

SVPWM 방식의 3상 인버터에 대한 간단한 데드타임 보상 알고리즘

金洪珉*, 秋榮培**, 李東熙†

Dead Time Compensation Algorithm for the 3-Phase Inverter using SVPWM

Hong-Min Kim, Young-Bae Choo, and Dong-Hee Lee

요 약

본 논문은 공간벡터펄스 변조법(SVPWM, Space Vector Pulse Width Modulation)을 사용하는 3상 인버터의 새로운 데드타임 직접 보상 방법을 제안한다. 제안된 데드타임 보상방식은 인버터에 인가되는 데드타임을 중간상 전류의 방향에 따라, 유효전압이 인가되는 유효전압벡터 인가시간에서 직접 보상하는 방식이다. 3상 인버터에서 각 상에 인가되는 전압의 크기는 유효전압이 인가되는 시간에 의해 결정되고, 데드타임의 영향에 따라, 실제로 유효전압이 인가되는 스위칭 시간은 전류의 방향에 따라 손실이 발생하게 된다. 제안된 방식에서는 실제로 전류의 방향에 따라 손실이 발생하는 유효전압벡터의 인가시간에 직접적으로 손실 시간을 더하여 유효전압벡터의 인가시간을 계산하는 방식으로 별도의 전압오차를 보상하기 위한 제어기와 복잡한 d-q 변환을 필요로 하지 않는 장점이 있다. 제안된 방식은 3상 R-L 부하에 대하여 컴퓨터 모의해석과 실험을 통하여 제안된 방식의 데드타임 보상을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a novel and direct dead-time compensation method of the 3-phase inverter using space vector pulse width modulation(SVPWM) topology. The proposed dead-time compensation method directly compensates the dead-time to the turn-on time of the effective voltage vector according to the current direction of the medium voltage reference. Each phase voltages are determined by the switching times of the effective voltage vectors, and the practical switching times have loss according to the current direction by the dead-time effect in the 3-phase inverter. The proposed method adds the dead-time to the switching time of the effective voltage vector according to the current direction, so it does not require complex d-q transform and controller to compensate the voltage error. The proposed dead-time compensation scheme is verified by the computer simulation and experiments of 3-phase R-L load.

Key Words : Dead-time compensation, SVPWM, 3-phase inverter, direct loss time compensation

1. 서 론

3상 인버터는 고성능의 전동기 구동 등 많은 분야에 활용되고 있으며 정밀한 출력전압을 생성할 수 있는 PWM(Pulse Width Modulation) 방식이 다양하게 연구되고 있다. 그중 SVPWM (Space Vector PWM) 방식이 영전압 스위칭 구간을 효율적으로 배치함으로써, PWM 방식에 비해 전류의 스위칭 노이즈를 억제할 수 있다. PWM 방식의 구현은 게이트 펄스의 인가시

†정회원, 경성대 메카트로닉스공학과 부교수

E-mail : leedh@ks.ac.kr

*학생회원, 학생회원, 경성대 메카트로닉스공학과 석사과정

**정회원, 거제대학 전기공학과 선박전기과 교수

접수일자 : 2011. 9. 29

1차 심사 : 2011. 10. 19

2차 심사 : 2011. 11. 11

심사완료 : 2011. 11. 15

간을 직접 계산하는 디지털 구현 방식이 고조파 특성이 좋고 스위칭 주파수가 고정되며 구현이 용이하다는 점에서 널리 사용되고 있다. 그러나, PWM 인버터의 실제 출력전압은 전력용 반도체 스위치의 단락 방지를 위해 삽입된 데드타임에 의해 지령 전압과는 오차를 가지게 된다. 데드타임에 의한 영향은 부하 전류의 방향에 따라서 데드타임을 고려하지 않으면 출력 전압에 왜형이 발생하게 되고, 실제 부하에 인가되는 출력전압에서 기본파 전압이 감소하는 문제가 발생한다.

