

# 3상 3 레벨 T-type 컨버터의 고 효율화를 위한 변조기법에 대한 연구

김태훈, 이우철

한경대학교

## A study on modulation technique for high efficiency of 3-phase 3-level T-type converter

TaeHun Kim, WooCheol Lee

Hankyong National Univ

### ABSTRACT

최근 환경문제로 인해 고효율의 전력 시스템의 중요성이 커지고 있다. 이에 따라 기존 2 레벨 컨버터에 비해 높은 효율을 갖는 3 레벨 컨버터의 사용이 증가하고 있다. 본 논문에서는 계통연계 형 3상 3 레벨 T type 컨버터의 고 효율화를 위해 기존의 2 레벨, 3 레벨 동작을 비교 분석하고 효율을 개선할 수 있는 변조 기법을 제시한다.

### 1. 서론

최근 환경 문제로 인해 고효율의 전력 시스템의 중요성이 커지고 있다. 일반적인 2 레벨 컨버터는 간단한 구조와 높은 신뢰성으로 많은 분야에 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 하지만 이러한 2 레벨 컨버터는 효율과 성능을 향상시키는데 제한이 있다. 이에 비해 멀티 레벨 컨버터는 더 많은 스위치가 필요하며 복잡한 구조로 구성되지만 높은 효율과 좋은 total harmonic distortion (THD) 등 더 좋은 성능을 갖는 멀티레벨 컨버터의 사용이 증가하고 있다<sup>[2-4]</sup>. 3 레벨 컨버터로 주로 사용되는 neutral point clamped (NPC), T type 컨버터는 2 레벨 컨버터에 비해 2 배 이상의 많은 스위치가 요구되지만 스위칭 전압이 절반으로 감소하기 때문에 스위칭 손실, 고조파 손실, 출력품질 향상 등의 장점이 있다<sup>[5,6]</sup>. 3 레벨 컨버터는 저 전압 영역에서 적합하지 않기 때문에 T type 컨버터가 제안되었다. T type 컨버터는 NPC 컨버터와 비교하여 요구되는 소자의 수가 적고 도통손실이 더 작은 장점이 있다. 따라서 저 전압 영역에서 더 우수한 효율을 얻을 수 있다<sup>[6]</sup>. 이전의 연구에서 T type 컨버터의 효율을 향상시키기 위한 새로운 반도체 소자, 효율적인 pulse width modulation (PWM) 기법과 동작모드, 최적 설계와 같은 연구들이 수행되었다<sup>[7-10]</sup>.

T type 컨버터는 2 레벨 컨버터와 유사한 특성을 갖는다. 중성점 스위치 구성을 제외하면 동일한 회로 구조를 갖기 때문에 필요하다면 중성점 스위치를 제외하고 2 레벨로 동작할 수 있다는 장점이 있다. T type 컨버터는 2 레벨 동작과 비교하여 절반의 스위칭 전압으로 인해 스위칭 손실이 감소하는 장점이 있다. 하지만 일반적인 T type 컨버터는 중성점에 두 개의 스위칭 소자로 구성되기 때문에 중성점 도통 시 도통손실이 커지게 된다. 중성점 스위치의 도통손실이 거의 2 배가 되기 때문에 중성점 도통 시간이 길어지는 저 전압 영역에서 도통 손실

이 2 레벨 동작모드보다 커질 수 있다<sup>[11, 12]</sup>.

본 논문에서는 3 상 3 레벨 T type 컨버터의 효율을 개선하기 위하여 2 레벨과 3 레벨 동작효율을 분석하여 더 높은 효율을 낼 수 있는 동작모드를 선택하는 변조기법을 제시한다. 제안된 방법은 PSIM의 Thermal module 을 사용한 시뮬레이션으로 검증하였다.

