

NTV 식별과정 없는 멀티레벨 인버터의 신속한 공간벡터PWM 변조 기법

論 文
55B-6-3

Fast Space Vector PWM Modulation of Multi-Level Inverter Without NTV Identification

陳善昊[†] · 吳珍錫^{**}
(Sun-Ho Jin · Jin-Seok Oh)

Abstract - In this paper, we suggest a new space vector PWM modulation method with very short processing time which does not need identification of nearest three vectors(NTV) and duty ratio for each vector. The suggested PWM method makes mean value of phase voltage to be same as reference during every modulation period by use of a triangle in small hexagon on multi-level vector space. This paper described the suggested modulation method can be successfully applied to the space vector modulation use of multi-level inverter by computer simulations and experiments.

Key Words : Multi-Level Inverter, Space Vector Modulation, Nearest Three Vector(NTV), Pole Voltage, Phase Voltage

1. 서 론

멀티레벨 인버터는 전통적인 구조로써 다이오드 클램프형, 플라잉 커패시터형 및 캐스캐이드 H-브리지형이 있으며 여러 가지의 개선된 구조들이 연구 및 개발되고 재생에너지 분야 등으로 그 용도와 연구분야가 확대되고 있다[1-4]. 그림 1과 같은 H-브리지 형의 인버터는 구조적 단순성, 유지보수의 용이성, 높은 출력전압 레벨 및 리던던시(redundancy) 등의 장점 때문에 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다[5-6].

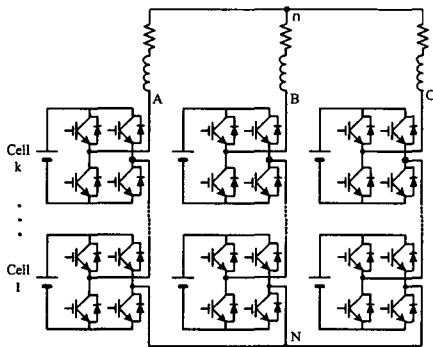


그림 1 H-브리지형 멀티레벨 인버터의 기본구조
Fig. 1 Basic structure of H-bridge multi-level inverter

멀티레벨 인버터의 변조방법은 그림 2와 같이 구분할 수 있다. 전동기의 벡터제어에 많이 사용되는 공간벡터 PWM 변조를 구현하기 위해 프로세서가 수행하는 가장 우선적인 동작은 제어시스템이 요구하는 기준전압 벡터와 인접한 세 개의 벡터(NTV), 즉 인접 삼각형을 식별하는 동작으로 NTV를 효과적으로 식별하여 프로세서의 수행속도를 향상시키는 분야에 관련된 연구가 많이 진행되고 있다[1,6,7-9].

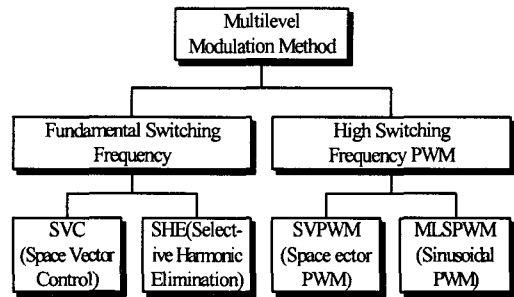


그림 2 멀티레벨 인버터의 변조기법
Fig. 2 Modulation methods for Multi-level inverter

본 논문에서는 전술한 NTV의 식별 과정을 생략하고, 1회의 변조 사이클 동안 제어시스템이 요구하는 상전압과 같은 평균전압을 출력하도록 만드는 방식의 공간벡터 PWM 변조기법을 제안한다. 제안하는 방식은 3상의 벡터공간에서 NTV를 이용하는 기존의 공간벡터 변조와 유사하게 동작하지만 NTV의 식별 프로세스가 생략되어 신속한 변조가 가능하다. 본 논문에서는 제안한 변조법을 설명하고 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다. 시뮬레이션 및 실험은 서로 다른 셀 전압비를 이용하여 출력레벨을 확장한 3-셀 구조의 H-브리지 인버터를 대상으로 하여 제한된 하드웨어

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國海洋大學校 大學院 機關시스템工學科 博士課程 修了

E-mail : mylit@naver.com

^{*} 正會員 : 韓國海洋大學校 大學院 메카트로닉스工學科 副教授

接受日字 : 2006年 3月 15日

最終完了 : 2006年 5月 24日

구조로써 13레벨까지의 다양한 출력레벨을 구현하도록 하였으며 실험을 통해 확인하였다.

