

## 더블 컨버터의 초기 점화각에 따른 출력 특성 대한 연구

장춘석\*, 한성우\*\*, 김성안\*, 한갑진\*, 조윤현\*  
 동아대학교\*, 부경대학교\*\*

### A Study on Output Characteristics According to Initial Firing Angle of Double Converter

Choon-Seok Jang\*, Sung-Woo Han\*\*, Sung-An Kim\*, Gap-Jin Han\*, Yun-Hyun cho\*  
 Dong-A University\*, Pukyong University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 부하에 따라 직류 가선전압의 제어가 가능하며 회생에너지를 재사용 할 수 있는 사이리스터 더블컨버터를 제안하며, 안정적인 모드 전환을 위하여 모드 전환시 초기 점화각에 따른 직류 전압의 특성을 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

여기서,  $T$ 는 전압 파형의 주기,  $\alpha$ 는 점화각,  $V_{m,l-l}$ 은 선간전압의 실효값을 나타낸다. 입력전압은  $\Delta-\Delta-Y$  변압기의 구성되어 있으므로 전압의 위상차는  $30^\circ$ 가 발생한다. 즉, 전압 파형의 주기  $T$ 는  $\pi/6$ 가 된다. 따라서 출력 전압은 식(2)로 표현할 수 있다.

#### 1. 서 론

현재 도시철도의 변전설비는 간단한 설비와 유지보수 증의 장점을 가지는 다이오드 이용한 시스템 주로 사용되고 있다. 하지만 다이오드를 이용한 도시철도 변전 설비는 전동차의 회생제동으로 발생하는 회생에너지를 재사용 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 회생인버터를 사용하거나, 에너지 저장장치를 이용한 시스템들이 연구되었으나, 낮은 회생율과 낮은 효율 등의 원인으로 시장진입에 어려움을 겪고 있다.[1][2][3]

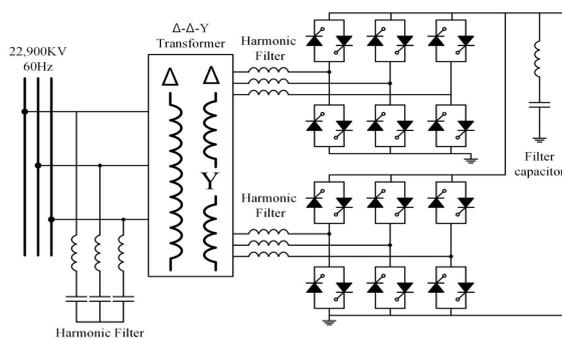
본 논문에서는 회생전력을 재사용하기 위하여 사이리스터를 이용한 양방향 더블컨버터를 제안하며, 더블컨버터의 운전특성과 부하에 따라 모드 변환이 이루어질 때의 더블 컨버터의 초기 점화각에 따른 출력 특성을 연구하며, 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

#### 2. 더블컨버터 시스템

##### 2.1 더블컨버터의 구조

<그림1>은 더블컨버터의 시스템 구조를 나타낸다. 더블컨버터 시스템의 변압기는  $\Delta-\Delta-Y$  결선을 가지는 3상 3권선 변압기이다. 더블 컨버터는 12펄스 위상제어 정류기 2대를 병렬로 연결된 구조를 가지고 있으며, 더블 컨버터의 각 모드에서 만들어지는 출력의 크기는 같고, 포워드 모드와 리버스 모드를 교번하여 사용하면서 더블 컨버터가 동작된다.

포워드 모드로 동작할 경우 전차선에 필요한 전력을 공급하고 부하량에 따라 가선전압의 제어가 가능하며, 잉여회생전력으로 인한 전차선의 가선전압이 상승할 경우 리버스 모드로 동작하여 회생전력을 교류모선으로 환원시켜준다.



<그림 1> 더블컨버터 시스템의 구조

##### 2.2 더블컨버터 출력 특성

더블컨버터 내의 포워드 모드 컨버터와 리버스 모드 컨버터는  $\Delta-\Delta-Y$  변압기에 병렬 연결된 12펄스 위상제어 정류기로 구성되어있다.

