

공간벡터 전류제어 기법을 이용한 벡터제어형 인버터의 dead time 보상

홍 기필, **오 원석, *김 영태, *김 희준
* 한양대학교 전기공학과 ** 유한전문대학 전기공학과

Dead Time Compensation of Vector Controlled Inverter Using Space Vector Modulation Method

Hong Ki Phil, **Oh Won Seok, *Kim Young Tae, *Kim Hee Jun
*Dept. of Electrical Engineering Hanyang University
**Dept. of Electrical Engineering Yuhan Junior College

Abstract

The switching dead time avoiding a bridge leg short circuit in PWM voltage source inverter produces distortions of the controlling inverter output performance such as current waveform, voltage vector, and torque. In this paper, the influence of dead time is investigated. The on-line space voltage vector modulation method is used for current controller. It is possible to compensate dead time by space voltage vector modulation which generates additional pulse compensating voltage distortion caused by dead time. In addition, narrow pulse which is generally neglected can be compensated. All the algorithms, including field-oriented control are performed by one chip microprocessor 80C196MC and DSP TMS320C31. Experimental results prove that the proposed scheme provides a good inverter output performance.

2. dead time과 인버터의 해석

dead time과 인버터의 해석을 위해 인버터 1상을 그림 2.1에 나타내었다. dead time 동안에는 인버터의 상단과 하단의 스위칭 소자가 모두 오프상태가 되므로 인버터 암의 출력 단자전압은 출력단자를 흐르는 전류의 방향에 의해서만 결정된다. 전류의 방향이 부하쪽으로 흘러가는 정방향일 경우 즉, $i_a > 0$ 일 때는 역방류 다이오드 D_4 가 도통되며 출력전압은 스위치 S_1 의 구동펄스인 G_1 에 의해 결정되며, 반대로 $i_a < 0$ 일 때는 다이오드 D_1 이 도통되고 스위치 S_4 의 구동펄스인 G_4 에 의해 출력전압이 결정된다.

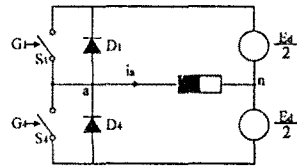


그림 2.1 인버터 1상

그림 2.2는 인버터의 스위칭파형을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 상전류가 정방향일 때는 출력 전압은 $T_d + T_{on} - T_{off}$ 시간 만큼 펄스폭이 줄어들기 때문에 이 펄스폭 만큼 기준전압보다 낮은 값을 갖게 된다.[6]

$$T_{aon} = T_{aref} - ((T_d + T_{on}) - T_{off}) \quad (2-1)$$

반대로 상전류가 역방향일 때는 $T_d + T_{on} - T_{off}$ 시간 만큼 펄스폭이 넓게 나타나므로 그만큼 출력전압이 증가하게 된다.

$$T_{aon} = T_{aref} + ((T_d + T_{on}) - T_{off}) \quad (2-2)$$

여기서, T_{aref} 은 출력전압의 기준시간
 T_{aon} 은 출력전압의 구동시간
 T_{on}, T_{off} 은 스위칭 소자의 턴온, 턴오프 시간
 T_d 은 스위칭 시간을 고려한 dead time

3상에 대해 정리하면

$$T_{pon} = T_{pref} - \text{sgn}(i_p) T_e \quad (2-3)$$

여기서, $p = a, b, c$ $T_e = (T_d + T_{on}) - T_{off}$

$$\text{sgn}(i_p) = \begin{cases} 1 & \text{for } i_p > 0 \\ -1 & \text{for } i_p < 0 \end{cases}$$

3상의 출력전압의 구동시간이 식(2-3)과 같고 샘플링 시간이 T_s 일때 평균 상전압 (\bar{U}_{pm})은 다음 식으로 정의될 수 있다.

$$\bar{U}_{pm} = E_d \left(\frac{T_{pon}}{T_s} - \frac{1}{2} \right) \quad p = a, b, c \quad (2-4)$$

