

공통암을 이용한 태양광 인버터의 스위칭소자 저감

박성준*, 김광현*, 남해곤*, 임영철*, 김철우**, 김종달***

*: 전남대학교 전기공학과 **: 부산대학교 전기공학과 ***: 동명대학 전기공학과

Reducing switching device of PV inverter using the common arm

Sung-Jun Park*, Kwang-Heon Kim*, Nam Hae Kon*, Young-Cheol Lim*, Cheul-U Kim**, Jong-Dal Kim***

*:Chonnam National University **: Busan National University ***: Dong-Myong College

Abstract - 본 연구에서는 H-Bridge 인버터와 변압기 조합에 의한 다중레벨 인버터로 구성함에 있어 스위칭 소자수를 저감하기 위해 각 H-Bridge 인버터의 한 암을 공동으로 사용할 수 있는 전력회로를 제안한다. 또한 각 인버터에 연결된 변압기의 이용률을 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식의 제안으로 각 변압기의 용량을 동일하게 하였다. 제안된 전력회로는 3상용 파워모듈과 전류정격이 3배인 한 암용 전력회로의 결합으로 경제성과 사이즈 면을 동시에 만족시킬 수 있는 전력회로 구성이 가능할 것이다.

1. 서 론

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^{[1][2]}. 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/dt 를 갖는다. 이러한 특성은 기존의 PWM기법 인버터의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 산업체의 적용이 활발해지고 있다. HBML 인버터는 직류링크전압의 불균형의 문제가 발생하지 않고, 다중레벨인버터의 확장이 용이한 장점이 있다. 그러나 변압기를 사용하지 않은 HBML인버터는 H-Bridge 인버터의 수와 동일한 수의 독립된 직류전원이 필요한 단점과 레벨의 기존의 인버터에 비하여 스위칭 소자의 수가 지나치게 많은 단점을 안고 있다. 이러한 단점을 개선하여 한 개의 직류전원으로 구동하기 위해서는 H-Bridge 인버터와 변압기 조합에 의한 다중레벨 인버터로 구성하여야 하며, 스위칭 소자수를 줄일 수 있는 특별한 전력회로를 구성할 필요가 있다. 또한 한 개의 직류전원으로 구동하기 위해 변압기와 결합된 HBML 인버터시스템에서는 상이한 변압기 정격으로 인하여 크기가 다른 변압기를 설계하여 사용하여야하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 단상 인버터에서 출력고조파 성분을 억제하기 위한 한 방법으로 변압기의 조합에 의한 새로운 다중 레벨인버터를 제안한다. 제안된 HBML 시스템의 구조는 기존의 H-Bridge 인버터 구조에서 각 인버터의 한 암을 공동으로 사용할 수 있는 새로운 전력회로에 의해 직류전원에 대하여 병렬로 구성하였으며, 그와 동일한 수의 변압기의 2차측을 직렬로 구성하였다. 또한 변압기의 이용률을 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식으로 각 변압기의 용량을 동일하게 하였다.

다중레벨용 인버터에는 DCML 인버터, CCML 인버터, HBML 인버터 등 다양한 종류의 다중레벨 인버터가 있다. 그 중에서 단상용 다중레벨 인버터로 일반적으로 사용되는 것은 HBML 인버터이다. HBML 인버터는 저압 H-bridge를 직렬로 연결되며 독립된 dc-link를 갖는 단위 cell로 구성된다. 그림 1은 3개의 H-bridge 인버터를 직렬로 연결하여 7레벨을 발생시킬 수 있는 HBML 타입의 다중레벨인버터의 구성과 그 동작원리를 나타내고 있다. 각 H-bridge 인버터는 스위칭함수에 따라 영 전압 및 정, 부의 dc-link 전압을 발생시킬 수 있으며, 최종 출력전압 V_o 는 직렬로 연결된 각 H-bridge 인버터의 출력전압의 합이 된다. 그림에서 나타난 스위칭 함수는 일반적으로 사용되는 스위칭함수에 의해 나타난 각 인버터의 출력과 직렬로 연결된 최종 출력전압이다.

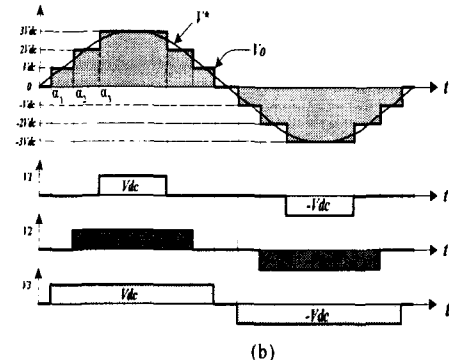
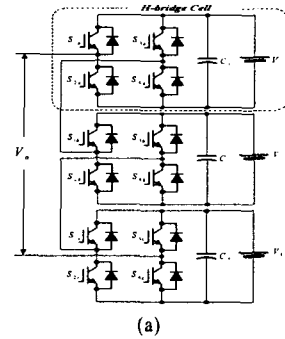


