

# 교류 입력 전압 변동에 따른 사이리스터 듀얼 컨버터의 출력 특성 개선을 위한 알고리즘 개발

## Algorithm Development for Improving Output Characteristics of Thyristor Dual Converter with AC Input Voltage Variation

김 성 안\* · 한 성 우\*\* · 조 윤 현†  
(Sung-An Kim · Sung-Woo Han · Yun-Hyun Cho)

**Abstract** - Electric energy is consumed or regenerated according to an operation of electric rail cars in urban railway power substations. A thyristor dual converter system is used to deal with the electric energy. Since the AC input voltage of power substations is  $22.9\text{kV} \pm 10\%$ , the magnitude of the AC voltage fluctuates according to load conditions, so the secondary side voltage of the DDY transformer also fluctuates. In the thyristor dual converter, the response characteristics of the DC output voltage and the DC output current are changed based on an initial firing angle in the cross mode conversion between the forward mode and the reverse mode. Therefore, this paper proposes the initial firing angle tracking algorithm considering fluctuation of the AC input voltage. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by a simulation compared with the conventional algorithm.

**Key Words** : Thyristor dual converter, Initial firing angle, AC input voltage variation, Voltage control, Forward/reverse mode

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 온실가스의 배출을 감소시키기 위해서 기존 시스템의 고 효율화에 대한 규약이 강화됨에 따라 그에 따른 연구의 필요성이 강조되고 있다. 경제부분별 온실가스 감축 목표량의 34%로 가장 많은 부분을 차지하는 수송 분야에서도 온실가스 감축을 위한 연구가 요구되고 있다[1]. 수송 분야인 도시 철도에서는 변전설비 및 전동차의 온실 가스 배출량 감소와 운전 효율 향상을 위해서 전동차 제동에서 발생하는 회생에너지를 이용하여 에너지를 저장하거나 역사 전기설로 공급하여 재사용한다. 전동차의 제동은 회생 제동과 공기 제동을 이용한 혼합 제동을 적용하고 있다. 최근 회생 제동 시스템의 기술이 발달함에 따라 공기 제동의 가동시간을 줄이고 회생 제동 가동 시간을 증가시키는 추세이다. 에너지를 저장하는 시스템은 배터리 저장 시스템, 초전도 저장 시스템, 플라이휠 저장 시스템 및 울트라 커패시터를 이용한 저장 시스템이 있다. 그러나 이 시스템들은 회생률이 3~7%로 낮으며 유지보수 비용 및 설치 공간 증가가 발생하는 단점 있다. 역사 전기설로 재공급하는 시스템은 IGBT와 사이리스터를 이용한 시스템으로 구분된다. IGBT를 이용한 시스템은

용량에 한계로 인하여 회생률이 3~7%로 낮으며 용량 증대를 위해서는 시스템 간 병렬로 구성해야 하므로 설치 공간이 증가되어야 하는 단점이 있다[2,3].

사이리스터를 이용한 듀얼 컨버터 시스템은 동일 공간 대비 IGBT를 이용한 시스템보다 대용량이므로 대전력분야인 도시철도에 적합하다. 사이리스터 듀얼 컨버터는 전동차 운전 상태에 따라 기동 혹은 역행일 때는 포워드 모드로 동작하며 타행일 때는 리버스 모드로 동작한다[4]. 사이리스터 듀얼 컨버터의 제어 기법은 사이리스터 듀얼 컨버터의 포워드 모드와 리버스 모드 전환 시의 가선 전압의 응답 특성을 향상시키는 제어 기법[5-7], 사이리스터 듀얼 컨버터의 DDY 변압기의 2차측과 연결되는 D형 및 Y형 듀얼컨버터의 불균형 전류 방지 제어 기법[8, 9], 두 대의 사이리스터 듀얼 컨버터의 병렬 제어 기법[10, 11], 두 대의 사이리스터 듀얼 컨버터의 병렬 운전에서의 불균형 전류 보상 제어 기법[12], 세 대의 사이리스터 듀얼 컨버터의 병렬 운전 제어 기법[13,14], 사이리스터 듀얼 컨버터가 설치된 역사 간의 병렬 운전 제어 기법[15]으로 연구 되었다.

