

## 전압강하 보상모드를 갖는 직류 지하철용 회생인버터 시스템

金俊龜<sup>†</sup>, 金宰亨<sup>\*</sup>, 曹基鉉<sup>\*\*</sup>, 元忠淵<sup>\*\*\*</sup>, 金容基<sup>\*\*\*\*</sup>

## Regenerative Inverter System for DC Traction Substation with Voltage Drop Compensation Mode

Jun-Gu Kim, Jae-Hyung Kim, Kee-Hyun Cho, Chung-Yuen Won and Yong-Ki Kim

## 요 약

본 논문에서는 전압강하 보상모드를 갖는 직류 지하철 회생인버터 시스템을 제안하였다. 주 정류기에 고장이 발생하면 직류 지하철은 전원측으로부터 전력을 공급받지 못한다. 실제적으로 사고를 방지하기 위하여 변전소 측에 예비 정류기가 설치되어 있다. 이 논문에서는 전압강하 보상모드가 별도의 예비정류기를 대신하여 회생인버터에 부가된다. 제안된 인버터 시스템은 직류 가선 전압에서 발생한 회생에너지를 계통으로 반환한다. 부가하여, 인버터는 직류 지하철 시스템에서 사용된 전력변환장치에 의하여 야기된 고조파를 보상할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 제안된 제어 알고리즘의 효용성을 설명하였다.

## ABSTRACT

In this paper, the regenerative inverter system with voltage drop compensation mode is proposed. When the main rectifier is broken, the DC traction can not be supplied the power from the utility. Actually, the reserve rectifier is mounted in the substation to prevent this accident. In this paper, the voltage drop compensation mode is added to the regenerative inverter system in order to substitute the reserve rectifier.

The proposed regenerative inverter system returns the regenerative energy from the DC line voltage to the utility. In addition, the inverter can be compensate the harmonics caused by the power conversion devices used in the DC traction system. We demonstrated the effectiveness of the proposed control algorithm by using computer simulation.

**Key Words** : regenerative inverter, voltage drop compensation, DC traction, reserve rectifier, harmonics

## 1. 서 론

국가물류비의 절감 및 교통혼잡 비용의 개선을 위한 국가의 수송정책은 도로위주의 중심에서 탈피하여 환

경 친화적인 철도교통으로 정책이 변화되고 있다. 국내의 전철화 사업은 범국가적인 차원에서 진행되어 2007년에는 56.9%, 2012년 이내에는 기존의 약 2배에 육박하는 85.9%로 늘어날 전망이다. 전철노선의 복선화 및 신선로의 증가로 전기에너지 사용량이 커지고 있다.<sup>[1]</sup>

전기철도에서는 기존에 주로 사용하던 기계적인 제동방식을 보완하여 차량 정지 시 또는 하 구배 운행구간에서 감속 시 회생에너지를 발생한다. 이 경우에 견인전동기를 이용한 전기제동을 병행하여 사용하고 있다. 전기제동 시에는 견인전동기를 발전기로 사용하기

<sup>†</sup>교신저자 : 학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정  
E-mail : hopuler08@yahoo.co.kr

<sup>\*</sup>학생회원, 성균관대 정보통신공학부 박사과정

<sup>\*\*</sup>학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원, 한국철도기술연구원

접수일자 : 2007. 12. 31                      1차 심사 : 2008. 1. 17

2차 심사 : 2008. 3. 10                        심사완료 : 2008. 4. 4

때문에 제동 중 에너지가 발생되며 이를 회생에너지라 한다. 이러한 회생에너지의 양은 차량을 가속하기 위해 투입되는 에너지의 45%정도로써 약 25%는 동일 직류 가선에서 운행 중인 타 전동차에서 소모되며, 20%는 잉여 전력으로 회생하게 된다. 그림 1은 직류 전동차의 에너지 사용도를 나타내고 있다.<sup>[2][3]</sup>

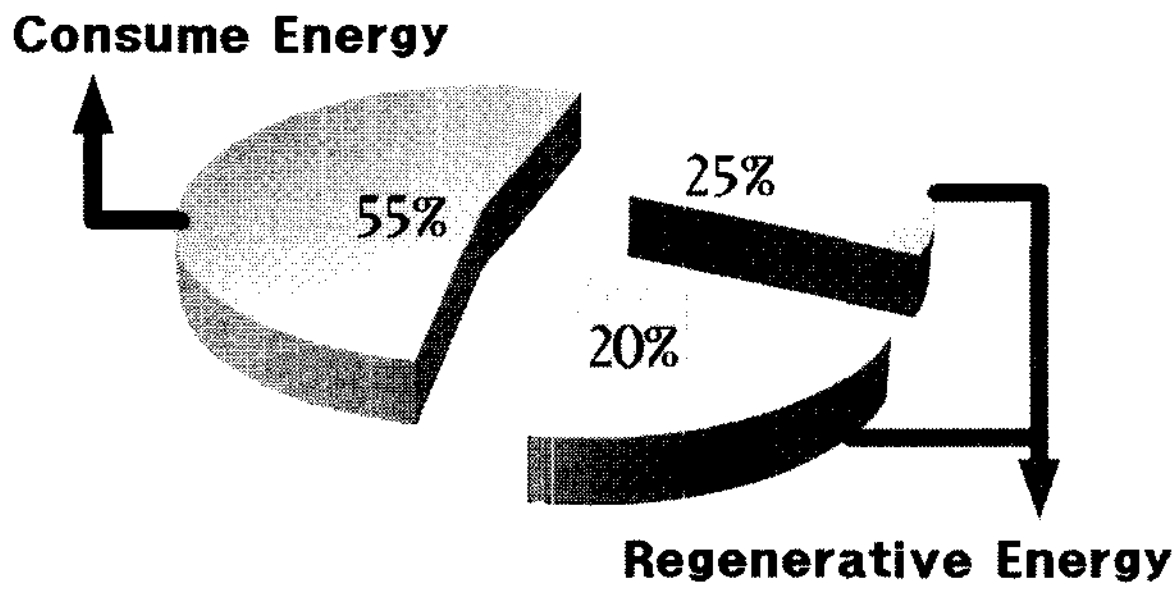


그림 1 직류 지하철의 에너지 사용도  
Fig. 1 Energy consumption rate of the DC traction

회생전력에 의해 상승된 가선 전압은 변전소의 정류기 및 차량 내부에 있는 전력 변환기의 장애를 일으킬 수 있기 때문에 회생 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하게 된다. 일반적으로 직류 지하철 시스템은 전동차에 저항기를 연결하여 회생에너지를 소비하는 방법이 주로 사용되었으나, 차량중량의 증가와 저항기 발열로 인한 온도상승, 기계 제동 사용에 따른 브레이크슈의 마모로 인한 소요비용이 증가된다는 단점을 갖고 있다. 회생제동 시 발생하는 가선 전압의 상승분을 PWM 인버터를 이용하여 3상 교류 모션으로 공급할 경우, 기존의 저항기를 이용한 방법에 비해 에너지를 재사용 할 수 있어 전기철도의 에너지 절약을 기대할 수 있다.

제안된 시스템에 PWM 인버터를 이용할 경우 차량 전인 시에 능동전력필터 기능을 수행하여 변전소 내 정류기 및 고압배전에 따른 수전측 전력품질에 대한 보상을 할 수 있다. 이로 인하여 기존에 필요했던 수동 고조파 필터의 크기를 줄일 수 있다. 또한 직류 지하철 시스템은 DC측의 단선사고나 주 정류기 고장으로 인한 사고 방지 대책으로 예비정류기를 변전소에 설치하여야 한다. 이 경우에는 바이패스 스위치를 사용하여 신속하게 시스템의 정상화를 한다. 그러나 제안된 알고리즘에서는 PWM 인버터를 PWM 컨버터로 사용하여 변전소내 별도의 예비정류기를 대신함으로써 한정되어 있는 변전소의 공간 활용 및 시스템 구성의 비용절감을 기대할 수 있다.

## 2. 회생인버터 시스템

본 논문에서 제안하는 시스템은 그림 2와 같다. 제안하는 회생인버터 시스템은 점선부분처럼 가선 전압과 병렬로 연결되어 있으며 전동차에 의한 회생에너지 발생 시 잉여분의 회생에너지만 계통측으로 반환한다. 회생동작을 하지 않을 경우에는 다이오드 정류기에 의한 고조파를 보상하는 능동전력필터로 동작하게 된다. 또한 주 정류기 고장으로 부하측에 원활한 전력이 공급되지 않는 경우 전압강하 보상기로 동작하여 전동차 측으로 전력을 공급하게 된다.