2. 변 조

2.1 기본개념

d-q축으로 표현되는 고정자 회전좌표계 위에서 a, b, c 상의 기준전압 벡터는 식 (1)과 같다[7]. 그림 3과 같이 세 상의 전압이 평형을 이루는 이상적인 평형 3상의 정현파 조건에서 상전압 V_{An} , V_{Bn} , V_{Cn} 는 각각 극전압 V_{AN} , V_{BN} 및 V_{CN} 과 일치한다. 따라서 공간벡터 변조의 특정 시점에서 상전압의 기준값 식 (1)은 식 (2)와 같은 극전압의 기준값으로 다시 쓸 수 있으며 그림 4와 같은 극전압 벡터공간으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{an}^{*'} \\ V_{bn}^{*'} \\ V_{cn}^{*'} \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_n^* \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{aN}^{*'} \\ V_{bN}^{*'} \\ V_{cN}^{*'} \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_N^* \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

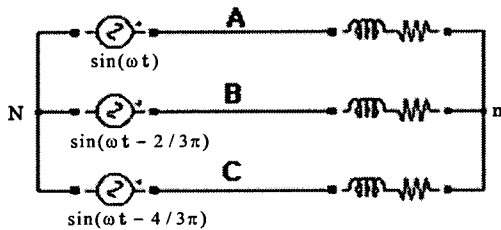


그림 3 3상 전압형 인버터의 이상적인 조건
Fig. 3 Ideal condition of 3-phase VSI

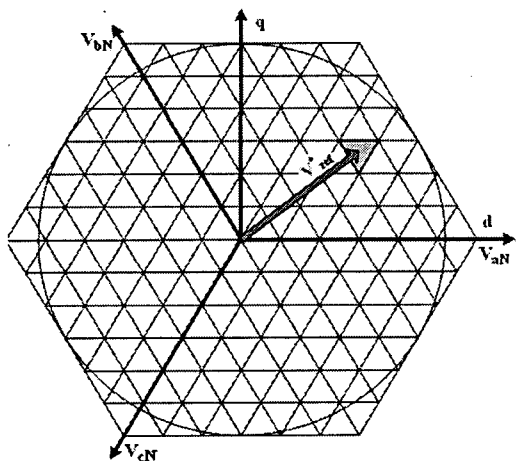


그림 4 극전압 벡터공간
Fig. 4 Vector space on pole Voltage

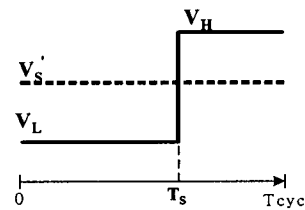
식(2)를 멀티레벨 벡터공간으로 표현하기 위해 단위 레벨의 전압으로 나누어 일반화하면 식(3)과 같고, 일반화된 세

상의 기준전압 V_N' 는 각각 식(4)의 범위 내에서 실수 값을 갖는다.

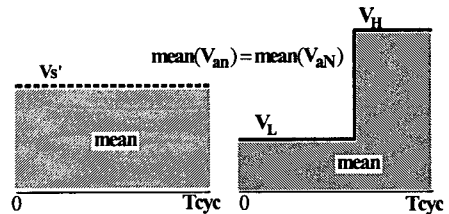
$$\begin{bmatrix} V_{aN}' \\ V_{bN}' \\ V_{cN}' \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2} V_N^*}{V_{cc}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$-\frac{p-1}{2} \leq V_N' \leq \frac{p-1}{2} \quad (4)$$

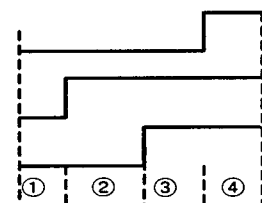
여기서 p는 멀티레벨 인버터의 출력 가능한 최대 레벨 수이다. 기준전압을 출력하기 위한 제안된 방법의 개념은 그림 5(a)와 같다. 변조주기 T_{cyc} 동안 기준전압의 평균치를 출력하기 위하여 각 상의 극전압은 한 번의 스텝을 생성하며, 세 극전압은 (c)와 같이 각 극의 스위칭 시간 T_s 에 따라 ①~④의 4 구간으로 구분된다. 이와 같은 방법으로 V_s' 와 동일한 평균 전압을 변조주기 T_{cyc} 동안 그림 5(b)와 같이 1회의 스텝을 통해 생성할 수 있다. 일반화된 전압 V_L 과 V_H 는 식 (6)-(7)의 관계를 갖는다.



