

## 직류전철용 전력공급 장치의 에너지회생에 관한연구

방효진\* · 장수진\* · 송상훈\*\* · 원충연\* · 김용기\*\*\* · 안규복\*\*\*\*  
 성균관대학교\* · 산업기술시험원\*\* · 한국철도기술연구원\*\*\* · 인텍 FA\*\*\*\*

### A study on energy regeneration of power supply for DC electric traction system

Hyo-Jin Bang\* · Su-jin Jang\* · Sang-Hun Song\*\* · Chung-Yuen Won\*  
 Yong-Ki Kim\*\*\* · Yu-Bok Ahn\*\*\*\*

Sungkyunkwan University\* · Korea Testing Laboratory\*\* · Korea Railroad Research  
 Institute\*\*\* · IN-TECH FA\*\*\*\*,

#### ABSTRACT

This paper described a dc power system, which can generate the excessive dc power form dc bus line to ac source in substation for traction system. The proposed regeneration inverter system for dc traction can be used as both an inverter and an active power filter(APF). As a regeneration inverter mode, it can recycle regenerative energy caused by decelerating tractions and as an active power filter mode, it can compensate for harmonic distortion produced by the rectifier substation.

#### 1. 서 론

1500[Vdc]직류 전압을 사용하는 전동차가 운행 중인 구간이 하 구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 많은 양의 잉여전력이 발생하게 된다. 이 에너지는 투입된 에너지의 약 40% 정도가 되며 직류 가선 전압을 상승시키는 원인이 된다. 이러한 경우 정류기 및 차량에 설치되어진 전력 변환기에 고장을 가져 올 수 있다.<sup>[1][2]</sup>

따라서 본 논문에서는 직류 가선 전압의 상승을 억제 하기위해 잉여전력을 회생인버터를 사용하여 교류모선으로 회생하는 알고리즘을 제안한다.

또한 평상시 즉 직류가선전압이 상승하진 않을 경우에는 직류 전동차 시스템에서 전력변환 장치사용으로 발생하는 고조파 전류, 역률저하, 전압의 왜곡 등을 줄여 주는 능동전력필터(active power filter : APF) 기능을 한다.

시스템 제어 알고리즘과 현장적용 가능성을 확인하기

위해 축소타입 설계를 통한 제어기 구성을 제안하였다.

#### 2. 제안된 직류전철용 에너지회생장치

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

3상 PWM 컨버터의 역할은 고조파 및 무효전력 발생을 줄이기 위하여 전압과 전류가 동상이 되도록 제어할 수 있다. 그리고 전력의 흐름을 양방향으로 제어할 수 있기 때문에 직류급전선의 잉여 에너지를 전원 측으로 회생시킬 수 있다.

또한 능동전력필터 기능을 추가하더라도 별도의 전력 변환회로 없이 한 시스템에서 제어가 가능하다.<sup>[3][4][5]</sup>

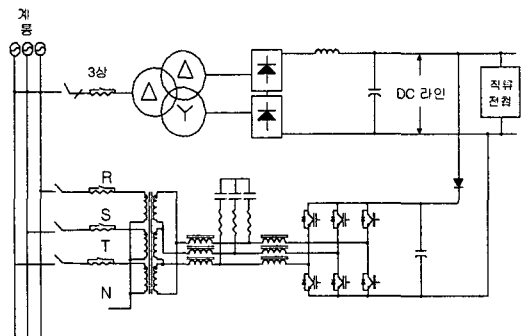


그림 1. 직류전력 회생 인버터 시스템  
 Fig 1. DC power regeneration inverter system

#### 2.1. 회생인버터 제어

기존의 PWM AC/DC 승압형 컨버터를 직류 전철 전력시스템을 위한 회생용 인버터의 알고리즘에 그대로 응용하였다. 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$0 = L_i \frac{di_d^e}{dt} - \omega L_i i_q^e + V_d^e \quad (1)$$

$$E = L_i \frac{di_q^e}{dt} + \omega L_i i_d^e + V_q^e$$

3상의 전류를 동기좌표계의  $d, q$ 로 변환한 다음 전압 지령과 DC link의 전압차로부터 PI전압제어를 행하여  $q$  축 전류지령을 만든다.

$q$  축 전류에  $d$  축의 간섭분을 보상하여  $q$  축 전압지령치를 만든다. 역률을 1로 제어하기 위해  $d$  축 전류를 0으로 제어한다.

