

변형 공간벡터방식을 사용한 Z-Source 인버터의 해석 및 제어

全泰園[†], 황빈트렌*, 金興根^{**}, 盧義哲^{***}

Analysis and Control of Z-Source Inverter using Modified Space Vector Methods

Tae-Won Chun, Quang-Vinh Tran, Heung-Gun Kim and Eui-Cheol Nho

요 약

본 논문은 ZSI에서 shoot-through 시간을 효율적으로 제어하기 위한 변형 공간전압 변조방식으로 3종류를 제시하였다. 3개의 변형 공간전압 변조방식에 대한 스위칭 패턴과 shoot-through 시간변화에 대한 변조신호의 변화를 분석한다. Shoot-through 시간 제어 범위와 함께 스위칭 패턴 및 변조신호의 평형성 등을 고려하여 최적의 변형 공간전압 변조방식을 선정하였으며, 32비트 DSP를 사용한 실험을 통하여 그 타당성을 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, the three modified space vector modulation methods are suggested in order to control effectively the shoot-through time at Z-source inverter. Both the switching patterns of three modulation methods and the modulation signals with a variation of shoot-through time are analyzed. The optimum modified space vector modulation method is determined by both the control range of the shoot-through time and the symmetry of the switching pattern and modulation signal. The performances of modulation methods are verified with the simulation results with 32-bit DSP.

Key Words : Modulation signal, modified space vector modulation, shoot-through time, switching pattern, ZSI (Z-source Inverter)

1. 서 론

교류전동기 제어 또는 UPS등에서 직류전압을 가변 교류전압으로 변환시키기 위하여 PWM인버터가 많이 사용되어 왔다. 그런데 220V의 교류입력전압을 정류하여 PWM인버터로 정격전압이 220V인 교류전동기를 제어할 경우 PWM신호를 과변조 하여야 한다. 이렇게

출력교류전압을 입력교류전압보다 더 크게 제어하기 위하여, 정류기와 PWM인버터사이에 직류 부스트 컨버터를 사용하여 직류전압을 상승시켜야 한다. 이 직류 부스트 컨버터에 인하여 전력회로가 더 복잡해지며, 비용이 상승하고 효율이 떨어지는 문제가 있다. 또한 PWM 인버터의 단락은 방지하기 위하여 각 상 브리지의 상위 및 하위 스위칭 소자의 PWM 신호에 데드시간이 반드시 필요하다. 이 데드시간에 의해 출력 교류전압의 크기가 감소되면서 왜곡현상도 발생되는 문제가 있다.^{[1],[2]}

기존의 PWM인버터의 문제점들을 해결하기 위하여 새로운 개념의 ZSI (Z-Source Inverter)가 제시되었다.^[3] 기존 PWM인버터와 달리 shoot-through 시간

[†] 교신저자 : 정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수
E-mail : twchun@mail.ulsan.ac.kr

* 정회원, 울산대 대학원 전기공학과 박사과정

** 정회원, 경북대 전자전기공학부 교수

*** 정회원, 부경대 전기제어계측공학부 교수

접수일자 : 2007. 6. 29 1차 심사 : 2007. 7. 14

심사완료 : 2007. 7. 16

을 제어하여 직류전압을 상승시킴으로써 직류 부스트 컨버터가 필요 없으므로 전력회로를 간단히 할 수 있다. 그리고 데드시간이 필요 없으므로 인버터의 단락에 의한 고장이 거의 없어 신뢰성을 향상시킬 수 있으나, 펄스폭 변조와 함께 shoot-through 시간을 동시에 제어하여야 한다. 기존의 논문에서는 연료전지 자동차 구동용으로 PWM인버터, 직류 부스트 컨버터-PWM인버터, ZSI를 사용 시, 각각 전체 전력용 스위칭 소자의 전력, 소자 수 및 효율 등을 비교하였다.^[4] 캐리어 기반 PWM 방식에서 3차 고조파 성분을 인가하여 직류전압을 최대 승압시키는 방법을 제시하였다.^{[5][6]} 변형된 캐리어 기반 기준 식으로 전압형 ZSI의 펄스폭 변조 성능을 분석하였다.^[7]

기존의 논문에서는 캐리어기반 변조방식에서 기준전압을 변형하여 shoot-through 시간을 조정하는 방식을 사용하였으나, 원하는 shoot-through 시간으로 정확하게 제어하기가 상당히 힘들다는 문제가 있었다.