(a) 기본 개념
(a) basic concept



(b) 평균값 일치
(b) the same mean value



(c) 3상 펄스
(c) 3-phase pulse

그림 5 제안한 방법
Fig. 5 Suggested Algorithm

$$V_L = \text{floor}(V_N') \quad (6)$$

$$V_H = V_L + 1 \quad (7)$$

식(6)의 floor (V_N') 은 V_N' 보다 작거나 같은 최대 정수를 나타낸다. 그림 5(c)의 각각의 스위칭 시간 T_S 는 변조주기 T_{cyc} 와 함께 식 (8)과 같은 관계를 갖는다.

$$T_S = |V_H - V_N'| \times T_{cyc} \quad (8)$$

2.2 극전압 및 상전압 평균

그림 3의 이상적인 조건이 아니라면 인버터 축의 극전압과 부하측의 상전압은 일치하지 않으며, 특정 시점에서의 한상의 상전압과 극전압의 관계는 식 (9)와 같다[6,9]. 따라서 그림 5(c)의 전체 구간에서 1상의 상전압 평균은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{an} = \frac{1}{3} [2 \cdot V_{aN} - V_{bN} - V_{cN}] \quad (9)$$

$$m_{an} = \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot m_{aN} - m_{bN} - m_{cN}] \quad (10)$$

여기서, $m_{an} = \frac{1}{T_{cyc}} \int_0^{T_{cyc}} V_{an} dt$, $m_{aN} = \frac{1}{T_{cyc}} \cdot \int_0^{T_{cyc}} V_{aN} dt$, $m_{bN} = \frac{1}{T_{cyc}} \cdot \int_0^{T_{cyc}} V_{bN} dt$, $m_{cN} = \frac{1}{T_{cyc}} \cdot \int_0^{T_{cyc}} V_{cN} dt$ 이다. 그런데 각 T_S 는 극전압의 평균을 3상 평형의 기준전압과 동일하게 만들기 때문에 각 극전압 평균의 합은 식(11)과 같다. 따라서 식(11)을 식(10)에 적용하면 식(12)와 같이 극전압과 상전압의 평균은 동일하게 된다.

$$m_{aN} + m_{bN} + m_{cN} = 0 \quad (11)$$

$$m_{an} = m_{aN} \quad (12)$$

따라서 3상의 극전압의 평균이 식(11)과 같은 평형 조건에서 변조주기 T_{cyc} 동안의 상 전압의 평균은 극전압의 평균과 동일하다. 그러므로 특정의 변조주기 동안 극전압의 평균값을 통해 각 상의 기준전압을 생성할 수 있다.

3. 벡터공간에서의 동작특성

각 극전압이 가지는 V_L 과 V_H 는 3상 극전압 벡터공간에서 식 (13)과 같은 8개의 벡터를 만든다. 또한 이 8개의 벡터는 멀티레벨 벡터공간에서 그림 6과 같은 하나의 작은 육각형을 형성한다. 식 (13)의 8개의 벡터에서 $V_0(V_{LLL})$ 과 $V_7(V_{HHH})$ 는 합성벡터의 방향과 크기가 같은 벡터로써 작은 육각형의 중심에 위치하며 전통적인 2레벨 인버터의 원점과 유사하다. 나머지 6개의 벡터는 작은 육각형의 외곽 꼭지점에 위치하며 그 배치는 각 상의 방향을 따른다.