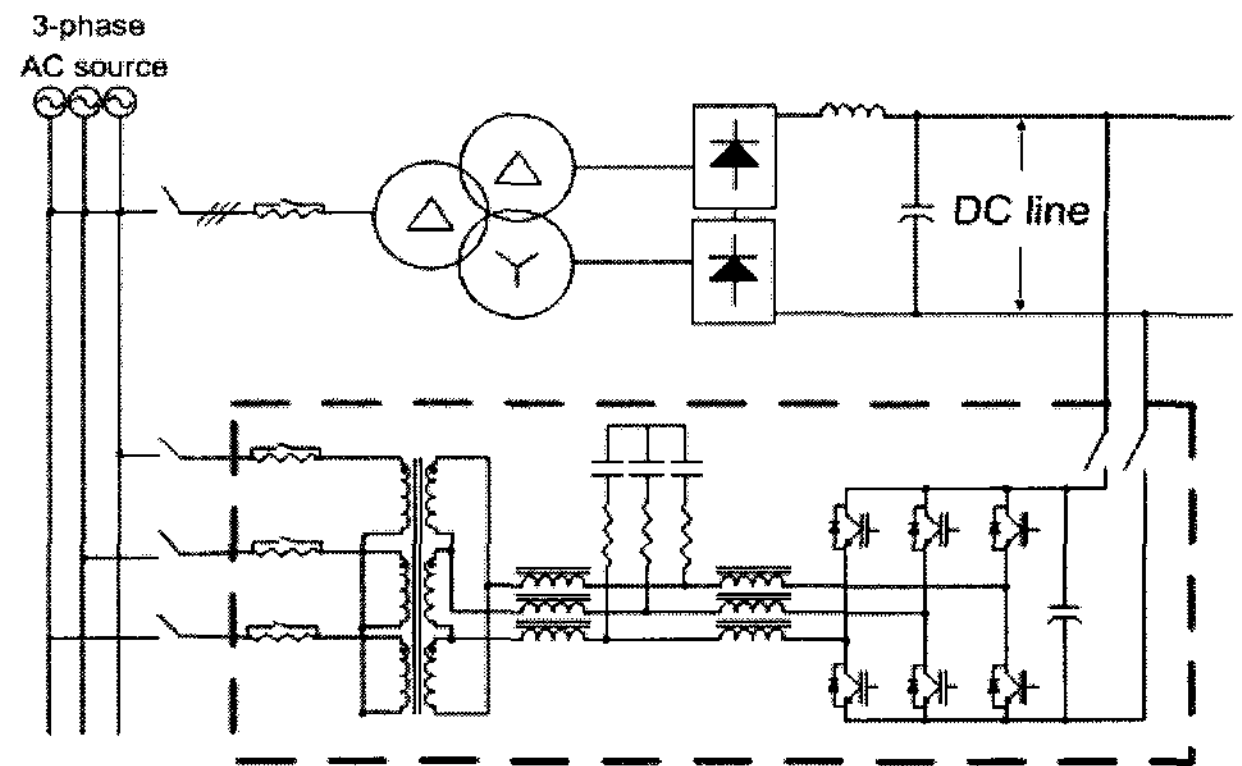


그림 2 제안된 직류 지하철 시스템  
Fig. 2 The proposed DC traction system

### 2.1 회생인버터 제어 알고리즘

회생인버터를 사용하여 직류모선의 회생전력을 교류 모션으로 회생할 수 있다. 회생인버터에 의해 회생된 에너지는 역사 내에 전등을 비롯한 보조전력설비나 다른 구간의 전동차에 재공급 된다. 그림 3은 제안된 시스템이 회생인버터 모드로 동작할 때 급전시스템의 전력흐름을 나타낸다.

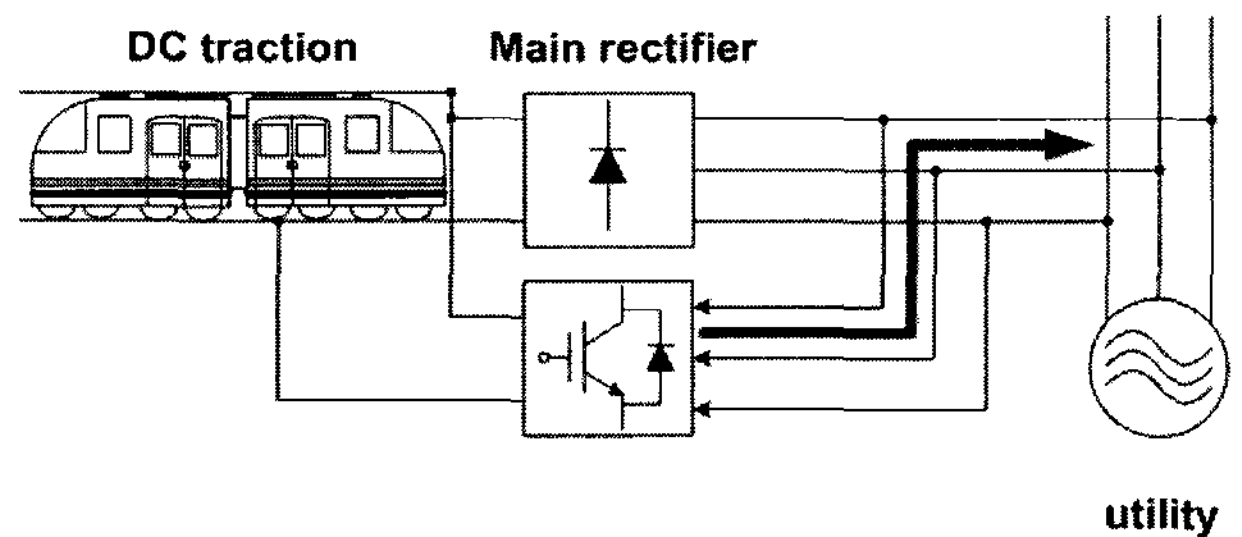


그림 3 그림 5 회생인버터 모드 시 전력 흐름도  
Fig. 3 Power flow of regenerative inverter mode

그림 4는 회생 인버터 모드시의 전체 제어 블록도를 나타내고 있다. 전원측 3상 전류를 2상 정좌표계로 변환하여 이것을 다시 2상 동기좌표계로 변환한다. 여기서 동기좌표계  $q$ 축전류  $i_q^e$ 와  $i_q^c$ 를 비교한 값을  $q$ 축 전류제어기를 거쳐  $q$ 축 기준전압을 만든다. 또한 동기좌표계의  $d$ 축 전류는 직류 가선 전압을 검출한 값과 기준전압 값을 비교하고 전압제어기를 거쳐서  $d$ 축 전류 기준값을 만든다. 최종적으로  $d$ 축 전류제어기를 거쳐  $d$ 축 기준전압을 만든다. 그리고 각각 성분을 de-coupling 하게 되고 전류제어기의 응답성을 위해서 E가 추가된다. 이렇게 만들어진  $d, q$ 축 전압을 다시 역변환을 하여 게이트 구동회로의 기준 값으로 입력되게 된다.<sup>[4]</sup>

