用した FRT

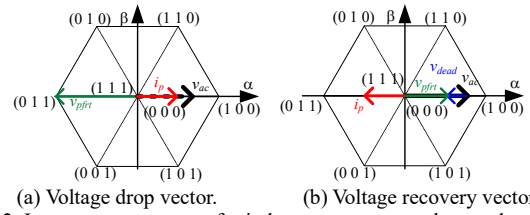


Fig. 2. Inverter output vector for inductor current overshoot reduction.

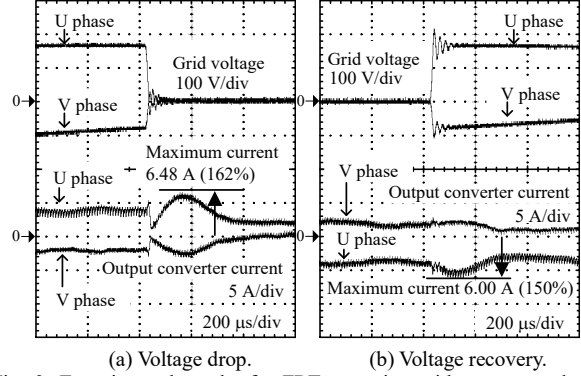


Fig. 3. Experimental results for FRT operation with counter voltage vector output.

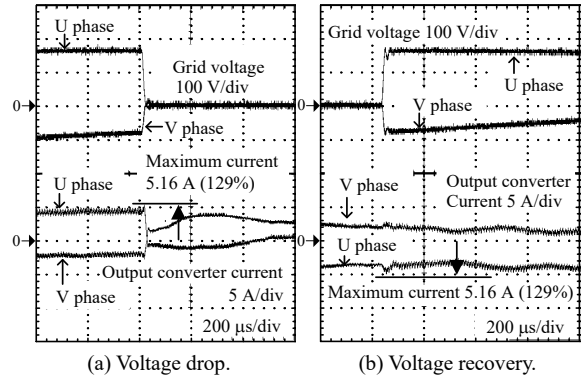


Fig. 4. Experimental results for FRT operation with proposed voltage vector output.

動作の実験結果を示す。提案法を適用することで図 3 のカウンタ電圧ベクトル出力を適用した FRT 動作と比較して瞬低発生時、瞬低復帰時の電流オーバーシュートが共に低減できていることがわかる。これは、提案法により瞬時に外乱を考慮したインバータ電圧を出力できるためである。特に、提案ベクトル操作により復帰時の電流オーバーシュート量を 21%低減できた。また、提案法を適用することで系統擾乱検出までのオーバーシュートのみを考慮し、ベクトル操作後の過渡応答を考慮せず連系インダクタンスの設計が可能である。

今後の課題は、残電圧 0%の瞬低により系統電圧位相情報を喪失した場合の提案ベクトル操作の検討と二相瞬低などの不平衡な瞬低に対する FRT 動作方法の検討である。

## 文献

- (1) 系統連系専門部会編:「系統連系規格 JEAC9701」, (2016)
- (2) G. Ding, et al, IEEE PELS, Vol. 31, No. 6, pp. 4182-4194, (2016)
- (3) J. Alipoor, et al, IEEE JIA, Vol. 4, No. 5, pp. 654-666, (2015)
- (4) 永井他:電気学会研究会, SPC-18-137, MD-18-097, (2018)