

## 동일한 변압기 용량을 갖는 직렬형 HBML 인버터의 스위칭 신호

이상훈, 박성준\*, 문채주\*\*, 안진우\*\*\*, 권순재\*\*\*\*, 이만형\*\*\*\*\*

부산대학교 메카트로닉스협동과정, 전남대학교 전기공학과\*, 목포대학교 전기공학과\*\*,  
경성대학교 메카트로닉스공학과\*\*\*, 부경대학교 기계공학과\*\*\*\*, 부산대학교 기계공학과\*\*\*\*\*

### Switching signal of Cascaded HBML inverter employing the identical Transformer

S.H. Lee, S-J Park\*, C-J Moon\*\*, J-W Ahn\*\*\*, S-J Kwon\*\*\*\*, M-H Lee

Busan Univ. Chonnam Univ.\* Mokpo Univ\*\*. Kyungsung Univ.\*\*\*Pukyong Univ.\*\*\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, an efficient switching pattern to equalize the size of transformer is proposed for a multi-level inverter employing cascaded transformers. It is based on the prior selected harmonic elimination PWM(SHEPWM) method. Because the maximum magnetic flux imposed on each transformer becomes exactly equal each to each, all transformers can be designed with the same size regardless of their position. Therefore, identical full-bridge inverter units can be utilized, thus improving modularity and manufacturability. The fundamental idea of the proposed switching pattern is illustrated and then analyzed theoretically. The validity of the proposed switching strategy is verified by experimental results.

하지 않고, 가장 적은 수의 소자를 갖고 다중레벨 인버터의 확장이 용이한 장점이 있다. 그러나 변압기를 사용하지 않은 HBML인버터는 H-Bridge 인버터의 수와 동일한 수의 독립된 직류전원이 필요한 단점과 각 독립전원의 합보다 높은 출력전압을 발생할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하여 한 개의 직류전원으로 구동하기 위해서는 H-Bridge 인버터와 승압형 변압기 조합에 의한 다중레벨 인버터로 구성하여야 한다. 또한 변압기와 결합된 HBML 인버터시스템에서는 상이한 변압기 정격으로 인하여 크기가 다른 변압기를 설계하여 사용하여야 하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 단상 인버터에서 출력고조파 성분을 억제하기 위한 한 방법으로 변압기의 조합에 의한 새로운 스위칭 방식으로 동일한 변압기를 사용할 수 있는 다중레벨인버터를 제안한다.

#### 1. 서론

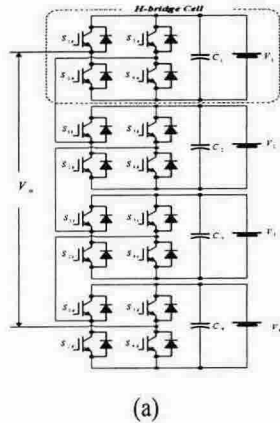
인버터의 출력 파형에는 기본파 성분 외에 고조파 성분이 함유되어 있어 전자유도 장애, 각종 계전기들의 오동작, 전동기 소음 및 토크 맥동 등의 원인이 되고 있다. 최근 이러한 원인들을 제거하기 위해서 인버터 자체에서 발생하는 고조파 성분을 최대한 억제하려는 시도가 이루어지고 있다<sup>[1]-[4]</sup>. 이러한 시도 중에서 대표적인 것이 다중레벨 인버터이다. 다중레벨 인버터는 고조파성분 감소와 높은 전압 정격을 실현할 수 있는 큰 장점을 갖고 있다. 또한 다중레벨 인버터는 전압의 레벨 수가 증가함에 따라 적은 고조파성분과 낮은 동작주파수 및 낮은 dv/dt를 갖는다. 이러한 특성은 기존의 PWM기법 인버터의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 산업체의 적용이 활발해지고 있다.