1회의 사이클의 변조에서 8개의 벡터 중 4개의 벡터가 사용되며 그 질차는 그림 7과 같다. 처음 3상 모두 V_L 상태, 즉 $V_{LLL}(V_0)$ 에서 출발하여 T_S 가 작은 순서대로 각 상의 양

의 방향으로 세 번의 천이를 거쳐 동일한 위치인 $V_{HHH}(V_7)$ 로 되돌아가 하나의 삼각형을 일주한다. 따라서 그림 5(c)와 같이 스위칭 시간 T_S 의 크기가 $b < c < a$ 일 때 원점을 출발한 벡터는 $b \rightarrow c \rightarrow a$ 상의 순서로 각각 1스텝씩 증가하여 삼각형 Tr3를 일주한다.

$$V_{a,b,c} = \begin{bmatrix} V_0 = V_{LLL} \\ V_1 = V_{HLL} \\ V_2 = V_{LHL} \\ V_3 = V_{LLH} \\ V_4 = V_{HHL} \\ V_5 = V_{LHH} \\ V_6 = V_{HLH} \\ V_7 = V_{HHH} \end{bmatrix} \quad (13)$$

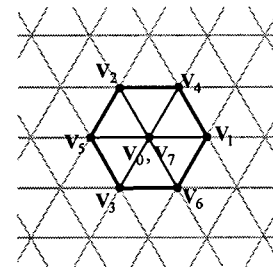
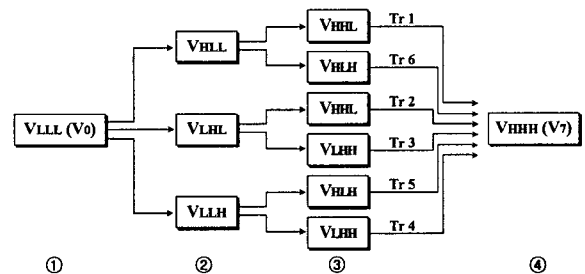
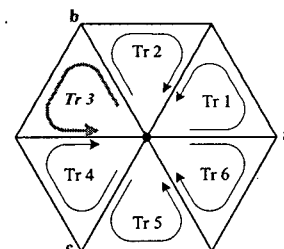


그림 6 멀티레벨 벡터공간에서의 작은 육각형
Fig. 6 Small hexagon in Multi-level vector space



(a) 블록 다이어그램
(a) Block diagram



(b) 작은 육각형 내의 6개의 삼각형
(b) 6-triangle in small hexagon

그림 7 벡터 천이의 블록다이어그램
Fig. 7 Block diagram of vector transition

그림 8은 제안된 변조법의 구현을 위한 프로세서의 실행 순서를 나타내며, 좌표변환을 이용하여 신속한 공간벡터 변조기법을 구현한 기존 방법[8]에서의 실행시간을 비교하고 있다. 마이크로프로세서에서의 실제 실행시간은 디바이스의 특성에 따라 다르지만 각 항목의 계산에 필요한 명령의 일반적인 개수를 함께 명시하였다. NTV의 식별과 그에 따른 듀티비의 계산에 소요되는 시간이 없으므로 하드웨어적으로 신속한 변조가 가능하다.

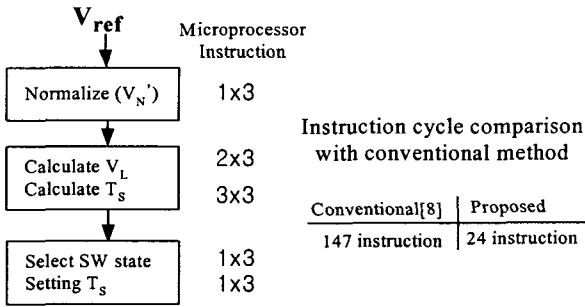


그림 8 제안한 방법의 변조 순서 및 명령 사이클
Fig. 8 Modulation sequence and instruction cycle for the proposed method

4. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 및 실험을 위하여 3-셀 구조를 갖는 H-브리

지형 인버터의 셀전압을 각 3:2:1로 하여 출력 레벨수를 13 레벨까지 확장하도록 설계되었으며, 저 레벨에서 고 레벨까지 제안한 변조법의 특성을 확인하였다. 시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK를 이용하였으며 실험장치는 H-브리 지 13레벨 인버터의 1KW급 소용량으로 구성하였다.