본 논문에서는 원하는 shoot-through 시간을 정확하게 쉽게 제어하기 위하여, 기존의 공간벡터 변조방식에서 shoot-through 시간을 첨가시키는 변형 공간벡터변조 방식을 제시한다. 이 변형 공간벡터변조방식에서 영 전압벡터 인가시간 및 shoot-through 시간을 분포시키는 3가지 방법을 제시하고, 이 방법들에 대한 특성을 각각 분석한다. 32-bit DSP로 수행한 실험을 통하여 3가지 변형 공간벡터변조방식의 특성을 분석한다.

2. ZSI의 구조 및 동작특성

그림 1은 ZSI의 구조를 보인 것이다.

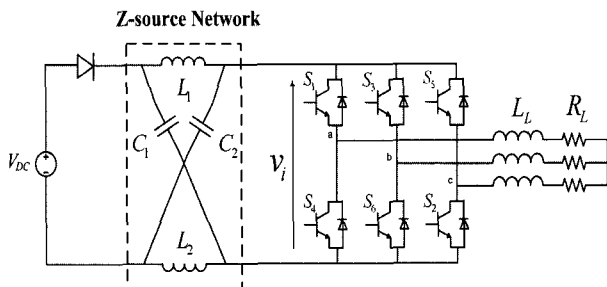
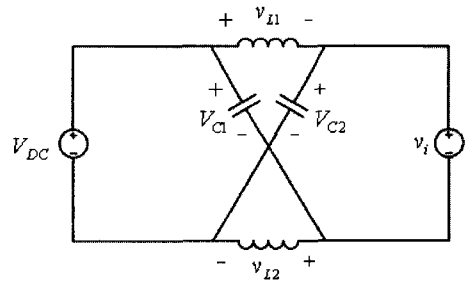


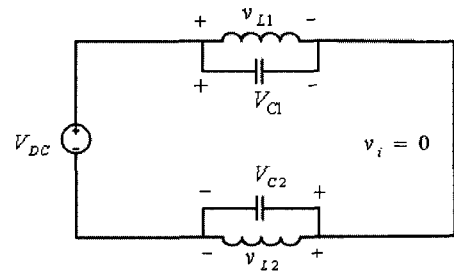
그림 1 ZSI의 구조
Fig. 1 Configuration of ZSI

이 ZSI는 직류전원과 직류전원의 역방향 전류를 차

단하기 위한 다이오드, 두 개 인덕터와 커패시터가 X 형태로 연결된 Z-source 네트워크, 6개의 스위칭 소자로 구성된 3상 인버터 및 부하로 구성된다. 이 ZSI는 비shoot-through 모드와 shoot-through 모드 등 2개 동작모드로 동작되며, 그림 2는 두 동작모드 동작 시 ZSI의 등가회로를 보인 것이다. 여기서 두 커패시터 및 인덕터 값이 각각 동일하므로, 두 커패시터 전압이 동일하고, 두 인덕터전압 값도 같다.



(a) 비shoot-through모드



(b) Shoot-through모드 시

그림 2 ZSI 동작모드
Fig. 2 Operation modes of ZSI

그림 2(a)의 비shoot-through모드에서는 스위칭 소자의 스위칭상태에 따라 6개의 전압벡터와 2개의 영전압 벡터가 부하에 인가되는 일반전인 PWM인버터로 동작한다.

$$V_L = V_{DC} - V_C \tag{1}$$

그림 2(b)의 shoot-through모드에서는 어떤 한 상의 브리지에서 상위와 하위 스위칭소자를 동시에 도통시켜 인버터 입력단이 단락회로로 되며, 인덕터 전압은 다음 식과 같다.

$$V_L = V_C \tag{2}$$

한 주기 T_s 에서 shoot-through 시간 T_{sh} 동안 shoot-through 모드로 동작하고, 나머지 시간 즉 $(T_s - T_{sh})$ 구간은 비shoot-through모드로 동작된다. 인덕터 전압의 한주기 평균값이 0이므로 커패시터전압은 다음 식과 같이 유도된다.^[3]

$$V_C = \frac{1 - (T_{sh}/T_s)}{1 - 2(T_{sh}/T_s)} V_{DC} \quad (3)$$

커패시터 전압은 shoot-through시간 함수이며, 이 시간이 증가되면 커패시터 전압이 증가된다.

