

동일한 변압기 사용을 위한 절연형 HBML 인버터

전장건*, 박성준*, 김광현*, 임영철*, 안진우**, 손우연***
 * 전남대학교 ** 경성대학교 *** 동명대학

The study on the HBML inverter using the cascaded transformers

Jang-Gun Jeon*, Sung-Jun Park*, Kwang-Heon Kim*, Young-Cheol Lim*, Jin-Woo Ahn **, Mu-Heon Shon***
 * Chonnam national university ** Kyung sung university *** Dong-Myong College

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.

1. 서 론

인버터의 출력 파형에는 기본파 성분 외에 고조파 성분이 함유되어 있어 전자유도장해, 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^{[1]-[4]}. 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. 본 연구에서는 단상 인버터에서 출력고조파 성분을 억제하기 위한 한 방법으로 변압기의 조합에 의한 새로운 스위칭 방식으로 동일한 변압기를 사용할 수 있는 다중 레벨인버터를 제안한다. 제안된 HBML 시스템의 구조는 다수의 H-Bridge 인버터를 직류전원에 대하여 병렬로 구성하였으며, 그와 동일한 수의 변압기의 2차측을 직렬로 구성하여 인버터와 출력의 절연을 확보하였다. 또한 변압기의 이용률을 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식으로 각 변압기의 용량을 동일하게 하였다. 제안된 전력회로의 타당성을 입증하기 위해 입력 12[V] 직류전원에서 110[V] 교류전원을 발생시킬 수 있는 인버터에 대하여 실험을 행하였다.

2. 다중전압발생을 위한 새로운 인버터

2.1 스텝 펄스파형 HBML 인버터의 구조와 특성

그림 1은 4개의 H-bridge 인버터를 직렬로 연결하여 9레벨을 발생시킬 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 스

위칭 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 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 가 된다.

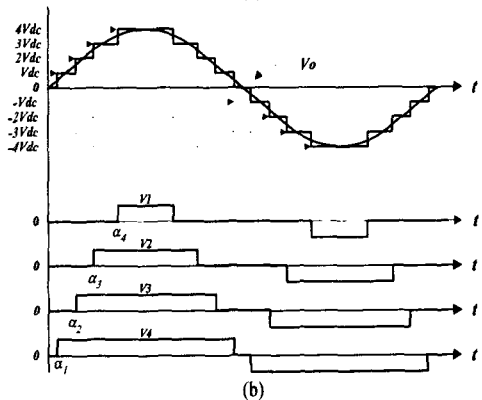
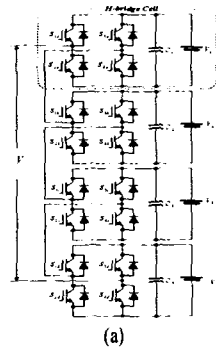


그림 1. 9레벨 HBML 인버터의 구성 및 출력전압
 (a) HBML 인버터의 구성, (b) HBML 인버터의 동작원리
 Fig. 1 Configuration of HBML inverter & output voltage
 (a) Configuration of HBML inverter
 (b) Operational principle of HBML inverter

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. 각 인버터의 도통각인 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 에 따

라 출력전압의 기본파 성분 및 고조파 성분을 분석하기 위해서 푸리에 급수의 전개가 필수적이며, 그림 1(b)의 파형을 보면 최종 출력전압 파형은 기함수임으로 푸리에 급수의 계수는 식(2)와 같다.

$$b_n = \frac{4}{\pi} \left[\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} V_{DC} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} 2V_{DC} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\alpha_3}^{\alpha_4} 3V_{DC} \sin(n\theta) d\theta + \int_{\alpha_4}^{\frac{\pi}{2}} 4V_{DC} \sin(n\theta) d\theta \right] = \frac{4V_{DC}}{n\pi} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3) + \cos(n\alpha_4)] \quad (2)$$

식 (2)의 푸리에 급수에서 기본파 성분의 크기가 크며, 고조파 성분의 크기가 적을 수 있도록 각 인버터의 도통각인 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 를 결정하여야 한다. 식 (2)으로부터 기본파 성분의 실효치 및 고조파성분의 실효치는 식 (3) 및 식 (4)과 같이 주어진다.

