

# 능동전력필터 기능이 추가된 지하철 회생 전력 제어용 인버터에 관한 연구

최창열\*, 배창환\*\*, 장수진\*, 송상훈\*\*\*, 원충연\*  
 (성균관대학교\*, 한국철도기술연구원\*\*, 산업기술시험원\*\*\*)

## A Study on Inverter for DC Traction Regenerative Power Control with Active Power Filter Ability

Chang-Youl Choi\*, Chang-Hwan Bae\*\*, Su-Jin Jang\*, Sang-Hun Song\*\*\*, Chung-Yuen Won\*  
 (Sungkyunkwan University\*, Korea Railroad Research Institute\*\*, Korea Testing Laboratory\*\*\*)

### ABSTRACT

This paper proposes a regeneration inverter system, which can regenerate the excessive power from the DC bus line to the AC source for traction systems. The proposed regeneration inverter system for DC traction can reduce harmonics which is a characteristic of the AC current source.

The simulation was composed as a prototype model [3.7kW]. Finally, it is shown that the inverter can successfully operate in regeneration mode.

### 1. 서론

전동차가 운행 중인 구간이 하구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 에너지가 회생 되어 많은 양의 전력이 발생하게 된다.<sup>[1][2]</sup>

잉여 에너지는 전동차를 가속하기 위해 투입된 에너지의 45~47%정도이며 약 20%정도는 전동차에서 소모되나 나머지 20~27%의 에너지가 잉여 전력으로 남고, 이 전력은 직류 가선 전압을 상승시킨다.

그러나 PWM DC/AC 전력 변환장치를 이용, 가선전압의 상승분을 교류 모선으로 회생시킬 경우 직류 가선 전압의 상승을 억제할 수 있고, 회생 되는 양 만큼 에너지를 절약할 수 있다.<sup>[3]</sup>

또한, 전동차 시스템에는 평상시 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류발생, 역률 저하, 전압의 외형이나 불평형이 수반되어 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생된다.

이 경우에 능동전력필터(APF)의 기능을 가지게 함으로써 두 가지 동작모드가 가능한 직류전력 회생용 인버터를 제안하였다.<sup>[4]</sup>

본 논문에서는 3.7[kW]급 에너지 회생용 전력변환 장

치를 설계하여 시뮬레이션과 실험으로 회생 및 능동전력 필터 동작을 구현하였다.

### 2. 제안된 회생용 인버터 시스템

그림 1은 기존 다이오드 정류기 시스템에 본 논문에서 제안한 IGBT 인버터, LCL필터, 변압기 등으로 구성된 직류전력 회생인버터 시스템을 나타내고 있다.

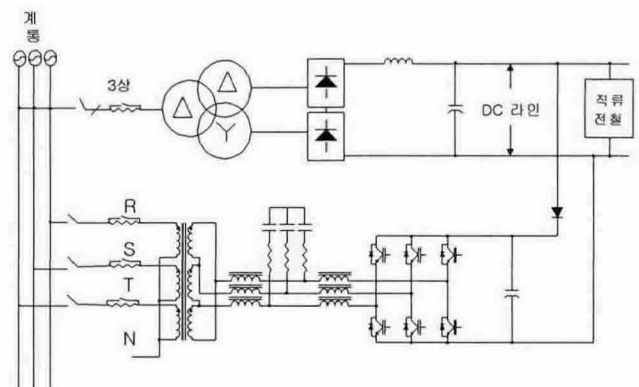


그림 1. 직류전력 회생 인버터 시스템  
 Fig 1. DC power regeneration inverter system

#### 2.1 회생용 인버터 시스템의 제어

3상의 전류를 동기좌표계의 d, q로 변환한 다음 전압지령과 DC link의 전압차로부터 PI전압제어를 행하여 d축 전류지령을 만든다. d축 전류에 q축의 간섭분을 보상하여 d축 전압지령치를 만든다.

역률을 1로 제어하기 위해 동기좌표계의 회전각  $\theta (= \omega t)$ 를  $e_q=0$ 이 되도록 설정하고 q축 전류를 0으로 제어한다. 이는 곧 유효 전력분 전류를 제어함으로써 DC link 전압을 제어하는 것과 동일하다.<sup>[5]</sup>

지금까지 언급한 3상 PWM 인버터의 전체 블록도는 그림 2와 같다.

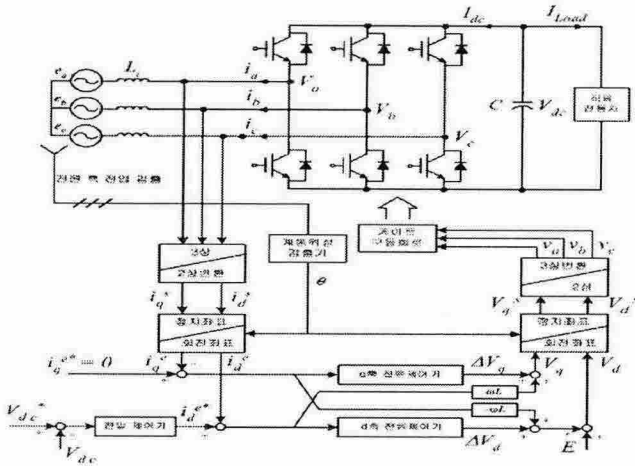


그림 2. 3상 PWM 인버터 전체 제어 블록도  
 Fig 2. The overall control block diagram of three phase PWM converter

### 2.2 능동전력필터의 제어

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭넓게 보상할 수 있고, 보상되는 양을 순시적으로 가변 제어할 수 있기 때문에 항상 최적의 전력 품질을 유지할 수 있다.