3. 변형 공간벡터변조방식

3.1 기존 공간벡터 변조방식

공간벡터 변조방식은 낮은 전류고조파성분 및 높은 변조율 때문에 전류제어형 PWM인버터에 많이 사용되어 왔다.^[8] 기존 전압벡터가 그림 3과 같이 섹터 I 가 있을 경우에는, 기준전압벡터를 전압벡터 V_1 과 V_2 로 분리할 수 있다.

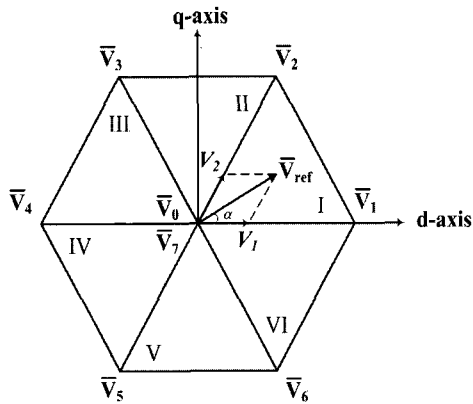


그림 3 공간벡터 변조(기준전압 섹터 I 있을 경우)
Fig. 3 Basic space vector PWM when the reference voltage vector is located at sector I

한 샘플링구간동안 전압 V_1 과 V_2 각각 T_1 및 T_2 시간동안 인가하고, 나머지 시간 $T_0 = T_s - (T_1 + T_2)$ 동안은 영 전압벡터를 인가한다. 기준 전압벡터 V_{ref} 는 다음 식으로 계산한다.

$$\overline{V_{ref}} = \overline{V_1} T_1 + \overline{V_2} T_2 \quad (4)$$

T_1 과 T_2 은 다음과 같다.

$$T_1 = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{\widehat{V}_i} T_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \quad (5)$$

$$T_2 = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{\widehat{V}_i} T_s \sin\alpha \quad (6)$$

여기서 \widehat{V}_i 는 인버터 입력전압의 피크값, α 는 기준전압벡터와 전압벡터 V_1 의 각으로 0에서 $\pi/3$ 까지 변화된다.

그림 4는 기존 공간벡터를 사용한 섹터 I 구간에서 6개의 스위칭소자의 스위칭패턴을 보인 것이다. 영전압 구간을 4개로 균등하게 분할하고, T_1 과 T_2 구간은 2개로 분할하여, PWM 신호가 반주기를 기준으로 대칭되도록 분포시킨다. 여기에 각 브리지의 단락을 방지하기 위하여 데드시간 T_d 을 인가하여야 한다.

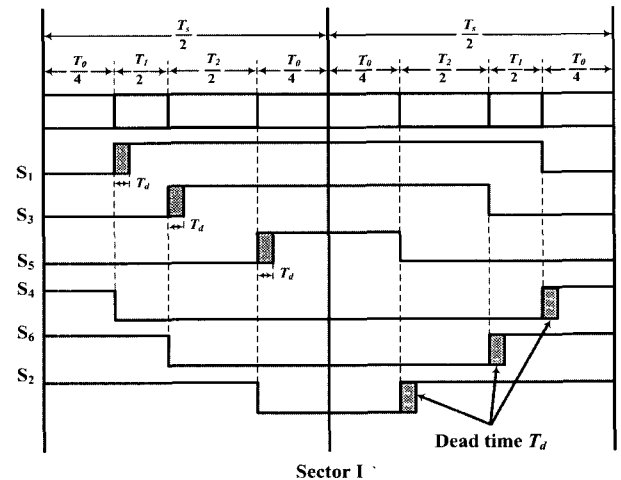


그림 4 기존 공간전압벡터 스위칭 패턴
Fig. 4 Switching pattern of traditional space voltage vector

