

## 직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구

윤인식\*, 서영민\*, 홍순찬\*, 윤덕용\*\*, 한성수\*\*\*  
 단국대학교 전기공학과\*, 천안공업대학 제어계측과\*\*, 한국철도차량(주)\*\*\*

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

In-Sic Yoon\*, Young-Min Seo\*, Soon-Chan Hong\*, Duck-Yong Yoon\*\*, Sung-Soo Han\*\*\*  
 Dankook University\*, Chonan National Technical College\*\*, Korea Rolling Stock Co.\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper deal with the power factor improvement of DC power regenerating systems, which are composed of two inverters, zig-zag connected output transformers, and an AC filter. The output voltages of the inverter system are not sinusoidal. Regenerated complex power is analyzed on the basis of fundamental components and therefore 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 for nonsinusoidal case. Computer simulations are carried out to verify the validity of the prososed control scheme.

#### 1. 서 론

직류모션으로부터 전력을 공급받는 전철시스템에서 제동시나 하강 경사로 주행시에 직류모션으로 회생되는 에너지를 급전시스템으로 회생하는 연구는 에너지의 효율적인 이용측면에서 매우 중요하다.<sup>[1]</sup> 직류전력을 교류모션으로 회생시키는데 있어서의 문제점은 전력이 회생됨에 따라 교류모션의 전력품질이 저하되는 외에도 전력 회생시 무효전력이 발생하여 단위역률을 달성하기 어렵다는 것이다. 따라서 원하는 양만큼의 유효전력을 회생시키면서도 무효전력을 제어하여 근사 단위역률을 달성할 수 있는 제어기법이 필요하다.

본 논문에서는 교류모션으로 원하는 만큼의 유효전력을 회생하면서도 무효전력을 영으로 제어하여 근사 단위역률을 달성할 수 있는 제어기법을 제시하고자 한다.

#### 2. 직류전력 회생시스템

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.

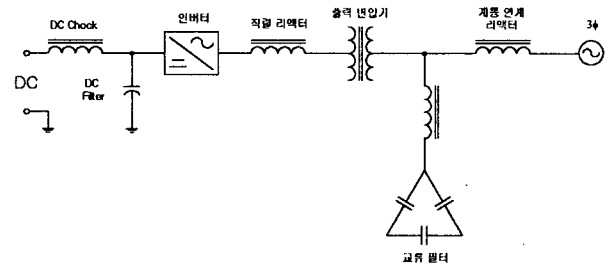


그림 1 직류전력 회생시스템  
 Fig. 1 DC power regenerating system.

직류전력 회생시스템에서 교류모션으로 에너지가 회생됨에 따라 직류모션의 전압이 감소한다. 그러나 회생인버터의 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 구형파 인버터에서 출력전압을 제어할 수 있는 효과적인 방법이지만 유도성 부하일 경우에는 게이트 신호뿐만 아니라 부하의 특성에 따라 인버터의 출력전압이 변동되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수정  $\alpha$ 도통

모드 제어방식이 제안되었다.<sup>[3]</sup>

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

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

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

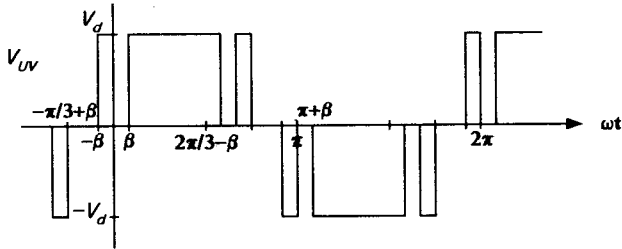


그림 2 수정  $\alpha$  모드방식일 때의 출력 선간전압  
Fig. 2 Line-to-line output voltage in modified  $\alpha$  conduction mode.

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

그림 3에서 변압기 T1의 권수비는  $N_1$ 과 변압기 T2의 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, 이때의 선간 출력전압  $v_{RS}$ 는 다음과 같다.

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

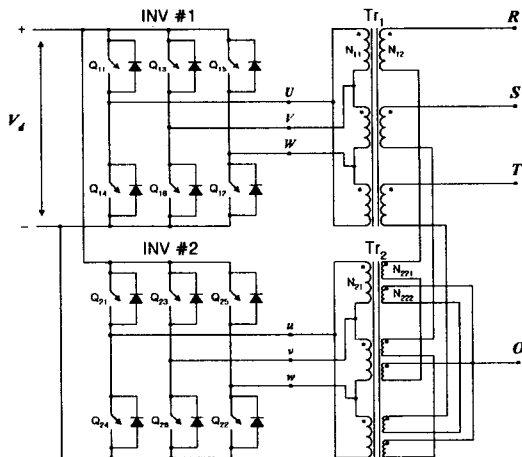


그림 3 회생용 인버터 시스템의 구성  
Fig. 3 Configuration of regenerating inverter system.