12펄스 위상제어 정류기는 3상 6펄스 위상제어 정류기 2대로 구성되어 있으며, 각각의 컨버터에는 같은 크기의 3상 입력이 인가되지만 위상차를 가진다. 따라서 각 컨버터의 출력 전압은 식(1)과 같다.

$$V_o = \frac{1}{T} \int_{T+\alpha}^{2T+\alpha} V_{m,l-l} \sin(\omega t) dt \quad (1)$$

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{2\pi}{6}+\alpha} V_{m,l-l} \sin(\omega t) dt \quad (2)$$

$$= \frac{6 V_{m,l-l}}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{2\pi}{6}+\alpha} \sin(\omega t) dt$$

식(2)를 정리하면 식(3)과 같이 정리 할 수 있다.

$$V_o = \frac{6(\sqrt{3}-1)V_{l-l}}{\pi} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{6}\right) \quad (3)$$

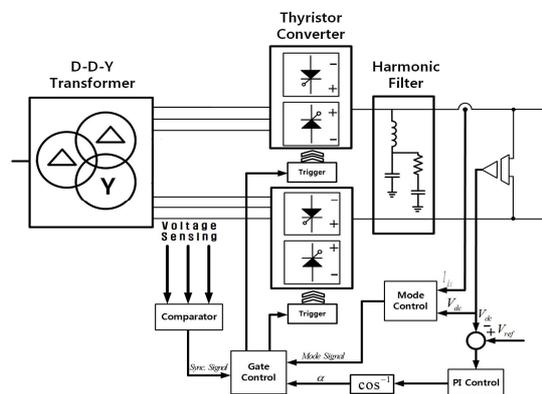
$$= \frac{6(\sqrt{3}-1)V_{l-l}}{\pi} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{12}\right)$$

#### 2.3 더블컨버터 제어

<그림 2>는 더블컨버터 시스템의 제어 구성도를 나타낸다. 더블컨버터로 들어가는 3상 전압의 영 전압을 검출하여 점화각  $\alpha$ 의 트리거 시점을 결정한다. 또한, 직류 전압  $V_{dc}$  및 직류 전류  $I_{dc}$ 의 감지를 통하여 더블컨버터의 모드의 결정과 점화각  $\alpha$ 를 계산하기 위한 PI제어기의 입력된다. 제어기는 알고리즘을 통해서 만들어진 신호를 통하여 각각 컨버터의 동작 조건에 맞는 점화각을 사이리스터에 트리거 시킨다.

더블컨버터의 제어의 목적은 제어 조건에 따라 포워드 모드 컨버터와 리버스 모드 컨버터를 교번 동작시키면서 전차선에 공급되는 가선전압을 일정하게 유지하는데 있다.

포워드 모드와 리버스 모드의 변환은 변경조건이 모두 만족해야하며, 단락 발생을 방지하기 위하여 서로 보완적으로 변환되어야한다. 직류 전압  $V_{dc}$ 가 최소 제어 기준전압  $V_{ref,min}$  전압 이하로 감소 할 경우에 더블컨버터는 포워드 모드로 동작하여 직류 전압  $V_{dc}$ 가 기준전압  $V_{ref}$  값으로 추종하도록 제어되며, 직류 전압  $V_{dc}$ 가 최대 제어 기준전압  $V_{ref,max}$  전압 이상으로 상승할 경우, 더블 컨버터는 리버스 모드로 동작하여 기준전압  $V_{ref}$  값이 되도록 제어된다. 모드의 변환은 전압의 히스테리시스 밴드를 통하여 급격한 모드 변환이 이루어지지 않도록 한다.

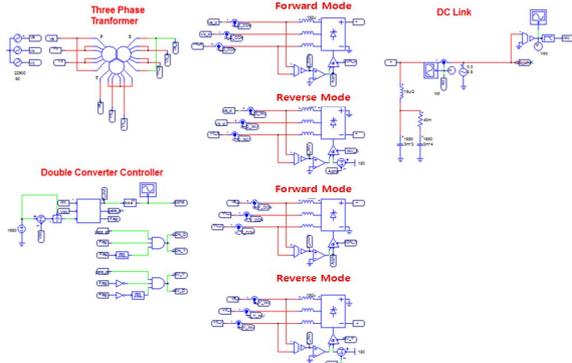


<그림 2> 더블컨버터 시스템 제어 구성도

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 초기 점호각에 따른 응답

부하에 따라 더블 컨버터가 모드 변환이 이루어 질 때, PI 제어기의 히스테리시스 밴드 구간 내에서 누적인 에러에 의한 오버슈트를 방지하고 직류 전압  $V_{dc}$ 가 최대한 빠르게 지령 전압  $V_{ref}$ 를 추종하기 위해서는 초기 점호각의 선정이 중요하다. 따라서 초기 점호각 선정에 따른 더블 컨버터의 모드 변환의 출력 특성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 구성도는 <그림 3>과 같으며, 시뮬레이션은 <표 1>와 동일한 사양으로 수행하였으며, PI 값은 더블 컨버터 사이에 단락을 방지하기 위하여 최대 0.9, 최소 0.1로 제한하였다.