계통 내에 왜곡된 전류가 흐르게 되면, 이는 유도장해, 전력기기의 과열, 공진에 의한 이상전압 발생 등의 악영향을 미친다. 이들을 제거하기 위하여 순시무효전력 (instantaneous reactive power)을 정의하여, 이전의 무효전력보상 이론보다 일반화되어진 *pq*이론이 사용되고 있다.<sup>[6]</sup>

*p*, *q*의 직류성분과 교류 성분을  $\bar{p}$ ,  $\tilde{p}$ ,  $\bar{q}$ ,  $\tilde{q}$ 라 하면, 실제 보상성분은  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$ ,  $\tilde{q}$ 이다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (1)$$

그리고 식 (1)을 이용하여 기준 전류  $i_{\alpha}^*$ 와  $i_{\beta}^*$ 를 계산하게 되고 다시 역  $\alpha$ - $\beta$  변환을 통해서 보상전류의 지령치  $i_{a}^*$ ,  $i_{b}^*$ ,  $i_{c}^*$ 를 만든다.  $i_{fa}$ ,  $i_{fb}$ ,  $i_{fc}$ 는 실제 능동전력필터의 보상전류를 나타낸다.

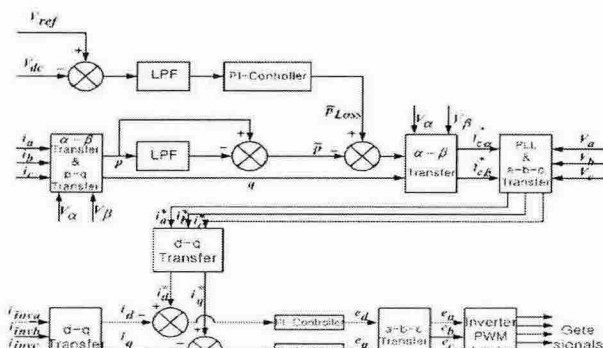


그림 3. 능동전력필터 제어 블록도  
 Fig 3. The control block diagram of active power filter

그림 3은 본 논문에서 제안하고 있는 *pq*이론을 적용한 병렬형 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다.

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 4의 제안된 시스템의 시뮬레이션은 축소모델과 동일한 파라미터 값을 가지고 회생동작 모드와 전원 축소조건을 보상하는 모드로 구분하여 수행하였다.

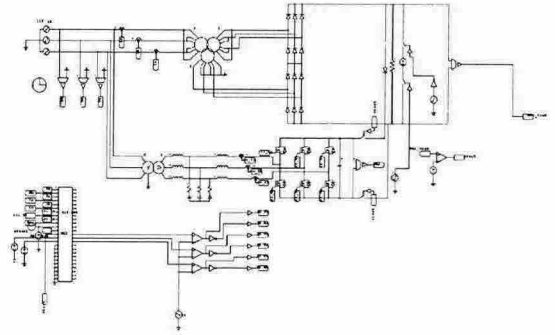


그림 4. 제안된 회생인버터 전력시스템  
 Fig 4. Proposed regeneration inverter dc power system

그림 5의 (1)파형은 능동전력필터로 동작할 때의 파형을 나타내고 있다. (a)는 정류기 입력 전류로써 12펄스 다이오드 정류기에 의해 왜곡되어진 전류 파형이다. (b)는 변압기를 거쳐 실제 전원 측으로 공급되어지는 보상 전류파형이다. (c)는 왜곡된 전류파형에서 보상전류에 의해 고조파가 저감된 전원 측의 정현파에 가까운 전류파형이다.

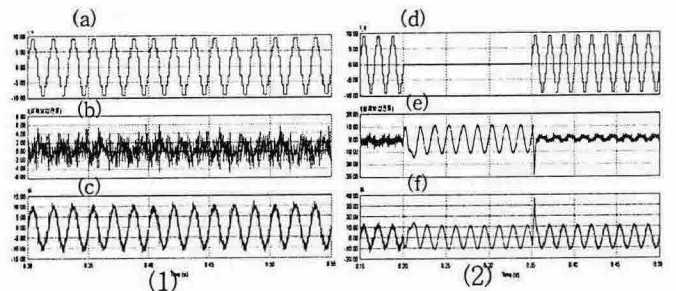


그림 5. (1)능동전력필터 동작 시 보상전류 파형  
 (2)회생동작과 능동전력필터 동작  
 Fig 5. (1)Compensation current at active power filter operation  
 (2) regeneration operation and APF operation

그림 5의 (2)파형은 회생전력발생시 회생인버터 동작과 회생전력 발생이 없을시 능동전력필터로 동작하고 있음을 나타낸다. (d)는 정류기 입력 전류로써 0.2초에 회생전력이 발생함으로써 부하 측으로 전류가 흐르지 않는 것을 보여준다. 0.2초 이후에 회생 전류를 공급하고 0.35초 이후에는 능동전력필터로써 보상전류를 공급함 (e)

에 나타내고 있다. (f)는 전원 측 전류로써 회생전력이 발생하지 않을 시에는 능동전력필터로 동작하여 고조파를 저감시키는 것을 보여준다.

