

# 3상 인버터에 대한 간단한 데드타임 보상 알고리즘

김흥민, 백승호, 안진우, 이동희  
경성대학교

## Dead Time Compensation Algorithm for the 3-phase Inverter

Hong Min Kim, Seung Ho Baek, Jin Woo Ahn, Dong Hee Lee  
Dept. of Mechatronics Engineering, Kyung Sung University

### ABSTRACT

This paper presents a novel and direct dead time compensation method of the 3 phase inverter using space vector pulse width modulation(SVPWM) topology. In the turn on time calculation of the effective voltage, the dead time effect is directly compensated according to the current direction of the midium voltage reference. Since the turn on time of the effective voltage vector is affected by the dead time, the loss time is compensated to turn on time of the effective voltage vector. And the dead time is added to the calculated voltage vector switching times according to the current direction.

For the more effective compensation, the direction of the midium phase current is considered by the practical direction and voltage drops in the power devices.

The proposed method can compensate the dead time which is considered feedback error or direction of middle phase current without coordinate transform in added controller. The proposed dead time compensation scheme is verified by the computer simulation and experiments of 3 phase R L load.

### 1. 서론

SVPWM (Space Vector PWM) 방식은 영전압 스위칭 구간을 효율적으로 배치함으로써, PWM 방식에 비해 전류의 스위칭 노이즈를 억제할 수 있는 반면에 전력용 반도체 스위치의 단락 방지를 위해 삽입된 데드타임에 의해 지령 전압과는 오차를 가지게 되고[1 2], 부하 전류의 방향에 따라서 데드타임을 고려하지 않으면 출력 전압에 왜형과 실제 부하에 인가되는 출력전압에서 기본과 전압이 감소하는 문제가 발생한다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고자 데드타임의 영향을 보상하기 위한 다양한 보상방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1 2].

본 논문에서는 SVPWM에서 최대 전압지령상과 최소 전압지령상을 제외한 중간값의 전압 지령상의 전류의 방향에 따른 데드타임의 영향을 분석하여, 직접적으로 유효 전압의 스위칭 시간에서 보상하게 된다. 제안된 방식에서는 중간상 전류의 방향에 따라 제어기에서 지령한 유효전압 인가시간이 실제 부하에 인가되는 시간과의 차이가 발생하는 현상을 고려하여, 직접적으로 유효전압 인가시간에 데드타임의 시간을 보상함으로써, 별도의 제어기에서 피드백된 오차 성분이나, 축변환 없이 중간상 전류의 방향만으로 고려한다. 또한, 보다 효과적인 중간상 전류의 방향을 고려하기 위하여 스위칭 소자의 전압강하 성분에 대한 고려하였으며, 지령전압의 크기에 따라 전류의 방향을 선행적으로 교차하도록 구현하여 데드타임의 영향이 크게 감소하였다.

제안된 방식은 3상 인버터를 적용한 3상 R L 부하에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

### 2. 3상 인버터의 데드타임 영향

3상 인버터에서 윗단과 하단의 반도체 스위치 사이에 암단락(Arm short)를 방지하기 위하여, 데드타임을 인가하여 스위칭 동작을 수행할 수 있다.

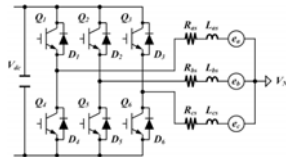
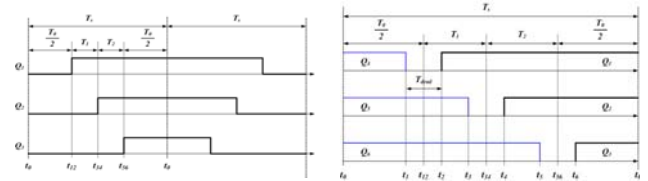


그림 1 일반적인 3상 인버터의 구조  
Fig. 1 General 3-phase inverter

3상 인버터 구조에서 부하에 인가되는 전류를 제어하기 위한 실제적인 방식으로 SVPWM(Space Vector PWM)이 영전압 스위칭 구간을 효율적으로

배치함으로써, 전류의 스위칭 노이즈를 억제할 수 있다.



