

## B4 인버터의 제어성능 향상을 위한 전압보상 기법

이 동 명, 오 재 윤, 정 달 호

LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소기술팀

### A Voltage Compensation Method to Improve the Control Performance for B4 Inverters

Dong-Myung Lee, Jae-Yoon Oh, Dal-Ho Cheong

Digital Appliance Research Lab. LG Electronics Inc.

#### ABSTRACT

This paper proposes a voltage compensation method to improve the control performance of B4 inverter which is studied for low-cost drive systems. The B4 inverter employs only four switches and it has a center-tapped connection in the split dc-link capacitors to one phase of a three-phase motor. In the B4 topology, unbalanced three-phase voltages will be generated by the dc link voltage ripple. To solve this problem, we present a voltage compensation method which adjusts switching times considering dc link voltage ripple. The proposed method is verified by simulation results.

#### 1. 서 론

가전제품의 저 소음화 및 에너지 절감을 위하여 가변속 인버터 시스템의 적용이 확대되고 있다. 이러한 인버터의 적용은 제품 가격의 상승을 가져와 최근에는 인버터 제품의 저가격화를 위한 연구가 활발히 진행중이다. 저가격화를 위한 하나의 방법으로 4개의 스위칭 소자를 사용한 3상 모터의 속도 제어 방식이 소개되었다<sup>[1]</sup>. 본 논문에서는 이러한 방식의 인버터를 B4인버터라 칭한다.

B4인버터는 3상 모터의 한 상이 DC link capacitor의 중성점에 연결된 구조이며 B4방식을 사용하여 3상 평형 전압의 발생을 위한 스위칭 기법이 여러 논문을 통해 소개되었다<sup>[2][3]</sup>. 그러나 B4인버터는 상하로 분리된 DC link capacitor를 가지므로 상하단의 전압차에 의해 발생 전압의 왜곡현상이 생기며 이를 해결하기 위한 기법이 연구되고 있다<sup>[4][5]</sup>. 소개된 기법들은 전압 왜곡 현상을 보상하기 위하여 스위칭 패턴을 변경하거나 순시 전압

을 측정하여 스위칭 시간을 연산하는 방식이다. 따라서, 추가적인 회로가 필요하거나 순시연산이 가능한 DSP를 채용한 경우로 저속의 마이크로를 사용하는 가전제품에 대한 이러한 기법의 적용은 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 저속의 마이크로에 적용 가능한 간단한 전압보상기법을 사용하여 B4 인버터의 제어 성능을 향상시키고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 B4 인버터의 동작 원리

스위칭 소자 6개를 사용하는 B6인버터는 각각의 레그가 모터 각 상에 연결된 구조로 되어 있다. 이에 비해 B4인버터는 그림 1과 같이 모터의 한 상이 상하로 분리된 DC link capacitor의 중성점에 연결되고 나머지 두상은 인버터의 레그에 연결된 구조이다. B4인버터는 4개의 스위칭 소자를 이용하여 2개의 전압벡터를 발생시킨다. 이 두 전압은 3상 평형 전압을 발생하기 위하여 그림 2와 같이 DC link 중성점에 연결된 상에 역상의 전압을 인가하는 방식으로 전압을 생성시킨다. 이렇게 발생된 두 전압은 3상 전압과 영상분의 전압을 가진 형태가 되어 3상 모터의 제어가 가능하다<sup>[1]</sup>.

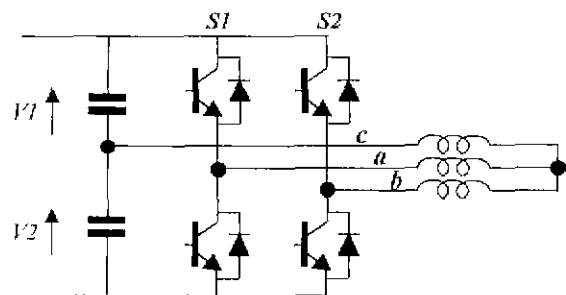


그림 1. B4 인버터 구조

그림 2에서 볼 수 있듯이 C상에 역상 전압을 인가한다고 가정하면 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>로 표시된 B4인버터의 레그 중 S<sub>1</sub>의 인가전압 V<sub>u</sub>는 V<sub>as</sub>에 비해 30° 지연되고, S<sub>2</sub>의 인가전압 V<sub>w</sub>는 V<sub>u</sub>에 비해 60° 지연된 전압 형태를 가진다. 3상의 평형전압 얻기 위한 2개의 전압벡터는 식(1)과 같다.

