

최근접 벡터 제어기법을 이용한 Cascade 3상 IHCML 인버터

송성근, 박성준, 남해곤
전남대학교 전기공학과

Cascade 3-Phase IHCML Inverter using maximal distension vector control

Sung-Geun Song, Sung-Jun Park, Hae-Kon Nam
Chonnam National University

Abstract - In this paper, the cascade 3-phase IHCML inverter using two low frequency transformers is proposed. The proposed inverter is constructed by connecting a 3-phase IHCML inverter. the cascade 3-phase IHCML inverter has several advantages. One advantage is that only one input power source is required because of using transformers to isolate. Another advantage is that the switching frequency of the high power switches is almost fundamental frequency of reference and the other the switching frequency of the low power switches is higher. It can be known that cascade 3 phase IHCML inverter has the excellent efficiency and the outstanding electric quality. lastly, we tested the 5kW cascade 3-phase IHCML inverter to clarify the proposed electric circuit and reasonableness of control signal for the proposed inverter.

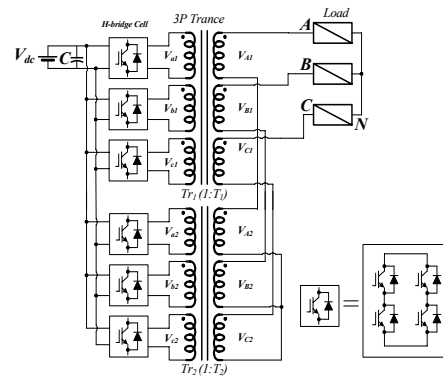
1. 서 론

최근 연료전지나 태양광과 같은 신·재생에너지 발전을 계기로 낮은 전압을 발생하는 전원소스를 이용한 인버터의 요구의 증가로 높은 승압비를 가지는 인버터가 요구되고 있으나 기존의 2레벨 인버터의 경우 승압효과는 거의 없으므로 부가적인 요소 없이 직접 사용하기는 부적합하다. 이와 같은 2레벨 인버터의 단점을 극복하며 신·재생 에너지 발전의 요구 및 산업용 대용량 인버터에 적합한 구조가 다중레벨 인버터이다. 다중레벨 인버터는 여러 개의 스위치 소자를 이용하여 낮은 전압을 적층하여 출력 전압을 형성 하는 방식으로 낮은 전압을 스위칭 함으로 dv/dt 에 의한 영향이 작아지며 EMC의 발생 역시 줄어든다. 또한 전압적층을 하기위해 스위치들이 직렬로 연결되므로 각 스위치의 전압정격이 낮아지게 되며, 이는 다시 말해 고전압 형성하기 위해 전압 정격이 낮은 스위치를 사용할 수 있으므로 구현이 용이하다. 또한 다중레벨 인버터의 각 스위치는 적절한 스위칭 패턴을 이용하면 스위칭 주파수를 낮출 수 있으며 이로 인해 스위칭 손실이 감소하게 된다^{[1]-[4]}. 이와 같은 많은 장점 때문에 다중레벨 인버터에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 그러나 다중레벨 인버터의 최대 단점은 많은 스위칭 소자가 필요하다는 점과 이로 인해 제어가 복잡하다는 점으로 최근 이를 극복하려는 노력이 많이 진행되고 있다^{[2],[5]}.

본 논문에서는 다중레벨 인버터의 단점을 보완하고 대용량 태양광 발전 시스템에 적합한 새로운 방식의 cascade 3상 IHCML 인버터를 제안한다. 제안한 방식은 변압비가 상이한 2개의 3상 변압기를 사용하는 방식으로 사용되는 스위칭 소자가 작다는 장점을 가지고 있으며, 기존의 테이블 방식의 스위칭 방식^[3]이 아닌 완전한 프로그램 방식의 최근접 벡터 제어 기법을 사용하여 간단한 수학적 계산에 의해 스위치가 제어되므로 연산 속도가 빠르며, 프로그램을 모듈화 하여 반복 사용할 수 있어 프로그램 메모리의 증가가 거의 없다는 장점이 있다. 제안된 방식을 Matlab을 이용한 시뮬레이션과 실험실 차원의 5kW 실물 제작을 통하여 그 타당성 및 성능을 검증 하였다.