HBML은 직류링크전압의 불균형의 문제가 발생

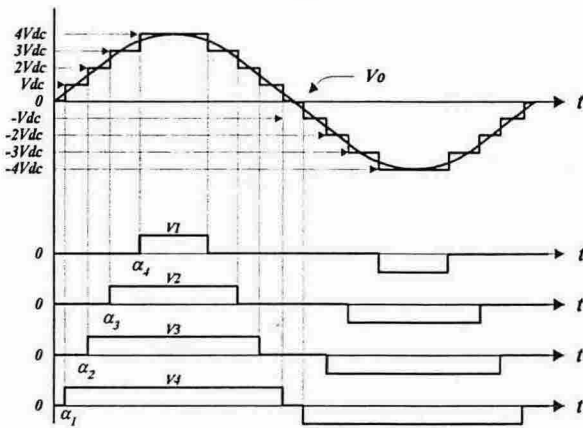
#### 2. 다중전압발생을 위한 새로운 인버터

##### 2.1 HBML 인버터의 구조와 특성

그림 1은 4개의 H-bridge 인버터를 직렬로 연결하여 9레벨을 발생할 수 있는 HBML 타입의 다중레벨인버터의 구성과 이를 이용하여 정현적인 출력전압을 발생하기 위한 동작원리를 나타내고 있다. H-Bridge 다중레벨 인버터에서 최상위레벨을 발생하는 스위칭 함수는 유일하게 존재하나, 그 밑의 레벨들은 다양한 스위칭 함수로 구현할 수 있다. 그러나 변압기를 사용하지 않은 다중레벨 인버터에서는 그림 1(b)와 같이 기본주파수당 한번만을 스위칭을 하는 스텝 펄스파 방식을 사용한 스위칭 함수를 나타내고 있다. 그림 1(b)는 9개의 출력레벨을 갖는 HBML인버터의 각 인버터의 출력전압과 그 때의 최종 출력전압을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 각 인버터에서 출력을 제어할 수 있는 제어요소는 도통각(a)이다. 따라서 출력전압을 제어할 수 있는 요소는 각 인버터의 도통각인  $a_1, a_2, a_3, a_4$  가 된다.



(a)



(b)

그림 1. 9레벨 HBML 인버터의 구성 및 출력전압  
(a) HBML 인버터의 구성, (b) HBML 인버터의 동작원리  
Fig. 1 Configuration of HBML inverter & output voltage  
(a) Configuration of HBML inverter  
(b) Operational principle of HBML inverter

각 인버터의 도통각인  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 에 따라 출력전압의 실효치는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$V_o = V_{DC} \sqrt{\frac{2}{\pi} (8\pi - \alpha_1 - 3\alpha_2 - 5\alpha_3 - 7\alpha_4)} \quad (1)$$

식 (1)에서 원하는 실효치를 만족하는 도통각  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 의 해는 유일하지 않고, 수없이 많이 존재할 수 있다. 따라서 동일한 실효치를 발생하면서 고조파 성분을 줄일 수 있는 도통각 결정이 필요하다.

## 2.2 EA method HBML 인버터의 스위칭 함수

그림 2는 각 인버터의 도통각을 결정하는 스위칭 함수의 발생을 위한 기본 개념도이다. 각 레벨의 전압과 정현적인 지령전압과의 교점은 다음과 같다.

$$\theta_n = \sin^{-1}\left(\frac{n V_{DC}}{V_p}\right) \quad (2)$$

만일 식 (2)를 만족를 만족하는 n 번째의 교점이 존재하면 인버터의 도통각은 아래 수식으로 결정된다.

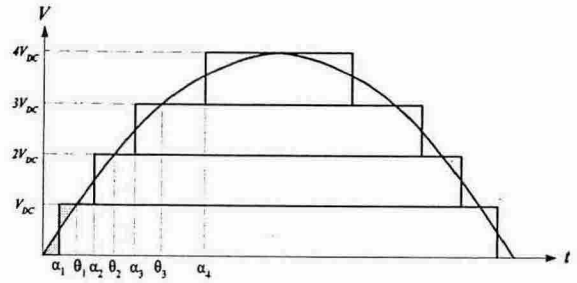


그림 2. THD 저감을 위한 스위칭 함수  
Fig. 2 Switching function for THD reduction

$$\alpha_n = \theta_n - \frac{1}{V_{DC}} \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} (V_p \sin(\theta) - n V_{dc}) d\theta \quad (3)$$