1. 서론

PWM 전압형 인버터는 가변속 제어가 용이하고 고성능 제어 등의 장점때문에 산업계에 널리 사용되고 있다. 인버터를 이용한 이러한 유도전동기의 고성능 제어에 있어 토오크 리플 그리고 전압, 전류 파형왜곡 등이 문제점으로 대두된다. 이 문제점의 주된 원인은 인버터의 dead time, 직류링크전압의 불안정, 그리고 스위칭 소자와 역방류 다이오드의 전압강하 등이다. 특히 이중에 큰 영향을 미치는 dead time에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[6]. 이상적인 스위칭 소자라면 문제가 없으나 실제로는 스위칭 동작시간을 가지므로 이 시간동안의 전압형 인버터의 직류링크 단락을 방지하기 위해 스위칭순간에 턴-오프 시간보다 긴 dead time을 두어 사용하는 것이 일반적이다. 스위칭 dead time은 인버터의 출력 전압 파형의 기본파 전압의 크기를 감소시키며 파형을 왜곡시키고 저차 고조파를 발생하여 유도전동기의 구동특성에 악영향을 미치며, 저속인 경우 그 영향이 심하게 나타난다. dead time의 영향을 없애는 방법으로는 인버터의 출력전압을 검출하여 보상하는 방법[1], 변조파에 출력 전류 방향에 따른 보상신호를 더하여 PWM 변조파형을 구동시키는 방법[2], 3상중 전류 방향이 다른 한 상만의 보정으로 dead time 을 보상하는 방법[3] 등이 연구되었다. 그러나 대부분의 연구는 복잡한 하드웨어 장치를 필요로 하며, dead time보다 작은 미소 구동 펄스를 고려하지 않고 있다.

본 논문에서는 벡터제어 인버터에 사용되는 전류제어 기법중 공간벡터 전류제어 기법을 이용한 전압형 인버터의 구동에 있어서 dead time의 영향을 분석하고, 미소펄스까지 고려한 공간벡터 변조에 의한 보상방법을 제안하였으며, 제안된 보상 알고리즘을 추가적인 하드웨어장치가 필요없이 소프트웨어만으로 처리하였다. 보상을 위한 실험에는 윈칩 마이크로프로세서인 80C196MC 와 DSP 320C31을 사용하였다.

그러므로 기준전압과 실제의 인버터 출력전압 사이에는 스위칭 소자의 스위칭 시간과 설정된 dead time만큼에 해당하는 오차전압이 발생되며 전동기 전류가 왜곡되는 원인이 된다.

$$a = \frac{|V_s|}{\frac{2}{3} Ed} \quad (3-4)$$

그러므로,

$$T_A = T_z a \frac{\sin(60^\circ - \gamma)}{\sin 60^\circ} \quad (3-5)$$

$$T_B = T_z a \frac{\sin \gamma}{\sin 60^\circ} \quad (3-6)$$

$$T_0 + T_7 = T_z - (T_A + T_B) \quad (3-7)$$

이와같은 공간벡터 변조기법에서의 전형적인 공간벡터 구동펄스 패턴을 그림 3.1(b)에 나타내었다.

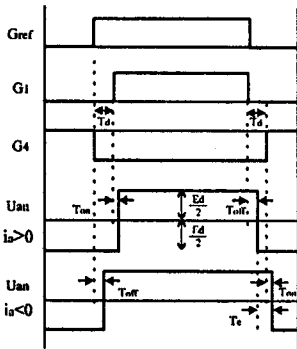


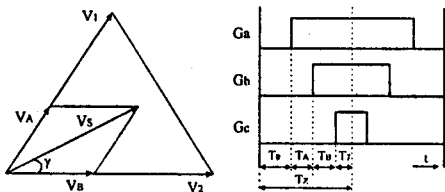
그림 2.2 인버터의 스위칭 파형

3. 공간벡터 전류 제어기

인버터에서 사용가능한 출력전압의 공간벡터 V_k 는 8개이며, 식 (3-1)과 같이 나타낼수 있다.

$$V_k(G_a, G_b, G_c) = \begin{cases} \frac{2}{3} Ed e^{j(k\pi/3)} & \text{for } k=1,2,\dots,6 \\ 0 & \text{for } k=0,7 \end{cases} \quad (3-1)$$

인버터에서 스위칭 주파수가 충분히 높다고 할때 기준전압벡터 V_s 는 스위칭 한 주기동안 일정하다고 가정할수 있다. 이 벡터 V_s 는 PI 속도제어기로부터 얻어지며, 공간벡터 전류제어기에서 이 기준전압벡터에 해당하는 인버터 출력전압을 얻기 위해 기준벡터에 인접한 2개의 유효벡터와 영벡터 즉 3개의 스위칭 상태를 이용한다.



