

# 멀티레벨 PWM 컨버터의 부하분담 PWM 방식 연구

안 준 선\*

## A Study On The Load Sharing PWM Method For Multi-level Converter

Joonseon Ahn\*

**요 약** 본 논문에서는 스마트그리드의 핵심 설비 중 하나인 반도체 응용 고주파 변압의 개발을 위한 PWM 컨버터의 PWM 생성 방식과 그 구현에 관한 논문으로, H-bridge의 cascade 방식으로 구성된 PWM 컨버터의 경우 각 H-bridge간의 전압 balancing이 항상 이슈로 대두되는 바, 이러한 불균형은 대부분의 경우 각 H-bridge에 부가되는 스위칭 부하가 각각 균형적으로 분포되는 것이 불가능하기 때문에 발생하는 것으로 이를 해결하기 위해 종래의 경우 스위칭 패턴에 복잡한 리턴턴시를 추가하여 해결 하였으나, 본 논문에서 적용하는 방법은 이러한 리턴턴시가 불필요해 제어기의 부담을 저감할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 자동부하분담 PWM 방식(ALB-PWM)의 실 구현에 관하여 논하였다.

**Abstract** In this paper, the implementation of proposed Automatic Load Balanced (ALB) PWM generation method is discussed. The conventional PWM generation method for cascade type H-bridge PWM converter causes the unbalance between each H-bridge converter, therefore the complex redundancy is required for the balancing of switching load of each converter, it consumes more computing power of controller. The ALB PWM method needs no additional switching redundancy for balancing, this paper discusses the implementation of ALB-PWM.

**Key Words** : intelligent universal transformer, solid-state transformer, multi-level converter

### 1. 서 론

스마트그리드의 보급과 함께 배전망의 지능화 및 고도화를 위한 각종 전력 기기 및 설비들이 지속적으로 연구되고 개발되어 보급되고 있으며, 지능형 다기능 변압기(Intelligent Universal Transformer, IUT) 역시 관련 기술 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1~3] 특히 미국 전력기술연구소(EPR)에서의 연구가 활발하여 IUT를 실 구현하기 위한 실증 연구가 진행되어 왔으며, Lai, Huang 등에 의한 실제 프로토타입의 개발까지 완료되어 있는 실정이다.[4~8] 하지만 이들의 연구는 기본적으로 IUT를 위해 특수 제작된 반도체 소자(super GTO)를 사용하는 것을 전제로

하기 때문에, 일반적으로 적용하기는 어려운 측면이 있어 널리 활용되기는 어려운 측면이 있다. Ahn 등의 연구에 의해 기존의 PWM 생성 방식이 갖는 한계-odd number cascade type PWM 컨버터만 구성할 수 있는 한계-를 극복하기 위한 노력이 이루어져 왔으며, 기본적인 연구 모델을 구성하여 그 가능성 확인한 바 있다.[9,10]

본 연구에서는 Ahn 등의 연구 결과를 바탕으로, 이를 구현하기 위한 다양한 실제 운전 상황을 가정하여 여러 시뮬레이션 실험을 수행하고 그 결과를 실증적으로 확인하였다. 그 결과, ALB PWM 방식이 제품화되어 현장에 적용되는 데에 큰 무리가 없는 것으로 판단할 수 있었다.

This paper was supported by research fund of osan university in 2016.

\*Department of Electrical Engineering, Osan university (jsahn@osan.ac.kr)

Received Octobert 31, 2017

Revised November 11, 2017

Accepted November 30, 2017

## 2. Multi-level PWM 생성

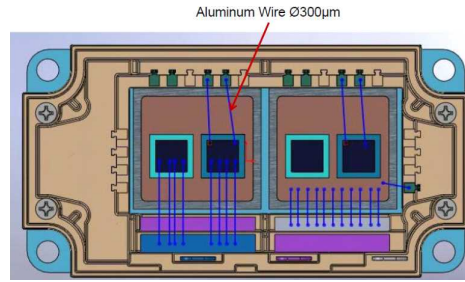
IUT 혹은 SST에 핵심적으로 사용되는 기술은 그림 1에 나타난 바와 같이 배전전압 6.6kV이상의 초고압을 옥내 배전전압으로 감압하는데 이를 종래의 주상 변압기와 같은 습식 저주파 변압기를 사용하지 않고, 건식 고주파 변압기를 사용함으로써 유지보수의 장점과, 변압기의 고주파화를 통한 크기의 대폭 축소 등을 장점으로 하는 SST를 구현하기 위해 6.6kV의 초고압 입력을 처리할 수 있는 PWM 컨버터를 개발하는데 있고, 이러한 초고압을 스위칭할 수 있는 PWM 컨버터 구성 및 PWM 생성기법을 개발하는데 있다.