단,  $\theta_0 = 0$

만일 식 (2)가 만족되지 않는다면 n 번째 인버터의 도통각은 아래 수식으로 결정된다.

$$\alpha_n = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2V_{DC}} \int_{\theta_{n-1}}^{\pi - \theta_{n-1}} (V_p \sin(\theta) - n V_{dc}) d\theta \quad (4)$$

## 2.3 변압기와 결합된 HBML 인버터의 스위칭 함수

HBML의 최대 단점은 독립된 dc-link 전원을 공급해야만 한다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 HBML인버터와 변압기를 결합한 방식의 인버터를 구성하였다. 4개의 H-Bridge 인버터와 변압기를 사용한 다중 레벨 PWM 인버터의 구성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 다중레벨 인버터는 4 개의 H-Bridge 모듈을 직류전원과 병렬로 연결하였고, 2차 측은 직렬로 결합된 4 개의 변압기를 가진다. 그러므로 인버터의 출력전압은 직류전원전압과 변압기의 권수비(N)로 표현될 수 있다. 그림 3과 같은 다중레벨 인버터는 변압기를 사용함으로써 기존의 HBML인버터와 달리 전원전압과 출력전압의 분리가 되는 절연형 HBML인버터가 되는 장점이 있다.

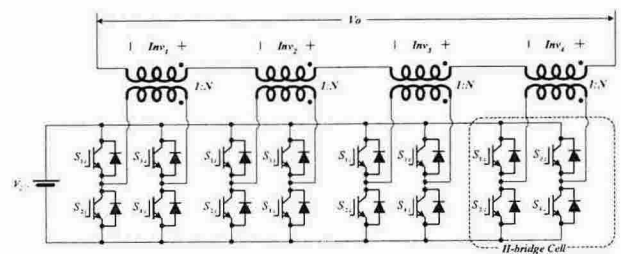


그림 3. 변압기를 이용한 승압형 HBML 인버터의 구성  
Fig. 3 Configuration of boost type HBML inverter by using 4-transformers

스텝 펄스파 방식을 사용한 스위칭 함수를 사용할 경우 각 변압기의 자속 최대치는 아래와 같다.

$$\Phi_n = (\pi - 2\alpha_n) \frac{V_p}{N} \quad (5)$$

이러한 자속의 차이는 곧 변압기의 정격의 차이로 나타난다. 변압기의 정격이 다르게 되면 변압기의 설계시 각각의 변압기를 설계하는 문제점이 있을 뿐만 아니라 각 H-Bridge의 전류정격이 다르게 된다. 특히 H-Bridge의 전류정격이 다름으로서 인버터의 설계 및 제작시 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 변압기의 사이즈를 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식을 제안한다. 제안된 스위칭 방식은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4(a)는 정의 지령전압에 대한 각 변압기에 인가되는 전압을 나타내고 있다. 제안된 방식은 스텝 펄스파 방식을 사용한 스위칭 함수를 기본으로 하여 각 레벨단위에서 각 변압기에 인가되는 전압적분이 같도록 세분화하여 스위칭 함수를 발생시키는 것이다. 위와 같이 변압기 이용률을 동일하게 스위칭 하는 방법은 다양하게 존재할 수 있으나, 그 기본법칙은 동일하게 된다. 우선 각 레벨이 인가되는 주기  $T_n$ 를 다시 인버터의 개수에 해당되는 세분화되는 주기를 나눈다.

$$T_{nm} = \frac{T_n}{N} \quad (6)$$

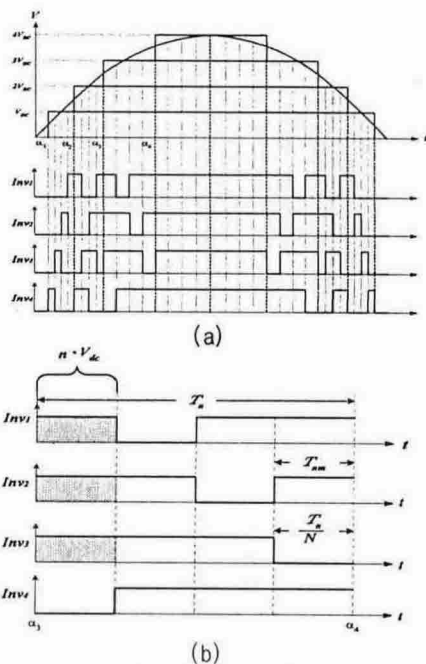


그림 4. 동일한 변압기 정격을 사용한 승압형 HBML 인버터의 스위칭 함수  
Fig. 4 The switching function of boost type HBML inverter using the same rating transformers