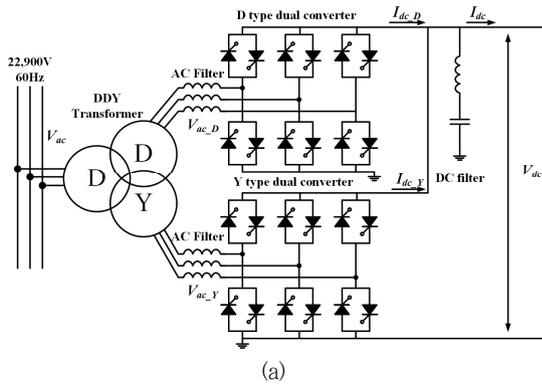
포워드 모드와 리버스 모드 전환 시의 가선 전압의 응답은 가선전압의 DC 필터의 임피던스와 부하 전류의 기율기에 따라서 최적의 초기 점화각 값이 달라진다. [7]에서는 초기 점화각 추종 알고리즘을 통해서 가선 전압의 응답 특성을 개선시켰다. 그러나 실제 시스템에서 교류 입력 전압의 허용 범위 기준 전압  $\pm 10\%$ 를 고려하지 않았다. 그러므로 본 논문에서는 교류 입력 전압의 변동에 따른 모드 전환 시의 가선전압의 응답 특성을 분석하고 개선시키기 위한 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea.  
E-mail: yhcho@dau.ac.kr

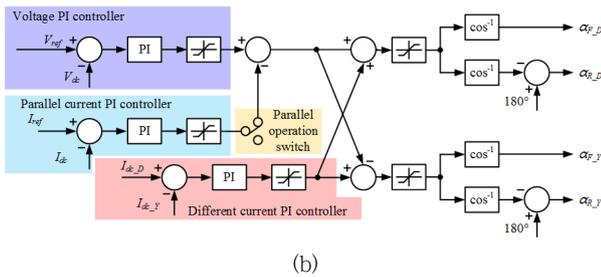
\* Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea.

\*\* R&D Center, Busan Transportation Corporation, Korea.

Received : July 17, 2017; Accepted : August 21, 2017



(a)



(b)

그림 1 사이리스터 듀얼 컨버터의 구성과 제어 블록도 (a) 12펄스 사이리스터 듀얼 컨버터 (b) 전압 및 전류 제어 블록도

Fig. 1 Configuration and control block diagram of thyristor dual converter (a) 12 pulse thyristor dual converter (b) Voltage and current control block diagram

리즘의 유효성은 성능 비교를 기반으로 시뮬레이션을 통해서 증명한다.

### 2. 사이리스터 듀얼 컨버터의 전압 및 전류 제어

사이리스터 듀얼 컨버터의 평균 출력 전압은 선간 전압과 점호각의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$V_{dc} = \frac{2\sqrt{3} V_{ac}}{\pi} \cos\alpha \quad (1)$$

여기서,  $V_{ac}$ 는 D-DY 변압기의 2차측 선간전압의 실효값,  $\alpha$ 는 사이리스터의 점호각을 나타낸다. 그림 1 (a)는 12펄스 사이리스터 듀얼 컨버터를 나타내며 D-D-Y변압기, AC 필터, 변압기의 2차측에 각각 연결된 D형 듀얼 컨버터와 Y형 듀얼 컨버터 및 DC 필터로 구성된다.  $V_{dc}$ 와  $I_{dc}$ 는 듀얼 컨버터의 DC 출력 전압과 DC 출력 전류이고  $I_{dc,D}$ 와  $I_{dc,Y}$ 는 D형 듀얼컨버터와 Y형 듀얼 컨버터의 DC 출력 전류를 나타낸다. 그림 1(b)는 병렬 운전 제어 기법을 적용한 듀얼 컨버터의 전압 및 전류 제어 블록도를 나타낸다.  $V_{ref}$ 와  $I_{ref}$ 는 지령전압과 병렬 운전시의 지령전류,  $\alpha_{F,D}$ ,  $\alpha_{R,D}$ ,  $\alpha_{F,Y}$ ,  $\alpha_{R,Y}$ 는 D형 듀얼 컨버터의 포워드 모드에서의 점호각, D형

듀얼 컨버터의 리버스 모드에서의 점호각, Y형 듀얼 컨버터의 포워드 모드에서의 점호각 및 Y형 듀얼 컨버터의 리버스 모드에서의 점호각을 각각 나타낸다.

PI 제어기는 전압 제어기, 차 전류 제어기 및 병렬 전류 제어기로 구성된다. 전압 PI 제어기는 듀얼 컨버터의 전압을 지령전압과 동일하게 유지하기 위해서 적용되며 차 전류 제어기는 D형과 Y형 듀얼 컨버터의 전류 불균형을 방지하기 위해서 적용되고 병렬 전류 제어기는 전차선의 부하 전류량에 따라 사이리스터 듀얼 컨버터간의 병렬 운전을 위해서 적용된다[15].

### 3. 사이리스터 듀얼 컨버터의 모드 전환 제어

그림 2와 표 1은 부하 전류에 따른 사이리스터 듀얼 컨버터의 동작 파형 및 모드 선택기의 조건을 나타낸다. 전동차의 운전 상태에 따라 부하의 전력 공급과 회생 에너지가 발생한다. 그에 따라  $V_{dc}$ 와  $I_{dc}$ 를 이용하여 모드 전환 조건을 결정한다[14]. 주 회로에 역전류의 인가 혹은 유지전류 이하로 떨어질 때까지 통전 상태를 유지하는 사이리스터의 동작 특성을 고려하여 영 전류 구간을 보장하기 위한 히스테리시스 밴드 구간을 설정하였다.