앞서 언급한 바와 같이 Lai 등에 의해 super GTO의 개발과 이를 활용한 3-level PWM 컨버터가 개발된 바 있으며, Huang 등은 SiC MOSFET 등을 활용한 사례를 연구한 바 있다. 하지만 이러한 연구들은 6.6kV이상의 초고압을 반도체 소자의 내압으로 극복한 것으로, 보편화되어있지 않은 소자의 사용에 의한 부담이 가중되며, 이로 인한 설계의 자유도 저하를 막을 수 없다.

그림 2 (a)에 나타난 3-level을 초과하는 multi-level 컨버터를 활용할 경우 일반적으로 상용화된 IGBT를 사용할 수 있는 장점이 있기 때문에, 접근이 용이한 반면, 그림 2의 (b)에서 보는 바와 같이 컨버터의 출력 전압에 따라 내측 소자들이 외측 소자들에 비해 좀 더 스위칭 부하를 많이 받는 구조이기 때문에, 부하 불균형으로 인한 스위치의 열화 등의 문제로 인해 냉각등의 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 내측 소자 스위칭 시에 스위칭 리턴턴스를 추가하여 부하의 불균형을 최소화하는 방법 등이 연구되어 있으나, 제어의 복잡도가 증가하는 등의 문제로 상용화에는 어려움이 발생할 수 있다.

이러한 종래의 multi-level PWM 컨버터의 단점을 극복한 방식이 phase-shift 방식의 multi-level PWM 컨버터이다. phase-shift 방식의 경우 그림 3에 나타난 바와 같이 각 스위치에 부가되는 스위칭 부하는 전부가 동일(duty=0.5)하고, 위상의 차이에 의해서 다 레벨의 합성 전압을 만들어내기 때문에, 각 스위치 별 부하분담이 동일하게 부과된다는 장점이

있다. 이러한 방식은 저 전압 응용 분야의 경우 제작 비용 상의 문제로 적용이 어려우나, IUT와 같은 초고압 입력을 갖는 전력기기의 경우 cascade 방식의 phase-shift PWM 방식을 적용할 경우 각 단계 인가되는 전압은 단 수에 따라 나뉘지게 되어 1.6kV이하의 상용 IGBT를 적용할 수 있는 장점이 있으며, 종래의 PWM 생성방법에서 문제가 되는 스위칭 소자 간 부하 불균형 문제도 발생하지 않는 장점이 있다.



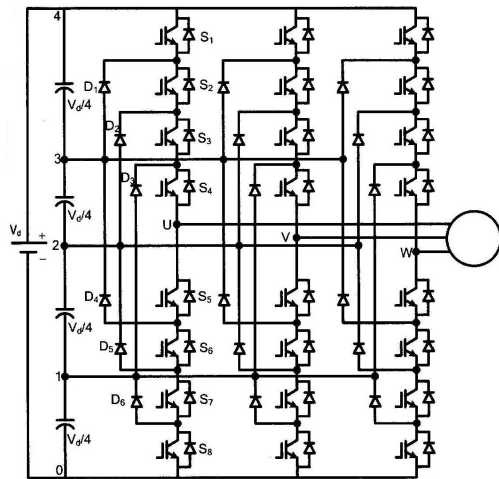
(a) Layout



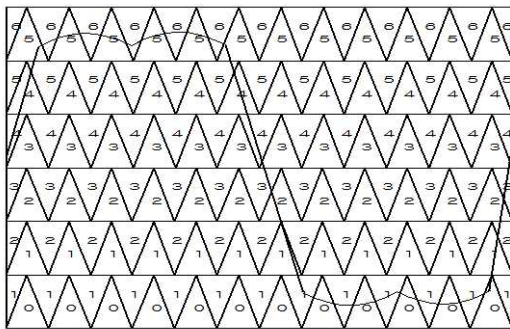
(b) Prototype

그림 1. 6.5kW 25A IGBT Dual Module [7]

Fig. 1. 6.5kW 25A IGBT Dual Module [7]



(a) Diode Clamped Multi-level Inverter



(b) PWM Generation of Multi-level Converter

그림 2. Multi-level PWM Converter[6]

Fig. 2. Multi-level PWM Converter[6]

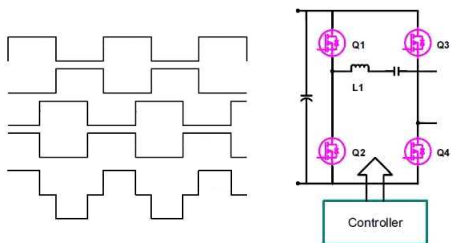


그림 3. Phase-shift 방식

Fig. 3. Method of Phase-shift

하지만, 이러한 phase-shift 방식은 Ahn 등이 논의한 바와 같이 PWM 생성이 기수(基數)개의 경우에만 유효한 것으로, 컨버터의 구성 역시 H-bridge의 기수개 연결의 경우에만 유효한 것으로 알려져 있다.