각 레벨  $n$ 이 인가되는 주기  $T_n$ 에서 인가되는 전압의 폭이 같기 위해서는  $n$ 개의 정의 전압이 나타나도록 각 레벨에서의 스위칭 구간을 변압기의 수와 같이 나누어 교번적으로 스위칭 하게 하였다. 제안된 방식의 스위칭 방

식을 사용할 경우 각 변압기의 최대 자속은 동일하며 그 값은 다음과 같다.

$$\Phi_n = \frac{2V_p}{N} \quad (7)$$

따라서 기존의 스위칭 방식에 대한 제안된 스위칭 방식에서 각 변압기의 최대 자속비는 다음과 같다.

$$R_n = \frac{\Phi_n}{\Phi_n} = \frac{2}{(\pi - 2\alpha_n)} \quad (8)$$

위 식에서 다중레벨의 수가 무한히 많다면 제일 하단의 변압기의 최대 자속비는  $2/\pi$ 가 된다.

### 3. 실험결과

그림 5는 제작된 시제품 인버터의 사진으로 그 구성은 4개의 H-Bridge 인버터 부, 4개의 직·병렬 변압기 부, 게이트 앰프 부 및 프로세서로 구성된 제어 부로 나눌 수 있다.

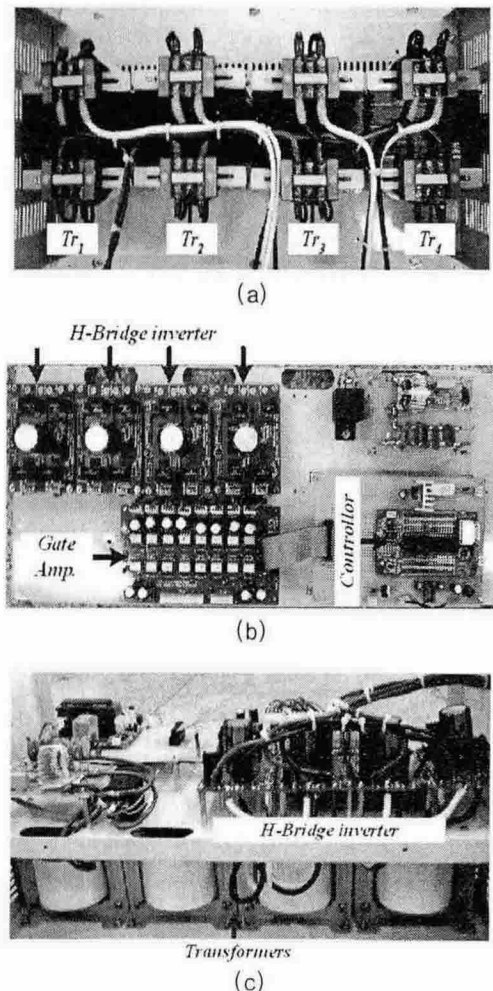


그림 5. 제작된 시제품 인버터의 사진  
Fig. 5 The photograph of prototype inverter

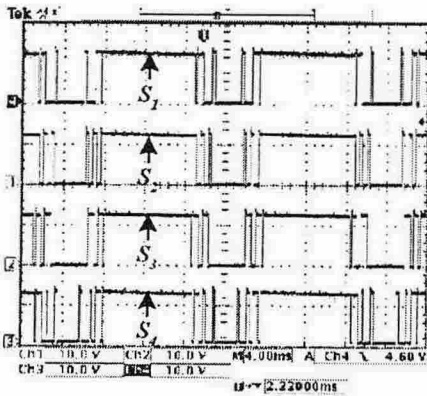


그림 6. 각 인버터의 상 신호 파형  
Fig. 6 Each phase signal of inverter

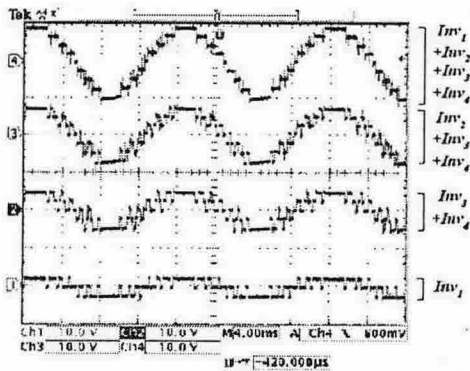


그림 7. 다중레벨용 인버터의 각부 파형  
Fig. 7 Each terminal waveform of multi-level inverter

그림 6은 4개의 변압기를 사용한 9레벨인버터에서 변조지수가 1일 때의 각 인버터의 상 신호를 나타내고 있다. 그림 7은 그림 6에서 나타난 각 인버터의 게이트신호를 인가하였을 때의 직렬로 연결된 다중레벨인버터의 각 부 파형을 나타내고 있다. 제일 밑 파형은 변압기 한 개의 출력 파형이며, 그 위는 2개, 3개 및 4개의 직렬 변압기의 출력 파형이다. 파형에서 알 수 있듯이 출력전압 레벨은 9레벨로 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

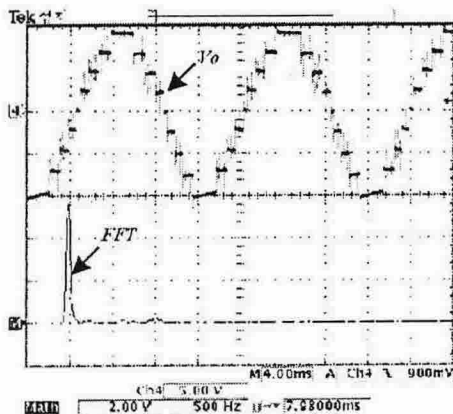


그림 8. 출력전압 고조파분석  
Fig. 8 FFT analysis of the output voltage