$$V_1 = \frac{4V_{DC}}{\sqrt{2}\pi} [\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4)] \quad (3)$$

$$V_h = \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} b_n^2} \quad (4)$$

기본파 성분과 그 외 파형간의 모양의 근접도를 나타내는 수단인 전 고조파왜율(total harmonic distortion)은 다음 식과 같이 정의된다.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{\left(\frac{V_o}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

식 (5)의 정의 식으로부터 THD를 구하면 다음과 같다.

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{8\pi - \alpha_1 - 3\alpha_2 - 5\alpha_3 - 7\alpha_4}{\cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \cos(\alpha_4)} - 1} \quad (6)$$

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.

$$\theta_n = \sin^{-1}\left(\frac{n V_{DC}}{V_p}\right) \quad (7)$$

만일 식 (7)을 만족하는 n 번째의 교점이 존재하면 인버터의 도통각은 아래 수식으로 결정된다.

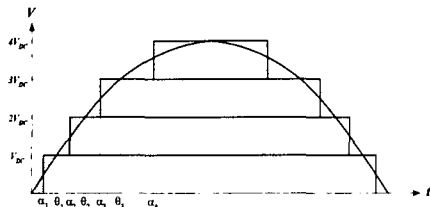


그림 2. THD 저감을 위한 스위칭 함수
Fig. 2 Switching function for THD reduction

$$\alpha_n = \theta_n - \frac{1}{V_{DC}} \int_{\theta_{n-1}}^{\theta_n} (V_p \sin(\theta) - nV_{dc}) d\theta \quad (8)$$

단, $\theta_0 = 0$

만일 식 (7)이 만족하지 않는다면 n 번째 인버터의 도통각은 아래 수식으로 결정된다.

$$\alpha_n = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2V_{DC}} \int_{\theta_{n-1}}^{\pi - \theta_{n-1}} (V_p \sin(\theta) - nV_{dc}) d\theta \quad (9)$$

2.3 변압기와 결합된 HBML 인버터의 스위칭 함수

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, 2차측은 직렬로 결합된 4개의 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 3과 같은 변압기를 사용한 다중레벨 인버터에서 그림 2와 같은 기본주파수당 한번만을 스위칭을 하는 스텝 펄스파 방식을 사용한 스위칭 함수를 사용할 경우 각 변압기 1차측에 인가되는 전압의 폭이 다르게 된다. 따라서 각 변압기 자속의 크기는 각 인버터의 스위칭 함수와 다르게 된다. 만일 정현적인 지령전압의 최대치인 V_p 가 다중레벨의 최대치와 같다면 다음 수식이 성립한다.

$$V_p = NV_{dc} \quad (10)$$

여기서 N은 H-Bridge의 인버터 수를 나타내고 있다.

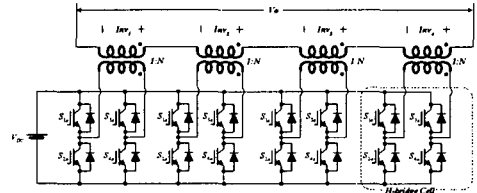


그림 3. 변압기를 이용한 승압형 HBML 인버터의 구성
Fig. 3 Configuration of boost type HBML inverter by using 4-transformers

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

$$\phi_n = (\pi - 2\alpha_n) \frac{V_p}{N} \quad (11)$$

이러한 자속의 차이는 곧 변압기의 정격의 차이로 나타난다. 변압기의 정격이 다르게 되면 변압기의 설계 시 각각의 변압기를 설계하는 문제점이 있을 뿐만 아니라 각 H-Bridge의 전류정격이 다르게 된다. 특히 H-Bridge의 전류정격이 다름으로써 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 나타내었다.