사이리스터 듀얼컨버터의 모드 선택기의 조건에서  $V_{on}$ 과  $I_{on}$ 은 컨버터를 ON시키기 위한 전압 및 전류 히스테리시스 밴드의 값이며  $V_{ref}$ 의 2.5% 및 부하전류 정격 값  $I_{rated}$ 의 4%로 선정하였다.  $V_{off}$ 와  $I_{off}$ 는 컨버터를 OFF시키기 위한 전압 및 전류 히스테리시스 밴드의 값이며  $V_{ref}$ 의 6.25% 및  $I_{rated}$ 의 1.5%로 선정하였다.

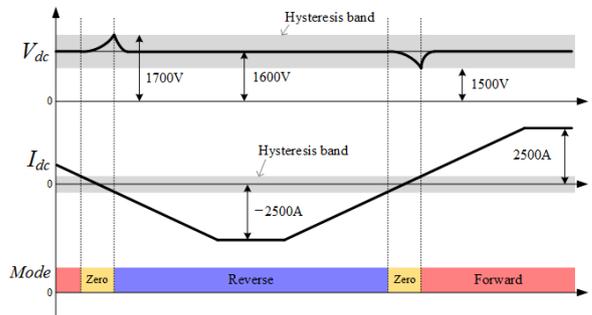


그림 2 사이리스터 듀얼 컨버터의 동작 파형

Fig. 2 Operation waveform of thyristor dual converter

표 1 모드 선택기의 조건

Table 1 Mode selector conditions

Mode		Condition
Con. ON	Forward mode ON	$I_{dc} > I_{on} \mid V_{dc} < V_{ref} - V_{on}$
	Reverse mode ON	$I_{dc} < -I_{on} \mid V_{dc} > V_{ref} + V_{on}$
Con. OFF	Forward mode OFF	$!F_{for} \ \& \ !F_{rev} \ \& \ (I_{dc} < I_{off} \ \& \ V_{dc} > V_{ref} + V_{off})$
	Reverse mode OFF	$!F_{for} \ \& \ !F_{rev} \ \& \ (I_{dc} > -I_{off} \ \& \ V_{dc} > V_{ref} - V_{off})$

$F_{for}$ 와  $F_{rev}$ 는 포워드 모드와 리버스 모드의 동작상태 신호를 나타낸다.

### 4. 초기 점화각 추종 알고리즘

#### 4.1 기존 초기 점화각 추종 알고리즘

사이리스터 듀얼 컨버터의 모드 전환 시의 가선전압용 DC필터의 임피던스와 부하의 전류 기울기에 따라 최적 초기 점화각이 달라진다. 실제 시스템에서는 임피던스의 측정 오차로 인해 실험적으로 초기 점화각을 선정한다[4]. 실험적 선정은 시간적인 소비가 크기 때문에 최적의 점화각을 추종하기 위한 알고리즘이 제안되었다[7]. 그림 3은 기존의 초기 점화각 추종 알고리즘을 적용한 사이리스터 듀얼 컨버터의 모드 전환 순서도를 나타낸다. 알고리즘의 대한 자세한 내용은 [7]에 언급되어 있다.

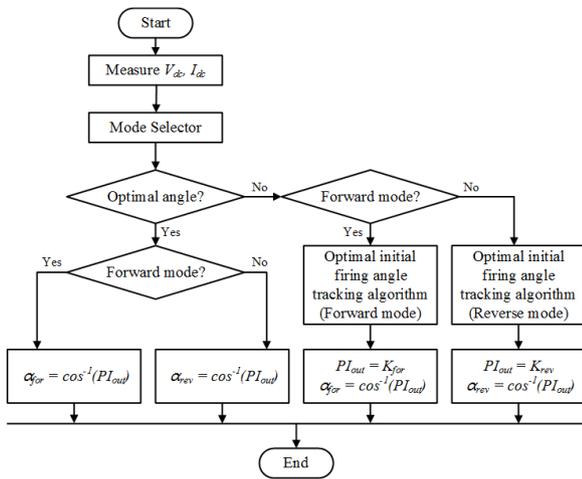


그림 3 기존 초기 점화각 추종 알고리즘  
Fig. 3 Conventional initial firing angle tracking algorithm

#### 4.2 기존 초기 점화각 추종 알고리즘의 문제점

도시 철도 변전 설비에서 교류 입력 전압은 전력 소비량에 따라 전압 변동을 가지게 된다. 그 범위는 기준전압±10%이다. 사이리스터 듀얼 컨버터의 모드 전환 시의 초기 점화각은 수식 (1)을 정리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{\pi V_{dc}}{2\sqrt{3} V_{ac}}\right) = \cos^{-1}(PI_{out}) \quad (2)$$

여기서,  $PI_{out}$ 은 전압 PI 제어기의 출력 값이다. 초기 점화각은 선간 전압의 함수이므로 선간 전압의 변동에 따라 달라짐을 확인할 수 있다. 그러나 기존의 최적 점화각 추종 알고리즘은 교류 입력 전압의 변동을 고려하지 않았기 때문에 실제 시스템에서 기준전압±10% 만큼의 변동이 발생하는 경우 가선 전압 및 전류의 응답 특성이 나빠진다. 그러므로 교류 입력 전압의 변동을 고려

한 개선된 알고리즘이 요구된다.

