

## 직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구

金敬源, 尹仁植, 徐永珉, 尹德鏞, 洪淳瓚\*

## A Study on the Power Factor Improvement of DC Power Regenerating Systems

Kyung-Won Kim, In-Sic Yoon, Young-Min Seo, Duck-Yong Yoon, and Soon-Chan Hong

## 요 약

본 논문에서는 전철시스템의 변전소에서 직류모선에 발생하는 잉여분의 직류전력을 교류전원측으로 회생시킬 수 있는 직류전력 회생시스템의 역률을 개선할 수 있는 새로운 제어기법을 제안하였다. 전력용량과 스위칭 손실을 고려하여 시스템은 3상 구형과 인버터를 기반으로 설계되며 두 개의 인버터, 지그재그 결선된 출력변압기와 교류필터로 구성된다. 회생시스템의 출력전압은 정현파가 아니다. 그러나 기본과 성분을 기반으로 하여 회생되는 복소전력을 해석하므로 고조파에 의해 발생하는 무효전력이 고려되지 않는다. 따라서 비정현파일 때에도 무효전력을 0에 가깝게 제어할 수 있는 새로운 제어기법이 필요하다. 본 논문에서 제안한 제어기법을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며, 그 결과 역률이 이론상 99%이상임을 확인하였다.

## ABSTRACT

This paper proposes a new control scheme for the power factor improvement of DC power regenerating systems, which can regenerate the excessive DC power from DC bus line to AC supply in substations for traction systems. From the viewpoint of both power capacity and switching losses, the system is designed on the basis of three-phase square-wave inverters and composed of two inverters, zig-zag connected output transformers, and an AC filter. The output voltages of the regenerating system are not sinusoidal. However, regenerated complex power is analyzed on the basis of fundamental components and thus the reactive power produced by harmonics is not considered. Therefore, it is needed a new control scheme capable of controlling the reactive power nearly to zero even for nonsinusoidal cases. To verify the validity of the proposed control scheme, computer simulations are carried out. And the results show that the power factor is theoretically higher than 0.99.

**Key Words** : Power factor improvement, Power control, Regeneration, Traction systems

## 1. 서 론

\*단국대학교 공학부 전기전자컴퓨터전공 교수  
E-mail : schong@dankook.ac.kr  
접수일자 : 2001. 7.23  
1차심사 요청일 : 2001. 7.23  
심사완료일 : 2001. 9.13

직류모선으로부터 전력을 공급받는 전철시스템에서 제동이나 하강 경사로 주행시에 직류모선으로 회생되는 에너지를 급전시스템으로 회생하는 연구는 에너지의 효율적인 이용측면에서 매우 중요하다<sup>[1]</sup>. 잉여분의

직류전력을 교류모션으로 회생시키는데 있어서의 문제점은 전력이 회생됨에 따라 교류모션의 전력품질이 저하되는 외에도 전력 회생시 무효전력이 발생하여 단위 역률을 달성하기 어렵다는 것이다. 따라서 원하는 양만큼의 유효전력을 회생시키면서도 무효전력을 제어하여 역률을 개선할 수 있는 제어기법이 필요하다.

본 논문에서는 교류모션으로 원하는 만큼의 유효전력을 회생하면서도 무효전력을 영으로 제어하여 역률을 개선할 수 있는 제어기법을 제시하고자 한다.

### 2. 회생시스템의 구성과 출력전압

전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행시에 직류모션으로 전력이 회생되면 직류모션의 전압이 상승한다. 이때 직류모션으로 회생된 에너지는 같은 직류구간내의 다른 전동차에서 소모된다. 그러나 동일 구간의 직류 모션내에 주행중인 전동차가 없거나 회생된 에너지가 인접한 전동차에서 필요한 전력보다 많으면 직류모션의 전압은 점점 더 상승하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하여 직류모션의 잉여전력을 교류모션으로 회생할 수 있다. 이 인버터가 회생용 인버터이며, 인버터에 의해 회생된 에너지는 보조설비나 다른 구간의 전동차에 공급된다.

그림 1은 직류전력을 회생하기 위한 시스템의 개념도이다.