그림 1. 7레벨 HBML 인버터의 구성 및 출력전압
(a) HBML 인버터의 구성
(b) HBML 인버터의 동작원리

Fig. 1 Configuration of HBML inverter & output voltage
(a) Configuration of HBML inverter
(b) Operational principle of HBML inverter

2. 다중전압발생을 위한 새로운 인버터

2.1 전원분리형 HBML 인버터 및 스위칭 함수

H-Bridge 다중레벨 인버터에서 최상위레벨을 발생하는 스위칭 함수는 유일하게 존재하나, 그 밑의 레벨들은 다양한 스위칭 함수로 구현할 수 있다. 그러나 변압기를 사용하지 않는 다중레벨 인버터에서는 그림 1(b)와 같이 기본주파수당 한번만을 스위칭을 하는 스텝 펄스파방식을 사용한 스위칭 함수를 나타내고 있다. 그림 1(b)는 7개의 출력레벨을 갖는 HBML인버터의 각 인버터의 출력전압과 그 때의 최종 출력전압을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 인버터에서 출력을 제어할 수 있는 제어요소는 도통각(α)이다. 따라서 출력전압을 제어할 수 있는 요소는 각 인버터의 도통각인 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 가된다. 이때 최적의 스위칭 함수는 DF 를 최소화 할 수 있는 도통각을 결정하는 것이다. 그러나 DF 를 최소화하기 위해서는 DF 를 미분하여 얻어 되는 도통각을 취해야하나, DF 를 미분할 경우 3차 편미분이 되어 수식적으로 구하기는 매우 어렵다. 따라서 다중레벨 인버터에서 도통각은 기본파 성분을 만족하면서 특정 저차 고조파성분을 만족하도록 결정하는 방식이 대부분이다. 대표적인 방식인 계단 변조기법에서는(step modulation technique) 도통각은 다음 식으로부터 유도된다.

$$\begin{bmatrix} B_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ B_3(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ \vdots \\ B_{x-2}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ B_x(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref}^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{단, } 0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_S \leq \frac{\pi}{2}$$

여기서 V_{ref}^* 는 지령전압의 최대치이며, x 및 B_n 은 다음과 같이 주어진다.

$$x = 2S + 1 \quad (2)$$

$$B_n = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \sum_{k=1}^S [\cos(n\alpha_k)] \quad (3)$$

식 (10)을 per-unit 로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} B_1(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ B_2(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ \vdots \\ B_{x-2}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \\ B_x(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SM_i^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{단, } 0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_S \leq \frac{\pi}{2}$$

여기서 B_n 및 M_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$B_n(p.u.) = \sum_{k=1}^S [\cos(n\alpha_k)] \quad (5)$$

$$M_i = \frac{\pi V_{ref}^*}{4SV_{DC}} \quad (6)$$

위와 같이 특정 저차 고조파성분을 만족하도록 도통각을 결정하는 방식은 특정고조파 성분 이외의 고조파성분 크기 저감은 보정할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 적분개념을 도입한 등가 정현적 스위칭기법 갖는 스텝 펄스파 방식을 제안한다.

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

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

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

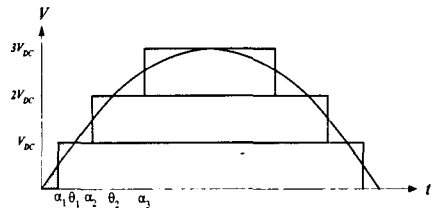


그림 2. THD 저감을 위한 스위칭 함수
Fig. 2. Switching function for THD reduction

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

단, $\theta_0 = 0$

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

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

2.2 전원일체형 HBML 인버터

HBML의 최대 단점은 독립된 dc-link 전원을 공급해야만 한다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 HBML인버터와 변압기를 결합한 방식의 인버터를 구성하였다. 3개의 H-Bridge 인버터와 변압기를 사용한 다중레벨 PWM 인버터의 구성을 그림 3에 나타내었다.

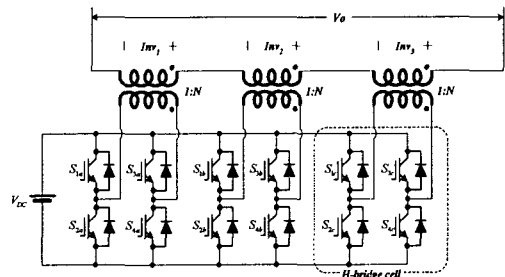


그림 3. 변압기를 이용한 HBML 인버터의 구성
Fig. 3 The configuration of HBML inverter using transformers

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 스위칭수와 다르게 된다. 만일 정현적인 지령전압의 최대치인 V_p 가 다중레벨의 최대치와 같다면 다음 수식이 성립한다.