#### 4.3 제안하는 초기 점화각 추종 알고리즘

그림 4는 수식 (2)에서  $V_{ac}$ 의 변화에 따른 초기 점화각  $\alpha$ 와 전압 PI 제어기의 출력 값  $PI_{out}$ 의 관계를 나타낸다.  $PI_{out}$ 의 단위는 단위법(Per unit : PU)으로 나타내었다.  $\alpha$ 는 선간전압에 비례하여 증가하고  $PI_{out}$  값은 감소하는 관계를 가진다. 기존의 초기 점화각 추종 알고리즘을 통해 결정된 점화각  $\alpha_c$ 에 교류 입력 전압의 변동이 없을 때의 점화각  $\alpha_{ac}$ 에 대한  $n\%$  만큼 변동하였을 때의 점화각  $\alpha_{ac \pm n\%}$ 의 비를 적용하면 모드 전환 시 전압과 전류의 오버슈트와 언더슈트를 억제시킬 수 있다. 따라서 선간 전압 변동에 따른 최적의 초기 점화각은 다음과 같이 표현할 수 있다.

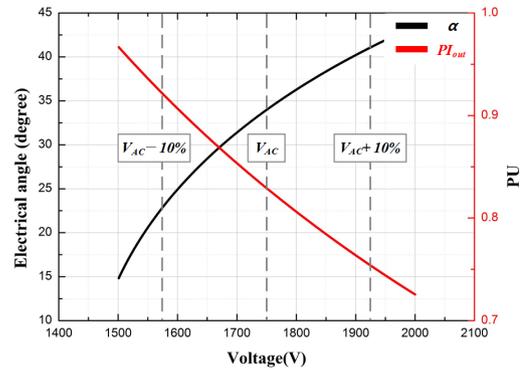


그림 4 선간 전압의 변화에 따른 점화각과 전압 PI 제어기 출력 값의 관계  
Fig. 4 Relation between firing angle and voltage PI controller according to line to line voltage

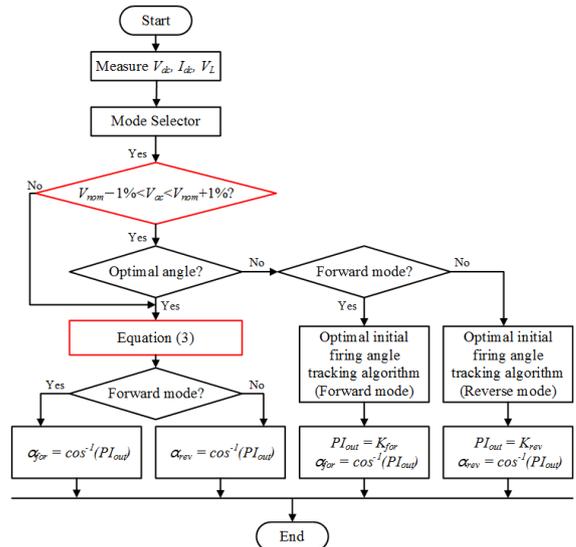


그림 5 제안하는 초기 점화각 추종 알고리즘  
Fig. 5 Proposed initial firing angle tracking algorithm

$$\alpha_v = \alpha_c \times \frac{\alpha_{ac \pm n\%}}{\alpha_{ac}} \quad (3)$$

그림 5는 교류 입력 전압의 변동을 고려한 제안하는 초기 점호각 추종 알고리즘 순서도를 나타낸다. 컨버터가 동작하는 시점에서의 DDY 변압기의 2차측 전압  $V_{ac}$ 을 측정하여  $V_{nom}$ 에 저장하고 변동범위가  $\pm 1\%$  이내일 때 기존의 초기 점호각 추종 알고리즘을 수행한다. 초기 점호각이 결정되게 되면 수식 (3)을 기반으로  $V_{ac}$ 의 변동에 따라 최적의 점호각을 결정하게 된다. 최종적으로 포워드 모드와 리버스 모드에 따라 점호각을 사이리스터에 적용하고 전압 및 전류 PI 제어를 이용하여 가선 전압 및 전류를 안정화시킨다.