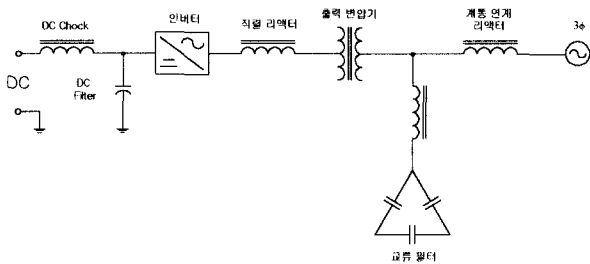


그림 1 직류전력 회생시스템  
Fig. 1 DC power regenerating system

직류전력 회생시스템에서 교류모션으로 에너지가 회생됨에 따라 직류모션의 전압이 감소한다. 그러나 회생시스템의 출력전압은 교류모션의 전압에 따라 알맞은 크기로 제어되어야 한다. 이를 위하여  $\alpha$ 도통모드를 사용하여 직류전력 회생용 인버터의 출력전압을 제어하는 기법이 제안되었다<sup>[2]</sup>.

$\alpha$ 도통모드는 구형과 인버터에서 출력전압을 제어할 수 있는 효과적인 방법이기도 하지만 유도성 부하일 경우에는 게이트 신호뿐만 아니라 부하의 특성에 따라 인버터의 출력전압이 변동되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수정  $\alpha$ 도통모드 제어방식이 제안되었다<sup>[3]</sup>.

수정  $\alpha$ 도통모드로 그림 3의 INV #1과 같은 3상 구형과 인버터를 제어할 때 인버터의 선간전압 파형은 그림 2와 같으며,  $\beta = (\pi - \alpha)/2$ 의 관계식을 이용하여 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$v_{UV} = \sum_n^{odd} V_{na} \sin n \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) \tag{1}$$

$$\text{단, } V_{na} = \frac{4V_d}{n\pi} \cos \frac{n\pi}{6} \left\{ 2 \cos n \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) - 1 \right\}$$

회생인버터 출력전압의 고조파를 저감시키기 위해 그림 3과 같이 두 대의 구형과 인버터를  $\pi/6$ 의 위상차로 2중화하고 특수 결선된 지그재그 출력변압기를 사용한다. 그리고 교류필터를 사용하여 잔존 고조파를 저감시킨다.

그림 3에서 변압기  $T_{r1}$ 의 권수비  $N_1$ 과 변압기  $T_{r2}$ 의 상단 권수비  $N_2$  및 하단 권수비  $N_3$  사이에  $N_1 = \sqrt{3}N_2 = \sqrt{3}N_3$ 의 관계가 성립하면  $(12m \pm 1)$ 차의 고조파만 남게 되며,<sup>[4]</sup> 이때의 선간 출력전압  $v_{RS}$ 는 다음과 같다.

$$v_{RS} = \sum_n^{odd} V_{na} N_1 \left( \sqrt{3} + 2 \cos \frac{n\pi}{6} \right) \sin n \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right) \tag{2}$$

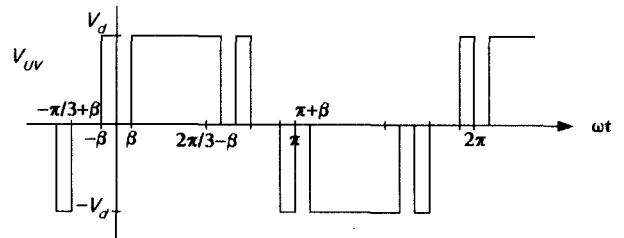


그림 2 수정  $\alpha$  모드방식일 때의 출력 선간전압  
Fig. 2 Line-to-line output voltage in modified  $\alpha$ -conduction mode

