

3상 전압형 인버터의 최소스위칭절환 SVPWM 제어기법 제안

조춘호*, 김동현*, 최창영*, 변철홍*, 김성곤**, 김태웅*
 경상대학교*, 전북자동차기술원**

Proposed SVPWM Control Scheme with Minimized Switching Commutation for 3-Phase Voltage Source Inverter

Choon-Ho Cho, Dong-Hyun Kim, Chang-Young Choi, Cheol-Hong Byeon
 Seong-Gon Kim, Tae-Woong Kim

Gyeongsang National University*, Jeonbuk Institute of Automotive Technology**

ABSTRACT

3상 전압형 인버터는 직류전압을 전원으로 하여 3상 교류로 내보내는 대표적인 전력변환시스템이다. 3상 전압형 인버터의 효율을 극대화 시키는 연구가 활발히 진행되고 있는 현재 시점에 스위칭횟수는 전체 시스템 효율향상에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 3상 전압형 인버터의 기존 스위칭시퀀스를 탈피하여 간략화 스위칭시퀀스 전략을 도입하여 스위칭손실을 저감시킬 수 있는 3상 전압형 인버터의 SVPWM 제어기법을 제안하고, 유효성을 시뮬레이션 및 실험을 통해서 검증한다.

1. 서론

3상 전압형 인버터의 공간벡터 PWM 제어기법에 있어서 5단계의 스위칭시퀀스로 동작하는 것이 일반적으로 정형화 되어 있다[1]. 본 논문에서는 기존 5단계 혹은 7단계^[1] 스위칭시퀀스에 의한 제어기법과 달리 섹터에 따라 스위칭데이블을 변경하여 최소 스위칭절환이 가능한 3단계 스위칭시퀀스를 새로이 도입하여 스위칭절환 횟수를 최소화시켜 스위칭손실을 저감할 수 있고, 또한 스위칭절환에 따른 데드타임의 횟수도 저감되어 데드타임보상에 대해 강점을 가지는 3상 전압형인버터의 최소 스위칭절환 공간벡터 PWM 제어기법을 제안한다.

2. 3상 전압형 인버터의 제어기법

2.1 기존 SVPWM 제어기법

3상 전압형 인버터를 제어할 경우, 전압공간벡터를 이용하여 필요한 6개 섹터정보를 계산하고, 유효벡터 인가시간에 맞게 스위칭시퀀스를 정한 후 적절한 스위칭패턴을 이용하여 제어를 하게 된다. 유효벡터는 위상에 따라 6가지의 스위칭패턴을 가지며, 영벡터는 섹터가 바뀔때 따라 스위칭절환이 최소로 이루어지게 하기 위한 2가지 패턴(패턴1. 상단 3개 스위치 on & 하단 3개 스위치 off. 패턴2. 상단 3개 스위치 off & 하단 3개 스위치 on)으로 스위칭데이블을 구성하게 된다. 3상 전압형 인버터를 제어하는 경우, 과전류의 위험이 있는 단락 회로가 되는 것을 방지하여야 한다. 따라서 한 상의 상/하단의 두 개 스위치가 동시에 턴 오프 되지 않도록 제어를 해야 한다^[2].

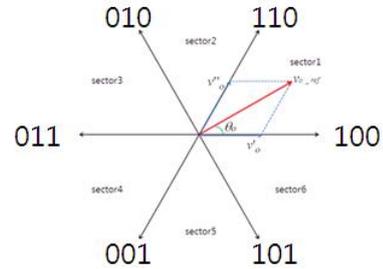


그림 1. 3상 전압형 인버터의 공간벡터 표현

전압형 인버터의 공간벡터 PWM 제어기법에 대한 공간벡터를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같이 표현되며, 이에 대한 유효벡터 인가시간은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\vec{v} = \frac{2}{3}(v_A + v_B e^{j2\pi/3} + v_C e^{j4\pi/3}) = V e^{j\theta} \quad (1)$$

$$\int_0^{T_s} V^* dt = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_0 dt \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 합성하여 프로세서에서 계산되는 최종 벡터 인가시간에 대한 수식을 식 (3)에서 보여준다. 여기서 영벡터 인가시간 T_0 은 제어주기에서 유효벡터 인가시간 T_1 , T_2 을 감산함으로 구하게 된다.

$$\begin{aligned} T_0 &= T_s - (T_1 + T_2) \\ T_1 &= MI \cdot \sin[\theta_0 + (k-1) \times 60^\circ] \\ T_2 &= MI \cdot \sin[60^\circ - \theta_0 + (k-1) \times 60^\circ] \end{aligned} \quad (3)$$

3상 전압형 인버터의 SVPWM 제어기법에 있어서 전체 벡터인가시간에 대한 스위칭시퀀스를 5개로 분할하기 위해 모노안정(mono stable)을 이용한다. 계산된 벡터인가시간에 대한 스위칭시퀀스는 다음과 같으며, 이 때 스위칭절환은 각 시퀀스가 바뀔때 따라 최소의 스위칭절환을 하게 된다.

$$\frac{T_1}{2} \rightarrow \frac{T_2}{2} \rightarrow T_0 \rightarrow \frac{T_2}{2} \rightarrow \frac{T_1}{2}$$

2.2 제안된 SVPWM 제어기법

본 논문에서는 스위칭시퀀스를 기존의 5단계에서 3단계로 줄여 시스템을 동작시키는 3상 전압형 인버터의 SVPWM 제어기법을 제안한다.

