

IT기반 지능형 다기능 변압기용 cascade형 PWM 컨버터의 특성 연구

안 준 선*

A Study On the Characteristics of Cascaded PWM Converter for IUT

Joonseon Ahn*

요 약

본 논문은 스마트 그리드의 핵심 설비중 하나인 반도체 지능형 변압기의 시스템 구성과 이에 필요한 PWM 컨버터의 PWM 생성 방식에 관한 논문으로, 반도체 지능형 변압기의 경우 입력단이 수전계통에 직접 접속되기 때문에 고전압을 견딜 수 있는 방식으로 구성되어야 하고 이를 위해서는 다단 연결방식의 PWM 컨버터의 구성이 필수적이다. 종래의 PWM 생성 방식의 경우 지령전압의 크기에 따라서 각 단별 스위칭 부하가 균등하게 분포되지 않기 때문에 이를 해결하기 위한 복잡한 리던던시를 스위칭 패턴에 추가해야 했으나, 본 논문에서 제안하는 방식의 경우 부하의 분담이 자동적으로 이루어지기 때문에 그러한 부담없이 시스템을 구성하는 것이 가능하다.

ABSTRACT

In this paper, novel PWM generation method for cascaded H-bridge PWM converter is proposed. The proposed method can solve the unbalancing problem between H-bridges which consist cascade PWM converter without any injection of redundancy switching pattern for solving the load of switches forced from voltage reference of controller.

Keywords : intelligent universal transformer, solid-state transformer, multi-level converter

1. 서 론

신재생 에너지 발전설비 및 지역 소규모 발전설비의 확충에 의해 전력계통의 관리에도 새로운 패러다임이 요구되고 있으며, 그에 부합한 전력계통 시스템을 스마트그리드로 칭한다. 스마트그리드, 즉 지능형 전력망은 이러한 분산전원에 의해 발전된 전력을 기존의 대규모 전력 발전설비에 의해 발전된 전력과 어떻게 조화롭게 운영하여 전력망

을 효율적으로 관리하는가의 문제, 즉 양방향 조류를 관리하는 문제와, 수용가의 전력공급상태를 모니터링하고 이렇게 수집된 데이터를 기반으로 하여 전력 계통망을 안정적으로 운영하는데 관한 것이다.

이러한 지능형 전력망의 핵심 설비 중 하나가 배전망의 최선단에서 동작하는 지능형 다기능 변압기이다. 지능형 다기능 변압기, 즉 IUT는 수용가의 전력 공급상태를 모니터링하고, 다양한 형태

* 교신저자 : 오산대학교 전자시스템제어과 (jsahn@osan.ac.kr)

접수일자 : 2013년 8월 1일, 수정일자 : 2013년 8월 11일, 심사완료일자 : 2013년 9월 1일

의 전력을 공급하는 역할을 담당하고 있으며, 배전변압기의 지능화는 선진국을 중심으로 2000년대 초반부터 꾸준히 연구하고 있으며, 현재 실험실 수준의 프로토타입과 엔지니어링 샘플이 개발되고 있는 실정이다.

이러한 지능형 다기능 변압기의 구성은 전력회로 구성면에서 볼 때, 입력단 AFE, 즉 PWM 컨버터와 인버터의 직렬연결 및 고주파 변압기와 출력단 인버터 및 컨버터로 구성된다. 특히 입력단의 PWM 컨버터의 경우 수전 전압인 6.6kV의 입력 고전압을 감당해야 하며 이를 위한 회로의 구성이 필수적으로 요구된다.