이러한 데드타임의 영향을 보상하기 위한 다양한 보상방식이 연구되었다^[1-12]. 실제 데드타임의 영향은 전류의 방향에 따라 다르게 나타나므로, 3상 인버터의 데드타임에 따른 출력전압을 d-q축 변환을 통하여 관측기를 설계하고, 관측기를 통해 추측된 d-q축 왜곡 전압을 이용하여 계산된 보상전압을 지령전압에 추가하여 데드타임의 영향을 보상하거나, 전류의 방향을 검출하기 위한 별도의 추가 회로를 각 상의 반도체 스위치에 병렬로 결합하여 전류의 방향이 바뀌는 순간 스위칭 패턴을 변화하여 데드타임으로 인한 출력전압의 왜곡을 최소화하는 방식의 연구가 이루어졌다^[1-6]. 하지만 전류의 방향을 관측하기 위한 왜곡 관측기는 전동기의 운전상태와 주파수의 대역폭에 의존적이며 복잡한 연산을 사용하고 있다. 또한 부가적으로 추가된 복잡한 하드웨어 방식의 회로는 별도의 전원을 필요로 하게 된다.

이러한 방식으로 보상되는 전압은 직접적으로 데드타임의 영향을 분석하여 보상하지 않고, 데드타임에 의해 왜곡되는 전압 또는 전류에 대한 오차를 별도의 제어기 형태로 구성된 보상기를 적용하여 전압 지령치에 왜곡의 크기에 비례하는 보상 전압을 추가적으로 인가하는 방식이다. 하지만, 실제 인버터에서는 데드타임에 의한 영향뿐만 아니라, 스위칭 소자에서의 전압 강하와 게이트 드라이브와 전력용 스위칭 소자에서의 상승 지연 및 하강 지연으로 인하여 다양한 왜곡 현상이 발생하게 된다.

본 논문은 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation, 공간벡터 펄스폭 변조) 방식으로 구동되는 3상 인버터에 대한 간단한 데드타임 보상 알고리즘에 관한 연구로서 SVPWM에서 최대 전압지령상과 최소 전압지령상을 제외한 중간값의 전압 지령상의 전류의 방향에 따른 데드타임의 영향을 분석하여, 직접적으로 유효 전압의 스위칭 시간에서 보상하는 방식을 제안한다. 본 논문에서 제시하는 방식은 중간상 전류의 방향에 따라 제어기에서 지령한 유효전압 인가시간

이 실제 부하에 인가되는 시간과의 차이가 발생하는 현상을 고려하여, 직접적으로 유효전압 인가시간에 데드타임의 시간을 보상하는 방식으로, 별도의 제어기에서 피이드백된 오차 성분이나, 축변환 없이 중간상 전류의 방향만으로 고려하여 직접적으로 데드타임의 영향을 보상하게 되므로 그 구현이 매우 단순하며, 연산이 빠른 장점이 있다. 보다 효과적인 중간상 전류의 방향을 고려하기 위하여, 본 논문에서는 실제 중간상 지령 전압의 크기가 스위칭 소자 또는 역방향 다이오드에서 발생하는 전압 강하분 보다 낮아지는 시점에서 전류의 크기에 대한 대역을 설정하고, 이 대역 이상의 경우에는 정상적인 전류의 방향을 검출하고, 대역 이내에서의 전류의 크기에 대하여는 선행되는 시점에서 중간상 전류의 방향이 역전되도록 하여 유효시간이 데드타임 이내로 중복되는 구간에서의 영향을 최소화 하였다.

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

2. 3상 인버터의 데드타임 영향

2.1 SVPWM의 스위칭 특성

그림 1은 일반적인 3상 인버터와 전동기가 결합된 구조의 등가회로를 나타내고 있다. 3상 인버터에서 각 상은 윗단과 하단의 전력용 반도체 스위치로 구성되어 있으며, 이러한 윗단과 하단의 반도체 스위치 사이에 암단락(Arm short)를 방지하기 위하여, 데드타임을 인가하여 스위칭 동작을 수행하게 된다^[5-8]. 이때 데드타임은 DSP(Digital Signal Processor)에서 PWM을 동작시키는 타이머와 연동하여 타이머의 값으로 사용자가 직접 설정하여 결정할 수 있으며, 인버터의 용량 및 스위칭 소자의 스위칭 주파수에 따라 달라진다.