<그림 3> 시뮬레이션의 구성도

<표 1> 시뮬레이션 사양

	항목	값
변압기	결선	$\Delta-\Delta-Y$
	입력 및 출력 주파수	60Hz
	1차측 입력전압( $V_{AC}$ )	3상 380V
	2차측 $\Delta$ 결선 출력 전압( $V_{DC}$ )	3상 87.5V
	3차측 Y 결선 출력 전압( $V_{DC}$ )	3상 87.5V
	변압기 권선비	$380 : 87.5 : 87.5 / \sqrt{3}$
더블 컨버터	용량	5kVA
	출력 전압	DC 80V
더블 컨버터 제어기	지령 직류 전압	80V
	Forward Mode	$V_{dc} < 75V \ \&\& \ I_{dc} > 2A$
	Reverse Mode	$V_{dc} > 85V \ \&\& \ I_{dc} < -2A$
	영전류 히스테리시스 밴드	$-1A < I_{dc} < 1A$

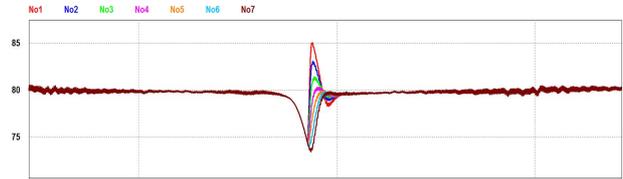
#### 3.2 모드 전환 특성

<표 2>는 포워드 모드 및 리버스 모드 변환이 이루어질 때의 시뮬레이션에 적용한 초기 점호각을 나타내며, <그림 4>는 초기 점호각에 따른 포워드 모드로의 변환시 특성 그래프를 나타낸다. 포워드 모드로 변환 될 때, 초기 점호각이 클수록 직류 전압  $V_{dc}$ 가 지령 전압  $V_{ref}$ 를 느리게 추종하기 때문에, 최저전압이 더 낮아지며 오버슈트는 특성을 가지고 있으며, 초기 점호각이 작을수록 빠른 응답속도를 가져 최저전압을 개선시킬 수 있지만, 오버슈트 때문에 순간적인 전압 상승으로 인하여 직류 전압이 불안정해지며, 정상상태에 도달하는 시간이 느려진다.

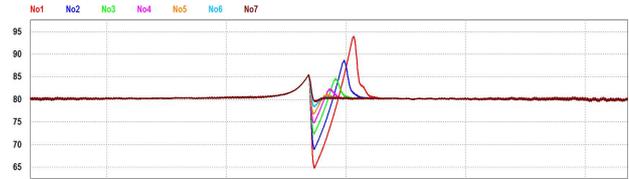
<그림 4>에서도 알 수 있듯이, 초기 점호각 70°를 가질 때, 빠른 응답속도와 전압변동률이 가장 작으면서 직류 전압  $V_{dc}$ 가 지령 전압  $V_{ref}$ 를 가장 잘 추종한다.

<표 2> 포워드 / 리버스 모드 초기 점호각

No	포워드 모드		리버스 모드	
	점호각	PI Value	점호각	PI Value
1	58°	0.5299	130°	0.6427
2	62°	0.4694	134°	0.6946
3	68°	0.4067	138°	0.7431
4	70°	0.3420	142°	0.7880
5	74°	0.2756	146°	0.8290
6	78°	0.2079	150°	0.8660
7	82°	0.1391	154°	0.8987



<그림 4> 초기 점호각에 따른 포워드 모드 변환 특성



<그림 5> 초기 점호각에 따른 리버스 모드 변환 특성

### 4. 결론

본 논문에서는 회생에너지를 재사용 할 수 있는 더블 컨버터의 제어에 대하여 제시 하였다. 또한 더블 컨버터의 모드 변환시 초기 점호각의 변화만으로 출력 특성을 향상 시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

부하 등의 조건에 더블 컨버터의 모드 전환시 안정적으로 빠르게 기준 전압을 추종할 수 있는 알고리즘에 관하여 추가적으로 연구 할 필요성이 있다.

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 철도기술연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(14RTRP-B091404-01)  
 본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 지원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20134030200320)입니다.  
 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A2A2A011003368)

#### [참 고 문 헌]

- [1] Yasunao Sekijima, Masayuki Inui, Yukitaka Monden, Hiroyuki Nishikawa, "Application Study of Electric Double Layer Capacitor on regenerative braking for DC railway system", IEE Japan, pp.195-196, 2004
- [2] Jun-Gu Kim, Jae-Hyung Kim, Kee-Hyun Cho, Chung-Yuen Won and Yong-Ki Kim, "Regenerative Inverter System for DC Traction Substation with Voltage Drop Compensation Mode", 電力電子學會論文誌, 213-220, 2007.
- [3] David J. Perreaul, John G. Kassakian, "Effects of Firing Angle Imbalance on 12-Pulse," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 10, No. 3, MAY 1995.