

3상 전류형 컨버터의 간략화 스위칭시퀀스 제어기법 제안

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

Proposed Control Scheme with simplified Switching Sequence for 3-phase Current Source Converter

Dong-Hyun Kim*, Choon-Ho Cho*, Chang-Young Choi*, Cheol-Hong Byeon*
 Seong-Gon Kim**, Tae-Woong Kim*
 Gyeongsang National University*, Jeonbuk Institute of Automotive Technology**

ABSTRACT

3상 전류형 인버터는 3상의 전류원을 정류하여 직류로 내보내는 대표적인 전력변환시스템이다. 3상 전류형 컨버터의 효율을 극대화 시키는 연구가 활발히 진행되고 있는 현재 시점에 스위칭시퀀스를 간략화 하여 스위칭횟수를 감소함으로써 스위칭 손실 저감시킴은 전체 시스템 효율에 긍정적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 3상 전류형 컨버터의 기존 스위칭시퀀스를 간략화 함을 통해 스위칭 절환을 최소로 하는 3상 전류형 컨버터의 제어기법에 대해 제안을 하며, 그 유효성을 PSIM 시뮬레이터와 실험을 통해서 검증한다.

1. 서론

현재 3상 전류형 컨버터의 제어기법에서 공간벡터 PWM 방식은 5단계의 스위칭시퀀스로 동작하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 3상 전류형 컨버터의 공간벡터 PWM 제어기법에서 스위칭 절환이 최소로 이루어지도록 스위칭시퀀스를 구성하고, 적절한 스위칭 패턴을 사용하여, 스위칭 손실을 최소화 하며 데드타임에 대한 시스템 효율을 극대화 하는 3상 전류형 인버터의 간략화 된 스위칭시퀀스 제어기법을 제안한다.

2. 3상 전류형 컨버터의 제어기법

2.1 기존의 SVPWM 제어기법

3상 전류형 컨버터를 제어할 경우, 전류공간벡터를 이용하여 필요한 6개 섹터 정보를 계산하고, 각 섹터에 대한 스위칭 패턴을 정하여 제어를 하게 된다. 유효벡터는 위상에 따라 6가지의 스위칭 패턴을 가지며, 영벡터는 섹터가 바뀌에 따라 스위칭 절환이 최소로 이루어지도록 3가지 패턴(패턴1. a상 2개 스위치 on, 패턴2. b상 2개 스위치 on, 패턴 3. c상 2개 스위치 on)으로 스위칭 테이블을 구성하게 된다. 3상 전류형 컨버터를 제어하는 경우, 상부나 하부의 소자들 중에서 두 개 이상이 동시에 도통이 되면 단락상태가 야기된다. 또한 어느 쪽이라도 도통되는 소자가 없는 경우는 회로가 개방되고 직류측 평활리액터에 무한대 전압이 유도되므로 이를 방지하기 위해 상단의 세 개 스위치가 동시에 턴 온이 되거나 하단의 세 개 스위치가

동시에 턴 오프가 되지 않도록 제어를 해야 한다^[1]. 3상 전류형 컨버터의 공간벡터 표현은 그림 1에서 보여준다.

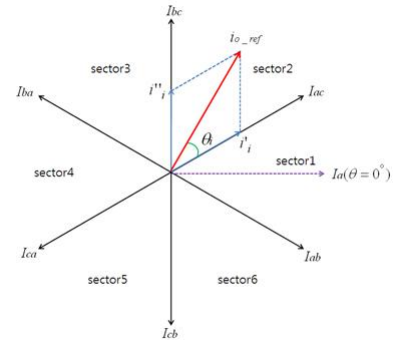


그림 1. 3상 전류형 컨버터의 공간벡터표현

전류형 컨버터의 공간벡터 PWM제어기법에 대한 공간벡터를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같이 표현되며, 이에 대한 유효벡터 인가시간은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\vec{i} = \frac{2}{3}(i_a + i_b e^{j2\pi/3} + i_c e^{j4\pi/3}) = I_c e^{j\theta} \quad (1)$$

$$\int_0^{T_s} I^* dt = \int_0^{T_1} I_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} I_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} I_0 dt \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 합성하여 프로세서에서 계산되는 최종 벡터 인가시간에 대한 수식을 식 (3)에서 보여준다. 여기서 영벡터 인가시간은 제어주기에서 유효벡터 인가시간을 감산함으로 구하게 된다.

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

3상 전류형 컨버터의 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 시퀀스

가 바뀔에 따라 스위칭 절환을 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 전류형 컨버터의 SVPWM 제어기법을 제안한다. 제안된 제어기법에서는 기존 제어기법의 5단계 스위칭시퀀스가 아닌 간략화 된 3단계 스위칭시퀀스로 이루어진다. 3상 전류형 컨버터를 구동할 때 영벡터는 3가지 패턴을 사용할 수 있으며, 사용할 영벡터는 스위칭 절환이 최소로 이루어지도록 스위칭테이블을 설정해 주어야 한다. 또한 각 섹터에 사용되는 유효벡터의 스위칭 상태에 따라 사용되는 영벡터의 스위칭 상태가 바뀌게 된다. 섹터 변환시의 스위칭 절환을 최소로 하기 위해 스위칭시퀀스의 T_1 과 T_2 사이에 T_0 를 배치하였으며, 스위칭 절환이 최소로 이루어지도록 영벡터를 설계하는 패턴을 표 1에서 보여준다.