(a) 데드타임이 없는 SVPWM 신호 (b) 데드타임이 있는 SVPWM 신호  
그림 2 SVPWM 방식에서의 데드타임  
Fig. 2 Dead-time of SVPWM method

그림 2(b)에서, 실제 스위치에 인가되는 시간은 데드타임( $t_{dead}$ )을 고려하여 윗단의 스위치 턴 온 시간과 하단의 스위치 턴 온 시간 사이에 데드타임이 인가되어 스위칭 패턴이 결정된다. 이때, 3상의 반도체 스위치 중에서 한상은 최대 전압을 인가하기 위해 가장 긴 유효전압을 인가하는 시간으로 결정되고, 또 다른 한 상은 최소 전압을 인가하기 위해 영전압 스위칭이 인가되도록 구현된다. 즉, 3상의 스위칭 패턴에서 가장 긴 유효스위칭 시간( $T_1 + T_2$ )를 가진 상이 가장 높은 양의 지령전압을 형성하기 위해 인버터에 인가되고, 가장 짧은 스위칭 시간( $\frac{1}{2}T_0$ )를 가진 상이 가장 낮은 음의 지령전압을 형성하기 위해 인버터에 인가된다.

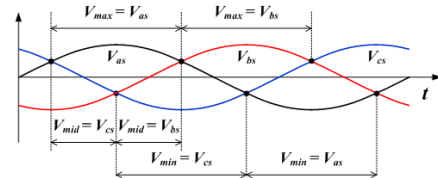


그림 3 회전각에 따른 3상 전압의 최대, 최소상  
Fig. 3 Maximum and minimum of 3-phase voltage

그림 3은 회전각에 따른 3상 전압의 최대( $V_{max}$ ), 중간( $V_{mid}$ ), 최소상( $V_{min}$ )에 대한 전압을 의미하며,  $i_{max}$ ,  $i_{mid}$  및  $i_{min}$ 은 해당하는 상의 전류를 나타낸다. 만약  $V_{max}$  상이 A상에 해당하고,  $V_{min}$  상이 C상에 해당한다면, 인버터에서 발생하는 유효전압벡터의 인가시간  $T_1$ 과  $T_2$ 동안에 각 권선에 인가되는 전압은 스위칭 소자의 전압강하를 무시하면 다음과 같다.

$$v_{max} = \left( \left( \frac{2}{3} \cdot T_1 \right) + \left( \frac{1}{3} \cdot T_2 \right) \right) \cdot \frac{V_{dc}}{T_s} \quad (1)$$

$$v_{mid} = \left( \left( -\frac{1}{3} \cdot T_1 \right) + \left( \frac{1}{3} \cdot T_2 \right) \right) \cdot \frac{V_{dc}}{T_s} \quad (2)$$

$$v_{min} = \left( \left( -\frac{1}{3} \cdot T_1 \right) + \left( -\frac{2}{3} \cdot T_2 \right) \right) \cdot \frac{V_{dc}}{T_s} \quad (3)$$

하지만, 데드타임이 포함된 실제 각 상에 인가되는 전압은 스위칭 소자의 전압강하를 무시하면, 전류의 방향에 따라 유효전압이 인가되는 시간이 달라지게 된다. 즉, 중간상 전류  $i_{mid}$ 가 양인 경우에는 유효전압 인가시간  $T_2$ 가 감소하는 현상이 발생하고, 중간상 전류  $i_{mid}$ 가 음인 경우에는 유효전압 인가시간  $T_1$ 이 감소하는 현상이 나타난다.

