

3상 절연형 변압기를 이용한 다중레벨

이화춘, 송성근, 박성준, 김광현
전남대학교 전기공학과

Multi-level Inverter Using 3-Phase isolated Transformers

Hwa-Chun Lee, Sung-Gun Song, Sung-Jun Park, Kwang-Heon Kim
Chonnam National University

Abstract - In this paper, we proposed the isolated multi-level inverter using 3-phase transformers. It makes possible to use a single DC power source due to employing low frequency transformers. In this inverter, the number of transformer could be reduced comparing with an exiting 3-phase multi-level inverter using single phase transformer. Also, using phase angle control method with switching frequency equal to output fundamental frequency, harmonics component of output voltage and switching losses can be reduced. Finally, we made a prototype inverter to clarify the proposed electric circuit and reasonableness of control signal.

1. 서 론

최근 인버터 출력의 고조파 성분을 제거하기 위해 인버터 자체에서 발생하는 고조파 성분을 최대한 억제하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 시도 중에서 대표적인 것이 멀티레벨 인버터이다. 멀티레벨 인버터는 낮은 동작주파수로 고조파성분을 감소시킬 수 있으며, 높은 전압 정격을 실현할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 특성은 기존의 PWM기법 인버터의 단점을 극복할 수 있는 대안으로 산업체의 적용이 활발해지고 있으며, 현재 새로운 변환기 영역으로 인정받고 있다[1],[2]. 본 논문은 단일 직류전원을 사용하는 3상 변압기 타입 멀티레벨 인버터에 관한 것으로 절연 변압기를 3상 저주파 변압기를 이용하여 전압을 적층하는 새로운 방식의 3상 변압기 절연형 H-Bridge 멀티레벨 인버터(IHCML, Isolated H-Bridge Cascade Multi Level)를 제안 한다. 제안된 방식은 3상 변압기를 이용하므로 기존의 단상 변압기를 이용하여 구현하는 방식[3],[4]보다 변압기 수를 감소시킬 수 있어 경제적이며 효율적인 인버터의 구현이 가능하다. 또한 각 H-Bridge 인버터의 스위칭 주파수가 출력 전압 기본파 주파수와 동일하게 스위칭 하면서 저차고조파 성분을 최적으로 제거하기 위해 각 스위치의 스위칭 각을 구간별로 Newton-Rapson법을 사용하여 결정하였으며, 이를 근거로 한 구간별 선형화 방법을 통한 전 영역에 대한 스위칭 각을 구현하였다. 제안된 IHCML은 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 실험실 차원의 실물 제작을 통하여 그 타당성을 검증 하였다.

2. 3상 IHCML 인버터

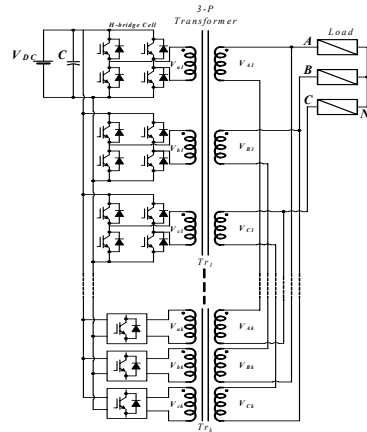
2.1 3상 IHCML 인버터 구조

본 논문에서 제안한 3상 IHCML 인버터의 구조는 그림 1과 같이 단일 직류 전원을 사용하며, 전압 적층을 위해 3상 저주파 변압기를 사용하는 구조로 되어 있다. IHCML 인버터의 변압기 1차 측은 상별로 H-Bridge 인버터에 연결되어 있어 V_{DC} , 0 , $-V_{DC}$ 의 전압 레벨을 갖게 되며, 변압기 2차 측은 전압을 적층하기 위해 각 상별로 직렬 연결되어 있다. 또한 각 상별 변압기 출력은 3상 변압기의 3고조파 성분을 제거하기 위해 결선을 하였다.

