

# 빌딩용 직류배전 시스템의 3상 AC/DC 컨버터의 기동 시 과도상태 응답 개선

신수철<sup>1</sup>, 이희준<sup>2</sup>, 이정호<sup>3</sup>, 나종국<sup>4</sup>, 원충연<sup>†</sup>

## Transient Response Improvement at Startup of Three Phase AC/DC Converter for DC Distribution System in Building Applications

Soo-Cheol Shin<sup>1</sup>, Hee-Jun Lee<sup>2</sup>, Jung-Hyo Lee<sup>3</sup>, Jong-Kuk Na<sup>4</sup>, and Chung-Yuen Won<sup>†</sup>

**Abstract** - Most of the DC loads have had the sensitive characteristics electrically for input voltage. In this system, power converter is operated after connecting with DC loads to minimize the overshoot of the control voltage that may occur during connection of the loads. But whenever starting the power converter, parameters in circuit are different because power converter has been connected with diverse load types at each startup time. This is cause of a disadvantage to PI controller design of power converter. In this paper, the novel voltage control method using sliding mode control theory has proposed. This control method minimizes the overshoot of control voltage at startup of power converter. Despite the variations of the system parameters, the proposed voltage controller has fast response and robustness characteristics such as PI and sliding mode controllers. The proposed controller was applied to the three-phase AC/DC converter and each performance of controller was verified.

**Keywords:** DC distribution, AC/DC converter, sliding-mode control, soft start method

### 명명법

$X_1$	제어전압과 실제전압의 오차
$X_{10} \sim X_{40}$	전압 오차에 따른 슬라이딩 영역
$\alpha_X$	$X_1$ 영역의 Offset
$I_{qMax}^c$	슬라이딩 궤적에서의 기준전류의 최대 값
$i_{qSD\sigma 1 \sim 4}^{e*}$	각 슬라이딩 영역에 따른 기준전류의 크기
$i_{qSDPI}^{e*}$	슬라이딩 영역에서의 기준전류의 궤적
$i_{qLoad}^c$	컨버터의 부하 보상 값
$V_{dc}$	3상 AC/DC 컨버터의 제어 전압

### 1. 서 론

현대의 산업계에서 직류전원을 필요로 하는 부하는 전자 시스템의 증가와 더불어 꾸준히 증가하여 왔으며, 최근 전력전자 기술의 발전으로 직류 전력시스템에 대한 관심이 증가하고 있다.<sup>[1][2]</sup> 일반적인 빌딩의 경우 대부분의 부하들이 PC관련 부하와 가전 및 오피스 부하 등으로 이루어진 직류 부하들이며, 대부분의 교류 부하도 인버터와 같은 전력변환장치를 이용하여 전력을 소모하고 있다.<sup>[3][4][5]</sup> 직류 전력의 경우 역률이 항상 1로 유지되며, 전압의 주파수와 회전방향이 없으므로 회로의 해석이 용이하다. 또한 직류 출력을 갖는 신·재생 에너지원의 발전시스템과 용이하게 연계할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 교류용 에너지 저장 시스템의 부재로 인하여 교류시스템에서 UPS (Uninterruptible Power Supply)를 이용하여 국부적으로 이용되어 왔던 에너지 저장 시스템도 직류 시스템에서는 배터리를 연결하여 용이하게 구성할 수 있다.<sup>[6][7]</sup> 교류 전력 시스템에서 직류부하에 전력을 공급하기 위해서는 AC to DC변환과 DC to DC로 변환하는 2단계 전력변환 시스템이 필요하다. 상대적으로 직류 전력 시스템을 이용하여, 직류부하에 전력을 공급할 경우 DC to DC 변환을 하는 1단계 전력변환 장치만으로 시스템 구성이 가능하기 때문에

Paper number: TKPE-2013-18-2-4 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: woncy@skku.edu, College of Information and Communication Eng., Sungkyunkwan Univ.

Tel: +82-31-290-7115 Fax: +82-31-290-7179

<sup>1</sup> Dept. of Elec. and Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.

<sup>2</sup> Dept. of Elec. and Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.

<sup>3</sup> Dept. of Elec. and Computer Eng., Sungkyunkwan Univ.

<sup>4</sup> School of Photovoltaic System Eng., Sungkyunkwan Univ.

Manuscript received Sep. 14, 2012; accepted Dec. 18, 2012

효율 측면에서 유리한 장점을 갖는다.<sup>[2][8]</sup>

그림 1은 일반적인 빌딩의 교류배전 시스템과 직류배전 시스템의 전력변환 시스템을 비교한 그림이다. 직류배전 시스템은 기존의 3상 교류 배전 계통과 빌딩의 직류 배전계통을 연계하기 위한 3상 AC/DC 전력변환 장치를 필요로 한다. 3상 AC/DC 전력변환 장치는 교류 전력을 직류 전력으로 변환 하는 장치로 교류 전원을 이용하여 승압된 직류 전원을 얻을 수 있으며 교류 계통에 유효 및 무효전력을 제어할 수 있다.<sup>[4][9]</sup> 빌딩용 전력변환 장치의 경우 직류 배전 전압에 부하가 연결된 상태로 운전이 개시될 수 있기 때문에 직류전압에 오버슈트가 발생하면 전압에 민감한 전자 부하의 경우 치명적인 영향을 받을 수 있다.<sup>[10]</sup> 제어 전압의 오버슈트는 정상 상태에서 부하변화에 따라 발생하는 경우와, 전력변환기 초기 구동 시 시스템과 제어기에 의하여 발생하는 경우로 나뉠 수 있다. 전자의 경우에 의하여 발생하는 제어 전압의 진동 억제 방법은 꾸준히 연구되어 왔다.<sup>[11][12]</sup>