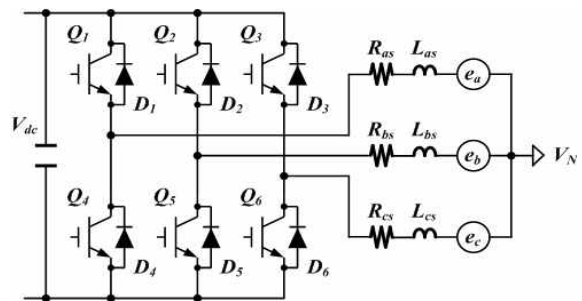
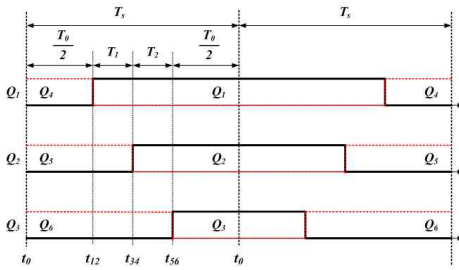
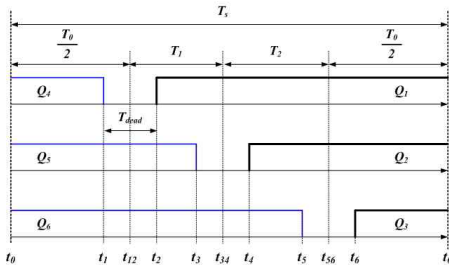


그림 1 일반적인 3상 인버터의 구조
Fig. 1 General 3-phase inverter



(a) 데드타임이 없는 SVPWM 스위칭 신호



(b) 데드타임이 있는 SVPWM 스위칭 신호

그림 2 SVPWM 방식에서의 데드타임
Fig. 2 Dead-time of SVPWM method

3상 인버터 구조에서 부하에 인가되는 전류를 제어하기 위한 실제적인 방식으로 PWM(Pulse Width Modulation)이 널리 적용되고 있으며, 이 중에서 SVPWM(Space Vector PWM) 방식이 영전압 스위칭 구간을 효율적으로 배치함으로써, 전류의 스위칭 노이즈를 억제할 수 있다^[10-11].

그림 2는 SVPWM 방식으로 구현되는 3상 인버터의 이상적인 스위칭 패턴과 데드타임이 인가된 실제적인 스위칭 패턴을 나타내고 있다. 그림 2에서 T_s 는 스위칭을 위한 샘플링 구간을 나타내고 있으며, T_1 , T_2 및 T_0 는 유효전압의 인가시간 및 영전압 벡터의 인가시간을 나타내고 있다.

그림 2(a)에서 유효전압이 인가되는 시간 T_1 은 한 상의 윗단 스위치가 턴-온 되고, 두 상의 하단 스위치가 턴-온 되는 구간을 나타내고 있으며, T_2 구간은 두 상의 윗단 스위치가 턴-온 되고, 한 상의 하단 스위치가 턴-온 되는 구간을 나타낸다. 그림 2(b)에서, 실제 스위치에 인가되는 시간은 데드타임인 T_{dead} 를 고려하여 윗단의 스위치 턴-온 시간과 하단의 스위치 턴-온 시간 사이에 데드타임이 인가되어 스위칭 패턴이 결정된다. 이때, 데드타임 T_{dead} 는 제어기에서 압단락을 방지하기 위해 설정된 데드타임의 크기를 나타내고 있다. 3상의 반도체 스위치 중에서 한상은 최대 전압을 인가하기 위해 가장 긴 유효전압을 인가하는 시간으로