ZSI는 기존의 공간전압 변조방식에서 필요한 데드시간이 필요가 없으며, 대신 직류전압을 부스트시키기 위하여 한 브리지의 상위 스위칭소자와 하위 스위칭소자를 동시에 도통시켜 단락시키는 시간 즉 shoot-trough 시간 T_{sh} 가 필요하다. 따라서 이 shoot-trough 시간을 포함시키는 변형 공간전압변조 방식 3가지를 제시하고, 각 변조방식에 대한 특성을 분석한다.

3.2 변형 공간전압 변조방식 I

먼저 변형 공간전압 변조방식 I의 6개 스위칭 패턴은 그림 5와 같다. 그림 4에서의 기존 변조방식에서 shoot-through 시간 T_{sh} 를 6등분한 시간 즉 $T = T_{sh}/6$ 을 한 주기 동안 6개 구간에 균등하게 나누어 분포시킨다. 여기서 유효전압 인가 구간인 T_1 과 T_2 는 변동이 없고, 영전압 벡터인 6개 구간 동안에서만 shoot-through 시간을 제어한다. 따라서 T_{sh} 가 증가할수록 영전압 벡터 인가 시간 T_0 는 감소되고, shoot-through 시간이 T_0 보다 작아야 하므로 최대 shoot-through 시간은 T_0 이다.

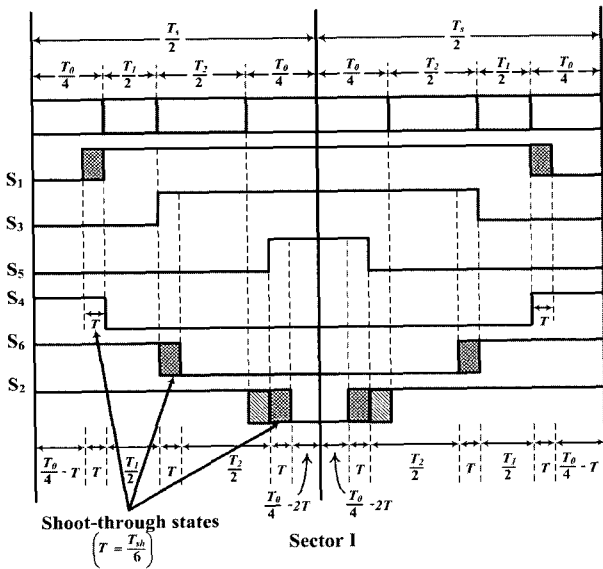


그림 5 변형 공간전압 변조방식 I 스위칭 패턴
Fig. 5 Switching pattern for modified space voltage modulation method I

이 그림에서 앞 반주기의 마지막 구간인 $(T_0/4 - 2T)$ 가 0보다 커야 하므로, 이 관계를 이용하여 T_{sh} 의 범위는 다음 식과 같다.

$$T_{sh} < \left(\frac{3}{4}\right)T_0 \quad (7)$$

식(7)에서 보면 shoot-through 시간은 영전압 인가 시간의 75%밖에 사용할 수 없으므로 직류전압을 부스트시킬 수 있는 범위가 제한된다는 문제점이 있다. 이에 반하여 제일 앞 구간인 $(T_0/4 - T)$ 에서는 $T_{sh}=T_0$ 되더라도 영전압 인가시간이 남는다.

3.3 변형 공간전압 변조방식 II

그림 6은 변형 공간전압 변조방식 II의 스위칭 패턴을 보인 것이다. 변조방식 I의 문제점을 해결하기 위하여 영전압 인가 시간을 균등하게 분포시키는 것이 아니라, $(T_0/6)$ 과 $(T_0/3)$ 으로 다르게 분포시킨다. 그리고 shoot-through 시간은 변조방식 I과 같이 6개 구간에 균등하게 나누어 분포시킨다. 이 경우에는 첫 번째 구간과 마지막 구간 모두 shoot-through 시간을 영전압인가 시간의 100% 사용할 수 있으므로 직류전압을 최대한 증가시킬 수 있다. 그런데 이 방식은 영전압 벡터인가 시간을 균등하게 분포시키지 않으므로 인버터 출력전압에 왜곡현상이 발생할 수 있다.