본 논문에서는 DC 배전용 전력변환 장치의 초기 운전 시 시스템 파라미터 및 부하의 변동에 강인한 비선형 제어기인 슬라이딩 모드 전압 제어기의 성능을 갖으며 정상상태에서 PI 제어기의 속응성을 갖는 전압 제어기를 제안하고, 이를 이용한 직류배전용 3상 AC/DC 컨버터의 soft start 운전 제어 방법을 제안 한다. 새로운 전압 제어기는 그림 2의 직류배전용 전력변환장치의 구성에서 3상 AC/DC 컨버터에 적용하였으며, 제안한 전압 제어기를 PI전압 제어기와 비교하고, 그 성능을 실험으로 검증 하였다.

## 2. 빌딩용 전력변환장치

### 2.1 빌딩용 전력변환 장치의 개요

빌딩용 직류배전시스템에 적용하기 위한 3상 AC/DC 컨버터는 교류전압을 직류전압으로 변환하여 빌딩에 직류전력을 공급한다. 직류전력을 이용하여 빌딩의 엘리베이터를 구동할 경우 회생에너지가 발생할 수 있으므로

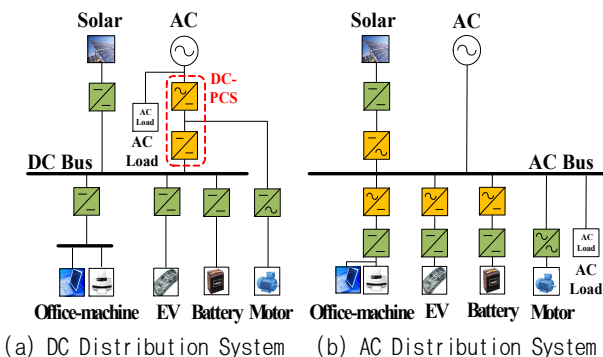


Fig. 1 Comparison of DC and AC power distribution system

교류계통과 양방향으로 전력을 제어할 수 있어야 한다. 이와 같이 양방향 전력제어가 가능한 시스템은 Building Integrated Photovoltaic System(BIPV)과 같은 신·재생 에너지 발전 시스템과 연계하여 빌딩의 에너지를 효율적으로 활용 할 수 있는 장점을 갖는다.

그림 2는 그림 1(a)의 DC-PCS(DC-Power Conditioning System)를 상세하게 표현한 것이다. DC-PCS는 3상 AC/DC 컨버터와 DC/DC 컨버터로 구성된다. 본 시스템에서 3상 AC/DC 컨버터의 입력 교류전압은 380[Vrms], AC/DC 컨버터의 직류 제어 전압은 650[Vdc], DC/DC 컨버터의 직류 제어 전압은 380[Vdc] 이다.

## 3. 슬라이딩 모드 제어기

Sliding Mode Control (SMC)은 기준궤적과 실제 궤적의 오차를 검출하여 설계된 경로에 복귀 하도록 스위칭을 변화시킴으로써 기준 궤적과 오차가 0으로 수렴하도록 제어한다. 슬라이딩 모드 제어기는 미리 정해진 슬라이딩 좌표 평면상의 궤적을 강제로 추종하도록 제어하기 때문에 선형 또는 비선형 시스템에서 파라미터 및 부하 변동에 강인한 제어 특성을 갖는다.<sup>[13]</sup> 하지만 제어 목표점에서 시스템에 진동을 유발하고 시스템이 무한루프에 빠질 우려가 있다. PI제어기의 경우 상대적으로 제어의 응답성이 빠르고, 제어 목표점에서 시스템에 진동을 최소화할 수 있는 장점이 있는 반면에 시스템의 파라미터 변화 또는 부하의 변동에 따라 제어 안정성을 확보하기 어려운 단점이 있다.

그림 3은 슬라이딩 모드 전압 제어 시 슬라이딩 영역에서의 기준 전류 궤적에 대한 시간영역에서의 기준전류 궤적과 제어 대상인 직류전압의 응답 파형이다. 그림 3의 (a)와 같은 슬라이딩 영역에서의 기준전류의 궤적을 시간영역에서 표현하면 그림 3의 (b)와 같은 기준 전류로 표현되며, 직류전압은 그림 3의 (c)와 같이 S 곡선으로 표현된다. 그러므로 슬라이딩 영역에서 그림 (a)와 같이 1차 방정식을 갖도록 기준전류를 제어하면, 그림 (c)와 같이 3차 방정식을 갖는 전압을 용이하게 제어 할 수 있다.