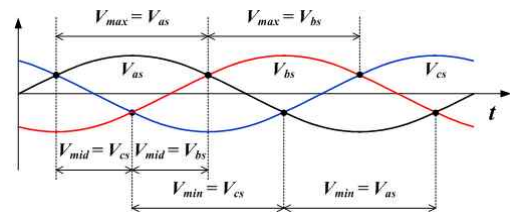


그림 3 회전각에 따른 3상 전압의 최대, 최소상
Fig. 3 Maximum and Minimum phase of 3-phase voltage

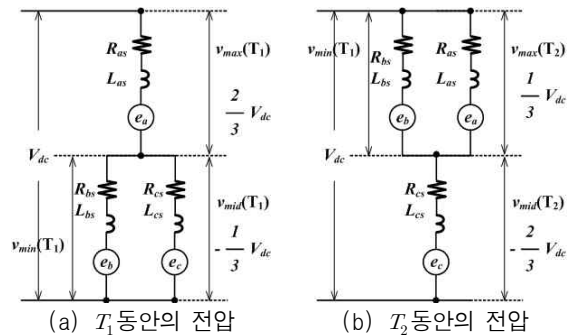


그림 4 유효전압 시간 동안의 각 권선에 인가되는 전압
Fig. 4 Supplied voltages during switching time

결정되고, 또 다른 한 상은 최소 전압을 인가하기 위해 영전압 스위칭이 인가되도록 구현된다. 즉, 3상의 스위칭 패턴에서 가장 긴 유효스위칭 시간($T_1 + T_2$)을 가진 상이 가장 높은 양의 지령전압을 형성하기 위해 인버터에 인가되고, 가장 짧은 스위칭 시간($\frac{1}{2}T_0$)을 가진 상이 가장 낮은 음의 지령전압을 형성하기 위해 인버터에 인가된다. 이러한 최대지령이 인가되는 상을 최대상이라고 하고, 가장 낮은 지령이 인가되는 상을 최소상이라고 하면, 이러한 최대상 및 최소상은 그림 3에서 보이는 바와 같이 각 상은 교번적으로 최대상 (V_{max}), 중간상(V_{mid}) 및 최소상(V_{min})으로 시간에 따라 가변하게 된다. 즉, SVPWM에서 최대상 V_{max} 가 A상인 경우에는 A상을 구동하는 윗단 스위치 Q_1 의 턴-온 시간은 유효전압이 인가되는 T_1 , T_2 및 영전압이 인가되는 $\frac{T_0}{2}$ 가 합한 시간동안으로 결정된다.

이때, V_{max} , V_{mid} 및 V_{min} 은 회전각에 따른 3상 전압의 최대, 중간 및 최소상에 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.

그림 2와 그림 4에서 데드타임이 없는 이상적인 3상 인버터에서 각 상에서 실제 유효 전압이 인가되는 시간을 각각 T_1 과 T_2 동안에 각 상의 인가되는 전압은 다음과 같다.

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

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

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

하지만, 데드타임이 포함된 그림 2(b)의 스위칭 패턴에서 실제 각 상에 인가되는 전압은 스위칭 소자의 전압강하를 무시하면, 전류의 방향에 따라 유효전압이 인가되는 시간이 달라지게 된다. 그림 5와 그림 6은 중간상 전류의 방향이 양인 경우와 음인 경우에 있어서 실제 인버터의 유효전압이 인가되는 시간과 이때의 전류 경로를 나타내고 있다. 그림 5와 그림 6에서 전류의 방향과 경로에 따라서 실제 제어기에서 구현된 유효전압의 인가시간 T_1 과 T_2 는 다르게 나타나게 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.

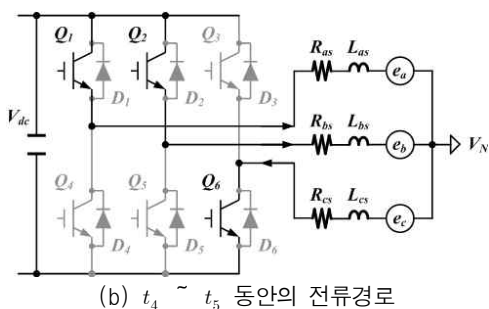
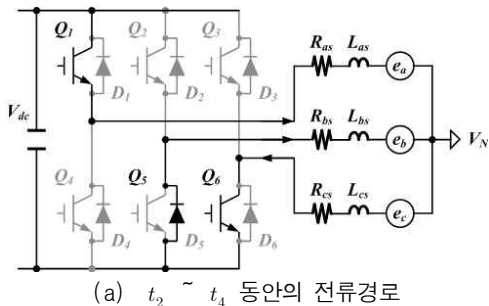


그림 5 $i_{\text{mid}} > 0$ 인 경우의 전류 경로
Fig. 5 Current path when $i_{\text{mid}} > 0$

