

フライングキャパシタの電圧アンバランスを維持する 空間ベクトル変調法を用いた出力電流リップル低減

志村 慎士郎, 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

Space Vector Modulation to Maintain Unbalanced Flying Capacitor Voltage for Output Current Ripple Reduction

Shinjiro Shimura, Keisuke Kusaka (Nagaoka University of Technology)

This paper proposes a space vector modulation (SVM) maintaining an unbalanced voltage of the flying capacitor (FC) for a three-level flying capacitor converter to reduce the output current ripple. The conventional SVM for balanced FC voltage selects the output voltage vectors that evenly balance FC voltages at half the DC voltage. In contrast, the FC voltage is controlled to be unbalanced to increase the number of output voltage vectors in this paper. The increased number of output voltage vectors allows the reduction of the current ripple. From the simulation result, the output current ripple is reduced by up to 20.4% in comparison with the conventional method.

キーワード: フライングキャパシタ, マルチレベルインバータ, 空間ベクトル変調

Keywords: Flying capacitor, Multilevel inverter, Space vector modulation

1. はじめに

フライングキャパシタ(FC)コンバータの変調方式の1つとして空間ベクトル変調方式が用いられている⁽¹⁾。一般的な空間ベクトル変調方式では、FC電圧を直流電圧の1/2で均等にバランスさせるために最適な出力電圧ベクトルが選択される⁽²⁾。しかし、デバイス耐圧が許容する範囲内でFC電圧をあえてアンバランスさせることが可能となれば、選択可能な出力ベクトルが増加するため、出力電流リップルの低減が期待できる⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで本稿では、FC電圧のアンバランス状態をあえて維持するための空間ベクトル変調法を提案する。

2. 提案する空間ベクトル変調法

Fig.1に本稿で提案する変調方式を導入する3レベルFCコンバータの回路図を示す。なお、本論文ではアームのスイッチングパルスをもとに $S(S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4})$ と表記する。

Fig.2に一般的なSVMの原理図を示す。3レベルの空間ベクトルの領域はSec.1~Sec.6の6つのセクタに分けられ、各セクタは(1)式のインナーベクトル V_{in}^* を定義することで等価的な2レベルSVMと同様に制御できる⁽²⁾。

$$V_{in}^* = |V_{in}^*| \angle \theta_{in} = V^{ref} - V_{6+i} \quad (1)$$

ここで θ_{in} はインナーベクトルの位相角、 i は選択するセクタ番号とする。

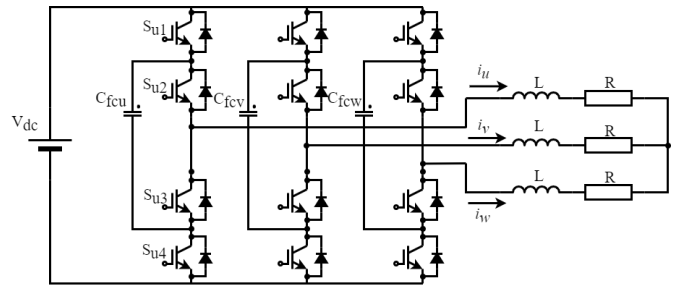


Fig. 2. Three-level flying capacitor converter topology.

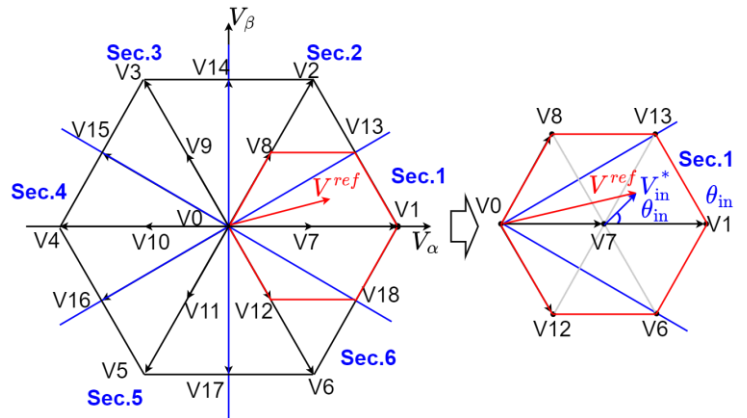


Fig. 1. Three-level SVM.

Table 1に3レベルFCコンバータのU相スイッチングパルスとU相電圧の関係を示す。本表からわかるように、FC

Table 1. Switching states of three-level FCC.

State	S(S _{u1} , S _{u2} , S _{u3} , S _{u4})	V _u
3	S(1, 1, 0, 0)	V _{dc}
2	S(0, 1, 0, 1)	V _{fc}
1	S(1, 0, 1, 0)	V _{dc} -V _{fc}
0	S(0, 0, 1, 1)	0

電圧を電源電圧 V_{dc} の 1/2 倍でバランスさせた場合、U 相に印加される電圧は $0, 1/2V_{dc}, V_{dc}$ の 3 通りとなる。このとき、出力できる電圧ベクトルは重複するベクトルを除くと 19 個となる。一方、提案方式では FC 電圧を $1/2V_{dc} + \Delta V_f$ に維持するよう変調する。この場合、U 相に印加される電圧は $0, 1/2V_{dc} + \Delta V_f, V_{dc} - 1/2V_{dc} - \Delta V_f, V_{dc}$ の 4 通りに増える。このとき $0 \sim \pi/2$ における空間ベクトルは Fig.3 のように変化する。FC 電圧を ΔV_f ずらして維持させたとき、黒点の V8 ベクトルは赤点の V8^x ($x = 1 \sim 6$) へ分離する。このようにして提案法では出力できる電圧ベクトルが 49 個に増える。