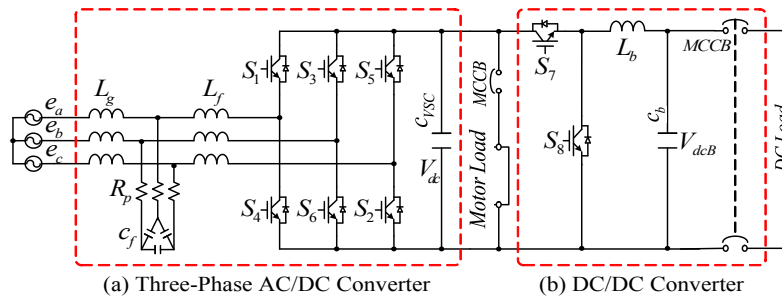


Fig. 2 Power Converters of DC power distribution system for building applications

### 4. 제안한 전력변환장치의 전압제어기

#### 4.1 PI 전압 제어기와 제안한 전압 제어기

그림 4는 전력변환기의 전압제어기 성능을 비교하기 위한 제어 블록 이다. PI 전압 제어기와 제안한 제어기의 성능을 비교하기 위하여 2가지 제어기의 운전 모드를 선택할 수 있는 soft start mode selection 블록을 가지고 있다.

① Anti-windup을 갖는 PI 전압제어기 : 안티와인드업을 갖는 PI 제어기는 잘 알려진 제어기로서 그림 5와 같다.

② 슬라이딩 궤적을 이용하는 제안한 전압제어기 : 순수한 슬라이딩 모드 전압제어기는 그림 3과 같이 슬라이딩 영역에서 제어전압의 오차에 대한  $q$ 축 전류의 슬

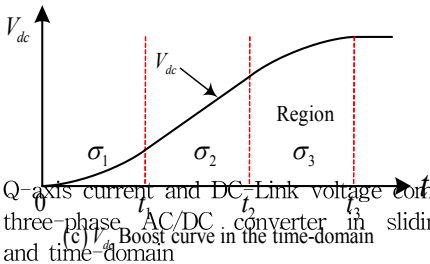
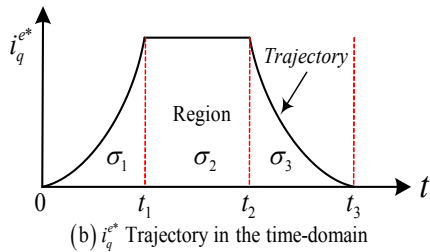
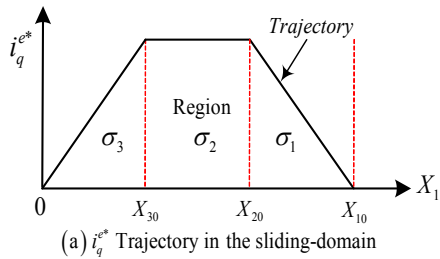


Fig. 3 Q-axis current and DC-Link voltage comparison of three-phase AC/DC converter in sliding-domain and time-domain

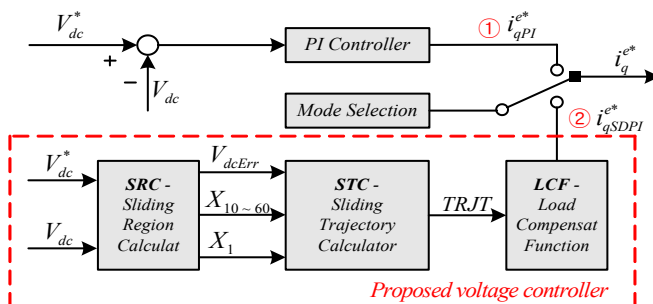


Fig. 4 Control blocks including two type voltage controller for comparison of each controller performance

라이딩 궤적을 설계하여 3상 AC/DC 컨버터의 전압제어기로 사용 한다. 그러나 제어 최종 목표점에서 전류 리플을 발생 시키는 특성을 갖는다. 제안한 전압 제어기는 슬라이딩 모드 전압제어기에서 슬라이딩 궤적만을 이용하는 PI 전압 제어기 이다. 그러므로 제안한 전압 제어기는 제어 목표점에서 순수한 슬라이딩 모드 제어기가 갖는 전류의 진동을 발생시키는 단점을 보완한다.

#### 4.2 3상 AC/DC 컨버터의 슬라이딩 궤적

그림 6은 슬라이딩 평면에서의 3상 AC/DC 컨버터의 기준전류 궤적을 나타낸다. 슬라이딩 평면에서의  $X$ 축은 제어전압의 오차로 식 (1)과 같다. 식 (2)는 슬라이딩 영역을 설정하기 위한 수식으로 제어전압이 완전한 S 곡선을 갖도록 식 (1)의 결과를 이용하여 각 영역을 3등분 하였다.  $Y$  축은 슬라이딩 영역에 따른  $q$ 축 전류의 기준값으로 식(3)과 같다. 식 (3)을 이용하여 각 영역의 기준 전류를 합성하면 식 (4)와 같이 모든 슬라이딩 영역에 대응하는 기준전류를 설계할 수 있다. 슬라이딩 영역에서 정의하지 않은 영역은 제어 불능 영역이기 때문에 슬라이딩 영역은 제어가 가능한 영역을 모두 포함 하도록 설계 한다.