이를 극복하고자 Ahn 등은 기수 개 분할 및 우수(偶數)개 사용이라는 방식을 제안한 바 있으며, 그에 대한 타당성을 나타낸 바 있다.

### 3. SST의 실 구현을 위한 ALB-PWM

#### 3.1 실 구현을 위한 필요 검토 조건

그림 4에 SST 시스템의 실 구현 모델을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 시스템은 4개의 직렬 연결 H-bridge 컨버터-인버터 모듈이 직렬 연결된 형태로 구성되어 있으며, 각 모듈의 출력은 4개의 고주파 변압기 출력을 통해 각각 다이오드 정류기와 연결되어 있다. 전체 시스템의 출력은 각 모듈의 정류기 출력을 wired-OR 하여 부하와 접속된다.

또한, 본 시스템은 단상입력에 적용하는 것을 목표로 구성하였기 때문에 입력 단은 단상 6.6kV 입력이 연결되며 이는 입력 리액터를 거쳐 모듈1에 직렬 접속된다.

본 논문에서 다루고자 하는 SST에 ALB-PWM 방식을 적용하는 경우 고려해야할 부분들 중 가장 중요한 부분은, 각 모듈간의 전압 불균형에 대한 극복 방안이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 각 모듈은 PWM 컨버터를 통해 전원을 공급 받아 인버터를 이용하여 각 모듈별 출력 전압을 제어하는 구조로 이루어져 있으나, 각 모듈별 PWM 컨버터는 각각 독립적으로 DC 링크 전압을 제어하는 방식이 아니라, 그림 5에 나타난 바와 같이, 모듈1의 DC 링크 전압을 피드백 신호로 공통으로 사용하여 각각의 PWM 신호를 생성하는 방식으로 시스템이 구성되어 있기 때문에, 각 모듈간의 전압 균형은 전체 시스템의 성능에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 각각의 모듈별 독립제어 방식도 고려해 볼 수 있으나, 제어의 복잡성 및 각 모듈간의 커플링 현상, H/W 적인 제약 때문에 고려하지 않았다.

따라서, 모듈 간에 전압 불균형이 발생할 경우 각 모듈이 출력하는 전압에 차이가 발생하게 되고, 이로 인해 출력전압의 저하 및 낮은 전압을 출력하는 모듈에 과도한 부하가 인가될 가능성이 있다.