표 1. 제안된 제어기법의 스위칭 그룹의 분리

섹터	스위칭시퀀스	유효벡터	영벡터
1	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(1, 1,0)(1,0, 1)	(a,0,0)
2	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(1,0, 1)(0,1, 1)	(0,0,c)
3	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(0,1, 1)(1,1,0)	(0,b,0)
4	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(1,1,0)(1,0,1)	(a,0,0)
5	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(1,0,1)(0, 1,1)	(0,0,c)
6	$T_1 \rightarrow T_0 \rightarrow T_2$	(0, 1,1)(1, 1,0)	(0,b,0)

제안된 3상 전류형 컨버터의 SVPWM 제어기법을 사용할 경우 기존의 제어기법과 비교하여 스위칭시퀀스가 2단계 줄어들기 때문에 각 제어주기마다 스위칭 절환이 4번 줄어들게 되고 이는 시스템의 스위칭 손실 및 데드타임에 대한 보상에 대해 이점을 가진다. 또한 시스템이 스위칭주파수가 높아질수록 더욱 큰 장점을 기대할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션 해석

시뮬레이션을 해석하기 위한 3상 전류형 컨버터의 전체 회로 구성은 그림 2에서 보여주며, 회로의 조건은 3상 교류전원 (10V, 3 phase), 6개 스위칭 소자, 6개 다이오드 및 R L부하 (1Ω, 10mH)를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 10kHz로 설정하였다.

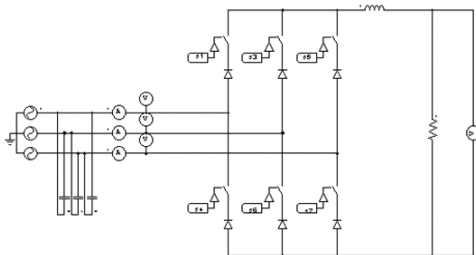
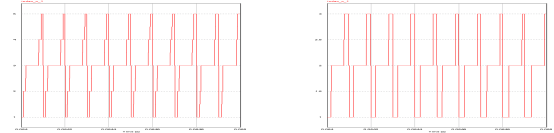
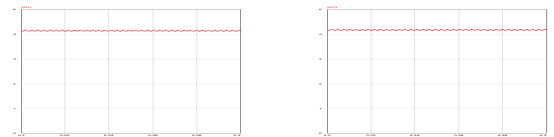


그림 2 시뮬레이션 회로도

3상 전류형 컨버터를 제안된 제어기법으로 시뮬레이션 한 결과, 스위칭시퀀스가 5단계에서 3단계로 줄어들음을 그림 4에서 보여주며, 기존 제어기법과 동일한 전압을 출력함을 그림 4에 보여준다.



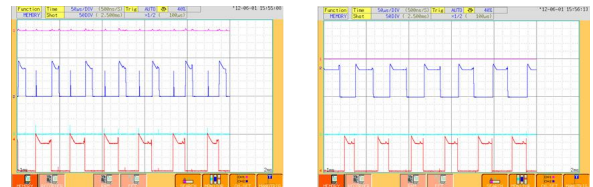
(a) 기존 제어기법 (b) 제안된 제어기법
그림 3. 3상 전류형 컨버터의 출력전압 FFT 분석
(x축 : 10us/div, y축 : 1/div)



(a) 기존 제어기법 (b) 제안된 제어기법
그림 4. 3상 전류형 컨버터의 정상상태 출력 전류
(x축 : 20us/div, y축 : 1V/div)

3.2 실험 해석

제안된 3상 전류형 컨버터 스위칭시퀀스 간략화 제어기법의 유효성을 검증하기 위해 스위칭 신호의 변경에 대한 실험을 한 결과, 게이트 신호가 시뮬레이션(그림 4)와 동일하게 T_1 , T_0 , T_2 의 스위칭시퀀스를 따라 동작을 한다는 것을 확인하였으며, 그림 5에서 게이트 신호 실험 결과를 보여준다(게이트 신호를 분석하여 섹터를 판별할 수 있다).



(a) 섹터1 게이트신호 (b) 섹터5 게이트신호
그림 5. 3상 전류형 컨버터의 게이트 신호
(x축 : 50us/div, y축 : 5V/div)

4. 결론

본 논문에서는 일반적으로 사용되고 있는 3상 전류형 컨버터의 공간벡터 제어기법의 스위칭시퀀스를 간략화하여 스위칭 절환의 횟수를 저감시킬 수 있는 제어기법을 제안하였다. 제안된 제어기법으로 시스템 구동 시 스위칭시퀀스가 40%줄어들고 스위칭절환 횟수는 50% 줄어들음을 수치적으로 계산하였다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 스위칭시퀀스의 간략화가 기존의 시스템과 동일한 출력특성을 가짐을 확인하였으며, 실험을 통해 제안된 제어기법이 시스템 구동 시 스위칭절환 횟수를 감소시키는 것을 검증하였다.

참고 문헌

[1] 김태웅 “전류형 PWM GTO 컨버터의 입력필터 설계” pp 3 11, 1993.