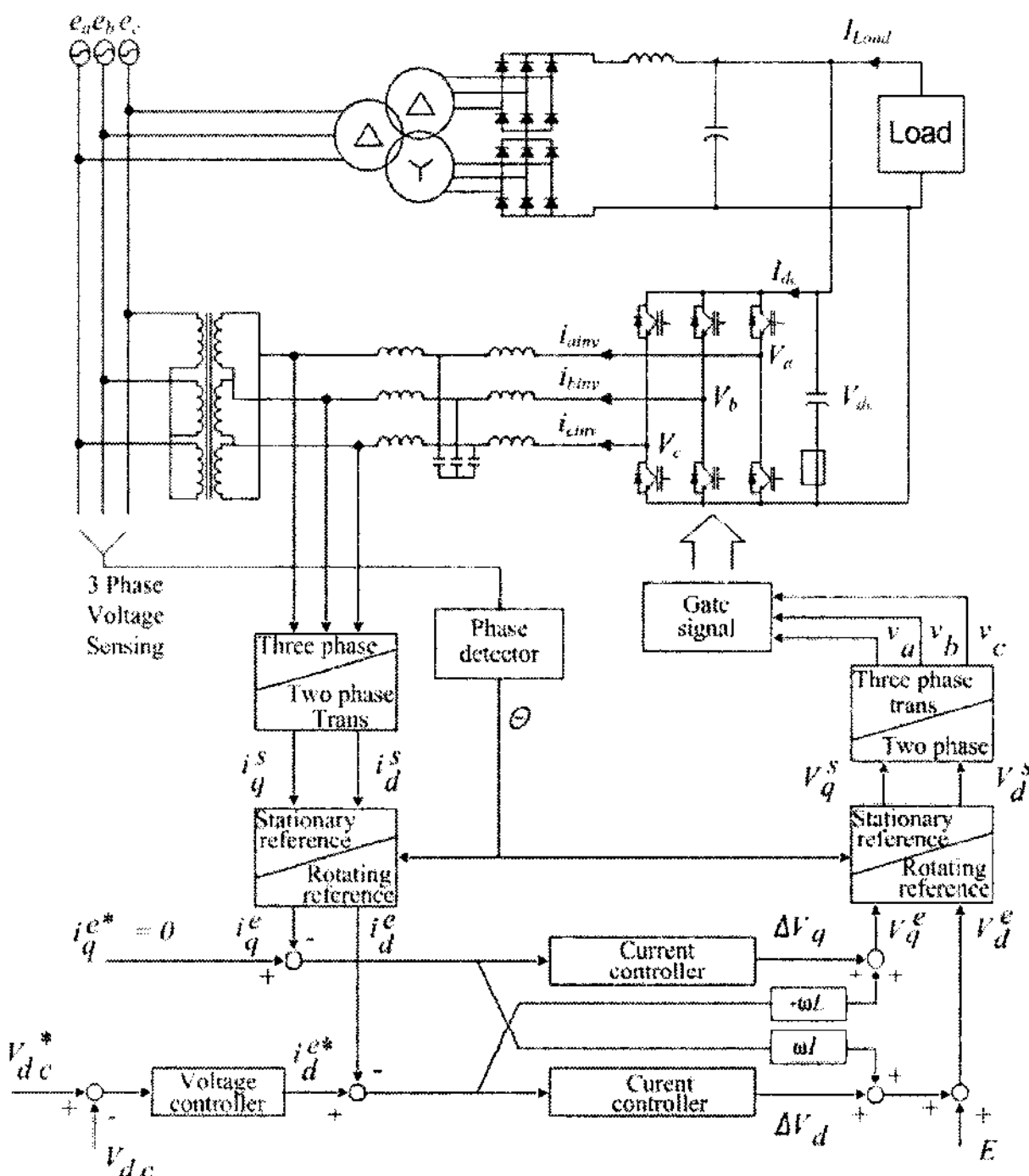


그림 4 회생인버터 모드시의 제어 블록도  
Fig. 4 The control block diagram of regenerative inverter mode

동기좌표계의  $d$ 축 전류를 제어함으로써 전원측에서 공급되는 입력유효전력을 제어할 수 있으며, 단위역률을 얻기 위해 무효전력성분인  $q$ 축 전류의 기준값을 0으로 한다.  $d$ 축 전류제어기와 직류측 소비전력에 대한 보상이 완벽하다면 전원측에서 공급하는 유효전력은 식(1)로 얻어지며, 직류링크단에서의 한 주기  $T_s$ 동안의 전력은 식(2)와 같다.

$$P_{ac} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = \frac{3}{2} (e_q^e i_q^e + e_d^e i_d^e) = \frac{3}{2} E i_d^e \quad (1)$$

$$\frac{CV_{dc}^2}{2T_s} = P_{ac} - P_{Load} \quad (2)$$

여기서  $P_{Load}$ 는 직류단의 소비전력이다. 회생모드 시에는 직류단의 소비전력이 없다고 가정하고, 식(2)의 좌변항을 직류 동작전압인  $V_{dc}$ 에서 테일러 시리즈로 정리하면 식(1)과 식(2)로부터 아래 수식을 얻을 수 있다.

$$\frac{CV_{dc} V_{dc}}{2T_s} = \frac{3}{2} E i_d^{e*} \quad (3)$$

따라서 전압 제어루프에서 발생하는  $d$ 축에 대한 기준전류값은 다음과 같다.

$$i_d^{e*} = \frac{CV_{dc}}{3ET_s} (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (4)$$

여기서  $T_s$ 는 전압제어루프의 샘플링주기이다.<sup>[5]</sup>

### 2.2 능동전력필터 제어 알고리즘

본 논문에서 제안하는 능동전력필터는 다이오드 정류기와 같은 비선형부하의 사용으로 인한 계통측 고조파를 보상하기 위해 사용된다. 그림 5는 제안된 시스템이 능동전력필터 모드 시 동작은 다음과 같다. 주정류기 등의 부하전류  $i_L$ 에 포함된 고조파 전류를 제거하기 위해 보상전류  $i_F$ 를 주입하여 계통전류  $i_S$ 에 포함된 고조파를 보상한다.

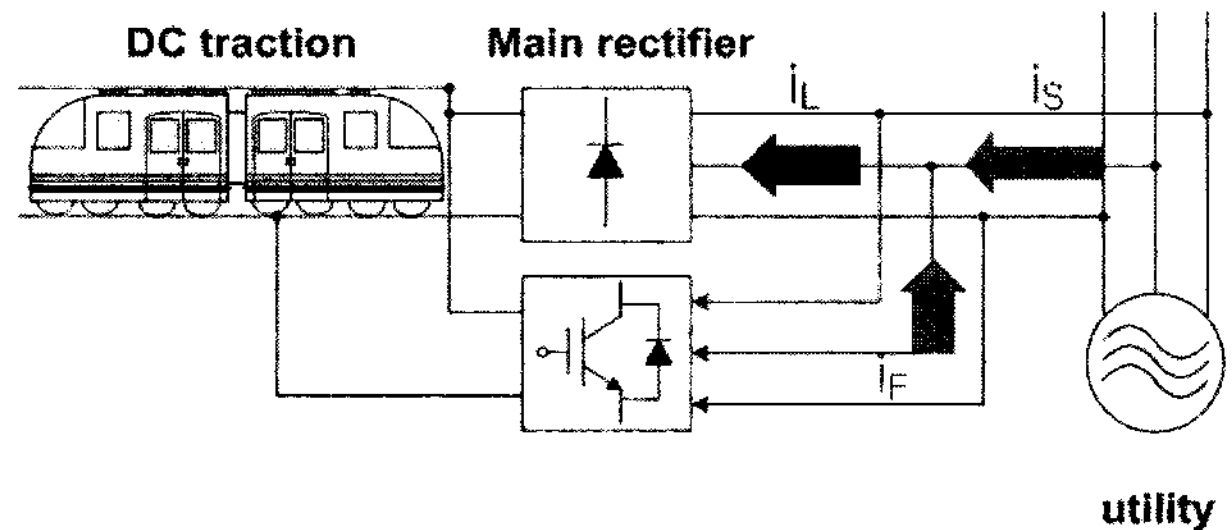


그림 5 그림 8 능동전력필터 모드 시 전류 흐름도  
Fig. 5 Current flow of active power filter mode

그림 6은 본 논문에서 제안하는  $p-q$ 이론에 의한 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다. 계통측

전압과 전류를 검출하고 2상 정좌표계로 변환하여  $V_\alpha, V_\beta$ 와  $I_\alpha, I_\beta$ 로 변환하여 이들의 곱으로 순시 전력  $p$ 와  $q$ 를 구한다. LPF(low pass filter)를 통과한  $\bar{p}$ 와 전압제어기를 통과한  $\bar{P}_{Loss}$ 의 차와  $q$ 값의 합이 보상해 주어야 할 값이기 때문에 이들의 합을 다시 역변환 하여 3상 좌표계로 변환해 준다. 이때 전압 제어기를 통과한  $\bar{P}_{Loss}$ 의 값은 직류 전압 지령치와 실제 전압의 차를 통해서 오차를 구하게 된다. 여기서 구한 오차는 LPF를 거쳐 직류 성분만의 손실이  $\bar{P}_{Loss}$ 이다. 이 값은 유효전력의 값으로 더해 주거나 또는 빼 주어야 하는 값이기 때문에 유효전력  $p$ 의 값에 관계된다. 위상검출기를 통한 PLL회로를 통해서 리액터와 변압기로 인한 위상지연을 보상해 준다.<sup>[6][7]</sup>