2.2 3상 IHCML 인버터 출력

그림 2는 k번째 3상 변압기의 상별 변압기 입력 전압과 A상의 출력 전압을 도식화 한 것으로 변압기 입력 전압은 H-Bridge의 출력에 해당한다. 그림 2에서 볼 수 있듯 H-Bridge의 스위칭 주파수는 기본 주파수와 같으며, b, c상은 a상에 대해 각각 120° 뒤지거나 앞서게 스위칭 하므로 제어할 수 있는 요소는 스위칭 각 α_k 만 있다. k개의 변압기를 사용하는 경우 제어 가능한 스위칭 각은 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 이 있으며 이를 적절히 조절하면 변압기 출력 전압을 제어 할 수 있다[2]. 또한 H-Bridge의 소호 각은 $\pi/2$ 에 대해 대칭이어야 하므로 $\pi - \alpha_1, \pi - \alpha_2, \dots, \pi - \alpha_k$ 가 된다. 스위칭 각의 제어 범위는 $0 \leq \alpha_k \leq \pi/2$ 이나 앞에서 언급한 바와 같이 변압기 입력이 3상평형을 이루지 못하므로 3상 변압기 출력 전압은 a,

b, c상 전압의 조합으로 형성되며, 스위칭 각에 따라 변압기 출력 전압은 모두 세 가지 경우가 있다. 그림 5(a)는 스위칭 각 α_k 의 범위가 $0 \leq \alpha_k \leq \pi/6$, (b)는 $\pi/6 \leq \alpha_k \leq \pi/3$, (c)는 $\pi/3 \leq \alpha_k \leq \pi/2$ 인 경우 각 상의 스위칭 패턴 및 3상 변압기의 출력 전압을 도식한 것으로 이 경우 변압비 T는 모두 1로 가정한 경우이다. 각 경우에 대해 A상의 출력 전압 V_{Ak} 는 대칭이며, 기함수이므로 푸리에 급수 전개를 하면 다음과 같다.



〈그림 1〉 제안된 3상 IHCML 인버터 구조

$$V_{Ak} = \sum_{n=1}^{\infty} b_{nk} \sin(n\theta) \quad (1)$$

위 식에서 상수 b_{nk} 는 스위칭 각에 따라 다음 식 (2)~(4)와 같이 전개된다.

case 1: $0 \leq \alpha_k \leq \pi/6$

$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \left[\frac{2}{3} \int_{\alpha_k}^{\pi/3 - \alpha_k} \sin(n\theta) d\theta + \frac{3}{3} \int_{\pi/3 - \alpha_k}^{\pi/3 + \alpha_k} \sin(n\theta) d\theta + \frac{4}{3} \int_{\pi/3 + \alpha_k}^{\pi/2} \sin(n\theta) d\theta \right]$$

$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \cos(n\alpha_k) \quad (2)$$

case 2: $\pi/6 \leq \alpha_k \leq \pi/3$

$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \left[\frac{1}{3} \int_{\pi/3 - \alpha_k}^{\alpha_k} \sin(n\theta) d\theta + \frac{3}{3} \int_{\alpha_k}^{2\pi/3 - \alpha_k} \sin(n\theta) d\theta + \frac{2}{3} \int_{2\pi/3 - \alpha_k}^{\pi/2} \sin(n\theta) d\theta \right]$$

$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \cos(n\alpha_k) \quad (3)$$

case 3: $\pi/3 \leq \theta_k \leq \pi/2$

$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{\pi} \left[\frac{1}{3} \int_{\alpha_k - \pi/3}^{2\pi/3 - \alpha_k} \sin(n\theta) d\theta + \frac{2}{3} \int_{\alpha_k}^{\pi/2} \sin(n\theta) d\theta \right]$$

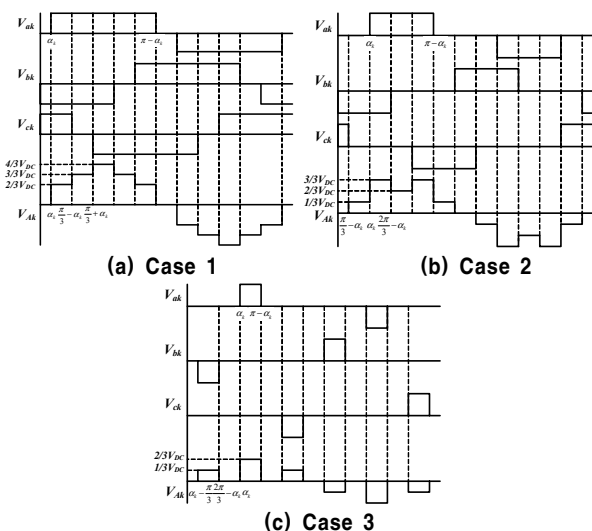
$$b_{nk} = \frac{4V_{DC}}{n\pi} \cos(n\alpha_k) \quad n = 1, 5, 7, 11 \dots l-2, l \text{ 이다.} \quad (4)$$