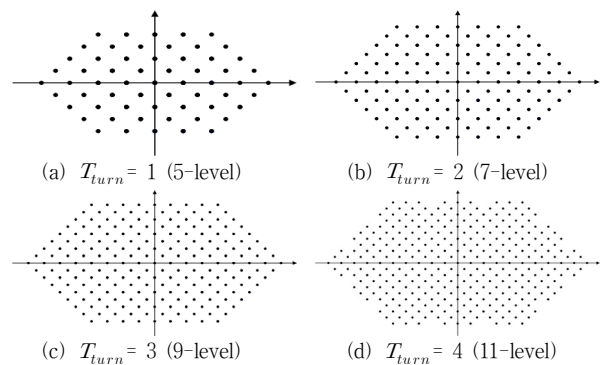
2. Cascade 3상 IHCML 인버터

제안된 Cascade 3상 IHCML 인버터의 구조는 다음 그림 1에 나타난 바와 같이 2개의 3상 저주파 절연 변압기를 사용하며 두 변압기의 변압비는 다르게 구성되어 있다. 이와 같은 구조는 변압비가 다른 2개의 3상 IHCML 인버터를 직렬로 연결한 형태로 생각 할 수 있으며, 적절한 스위칭 방식을 사용하여 각 3상 IHCML 인버터의 스위칭 주파수를 다르게 동작시키면 인버터의 효율 및 전력 품질을 향상 시킬 수 있다. 즉, 많은 전력을 담당하는 고효율 IHCML 인버터의 경우 저속 스위칭을 통하여 스위치 과도손을 감소시키며 스위칭 주파수가 낮으므로 GTO와 같은 저속의 대용량 소자의 사용이 가능하므로 효율적이며 경제적이다. 또한 작은 전력을 담당하는 저출력 IHCML 인버터의 경우 고속 스위칭을 통하여 출력 전력의 품질을 향상 시킬 수 있다.

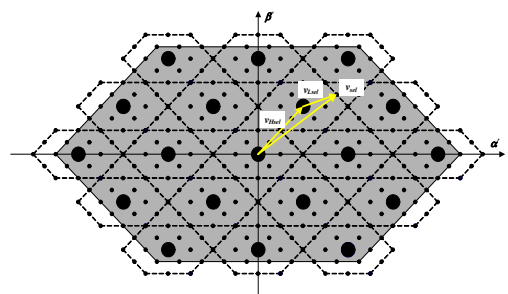


<그림 1> Cascade 3상 IHCML 인버터 구조

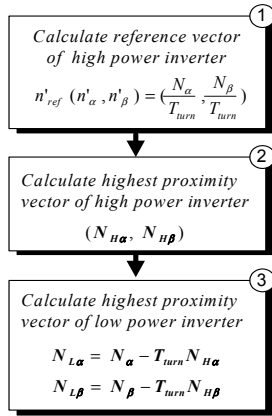
Cascade 3상 IHCML 인버터의 경우 2개의 변압기만을 사용하며, 두 변압기의 변압비가 상이하므로 두 변압기의 변압비에 따라 출력 가능한 레벨 및 벡터의 수가 다르게 된다. 그림 2는 변압비에 따른 출력 가능한 레벨 및 벡터를 나타내고 있으며 변압비를 T_{turn} 이라고 하는 경우 T_{turn} 이 1에서 4까지 증가한 경우 출력 가능한 레벨은 5에서 11까지 변화한다. 변압비 T_{turn} 이 5이상 이 되면 출력 벡터가 불연속적으로 분포되므로 T_{turn} 의 최대값은 4가 된다. 그림 3은 T_{turn} 가 4인 경우에 대해 각 IHCML 인버터별 출력 벡터를 보다 자세히 도식한 것으로 그림에서 큰 점은 변압비가 큰 IHCML 인버터의 출력 벡터를 나타내고 있다.