$$V_u = T_a = \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} m_a \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) \right] \cdot T_{\text{samp}}$$

$$V_w = T_b = \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} m_a \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \right] \cdot T_{\text{samp}} \quad \text{식(1)}$$

여기서, m<sub>a</sub>: 변조율, T<sub>samp</sub>: Sampling Time

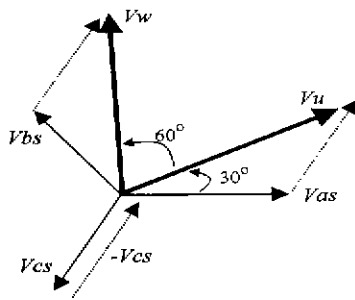


그림 2. B4 인버터의 전압 벡터도

식(1)에 의해 발생하는 전압은 스위칭 상태에 따라 표 1과 같은 4가지 전압벡터를 가진다. B6의 경우는 6개의 유효벡터와 2개의 무효벡터를 가지나, B4인버터는 4개의 유효벡터만이 존재한다. 여기서 0은 아래단의 스위치가 on인 경우이고, 1은 위단이 on인 경우이다. 표 1은 3상 모터의 Y결선 중 C상이 DC link 중성점에 연결된 경우를 예로 한다.

B4 인버터의 4가지 전압 중 mode 1(0,0)은 표 1에서 알 수 있듯이 하단 capacitor가 모터에 전압을 공급하고 mode 4(1,1)는 상단 capacitor에서 모터에 전압을 공급함을 알 수 있다. 따라서 모드에 따라 전압을 공급하는 Capacitor가 달라지므로 B4 인버터가 B6인버터에 비해 인가전압의 왜곡이 큼을 알 수 있다. 한편 V<sub>1</sub>은 상단 capacitor의 전압, V<sub>2</sub>는 하단 capacitor의 전압을 나타낸다.

표 1. 모드에 따른 상전압 방정식

| 모드 | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | V <sub>as</sub>            | V <sub>bs</sub>            | V <sub>cs</sub>          |
|----|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1  | 0              | 0              | $-\frac{1}{3} V_2$         | $-\frac{1}{3} V_2$         | $\frac{2}{3} V_2$        |
| 2  | 0              | 1              | $-\frac{1}{3}(2V_2 + V_1)$ | $\frac{1}{3}(2V_1 + V_2)$  | $\frac{1}{3}(V_2 - V_1)$ |
| 3  | 1              | 0              | $\frac{1}{3}(2V_1 + V_2)$  | $-\frac{1}{3}(2V_2 + V_1)$ | $\frac{1}{3}(V_2 - V_1)$ |
| 4  | 1              | 1              | $\frac{1}{3} V_1$          | $\frac{1}{3} V_1$          | $-\frac{2}{3} V_1$       |

## 2.2 전압 왜곡 현상

해석의 간편화를 위하여 u<sub>1</sub>(0,0)을 실수축으로 하여 4개의 전압을 나타내면 그림 3과 같게 되고, 이때의 실수 및 허수 값은 표 2와 같다. 그림 3은 V<sub>1</sub>과 V<sub>2</sub>의 전압이 동일한 이상적인 경우에서의 전압 벡터도이다. V<sub>1</sub>=V<sub>2</sub>인 경우 4개의 전압 벡터는 직교한다.

표 2. 전압 벡터의 성분

| 전압             | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | Re                       | Im                               |
|----------------|----------------|----------------|--------------------------|----------------------------------|
| u <sub>1</sub> | 0              | 0              | V <sub>2</sub>           | 0                                |
| u <sub>4</sub> | 0              | 1              | $\frac{1}{2}(V_2 - V_1)$ | $-\frac{\sqrt{3}}{2}(V_1 + V_2)$ |
| u <sub>2</sub> | 1              | 0              | $\frac{1}{2}(V_2 - V_1)$ | $\frac{\sqrt{3}}{2}(V_1 + V_2)$  |
| u <sub>3</sub> | 1              | 1              | -V <sub>1</sub>          | 0                                |