그림 9는 제안된 방법을 이용한 H-브리 지형 13레벨 인버터의 다양한 변조지수에 따른 극전압, 선간전압 및 상전압의 시뮬레이션 결과를 나타내며 출력주파수는 60Hz, 변조주파수는 2KHz로 하였다. 변조지수의 변화에 따라 각각 13, 11, 7 및 5 레벨에 해당하는 출력에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 10은 변조지수의 변화에 따라 극전압의 레벨수와 13차 고조파까지의 상전압 THD를 비교하고 있다. 전반적으로 양호한 THD 특성을 보이며 특히 M=0.5이상의 7레벨 이상의 영역에서는 약 1% 내외의 THD값이 유지되고 있다.

그림 11은 산업현장에서 가장 많이 사용되는 것으로 알려진 위상차를 갖는 삼각변조파를 이용한 MLSPWM과 제안한 PWM 방법을 비교하고 있으며 변조주파수 및 출력레벨을 유사한 조건에서 비교하였다[6,9]. 그림에서 제안된 PWM 방법은 MLSPWM보다 낮은 진폭을 가지고 기준전압을 추종하고 있음을 알 수 있다. 이는 제안한 방법에서는 공간벡터 변조와 유사한 방법으로 인접한 3개의 전압벡터가 이용하는 반면 MLSPWM에서는 인접 전압벡터를 효과적으로 활용하지 못하기 때문으로 판단된다[6].

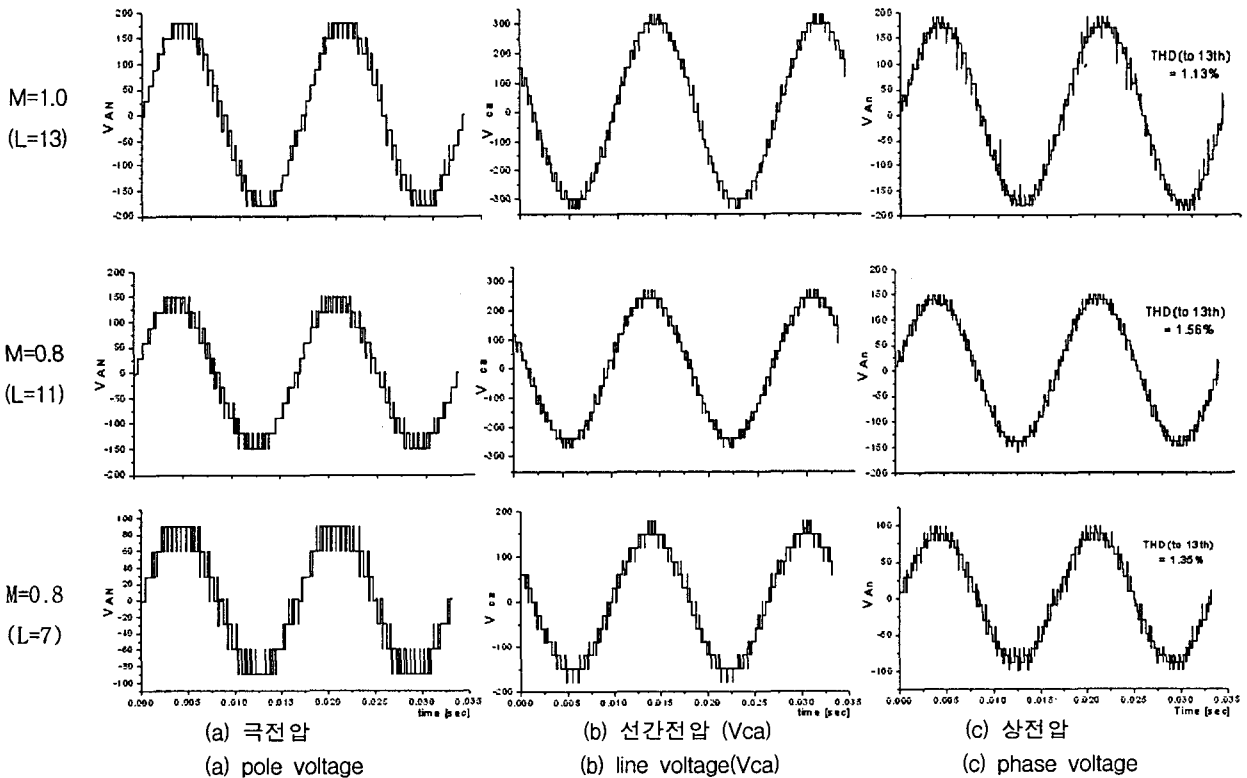


그림 9 제안된 변조법의 시뮬레이션 결과(PWM), $T_{cyc} = 500\mu s$ (2KHz)
Fig. 9 Simulation results with proposed method(PWM), $T_{cyc} = 500\mu s$ (2KHz)