3상 AC/DC 컨버터는 직류단에 부하가 결합되어 있는 경우 3상 AC/DC 컨버터를 운전하지 않더라도 IGBT의 다이오드를 통하여 부하에 전류를 공급한다. 그림 6의  $I_{qLoad}^e$  는 이를 슬라이딩 궤적에 보상하여 컨버터의 운전을 원활하게 수행 할 수 있도록 한다.

$$X_1 = V_{dc}^* - V_{dc} \tag{1}$$

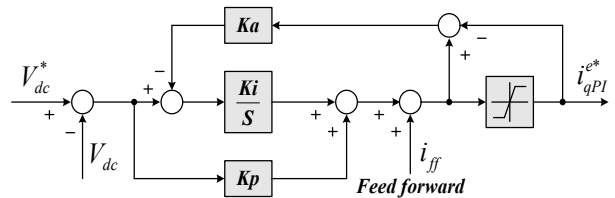


Fig. 5 PI voltage controller including anti-windup

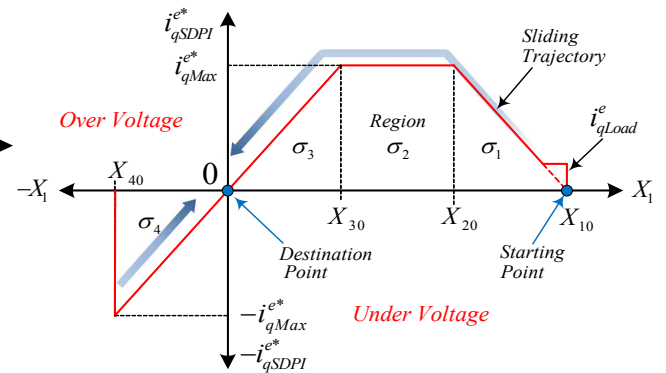


Fig. 6 Proposed voltage controller trajectory in sliding domain of three-phase AC/DC converter

$$\begin{aligned} X_{10} &= X_1 + \alpha_X \\ X_{20} &= X_{10} \times \frac{2}{3} \\ X_{30} &= X_{10} \times \frac{1}{3} \\ X_{40} &= -X_{30} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{qSDr1}^{e*} &= I_{qMax}^e \times \left(1 - \frac{X_1}{X_{10}}\right) \times \left(\frac{X_{10}}{X_{10} - X_{20}}\right) \\ i_{qSDr2}^{e*} &= I_{qMax}^e \\ i_{qSDr3}^{e*} &= I_{qMax}^e \times \frac{X_1}{X_{30}} \\ i_{qSDr4}^{e*} &= -\left(I_{qMax}^e \times \frac{X_1}{X_{40}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$i_{qSDPI}^{e*} = \sum_{n=1}^4 i_{qSDrn}^{e*} \quad (4)$$

**4.3 직류배전 시스템의 제어 알고리즘**

그림 7은 시뮬레이션과 실험에서 사용한 3상 AC/DC 컨버터의 제어 알고리즘 블록이다. 입력전압은 380[V] ±10[%] 범위 내에서 에서 정상 동작하도록 시스템을 설계하였다. 초기충전 회로는 커패시터 ( $C_{VSC}$ )가 방전되어 있을 때 커패시터로 입력되는 과전류를 방지하여 3상 AC/DC 컨버터의 IGBT 와 병렬구조로 결합되어 있는 Diode의 소손을 방지한다. 제어 블록은 슬라이딩 모드

(2) 제어기를 포함하는 직류 전압제어, 역률 제어, 계통의 위상각을 계산하는 Phase Lock Loop 블록, 슬라이딩 영역을 계산하는 슬라이딩 영역 계산기, 슬라이딩 궤적을 생성하는 슬라이딩 궤적 계산기, 부하 양을 보상하는 부하 보상 블록, 유·무효 전력을 계산하는 유·무효 전력 계산기, PI 전압 제어기와 제안한 제어기의 성능을 비교할 수 있도록 전압제어기를 선택할 수 있는 Soft Start Mode Selection 블록을 포함하고 있다. 또한 계통전원의 고장발생 시에 교류 계통 전압의 불 평형을 해석하기 위한 Positive Sequence 제어 블록을 포함하여, 역상분 전압의 크기를 계산하고 이를 이용하여 시스템 보호에 적용한다.

표 1은 시뮬레이션과 실험에 적용한 축소형 직류배전 시스템의 파라미터 이다. 시스템의 용량은 6[kW], 입력 전압은 3상 380[Vrms], 60[Hz]이며, 3상 AC/DC 컨버터를 통하여 제어하는 직류 전압은 650[Vdc], 컨버터의 스위칭 주파수는 10[kHz]이다.

**5. 시뮬레이션**

시뮬레이션에서 안티와인드업을 갖는 PI 제어기를 이용한 전압제어와 전류 리플이 제거된 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 전압제어의 성능을 비교 하였다.

