

벡터제어방식에 의한 공통암 멀티레벨 인버터

송두영, 송성근, 김동옥, 박성준, 김광현, 임영철
전남대학교

Vector Control Method For Common-Arm multi-level Inverter

Doo-Young Song, Sung-geun Song, Dong-Ok Kim, Sung-Jun Park, Kwang-Heon Kim,
Young-Cheol Lim
Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 3상 저주파 변압기를 이용한 절연형 멀티레벨 인버터를 위한 새로운 공간 벡터 제어 방식을 제안한다. 제안된 제어 방식은 기존의 미리 계산된 표를 이용한 방식이 아닌 완전히 프로그래밍에 의한 방식으로 구현 시간은 기존 방식에 비해 늘이지 않으며, 확장성이 용의하다는 장점이 있다. 제안된 제어 방식을 공통암을 이용한 3상 IHCML 인버터에 적용하였으며, Matlab을 이용한 시뮬레이션 및 실험실 차원의 인버터 제작을 통하여 제안한 방식의 타당성을 검증 하였다.

Key Words : H-Bridge, Multi-level inverter, CHML, 3-Phase transformer, Space Vector.

1. 서 론

최근 저 비용, 고용량의 인버터에 대한 요구가 증대 되고 있으며 고용량을 위해서는 특히 고압의 출력 전압이 요구를 만족하기 위해 여러 개의 낮은 직류 전압과 H-Bridge를 이용하여 출력을 직렬 연결한 방식인 Cascade Multi Level(CML) 회로가 많이 개발 되고 있다^{[1]-[6]}.

CML 인버터의 경우 한 개 H-Bridge를 이용한 기존의 PWM인버터 보다 저압 스위칭이 가능하므로 고압 스위칭(dV/dt)에 의한 기기의 오작동이나 손상이 많이 개선되며, 스위칭 주파수가 낮아도 원하는 전압의 품질을 얻을 수 있으므로 스위칭 손실을 저감 할 수 있어 효율 적이다. 또한 스위치의 정격 전압이 낮아지므로 저가의 구현이 가능하다^[4].

본 논문에서는 기존의 미리 계산된 테이블이 아닌 새로운 완전한 프로그래밍 스위칭 방식을 제안한다. 제안된 방식을 공통암을 이용한 3상 IHCML 인버터에 적용하여 절연방식의 인버터에도 적용 가능함을 확인 하였으며 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 실험실 차원의 실험 제작을 통하여 그 타당성을 검증 하였다.^[1]

2. 3상 IHCML 인버터

2.1 3상 공통암을 이용한 IHCML 인버터 구조

CML인버터에서 그림 1과 같은 3상 저주파 변압기를 이용하여 출력단을 절연시키고 출력단 전압을 적층하므로 단일 직류 전원을 사용할 수 있으며, 각 H-Bridge의 극성이 같게 스위칭

을 하면 극성을 결정하는 한 암을 공통으로 사용하여 인버터의 소자수를 감소시킨다.

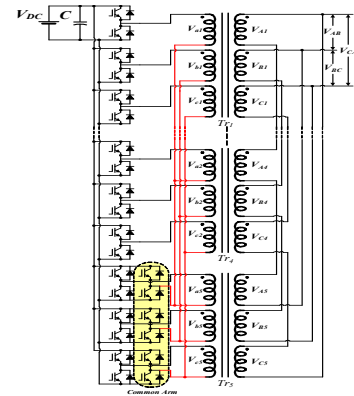


그림 1 공통암을 이용한 삼상 IHCML 인버터 구조
Fig. 1 Structure of 3-Phase IHCML inverter using common-arm

그림에서 볼 수 있듯 각 상의 극성을 결정하는 암을 공통으로 사용하여 그렇지 않은 경우에 비해 24개의 스위치 소자를 줄였으며, 만일 k 개의 변압기를 이용하는 경우 줄일 수 있는 소자 수(p)는 다음 식과 같다.