### 3. 제안된 SVPWM에서의 데드타임 보상

제안된 데드타임 보상 방식은 오차에 대한 별도의 복잡한 제어기의 구현 없이, SVPWM에서 전류의 방향에 따른 데드타임의 영향을 분석하여, 직접적으로 유효 전압의 스위칭 시간에서 보상하는 방식을 적용하였다. 표 1은 3상 인버터에서 전류의 경로에 따른 실제 유효 전압이 인가되는 시간과 그 시간 동안에 각 상에 인가되는 전압의 크기를 나타내고 있다.

표 1. 전류 경로에 따른 각 구간에서의 실제 인가 전압  
Table 1. Practical input voltage according to the current path

Section	$i_{mid} > 0$		$i_{mid} < 0$	
$t_0 \sim t_2$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$
$t_2 \sim t_3$	$T_1$	$v_{max} = \frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{mid} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{min} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$	$T_1 - T_{dead}$	$v_{max} = \frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{mid} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{min} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$
$t_3 \sim t_4$		$v_{max} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{mid} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$ $v_{min} = \frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{cr})$		$T_2$
$t_4 \sim t_5$	$T_2 - T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$	$T_2$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$
$t_5 \sim t_0$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$

표 1에서 실제 유효전압이 인가되는  $T_1$ 과  $T_2$ 의 구간에서  $i_{irrad} > 0$ 인 경우에는  $T_2$  구간동안 데드타임동안의 시간 손실이 발생하고,  $i_{irrad} < 0$ 인 경우에는  $T_1$  구간동안에서 데드타임의 시간 손실이 발생하게 된다. 데드타임이 없는 경우에서의 각 유효시간의 계산은 먼저 지령 전압의 크기로부터 최대상의 지령전압  $V_{max}^*$  및 최소상의 지령전압  $V_{min}^*$ 을 추출하면, 각 유효시간은 다음과 같이 계산된다.

$$T_1 = (2 \cdot V_{max}^* + V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} \quad (4)$$

$$T_2 = -(V_{max}^* + 2 \cdot V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} \quad (5)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (6)$$

데드타임이 있는 경우에는 중간상의 전류 경로가 양의 방향( $i_{irrad} > 0$ )인 경우에는 각 유효시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_1 = (2 \cdot V_{max}^* + V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} \quad (7)$$

$$T_2 = -(V_{max}^* + 2 \cdot V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} + T_{dead} \quad (8)$$

또한, 데드타임이 있는 경우에는 중간상의 전류 경로가 음의 방향( $i_{irrad} < 0$ )인 경우에는 각 유효시간은 다음과 같이 결정된다.

$$T_1 = (2 \cdot V_{max}^* + V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} + T_{dead} \quad (9)$$

$$T_2 = -(V_{max}^* + 2 \cdot V_{min}^*) \cdot T_s \cdot \frac{1}{V_{dc}} \quad (10)$$

이로부터, 각 상의 실제 스위칭 시간은 다음과 같이 재배열 된다.

$$T_{max} = \frac{T_0}{2} + T_1 + T_2 \quad (11)$$

$$T_{mid} = \frac{T_0}{2} + T_2 \quad (12)$$

$$T_{min} = \frac{T_0}{2} \quad (13)$$

그림 4에서  $V_{S1}$  및  $V_{S2}$ 은 스위칭 소자의 전압강하를 고려하여 0.7[V] 시점에서 중간상 전류  $i_{irrad}$ 를 검출하고, 이 전류가 미소전류(10 [mA]) 이내 대역에 존재하는  $i_{irrad2}$ 의 경우에는 실제 전류가 역전되지 않더라도 유효 전압시간의 중복을 고려하여 전류의 방향이 음으로 되는 것으로 가정하여 스위칭 시간을 계산하고, 미소전류 이상의 대역에 존재하는  $i_{irrad}$ 의 경우에는 정상적으로 전류의 방향에 따라 중간상의 전류 방향을 고려하도록 하였다.