위의 식에서 확인 할 수 있듯 각 경우에 대한 푸리에 급수 전개 결과가 모두 같으므로 스위칭 각 범위 $0 \leq \alpha_k \leq \pi/2$ 에서 식 (1)의 b_{nk} 가 일정한 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 상의 출력 전압 V_{Ak} 를 표현하면 다음과 같다.

$$V_{Ak} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\theta) - \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} b_n (\sin(n\theta) + 2\sin(n\theta)\cos(\frac{2n\pi}{3})) \quad (5)$$

if, $n = 3, 9, \dots, 3(l-2), 3l$, $V_{Ak} = 0$

if, $n = 1, 5, 7, 11 \dots l-2, l$, $V_{Ak} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\theta)$ 이 되므로 k번째 변압기의 출력 전압 V_{Ak} 는 차수 $n = 1, 5, 7, 11 \dots l-2, l$ 에 대해서만 존재 한다. 이상에서 알 수 있듯이 3상 인버터의 경우 출력 측에 3의 배수 고조파 성분은 출력되지 않는다.



〈그림 2〉 스위칭 각에 따른 변압기 출력 전압 파형

2.3 스위칭 신호발생

IHCML 인버터는 변압기 출력을 각 상별로 직렬연결 하므로 인버터의 출력 전압은 각 변압기의 합으로 표현이 가능하며 앞에서 언급한 바와 같이 각 변압기의 출력 전압은 스위칭 각 범위에서 무관하게 정의 되므로 3상 변압기를 3개 사용한 경우 IHCML 인버터의 출력 전압은 다음 식 (6)과 같다.

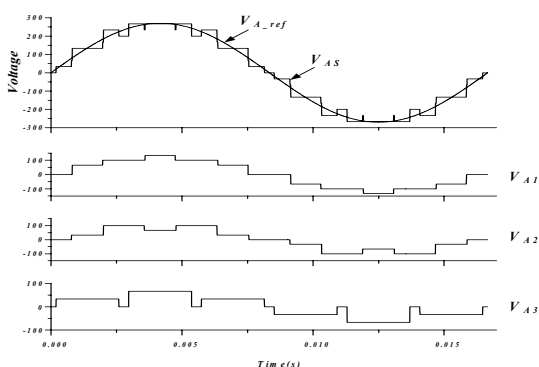
$$V_{AS} = \frac{4V_{DC}}{n\pi} (\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) + \cos(n\alpha_3)) \quad (6)$$

단, $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \pi/2$

위 식에서 알 수 있듯 인버터 출력 전압 제어는 스위칭 각 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 을 제어함으로써 가능하므로 기본파 성분을 만족 하면서 특정 고조파 성분을 제거하도록 스위칭 각을 제어할 수 있다[2]. 위 식에서 3개의 스위칭 각 제어가 가능하므로 기본파 성분 제어와 동시에 2개의 고조파 성분을 제거 가능하며, 앞에서 언급한 바와 같이 3의 배수 고조파 성분은 출력에 나타나지 않으므로 본 논문에서는 5, 7차 고조파 성분을 제거 하였다. 기본파 성분을 만족하며 5, 7차 고조파 성분을 제거하기 위한 식은 다음과 같다.

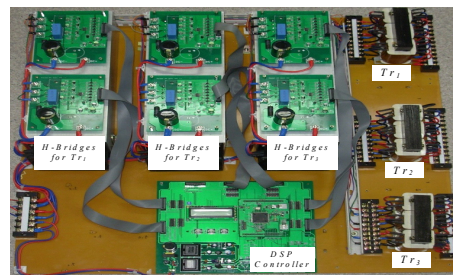
$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1) + \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) &= \frac{3m\pi}{4} \\ \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) &= 0 \\ \cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) &= 0 \quad (m \text{ 은 변조비}) \end{aligned} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과