### 2. T-type 컨버터 손실비교

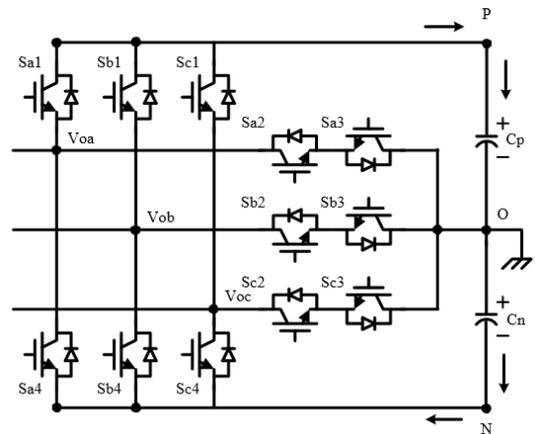


그림 1 3 상 3 레벨 T-type 컨버터  
Fig. 1 3 phase 3 level T-type converter

그림 1은 3 상 3 레벨 T type 컨버터 구성을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 중성점 스위치를 제외하면 2 레벨 컨버터와 동일한 구성을 갖는다. 본 절에서는 2 레벨과 3 레벨 동작 시 각각 동작의 스위칭 손실과 도통손실을 비교한다.

#### 2.1 3 레벨 동작 손실 분석

컨버터는 동작시 단위역률로 제어되기 때문에 전압과 전류에 따라 두 가지 동작 모드를 갖는다. 양의 전압이 인가되는 경우 P 와 O 노드에 연결되며 순방향 전류가 흐르기 때문에 그림 2 (a), (b)의 동작모드로 동작한다. (a)에서  $S_{a1}$ 의 다이오드에서 도통손실과 역 회복 손실이 발생한다. (b)에서 중성점으로 동작하는 경우 두 개의 스위치에서 손실이 발생한다.  $S_{a3}$  트랜지스터와  $S_{a2}$ 의 다이오드에서 도통 손실과 온, 오프 손실 그리고 역 회복 손실이 발생한다.

음의 전압이 인가되는 경우 전류는 역방향으로 흐르게 되며

그림 2 (c), (d) 의 동작모드로 동작한다. (c) 에서  $S_{a1}$  의 다이

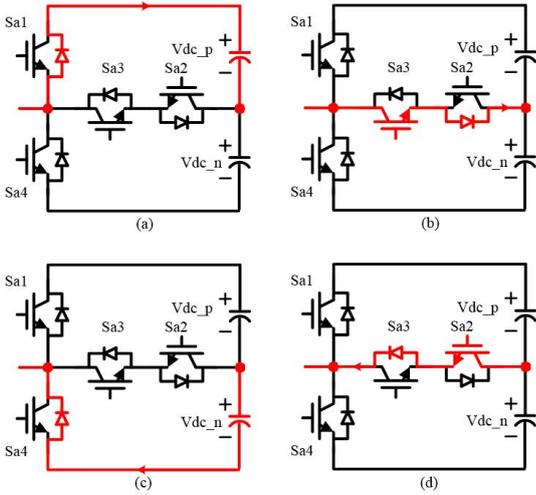


그림 2 3 레벨 T-type 컨버터 동작모드  
Fig. 2 3-level T-type converter operation mode

오드에서 도통손실과 역 회복 손실이 발생한다. (d) 에서  $S_{a3}$  의 다이오드와  $S_{a2}$  의 트랜지스터에서 스위칭 손실이 발생한다. 턴온, 오프 손실과 역 회복 손실, 트랜지스터와 다이오드의 도통손실은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[13]</sup>.

$$P_{xon3} = \frac{V_{dc}/2}{V_{data}} A |i_{xL}| \quad (1)$$

$$P_{xoff3} = \frac{V_{dc}/2}{V_{data}} B |i_{xL}| \quad (2)$$

$$P_{xrr3} = \frac{V_{dc}/2}{V_{data}} C |i_{xL}| \quad (3)$$

$$P_{xtr} = (V_{d0} + R_s |i_{xL}|) |i_{xL}| \quad (4)$$

$$P_{xd} = (V_{d0} + R_d |i_{xL}|) |i_{xL}| \quad (5)$$

$V_{data}$  는 데이터 시트에서 사용된 스위칭 전압이다.  $A, B$  는 데이터 시트의 스위칭 손실과 전류 곡선에서 얻을 수 있는 상수 값이다.  $C$  는 역 회복 손실과 전류 곡선에서 얻을 수 있는 상수 값이다.  $V_{d0}$  와  $V_{d0}$  는 전류가 흐르지 않는 경우 온 상태 포화 전압을 나타하며  $R_s$  와  $R_d$  는 도통 시 저항을 나타낸다.