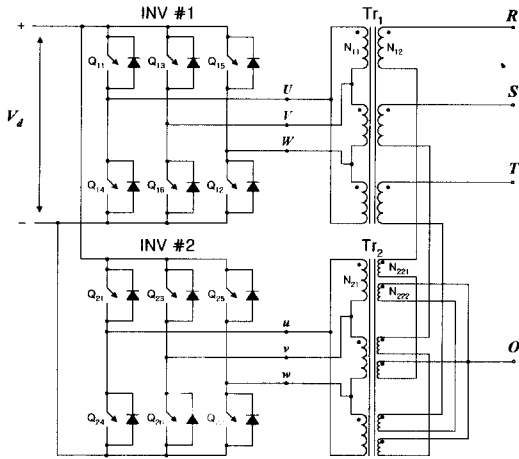


그림 3 회생용 인버터 시스템의 구성  
Fig. 3 Configuration of regenerating inverter system

### 3. 역률제어 알고리즘

본 논문에서는 직류전력 회생시스템의 역률을 개선하기 위하여 무효전력을 0으로 제어한다. 이 인버터 시스템은 3상 대칭이므로 한 상에 대해서 해석한 후에 각 값을 3상으로 치환하면 된다. 인버터 시스템의 출력전압에서 기본과 성분만을 고려할 경우, 시스템의 상당 등가회로는 그림 4와 같으며 등가회로의 벡터도는 그림 5와 같다. 등가회로에서 두 전원 사이에 연계 리액턴스만 존재하므로 전력원선도는 그림 6과 같다<sup>[5]</sup>. 교류모션으로 전달되는 복소전력은  $S_{AC} = P_{AC} + jQ_{AC}$ 이며, 이때의 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P_{AC} = \frac{|V_{R1}| |V_A|}{X_l} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q_{AC} = \frac{|V_A|}{X_l} (|V_{R1}| \cos \delta - |V_A|) \quad (4)$$

역률을 개선하기 위해서는 무효전력  $Q_{AC}$ 가 0이 되어야 하며, 식 (4)에서 다음을 만족하여야 한다.

$$|V_{R1}| = \frac{|V_A|}{\cos \delta} \quad (5)$$

이때 교류모션으로 전달되는 유효전력은 다음과 같다.

$$P_{AC} = \frac{|V_A|^2}{X_l} \tan \delta \quad (6)$$

따라서 교류모션으로 회생시키고자 하는 유효전력의 양을 먼저 결정하면 식 (6)에서  $|V_A|$ 와  $X_l$ 의 값이 일정하므로  $V_{R1}$ 과  $V_A$  사이의 위상차  $\delta$  값이 결정된다. 이때 무효전력을 0으로 제어하려면 식 (5)의 관계가 만족되어야 하며,  $|V_A|$ 와  $\delta$ 의 값으로  $|V_{R1}|$ 을 구하면 2장에서 이에 해당하는  $\alpha$  값을 산출할 수 있다.