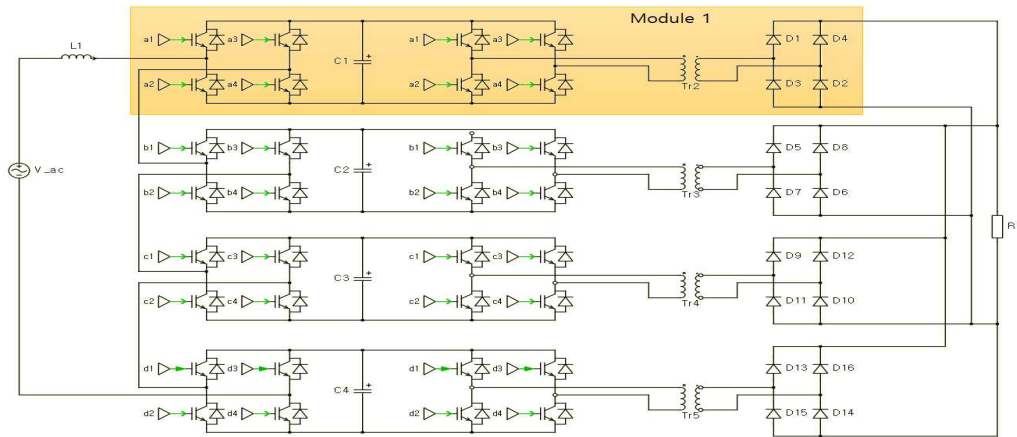


그림 4. SST 시스템의 구성  
Fig. 4. System Diagram of SST

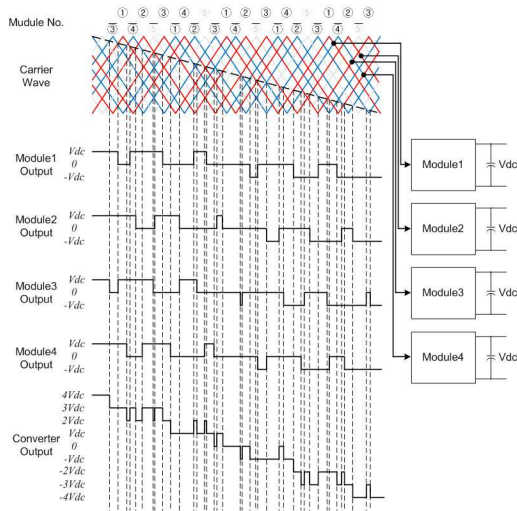


그림 5. ALB-PWM 생성 방식[10]  
Fig. 5. PWM algorithm of ALB-PWM[10]

### 3.2 ALB-PWM 전압 균형 시뮬레이션

ALB-PWM 방식의 특성 파악을 위한 컴퓨터 시뮬레이션은 PLECS를 이용하여 진행 하였으며 그 시뮬레이션 모델은 그림 6에 나타난 바와 같다. 또한 본 시뮬레이션을 위한 시스템에 적용된 주요 소자의 정격 및 파라미터는 표 1과 같다.

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

Parameter	Unit	Value
Input inductance	mH	407
DC Link Voltage	V	2700
DC Link Voltage Ripple	V	270
Switching Frequency	kHz	4
DC Link Capacitor	$\mu\text{F}$	375
Input Voltage	V	6600
Input Power Rating	kVA	30

각 모듈별 불균형은 그 발생 지점별로 ① DC link 단 충전전압 불균형, ② 2차측 부하불균형으로 나눌 수 있으며, 발생 원인별로는 ㉠ 각 모듈 개별의 순간 전압강하, ㉡ 각 모듈의 개별 부하불균형으로 구분할 수 있다. 각각의 발생 원인에 대해서는 다양한 고려를 할 수 있겠으나, 그에 대해서는 본 연구의 범위를 벗어난 주제이기 때문에 논의하지 않는다.

이러한 조건을 고려하여 각 경우별로 시뮬레이션 조건을 생성하고 원인 발생 시점부터 정상상태 회복 시간을 측정하여 그 결과를 그림 7 및 그림 8에 나타내었다.

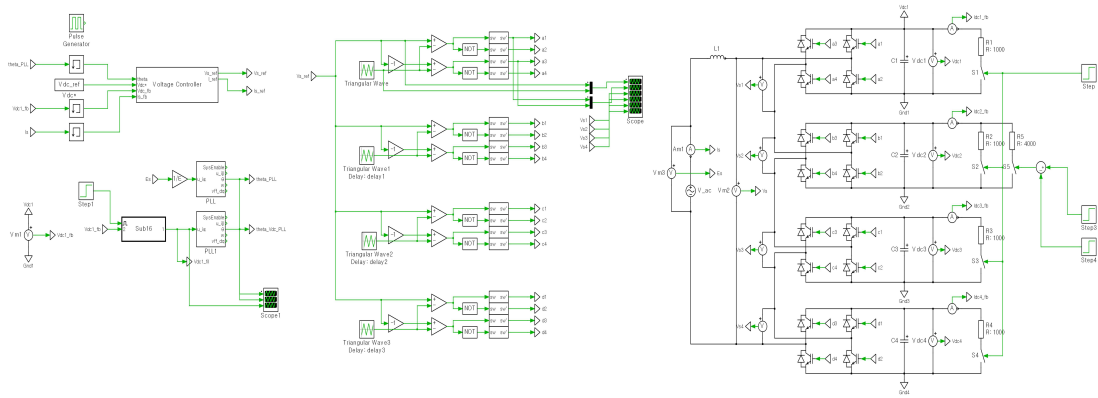


그림 6. ALB-PWM 방식의 H-bridge Multilevel Converter의 컴퓨터 시뮬레이션 모델  
 Fig. 6. Computer Simulation Model of H-bridge Multilevel Converter Using ALB-PWM

순간정전 및 전압강하 기준을 고려하여, 불균형 전압은 정격전압의 30% 전압강하를 가정 하였으며, 500ms 동안 지속되는 것으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 불균형 전압 인가 후 정상상태 도달 시 까지 약 480ms가 소요되었다.(그림 7)[11]