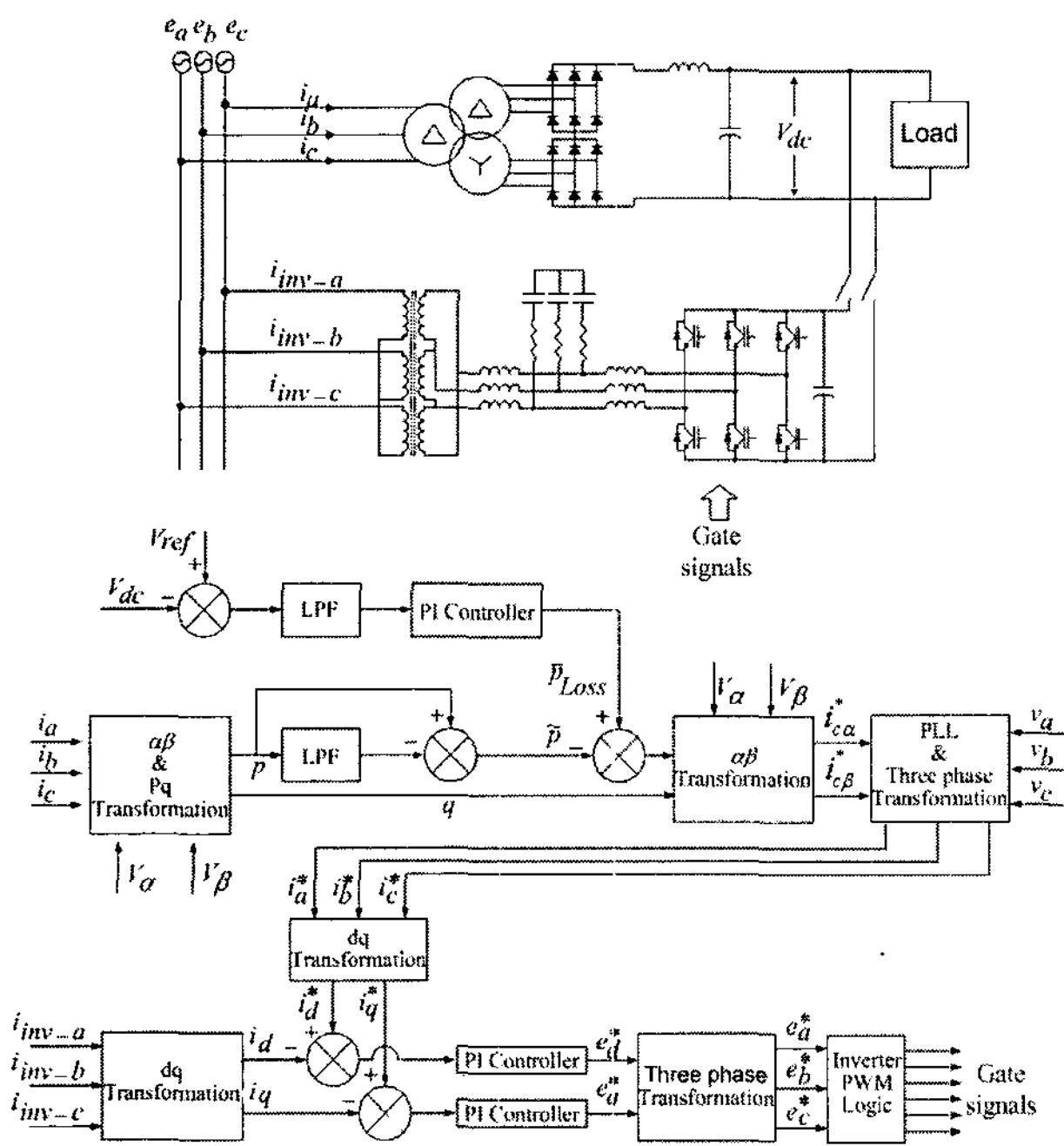


그림 6 능동전력필터 모드의 제어 블록도  
Fig. 6 The control block diagram of active power filter

### 2.3 전압강하 보상 알고리즘

그림 7은 전압강하 보상모드 시 전력 흐름도를 나타낸다. X점에서 단선되면 주 정류기는 계통에서 전력을 공급받지 못하기 때문에 회생인버터를 PWM 컨버터로 사용하여 부하측에 전력을 공급한다.

#### 2.3.1 전압강하 보상모드의 제어 블록도

전압강하 보상모드의 제어 블록도는 그림 8과 같다.

본 논문에서 회생에너지 발생 시 회생에너지를 계통측으로 반환한다. 그러나 주 정류기 고장이나 X점에서 단선사고가 발생 시 계통측에서 PWM 컨버터를 통하여 전동차측으로 전력을 공급한다.

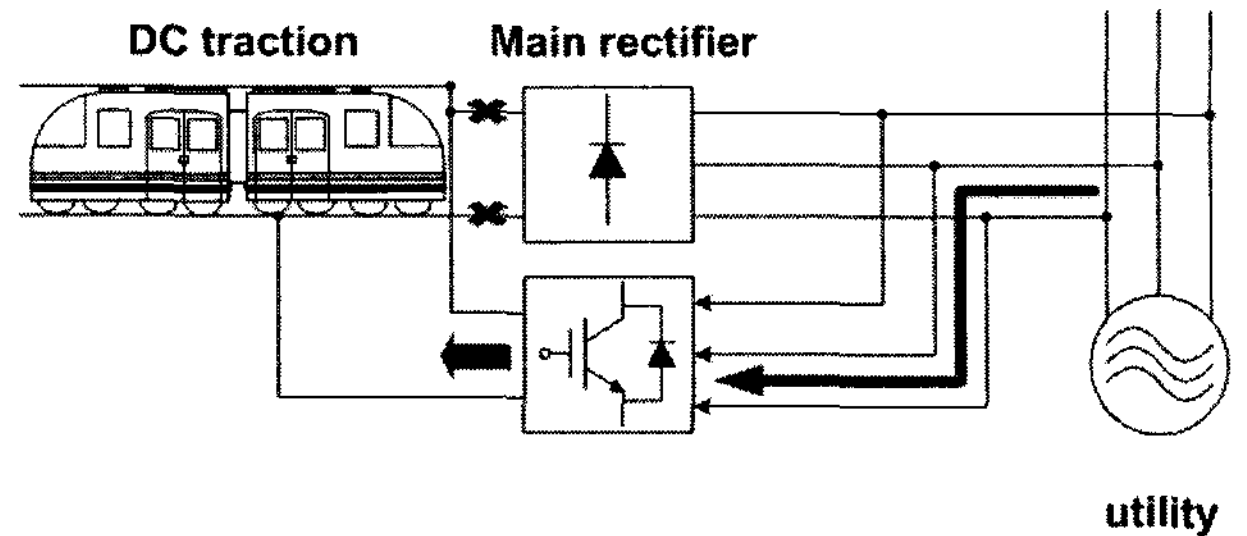


그림 7 그림 10 전압강하 보상모드 시 전력 흐름도  
Fig. 7 Power flow of voltage drop compensation mode