<그림 2> Cascade 3상 IHCML의 정규화된 벡터도



<그림 3> Cascade 3상 IHCML 출력 가능 벡터 및 최근접 벡터 선택



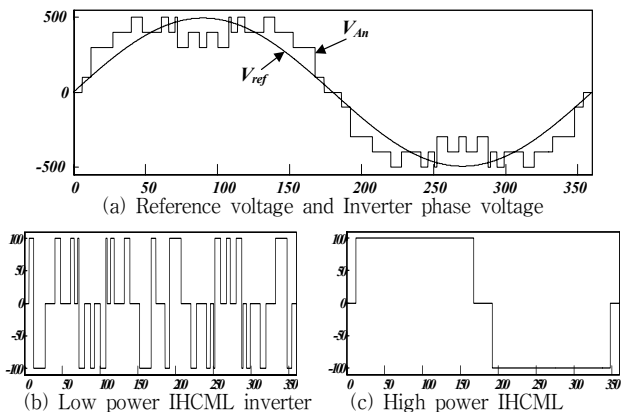
<그림 4> 인버터별 벡터 결정 순서도

그림에서 볼 수 있듯 11-레벨에 해당하는 외가의 벡터들은 불연속적인 부분이 발생하게 되고 이로 인해 출력 전력의 품질이 나빠지게 되므로 실제 연속적으로 제어 가능한 레벨은 10-레벨이 된다. 이와 같은 Cascade 3상 IHCML 인버터는 2개의 3상 IHCML 인버터를 직렬 연결한 것으로 각 IHCML 인버터가 3-레벨의 인버터로 각각 19개의 벡터를 출력 가능하다. 그러므로 Cascade 3상 IHCML 인버터의 출력 가능 벡터는 모두 361개가 된다. 그러나 실제 제어에서는 불연속인 최외가의 11-레벨 벡터를 사용하지 않으며, 벡터 간 중첩이 있으므로 실제 출력 가능한 정규화된 벡터의 개수는 모두 271개 이다.

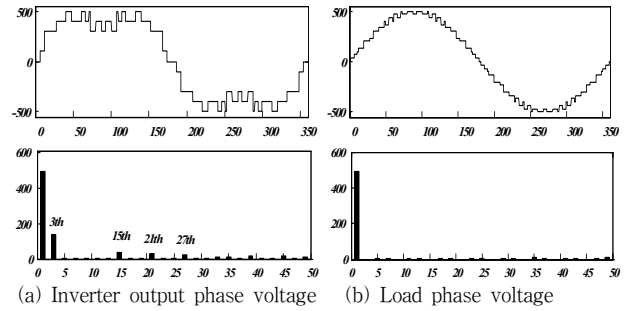
Cascade 3상 IHCML 인버터의 경우는 변압비가 다른 2개의 3상 IHCML 인버터의 직렬 연결된 구조로 각 인버터별 출력 벡터를 결정해 주어야 한다. 앞의 그림 3에 나타난 바와 같이 최근접 벡터 v_{sel} 을 출력하기 위해서는 우선 변압비가 큰(고출력) IHCML 인버터에서 v_{Hsel} 벡터를 출력하고 이를 기준으로 다시 변압비가 작은(저출력) IHCML 인버터에서 v_{Lsel} 을 출력하면 된다. 이와 같이 두 개의 IHCML 인버터의 출력 벡터를 결정하는 방법은 최근접 벡터 제어법을 이용하여 최근접 벡터 v_{sel} 을 계산하고 이와 같은 과정을 다시 한번 반복하여 v_{Hsel} 벡터를 계산한다. 이렇게 계산된 v_{sel} , v_{Hsel} 를 이용하여 최종으로 v_{Lsel} 을 계산한다. 이를 순서도 형태로 표현하면 그림 4와 같다.