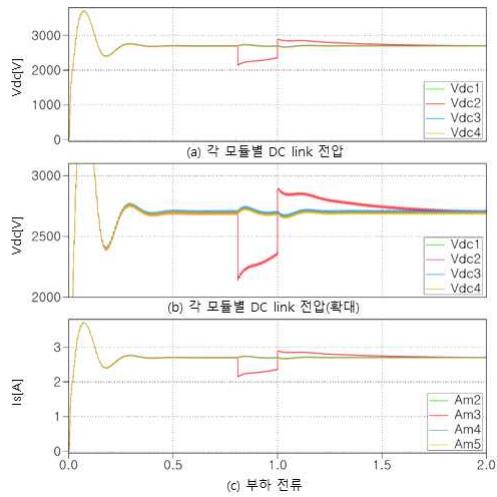


그림 7. 특정 모듈의 순간전압강하 시뮬레이션  
 Fig. 7. Voltage Dip Simulation

또한 그림 8 에서 보는 바와 같이, 정격 균형 부하 인가 시에는 전 모듈의 동작이 일치하며 동작 전압이 정상상태 도달까지 300ms가 소요됨을 알 수 있고, 불균형 부하 인가 시(인가조건: 모듈2, 120% 부하인가 100ms 유지)에는 각 조건에서의 정상상태 settling

time은 570ms를 나타내고 있다. 이는 본 제안 모델이 구현되었을 시에 적용 가능한 수준으로 사료되며, 제안된 모델이 실 적용 시 운전 중에 발생할 수 있는 모듈별 순간 전압강하 및 부하불균형 현상의 발생에 대해서 제안된 방식이 강인한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

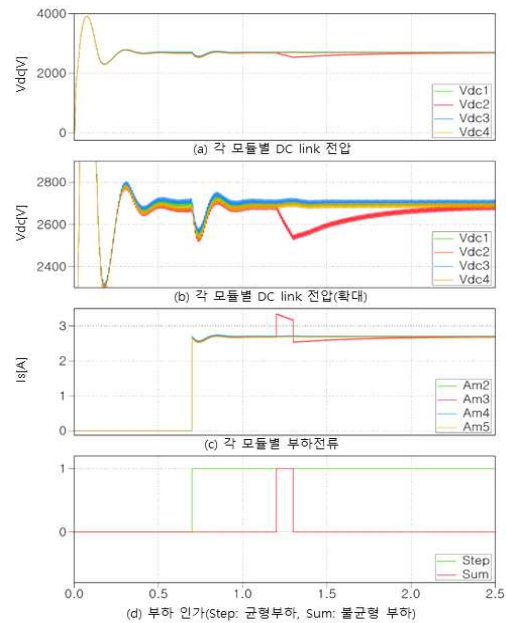


그림 8. 균형부하 및 불균형 부하 시뮬레이션  
 Fig. 8. Simulation of Load Balancing

#### 4. 결론

본 연구에서는 스마트그리드 배전계통의 핵심 설비 중 하나인 반도체 응용 고주파 변압기의 설계 자유도 증대를 위한 ALB-PWM 구동 방식을 제안하고 실 구현시에 발생할 수 있는 여러 부하불균형 조건들에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 구동방식의 강인성을 확인하였다. 그 결과 본 연구에서 제안한 PWM 구동 방식의 강인성을 확인할 수 있었고, 본 제안 방식이 실 시스템에 구현 가능할 것으로 판단할 수 있었다.

향후 실 시스템의 구현 및 본 연구에서 수행한 조건별 실험을 통해 그 타당성을 확인할 필요가 있다.

#### REFERENCES

- [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), 2004.
- [7] X. Huang, et. Al, "Comparisons of 6.5kV 25A Si IGBT and 10-kV SiC MOSFET in Solid-State Transformer Application," Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), Sept., 2010.
- [8] 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
- [9] 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.
- [10] J. Ahn, " A Study on the Characteristics of Cascade PWM Converter for IUT," Journal of KIIECT, Vol. 6, No 3, pp135~140, 2013.
- [11] IEC61000-4-11 Electromagnetic compatibility(EMC) Part 4-11: Testing and measurement techniques- Voltage dips, short interrupts and voltage variations immunity tests

---

#### 저자약력

---

안 준 선(Joonseon Ahn)

[정회원]



- 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업.
- 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
- 2008년~현재 오산대학 전기과 부교수

<관심분야> 전력전자, 전동기제어, 전력변환