### 3. 복소전력 해석

직류전력 회생용 인버터 시스템은 3상 대칭이므로 한 상에 대해서 해석한 후에 각 값을 3상으로 치환하면 된다. 시스템의 상당 등가회로는 그림 4와 같으며 등가회로의 벡터도는 그림 5와 같다. 등가회로에서 두 전원 사이에 연계리액터만 존재하므로 전력원선도는 그림 6과 같다.<sup>[4]</sup> 교류모션으로 전달되는 복소전력은  $S_{AC} = P_{AC} + jQ_{AC}$ 이다. 이때의 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.<sup>[4]</sup>

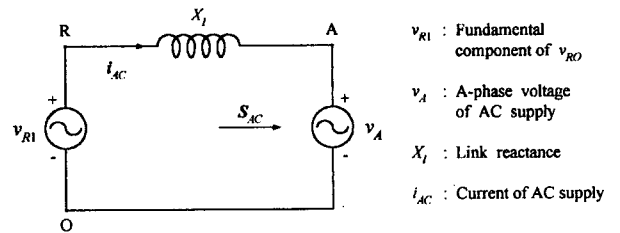


그림 4 상당 등가회로  
Fig. 4 Per-phase equivalent circuit.

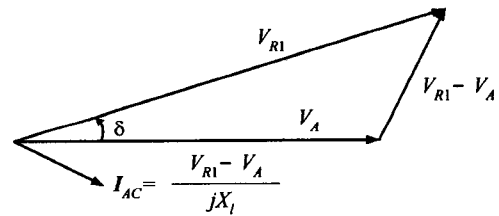


그림 5 등가회로의 벡터도  
Fig. 5 Vector diagram of equivalent circuit.

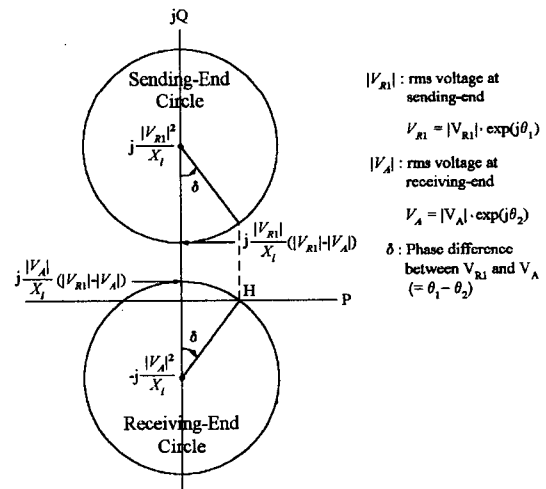


그림 6 전력원선도  
Fig. 6 Power circle diagram.

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

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

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

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

이때 교류모션으로 전달되는 유효전력은 다음과 같다.

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

#### 4. 역률 개선

식 (3) 및 (4)에서 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 유효전력 성분과 무효전력 성분으로 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 적당하나 구간이 한정되고 구간을 벗어나면 디커플링이 되지 않는 단점을 지니고 있다.

본 논문에서는 구간별로 제어변수에 대한 감도를 구해 상대적으로 감도가 큰 변수만을 고려하는 방법을 이용하며, 인버터 출력전압의 고조파에 의해 발생하는 무효전력을 보상하기 위해 등가회로모형을 이용한 전향보상기를 설계한다.

직류전력 회생시스템에서는 위상차  $\delta$ 의 구간이  $12^\circ$  이하이고 인버터의 출력전압의 변화가 15%이기 때문에<sup>[2]</sup> 유효전력은 인버터의 출력전압보다  $\delta$ 의 변화에 더욱 민감하며, 무효전력은 위상차  $\delta$ 보다 인버터의 출력전압에 더욱 민감하다. 그러므로 유효전력은 위상차  $\delta$ 의 함수로 볼 수 있으며 무효전

력은 인버터 출력전압의 함수로 볼 수 있다. 인버터 출력전압의 크기는 도통각  $\alpha$ 의 함수이므로 무효전력은 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.

$$\begin{aligned} |V_{Rl}| &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4V_d}{\pi} \cos \frac{\pi}{6} \left\{ 2 \cos \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{k,ref}}{2} \right) - 1 \right\} N_2 (\sqrt{3} + 2 \cos \frac{\pi}{6}) \\ &= \frac{6\sqrt{2}V_d}{\pi} \left\{ 2 \sin \frac{\alpha_{k,ref}}{2} - 1 \right\} N_2 = \frac{|V_A|}{\cos \delta_k} \\ \therefore \alpha_{k,ref} &= 2 \sin^{-1} \left( \frac{\pi |V_A|}{12\sqrt{2} N_2 V_d \cos \delta_k} + \frac{1}{2} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

그러나 실제 인버터 출력전압은 완전히 정현적이지 않기 때문에 고조파에 의해서도 무효전력이 발생한다. 이때 고조파에 의해 추가로 발생하는 무효전력을 보상하기 위해 전향보상기를 구성한다.

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.

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

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

d-q 변환된 전압과 전류를 이용하여 교류모션으로 전달되는 순시 유효전력과 순시 무효전력을 계산한 다음에 저역통과필터를 거쳐서 평균 유효전력과 평균 무효전력을 구한다.