그림 8은 그림 8의에서 나타난 다중레벨 인버터의 최종 출력 파형인 제일 위 파형에 대한 고조파 분석결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 제 3 고조파 성분이 다소 존재하나 그 외의 고조파 성분은 거의 나타나지 않았다.

#### 4. 결 론

본 연구는 기존의 HBML인버터가 독립된 직류전원이 필요한 단점과 각 독립전원의 합보다 높은 출력전압을 발생할 수 없는 단점을 극복하기 위하여 변압기와 결합된 HBML 인버터에 관한 것이다. 변압기 조합의 다중레벨 인버터시스템에서 발생하는 변압기 정격의 차이로 인한 변압기의 설계 및 H-Bridge 제작시 문제점을 극복하기 위해 변압기의 정격을 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식을 제안하였다. 또한 제안된 스위칭 방식의 타당성을 이론적으로 해석하였으며, 4개의 변압기를 사용한 시 작품 승압형 9레벨 인버터를 제작하여 실험을 행하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구 센터 육성·지원 사업에 의해 작성되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Abraham I. Pressman, Switching Power Supply Design, McGraw-Hill, Inc., 1991.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: converters, applications, and design, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [3] B. K. Bose, Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications, IEEE Press, 1997.
- [4] 박성준, 강필순, 박노식, 김철우, "변압기 직렬 결합을 이용한 새로운 멀티 레벨 인버터", 전력전자학회 논문지, 제 8 권, 제 1호, PP. 9-16, 2003년 2월.
- [5] 박건태, 김태진, 강대욱, 현동석, "3상 NPC 인버터의 한상 고장시 연속적인 운전을 위한 제어기법", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 6-10, 2003년 11월.
- [6] 김운호, 문현욱, 김수홍, 광영찬, 원충연, "멀티레벨 컨버터를 기반으로하는 고효율 연료 전지 시스템의 전압강하 대책", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 696-700, 2003년 7 월.