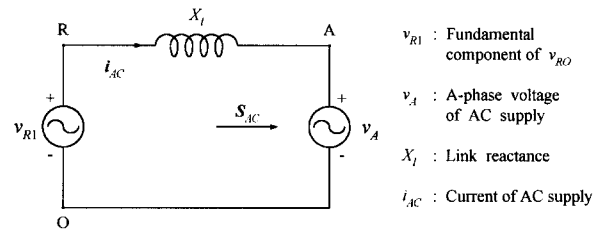


그림 4 상당 등가회로  
Fig. 4 Per-phase equivalent circuit

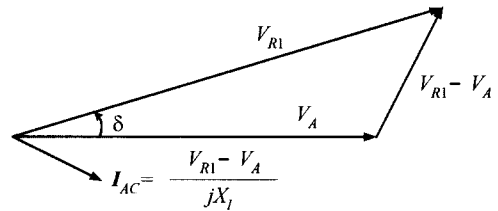


그림 5 등가회로의 벡터도  
Fig. 5 Vector diagram of equivalent circuit

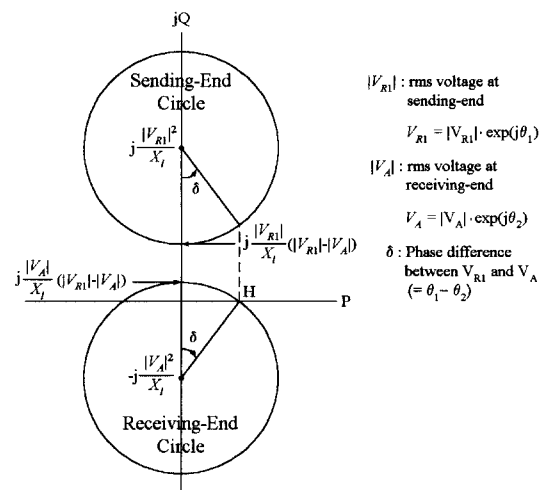


그림 6 전력원선도  
Fig. 6 Power circle diagram

### 4. 역률 개선

이상에서 알 수 있듯이 유효전력과 무효전력을 제어하려면 인버터의 출력전압과 위상차  $\delta$ 를 제어하여야 한다. 이와 같이 유효전력과 무효전력이 모두 인버터 출력전압의 크기와 위상차  $\delta$ 에 대해 서로 커플링되어 있으므로 원활한 제어를 위해서는 디커플링이 필요하다.

디커플링 방법으로는 연계리액터에 흐르는 전류를 유효성분과 무효성분으로 나누어 각각을 독립적으로 제어하는 방법과 구간별로 변수에 대한 감도를 구해 감도가 상대적으로 낮은 변수의 영향을 무시하는 방법 등이 있다. 전류를 성분별로 디커플링하는 방법은 빠른 응답을 얻을 수 있지만 인버터의 출력전류를 실시간으로 제어해야 하기 때문에 스위칭 주파수의 제약이 심한 대용량 시스템에는 적용하기가 곤란하다. 구간별로 감도를 구해 디커플링하는 방법은 간단하고 스위칭 주파수가 낮아도 디커플링 효과를 얻을 수 있으므로 대용량 인버터에 적당하다.

본 논문에서는 구간별로 제어변수에 대한 감도를 구해 상대적으로 감도가 큰 변수만을 고려하는 방법을 이용하며, 인버터 출력전압의 고조파에 의해 발생하는 무효전력을 보상하기 위하여 그림 4의 등가회로모델을 이용한 보상기를 설계한다.

직류전력 회생시스템에서는 위상차  $\delta$ 의 구간이  $10^\circ$  이하이고 인버터의 출력전압의 변화가 15%이내이기 때문에<sup>[2]</sup> 유효전력은 인버터의 출력전압보다  $\delta$ 의 변화에 더 민감하며, 무효전력은 위상차  $\delta$ 보다 인버터의 출력전압에 더 민감하다. 그러므로 유효전력은 위상차  $\delta$ 의 함수로 볼 수 있으며 무효전력은 인버터 출력전압의 함수로 볼 수 있다. 인버터 출력전압의 크기는 도통각  $\alpha$ 의 함수이므로 무효전력은 결국 도통각  $\alpha$ 의 함수로 볼 수 있다.

유효전력을 제어하기 위해 출력이  $\delta_k$ 인 PI제어기를 구성하고, 위상차가  $\delta_k$ 일 때 무효전력이 0인 조건에서의 도통각  $\alpha_{k,ref}$ 를 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$|V_{R1}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4V_d}{\pi} \cos \frac{\pi}{6} \left\{ 2 \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{k,ref}}{2} \right) - 1 \right\} \cdot N_2 \left( \sqrt{3} + 2 \cos \frac{\pi}{6} \right)$$

$$= \frac{6\sqrt{2}V_d}{\pi} \left( 2 \sin \frac{\alpha_{k,ref}}{2} - 1 \right) N_2 = \frac{|V_A|}{\cos \delta_k}$$

따라서

$$\alpha_{k,ref} = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\pi |V_A|}{12\sqrt{2} N_2 V_d \cos \delta_k} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

교류모션으로 전달되는 전력을 구하기 위해 교류모션 앞단에서 선간전압과 선전류를 검출한다. 선간전압을 검출하기 때문에 전압의 크기와 위상을 상전압 기준으로 바꾸기 위해 식 (8)과 같이 d-q 변환하고 선전류는 식 (9)와 같이 d-q 변환한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{CA} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

d-q 변환된 전압과 전류를 이용하여 교류모션으로 전달되는 순시 유효전력과 순시 무효전력을 계산한 다음에 저역통과필터를 거쳐서 그림 7과 같이 주기당 평균 유효전력과 평균 무효전력을 구한다.