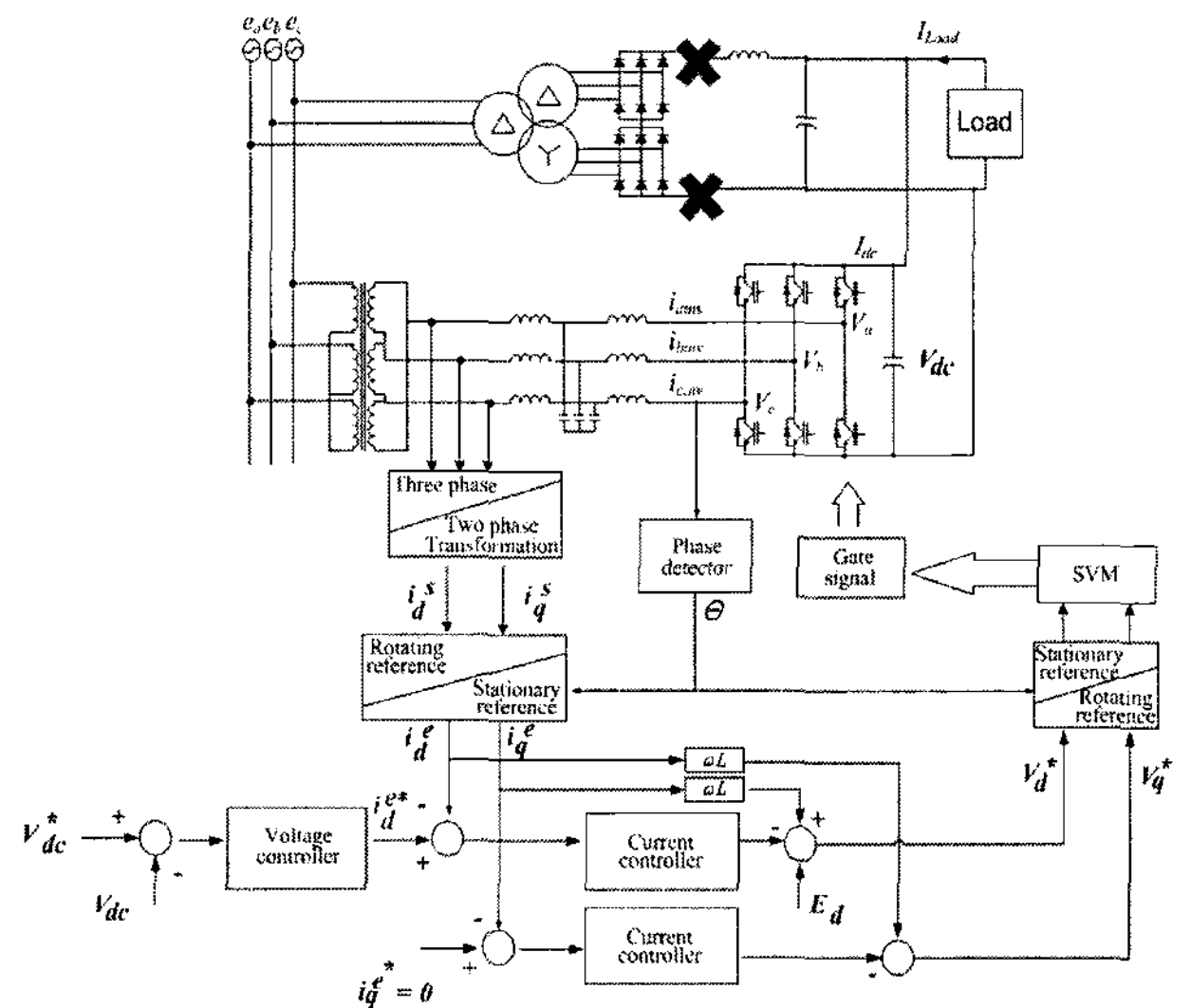


그림 8 전압강하 보상모드의 제어 블록도  
Fig. 8 The control block diagram of voltage drop compensator mode

#### 2.3.2 전류 제어기의 구성

직류 링크단의 전압제어 및 정류 회생 동작을 위해서는  $i_d^e$  전류를 제어해야 한다.  $q$ 축 전류  $i_q^e$ 는 단위 역률 제어를 위해서 zero가 되어야 한다. 이때  $q$ 축 전류  $i_q$ 는 기준전류  $i_q^* = 0$ 으로 제어해 주어야 한다. 동기좌표계의  $d$ 축을 전원전압 벡터로 설정하였기 때문에 정류기의 입력측 피상전력, 유효전력은 각각 식(5), 식(6)과 같다. 동기좌표계에서 상전류의 공간벡터가 전압벡터와 일치하지 않으면 무효전력 성분이 생기게 된다. 무효전력 성분은 식(7)과 같다.

$$S = \frac{3}{2} [E_{dq}^c \cdot i_{dq}^{c*}] \quad (5)$$

$$= \frac{3}{2} [(E_d^c + jE_q^c) \cdot (i_d^c + ji_q^c)]$$

$$P = \frac{3}{2} E_d^c \cdot i_d^c \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} E_q^c \cdot i_q^c \quad (7)$$

여기서 무효전력 성분  $Q$ 가 0이 되기 위한 조건은  $i_q^c = 0$ 이다. 따라서 무효전력 성분을 제거하기 위해서 즉 전압벡터와 전류벡터를 동상으로 만들려면 정류기의 전류성분  $i_q^{c*}$ 을 반드시 0으로 제어해야만 한다. 따라서 PI 전류제어기 설계를 하면 정류기의 전압은 다음과 같이 된다.

$$V_d^c = E_d^c + \omega L i_q^c - u_d \quad (8)$$

$$V_q^c = E_q^c - \omega L i_d^c - u_q = -\omega L i_d^c - u_q$$

$\omega L i_d^c$ ,  $\omega L i_q^c$ 는  $q$ 축에서  $d$ 축, 그리고  $d$ 축에서  $q$ 축으로의 간섭분이다.  $E_d^c$ 는 전원전압의 피크값인데 전향 제어항이다. 식(8)에서  $u_d$ ,  $u_q$ 는 새로운 인가전압이고, 식(9)로 표현된다.

$$\frac{di_d^c}{dt} = u_d, \quad \frac{di_q^c}{dt} = u_q \quad (9)$$

전류 지령치가  $i_d^{c*}$ ,  $i_q^{c*}$ 라고 할 때 식(10)과 같은 PI 제어기 출력을 식(9)에 대입하면 PI 제어기의 이득에 따라 전류 제어기의 성능이 결정된다.<sup>[8]</sup>

$$u_d = K_p(i_d^{c*} - i_d^c) + K_i \int (i_d^{c*} - i_d^c) dt \quad (10)$$

$$u_q = K_p(i_q^{c*} - i_q^c) + K_i \int (i_q^{c*} - i_q^c) dt$$

### 2.3.3 전압 제어기의 구성

출력측 등가회로에 대한 미분방정식과 입력전력과 컨버터 출력의 관계식은 식(11)과 같이 표현된다.<sup>[9][10]</sup>

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_c = I_{dc} - I_{Load} \quad (11)$$

$$P = V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (E_d^c I_d^c + E_q^c I_q^c)$$

$C$ 는 직류 링크단의 커패시턴스이고  $I_{dc}$ 는 직류 링크

앞단에 흐르는 전류이다.  $I_c$ 는 직류 링크단의 커패시터로 흘러들어가는 전류를 나타내고,  $I_{Load}$ 는 부하전류를 나타낸다. 즉, 직류 가선 전압을 조절할 수 있는 것은 정류기의 출력전류에서 부하로 빠져 나가는 전류의 차이이다. 식(11)에서와 같이 입력측 전력과 출력측 전력이 같다는 가정을 하고  $I_q = 0$ 을 이용하면 다음과 같이  $I_d$ 와  $I_{dc}$ 의 관계는 식(12)와 같다. 식(12)를 다시 쓰면 식(13)과 같다.

$$\frac{I_{dc}}{I_d^c} = \frac{3}{2} \frac{E}{V_{dc}} = K_{cm} \quad (12)$$

$$V_{dc} = \frac{3}{2} \frac{E I_d^c}{I_{dc}} \quad (13)$$

여기서 직류 가선 전압은 유효전류  $I_d$ 로 조절할 수 있다. 또한 정류기의 유효전류를 제어함으로써 전원측에서 공급되는 입력전력을 제어할 수 있다. 전원측에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력 전력보다 클 경우에는 직류 가선 전압이 상승한다. 반대의 경우에는 직류 가선 전압이 감소하므로 정류기의 입력을 제어하면 직류 가선 전압을 제어할 수 있다. 전류 제어기의 제어주기는 전압제어기 속도에 비해 빠르기 때문에 전류제어기의 전달함수를 1로 볼 수 있다.

$$I_d^{c*} = K_p(V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int_0^t (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (14)$$

여기서  $V_{dc}^*$ 는 직류 가선 전압의 지령치이다. 전류제어기의 대역폭은 전압제어기보다 훨씬 넓기 때문에 전류 지령치  $I_d^{c*}$ 에 대한 정류기의 유효전류  $I_d = I_d^{c*}$ 가 된다. PI 전압제어기의 전달함수를  $G(S)$ 라고 할 경우에 전압 지령치에 대한 직류 가선 전압의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{K_{cm} G(S)}{SC + K_{cm} G(S)} \quad (15)$$

부하전류  $I_{Load}$ 에 대한 직류 가선 전압의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{V_{dc}}{I_{Load}} = \frac{1}{SC + K_{cm} G(S)} \quad (16)$$