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

여기서 N 은 H-Bridge의 인버터 수를 나타내고 있다. 스텝 펄스와 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. 스텝 펄스와 방식을 사용한 스위칭 함수를 사용할 경우 각 변압기의 자속 최대치는 차이가 나며, 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 나타나있다. 그림 4는 지령전압에 대한 각 변압기에 인가되는 전압을 나타내고 있다. 제안된 방식은 스텝 펄스와 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 주기를 다시 인버터의 개수에 해당되는 세분화되는 주기를 나눈다.

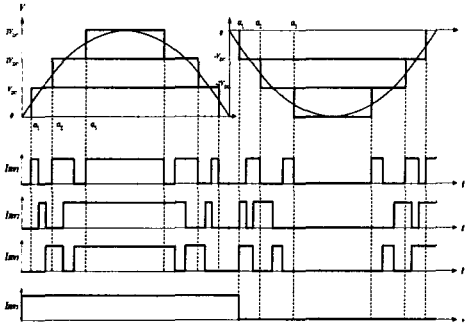


그림 4 동일한 변압기 정격을 사용한 HBML 인버터의 스위칭 함수
Fig. 4 The switching function of HBML inverter using the same rating transformers

각 레벨 n 이 인가되는 주기에서 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 스위칭의 상태가 변화가 적은 형태를 취하게 하였다. 이러한 스위칭 신호는 스위칭 변압기의 이용률을 동일하게 함과 동시에 스위칭 주파수를 적게 할 수 있다.

그림 3과 같이 구성된 변압기 조합형 HDML 인버터는 단독의 직류전원의 사용이 가능하나 스위칭 소자수가 매우 많은 단점이 있다. 비절연형 H-Bridge 타입 다중레

벨 인버터에서는 동일한 극성을 발생하는 스위칭 구조임에도 불구하고 각 H-Bridge 인버터가 다른 전원으로 결합되어 있어 공통 암을 사용할 수가 없다. 그러나 변압기와 결합된 다중레벨 인버터는 각 H-Bridge 인버터는 동일한 전원을 사용하고 각 인버터에서 발생하는 극성이 동일함으로 각 인버터의 두 암 중에서 한 암은 공유할 수 있는 조건이 된다.

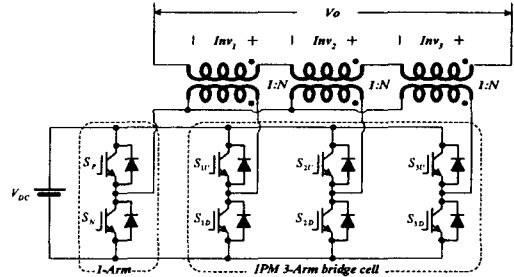


그림 5. 스위칭 소자저감을 위한 제안된 HBML 인버터
Fig. 5 The proposed HBML inverter for reducing switching devices

그림 5는 본 논문에서 제안한 스위칭 수를 저감형 HDML 인버터를 나타내고 있다. 제안된 전력회로는 그림 3과 같은 기존의 H-Bridge 인버터에서 각 인버터의 한 암을 공유함으로써 스위칭 소자 수를 대폭 감소할 수 있다.

3. 결 론

인버터가 공통암을 사용할 수 있는 조건은 동일한 극성을 발생시키며, 동일한 직류전원을 사용해야한다. 그러나 비절연형 HBML인버터의 구조에서는 각 H-Bridge 인버터가 독립된 전원에 연결되어 있어 동일한 출력극성을 발생시키에도 불구하고 공통암을 사용할 수가 없다 본 연구에서는 HBML의 최대 단점인 H-Bridge 수와 동일한 독립된 직류전원 수와 스위칭 소자의 수를 최소화하기 위해 한 개의 직류전원으로 구동하기 위해서는 H-Bridge 인버터와 변압기 조합에 의한 다중레벨 인버터로 구성하였으며, 이로 인하여 각 H-Bridge 인버터는 공통암을 사용할 수 있는 조건을 구비하였다. 변압기를 사용함으로써 입력과 출력측의 절연을 유지하였으며, 승강압이 가능하다. 또한 한 개의 직류전원으로 구동하기 위해 변압기와 결합된 HBML 인버터시스템에서는 상이한 변압기 정격으로 인하여 크기가 다른 변압기를 설계하여 사용하여야하는 단점을 극복하기 위해 변압기의 이용률을 동일하게 할 수 있는 스위칭 방식을 제안으로 각 변압기의 용량을 동일하게 하였다. 제안된 전력회로는 3상용 파워모듈과 전류정격이 3배인 한 암용 전력회로의 결합으로 경제성과 사이즈 면을 동시에 만족시킬 수 있는 전력회로 구성이 가능할 것이다.

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.