(a) 공간전압벡터 (b) 공간벡터 구동펄스 패턴

그림 3.1 공간벡터 변조법

그림 3.1은 공간벡터 변조법의 벡터도와 파형을 나타낸다. 원하는 기준전압 벡터 V_s 와 한 공간벡터 변조 사이클 동안의 인버터 출력전압 벡터와의 관계에 의해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$V_s T_z = V_0 T_0 + V_A T_A + V_B T_B + V_7 T_7 \quad (3-2)$$

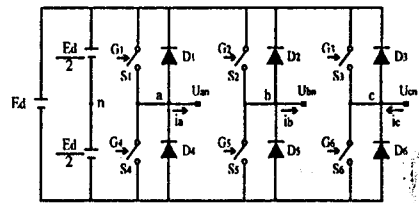
여기서, $T_z = T_0 + T_A + T_B + T_7$. T_0 , T_7 , T_A 와 T_B 는 출력전압 벡터들의 스위칭 시간이다. 벡터 V_A 와 V_B 는 기준벡터 V_s 에 인접한 2개의 인버터 출력전압 벡터이며, 만약 이 식에서 공간벡터들을 직교 좌표상에 나타내면 식(3-3)-(3-7)과 같다.

$$T_z \frac{2}{3} Ed a \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \sin \gamma \end{bmatrix} = T_A \frac{2}{3} Ed \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_B \frac{2}{3} Ed \begin{bmatrix} \cos 60^\circ \\ \sin 60^\circ \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

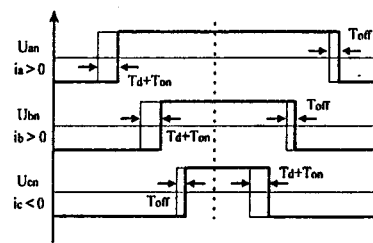
4. dead time 영향에 의한 인버터의 해석

dead time에 대한 인버터의 해석은 2가지의 모드로 나누어 볼수 있다. 즉, 스위치의 구동펄스가 dead time보다 더 작은 미소펄스가 없는 경우(모드1)와 미소펄스가 있는 경우(모드2)이다. 이 두가지의 모드에 대해 출력전압의 왜곡을 알아본다.

3상 인버터의 전류벡터 합은 0이 되어야 하므로 전류 방향이 같은 두상과 다른 한상이 존재하게 된다. 그림 4.1은 $i_a, i_b > 0$ 이고 $i_c < 0$ 인 경우의 3상 인버터의 구조와 각상의 공간전압 벡터 파형이다.



(a) 3상 인버터



(b) 공간전압 벡터

그림 4.1 3상 인버터 구조와 공간전압 벡터

가는 실선은 기준전압벡터이고 두꺼운 실선은 dead time의 영향을 고려한 실제 전압벡터이다. 이 경우에 있어서 모드1과 모드2대해 해석하면,

1) 모드 1의 경우

출력전압의 구동시간은 식(2-1)으로부터 식(4-1)과 같이 정의 할수 있다.

$$\begin{aligned} T_{aon} &= T_{aref} - T_e \\ T_{bon} &= T_{bref} - T_e \\ T_{con} &= T_{cref} + T_e \end{aligned} \quad (4-1)$$

평균 상전압은 식(4-2)와 같다.

$$\begin{aligned}\bar{U}_{an} &= Ed \left(\frac{T_{aref} - T_e}{T_s} - \frac{1}{2} \right) \\ \bar{U}_{bn} &= Ed \left(\frac{T_{bref} - T_e}{T_s} - \frac{1}{2} \right) \\ \bar{U}_{cn} &= Ed \left(\frac{T_{cref} + T_e}{T_s} - \frac{1}{2} \right)\end{aligned}\quad (4-2)$$

그러므로, 선간전압은

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= Ed \left(\frac{T_{aref} - T_{bref}}{T_s} \right) \\ \bar{U}_{bc} &= Ed \left(\frac{T_{bref} - T_{cref} - 2T_e}{T_s} \right) \\ \bar{U}_{ca} &= Ed \left(\frac{T_{cref} - T_{aref} + 2T_e}{T_s} \right)\end{aligned}\quad (4-3)$$

위의 식을 다시 정리하면,

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{abref} \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_{bcref} - \bar{U}_e \\ \bar{U}_{ca} &= \bar{U}_{caref} + \bar{U}_e\end{aligned}\quad (4-4)$$

여기서,

$$\bar{U}_e = Ed \left(\frac{2T_e}{T_s} \right)\quad (4-5)$$

\bar{U}_{abref} , \bar{U}_{bcref} , \bar{U}_{caref} 는 평균 기준선간전압

실제 선간전압과 기준 선간전압은 전류방향이 같은 a 상과 b 상에는 아무런 오차가 발생하지 않음을 알 수 있으며, 전류방향이 다른 한상과의 선간전압은 U_e 만큼의 오차가 발생함을 알 수 있다.