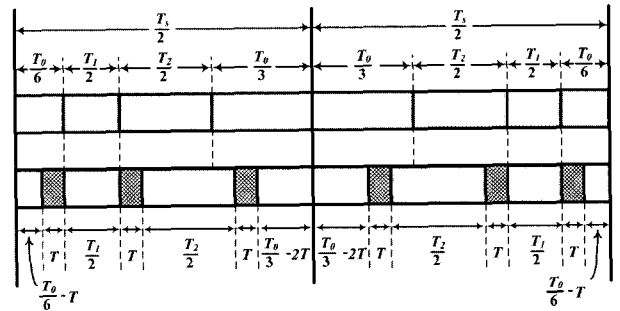


그림 6 변형 공간전압 변조방식 II 스위칭 패턴
Fig. 6 Switching pattern for modified space voltage modulation method II

3.4 변형 공간전압 변조방식 III

그림 7은 변형 공간전압 변조방식 III의 스위칭 패턴을 보인 것이다.

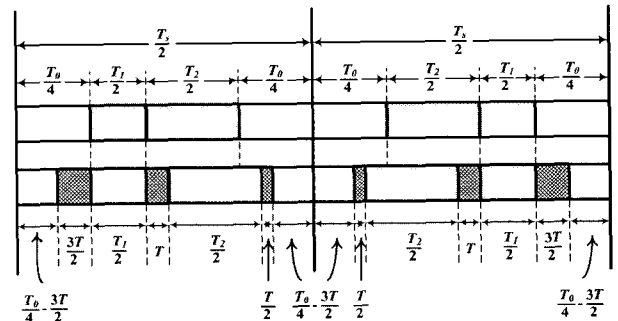


그림 7 변형 공간전압 변조방식 III 스위칭 패턴
Fig. 7 Switching pattern for modified space voltage modulation method III

세 번째 변조방식은 영전압 벡터 시간은 기존의 공간전압 변조방식과 같이 4부분으로 균등하게 분배시키고, shoot-through 시간을 $T_{sh}/4$,

$T_{sh}/6$, $T_{sh}/12$ 로 다르게 조정하여 분포시킨다. 이 변조방식은 첫 번째 및 마지막 구간 모두 shoot-through 시간을 T_0 의 100% 사용할 수 있으면서, 영전압 벡터 시간을 균등하게 분포시킴으로써 인버터 출력전압의 왜곡현상을 방지할 수 있다.

4. 변형 공간벡터변조방식 해석

3개의 변형 공간벡터 방식의 차이점을 해석하기 위하여 각 방식별 펄스를 변조하기 위한 기준 변조 신호를 분석한다. 먼저 식(5)와 (6)을 이용하여 n 섹터에서 유효전압 인가시간 T_a 는 다음 식과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} T_a = T_1 + T_2 &= \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{\widehat{V}_i} T_s \sin\left(\frac{(n+1)\pi}{3} - \alpha\right) \\ &= T_{pk} \sin\left(\frac{(n+1)\pi}{3} - \alpha\right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 전압스트레스 \widehat{V}_i 를 T_{sh} 로 표시하면,^[3] T_{pk} 는 식(9)와 같이 T_{sh} 의 함수로 표현할 수 있다. 이 값은 기준전압에 비례하며, shoot-through 시간이 증가되면 감소됨을 알 수 있다.

$$T_{pk} = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{\widehat{V}_i} T_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V_{ref}}{V_{DC}} \times (T_s - 2T_{sh}) \quad (9)$$

그림 8은 식(8)과 (9)를 이용하여 각 변형 공간 벡터 변조방식에서 펄스를 변조하기 위한 기준 변조신호 파형을 보인 것이다.