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 발생하는 것이다. 위와 같이 변압기 이용률을 동일하게 스위칭하는 방법은 다양하게 존재할 수 있으나, 그 기본법칙은 동일하게 된다. 우선 각 레벨이 인가되는 주기 T_n 를 다시 인버터의 개수에 해당하는 세분화되는 주기를 나눈다.

$$T_{nm} = \frac{T_n}{N} \quad (12)$$

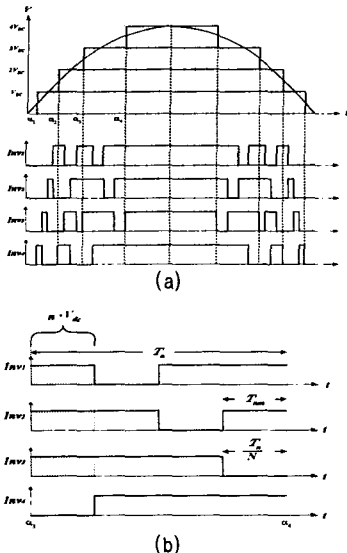
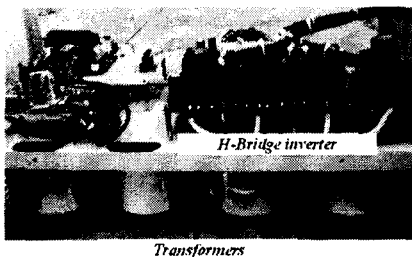


그림 4. 동일한 변압기 정격을 사용한 승압형 HBML 인버터의 스위칭 함수
 Fig. 4 The switching function of boost type HBML inverter using the same rating transformers

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 스위칭하게 하였다. 스위칭 교번에 있어 그 순서는 스위칭 상태의 변화가 적은 형태를 취하게 하였다. 이러한 스위칭 신호는 스위칭 변압기의 이용률을 동일하게 함과 동시에 스위칭 주파수를 적게 할 수 있다. 그림 4(b)는 4개의 H-Bridge를 사용하여 3레벨의 전압을 발생하는 스위칭 함수의 예를 도시한 것이다. $N=4$, $n=3$ 임으로 레벨의 주기를 4개의 세분화 주기로 나누고, 세분화된 주기에서 정의 전압이 인가되는 개수는 3개가 되도록 하고 스위칭 상태변화가 최소가 되도록 하였다.

3. 실험결과

그림 6은 제작된 시작품 인버터의 사진으로 그 구성은 4개의 H-Bridge 인버터 부, 4개의 직·병렬 변압기 부, 게이트 엠프 부 및 프로세서로 구성된 제어 부로 나눌 수 있다.



(c)

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

그림 6은 4개의 변압기를 사용한 9레벨인버터에서 변조주파가 1일 때의 각 인버터의 상 신호를 나타내고 있다. 그림 7은

그림6에서 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 직렬변압기의 출력 파형이다. 파형에서 알 수 있듯이 출력전압레벨은 9레벨로 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

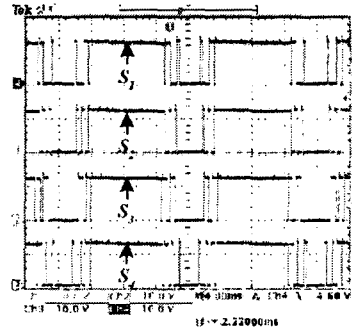


그림 6. 각 인버터의 상 신호 파형
 Fig. 6 Each phase signal of inverter

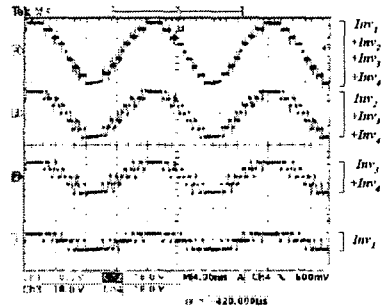


그림 7. 다중레벨용 인버터의 각부 파형
 Fig. 7 Each terminal waveform of multi-level inverter

4. 결 론

본 연구는 기존의 HBML인버터가 독립된 직류전원이 필요한 단점과 각 독립전원의 함보다 높은 출력전압을 발생시킬 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 시작품 승압형 9레벨 인버터를 제작하여 실험을 행하였다.

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.