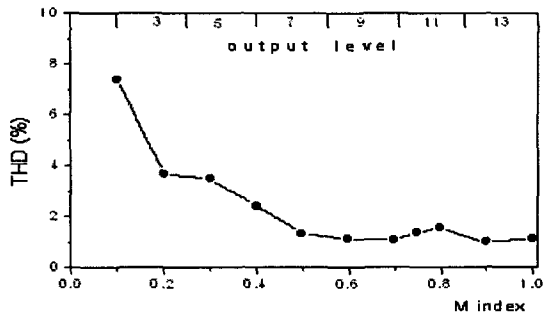
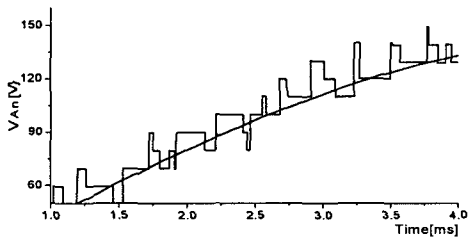
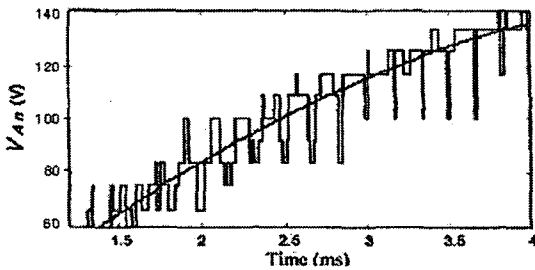


그림 10 변조지수에 대한 출력레벨 및 상전압 THD (%)

Fig. 10 Output level and phase volt. THD with M index



(a) 제안한 방법 (Fc=3KHz, 11 레벨)
(a) proposed method (M=3KHz, 11 level)



(b) MLSPWM (Fc=600Hz, 셀수=5, 11 레벨)
(b) MLSPWM (Fc=600Hz, Nc=5, 11 level)

그림 11 제안한 방법과 MLSPWM의 상전압 비교
Fig. 11 Comparison with proposed method and MLSPWM

그림 12 및 표1은 실험장치의 사진과 블록다이어그램 및 주요 구성품을 나타낸다. 실험장치는 1개의 주제어기 보드와 각 3개의 상제어기 및 인버터 보드, 그리고 입력 변압기와 정류회로 등으로 구성된다. 각 상제어기는 하나의 프로세서와 인버터보드의 12개 스위치를 구동하기 위한 게이트 드라이브 회로를 가지며 스위칭 펄스를 생성한다. 주제어기에서는 각 상의 기준전압에 따라 극전압 구현에 필요한 V_L 및 T_s 값을 CAN 통신을 통해 상제어기로 전송하고 인터럽트를 발생시킨다. CAN 통신의 표준데이터 프레임의 8바이트 중에서 각 상마다 2바이트씩 할당하여 6바이트를 송신하며 수신한 상제어기는 정해진 듀티시간 동안 V_L 및 V_H 를 출력한다.

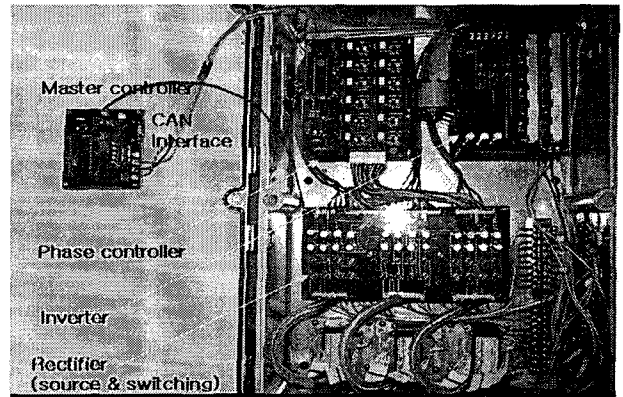


그림 12 실험장치 사진
Fig. 12 Experiment apparatus

표 1 주요 구성품 사양
Table 1 Main items spec

Processor	dsPIC30F4013	microchip
Gate driver	TLP250	toshiba
IGBT switch	SGH20N60RUF0	fairchild
Cell source	Cell1:DC96V, Cell2:DC64V, Cell3:DC32V	
Output	AC ~ 235V, 3 ϕ (~13 level)	
Mod. Freq.	2KHz (T _{cyc} =500us)	
Motor	3 ϕ induction motor, 1HP (효성중공업)	