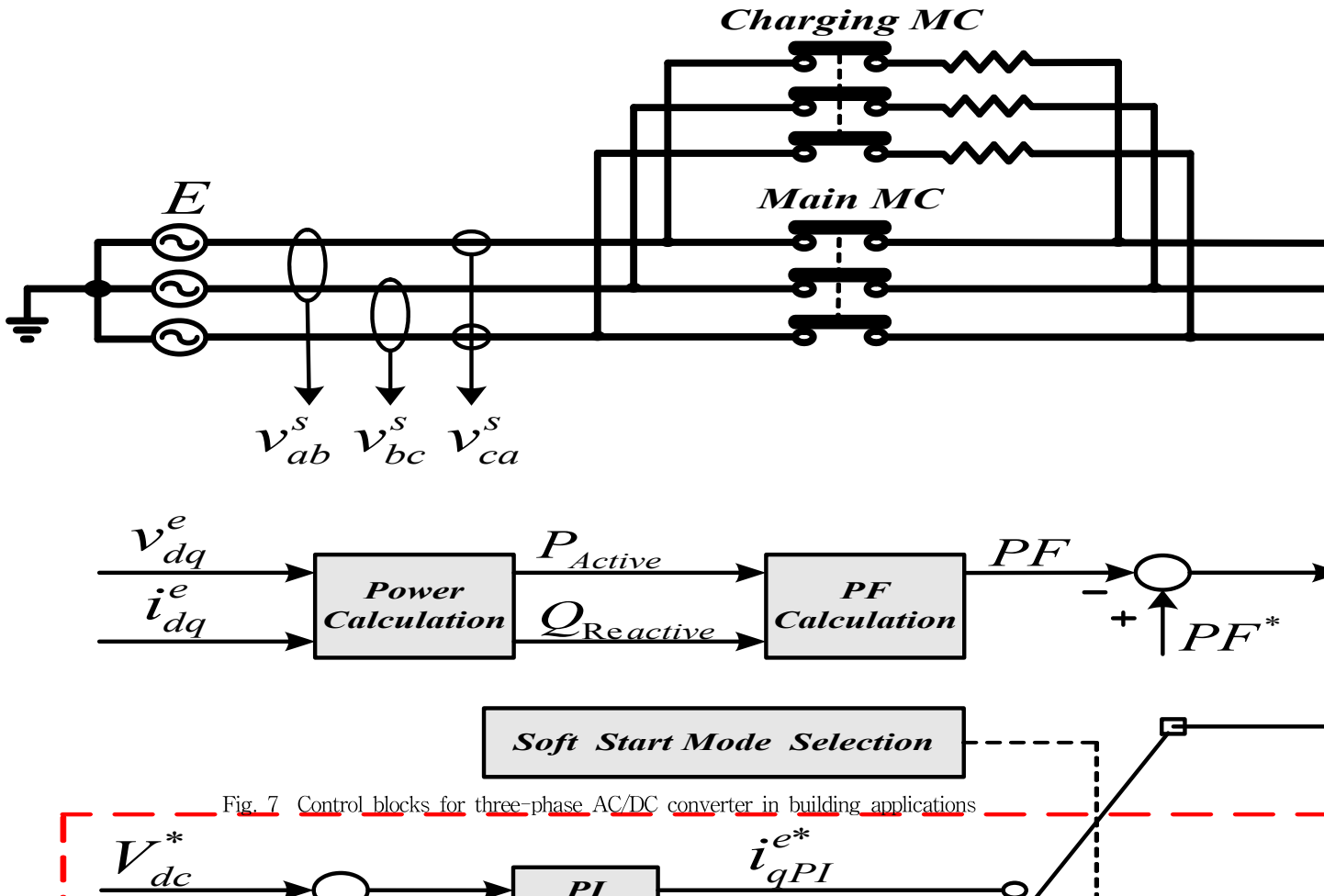


Fig. 7 Control blocks for three-phase AC/DC converter in building applications

Table 1 System parameters of experimental set-up for DC distributions

Parameter	Item	Value
Power	$P$	6[kW]
Grid voltage	$E$	380[V]
Grid current	$I$	9.12[A]
Grid frequency	$f_g$	60[Hz]
Switching frequency	$f_s$	10[kHz]
VSC maximum reference current	$i_{qMax}^*$	12.9[A]
VSC filter line inductance	$L_g$	400[μH]
VSC boost inductance	$L_f$	4[mH]
VSC filter Capacitance	$C_f$	50[μF]
VSC DC-Link capacitance	$C_{VSC}$	4700[μF]
VSC DC-Link Voltage	$V_{dc}$	650[V]
Load	$R$	70[Ω]

5.1 안티와인드업을 갖는 PI 전압제어기

그림 8은 PI 전압제어기를 이용한 3상 AC/DC 컨버터의 직류 전압과 q축 전류 파형이다. PI 전압 제어기를 이용할 경우 그림 8과 같이 제어 대상인 직류전압에 오버슈트가 발생할 우려가 있다.

그림 8에서 직류 전압이 제어 전압인 650[Vdc]에 도달 하였음에도 q축 전류는 여전히 양의 값으로 지령하

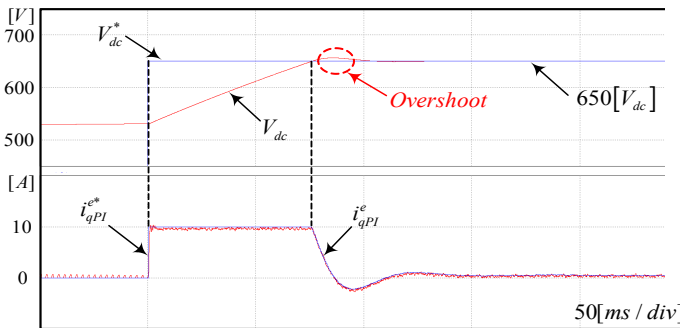


Fig. 8 Simulation results of the PI voltage control in the three-phase AC/DC converter