$$p = 6(k - 1) \quad (1)$$

3. 제안된 벡터 제어방식

3.1 공간 벡터 변조 및 정규화

공간 벡터 변조(Space Vector Modulation, SVM) 방식을 이용해 3상을 2차원의 공간벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$v(t) = v_\alpha + j \cdot v_\beta \quad (2)$$

위 식에서 v_α , v_β 는 복소평면 α , β 축의 $v(t)$ 에 대한 요소로 다음과 같이 정의된다.

$$v_\alpha = \frac{1}{3}(2 \cdot v_{aS}(t) - v_{bS}(t) - v_{cS}(t)) \quad (3)$$

$$v_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{bS}(t) + v_{cS}(t)) \quad (4)$$

계산된 v_α , v_β 의 값을 정수화 하기 위해 식(3), (4)에 각각 3과 $\sqrt{3}$ 을 곱한 정규화된 v'_α , v'_β 는 항상 정수 값을 가지게 된다.

$$v'(t) = v'_\alpha + j \cdot v'_\beta \quad (5)$$

3.2 최근접 벡터의 계산

기준 벡터에 대해 오차가 가장 적은 벡터를 출력하여야 하므로 임의의 기준벡터 v'_{ref} 에 대해 오차가 가장 적은 최근접 벡터는 v_{scl} 이 되며 v'_{ref} 가 그림의 육각형 내부에 있을 때는 모두 IHCML 인버터에서는 v_{scl} 벡터를 출력하게 된다.

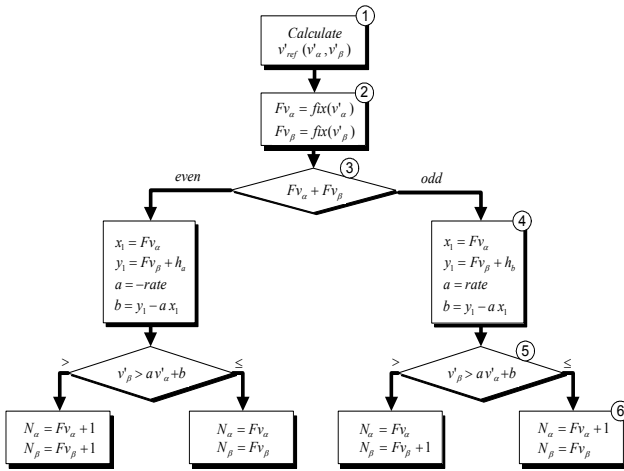


그림 2 근접 벡터 선택을 위한 순서도
Fig. 2 Flowchart to calculate the highest proximity vector

기준 벡터 v'_{ref} 가 육각형의 경계보다 위에 있으면 IHCML 인버터의 출력 벡터 v_{scl} 는 v_h 가 되고 그렇지 않으면 출력 벡터는 v_l 이 되며^[3], 계산 과정은 다음과 같다.

- 1) 지령치 기준 벡터(v'_{ref})를 정규화
- 2) 정규화된 벡터의 정수화

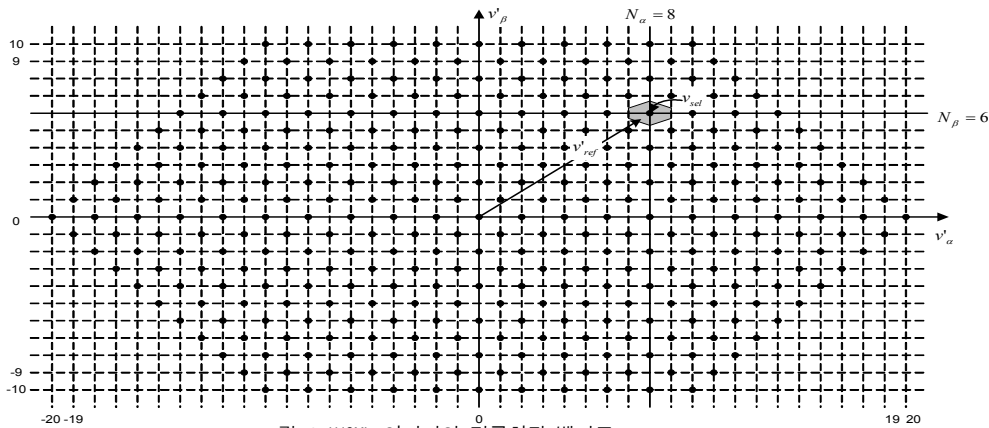


그림 4 IHCML 인버터의 정규화된 벡터도
Fig. 4 Normalized vectors generated by the IHCML inverter