그림 13은 제안한 변조기법으로 1HP 삼상 유도전동기를 무부하로 구동할 때의 a상의 선간전압, 상전압 및 상전압 THD 분석결과를 나타낸 실험결과로서 넓은 변조범위에 걸쳐 전반적으로 시뮬레이션 결과와 유사하게 나타난다. 고레벨 영역에서는 약 600Hz 부근을 제외하고는 낮은 THD 성분을 가지며 극전압 5레벨에 해당하는 변조지수 0.5이하에서는 저차의 고조파가 증가함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 NTV의 식별과정 없이 신속하게 공간벡터 PWM 변조를 구현할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 변조법은 변조주파수에 따라 결정되는 주기 동안 1회의 극전압 스텝을 이용하여 상전압 기준값과 평균적으로 동일한 값을 출력하는 방법으로서 마이크로프로세서에서 신속한 구현이 가능하며 하드웨어에서의 구현시간을 단축할 수 있다. 제안한 변조법의 검증은 위하여 H-브리지 13레벨 인버터의 다양한 변조주기와 출력레벨에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행하고 기존의 방법인 MLSPWM과 비교한 결과 멀티레벨 인버터의 변조에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 수중운동체 기술 특화연구센터의 지원으로 수행됨.

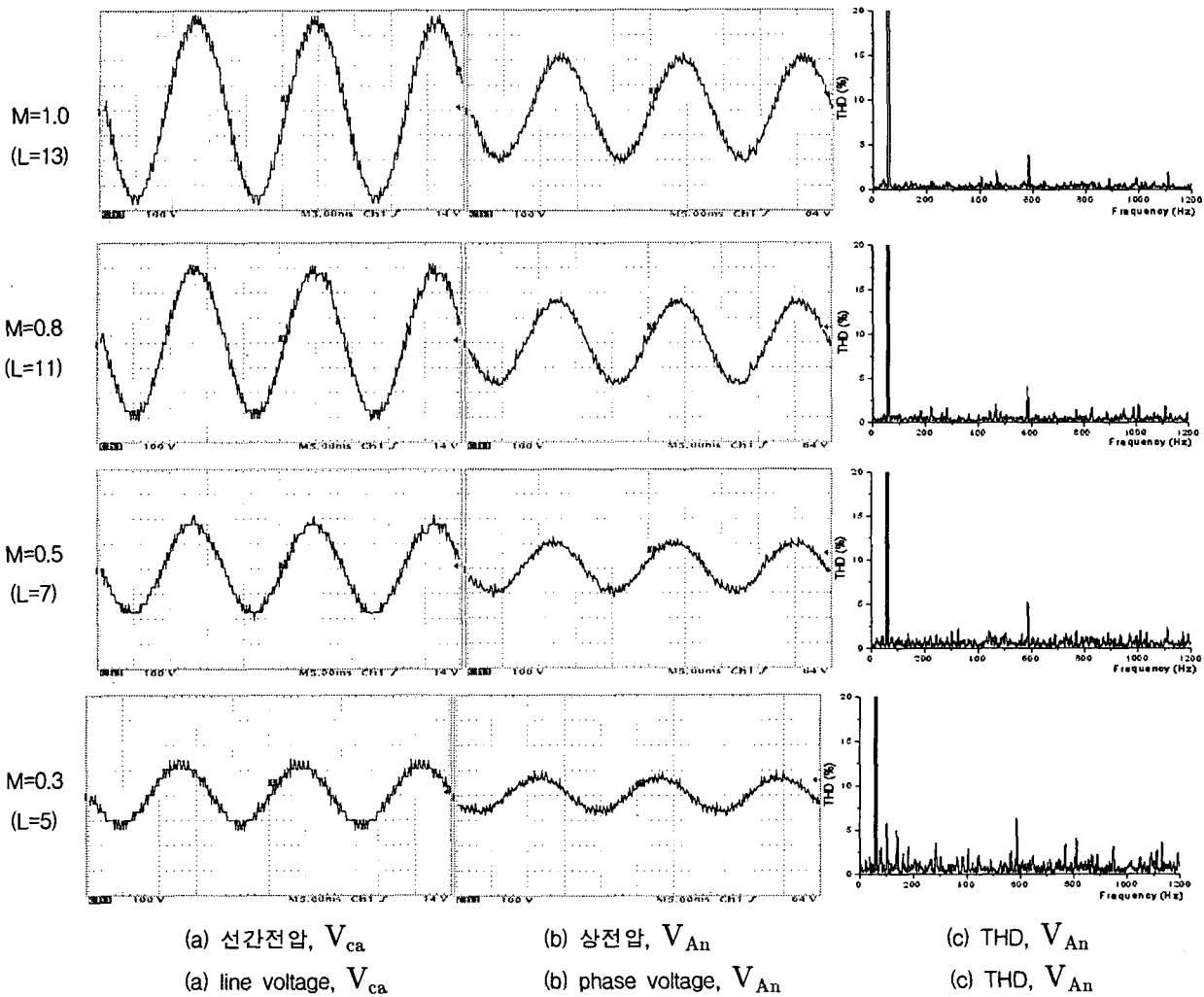


그림 13 실험 결과
Fig. 13 Experimental results

참 고 문 헌

[1] José Rodriguez and Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topology, Controls and Applications", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 49, No. 4, pp.724-738, August 2002.

[2] 박성준의 6인, "공통암을 이용한 새로운 다중레벨 PWM 인버터", 대한전기학회 논문지, 제54B권, 4호, pp. 195-200, 2005. 4.

[3] 김태훈의 3인, "고전압 대응량을 위한 새로운 인버터 토폴로지", 대한전기학회 논문지, 제52B권, 2호, pp.80-86, 2003. 2.

[4] 강필순의 2인, "독립형 태양광 발전 시스템을 위한 새로운 19레벨 PWM 인버터" 대한전기학회 논문지, 제 53B권, 7호, pp.452-461, 2004. 7.