이는 곧 유효전력분 전류를 제어함으로써 직류링크 전압을 제어하는 것과 동일하다.<sup>[6][7]</sup>

지금까지 언급한 3상 PWM 컨버터의 전체 제어도는 그림 2와 같다.

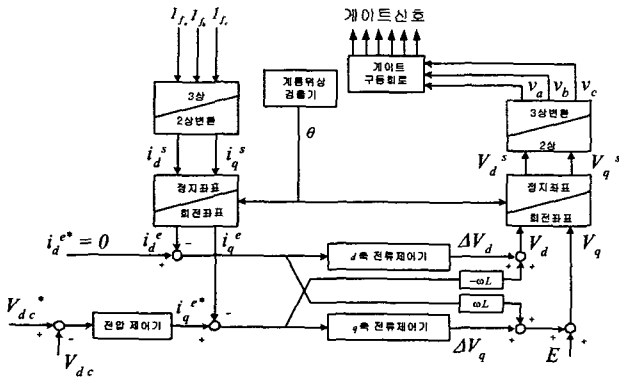


그림 2. 3상 PWM 컨버터 전체 제어 블록도  
Fig 2. The overall control block diagram of three phase PWM converter

## 2.2. 능동전력필터 제어

순시 무효전력(instantaneous reactive power)을 정의하여, 이전의 무효전력보상 이론보다 일반화되어진 무효전력보상 이론인  $pq$ 이론을 이용한다.<sup>[8][9][10]</sup>

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

식 (2)를 이용하여 레퍼런스 전류  $i_{\alpha}^*$ 와  $i_{\beta}^*$ 를 계산하게 되고 다시 역  $\alpha$ - $\beta$  변환을 통해서 보상전류의 지령치  $i_{\alpha}^*$ ,  $i_{\beta}^*$ ,  $i_{\gamma}^*$ 를 생성해낸다.

$i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}$ 는 능동전력필터의 보상전류를 나타낸다.

그림 3는 본 연구에서 제안하고 있는  $pq$ 이론을 적용한 병렬형 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다.<sup>[11]</sup>

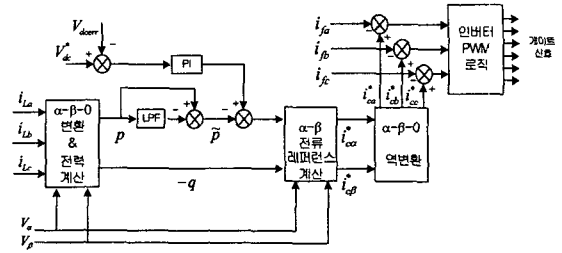


그림 3. 능동전력필터 제어 블록도  
Fig 3. The control block diagram of active power filter

## 3. 직류 전력시스템 시뮬레이션

### 3.1. 기존 다이오드 정류기 전력시스템

본 연구에서 제안한 직류 전력시스템에 대한 시뮬레이션은 Psim을 이용하였다.

그림 4의 직류 전철 전력시스템 시뮬레이션은 기존 12펄스 다이오드 정류기이다.

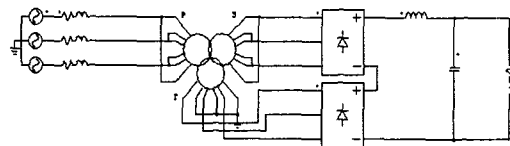


그림 4. 다이오드 정류기 직류 전력시스템  
Fig 4. Diode rectifier dc power system

표 1은 직류 전철 전력시스템을 수행하기 위한 변전소 전력시뮬레이션 데이터 및 파라미터를 나타내고 있다.<sup>[11][12]</sup> “도시철도 에너지 사용 설비 진단용역”에 관한 연구 보고서(2003년)를 활용하였다

표 1. 수락산 변전소 전력시스템 파라미터  
Table 1. Parameter of Suraksan subsystem power system

파라미터	정격
주회로	12펄스다이오드 정류기
정류기 평균 공급전력	5735[kW]
정류기 평균전류	3828[A]
구동 평균 전압	1500[V]

그림 5은 직류 가선 전압을 나타내고 있으며, 하단의 파형은 다이오드 정류기 입력전류 파형을 나타낸다.

그림 6은 입력전류 파형의 FFT분석 파형을 나타내고 있으며, 입력전류는  $n=12k \pm 1$  ( $k=1,2,3...$ )의 고조파 성분을 포함하여 11, 13차 고조파의 영향을 받고 있음을 FFT 분석을 통하여 확인 할 수 있다.