일반적으로 고전압 입력 PWM 컨버터는 멀티레벨 방식으로 구성하며 멀티레벨 방식에는 다이오드 클램프 방식(NPC 방식), H-bridge cascade 방식 등이 있으나, 다이오드 클램프 방식의 경우 5레벨 이상에서는 적용이 어렵다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 6.6kV 입력에 적합한 H-bridge cascade 방식의 PWM 컨버터를 적용한 IUT의 회로 연구를 수행하였다. 입력단에 H-bridge cascade PWM 컨버터를 적용함에 있어서 기존의 PWM 생성 방식은 지령전압을 cascade 단수에 맞춰 전압 크기별로 분할하여 각 단에 해당하는 PWM 지령전압을 생성하는 방식으로 구성한다. 이러한 방식은 단수의 우수, 기수 여부와 단의 수에 관계없이 PWM을 생성하여 비교적 간단하게 멀티레벨을 구성할 수 있다는 장점이 있으나, 지령전압의 형태에 따라서 단 별로 스위칭 부하가 달라지는 단점이 있다. 이러한 방식을 극복한 PWM 생성 기법이 phase-shift 방식의 PWM 생성 기법이다. phase-shift 방식은 각 단의 스위칭용 carrier wave의 위상에 변화를 줌으로서 멀티레벨을 구현한다. 따라서 단 별 스위칭 지령은 지령전압의 크기와 무관하게 동일해지며 단지 그 위상만 변이되기 때문에 각 단의 스위칭 부하는 동일하게 된다. 이러한 부분에서 종래의 PWM 생성 방법에 대하여 장점을 가지나, 위상변이의 특성상, 기수 분할의 경우, 즉 3분할 120° 혹은 5분할 72° 등의 경우는 문제가 없으나, 우수 분할의 경우 + 혹은 - 전압의 생성 과정에서 서로 동상이 되어 위상 변이의 효과가 상쇄되어 버리는 결과가 나타난다. 이로 인해 각 단에 가해지는 전압 스트레스

를 의도하는 만큼 줄이기 어렵게 되어 시스템 설계의 자유도가 그만큼 줄어들게 된다.

따라서 본 논문에서는 이러한 phase-shift 방식의 문제점을 개선하고자 수정된 phase-shift 방식을 제안하였고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

II. 지능형 다기능 변압기의 구성과 PWM 생성

그림 1에 지능형 다기능 변압기의 블럭도를 나타내었다. 지능형 다기능 변압기의 전력 부분은 크게 네 부분으로 구성되며, 입력단의 PWM 컨버터부, 인버터부 및 고주파 변압기부와 출력부로 구성된다. 입력부 PWM 컨버터는 H-bridge cascade 구성으로 이루어져 있으며, 입력전압 6.6kV를 감당할 수 있도록 4단 직렬로 구성되어 있다. 각 H-bridge 컨버터에 직렬로 인버터가 연결되며, 인버터의 출력단은 고주파 변압기와 연결되어 절연 기능을 가능케 한다. 또한 각 고주파 변압기의 출력은 다이오드 정류기로 ORing되어 결합되며 이렇게 전달된 전력은 부하의 성격에 따라 220V/60Hz 및 240Hz, DC전원을 생성하기 위한 인버터 및 컨버터의 입력단에 연결된다.

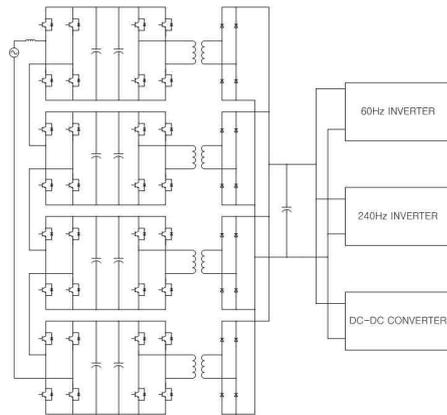


그림 1 지능형 반도체 변압기의 기본 구조

그림 2에는 종래의 멀티레벨 컨버터의 PWM 생성 방법을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 구성하는 단의 수에 따라 지령 전압을 분할하고

각 단계에 해당하는 carrier wave를 생성하여 단 별 범위의 지령전압과 비교하여 PWM을 생성한다. 이러한 생성 방식은 그 방식이 단순하여 구현하기가 용이하며, 구성단수에 무관하게 PWM 신호를 생성할 수 있는 큰 장점이 있다. 하지만, 전압의 범위가 낮은 단계의 경우 상대적으로 장시간 스위치를 켜야 하기 때문에 전압의 범위가 높은 단계에 비해서 스위치의 부하가 커지게 되고, 이로 인한 열적 불평형 또한 증가하므로 스택을 설계할 시에 이러한 점을 고려해야 하는