실제 인버터 출력전압은 완전히 정현적이지 않기 때문에 고조파에 의해서도 무효전력이 발생한다. 그러나 3상에서는 인버터 시스템 출력전압의 기본과 성분만을 대상으로 하여 무효전력을 제어하기 때문에, 고조파에 의해 추가로 발생하는 무효전력을 보상하기 위해 보상기를 구성한다.

유효전력을 제어하기 위한 PI제어기, 등가회로모델을 이용한 보상기와 유효전력 및 무효전력의 연산부를 포함한 전체 제어시스템의 블록도는 그림 8과 같다.

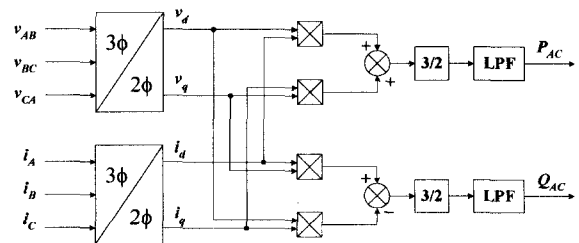


그림 7 유효전력 및 무효전력 연산부  
Fig. 7 Operation part for active and reactive power

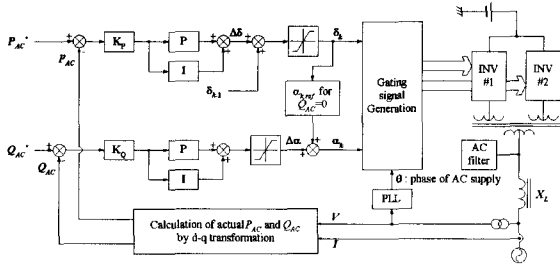


그림 8 전체 전력제어시스템 블록도  
Fig. 8 Overall block diagram of proposed power control system

직류전력 회생시스템에서 교류모션측 선간전압과 전류를 검출하여 d-q 좌표계로 변환한 후 평균값 유효전력과 무효전력을 계산한다. 계산된 유효전력은 유효전력 명령값  $P_{AC}^*$ 와 비교하고 PI제어기를 사용하여 위상차  $\delta_k$ 를 얻는다. 위상차가  $\delta_k$ 일 때 무효전력을 영이 되게 하는 도통각  $\alpha_{k,ref}$ 를 계산한다. 고조파에 의해 발생하는 무효전력을 제거하기 위해 보상기를 사용하여  $\Delta\alpha$ 를 구한 다음에 이  $\Delta\alpha$ 로  $\alpha_{k,ref}$ 를 보상하여  $\alpha_k$ 를 얻는다. 검출된 교류모션 선간전압에서 PLL를 사용하여 위상정보  $\theta$ 와 주파수  $f$ 를 얻고 계산된  $\alpha_k$ ,  $\delta_k$ 를 이용하여 인버터의 게이트 신호를 발생시킨다.

### 5. 시뮬레이션

제안한 제어기법의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 단국대학교 전력전자연구실을 기준으로 하여 교류모션이 220V일 때 5kVA 용량인 축소모델을 대상으로 하였다.

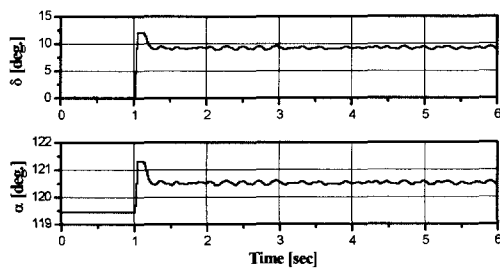


그림 9 위상각  $\delta$  과 도통각  $\alpha$   
Fig. 9 Phase difference  $\delta$  and conduction angle  $\alpha$

그림 9는 유효전력 명령값의 변화에 따른 위상차  $\delta$ 와 도통각  $\alpha$ 의 응답을 나타낸 것이다. 유효전력 명령값  $P_{AC}^*$ 와 무효전력 명령값  $Q_{AC}^*$ 의 초기값은 0이며, t

= 1sec일 때 유효전력 명령값만 0에서 4kW로 변화시켰다.