## 5. 시뮬레이션

### 5.1 시뮬레이션의 구성

표 2는 12펄스 사이리스터 듀얼 컨버터의 사양을 나타낸다. 변압기는 3상 DDY 결선 방식으로 입력 교류 전압은 전압 변동을 고려하여  $22.9kV \pm 10\%$ , 변압비는  $22900 : 1700 : 1700/\sqrt{3}$ , 출력 교류 전압은  $1750V \pm 10\%$ 이다. 사이리스터 듀얼 컨버터의 용량은 4.2MW, 가선 전압의 지령 전압은 1600V, 정격 전류는

표 2 12 펄스 사이리스터 듀얼 컨버터의 사양

Table 2 Specifications of 12 pulse thyristor dual converter

Items	Unit	Value
Connection		DDY
Input AC voltage( $V_{ac}$ )	kV	3 $\Phi$ 22.9 $\pm 10\%$
Trans. ratio	V	22900 : 1750 : 1750/ $\sqrt{3}$
Output AC voltage ( $V_{ac,D}$ , $V_{ac,Y}$ )	V	1750 $\pm 10\%$
Rated power ( $P_d$ )	MW	4.2
Output voltage ( $V_{ref}$ )	V	1600
Rated current ( $I_{rated}$ )	A	$\pm 2500$
DC filter	$\mu F$	5000

$\pm 2500A$ , DC필터 커패시터의 값은  $5000\mu F$ 이다.

### 5.2 시뮬레이션 결과

#### 5.2.1 교류 입력 전압에 변동이 없는 경우

그림 7은 교류 입력 전압  $V_{ac}$ 에 변동이 없는 경우 기존의 초기 점호각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 포워드 모드와 리버스 모드 전환 시 임의의 초기 점호각  $\alpha_{for} = 64.0^\circ$ 와  $\alpha_{rev} = 100.5^\circ$ 를 적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc,D}$  및  $I_{dc,Y}$ 을 나타낸다. 리버스 모드 전환 시  $V_{dc}$ 의 오버슈트는 1702V로 히스테리시스 밴드 전압 1700V에 근접하지만 정상상태 도달하기 전에 1547V로 언더슈트가 발생한다. 이에 따라  $I_{dc,Y}$ 에 언더슈트가 -3271A 발생한다. 포워드 모드의 경우 언더슈트는 1481V로 히스테리시스 밴드 전압 1500V보다 19V 작고 느린 응답과 과도 상태에서 불안정한 전압 파형을 확인할 수 있다. 그 후 정상상태 도달하기 전에 1812V로 큰 오버슈트가 발생하고 불안정한 전압 파형이 나타남을 확인할 수 있다. 그에 따라  $I_{dc,D}$ 와  $I_{dc,Y}$ 에도 큰 오버슈트와 언더슈트가 나타난다. 그림 7 (b)는 기존의 초기 점호각 추종 알고리즘을 적용한 후 최종적으로 추종된 점호각 포워드 모드 전환 시  $\alpha_{for} = 76.58^\circ$  및 리버스 모드 전환 시  $\alpha_{rev} = 159.85^\circ$  적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc,D}$  및  $I_{dc,Y}$ 이다. 모드 전환 시의 전압과 전류에서 히스테리시스 밴드로 인한 오버슈트와 언더슈트를 제외하고는 큰 오버슈트와 언더슈트가 억제된 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 사이리스터 듀얼 컨버터의 출력 특성이 개선됨을 확인할 수 있다.

#### 5.2.1 교류 입력 전압에 변동이 있는 경우

그림 8은  $V_{ac}$ 의 전압이 +10% 변동(1925V)이 있을 때의 제안된 초기 점호각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 8(a)는 기존 알고리즘을 적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc,D}$  및  $I_{dc,Y}$ 를 나타낸다. 그림 7(b)와 비교하여 리버스 모드 전환 시  $V_{dc}$ 가 전압 히스테리시스 밴드에 의한 오버슈트의 크기보다 약 10V 커졌으며 포워드 모드의 경우  $V_{dc}$ 에 오버슈트의 크기

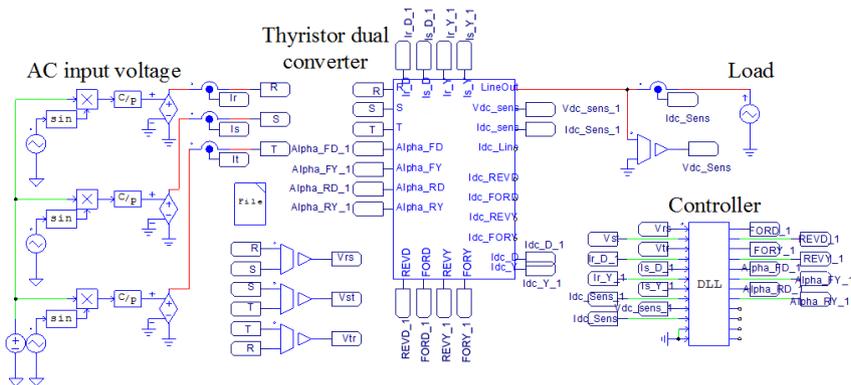


그림 6 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로  
Fig. 6 Simulation circuit using PSIM