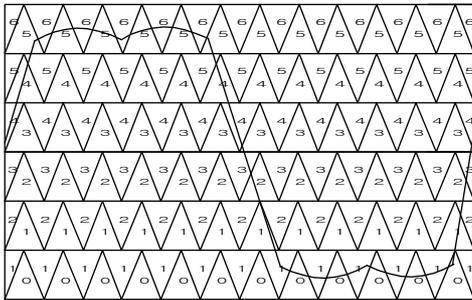


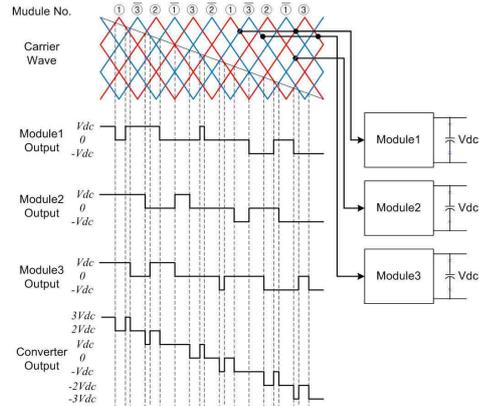
그림 2 기존의 멀티레벨 PWM 생성 방법

단점이 있다.

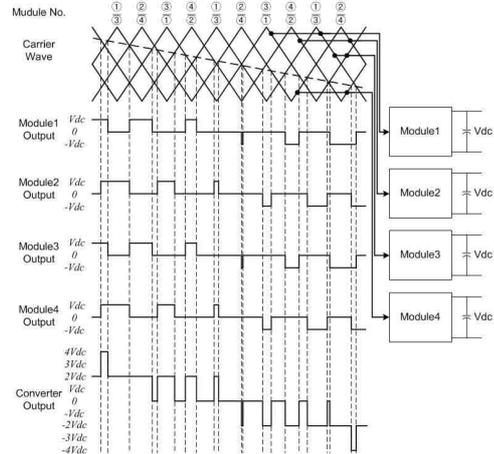
이러한 단점을 극복하고자 고안된 PWM 생성 방식이 phase-shift 방식으로 산업계에 널리 사용되고 있다. phase-shift 방식이란, 컨버터를 구성하는 단 수에 맞춰 스위칭 한 주기를 그 수만큼 분할하여 분할된 각도만큼 위상을 변이하여 PWM carrier wave를 생성하는 방식이다. 그림 3의 (a)에 보인 바와 같이 컨버터가 3단으로 구성되는 경우 스위칭 한 주기를 각 120°로 분할하여, 제 1단은 0°, 제2단은 120°, 제 3단은 240°로 분할하여 PWM의 carrier wave로 사용한다. 이렇게 구성하는 경우 각각의 carrier wave가 감당하는 지령전압의 크기가 동일하기 때문에 각 단계에 가해지는 스위치의 부하는 동일하며, 원하는 수의 레벨을 구현할 수 있다.

하지만 이러한 방식은 스위칭 주기를 기수(基數)개로 분할하는 경우만 유효한 것으로서 우수(偶數)개로 분할하는 경우에는 유효하지 않다. 그 이유는 그림 3 (b)에 도시한 바와 같이 우수개로 분할할 시에, (-)전압을 생성하기 위한 신호들이 (+)

전압을 생성하기 위한 신호와 동상이 되어버려 위상 변이의 효과가 사라지기 때문이다.