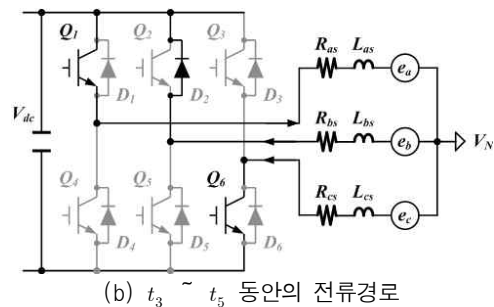
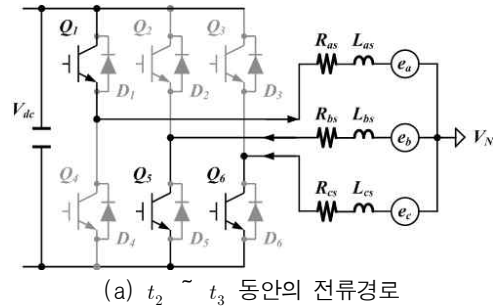


그림 6 $i_{\text{mid}} < 0$ 인 경우의 전류 경로
Fig. 6 Current path when $i_{\text{mid}} < 0$

본 논문에서는 이러한 중간상 전류의 방향에 따라 제어기에서 지령한 유효전압 인가시간이 실제 부하에 인가되는 시간과의 차이가 발생하는 현상을 고려하여, 직접적으로 유효전압 인가시간을 보상하는 방식을 제안한다. 제안된 방식은 별도의 제어기에서 피드백된 오차 성분이나, 축변환 없이 중간상 전류의 방향만으로 고려하여 직접적으로 데드타임의 영향을 보상하는 방식으로 그 구현이 매우 단순한 장점이 있다.

3. 제안된 데드타임 보상방식

3.1 유효 스위칭 시간 보상

제안된 데드타임 보상 방식은 오차에 대한 별도의 복잡한 제어기의 구현 없이, SVPWM에서 전류의 방향에 따른 데드타임의 영향을 직접적으로 유효 전압의 스위칭 시간에서 보상하여 그 구현이 매우 간단하고, 실시간 보상이 가능하다.

표 1은 3상 인버터에서 전류의 경로에 따른 실제 유효 전압의 인가시간과 그 시간 동안에 각 상에 인가되는 전압의 크기를 나타내고 있다. 표 1에서 실제 유효 전압이 인가되는 T_1 과 T_2 의 구간에서 $i_{\text{mid}} > 0$ 인 경우에는 T_2 구간동안 데드타임동안의 시간 손실이 발생하고, $i_{\text{mid}} < 0$ 인 경우에는 T_1 구간동안에서 데드타임의

표 1 전류 경로에 따른 각 구간에서의 실제 인가 전압
Table 1 Practical input voltage vs. 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	$v_{max} = \frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{mid} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{min} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$	$T_1 - T_{dead}$	$v_{max} = \frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{mid} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{min} = -\frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$
$t_3 \sim t_4$		$v_{max} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{mid} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{min} = -\frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$	T_2	$v_{max} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{mid} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{min} = -\frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$
$t_4 \sim t_5$	$T_2 - T_{dead}$	$v_{max} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{mid} = \frac{1}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$ $v_{min} = -\frac{2}{3}(V_{dc} - 2V_{ce})$		
$t_5 \sim t_0$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$	$\frac{1}{2}T_0 + \frac{1}{2}T_{dead}$	$v_{max} = 0$ $v_{mid} = 0$ $v_{min} = 0$

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 같다.

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

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

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

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

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

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

따라서, 제안된 방식에서는 중간상의 전류 경로에 따라서 각 상의 지령전압으로부터 최대상과 최소상의 값으로부터 식(7-8) 또는 식(9-10)으로 간단하게 유효 스위칭 시간의 보상이 가능하다. 이로부터, 각 상의 실제 스위칭 시간은 그림 2와 같이 지령전압을 생성하기 위하여 다음과 같이 재배열 된다.

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

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

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

이때, T_{max} , T_{mid} 및 T_{min} 은 지령전압의 최대상, 중간상 및 최소상을 생성하기 위해 계산된 상 스위칭 시간을 나타내며, 최대상, 중간상 및 최소상은 지령전압의 간단한 비교를 통하여 결정된다.