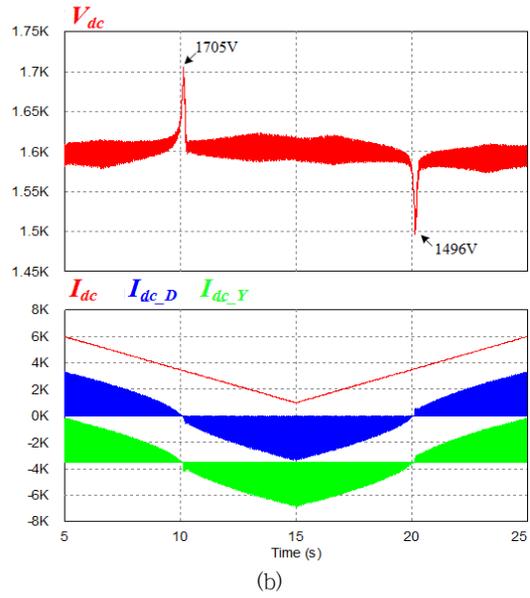
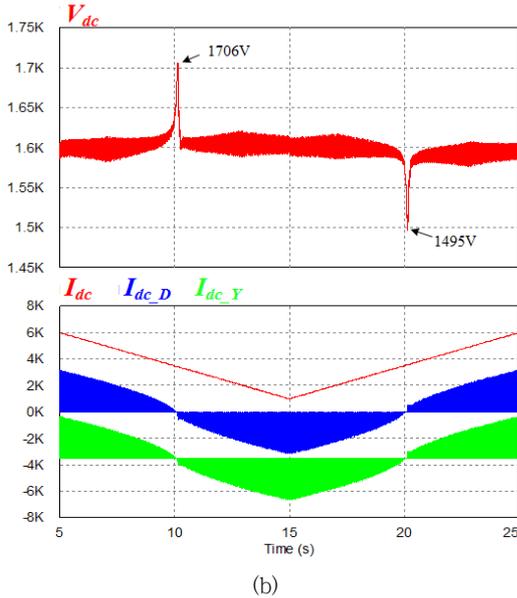
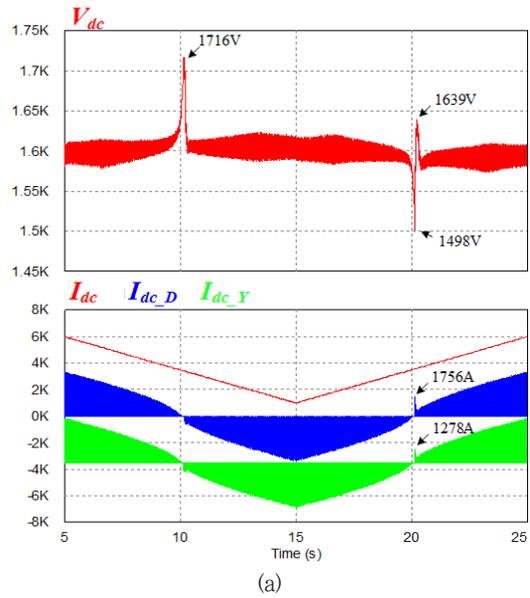
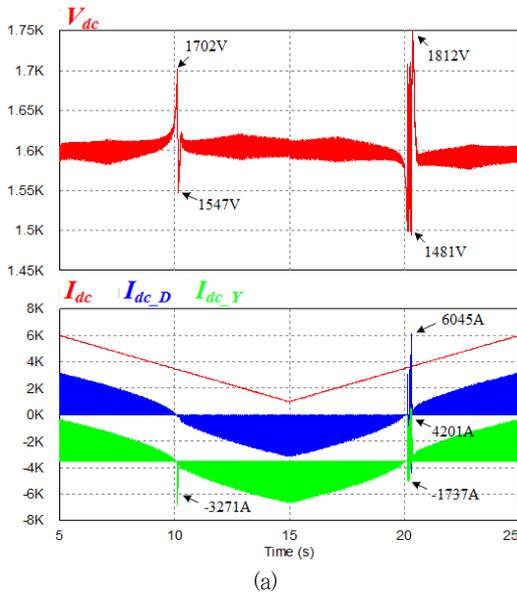


그림 7  $V_{ac}$ 가 변동이 없는 경우 기존의 초기 점화각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과 (a) 적용 전 (b) 적용 후

Fig. 7 Simulation results using conventional initial firing angle tracking algorithm without  $V_{ac}$  variation (a) before application (b) after application