앞서 설명한 동작모드에 따른 스위칭 손실과 도통손실은 최종적으로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_{xsw3} = P_{xon3} + P_{xoff3} + P_{xrr3} \quad (6)$$

$$P_{xcon3} = D_3 P_{xtr} + (1-D_3) P_{xd} + (d/2)(P_{xd} - P_{xtr}) \quad (7)$$

### 2.2 2 레벨 동작 손실 분석

2 레벨 동작 시 스위칭 손실과 역 회복 손실은 스위칭 전압이  $V_{dc}$  로 증가하기 때문에 수식 (1 3) 보다 2 배로 증가하게 된다. 각 소자의 도통 손실은 동일하며 2 레벨 동작 시 전체 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{xsw2} = P_{xon2} + P_{xoff2} + P_{xrr2} \quad (8)$$

$$P_{xcon2} = D_2 P_{xtr} + (1-D_2) P_{xd} + (d/2)(P_{xd} - P_{xtr}) \quad (9)$$

## 3. 제안된 PWM 방법

제안된 PWM 방법은 2 레벨과 3 레벨의 동작 효율을 분석하여 높은 효율을 낼 수 있도록 스위칭 방법을 선택하는 것이다. 동작 순서는 그림 3 과 같다.

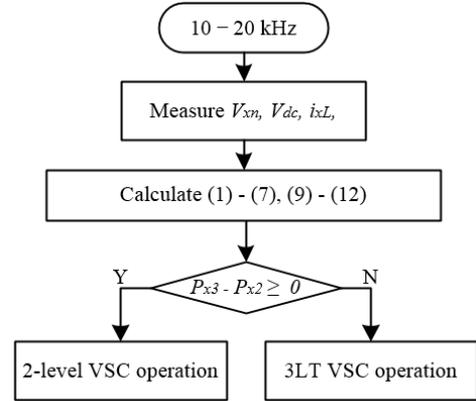


그림 3 제안된 절체방법 동작 순서도  
Fig. 3 Proposed Switching Method Operation Flowchart

$P_{x3}$  와  $P_{x2}$  는 3 레벨과 2 레벨 동작모드에 따라 계산된 손실로 다음과 같이 계산된다.

$$P_{xm} = P_{xswm} + P_{xcom} \quad (10)$$

## 4. 시뮬레이션

시뮬레이션 회로는 PSIM 을 사용하여 그림 4 와 같이 구성하였다. a 상에 Thermal module 을 사용하여 동작 효율을 확인하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1 과 같다.

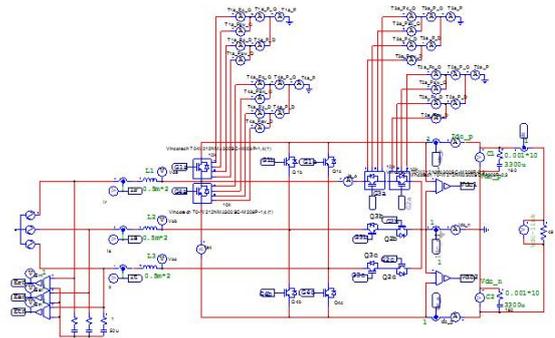


그림 4 시뮬레이션 회로  
Fig. 4 Simulation circuit

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
DC link 전압	700 [V]
계통 선간 전압	380 [V]
정격 용량	10 [kW]
스위칭 주파수	10 20 [kHz]

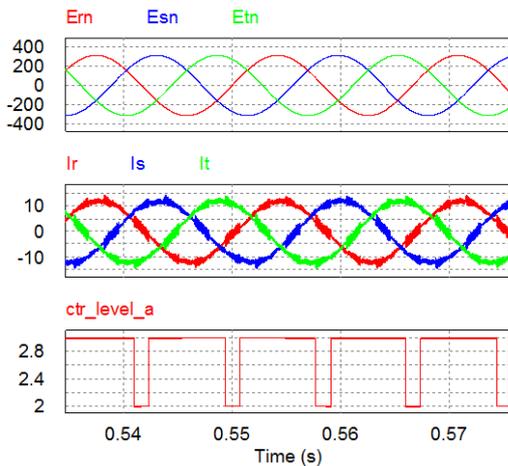


그림 5 시뮬레이션 결과 파형 (10 [kW], 20 [kHz])  
Fig. 5 Simulation result waveform (10 [kW], 20 [kHz])