(a) 3 cascade 시스템 phase-shift PWM 생성(기수분할)



(b) 4 cascade 시스템 phase-shift PWM 생성(우수분할)
그림 3 phase-shift 방식 PWM 생성

이러한 단점을 극복하고자 본 논문에서는 우수개의 연결 구성을 가진 cascade H-bridge PWM 컨버터에 적용이 가능한 phase-shift 방식을 제안하였다. 기수개 분할의 경우 레벨 상실 현상이 나타나지 않는 점에 착안하여 분할을 기수개(2n+1)로 한 후 사용은 우수개(2n)로 하는 방법으로, 이렇게 구성하는 경우 위상변이에 의한 멀티레벨의 구현이 충실히 수행됨과 동시에, 종래의 우수개의 분할 시 발생하던 변이된 파형의 겹침에 의한 레벨 상실 현상을 해결할 수 있다. 그림 4에 제안된

방식의 PWM 생성 기법을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 carrier wave의 분할은 5개로 72°의 위상 변이를 가지며, 이 중 연속된 4개의 파형을 각 컨버터의 carrier wave로 사용하였다. 이 때, 생성되는 합성 전압은 총 9개의 레벨을 가지게 되며 설계상의 레벨과 동일하게 된다. 이러한 결과는 앞서 도시한 그림 3의 (b)에 도시된 4개로 분할하여 사용한 경우에 나타나야 하는 9개의 레벨에서 $\pm V_{dc}$, $\pm 3V_{dc}$ 가 상실된 5레벨만 나타나는 것과 대비되는 결과를 보이고 있다.

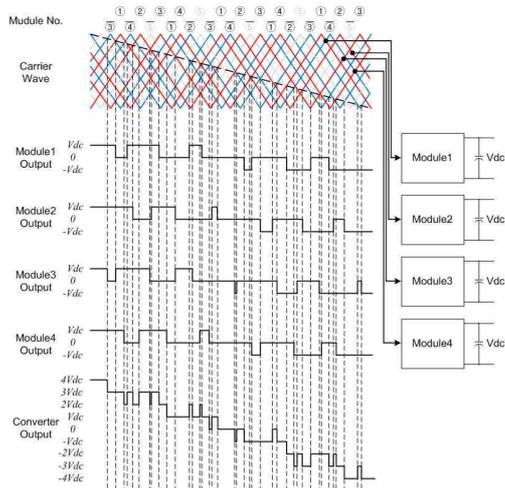


그림 4 제안된 phase-shift 방식 PWM 생성

III. 시뮬레이션

표 1에 모델이 되는 시스템의 사양을 나타내었다. 입력 전압은 6.6kV/60Hz이며, 정격 용량은 30kVA이다. 입력 라인 인덕터의 인덕턴스는 407mH, DC link 단 커패시터는 합성 375 μ F을 사용하였다. 또한 스위칭 주파수는 전력용 반도체의 정격과 스위칭 손실을 감안하여 4kHz로 설정하였다.

그림 5에는 MATLAB /Simulink를 사용한 시뮬레이션 모델을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 모델은 위상변이를 생성하기 위한 PWM carrier wave 생성부, 전력변환부 및 제어부로 구성되어 역률제어 및 전압제어를 수행한다.

그림 6에는 수행한 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 5개의 분할된 carrier wave 중에서 4개를 PWM 생성을 위해 사용하였

으며, 그 결과 기존의 방식으로 생성하였을 시에 사라진 홀수 레벨이 사라지지 않고 생성되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 본 방식을 사용하는 경우 시스템 구성의 자유도가 크게 신장될 수 있어 향후 멀티레벨 방식의 시스템 구성에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

표 1. 지능형 다기능 변압기의 주요 사양.
Table 1. Specification of IUT

Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value
Input inductance	mH	407	DC Link Capacitor	μ F	375
DC Link Voltage	V	2700	Input Voltage	V	6600
DC Link Voltage Ripple	V	270	Input Power Rating	kVA	30
Switching Frequency	kHz	4			