스위칭시퀀스는 유효벡터 인가시간이 2분주 되지 않는 3단계로 이루어지며 제어주기에 대해 스위칭시퀀스 1과 스위칭시퀀스 2가 한 번씩 교차하며 제어를 하게 된다. 이 때, 한 개 스위칭시퀀스를 사용하면 제어주기마다 스위칭절환이 4번(일반적으로 2번) 일어나는 구간이 생기며, 섹터를 구분하지 않은 경우에 섹터가 바뀔 때 마다 스위칭절환이 4번 일어나는 구간이 생기게 된다. 이를 방지하기 위하여 섹터의 판별과 교차 스위칭시퀀스 및 2가지 스위칭패턴으로 구성된 2개의 스위칭 록업테이블을 이용하여 최소 스위칭절환을 하기 위한 스위칭그룹 분리를 표 1에서 보여준다.

표 1. 제안 SVPWM 제어기법의 스위칭그룹 분리

섹터	스위칭시퀀스 1	스위칭시퀀스 2
1, 3, 5	$T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2$	$T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$
2, 4, 6	$T_0 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$	$T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2$

제안된 3상 전압형 인버터의 SVPWM 제어기법을 사용할 경우 기존의 제어기법과 비교하여 스위칭시퀀스가 2단계 줄어들기 때문에 각 제어주기마다 스위칭절환이 4번 줄어들게 되고 이는 시스템의 스위칭손실 및 데드타임에 대한 보상에 대해 강점을 가진다. 또한 시스템이 스위칭주파수가 높아질수록 더욱 큰 장점이 기대된다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션 해석

시뮬레이션에 의한 검증용 3상 전압형 인버터의 전체 회로 구성은 그림 (2)에서 보여주며, 조건은 10V 직류전원, 역방향 다이오드가 달린 6개 스위칭소자 및 3상 R L부하(5Ω, 5mH)를 사용하였으며, 스위칭주파수는 10kHz로 설정하였다.

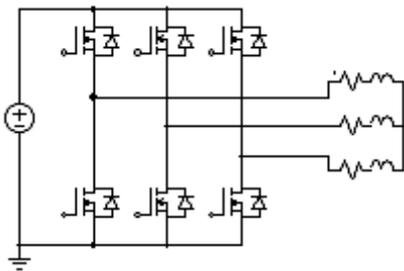
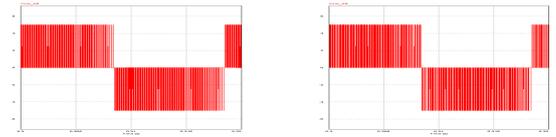
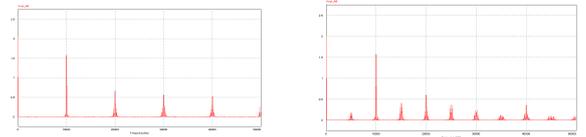


그림 2. 시뮬레이션 구성회로

3상 전압형 인버터를 제안된 제어기법으로 시뮬레이션 수행한 결과, 기존 제어기법의 출력과 동일한 출력이 얻어짐을 그림 2에 보여준다. 제안된 제어기법에서는 스위칭테이블이 양방향으로 대칭되는 삼각파형태가 아닌 변형된 삼각파 형태로 구성되기 때문에 선간전압의 FFT분석을 살펴보면 5kHz 주파수에 약간의 고조파가 발생하는 것을 확인 할 수 있으며, 하지만 시스템의 동특성이 좋아짐이 기대된다.



(a) 기존 제어기법 (b) 제안 제어기법
그림 3. 출력선간전압 파형(x축:50ms/div, y축:1V/div)



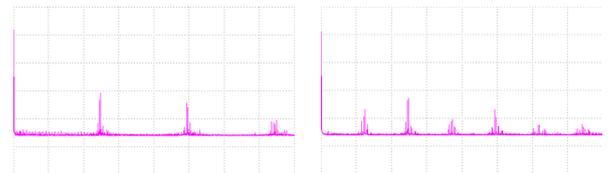
(a) 기존 제어기법 (b) 제안 제어기법
그림 4. 출력 선간전압 FFT분석(x축:10kHz/div, y축:0.5V/div)

3.2 실험 해석

3상 전압형 인버터의 prototype를 제작하였고, 입력전원 10V, 스위칭 주파수를 2.5kHz로 실험 한 결과 시뮬레이션과 동일한 출력선간전압이 얻어짐을 그림 5에 보여준다. 또한 출력선간전압의 FFT분석 결과는 그림 6에 보여주며, 1.25kHz 주파수 영역에서 고조파가 발생하지만 2.5kHz 스위칭주파수 영역에서의 고조파성분이 약간 저감된다는 것을 확인하였다.



(a) 기존 제어기법 (b) 제안 제어기법
그림 5. 출력 선간전압 FFT분석(x축:50ms/div, y축:5V/div)



(a) 기존 제어기법 (b) 제안 제어기법
그림 6. 출력 선간전압 FFT분석(x축:1kHz/div, y축:1v/div)

4. 결론

본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 인버터의 공간벡터 제어기법의 스위칭시퀀스를 간략화하여 스위칭절환의 횟수를 저감시킬 수 있는 제어기법을 제안하였다. 섹터에 따라 스위칭시퀀스와 스위칭상태를 변경하여 스위칭절환 횟수를 최소로 하는 제어기법을 모색하였다. 이는 50Hz 출력전압의 한 주기에 대해 스위칭시퀀스가 130단계 줄어들어 스위칭절환이 260회(33%) 줄어들음을 수치적으로 계산하였다. 그리고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 제어기법의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 설승기, "전기기기제어론"브레인코리아, pp 239 276, 2002.
- [2] 김태웅, 최재호, "전력전자회로" 내하출판사, pp 137 207, 2005.