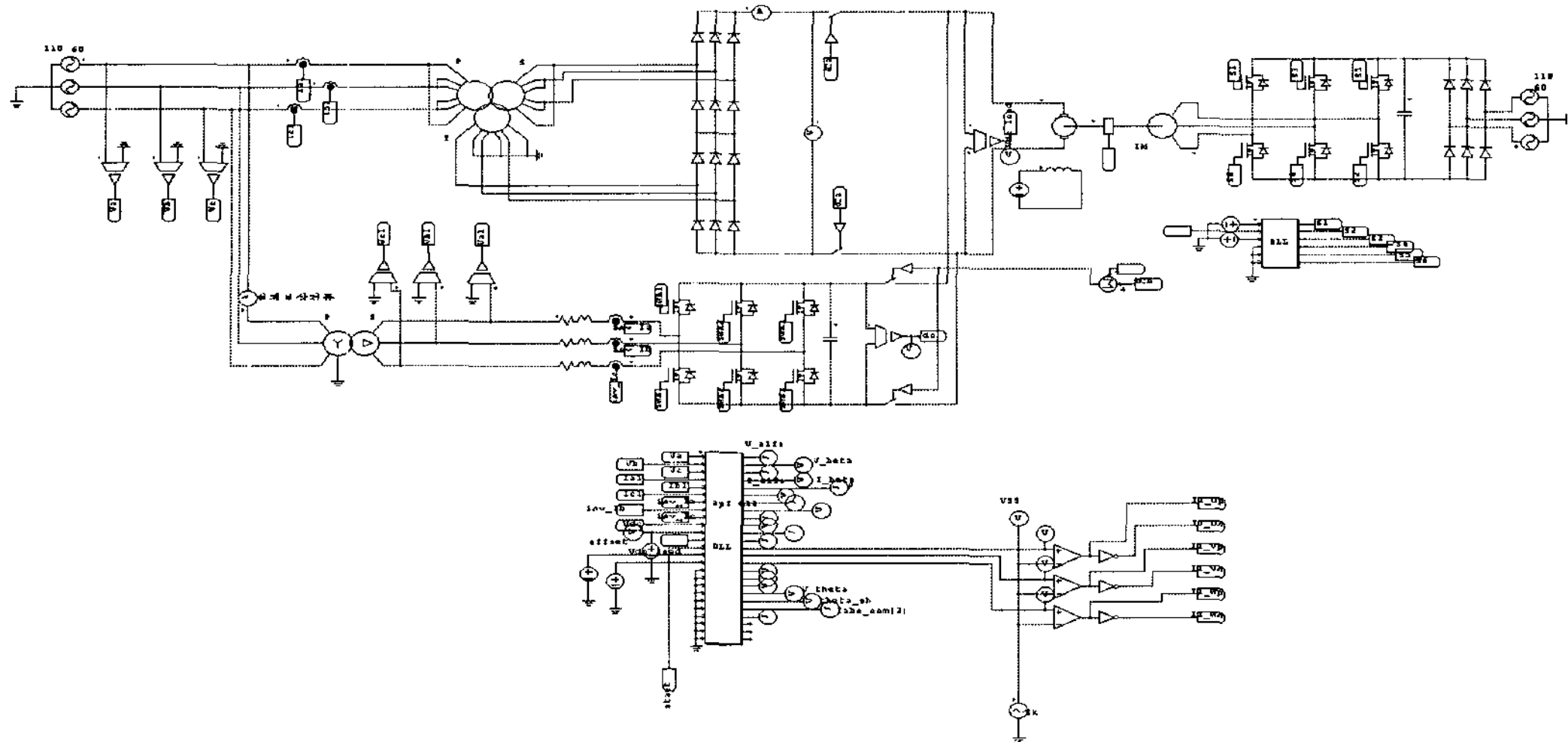


그림 9 제안하는 시스템의 시뮬레이션 회로도  
Fig. 9 Simulation circuit diagram of the proposed system

### 3. 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용한 툴은 전력전자분야 전용으로 개발된 PSIM 소프트웨어를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용한 소자는 이상적이고 각 파라미터 정격은 표 1에 나타내었다. 그림 9는 제안하는 시스템의 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. 직류 전철 시스템을 모사하기 위해 유도전동기와 직류발전기로 구성된 MG-set을 구성하여 시뮬레이션 하였다. 또한 가선 전압측에 주정류기의 고장 및 단선사고를 모의하는 스위치를 구성하여 전압강하 보상모드의 동작을 확인하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Parameters of simulation

Parameter	Value
12 pulse diode rectifier	
Input voltage	110 [Vrms]
Output voltage	113 [VDC]
transformer winding	$\Delta - \Delta - Y$
PWM regenerative inverter	
Output LCL filter	70[mH], 0.1[nF], 50[uH]
Input capacitor	880[uF]
Current sampling time	0.00025[s]
Voltage sampling time	0.0025[s]

그림 10은 회생인버터 모드와 능동전력필터 모드를 나타내는 부하전류, 인버터 출력전류, 계통전류를 나타

낸다. 0.2초에서부터 0.35초 구간에서는 회생에너지가 발생하여 회생인버터는 회생모드로 동작하게 된다. 따라서 정류기로부터 입력되는 부하전류는 흐르지 않는다. 발생된 회생에너지는 계통측으로 회생됨을 알 수 있고, 이때 회생되어지는 전류는 계통전압과 180°위상차를 가진다. 0.15초부터 0.2초 사이와 0.35초 이후에는 능동전력필터로 동작하여 계통측의 전류는 기본과 성분의 전류만이 존재하여 고조파의 보상이 이루어진다.

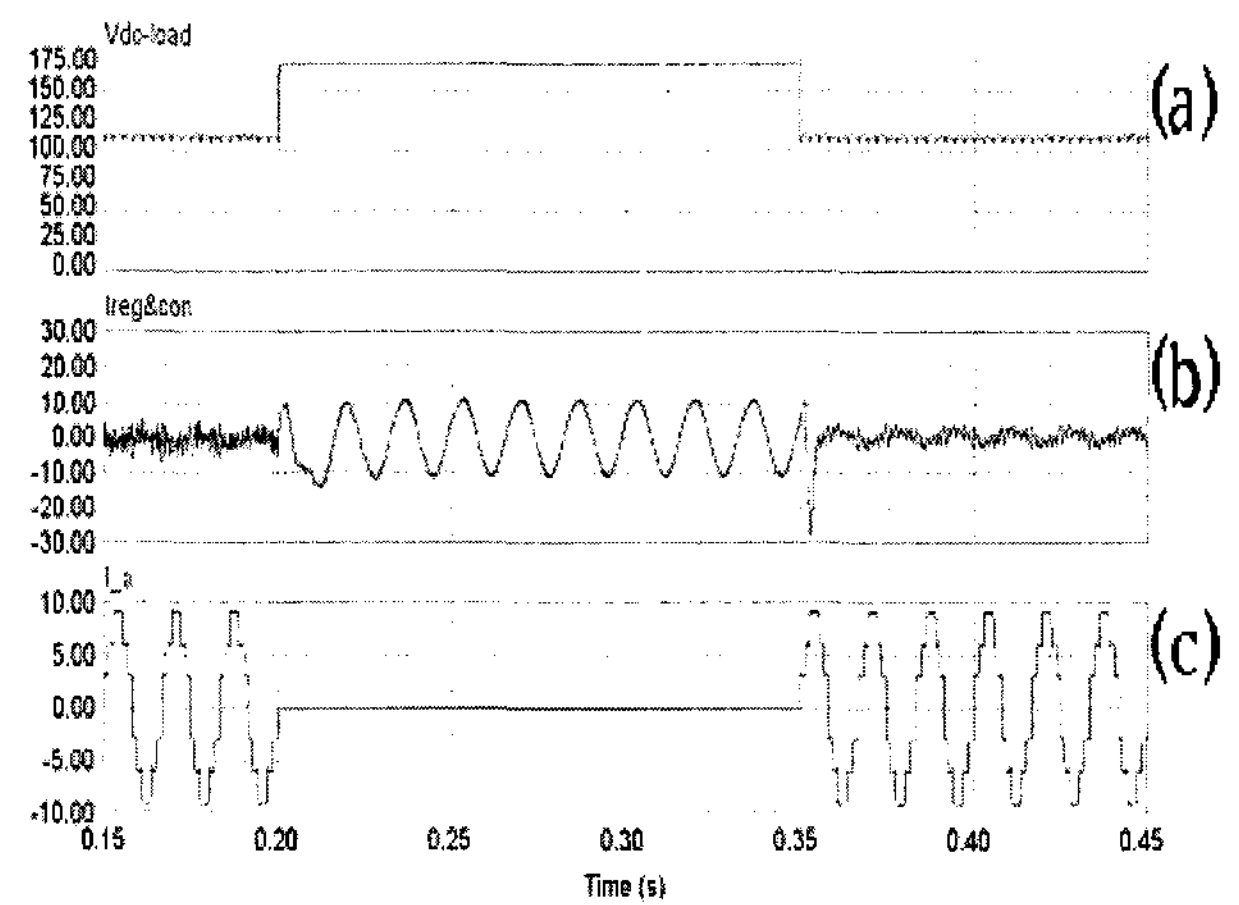


그림 10 회생 및 능동전력필터 모드 시 각 부 파형  
(a)가선 전압 (b)회생인버터 출력전류 (c)계통전류  
Fig. 10 Output waveforms of regenerative and active power filter (a)DC line voltage (b)Regenerative inverter output current (c)Utility current