#### 4. 실험결과

표 1은 실험에 사용된 축소모델의 파라미터를 나타낸다.

표 1. 축소모델 파라미터  
Table 1. Parameter of experience.

정류 용량	5[kVA]
회생 용량	3.7[kVA]
스위칭 주파수	2[kHz]
허용 전류(MAX)	12[A]
허용 전압(MAX)	350[V]
계통 연계 리액터	7[mH]
12펄스 정류 전압(무부하)	150[V]

그림 6은 실험에 사용된 축소모델[3.7kW]과 DC축 전압 상승 시 d축과 q축 전류를 나타낸다. q축 전류는 무효전력 성분이고 d축 전류는 회생 유효전력을 나타낸다. 유효전력 성분만이 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

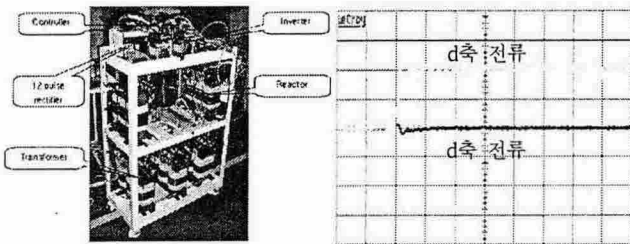


그림 6. 축소모델 [3.7kW]과 d,q축 전류  
Fig 6. Prototype model and Current of d axis and q axis

그림 7의 파형은 a상 전압과 a상 회생전류를 나타낸다. 디지털 PLL을 거침으로써 변압기에 의한 위상차를 보상하고 전압과 180도 위상차이므로 단위역률 ( $\cos\theta = 1$ )로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

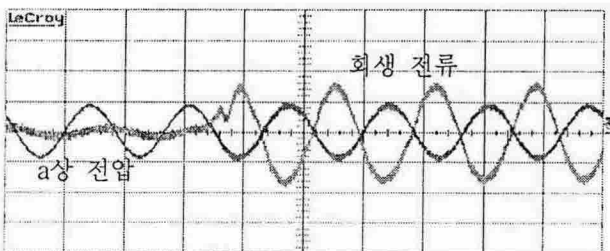


그림 7. a상 전압과 a상 회생 전류  
Fig 7. Voltage of a phase and regeneration current of a phase.

그림 8의 파형은 DC가선 전압과 회생전류를 나타낸다. 회생동작 시 전압제어에 의해 DC가선 전압이 하강하고 상승전압에 따른 d축 전류(유효전력)의 지령치 만큼 회생되어지는 것을 알 수 있다.

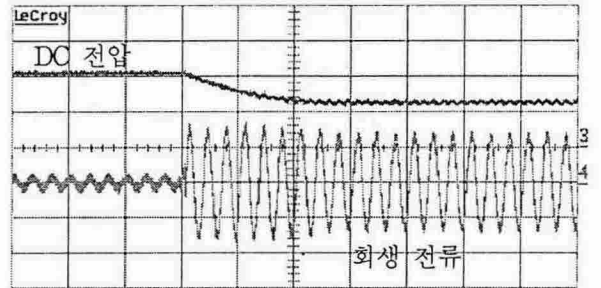


그림 8. DC전압과 회생전류  
Fig 8. DC voltage and regeneration current

#### 5. 결론

본 논문에서는 직류를 전원으로 하는 전철 시스템에서 잉여분의 직류 전력을 교류모션으로 회생하면서 정류모드 시 고조파를 저감할 수 있는 능동전력 필터 기능이 추가된 직류전력 회생용 인버터 시스템을 구성하고 이를 고효율·단위역률로 제어할 수 있는 제어 기법을 연구하였다.

제한된 직류급전시스템을 시뮬레이션과 실험을 통해 기존 다이오드 정류기 시스템보다 에너지 활용성 증가 및 전원 측 전류의 낮은 고조파 함유율을 확인하였다.

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 과제에 일환으로 수행 되었으며 지원에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구” 전력전자학회 논문지, 제 6권, 제 5호, 2001.
- [2] 김경원, 서영민, 홍순찬, “회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구” 전력전자학회 논문지, 제 7권, 제 2호, 2002.
- [3] 백병산, 김남해, “전기철도 급전시스템에 응용되는 전력전자 및 제어기술” 전력전자학회지, 제 8권, 제 1호, 2003.
- [4] 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.
- [5] Ohnishi.T, “Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control”, IECON of IEEE, Vol. 1, pp. 819-824, 1991.
- [6] 하오철, “UPQC의 제어시스템 설계와 성능해석에 관한 연구”, 명지대학교 석사학위논문, 2001.