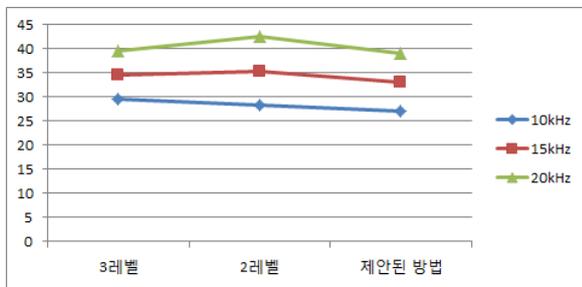


그림 6 시뮬레이션 결과 손실 비교 (10 [kW])  
Fig. 6 Comparison of simulation result loss (10 [kW])

그림 5 는 시뮬레이션 결과 파형을 보여준다. 전류 파형에서 전압레벨이 변경됨에 따라 전류 THD 가 증가함을 확인할 수 있다. 3 레벨에 비해 THD 가 증가하는 단점이 있지만 2 레벨 동작에 비해 여전히 낮은 THD 를 갖는다. 그림 6 은 시뮬레이션 결과 손실을 보여준다. 주파수에 따라 10 kHz 에서는 2 레벨 손실이 더 적고 20 kHz 로 주파수가 증가할수록 3 레벨 동작이 유리함을 확인할 수 있다. 또한 제안된 방법이 모든 주파수에서 가장 적은 손실이 발생하였다.

## 5. 결론

최근 환경문제로 인해 고효율의 전력 시스템의 중요성이 커지고 있다. 이에 따라 기존 2 레벨 컨버터에 비해 높은 효율을 갖는 3 레벨 컨버터의 사용이 증가하고 있다. 본 논문에서는 계통연계 형 3상 3 레벨 T type 컨버터의 고효율화를 위해 기존의 2 레벨, 3 레벨 동작을 비교 분석하고 효율을 개선할 수 있는 변조 기법을 제시하였다. 시뮬레이션을 사용하여 제안된 방법에 대해 검증하였으며, 2, 3 레벨 각각의 동작모드보다 높은 효율을 보이는 것을 확인하였다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임  
(No. NRF 2017R1D1A1B03031532)

## 참고 문헌

- [1] P. Cortes, G. Ortiz, J. I. Yuz, J. Rodriguez, S. Vazquez, and L. G. Franquelo, "Model predictive control of an inverter with output lc filter for ups applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 6, pp. 1875-1883, 2009.
- [2] L. G. Franquelo et al., "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, Jun. 2008.
- [3] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel Voltage source converter Topologies for Industrial Medium voltage Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2930-2945, Dec. 2007.
- [4] H. Abu Rub, J. Holtz, J. Rodriguez, and G. Baoming, "Medium voltage multilevel converters State of the art, challenges and requirements in industrial applications," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 57, no. 8, pp. 2581-2596, Aug. 2010.
- [5] T. Bruckner, S. Bernet, and H. Guldner, "The active NPC converter and its loss balancing control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 855-868, Jun. 2005.
- [6] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and implementation of a highly efficient 3 level T type converter for low voltage applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 2, pp. 889-907, Feb. 2013.
- [7] Y. Kashihara and J. Itoh, "The performance of the multilevel converter topologies for PV inverter," in *Proc. CIPS*, Beijing, China, pp. 1-6, Mar. 2012.
- [8] K. Komatsu, "New IGBT modules for advanced neutral point clamped 3 level power converters" *International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 523-527, 2010.
- [9] S. M. Shin, J. H. Ahn, and B. K. Lee, "Maximum Efficiency Operation of Three Level T type Inverter for Low Voltage and Low Power Home Appliances," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 2, pp. 586-594, 2015.
- [10] J. W. Kolar, "High efficiency drive system with 3 level T type inverter," *Proc. EPE Appl.*, pp. 1-10, Aug. 2011.
- [11] R. Teichmann and S. Bernet, "A comparison of threelevelconverters versus two level converters for lowvoltage drives, traction, and utility applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, pp. 855-865, May/June 2005.
- [12] Alemi, Payam, and Dong Choon Lee. "A Generalized Loss Analysis Algorithm of Power Semiconductor Devices in Multilevel NPC Inverters," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol.9, no.6, pp. 2168-2180, 2014.
- [14] Bai Baodong, Chen Dezhi, "Inverter IGBT Loss Analysis and Calculation," *Industrial Technology (ICIT)*, 2013 *IEEE International Conference on*. IEEE, pp. 563-569, 2013.