Table2 に Fig.2 内の V8 ベクトルにおけるスイッチング状態(S_u, S_v, S_w)とキャパシタ電流(i_{cu}, i_{cv}, i_{cw})の関係を示す。キャパシタ電流はキャパシタ充放電状態を表しており、1: 充電, 0: 充放電なし, -1: 放電を意味する。FC 電圧を一定値で維持させるため、キャパシタ充放電指令と Table2 を比較し、現在の負荷力率から指令にもっとも近いスイッチングパターンを選択する。ただし、充放電状態は負荷力率に依存するため、本稿では負荷力率 1 を想定する。

3. シミュレーション結果

Fig.4 に電源電圧 100V で FC 電圧を 60V のアンバランスで維持したときのシミュレーション結果を示す。Fig.4 から FC 電圧を 60V (直流電圧の 60%) で維持できていることが確認できる。ただし、出力電流にひずみが生じることとなった。本電流ひずみは、電圧指令の算出にベクトルの移動量が考慮できていないことから電圧指令と出力電圧に誤差が生じることが原因であり、今後改善予定である。

Fig.5 に U 相電流ピーク時の拡大波形を示す。Fig.5(a)は FC 電圧を 50V に維持した場合の波形を示しており、リップルの peak to peak は 0.98A であった。それに対して Fig.5(b)は FC 電圧を 60V に維持したときの波形を示しており、リップルの peak to peak が 0.78A であった。この結果から、提案する変調法により、電流リップルが最大で 20.4%減少することを確認した。

今後は、定常時における負荷電流ひずみを改善するような電圧指令の算出方法について検討する。また、一部期間において電流リップル低減が確認できているが、定常的に電流リップル低減が可能な電圧ベクトルの選定についての検討を行う。

文献

- (1) J. Amini, "An Effortless Space-Vector-Based Modulation for N-level Flying Capacitor Multilevel Inverter With Capacitor Voltage Balancing Capability," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 11, pp. 6188-6195(2014).
- (2) M. M. da Silva and H. Pinheiro, "Voltage balancing in flying

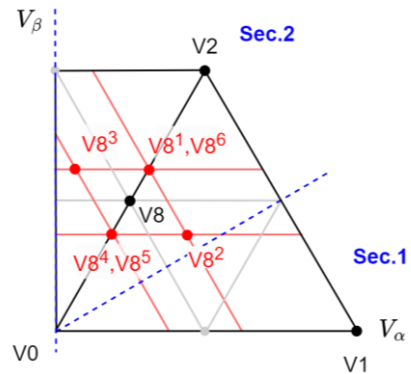


Fig. 3. SV with unbalanced flying capacitor voltage.

Table 2. Relation of switching state and capacitor charging.

	Su	Sv	Sw	i_{cu}	i_{cv}	i_{cw}
V8 ¹	1	1	0	1	1	0
V8 ²	2	1	0	-1	1	0
V8 ³	1	2	0	1	-1	0
V8 ⁴	2	2	0	-1	-1	0
V8 ⁵	3	3	1	0	0	1
V8 ⁶	3	3	2	0	0	-1

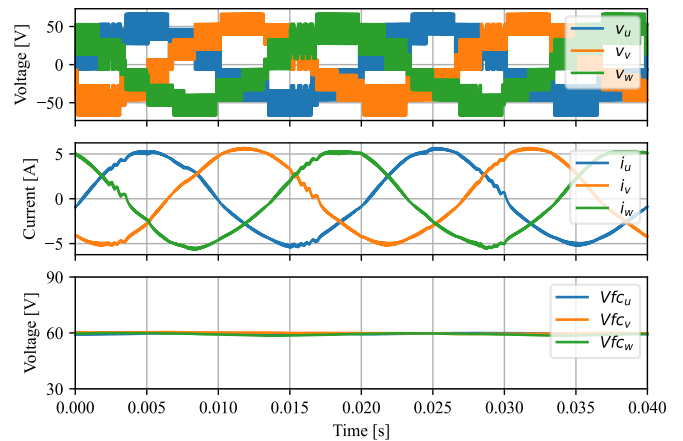


Fig. 4. Waveform of phase voltage, current and V_{fc}.

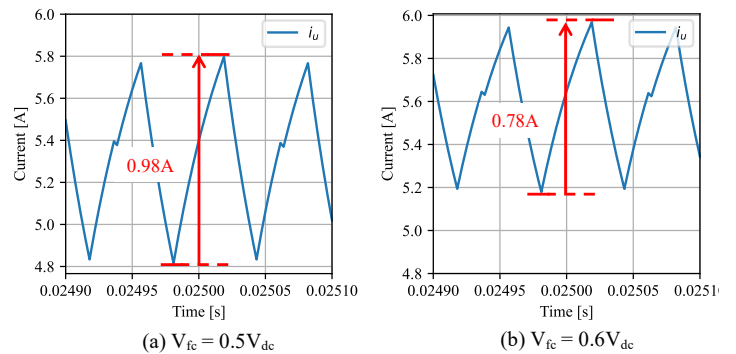


Fig. 5. Enlarged waveform at peak of U-phase current.

capacitor converter multilevel using space vector modulation," 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Florianopolis, Brazil, 2017, pp. 1-5.

- (3) L. Tan et al., "A Simplified Space Vector Modulation for Four-Level Nested Neutral-Point Clamped Inverters With Complete Control of Flying-Capacitor Voltages," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 3, pp. 1997-2006, March 2018.
- (4) L. Tan et al., "A Space Virtual-Vector Modulation With Voltage Balance Control for Nested Neutral-Point Clamped Converter Under Low Output Frequency Conditions," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 5, pp. 3458-3466, May 2017.