2) 모드 2의 경우

전류의 방향이 모드 1에서와 같고 dead time보다 작은 미소펄스가 a 상일 경우 출력전압의 구동시간은 식(4-6)과 같다.

$$\begin{aligned}T_{aon} &= 0 \\ T_{bon} &= T_{bref} - T_e \\ T_{con} &= T_{cref} + T_e\end{aligned}\quad (4-6)$$

평균 상전압은 식(4-7)과 같다

$$\begin{aligned}\bar{U}_{an} &= -\frac{Ed}{2} \\ \bar{U}_{bn} &= Ed \left(\frac{T_{bref} - T_e}{T_s} - \frac{1}{2} \right) \\ \bar{U}_{cn} &= Ed \left(\frac{T_{cref} + T_e}{T_s} - \frac{1}{2} \right)\end{aligned}\quad (4-7)$$

그러므로, 평균 선간전압은

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= Ed \left(\frac{-T_{bref} + T_e}{T_s} \right) \\ \bar{U}_{bc} &= Ed \left(\frac{T_{bref} - T_{cref} - 2T_e}{T_s} \right) \\ \bar{U}_{ca} &= Ed \left(\frac{T_{cref} + T_e}{T_s} \right)\end{aligned}\quad (4-8)$$

위의 식을 다시 정리하면,

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{abref} - Ed \frac{T_{aref} - T_e}{T_s} \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_{bcref} - U_e\end{aligned}\quad (4-9)$$

$$\bar{U}_{ca} = \bar{U}_{caref} + Ed \frac{T_{aref} + T_e}{T_s}$$

여기서, \bar{U}_{abref} , \bar{U}_{bcref} , \bar{U}_{caref} 는 평균 기준선간전압

전류방향과 미소펄스가 있는 상이 다른 경우에 대해서도 동일한 해석을 하면,

a) $ia, ib < 0, ic > 0$ 이고 미소펄스가 a 상일 경우

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{abref} - Ed \frac{(T_{aref} - T_e)}{T_s} \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_{bcref} + \bar{U}_e\end{aligned}\quad (4-10)$$

$$\bar{U}_{ca} = \bar{U}_{caref} + Ed \frac{T_{aref} - 3T_e}{T_s}$$

b) $ia, ib > 0, ic < 0$ 이고 미소펄스가 c 상일 경우

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{abref} \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_{bcref} + Ed \frac{T_{cref} - 3T_e}{T_s}\end{aligned}\quad (4-11)$$

$$\bar{U}_{ca} = \bar{U}_{caref} - Ed \frac{T_{cref} - 3T_e}{T_s}$$

c) $ia, ib < 0, ic > 0$ 이고 미소펄스가 c 상일 경우

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ab} &= \bar{U}_{abref} \\ \bar{U}_{bc} &= \bar{U}_{bcref} + Ed \frac{T_{cref} + T_e}{T_s}\end{aligned}\quad (4-12)$$

$$\bar{U}_{ca} = \bar{U}_{caref} - Ed \frac{T_{cref} + T_e}{T_s}$$

그러므로 각상의 미소펄스에 의해 모드1에서와는 다른 크기의 전압 오차가 발생함을 알 수 있다.

5. dead time의 영향 보상

dead time의 보상을 위해 공간벡터 변조방식을 이용하여 각 모드에 따라 그 기준 전압벡터와 실제 출력전압벡터의 차이 만큼을 보상한 공간벡터를 내보낸다.

1) 모드1일 경우 보상

인버터의 상전류의 방향이 $ia, ib > 0$ 이고 $ic < 0$ 인 경우, 출력전압은 기준전압에 대해 $2T_e$ 만큼의 시간에 해당하는 U_e 의 전압의 차이를 보였다. 전류방향이 같은 두 상간에는 dead time의 영향이 없음을 알 수 있고 따라서 전류방향이 다른 한상만을 보상하여 dead time에 의한 출력전압의 왜곡을 없앨 수 있다. 전류방향이 다른 c 상의 기준 구동펄스를 반주기마다 T_e 만큼의 시간을 보상에 주면 된다. 즉

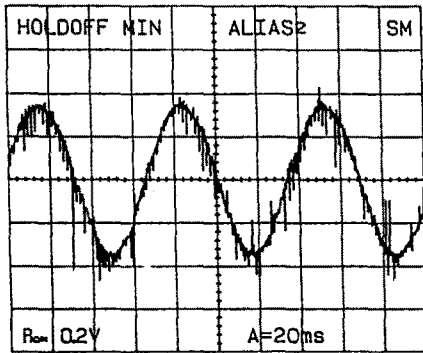
$$T_{ccom} = T_{cref} - 2T_e\quad (5-1)$$

여기서, T_{ccom} 은 T_{cref} 의 보상된 출력전압의 기준 시간

만약, 전류의 방향이 반대일 경우에는 출력전압의 기준 시간을 다음과 같이 보상에 주면된다.