3. 시뮬레이션

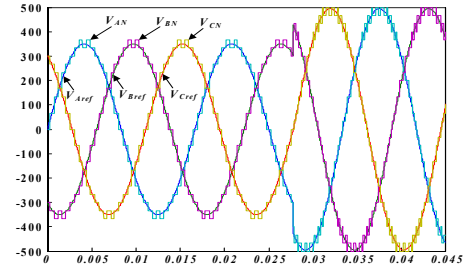
제안된 Cascade 3상 IHCML 인버터에 그림 3과 같은 최근접 벡터 변조기법을 사용하였으며, 제안된 방식의 타당성 검증에 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5(a)는 변조비를 0.99로 한 경우 전압 지령치 및 인버터 출력 전압을 나타내고 있으며, (b)는 저출력 IHCML 인버터의 T_1 에 입력되는 전압, (c)는 고출력 IHCML 인버터의 T_2 에 입력되는 전압을 각각 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯 고출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수는 지령치의 기본과 주파수와 같으며, 저출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수는 그렇지 않다. 이는 많은 부하를 담당하는 고출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수가 낮으므로 전체적인 인버터의 스위칭에 의한 과도손은 낮고, 작은 부하를 담당하는 저출력 IHCML 인버터의 경우 스위칭 주파수가 높으므로 전체 인버터의 출력전압 품질은 좋아짐을 반증한다.



<그림 5> 변조비 0.99인 경우의 시뮬레이션 결과



<그림 6> 변조비 0.99인 경우 출력 상전압 및 부하 상전압 결과



<그림 7> 변조비를 0.7에서 0.99로 변경 시 부하의 상별 전압 파형

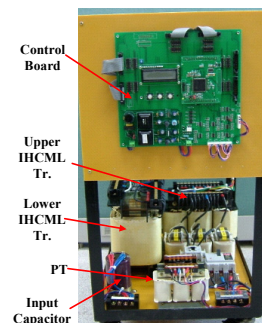
그림 6(a)는 변조비를 0.99로 한 경우의 인버터 출력측 상전압 V_{An} 의 출력 파형 및 주파수 분석 결과를 나타내고 있으며, (b)는 Y-결선된 평형 3상 부하의 상전압 V_{AN} 을 나타내고 있다. 인버터 출력 상전압의 주파수 분석 결과로 THD가 32.17%로 매우 나쁘게 나타난다. 이는 그림에서 확인할 수 있듯 3의 배수 고조파 성분이 많이 포함되어 있기 때문이며, 3상 시스템에서는 3의 배수 고조파 성분은 출력 측에 영향을 주지 않으므로 인버터 출력 전압의 THD가 나쁘더라도 부하 측에는 영향을 주지 않는다. 이는 그림 6(b)의 부하 상전압의 주파수 분석 결과에서 확인 되면 부하 상전압의 THD를 계산하면 4.0%로 매우 우수하다.

그림 7은 제안된 인버터의 스텝 지령치 변화에 따른 과동 응답특성을 보기 위한 것으로 임의의 시점에 변조비를 0.7에서 0.99로 변경시킨 경우의 시뮬레이션 결과 파형으로 각 상별 전압 지령치와 부하 상전압을 나타낸 것으로 과도상태에서도 모든 상이 대칭을 이루고 있다.

4. 실험 결과

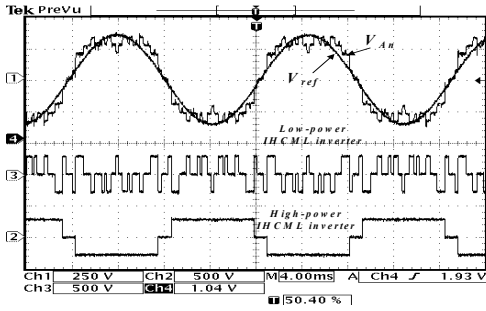
그림 8은 5kW 시제품 Cascade 3상 IHCML 인버터의 구조 및 사양을 나타내고 있으며, 제어는 TI사의 고속 DSP인 TMS320F2812를 이용하여 구현하였으며 출력단에 2개의 5kW, 2kW 절연 변압기를 사용하였다.