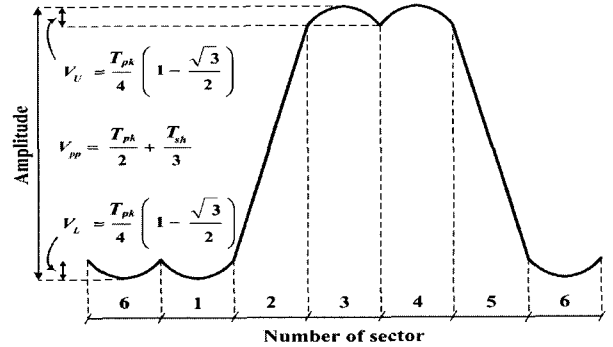
그림 8(a)은 변조방식 I의 기준 변조신호이다. 이 변조신호에서 섹터 6,1의 값 V_L 을 유도하기 위하여, 먼저 그림 5를 참조하여 섹터 1에서의 기준변조 식은 다음 식과 같다.

$$M_{ref} = \frac{T_0}{4} - T = \frac{T_s - T_a}{4} - T \quad (10)$$

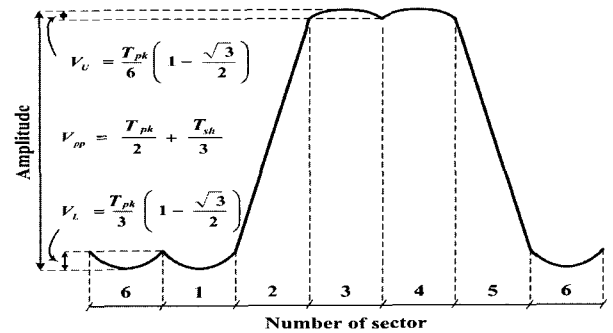
이 V_L 값은 $\alpha=\pi/6$ 일 때의 기준 변조값에 $\alpha=0$ 일 때의 기준 변조값을 빼면 구할 수 있다. 식(8)에서 $\alpha=\pi/6$ 일 경우 $T_a = T_{pk}$ 이며, $\alpha=0$ 일 경우 $T_a = (\sqrt{3}/2)T_{pk}$ 이다. 이 T_a 의 식을 식(10)에 대

입하고, 두 값의 차 즉 V_L 은 다음과 같다.

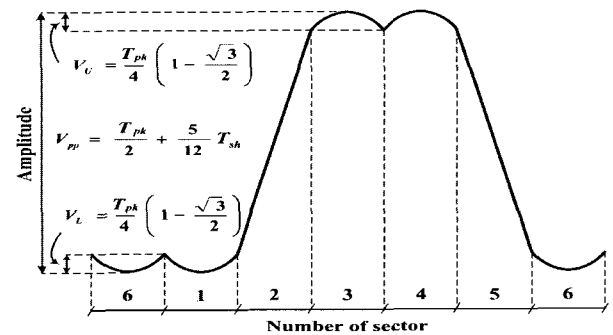
$$V_L = \frac{T_{pk}}{4} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad (11)$$



(a) 변형 공간전압 변조방식 I 경우



(b) 변형 공간전압 변조방식 II 경우



(c) 변형 공간전압 변조방식 III 경우

그림 8 변형 공간전압 변조방식의 변조신호
Fig. 8 Modulation signals for modified space voltage modulation method

섹터 3,4의 값 V_U 을 유도하기 위하여, 섹터 3에서의 기준변조 식은 다음 식과 같다.

$$M_{ref} = \frac{T_0}{4} + \frac{T_1 + T_2}{2} + T = \frac{T_s + T_a}{4} + T \quad (12)$$

식(8)에서 $n=3$ 이며, $\alpha=\pi/6$ 일 경우와 $\alpha=0$ 일 경우에서의 각각 T_a 식을 구한 후, V_U 의 식을 유도하면 V_L 의 식과 같다.

$$V_U = \frac{T_{pk}}{4} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad (13)$$

같은 방법으로 다른 두 변조방식에서 기준 변조신호 값을 유도할 수 있다.

위와 같이 섹터 6,1과 섹터 3,4의 파형이 동일하면서 두 섹터에서의 크기가 T_{pk} 값에 비례한다. 그리고 변조신호의 peak-to-peak 값 V_{pp} 역시 T_{pk} 의 함수이므로 shoot-through 시간이 증가할 수록 이 변조신호의 크기가 감소된다.