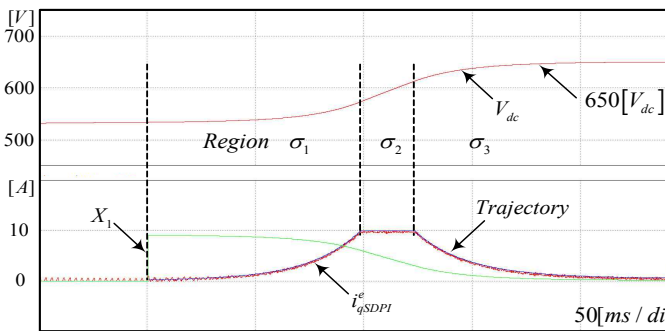


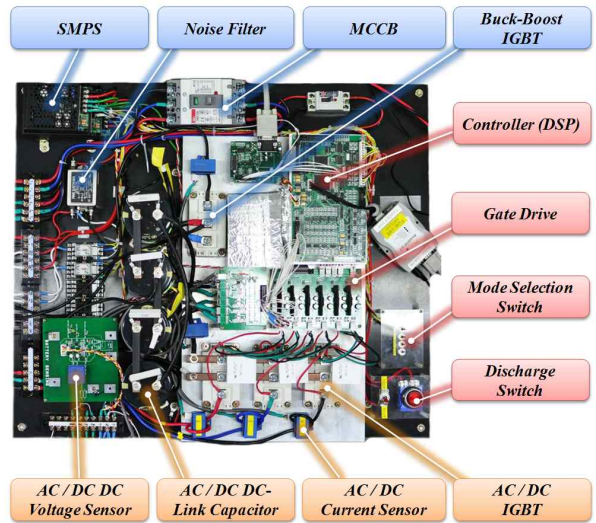
Fig. 9 Simulation results of proposed voltage controller using sliding-trajectory in the three-phase AC/DC converter

고 있는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 PI 제어기가 갖는 적분항의 영향으로 제어전압과 실제 전압의 오차가 음의 값을 갖는 경우에도 적분항의 값이 양의 값으로 크게 쌓여있는 경우 기준전류( $i_{qPI}^*$ )의 값을 짧은 시간 동안 여전히 양의 값으로 지령하기 때문이다. 이러한 경우 PI 제어기의 이득 값과 Anti-Windup 이득 값을 조정하여 최적화 할 수 있으나, 시스템의 파라미터 변동이나 부하 변동 또는 외란에 대하여 제어기의 재 튜닝이 필요하다.

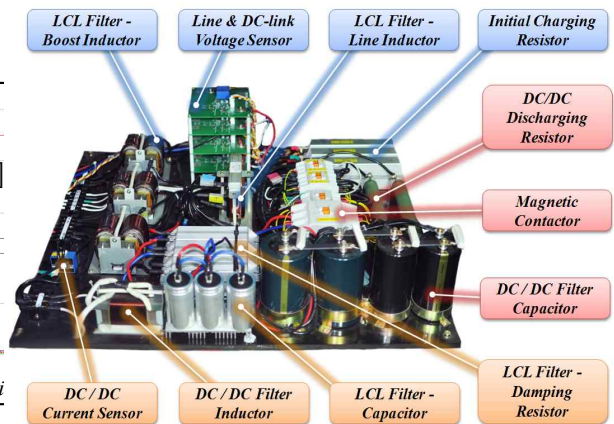
5.2 슬라이딩 궤적을 이용하는 제한한 전압 제어기

그림 9는 제한한 전압제어기를 이용한 3상 AC/DC 컨버터의 전압과 전류 파형이다.

그림 3의 (a)와 같은 슬라이딩 영역에서의 기준전류  $i_q^*$ 의 슬라이딩 궤적은 시간영역에서 그림 9의 기준 전류( $i_{qSDPI}^*$ )와 같은 파형으로 나타나고, 전압파형은 그림 9의 전압과 같이 표현됨을 알 수 있다. 기준전류  $i_{qSDPI}^*$ 는 제어전압이 목표 전압 값인 650[V]에 도달하기 전에 감소하여, 근본적으로 직류전압의 오버슈트를 방지한다.



(a) Control Circuit



(b) Power Circuit

Fig. 10 Experimental set-up for DC distribution system



### 6. 실험 결과

그림 10은 실험에 사용한 빌딩용 직류배전 시스템 축소 모델이다. 실험 장치의 하드웨어 구성은 그림 10과 같이 3상 AC/DC 컨버터와 비 절연형 양방향 DC/DC 컨버터가 결합된 형태이다. 그림 10의 (a)는 전력변환 장치의 주 제어회로 부분이며, 시스템을 제어하기 위한 DSP제어기, IGBT 구동을 위한 Gate Drive, 컨버터의 전류를 측정하는 센서류, 입출력 장치류, 3상 AC/DC 컨버터의 DC-Link, 제어기 및 센서 전원용 DC Power Supply 및 차단기류로 구성되어 있다. 그림 10의 (b)는 전력변환 장치의 전력회로 부분이며, 3상 AC/DC 컨버터에 적용한 LCL 필터와 초기충전회로, 전압 센서류, 컨버터의 DC-Link의 전류를 방전하기 위한 방전 회로 및 저항 등으로 구성되어 있다. 전력변환장치의 시스템 사양은 표 1과 동일하다.