유효전력을 제어하기 위한 PI제어기, 등가회로도

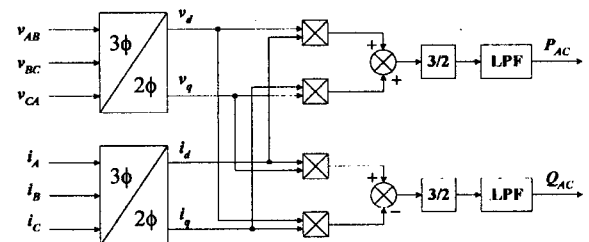


그림 7 유효전력 및 무효전력 연산부 블록도  
Fig. 7 Operation part for active and reactive power.

델을 이용한 전향보상기와 유효전력 및 무효전력의 연산부를 포함한 전체 제어시스템의 블록도는 그림 8과 같다.

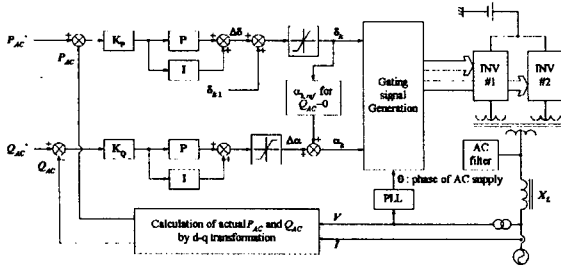


그림 8 전체 제어시스템 블록도  
Fig. 8 Overall block diagram of proposed power control system.

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

## 5. 시뮬레이션 결과

제안한 제어기법의 타당성을 검증하기 위하여 교류모선이 220 V일 때 5 kVA용량인 축소모델을 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9는 유효전력 명령값의 변화에 따른 위상차  $\delta$ 와 도통각  $\alpha$ 의 응답을 나타낸 것이다. 유효전력명령값  $P_{AC}^*$ 와 무효전력 명령값  $Q_{AC}^*$ 의 초기값은 0이며,  $t=1$  sec일 때 유효전력 명령값을 0에서 4 kW로

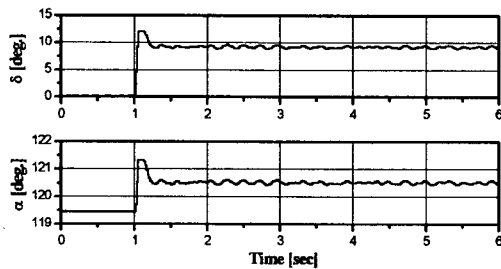


그림 9 위상각  $\delta$  과 도통각  $\alpha$   
Fig. 9 Phase difference  $\delta$  and conduction angle  $\alpha$ .

변화시켰다. 그림 10에서 회생되는 유효전력은 작은 오버슈트가 있으나 명령값을 잘 추종하며 무효전력은 0에 가깝게 제어되고 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과로부터 제안한 제어기법을 적용한 시스템의 역률을 구하면 99% 이상이다.

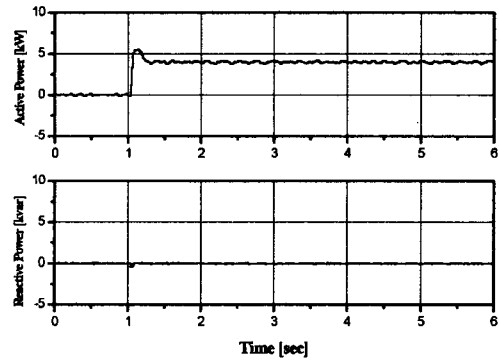


그림 10 회생되는 유효전력과 무효전력  
Fig. 10 Regenerative active and reactive power.

## 6. 결 론

본 논문은 전철시스템에서 잉여 직류전력을 교류모선으로 회생하는 경우에 원하는 만큼의 유효전력을 회생하면서도 무효전력을 영으로 제어하여 근사 단위역률을 달성할 수 있는 제어기법을 제시하였다. 제안한 제어기법에서는 유효전력을 제어하기 위해 PI제어기를 사용하였으며 무효전력을 영으로 제어하기 위해 등가회로모델을 이용한 전향보상기를 사용하였다. 제안한 제어기법의 타당성을 입증하기 위해 축소모델을 대상으로 하여 시뮬레이션하였으며, 역률이 99% 이상임을 확인하였다.

본 연구는 에너지자원기술개발원센터가 지원하고 한국철도차량주식회사가 주관하는 에너지 절약기술개발사업의 연구결과중 일부임.

## 참 고 문 헌

- [1] 김명수 외, "직류전력 회생용 인버터의 고조파 저감에 관한 연구", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp. 464~468, 1999.
- [2] 서영민 외, " $\alpha$ 도통모드에 의한 직류전력회생용 인버터 출력전압의 크기 제어", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, pp. 351~354, 2000.
- [3] 김경원 외, "R-L부하를 가진 구형파 VSI의 출력전압 제어", 전력전자학회 전력전자학술대회 논문집, 2001.
- [4] A. R. Bergen and V. Vittal, Power Systems Analysis, Prentice-Hall, Inc., 2000.