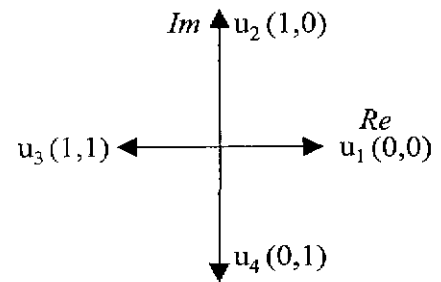


그림 3. 4개의 유효 전압벡터

B4인버터의 전압왜곡현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. V<sub>2</sub>=V<sub>1</sub>일 때 직교하는 전압벡터는 V<sub>2</sub>>V<sub>1</sub>인 경우 그림 4와 같이 오른쪽으로 기울어진 전압 벡터가 된다. V<sub>2</sub>가 V<sub>1</sub>보다 큰 경우 u<sub>4</sub>(0,1)를 예로 표 2를 보면 실수값이 양이 됨을 알 수 있다. 즉 V<sub>2</sub>, V<sub>1</sub>이 동일한 경우 Re성분이 영이 되어 직교하던 u<sub>4</sub> 전압벡터가 V<sub>2</sub>가 V<sub>1</sub>보다 크면 양의 Re성분을 갖게 되어 오른쪽으로 기울어진 전압벡터가 된다. 또한 u<sub>1</sub>(0,0)이 u<sub>3</sub>(1,1)에 비해 커지게 된다.

상하 DC link단의 전압차가 존재하는 경우 제어기에서 지령치 전압을 생성하기 위한 S<sub>1</sub>의 스위칭 시간, S<sub>2</sub>의 스위칭 시간을 그대로 인가하면 상하단 DC link단의 전압차에 의한 왜곡된 전압벡터에 의해서 그림 4의 아래 그림과 같이 발생전압이 왜곡된다. V<sub>2</sub>>V<sub>1</sub>인 경우 u<sub>2</sub>, u<sub>4</sub>가 우측으로 치우치고, u<sub>1</sub>>u<sub>3</sub>가 되므로 원하는 지령치 전압보다 우측으로 기울어지고 전압의 크기 또한 커진 왜곡된 전압을 발생한다.

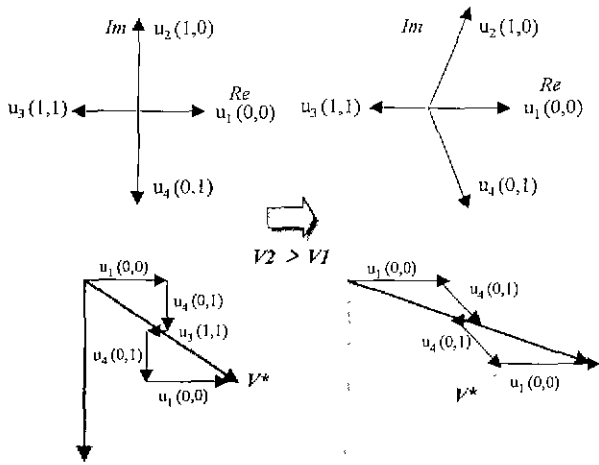


그림 4. 지령전압 및 발생전압

### 2.3 전압 보상 기법

그림 4에서 설명한 것과 같이  $V_2 > V_1$ 인 경우 Sinusoidal PWM에 의해 계산된  $T_a$ ,  $T_b$ 를 그대로 인가하는 경우,  $u_1$ 전압은 더 인가되고  $u_3$ 전압은 작게 인가된 결과가 된다. 따라서, 전압의 왜곡을 감소시키기 위하여 계산된  $u_1$ 의 인가시간  $t_1$ 은 감소시키고,  $u_3$ 의 인가시간  $t_3$ 는 증대시켜야 한다.

그림 5는 Center Aligned PWM의 영역에 따른 on시간을 나타낸다. 우선 그림 5는 크게 두 영역으로 나눌 수 있다.  $S_1$ 의 위상 스위치의 on시간을  $T_a$ ,  $S_2$ 의 위상 스위치의 on시간을  $T_b$ 라고 할 때,  $T_a > T_b$ 인 영역 I과  $T_b > T_a$ 인 영역 II로 나눌 수 있다.

영역 I에서의 보상기법은 다음과 같다. 그림 5에서 샘플링 시간을  $T_{samp}$ 이라 할 때  $t_1 = T_{samp} - T_a$ ,  $t_3 = T_b$ 로 표시되고,  $V_2 > V_1$ 일 때  $t_3$ 증가,  $t_1$ 은 감소시키면 되므로 이는 그림 5로부터  $T_b$ 증가,  $T_a$ 증가임을 알 수 있다. 한편  $V_1 > V_2$ 인 경우는 반대 경우이므로  $t_3$ 감소,  $t_1$ 증가이다. 즉  $T_b$ ,  $T_a$ 를 감소시키면 된다. 영역 II에서  $V_2 > V_1$ 인 경우  $u_4$ 전압은 영역 I에서와 마찬가지로 우측으로 기울어져 있으므로,  $t_1$ 의 인가시간은 줄이고  $t_3$ 의 인가시간은 늘려주어야 한다. 따라서 영역에 관계없이  $V_2 > V_1$ 인 경우  $T_a$ ,  $T_b$ 를 증가시키고,  $V_1 > V_2$ 인 경우  $T_a$ ,  $T_b$ 를 감소시켜 주어야 한다. 한편, 보상량은 상하단 DC link capacitor의 전압차 및  $u_1$ 의 인가시간인  $t_1$ 과  $u_3$ 의 인가시간인  $t_3$ 에 의해 결정된다. 영역 I에서 보상량은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta T_a &= k \cdot (V_2 - V_1) / V_{dc} \cdot t_1 \\ \Delta T_b &= k \cdot (V_2 - V_1) / V_{dc} \cdot t_3 \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