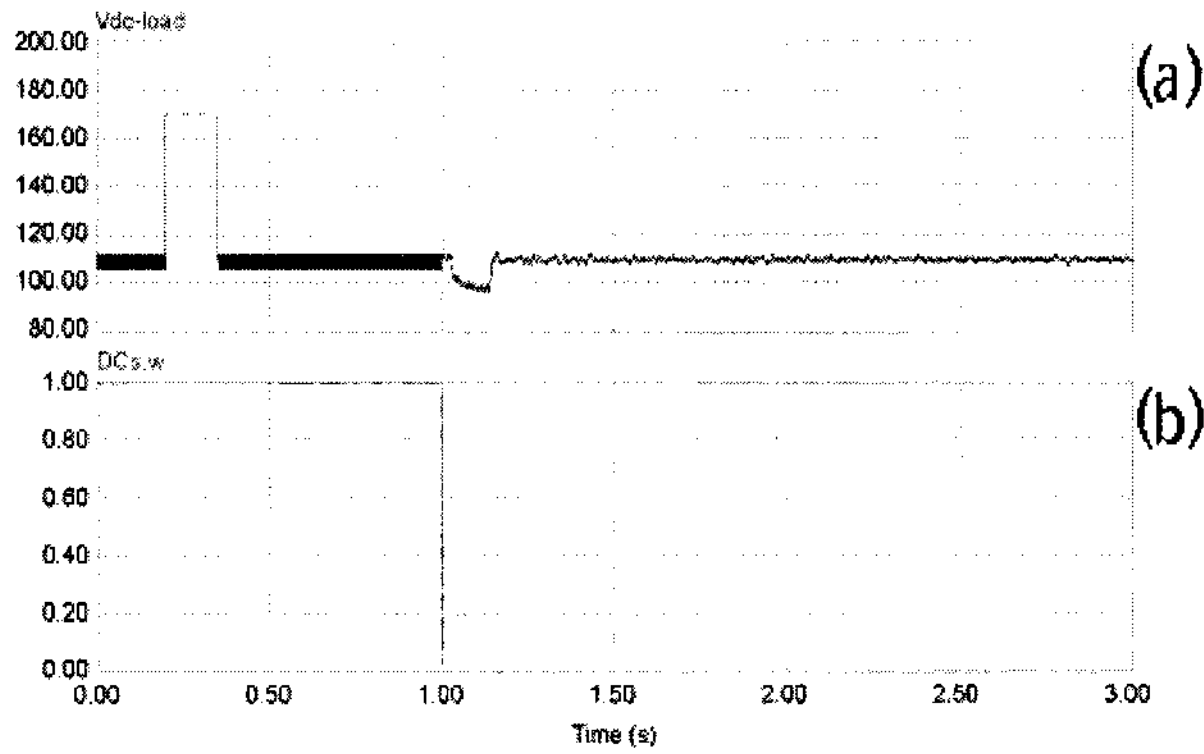


그림 11 전압강하 보상모드 시 각 부 파형  
 (a)가선 전압 (b)DC 전력 차단 스위치 신호  
 Fig. 11 Output waveform of voltage drop compensation mode (a)DC line voltage (b)DC power blocking switch signal

계통의 단선 사고나 주 정류기의 고장으로 부하측 전력공급이 이루어 지지 않을 경우 회생인버터 시스템은 전압강하 보상모드로 동작하여 부하측에 전력을 공급하는 것을 그림 11을 통해 확인 할 수 있다.

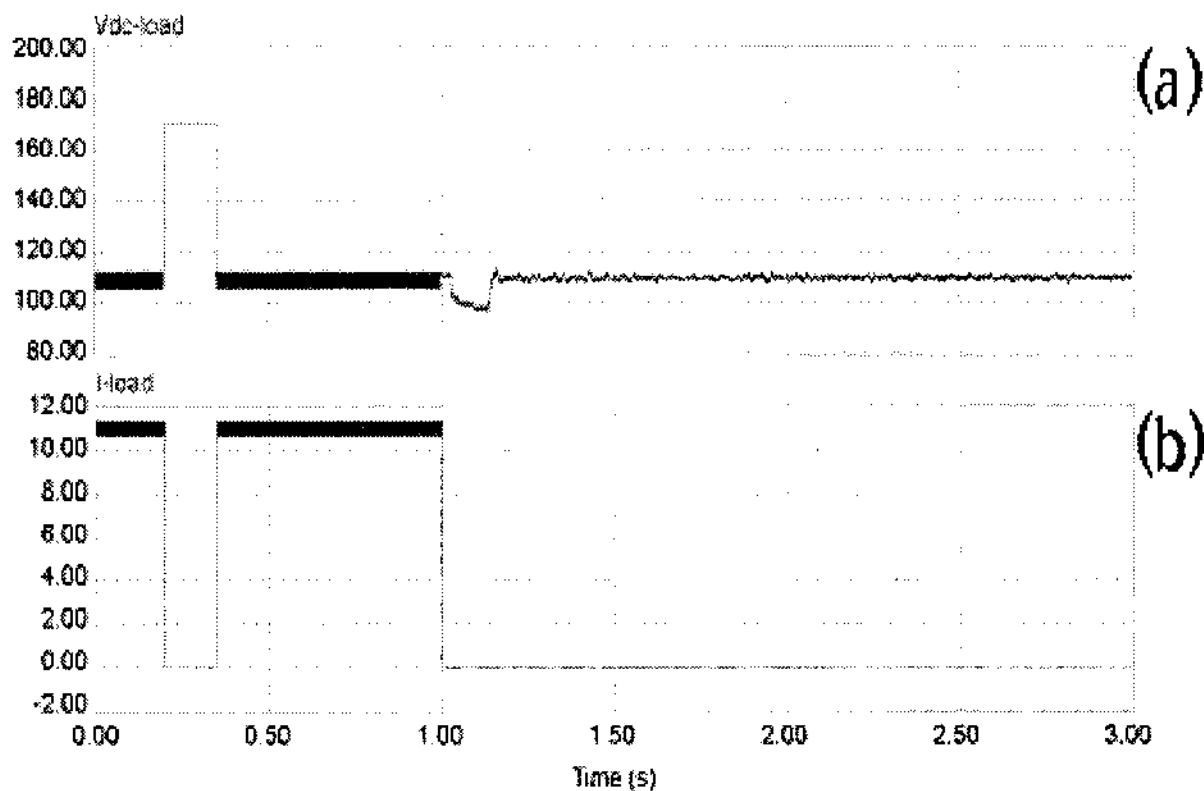


그림 12 전압강하 보상모드 시 각 부 파형  
 (a)가선 전압 (b)주 정류기 출력전류  
 Fig. 12 Output waveforms of voltage drop compensation mode (a)DC line voltage (b)Output current of main rectifier

그림 12는 계통측 사고모의 시 가선 전압과 주 정류기 부하전류 파형을 나타낸다. 계통에서 전력공급이 불가능하기 때문에 계통에서 공급받는 부하측 전류는 0으로 나타난다. 가선 전압은 1초 이후부터 회생인버터가 전압강하 보상모드로 동작하기 때문에 일정전압으로 유지된다.