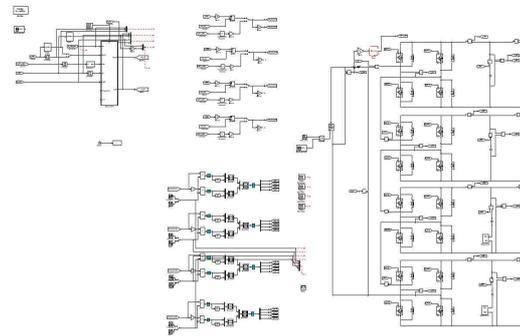
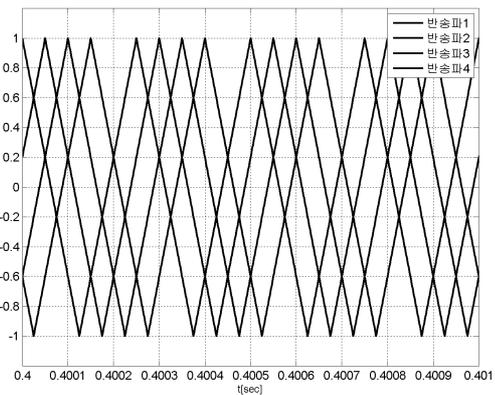
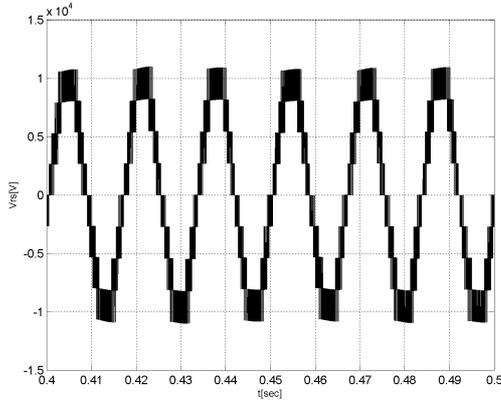


그림 5 MATLAB 시뮬레이션 모델



(a) 제안된 방식의 캐리어 신호 파형



(b) 생성된 합성 전압 파형
그림 7. 제안된 방식에 의해 생성된 전압 파형

V. 결론

본 논문에서는 지능형 다기능 변압기를 구성하는데 있어 적용되는 cascade H-bridge 멀티레벨 컨버터의 PWM 생성 기법에 대하여 다루었다. 기존의 phase-shift 방식의 단점 중 하나인 우수(偶數)개의 분할에서 발생하는 레벨 상실 현상을 극복할 수 있는 방법을 제안하였으며 그 가능성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이를 통하여 cascade H-bridge형 컨버터 시스템의 설계 자유도를 신장시킬 수 있어 유용할 것으로 판단되며, 향후 추가적인 연구를 통해 본 제안 방식의 특성을 좀 더 면밀히 검토하는 것이 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013학년도 오산대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

[1] M. Kang, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, no.6, pp. 1133-1141, Nov. 1999.
[2] E.R. Ronan, S.D. Sudhoff, S.F. Glover, and

D.L. Galloway, "A power electronic-based distribution transformer," IEEE Trans. Power Delivery., vol.17, pp. 537 - 543, April 2002.
[3] H. Iman-Eini, Sh. Farhangi, "Analysis and Design of Power Electronic Transformer for Medium Voltage Levels," in proc. IEEE PESC conf., pp. 843- 847, June 2006.
[4] J.S. Lai, A. Maitra, A. Mansoor, F. Goodman, "Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications," in Proc. IEEE IAC conf., Vol. 3, pp. 1893 - 1899, October 2005.
[5] A. Maitra, A. Sundaram, M. Gandhi, S. Bird, S. Doss, "Intelligent Universal Transformer Design and Applications," Proceeding of 20th International Conference on Electricity Distribution, paper no. 1032, June, 2009.
[6] Development of a New Multilevel Converter-Based Intelligent Universal Transformer: Design Analysis (EPRI, Palo Alto, CA: 2004. TR1002159)
[7] H. Joo, "A Study on the Development of Power Converter for 3.3kV, 15kVA. Single-phase Solid-state Transformer Using Microprocessor", ICEE-A174, ICEE 2011
[8] J.S. Ahn, "A Study on the Development of Power Converter for 6.6kV, 30kVA Single-phase Solid-state Transformer using Microprocessor, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, p512, Aug., 2013.

저자약력

안 준 선(Joon-Seon Ahn) 종신회원



1993년 한양대학교 전기공학과 졸업.

2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).

1995년~2000년 LS산전 빌딩 설비사업부 연구소.

2001년~2003년 (주) 저스텍 기술연구소.

2008년~현재 오산대학 전기 시스템제어과 조교수

<관심분야> 전력변환, 전동기제어