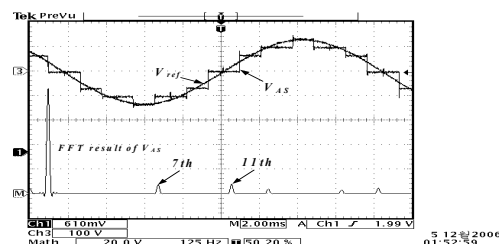
〈그림 3〉 변조비 0.9인 경우 시뮬레이션 결과

그림 3 변조비 0.9, 직류전압 100V, 변압비 1로 가정된 경우 A 상의 출력 V_{AS} 와 각 변압기의 A 상 출력을 Matlab를 이용하여 시뮬레이션 한 결과로 첫 번째 변압기의 스위칭 각 α_1 각은 17.5°, 소호각은 162.5°로 그림 3(b)에 해당하며, 두 번째 변압기의 스위칭 각 α_2 는 43.1°, 소호각은 136.9°로 그림 3(c), 세 번째 변압기의 스위칭 각 α_3 는 64.1°, 소호각은 115.9°로 그림 3(d)의 경우에 해당한다. 그림에서 V_{A1}, V_{A2}, V_{A3} 는 각 변압기별 A 상 출력 전압을 V_{AS} 는 변압기를 직렬 연결한 인버터 A 상 출력을 나타내며, V_{A-ref} 는 지령 전압을 나타낸다.



〈그림 4〉 3상 IHCML 인버터 프로토타입

제안된 3상 IHCML 인버터의 타당성을 검증하기 위해 그림 4와 같은 3상 변압기 3개와 IPM 6개를 이용하여 실험실 차원의 실제 IHCML 인버터를 제작하여 실험을 수행 하였다. 제어는 DSP 2812를 이용하여 수행하였으며 다수의 스위치 제어를 위해 레지회로를 이용하였다.



〈그림 5〉 인버터 지령 전압, 출력 전압 및 FFT 분석 파형

그림 5는 각각 변조비를 1.0, 0.4, 0.2로 한 경우의 인버터 지령전압과 출력 전압파형 및 출력 전압의 FFT 수행 결과파형이다. 변조비 1.0에서는 3개의 H-bridge 인버터의 제어각을 사용함으로써 기본파 성분의 크기 및 5, 7고조파 성분을 제거할 수 있으며, 변조비가 0.4인 경우는 3개의 H-bridge 인버터 중 두 개의 제어각만 사용함으로써 기본파 성분 크기 제어와 5고조파 성분을 제거할 수 있으며, 변조비 0.2는 한 개의 제어각만 사용함으로써 기본파 성분 크기 제어만할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 저주파 3상 변압기를 이용한 3상 변압기 절연형 H-Bridge 멀티레벨 인버터를 제안 하였으며, 시뮬레이션 및 프로토타입을 제작하여 제안한 방식의 타당성을 검토 하였다. 또한 Newton-Rapson법을 근거로 한 구간별 선형화 방법을 통한 전 영역에 대한 스위칭 각을 구현하였다. 이와 같은 제안된 멀티레벨 인버터의 구성 및 스위칭 방식의 장점은 동일 변압기 이용이 가능하므로 효율적이고 경제적이며, 3상 변압기를 이용함으로써 변압기 이용을 증대 및 부피를 감소하며, 절연 변압기를 사용함으로써 단일 직류 전원을 사용할 수 있다. 또한 스위칭 주파수가 작으므로 대용량에 적합하며 스위칭 과도손이 거의 없고, 전압 적응방식이므로 고전압 형성 시 EMI 문제가 적다.

또한, 제안된 방식의 단일 직류전원을 사용하는 변압기 절연형 H-Bridge 멀티레벨 인버터는 출력전원 주파수와 동일한 스위칭 주파수로 동작하는 기존의 스위칭 방식을 그대로 사용 가능함을 확인 하였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.
이 연구의 참여한 연구자는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았다.

[참 고 문 헌]

- [1] K.A. Corzine, M.W. Wielebski, F.Z. Peng and J. Wang, "Control of Cascaded Multi-Level Inverters", Electric Machines and Drives Conference, Vol. 3, pp.1549~1555, 2003.
- [2] Tolbert, L.M., Fang Zheng Peng and Habetler, T.G., "Multilevel converters for large electric drives" Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 35, pp.36~44, 1999.
- [3] 송성근, 이상훈, 남해곤, 박성준, 이만형, "위상 변위제어기법을 이용한 저주파 다중레벨 스위칭 방식", 전력전자학회 논문지, 제11권 6호, pp.520~528, 2006
- [4] 박성준, 송성근, 우토, 이상훈, 조수억, 문채주, 김철우, "공통암을 이용한 새로운 다중레벨 PWM 인버터", 전력전자학회 논문지, 제10권 1호, pp.95~101, 2005.