식(2)를 보면  $V_2 > V_1$ 보다 큰 경우  $\Delta T_a$ ,  $\Delta T_b$ 는 양의 값을 가지고,  $V_1 < V_2$ 인 경우에는  $\Delta T_a$ ,  $\Delta T_b$ 는 음의 값이다. 따라서  $V_2 > V_1$ 인 경우 식(2)에 의해  $T_a$ ,  $T_b$ 가 증가됨을 알 수 있다. 영역 II에서의 보상량은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T_a &= k \cdot (V_2 - V_1) / V_{dc} \cdot t_3 \\ \Delta T_b &= k \cdot (V_2 - V_1) / V_{dc} \cdot t_1 \end{aligned} \quad \text{식(3)}$$

식(2)와 식(3)의 차이점은  $t_1$ ,  $t_3$ 의 위치이다. 영역 I에서  $T_a$ 의 증감은  $t_1$ 의 증감과 관련이 있고, 영역 II에서  $T_a$ 의 증감은  $t_3$ 와 관련이 있기 때문이다. 여기서,  $k$ 는 보상 상수이고 그림 6은 본 논문에서 사용된 전압보상 기법의 순서도이다.

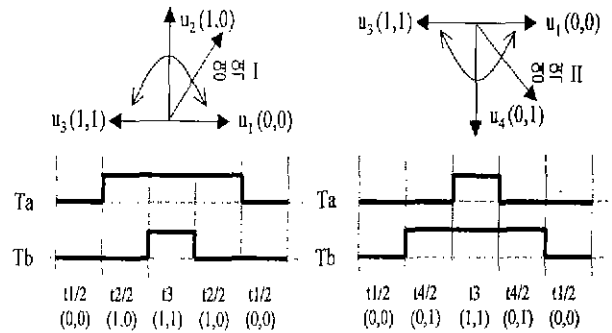


그림 5.  $T_a$ ,  $T_b$ 의 크기에 따른 영역

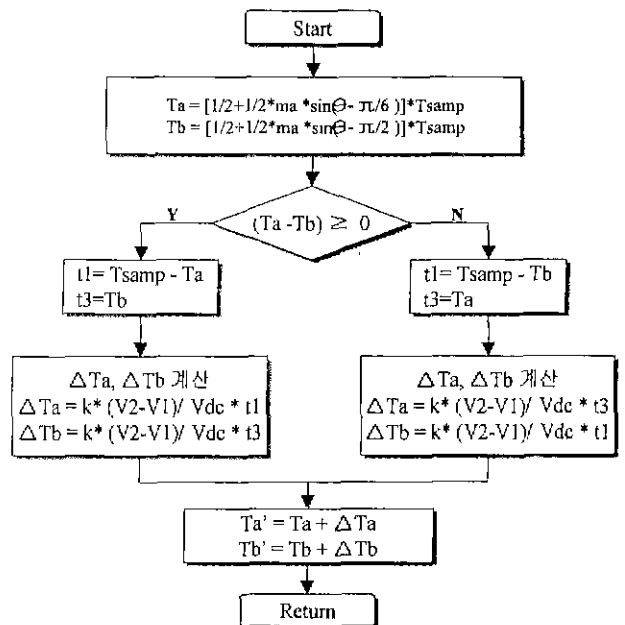


그림 6. 순서도

## 2.4 시뮬레이션 결과

그림 7은 전압 보상을 하지 않은 경우의 속도 및 전류 파형이다. 지령속도 60[rpm]에 대하여 속도리플이 상당히 존재하고, 120°위상차를 갖는 3상 전류가 생성되지 않음을 볼 수 있다. B상 전류가 A, C상 전류에 비해 작고, B, C의 위상이 거의 동상임을 볼 수 있다. 이는 상하단 DC link 전압차에 의해 인가 전압이 왜곡되었기 때문이며, 이러한 전압의 왜곡으로 말미암아 발생 토오크의 리플을 가져오고 이에 따른 속도 리플을 야기시킨다. 그림 8은 그림 7과 동일한 조건에서 보상을 행한 경우의 속도 및 전류 파형을 나타낸다. 그림 7에 비해 속도리플이 줄고, 전류의 위상이 120°를 유지함을 알 수 있다.