3.2 중간상 전류 방향 결정

제안된 방식에서 중간상 전류의 방향은 데드타임의 보상에서 매우 중요한 요소이며, 중간상 전류의 방향에 따라 데드타임의 보상에서 인가되는 전압에 오차가 발생할 수 있다. 특히, 전류의 방향이 바뀌는 부분에서는 매우 낮은 전류의 스위칭 노이즈와 제어기의 검출 노이즈로 인하여 오차를 가질 수 있으며, 또한, 전류의 방향이 한번 바뀌지 않고 노이즈성으로 변동하는 특성을 가질 수 있다. 이러한 노이즈성의 전류 방향은 실제 데드타임의 보상을 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 실제 중간상 지령 전압의 크기가 스위칭 소자 또는 역방향 다이오드에서 발생하는 전압강하분 보다 낮아지는 시점에서 전류의 크기에 대한 대역을 설정하고, 이 대역 이상의 경우에는 정상적인 전류의 방향을 검출하고, 대역 이내에서의 전류의 크기에 대하여서는 선행되는 시점에서 중간상 전류의 방향이 역전되도록 하여 유효시간이 데드타임 이내로 중복되는 구간에서의 영향을 최소화 하였다.

그림 7은 제안된 데드타임 보상 방식에서 유효전압의 인가시간을 결정하기 위한 중간상 전류의 방향에 대한 고려를 나타내고 있다.

그림 7에서 V_{SH} 및 V_{SL} 은 스위칭 소자의 전압강하를 고려하여 0.7[V] 시점에서 중간상 전류 i_{mid1} 를 검출하고, 이 전류가 미소전류(10[mA]) 이내 대역에 존재하는 i_{mid2} 의 경우에는 실제 전류가 역전되지 않더라도 유효

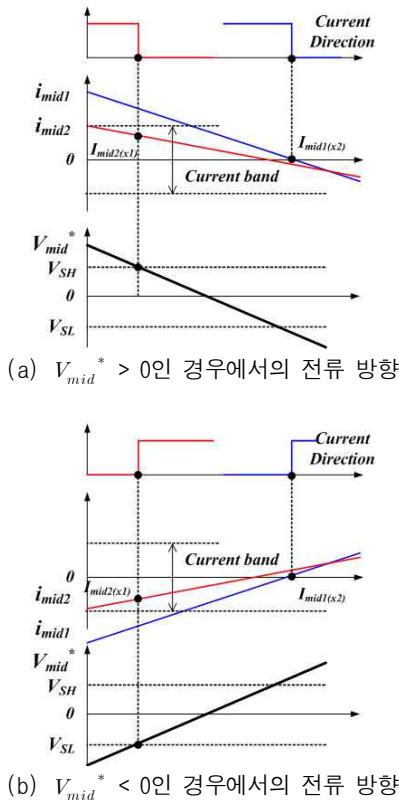


그림 7 i_{mid} 전류의 교번 구간에서의 전류 방향
 Fig. 7 Consideration of i_{mid} direction changing

전압시간의 중복을 고려하여 전류의 방향이 음으로 되는 것으로 가정하여 스위칭 시간을 계산하였으며, 미소전류 이상의 대역에 존재하는 i_{mid1} 의 경우에는 정상적으로 전류의 방향에 따라 중간상의 전류 방향을 고려하도록 하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 데드타임 보상 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink에서 지원되는 SimPowerSystem 모듈을 적용하여 전력용 스위칭의 임피던스와 스위칭에 대한 모델을 구성하였으며, 스위칭 패턴은 100[μ s]의 스위칭 시간에 대하여 4[μ s]의 데드타임을 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 부하는 3상 R-L 부하를 적용하였으며, 50[Ω]-37.5[mH]의 부하를 사용하였다. 시뮬레이션 및 실험에서는 순수하게 데드타임의 영향과 제안된 보상 방식에 대한 검증을 위하여 전류 피이드백 제어기를 사용하지 않고, 오픈루프 지령 전압에 대한 부하 전류