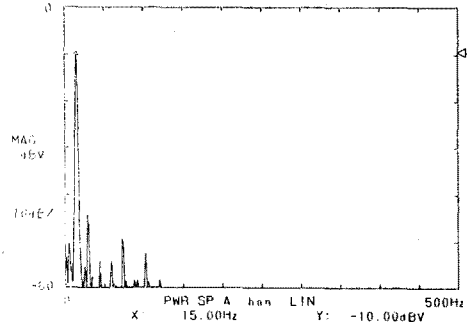
$$T_{ccom} = T_{cref} + 2T_e\quad (5-2)$$

그럼 5.1(a)은 보상된 파형을 나타낸다.



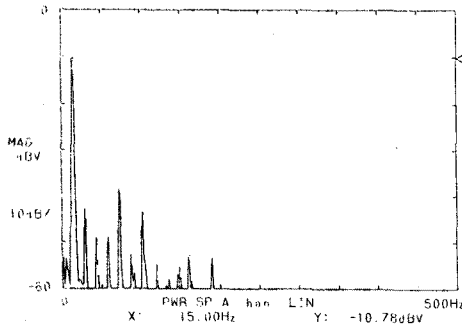
(c) 미소펄스를 고려하고 보상한 경우

그림 6.2 상전류 파형

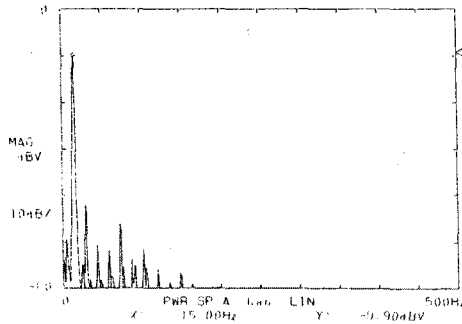


(c) 미소펄스를 고려하고 보상한 경우

그림 6.3 스펙트럼 분석



(a) dead time 보상이 없는 경우



(b) 미소펄스를 무시하고 보상한 경우

7. 결론

유도전동기의 고성능 운전에 대한 요구로 인해 전류루프의 빠른 응답과 전류 고조파 성분의 감소가 요구되고 있다. dead time은 인버터 출력전압의 크기를 감소시키고 고조파 성분을 증가시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 전류루프의 속응답을 가능하게 하는 공간 벡터 변조방식에 의한 dead time 보상법을 제시하였다. 제안된 방법은 온라인으로 동작하며, 새로운 전압벡터에 대한 정보를 매 샘플링 시간마다 계산하여 빠른 전류루프 응답과 고조파 성분의 감소를 가능하게 한다. 모든 보상 알고리즘을 소프트웨어로 처리하여 부가적인 하드웨어 장치가 필요없고, dead time보다 작은 미소펄스까지 보상이 가능하여 dead time에 의한 인버터의 비선형 동작을 적절히 보상할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Yoshihiro Murai et al., "Waveform Distortion and Correction Circuit for PWM Inverter with Switching Lag Times," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.1A-23, No.5, pp881-886, 1987.
- [2] Takashi Sukegawa et al., "Fully Digital Vector Controlled PWM VSI Fed AC Drives with an Inverter Dead Time Compensation Strategy," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.27, No.3, pp552-559, 1991.
- [3] Y.T. Chung et al., "The Waveform Compensation Of Dead Time in PWM Inverters," J.KIEE, Vol.42, No.5, pp29-35, 1993.
- [4] H.W. Van der Broeck, et al., "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors," IAS86, pp244-251, 1986.
- [5] K. Heumann et al., "Design Criteria for Fast Switching PWM Inverters," PESC'88, pp271-276, 1988.
- [6] John K. Pedersen et al., "An Ideal PWM-VSI Inverter with Feedforward and Feedback Compensation," EPE93, pp501-507, 1993.