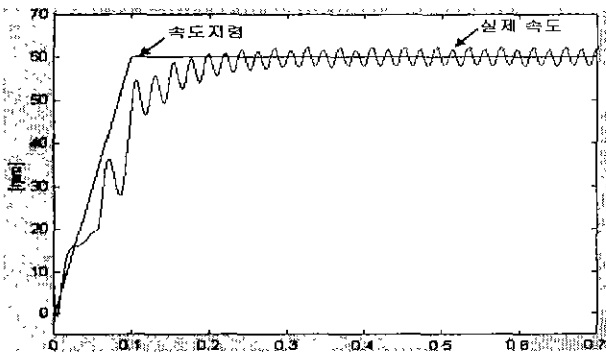


그림 7. 전압 보상이 없는 경우(위로부터 속도, 전류)

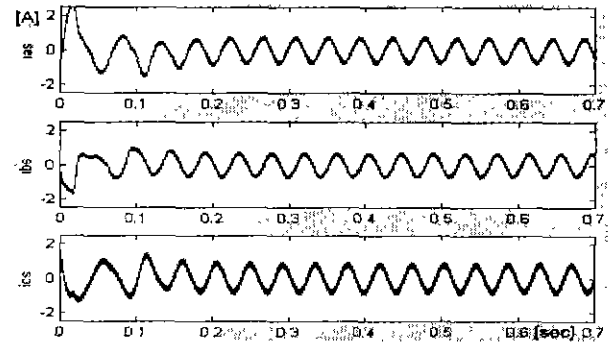
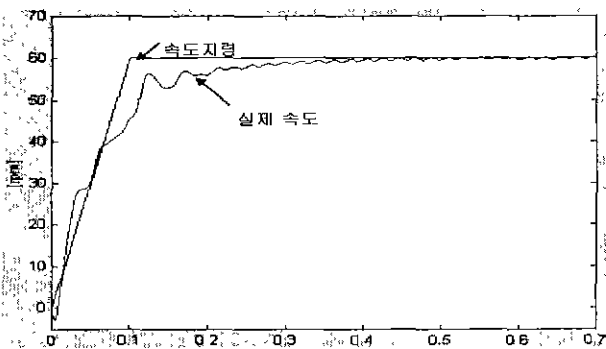


그림 8. 전압 보상을 한 경우(속도, 전류)

## 3. 결론

본 논문에서는 B4인버터를 이용한 3상 모터 제어기에 있어서 간단한 보상기법을 통하여 인버터의 제어 성능이 향상됨을 보였다. B4인버터의 전압왜곡 현상은 상하단 DC link capacitor의 전압차에 의해 발생됨을 도식적으로 분석하였으며, 이러한 전압왜곡을 간단한 수식에 의해 보상이 가능함을 확인하였다. 이러한 보상기법을 기초로 하여 B4인버터의 제어 성능 향상에 대한 연구가 더욱 진행되리라 생각한다.

## 참고 문헌

- [1]H. van der Broeck and J. van Wyk, "A comparative investigation of a three-phase induction machine with a component minimized voltage-fed inverter under different control options," *IEEE Trans. on Indus. Appli.*, vol. IA-20, no. 2, pp. 309-320, Mar./Apr. 1984.
- [2]F. Blaabjerg, H. Kragh, D. O. Neacsu, and J. K. Pedersen, "Comparison of modulation strategies for B4-inverters," *EPE'97*, vol. 2, pp. 378-385.
- [3]C. B. Jacobina and B. R. Correa, "Induction motor drive system for low-power applications," *IEEE Trans. on Indus. Appli.*, vol. 35, no. 1, pp. 52-61, Jan./Feb. 1999.
- [4]F. Blaabjerg, S. Freysson, H. H. Hansen, and S. Hansen, "Comparison of a space-vector modulation strategy for a three phase standard and a component minimized voltage source inverter," *EPE'95*, vol. 1, pp. 806-813.
- [5]F. Blaabjerg, D. O. Neacsu, and J. K. Pedersen, "Adaptive SVM to compensate DC-link voltage ripple for four-switch three-phase voltage-source inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 14, no. 4, pp. 743-752, July 1999.