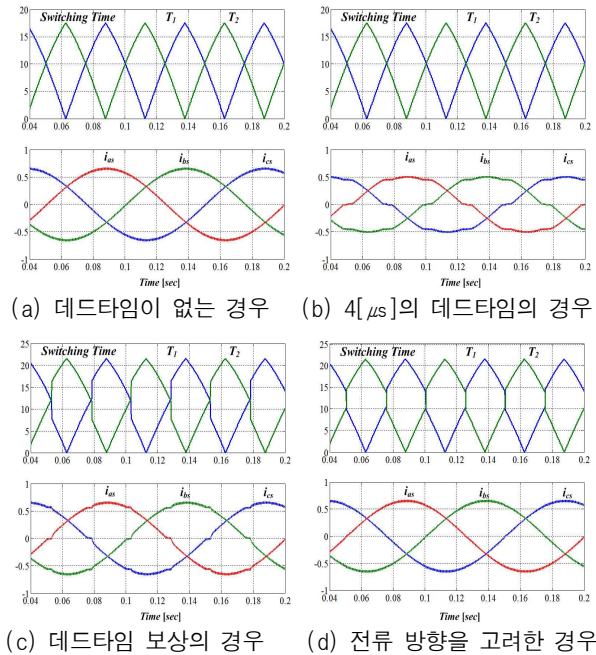


그림 8 시뮬레이션 결과 비교
 Fig. 8 Comparison of simulation results



그림 9 실험장치의 구성
 Fig. 9 Experimental configuration

의 크기와 파형을 분석하였다.

그림 8(a)는 데드타임이 없는 이상적인 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있으며, 부하 전류는 매우 정현적인 형태로 나타나고 있다. 그림 8(b)는 데드타임이 스위칭 패턴에 인가된 경우를 나타내고 있으며, 부하 전류의 크기가 감소하고 6차 고조파의 왜형이 크게 나타나고 있음을 보이고 있다.

그림 8(c)는 제안된 데드타임 보상을 적용한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 전류의 크기는 보상이 되고 있지만, 미소 지령전압이 발생하는 구간에서 전류 방향에 대한 고려를 하지 않으므로

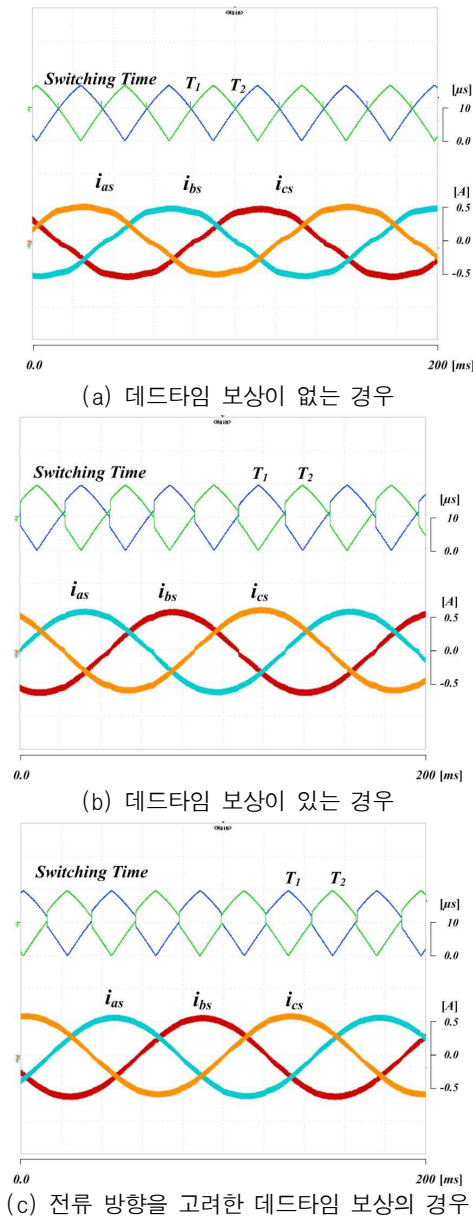


그림 10 실험 결과
Fig. 10 Experimental results

인하여 부하 전류에 비교적 낮은 오차와 왜형이 발생하고 있다. 그림 8(d)는 전류 방향을 고려한 데드타임 보상을 적용한 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과에서 매우 정현적인 부하 전류를 보이고 있으며, 데드타임의 영향을 보상할 수 있음을 보이고 있다.