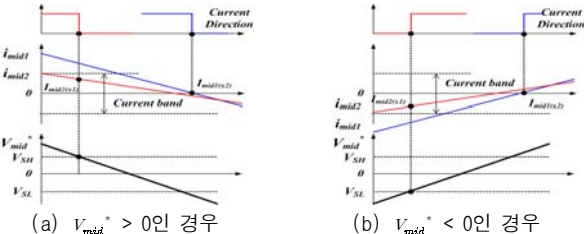
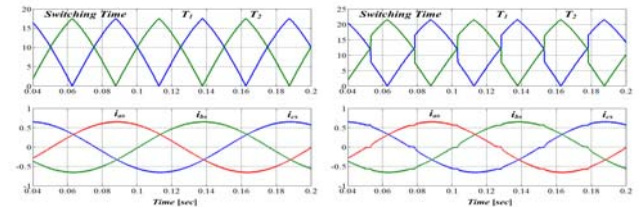


그림 4.  $i_{irrad}$  전류의 교번 구간에서의 전류 방향에 대한 고려  
Fig. 4. Consideration of  $i_{irrad}$  current during the direction changing

#### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 데드타임 보상 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험에서는 순수하게 데드타임의 영향과 제안된 보상 방식에 대한 검증을 위하여 전류 피이드백 제어를 사용하지 않고, 오픈루프 지령 전압에 대한 부하 전류의 크기와 파형을 분석하였다. 그림 5(c)의 시뮬레이션 결과에서, 매우 정현적인 부하 전류를 보이고 있으며, 데드타임의 영향을 보상할 수 있음을 보이고 있다.



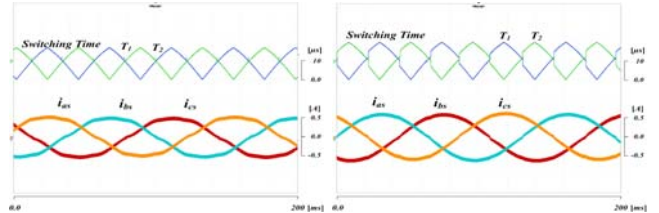
(a) 데드타임이 없는 이상적인 경우 (b) 데드타임 보상의 경우

(c) 전류의 방향을 고려한 보상의 경우

그림 5. 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 5. Comparison of simulation results

제안된 데드타임 보상 방식을 적용한 경우에는 시뮬레이션 결과와 유사하게 매우 정현적인 부하전류를 보이고 있으며, 부하 전류의 중간상의 전류 방향이 교번되는 구간에서 전류 대역을 이용한 전류 방향을 고려한 경우가 보다 효과적인 보상 효과를 보이고 있다.



(a) 데드타임 보상이 없는 경우 (b) 데드타임 보상이 있는 경우

(c) 전류의 방향을 고려한 보상의 경우

그림 6. 실험 결과 비교

Fig. 6. Comparison of experimental results

#### 5. 결론

본 논문은 3상 인버터의 데드타임 영향을 보상하는 SVPWM 방식의 3상 인버터에 대한 간단한 데드타임 보상 알고리즘을 제안하였다. 제안된 SVPWM 방식은 중간상 전류의 방향에 따라 유효전압 인가시간을 보상함으로써, 별도의 제어기에서 피이드백된 오차 성분이나, 축변환 없이 중간상 전류의 방향만으로 고려하여 직접적으로 데드타임의 영향을 보상할 수 있는 장점을 가진다. 또한 부하 전류의 중간상의 전류 방향이 교번되는 구간에서 전류 대역을 이용한 전류 방향을 고려한 경우 보다 효과적인 보상 효과를 가진다. 제안된 SVPWM 방식은 3상 인버터를 적용한 3상 R-L 부하에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

#### [참고 문헌]

[1] H. W. Van der Broeck, H. C. Skudelyny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. IA 24, pp. 142-150, 1988, January/February.  
[2] Y. Murai, Y. Goshi, K. Matsui, I. Hoseno, "High Frequency Split Zero Vector PWM with Harmonic Reduction for Induction Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 28, pp. 105-112, 1992, January/February.