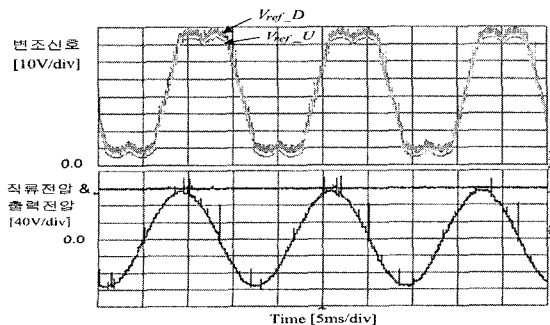
그림 8(b)는 변조방식 II의 기준 변조신호이다. 섹터 6,1에서의 V_L 값이 섹터 3,4에서의 V_U 값보다 2배로 크므로 불평형 파형을 가지고 있다. 변조신호의 peak-to-peak 값은 변조방식 I과 동일하고 역시 shoot-through 시간이 증가할 수록 이 변조신호의 크기가 감소된다.

그림 8(c)는 변조방식 III의 기준 변조신호이다. 변조방식 I의 변조신호와 비교하면, 섹터 6,1과 섹터 3,4의 파형은 동일하고 peak-to-peak 값 V_{pp} 는 약간 더 크울 알 수 있다.

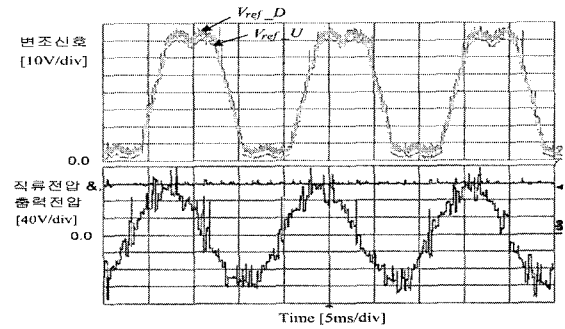
5. 실험 결과

변형 공간벡터 변조방식을 구현하기 위하여 32 비트 DSP인 320F2812를 사용하였다.

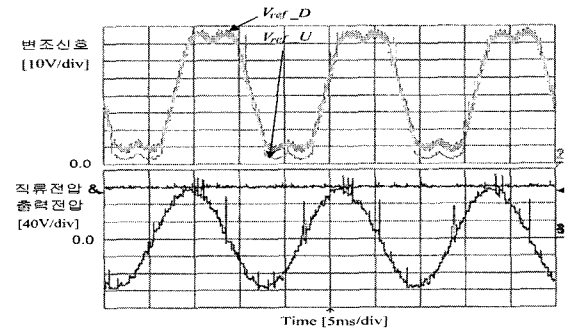
그림 9는 입력직류전압 V_{DC} 가 100V, 출력 교류전압의 피크치가 100V이며 shoot-through시간이 30 μsec 일 경우 3개 변조기법에서 인버터 a상의 상위스위칭 소자 변조신호 $V_{ref,U}$ 와 하위 스위칭소자 변조신호 $V_{ref,D}$ 및 커패시터 전압과 인버터 출력교류전압의 파형에 대한 실험결과이다.



(a) 변형 공간전압 변조방식 I 사용 시



(b) 변형 공간전압 변조방식 II 사용 시



(c) 변형 공간전압 변조방식 III 사용 시

그림 9 출력교류전압=100V, $T_{sh} = 30 \mu\text{sec}$ 시 실험결과
Fig. 9 Experimental results at output ac voltage = 100V, $T_{sh} = 30 \mu\text{sec}$

그림 9(a) 보는 바와 같이 변조방식 I 사용 시 변조신호는 그림 8(a)와 거의 같은 파형이며 상위 스위칭소자의 변조신호는 하위 스위칭소자의 변조신호 보다 $T (=T_{sh}/6)$ 만큼 밀어서 이동되어 있다. 그리고 $T_{sh} = 30 \mu\text{sec}$ 이므로 커패시터 직류전압은 직류전압의 1.2배인 120V이며, 출력전압은 리플성분이 거의 없는 정현파이다.