그림 9는 제안된 방식을 검증하기 위한 실험 장치의 구성도를 나타내고 있다. R-L 부하로는 3상 SRM의

고정자 권선을 부하로 사용하여 실험하였다. 제어기로는 TI사의 TMS320F28335를 적용하였으며, 25[A] 600[V]의 미쯔비시사의 IPM(Intelligent Power Module)으로 3상 인버터를 구성하였다. 전류센서는 ACS-712의 칩형 전류센서를 사용하였으며, Analog device사의 14비트 ADC 소자를 이용하여 전류 데이터를 피드백 하였다. 스위칭 주파수는 10[kHz]로, 4[μ s]의 데드타임을 인가하여 실험을 수행하였다.

그림 10은 실험 결과를 나타내고 있다. 실제 실험에서는 데드타임이 없는 경우의 실험이 불가능하므로, 데드타임을 보상하지 않는 경우와 제안된 데드타임 보상방법과 전류 방향에 대한 고려를 한 경우의 실험 결과를 비교하였다.

그림 10(a)는 데드타임 보상이 없는 경우의 실험결과를 나타내고 있다. 부하 전류 파형에서 시뮬레이션 결과와 유사하게 6차 고조파의 왜형이 크게 발생하고 있음을 보이고 있다. 그림 10(b)와 그림 10(c)는 제안된 데드타임 보상 방법에 의한 실험결과를 나타내고 있다. 그림 10(b)에서는 순수한 전류 방향만을 고려한 보상을 적용한 경우의 결과를 나타내고 있으며, 그림 10(c)는 전압 지령치의 중간값과 전류 대역을 이용한 전류 방향을 고려한 경우의 실험 결과를 나타내고 있다.

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

5. 결 론

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 피드백된 오차 성분이나, 축변환 없이 중간상 전류의 방향만을 고려하여 직접적으로 데드타임의 영향을 보상할 수 있는 장점을 가진다. 또한 부하 전류의 중간상의 전류 방향이 교번되는 구간에서 전류 대역을 이용하여 전류의 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] J. H. Jung, K. H. Nam, "A PI-type dead-time compensation method for vector-controlled GTO inverters", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 34, pp. 452-457, 1998, May./June.
- [2] N. Urasaki, T. Senjyu, K. Uezato, T. Funabashi, "Adaptive Dead-Time Compensation Strategy for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 22, pp. 271-280, 2007, June.
- [3] 김현수, 윤명중, "온라인 전향 데드타임 보상기법", 전력 전자학회 논문지, Vol. 9, No. 3, pp. 267-274, 2004.
- [4] L. Chen, F. Z. Peng, "Dead-Time Elimination for Voltage Source Inverters", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 23, pp. 574-580, 2008, March.
- [5] Y. K. Lin, Y. S. Lai, "Dead-Time Elimination of PWM-Controlled Inverter/Converter Without Separate Power Sources for Current Polarity Detection Circuit", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, pp. 2121-2127, 2009, June.
- [6] Terrence J. Summers, Robert E. Betz, "Dead-Time Issues in Predictive Current Control", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 40, pp. 835-844, 2004, May./June.
- [7] H. S. Kim, H. T. Moon, M. J. Youn, "On-Line Dead-Time Compensation Method Using Disturbance Observer", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 18, pp. 1336-1345, 2003, November.
- [8] S. H. Hwang, J. M. Kim, "Dead Time Compensation Method for Voltage-Fed PWM Inverter", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 25, pp. 1-10, 2010, March.
- [9] A. C. Oliveira, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, "Improved Dead-Time Compensation for Sinusoidal PWM Inverters Operating at High Switching Frequencies", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 54, pp. 2295-2304, 2007, August.
- [10] H. W. Van der Broeck, H. C. Skudelny, "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.
- [11] 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.

- [12] N. Urasaki, T. Senjyu, T. Funabashi and H. Sekine, "An Adaptive Dead-time Compensation Strategy for a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Using Neural Network", Journal of Power Electronics, Vol. 6, No. 4, pp. 279-289, 2006.

저자 소개



김홍민(金洪珉)

1986년 4월 8일생. 2011년 경성대 공대 메카트로닉스 공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 메카트로닉스 공학과 석사과정 재학



추영배(秋榮培)

1955년 6월 23일생. 1982년 부산대 공대 전기기계공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 (주)효성중공업 근무. 1986년~1991년 한국전기연구원. 1994년~현재 거제대학 선박전기과 교수



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스 공학과 부교수. 당 학회 편집위원.