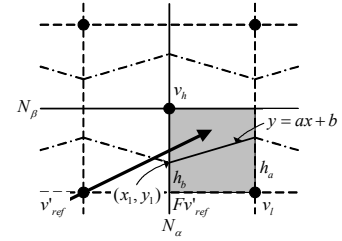


그림 3 최근접 벡터의 외각 함수 결정
Fig. 3 Calculate the outer covering function of the highest proximity vector

- 3) 벡터 영역 결정
- 4) 영역별 경계함수 계산
- 5) 경계 조건 적용
- 6) 출력벡터 결정

3.3 스위칭 신호 결정

IHCML 인버터의 각 상에 대한 기준신호 v_{aS} , v_{bS} , v_{cS} 는 앞 절에서 v_{scl} 벡터를 다음 식에 의해 α' , β' 축을 a , b , c 축으로 변환하여 계산한다.

$$v_{aS} = \text{round}\left(\frac{N_\alpha}{3}\right)$$

$$v_{bS} = -\frac{1}{2}(N_\alpha - N_\beta) + v_{aS}$$

$$v_{cS} = -\frac{1}{2}(N_\alpha + N_\beta) + v_{aS} \quad (6)$$

영역별 경계함수 계산에서 상 신호를 발생하는 경우 레벨 범위를 초과하는 경우가 발생할 경우 초과 되는 상의 신호에서 레벨 초과분을 모든 상에 대해 빼줌으로 해결한다. IHCML 인버터의 각 H-Bridge 출력 신호는 식 (6)에서 계산된 신호 벡터로부터 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\text{for } (i=0; i < \text{level}; i++)$$

$$\text{if } |v_{aS}| > i \quad \text{then } v_{h(i+1)} = 1$$

$$\text{else } v_{h(i+1)} = 0$$

$$\text{if } v_{aS} < 0 \quad \text{then}$$

$$v_{h(i+1)} = -1 \times v_{h(i+1)} \quad (7)$$

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 5은 변조비(m)을 0.99로 한 경우의 A상 기준 신호와 IHCML 인버터의 출력 및 각 H-Bridge의 출력을 나타내고 있다. 또한 각 H-Bridge의 스위칭 주파수는 기본 주파수 성분과 같으며, 극성이 모두 같은 것을 확인 할 수 있으며 이는 H-Bridge의 암중 극성을 결정하는 한 암을 공통으로 사용할 수 있음을 의미한다.

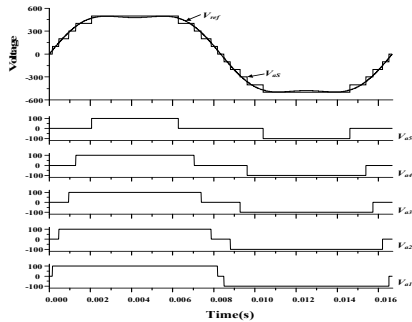
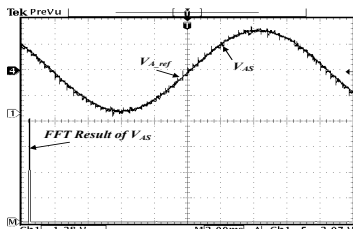
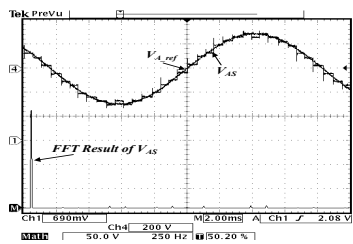