#### 6.1 PI 전압 제어기 실험 결과

그림 11은 Anti-Windup을 갖는 PI 전압제어기를 사용하여 직류단 전압을 650[Vdc]로 제어하였을 때의 직류단 전압과 기준전류의 파형이다. 시뮬레이션 결과와 같이 PI 제어기의 적분기의 영향으로 제어 전압에 오버슈트가 발생할 수 있다. 적분 항을 포함하는 PI 제어기는 최종 제어 목표 값을 비교적 정확하게 제어할 수 있

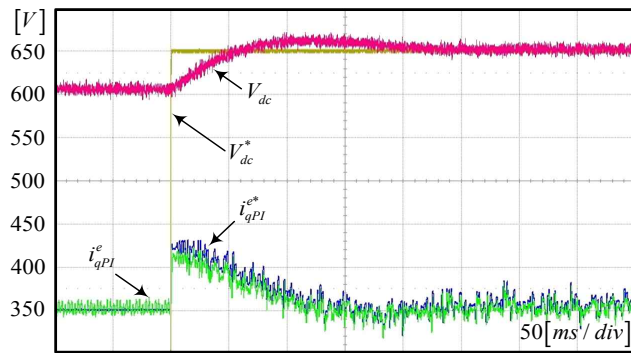


Fig. 11 Experimental results of the PI voltage control in the three-phase AC/DC converter

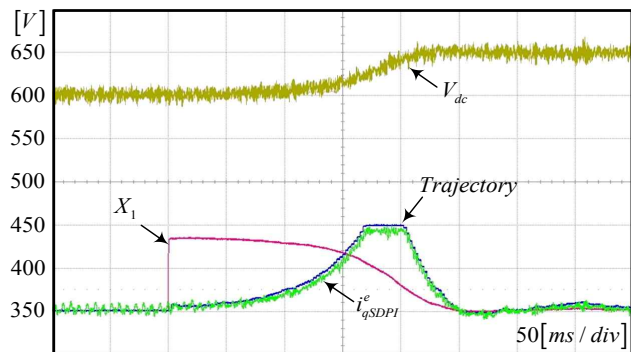


Fig. 12 Experimental results of DC voltage with q-axis current using proposed voltage controller in the three-phase AC/DC converter

으나 적분 항을 포함하는 한 근본적으로 제어대상의 오버슈트를 방지하기 어려운 단점이 있다.

#### 6.2 제안한 전압 제어기 실험 결과

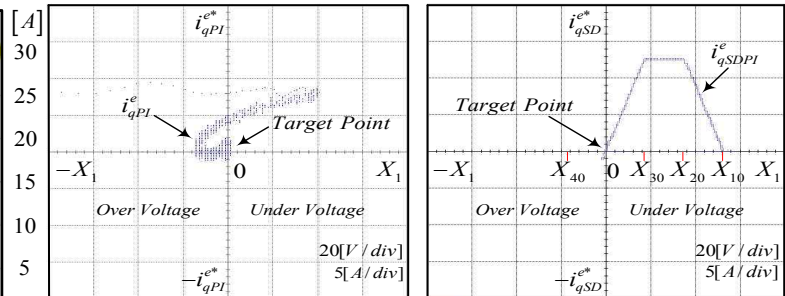
그림 12는 제안한 전압 제어기의 Sliding Region Calculator를 이용하여 q축 전류의 Trajectory를 계산하고, 이를 기준 전류로 이용하여 전압 전압제어를 수행하였을 때의 직류단 전압과 q축 전류 파형이다. q축 전류는 제어대상인 직류단 전압이 제어 목표전압 650[Vdc]에 도달하기 전에 감소하여 제어 목표 전압에서 0에 근접한다. 이는 제어대상의 오버슈트를 근본적으로 해결할 수 있으며, 제어 대상인 직류단 전압을 부드럽게 승압시킬 수 있는 장점을 보여준다. 제안한 전압 제어기는 전력변환기의 운전 초기에 슬라이딩 모드 제어기의 슬라이딩 궤적을 이용하여 3상 AC/DC 컨버터를 부하의 변화나 시스템 파라미터 변동에 강인하게 제어할 수 있다.

#### 6.3 PI제어기와 제안한 전압 제어기의 슬라이딩 궤적 실험 결과

그림 13은 PI 전압제어기와 제안한 전압 제어기를 사용할 시 q축 전류의 실험 파형이다. 슬라이딩 평면상에서 좌 분면은 직류전압의 오버슈트를 나타낸다. 그림 (a)의 PI 제어기의 경우 제어목표점인 0점에 도달하기 까지 오버슈트를 동반함을 알 수 있다. 그림 (b)의 제안한 전압 제어기는 0 ~ X<sub>40</sub> 영역에서 슬라이딩 궤적에 따라 q축 전류를 제어 하여 기존의 PI 제어기가 갖는 문제점인 직류전압의 오버슈트 발생을 최소화 하면서, 슬라이딩 모드 제어기의 장점인 부드럽고 강인하게 직류단 전압을 승압할 수 있음을 보인다.