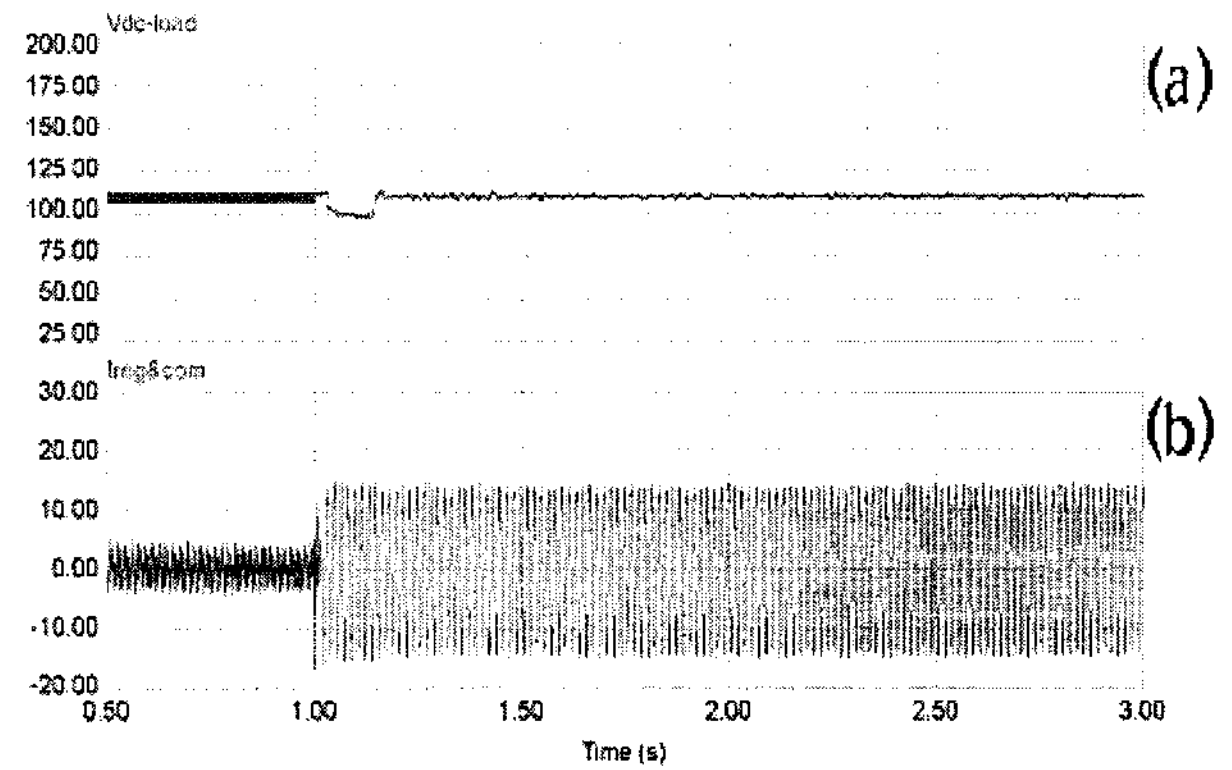


그림 13 전압강하 보상모드 시 각 부 파형  
 (a)가선 전압 (b)회생인버터 출력전류  
 Fig. 13 Output waveforms of voltage drop compensation mode (a)DC line voltage (b)Output current of regenerative inverter

그림 13은 전압강하 보상모드 시 가선 전압과 회생인버터 출력파형을 나타낸다. 회생인버터는 1초 이전에는 능동전력필터 모드로 동작하여 계통측 고조파를 보상하지만 1초 이후부터 전압강하 보상모드로 동작하여 부하측 전력을 공급한다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전압강하 보상 기능을 갖는 회생인버터 시스템을 제안하였다. 부하 단에서 회생에너지가 발생할 경우 계통측으로 반환하는 기능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 회생모드로 동작하지 않을 경우에는 능동전력필터 기능을 사용하여 전력 계통측의 전류에 보상전류를 주입함으로써 고조파의 보상을 하였다. 가선 전압의 전압강하가 발생하였을 경우, 회생인버터를 컨버터로 사용하여 부하측으로 전력을 공급한다. 또 다른 전력변환장치의 추가 없이 동작이 가능함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참 고 문 헌

[1] "미래철도 기술개발사업 차세대 전철시스템 에너지 회생 장치 개발", 한국철도기술연구원, 2004.  
 [2] A. Horn, R. H. Wilkinson, and J. H. R. Enslin,

"Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations", *ISIE of IEEE*, Vol. 2, pp. 802-807, 1996.

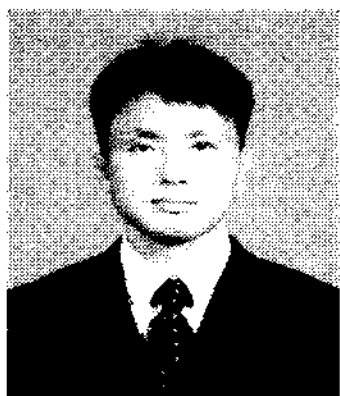
- [3] P. J. Randewijk, and J. H. R. Enslin, "Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated", *PESC of IEEE*, Vol. 1, pp. 360-366, 1995.
- [4] "차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 2004년도 국가교통핵심기술개발사업", 건설교통부, 2004.
- [5] C. H. Bae, M. S. Han, Y. G. Kim, C. Y. Choi, and H. J. Jang, "Simulation study of a regenerative inverter for absorption of regenerative energy in a DC traction substation", *Korean Society for Railway*, pp. 69-75, 2005.
- [6] R. H. Wilkinson, J. H. R. Enslin, C. Putter, "DC-side harmonic compensation in DC traction applications", *IEEE AFRICON*, Vol. 2, pp. 827-832, 1996.
- [7] 한진욱, "Active power filter를 이용한 전력계통의 고조파 제거", 포항공대 석사 학위논문, 1997.
- [8] G. Y. Jeong, T. J. Park, B. H. Kwon, "Line voltage sensorless active power filter for reactive power compensation", *IEE*, Vol. 147, pp. 385-390, 2000.
- [9] D. C. Lee, G. M. Lee, K. D. Lee, "DC-bus voltage control of three-phase AC/DC PWM converters using feedback linearization", *IEEE*, Vol. 36, pp. 826-833, 2000.
- [10] J. W. Choi, S. K. Sul, "Fast current controller in three-phase AC/DC boost converter using d-q axis cross coupling", *IEEE*, Vol. 13, pp. 179-185, 1998.

**저 자 소 개**



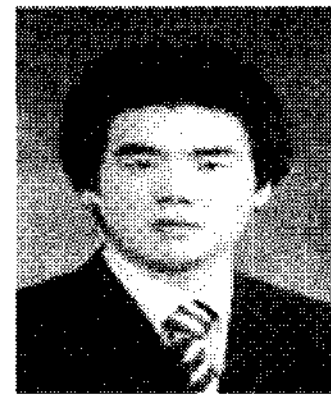
**김준구(金俊龜)**

1981년 5월 7일생. 2007년 남서울대 전자공학과 졸업. 현재 2007년 성균관대 대학원 태양광시스템공학협동과정 석사과정.



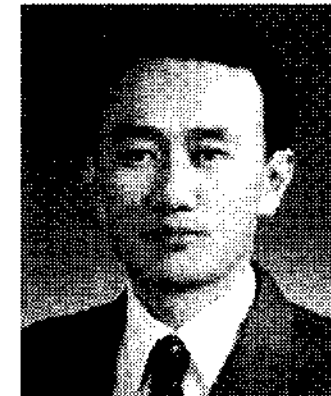
**김재형(金宰亨)**

1975년 12월 3일생. 2000년 2월 동의대 전기공학과 졸업. 2002년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 성균관대 대학원 태양광시스템공학협동과정 박사과정.



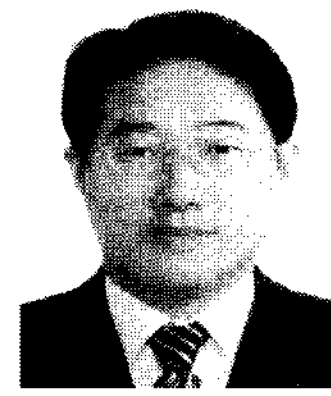
**조기현(曹基鉉)**

1982년 07월 08일생. 2006년 호서대 전기공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원 에너지 시스템 협동과정 졸업(석사). 현재 ADT 중앙연구소 연구원.



**원충연(元忠淵)**

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 12월 ~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년~2007년 한국조명전기설비학회 편수위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년~현재 월간 전기설비 편집자문위원. 2008년~2009년 한국조명전기설비학회 평가위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 당 학회 부회장.



**김용기(金容基)**

1959년 11월 3일생. 1987년 서울산업대 화학공학과 졸업. 1992년 연세대 대학원 화학공학과 졸업(석사). 2003년 서울시립대 대학원 화학공학과 졸업(공학박). 현재 한국철도기술연구원 책임연구원.