그림 8  $V_{ac}+10\%$  일 때 제안된 초기 점화각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과 (a) 적용 전 (b) 적용 후

Fig. 8 Simulation results proposed initial firing angle tracking algorithm when  $V_{ac}+10\%$  (a) before application (b) after application

가 약 39V 발생하며 그에 따라  $I_{dc,D}$ 와  $I_{dc,Y}$ 에도 큰 오버슈트가 발생하게 된다. 그림 8 (b)는 제안된 알고리즘을 적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc,D}$  및  $I_{dc,Y}$ 를 나타낸다.  $V_{ac}$ 의 값에 따른 적합한 초기 점화각을 그림 4와 수식(3)을 통해 추종하여 적용하였다. 그림 8 (a)에서 발생하는 오버슈트와 언더슈트가 억제됨을 확인할 수 있으며 그림 7 (b)와 유사한 전압과 전류의 응답특성을 확인할 수 있다.

그림 9는  $V_{ac}$ 의 전압이 -10% 변동(1575V)이 있을 때의 제안된 초기 점화각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 9 (a)는 기존 알고리즘을 적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc,D}$  및  $I_{dc,Y}$ 를 나타낸다. 그림 7 (b)와 비교하여 리버스 모드 전환 시  $V_{dc}$ 에 언더슈트의 크기가 약 12V 크게 발생하며 그에 따라  $I_{dc,D}$ 와  $I_{dc,Y}$ 에도 오버슈트가 발생하고 포워드 모드 전환 시  $V_{dc}$ 가 전압 히스테리시스 밴드에 의한 언더슈트의 크기보다

## 6. 결 론

본 논문에서는 사이리스터 듀얼 컨버터의 교류 입력 전압 변동을 고려한 초기 점화각 추종 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법은 교류 입력 전압에 따른 초기 점화각과 전압 PI 제어기의 출력 값의 관계를 설명하고 기존의 초기 점화각 추종 알고리즘을 개선시켜 사이리스터 듀얼 컨버터의 모드 전환 시 발생하는 전압 및 전류의 오버슈트와 언더슈트를 억제시켰다. 제안된 제어 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해서 입증하였다.

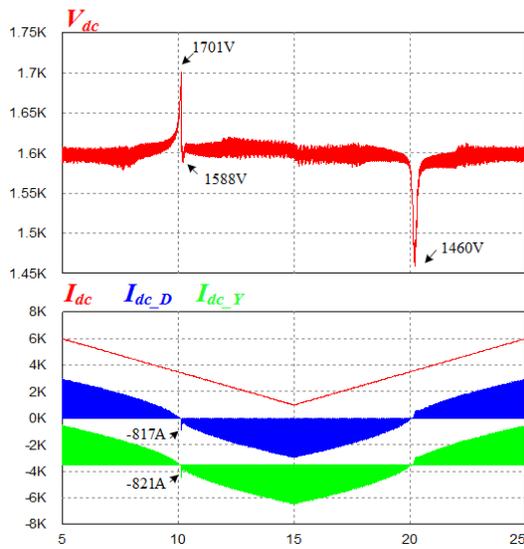
### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 지원으로 수행되었음 (과제번호 17RTRP-B088262-04).

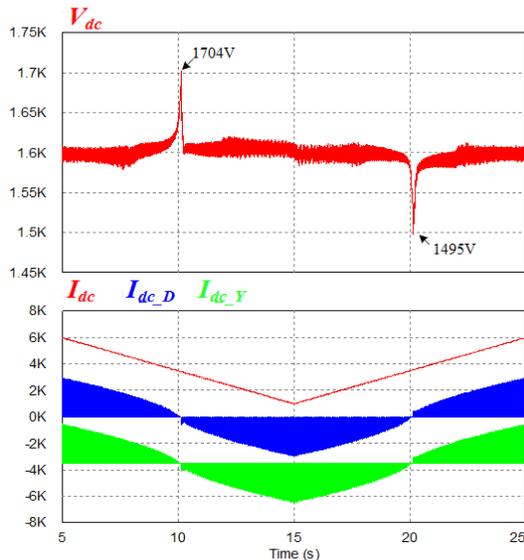
본 연구는 WC300 R&D는 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학연협력 기술개발사업(No. S2482820)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