### 7. 결론

본 논문에서는 빌딩용 직류배전 시스템에 적용하기 위한 3상 AC/DC 컨버터의 soft start 운전 기법에 대하여 제안한다. 직류 배전 계통에 연계되는 전자부하들은 입력전압에 민감한 전자 부품을 사용하므로 안정적인



(a) PI Voltage Control (b) Proposed Voltage Control

Fig. 13 Experimental results of PI and proposed voltage controller in the three-phase AC/DC converter in sliding domain.

직류 전압을 필요로 한다. 전력변환기가 전압 제어를 완료한 후 직류 부하를 투입할 시 제어전압에 큰 오버슈트를 발생시킬 수 있으므로, 직류배전시스템은 부하를 연결한 이후에 전압제어를 수행한다. 그러나 PI 전압제어기를 사용하는 경우 전력변환기가 운전할 때마다 연결되어있는 부하의 양이 다르므로, 시스템의 파라미터가 매 운전 시 마다 다르며 이는 PI 제어기의 설계를 어렵게 하는 요인이 된다. 제안한 전압제어기는 슬라이딩 모드 제어기의 슬라이딩 궤적을 이용하여 컨버터의 운전 초기에 슬라이딩 모드 제어기가 갖는 시스템 파라미터 변동에 강인한 제어 특성과 정상상태에서 PI 전압 제어기가 갖는 제어 속응성을 동시에 갖는다. 또한 제안한 제어기는 다양한 형태의 전력변환기에 용이하게 적용 가능함을 시뮬레이션과 실험으로 검증 하였다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 R&D 전략기획단(No. 2011T100100025)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

**참 고 문 헌**

[1] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, S. M, "An efficient appliance for low voltage DC house," in *Conf Rec. IEEE EPEC*, pp. 334-339, Oct. 2011.

[2] Gab-Su Seo, Jongbok Baek, Kyusik Choi, Hyunsu bae, Bohyung Cho, "Modeling and Analysis of DC Distribution System," *ICPE 2011-ECCE Asia*, pp. 223-227, May. 2011.

[3] Hyo-Sung Kim "DC Distribution Sysytems and DC Circuit Breaking Technology," *The Journal of the KIPE*. 15, No. 5, pp. 40-46, 2010.

[4] Daniel Salomonsson, Ambra Sannino, "Centralized ac/dc Power Conversion for Electronic Loads in a Low-Voltage dc Power System," in *Conf Rec. IEEE PESC*, pp. 1-7, June. 2006.

[5] J. Ferreira and H. van der Broeck, "Alternative Power Distribution in Residential and Commercial Buildings," in *Proc. Fifth Eur. Conf. Power Electronics and Applications (EPE'93)*, Vol. 7, pp. 188-193, 1993.

[6] Daniel Salomonsson, ambra Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 22, No.3, pp. 1620-1627, July. 2007.

[7] B. K. Jhonson and R. H. Lasseter, "An industrial power distribution system featuring UPS properties," in *Conf Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp.759-765, Oct. 1993.

[8] Kyoung-Ho Lee, "Trends and Safety Measures of DC Power Distribution," *The Journal of the KIPE*, Vol. 14, No. 2, pp. 21-26, April. 2009.

[9] Michael Starke, Leon M. Tolbert, "AC vs. DC Distribution: A Loss Comparison," in *Conf Rec. IEEE TDC*, pp. 1-7, April. 2008.

[10] John Schonberger, Richard Duke, "DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable NanoGrid," *IEEE Tran. Power Electron.*, Vol. 53, No. 5, pp. 1453-1460, Oct. 2006.

[11] Young-Seok Kim, Bong-Jun Seok, Jae-Du La, "The Design of the PI Compensator for a Voltage Bus Conditioner in the DC Distributed Power System", *The Transactions of KIPE*, Vol. 59, No. 12, pp. 2195-2201, Dec. 2010.

[12] Young-Wook Park, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok, "Spectral Analysis of DC Link Ripple Currents in Three-Phase AC/DC/AC PWM Converters", *The Transactions of KIPE*, Vol. 7, No. 3, pp. 244-252, 2002

[13] Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics AND AC Drives*, Prentice Hall Inc., pp. 419-437, 2002.

**저 자 소 개**



**신수철(申守澈)**

1977년 2월 27일생. 2004년 수원대 전기전자공학부 졸업. 2006년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2006년~2010년 (주)효성 중공업연구소 선임연구원. 2010년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



**이희준(李羲俊)**

1982년 9월 30일생. 2008년 순천향대 정보통신공학부 졸업. 2011년 성균관대 대학원 메카트로닉스 협동과정 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



**이정효(李楨孝)**

1982년 9월 20일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(공학).



**나종국(羅種國)**

1959년 4월 24일생. 2006년 3월 24일 한국산업기술대 전자공학과 졸업. 2012년 한양대 공과대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 성균관대 대학원 태양광시스템공학협동과정 박사과정. 1997년~현재 (주)갑진 대표이사



**원충연(元忠淵)**

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~2009년 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006년~2009년 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술 평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년~현재 (주)로템 기술자문위원. 2010년~현재 도시철도 공사 기술검증위원. 2007년~2012년 삼성전기 에너지파워 연구센터장. 2011년~현재 한국토지주택공사 기술심사 평가위원. 2010년 당 학회 회장. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.