그림 9는 변조비를 0.99로 한 경우의 기준전압과 인버터의 A상 출력 전압 및 각 IHCML 인버터의 스위칭 파형을 나타내고 있다. 그림에서 고출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수는 기본과 성분과 같고 저출력 IHCML 인버터의 경우 그렇지 않다는 것이 확인된다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 전류 용량이 큰 스위칭의 스위칭 과도손을 줄여 전체 시스템의 효율을 증가 시키기며, 전류 용량이 작은 스위치의 스위칭 주파수를 높여 전체 시스템의 출력 특성을 향상 시킬 수 있음을 뜻한다. 또한 인버터 출력 상전압의 왜곡율이 크다는 것을 확인할 수 있으며 실제 주파수 분석 결과 인버터 출력 상전압의 THD가 32.7%로 매우 나쁘게 나왔으며 이는 그림 10(a)에서 확인할 수 있듯 3의 배수 고조파 성분이 많이 포함되어 있기 때문이다.

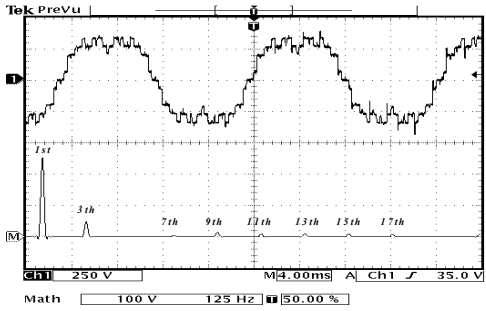


항 목	사 양
입력 전압	450[V]
출력 전압	380[Vrms, L-L]
출력 전류	8[Arms]
용 량	5kVA
변압기	220[V]:220[V], 5kVA 220[V]:55[V], 2kVA
리액터	2mH