### References

- [1] Sungho Bae, "Domestic Greenhouse Gas Reduction Policy," Journal of Energy Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 8-12, Mar. 2011.
- [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," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 13, No. 3, pp. 213-220, Jun. 2008.
- [3] Joorak Kim, Moonseob Han, Yong-Ki Kim and Jung-Hoon Kim, "Development and Test of Inverter for Regenerative Power of DC Traction Power Supply System," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 2, pp. 254-259, Apr. 2009.
- [4] Sung-Woo Han, Chang-Hee Lee, Young-Woo Kim and Dong-Ok Moon, "Control Algorithm of Thyristor Dual Converter Power System for Railway Power Substations," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 20, No. 6, pp. 573-579, Dec. 2015.
- [5] Seung-Sam Seo, Sung-Woo Han, and Gi-Sig Byun. "A Study on the Firing Angle at the Mode Conversion to Improve the Output Characteristics of the Double Converter for Urban Railway DC Power Supply," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 18, No. 6, pp. 533-542, Dec. 2015.
- [6] Sung-An Kim, Gab-Jin Han, Sung-Wo Han, and



(a)



(b)

그림 9  $V_{ac}$ -10% 일 때 제안된 초기 점화각 추종 알고리즘 적용 전·후의 시뮬레이션 결과 (a) 적용 전 (b) 적용 후

Fig. 9 Simulation results proposed initial firing angle tracking algorithm when  $V_{ac}$ -10% (a) before application (b) after application

약 35V 커진 것을 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 제안된 알고리즘을 적용하였을 때의  $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ,  $I_{dc\_D}$  및  $I_{dc\_Y}$ 를 나타낸다.  $V_{ac}$ 의 값에 적합한 초기 점화각을 추종하여 적용하였다. 그림 9(a)에서 발생하는 오버슈트와 언더슈트가 억제됨을 확인할 수 있으며 그림 7(b)와 유사한 전압과 전류의 응답특성을 확인할 수 있다.

Yun-Hyun Cho, "Initial firing angle control of 12-pulse parallel connected thyristor dual converter for urban railway power substations," IEEE Conference on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 1-6, 2016.

- [7] Sung-An Kim, Sung-Wo Han and Yun-Hyun Cho, "Initial Firing Angle Control of Parallel Multi-Pulse Thyristor Dual Converter for Urban Railway Power Substations," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 674-682, Mar. 2017.
- [8] Sung-Woo Han, Sung-Kyu Kim, Sang-Hyun Park, Chang-Hee Lee, and Hyo-Yol Yoo. "Development of Double Converter Substation with Control Algorithm and Parallel Operation Method for Electric Railway Power System," Spring Conference on The Korea Society for Railway, pp. 223-228, 2015.
- [9] Sung-An Kim, Gab-Jin Han, Sung-Woo Han and Yun Hyun Cho, "Study on Parallel Operation Control of Dual Converter for Urban Railway DC Power Substations," Summer Conference on The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 999-1000, 2016.
- [10] Choon-Seok Jang, Sung-An Kim, Hwan-Jin Kim, Gap-Jin Han, Yun-Hyun Cho. "A Study on Double Converter for Urban Transit Power Supply," Power Electronics Annual Conference, pp. 223-224, 2015.
- [11] Sung-Woo Han, Sung-An Kim, Yun-Hyun Cho, and Gi-Sig Byun. "A Studies for Sequential Mode Change Control Algorithm of the Parallel Dual Converter of Using Thyristor for Supplying the Urban Railway DC Power." The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 3, pp. 511-519, Mar. 2016.
- [12] S. A. Kim, S. W. Han, D. O. Moon, Y. W. Kim, C. H. Lee and Y. H. Cho. "A Study on the Compensation Method for Unbalance Parallel Operation of Parallel Connected Thyristor Dual Converters using Circulating Current." Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 21, No. 6, pp. 473-480. Dec. 2016.
- [13] Sung-An Kim, Sung-Wo Han, Yun-Hyun Cho, "A Study on Three Parallel Operation Control Algorithm of Thyristor Dual convertors for Urban Railway Substations," Summer Conference on The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 296-297, Oct. 2016.
- [14] Young-Woo Kim, Dong-Ok Moon and Chang-Hee Lee, "Parallel Control Algorithm of Thyristor Dual Converter Power System for DC Power Substation of Railway," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 22, No. 1, pp. 9-17, Feb. 2017.
- [15] Sung-An Kim, Sung-Woo Han and Yun-Hyun Cho, "A

Study on Three Parallel Operation Control Algorithm of Thyristor Dual Converter System for Urban Railway Substation," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 66, No. 2, pp. 459-467, Feb. 2017.

## 저 자 소 개



### 김 성 안 (Sung-An Kim)

1986년 1월 18일생. 2011년 동아대 전기공학과 졸업, 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2015년 동 대학원 전기공학과 박사수료, 2015년~현재 동 대학원 박사과정 및 전임연구원  
E-mail : y3k9s1@nate.com



### 한 성 우 (Sung-Woo Han)

1985년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2017년 부경대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(박사), 현재 부산교통공사 기술연구원 수석연구원  
E-mail : h111641@humetro.busan.kr



### 조 윤 현 (Yun-Hyun Cho)

1984년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1995년~현재 동아대학교 전기공학과 교수.  
E-mail : yhcho@dau.ac.kr