그림 9(b)와 같이 변조방식 II를 사용 시 실험결과로 섹터 1,6의 변조신호는 섹터 3,4의 변조신호와 다르며, 이 불평형 때문에 출력 교류전압에 왜곡현상이 발생된다. 그림 9(c)는 변조방식 III를 사용 시 실험결과이다. 변조신호는 변조방식 I의 변조신호와 같이 평형상태이므로 출력 교류전압에 고조파성분이 거의 없는 정현파임을 알 수 있다. 상위 및 하위 스위칭소자의 변조신호 직류레벨은 섹터 3,4에서는 $0.5T$, 섹터 2,5에서는 T , 섹터 6,1에서는 $1.5T$ 등 섹터에 따라 변화된다.

여기서 shoot-through 시간을 증가시켜 커패시터 전압 즉 인버터 직류 입력전압을 증가시키면, 그림 9(b)에서 보여준 인버터 출력 전압의 왜곡

현상이 상당히 감소시킬 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 ZSI에서 직류전압을 부스트시키기 위한 shoot-through 시간을 효율적으로 제어하기 위한 3개의 변형 공간전압 변조방식을 제시하였다. 각 변조방식의 스위칭 패턴과 함께 shoot-through 시간 및 기준전압에 대한 기준 변조신호의 특성을 분석하였다.

첫 번째 변형 공간전압 벡터 변조 방식은 스위칭 패턴 및 변조신호가 평형상태로 되어 출력신호 파형이 가장 좋으나 shoot-through 시간 제어 범위가 제한된다는 단점이 있다. 두 번째 및 세 번째 변조 방식은 shoot-through 시간을 최대한 제어할 수 있다. 그런데 두 번째 변조 방식은 스위칭 패턴 및 변조신호가 불균형하며 출력전압에 왜곡현상 발생할 수 있으며, 세 번째 변조방식이 비교적 좋은 특성을 내는 것으로, 32비트 DSP를 사용한 실험을 통하여 확인하였다.

이 논문은 2006년도 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] H.Zhao, Q.M.Jonahan, A.Kawamura, "An Accurate Approach of Nonlinearity Compensation for VSI Inverter Output Voltage", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19, no.4, July, 2004, pp.1029-1035.
- [2] 류호선, 김봉석, 이주현, 임익현, 황성환, 김장목, "전압형 PWM인버터의 새로운 데드타임 보상기법" 전력전자학회 논문지, 11권, 5호, 2006, pp.395-403.
- [3] F.Z.Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Industry Applications, vol.39, no.2, 2003, pp.504-510.
- [4] M.Shen, J.Wang, F.Z.Peng, L.M.Tolbert, and D.J.Adams, "Maximum Constant Boost Control of the Z-Source Inverter", in Conf. Rec. IEEE- IAS Annual Meeting, 2004, pp.142-147.
- [5] F.Z.Peng, M.Shen, and Z.Qian, "Maximum Boost Control of the Z- Source Inverter", in Conf. Rec. IEEE- PESC Annual Meeting, 2004, pp.255-260.
- [6] F.Z.Peng, M.Shen, and Z.Qian, "Comparson of Traditional Inverters and Z-Source", in Conf. Rec. IEEE- PESC Annual Meeting, 2005, pp.1692- 1698.

- [7] P.C.Loh, D.M.Vilathgamuwa, Y.S.Lai, G.T.Chua, and Y. Li, "Pulse-Width Modulation of Z-Source Inverters", in Conf. Rec. of IEEE- IAS Annual Meeting, 2004, pp.148-155.
- [8] Y.H.Liu, C.L. Chen, and R.J.Tu, "A Novel Space-Vector Current Regulation Scheme for a Field-Oriented- Controlled Induction Motor Drive", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.45, no.5, Oct., 1998, pp. 730-737.

저 자 소 개



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 버지니아공대 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 편집위원장.



황빈트렌(Q.V.Tran)

1979년 6월 19일생. 2002년 베트남 호치민대 전기전자공학과 졸업. 2006년 울산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 경북대 전자전기공학부 교수. 당 학회 부회장.



노의철(盧義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박). 1995년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 교수. 당 학회 편집이사.