[5] 박영민외 4인, "3,300V 1MVA H-브리지 멀티레벨 인버터 개발", 전력전자학회 논문지, 제 8권 제6호, pp.478-487, 2003. 12.

[6] Jose Rodriguez, Luis Moran, Pablo Correa, Cesar Silva, "A Vector control Technique for Medium-Voltage Multilevel Inverters" IEEE Trans. Ind. Applicat, vol. 49, pp.882-888, August 1996.

[7] Keith A. Corzine, "Multilevel Voltage-Source Duty-Cycle Modulation : Analysis and Implementation", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 49, No.5, pp.1009-1016, October 2002

[8] Nikola Celanovic, "Space vector modulation and control of Multilevel inverters", Doctoral thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000

[9] Jose Rodriguez, Luis Moran, Pablo Correa, Jorge Pontt, Cesar Silva, A high-Performance Vector Control of an 11-level inverter, IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol. 50, No.1, pp. 80-85, February 2003.

저 자 소 개



진 선 호(陳 善 昊)

1969년 11월 2일생. 해군사관학교 졸업.
2002년 한국해양대대학원 기관시스템공학석
사. 2006년 동대학원 박사과정 수료.

Tel : 017-684-5158

E-mail : mylit@naver.com



오 진 석(吳 珍 錫)

1960년 3월 21일생. 한국해양대 졸업. 영국
ZODIAC 선박회사 엔지니어. 1989년~1992
년 국방과학연구소 연구원. 1992년~1996년
양산대 전임강사, 조교수, 학과장. 1996년~
현재 한국해양대 전임강사, 조교수, 부교수.
2001년~2002년 영국 CARDIFF대학 교환
교수. 2002년~현재 산학연컨소시엄사업단
장. 2002년~현재 한국마린엔지니어링학회
편집위원. 2002년~현재 한국산학연논문집
편집위원. 2003년~현재 영국 K.O.Tech 연
구원.

Tel : 051-410-4283

Fax : 051-410-4283

E-mail : ojs@hhu.ac.kr