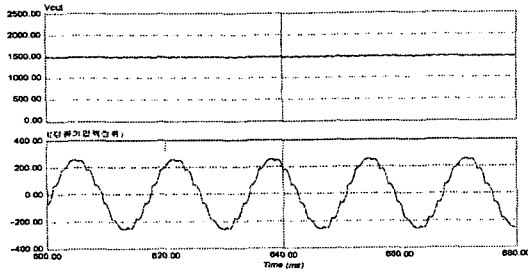


그림 5. 다이오드 정류기 출력전압, 정류기 입력전류  
Fig 5. Diode rectifier output voltage, rectifier input current

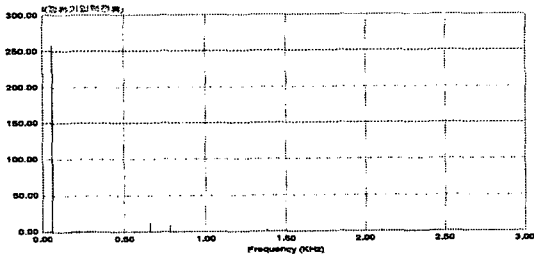


그림 6. 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석  
Fig 6. Input current FFT analysis of diode rectifier

### 3.2. 회생인버터가 추가된 직류 전력시스템

그림 7은 회생용 인버터가 추가된 그림을 나타내고 있다. 여기서 직류가선전압의 상승을 나타내기 위해 부하 측에 대용량 커패시터를 연결하여 시뮬레이션 하였다.

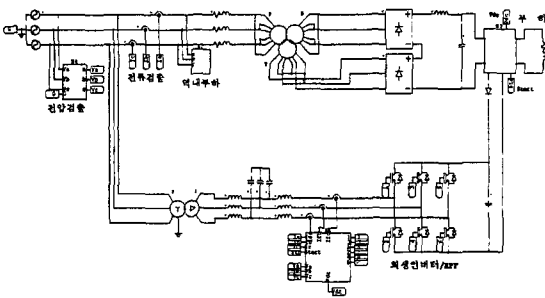


그림 7. 제안된 회생인버터 전력시스템  
Fig 7. Proposed regeneration inverter dc power system

그림 8은 직류전철 회생인버터 시스템이 추가된 경우 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다.

구동 평균전압 1499V로 정류모드 동작 시, 0.2초 후에 직류 가선전압이 상승한다. 이때 다이오드 정류기에 공급되는 입력전류는 더 이상 흐르지 않게 된다.

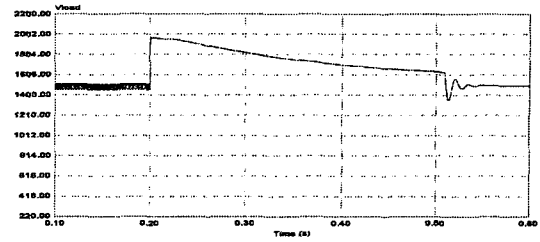


그림 8. 정류 및 회생동작 시 직류 가선전압  
Fig 8. DC trolley wire voltage at rectification and generation operation

그림 9은 회생전력이 역내부하에서 모두 소비되고 부족 전력은 계통에서 공급되는 것을 볼 수 있다.

가선전압 상승 시 회생된 전력은 교류 모선에 접속되어 있는 다른 부하에서 소비되어 회생전력의 사용 가능함을 확인하였다.

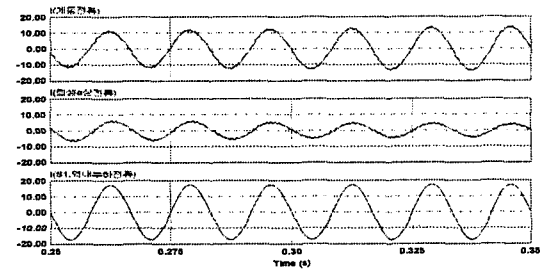


그림 9. 계통전류, 회생전류, 내부하전류 (회생전력 < 역내부하공급전력)  
Fig 9. Utility current, regeneration current, load current (regeneration power < load supply power)

그림 10는 제안한 시스템이 능동전력필터로 동작 시 계통전류, 정류기 입력전류, 보상전류를 나타낸다.