그림 10에서 회생되는 유효전력은 작은 오버슈트가 있으나 명령값을 잘 추종하며, 무효전력은 여전히 0에 가깝게 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 제어가 시작된 1sec에서부터 직류전력 회생시스템의 역률을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 직류전력회생시스템에 본 논문에서 제안한 제어기법을 사용하면 거의 단위역률을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

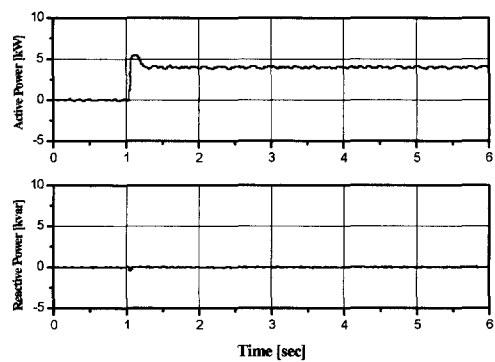


그림 10 회생되는 유효전력과 무효전력  
Fig. 10 Regenerative active and reactive power

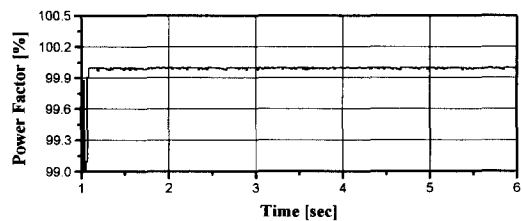


그림 11 회생시스템의 역률  
Fig. 11 Power factor of regenerating system

### 6. 결론

본 논문은 전철시스템에서 잉여 직류전력을 교류모션으로 회생하는 경우에 원하는 만큼의 유효전력을 회생하면서도 무효전력을 영으로 제어하여 근사 단위역률을 달성할 수 있는 제어기법을 제안하였다. 제안한 제어기법에서는 유효전력을 제어하기 위해 PI제어기를 사용하였으며 무효전력을 영으로 제어하기 위해 등가 회로모델을 이용한 보상기를 사용하였다. 제안한 제어기법의 타당성을 입증하기 위해 축소모델을 대상으로

하여 시뮬레이션하였으며, 역률이 99% 이상임을 확인하였다.

**참 고 문 헌**

- [1] 김명수, 윤인식, 박영진, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구”, *전력전자학회 전력전자학술대회 논문집*, pp. 464~468, 1999. 7.
- [2] 서영민, 이주훈, 김경원, 윤인식, 유종걸, 윤덕용, 홍순찬, “ $\alpha$ 도통모드에 의한 직류전력회생용 인버터 출력전압의 크기 제어”, *전력전자학회 전력전자학술대회 논문집*, pp. 351~354, 2000. 7.
- [3] 김경원, 홍순찬, 유종걸, 김상균, 박채운, “R-L부하를 가진 구형과 VSI의 전압크기 제어”, *전력전자학회 전력전자학술대회 논문집*, pp. 479~482, 2001. 7.
- [4] Ju-Hoon Lee, In-Sic Yoon, Young-Min Seo, Duck-Yong Yoon, and Soon-Chan Hong, “Control and Harmonic Reduction Technique of Inverters for DC Power Regeneration”, *ICEE2K Proceedings*, pp. 982~985, July 2000.
- [5] A. R. Bergen and V. Vittal, *Power Systems Analysis*, Prentice-Hall, Inc., 2000.

**저 자 소 개**



**김경원(金敬源)**

1973년 10월 30일생. 2000년 단국대 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**윤인식(尹仁植)**

1974년 11월 2일생. 1999년 단국대 전기공학과 졸업. 2001년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 LG산전(주) 근무.



**서영민(徐永珉)**

1974년 5월 5일생. 1997년 단국대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**윤덕용(尹德鏞)**

1958년 5월 19일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 단국대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1982년~1984년 삼성전자(주) 종합연구소 주임연구원. 1984년~1985년 한독(주) 컴퓨터기술연구소 과장대리. 1985년~현재 천안공업대학 제어계측과 교수. 당 학회 학술위원.



**홍순찬(洪淳瓊)**

1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학과 전임강사. 1978년~현재 단국대 공학부 전기전자컴퓨터전공 교수. 1986년~1987년 미국 Texas A&M University 방문교수. 현재 당 학회 부회장.