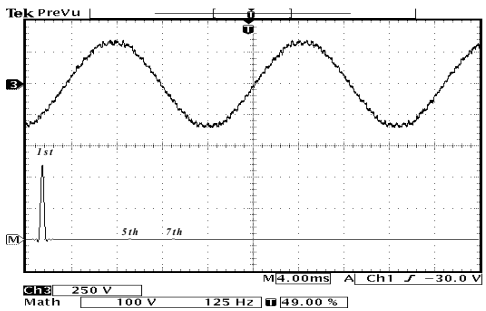
<그림 8> Cascade 3상 IHCML 인버터 사진



<그림 9> 변조비 0.99인 경우 인버터 출력파형

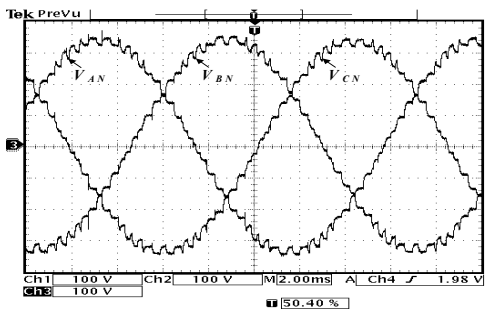


(a) Inverter output phase voltage

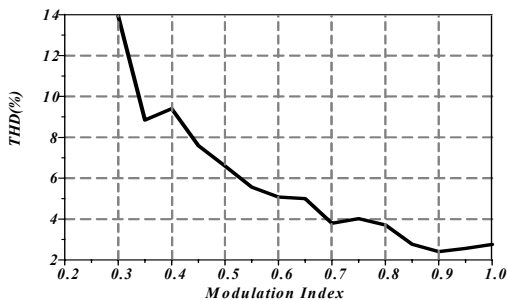


(b) Load phase voltage

<그림 10> 변조비 0.99인 경우 출력파형 및 주파수 분석 결과



<그림 11> 변조비 0.99인 경우 3상 부하 상전압



<그림 12> 부하 상전압 THD 결과

그림 10(a)는 인버터 출력 상전압의 전압 파형 및 주파수 분석 결과로 그림에서 확인할 수 있듯 3고조파 성분이 기본파를 제외하고는 가장 크고 3의 배수 고조파 성분인 9, 15차 고조파 성분이 나타난다. 그림 10(b)는 3상 평형 부하를 Y-결선한 경우의 부하 상전압 및 주파수 분석 결과로 3상 시스템에서는 3의 배수 고조파 성분이 출력측에 나타나지 않으므로 인버터 출력 상전압에 포함되어 있는 3의 배수 고조파 성분은 나타나지 않으며 THD 분석 결과 2.7%로 전력 품질이 매우 우수함을 확인할 수 있다.

그림 11은 변조비를 0.99로 한 경우 각 상별 부하 출력 전압 파형으로 각 상의 전압이 120° 위상각을 가지며 정확히 대칭을 이루고 있음을 확인할 수 있다.

그림 12는 변조비를 0.5에서 1.0까지 변화한 경우 부하 상전압의 THD를 나타내고 있으며 결과에서 변조비 0.6 이상에서는 출력 전압의 THD가 5%이하로 상용 인버터에서 요구하는 5%이하의 왜형율을 만족하고 있으며, 변조비 0.9에서 왜형율이 2.41%로 가장 작게 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 대용량 태양광 발전 설비에 적합한 Cascade 3상 IHCML 인버터를 제안하였다. 제안한 구조는 2개의 IHCML 인버터를 직렬 연결한 구조로 사용되는 스위칭 소자가 작다는 장점을 가지고 있으며, 완전한 프로그램 방식의 최근접 벡터제어 기법을 사용하여 간단한 수학적 계산에 의해 스위치가 제어 되므로 연산 속도가 빠르며, 프로그램을 모듈화 하여 반복 사용할 수 있어 프로그램 메모리의 증가가 거의 없다는 장점이 있다. 또한 제안된 스위칭 방식에 의해 고휘출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수는 지명치의 기본과 주파수와 같으며, 저출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수는 고속으로 된다. 이는 많은 부하를 담당하는 고휘출력 IHCML 인버터의 스위칭 주파수가 낮으므로 전체적인 인버터의 스위칭에 의한 과도손은 낮고 대용량 저속 스위칭 소자인 GTO를 사용할 수 있다. 또한 작은 부하를 담당하는 저출력 IHCML 인버터의 경우 스위칭 주파수가 높으므로 전체 인버터의 출력전압 품질은 좋아지게 된다. 제안된 인버터를 실험실 차원의 5kW 시제품을 제작하여 실험해본 결과 변조비 0.99에서 상전압의 THD가 2.7%로 매우 전력 품질이 우수함을 확인할 수 있으며 변조 0.7 이상에서 4% 이하로 상용 인버터에 적용이 가능함을 확인 하였다.

제안된 cascade 3상 IHCML 인버터는 저속 대용량 소자를 사용할 수 있어 제작단가를 낮출 수 있으며 저속 스위칭으로 고효율이므로 대전력 변환기의 사용에 적합하며, 고속 소용량 소자를 고속 스위칭 하여 출력 전압의 품질을 개선 시키므로 고품질의 전력변환기를 구현할 수 있다. 그러므로 제안된 cascade 3상 IHCML 인버터는 대용량 태양광 발전에 적합할 것으로 사료 된다.

감사의 글

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

[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] Feel-soon Kang, Su Eog Cho, Sung-Jun Park, Cheul-U Kim, Toshifumi Ise, "A new control scheme of a cascaded transformer type multilevel PWM inverter for a residential photovoltaic power conditioning system", Solar Energy 78, 2005, pp. 727 - 738