그림 5 변조비 0.99인 경우 지령 전압 및 각 H-Bridge 출력
Fig. 5 Reference voltage and H-Bridge output at modulation 0.99

그림 6(a)는 변조비 0.99인 경우의 기본과 성분의 지령 전압과 3상 출력 변압기를 직렬 연결한 IHCML 인버터의 출력 전압으로 전압의 THD는 3.16%, DF는 0.22% 이며, 그림 6(b)는 변조비 0.5인 경우로 THD는 6.35%, DF는 0.4%로 전압의 품질이 매우 우수함을 확인 하였다.



(a) modulation 0.99



(b) modulation 0.5

그림 6 변조비별 인버터 지령전압, 출력 전압 및 FFT 결과
Fig. 6 Waveform of inverter reference voltage, output voltage and FFT

5. 결론

본 논문에서는 3상 저주파 변압기를 이용한 절연형 멀티레벨 인버터를 위한 프로그래밍에 의한 방식의 새로운 공간 벡터 제어 방식을 제안하였으며, 시뮬레이션 및 프로토타입을 제작하여 제안한 방식의 타당성을 검토하였다. 제안된 제어 방식은 기존의 계산된 표를 이용하는 방식에 비해 사용되는 메모리는

없고, 계산량은 기본 방식과 거의 같아 매우 효율 적이며, 확장성이 용의하다는 장점이 있다. 이와 같은 인버터는 3상 절연형 변압기를 이용함으로 비절연형 멀티레벨 인버터와 달리 단일 직류 전원을 사용할 수 있는 장점이 있으며, 기존의 단상 변압기를 이용한 3상 멀티레벨 인버터에 비하여 변압기의 수를 줄일 수 있어 경제적이다. 또한 각 H-Bridge의 스위칭 주파수는 출력 기본주파수와 거의 동일하므로 스위칭 손실이 작아 효율적이며, 저전압 스위칭 및 스위칭수가 작으므로 고주파 노이즈가 작아 안정적이므로 대용량의 인버터 구현에 적합하다. 실제 제작을 통해 인버터를 구현해 본 결과 변조비 0.99에서 출력전압의 THD는 3.16%, DF는 0.22%였으며, 변조비 0.5에서는 THD는 6.35%, DF는 0.4%로 전압의 품질이 매우 우수함을 확인 하였다.

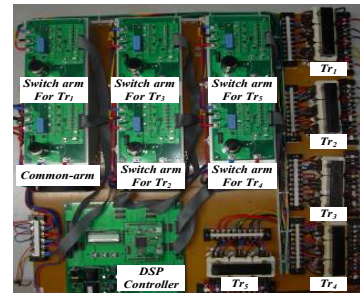


그림 7 3상 IHCML 인버터 프로토타입
Fig. 7 Prototype 3-Phase IHCML inverter

참고 문헌

- [1] D. Rendusara, E. Cengelci, P. Enjeti, V. R. Stefanovic, and W. Gray, "Analysis of common mode voltage-'Neutral shift' in medium voltage PWM adjustable speed drive (MV-ASD) systems" IEEE PESC 99, Vol. 2, 1999, pp. 935-940.
- [2] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 35, 1999, pp. 36-44
- [3] José Rodríguez, Luis Morán, Jorge Pontt Pablo Correa, Cesar Silva, "A High-Performance Vector Control of an 11-Level Inverter" IEEE Trans On Industrial Electronics, Vol 50, 2003, pp. 80-85.
- [4] P. Hammond, "A new approach to enhance power quality for medium voltage AC drives" IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 33, 1997, pp. 202-208
- [5] Fu-San Shyu and Yen-Shin Lai, "Virtual Stage Pulse-Width Modulation Technique for Multilevel Inverter/Converter", IEEE Trans. Power Elect., Vol. 17, 2002, pp 332-341
- [6] Timothy. S "THE POWER ELECTRONICS HANDBOOK Industrial Electronics Series", Chap 6