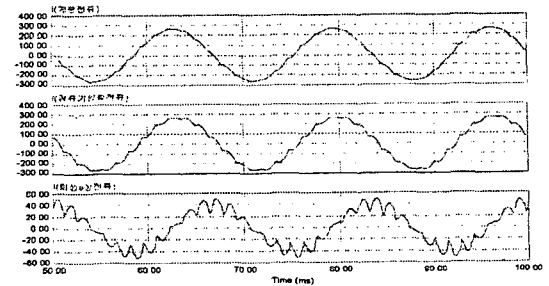


그림 10. 계통전류, 정류기 입력전류, 보상 전류  
Fig 10. Utility current, rectifier input current, compensation current

정류기 입력전류는 11차, 13차 고조파가 함유된 일그러진 파형이나, 회생인버터 시스템의 능동전력필터 기능으로 보상전류를 공급하므로 계통전류가 정현파에 가까

은 파형을 나타낸다.

그림 11은 계통전류와 정류기 입력전류의 FFT분석 결과 파형을 나타낸다. 다이오드 정류기 입력전류  $n=12k \pm 1(k=1,2,3...)$ 의 고조파 성분이 감소하는 것을 확인 하였다.

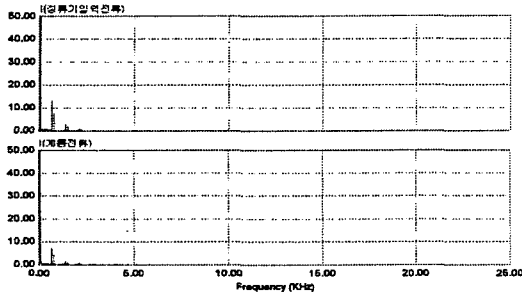


그림 11. 정류기 입력전류, 계통전류 FFT 분석  
Fig 11. FFT analysis of utility current and diode rectifier Input current

계통전류의 경우 출력 LCL필터와 인터페이스 변압기의 최적 설계가 된다면 파형의 고조파 함유율 및 파형의 왜곡을 더욱 개선시킬 수 있다.

### 3.3. 하드웨어 구성

그림 12은 현재 만들고 있는 하드웨어의 구성을 나타내고 있다. DSP302VC33 과 DSP56F807PY80 두 개의 프로세서를 이용해 신뢰성 및 소수점 연산을 가능하게 하고 외부와 통신을 가능하게 구성하였다.

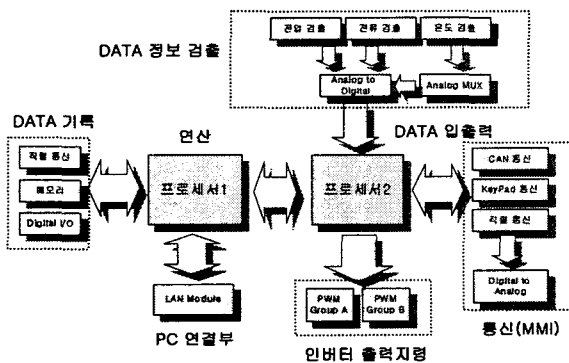


그림 12. 하드웨어 구성  
Fig 12. The consist of hardware

## 4. 결 론

제안된 직류급전시스템 시뮬레이션을 통해 기존 다이오드 정류기 시스템보다 에너지 활용성 증가 및 전류

의 THD가 약 8%정도 감소하는 것을 확인하였다

제안한 시스템을 직류전철 급전시스템에 적용 시 나타날 수 있는 문제점을 파악하고 현장 적용의 타당성을 검증하기 위하여 축소모형(3상 380[Vac], 3.7[kVA])을 설계·제작하고 있다.

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.(2003.6.30-2004.5.31)

## 참 고 문 헌

- [1] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생시스템의 역할개선에 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] A.Horn, R.H.Wilkinson, and T.H.R.Enslin, “Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations”, ISIE of IEEE, Vol.2, pp.802-807, 1996.
- [5] 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.
- [6] 한홍일, 함년근, 성낙규, 김길동, 김대균, 한경희, “3상 PWM 컨버터의 전류제어기 비교에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp.1248-1250, 2000.
- [7] 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.
- [8] J.H.Marks, and T.C.Green, “Ratings analysis of active power filters”, PESC of IEEE, Vol.3, pp.1420-1425, 2001.
- [9] 조용상, 박기원, 권명기, 박창주, “능동전력필터의 현장적용 보고”, 포스콘기술보, 2002.
- [10] 하요철, “UPQC의 제어시스템 설계와 성능해석에 관한 연구”, 명지대학교 석사학위논문, 2001.
- [11] 한국철도기술연구원, “도시철도표준화 연구개발사업 2003년도 연구중간보고서”, 2003.
- [12] 산업자원부, “대용량 직류전력 회생인버터 시스템 기술개발에 관한 최종보고서”, 2001.