

능동전력필터를 가진 지하철 회생인버터 시스템

(A Regeneration Inverter for Traction Applications with a Active Power Filter)

장수진 · 김연충 · 이병국 · 원충연* · 배창한 · 김용기

(Su-Jin Jang · Yuen-Chung Kim · Byoung-Kuk Lee · Chung-Yuen Won
· Chang-Hwan Bae · Yong-Ki Kim)

요 약

본 논문에서는 전철시스템의 직류모선에 발생하는 잉여분의 전력을 교류전원 측으로 회생시킬 수 있는 회생인버터시스템을 제안한다. 제안된 직류 전철용 회생인버터 시스템은 교류 전원 측 전류에 포함되어진 고조파를 제거할 수 있는 기능을 추가하였다. 회생인버터 모드에서는 전철의 감속에 의해 회생되는 에너지를 재사용할 수 있으며, 능동전력필터 모드에서는 정류기에 의해 발생하는 고조파 왜곡을 보상할 수 있다.

논문에서 회생용 인버터는 PWM DC/AC 인버터 알고리즘을 사용하였으며, 능동전력필터는 p-q 이론을 사용하였다. 시뮬레이션은 축소모델[3.7kW]과 동일하게 구성되었다. 시뮬레이션과 실험 결과로부터 두 가지 알고리즘이 실 모델[100kW]에서도 적용되어질 수 있음을 증명하였다.

Abstract

This paper proposes a regeneration inverter system, which can regenerate the excessive power form dc bus line to ac source for traction system. The proposed regeneration inverter system for dc traction can reduce harmonics which are included to ac current source. The regeneration inverter is operated as two modes. In the regeneration inverter mode, it can recycle regenerative energy caused by decelerating tractions and in the active power filter mode, it can compensate harmonic distortion produced by the rectifier substation.

In this paper, the regeneration inverter uses PWM DC/AC inverter algorithm and the active power filter uses p-q theory. From the informative simulation and experimental results, which are performed wiith a prototype rated 3.7[kw], it can expected that the proposed system can be effectively applied in the real traction system rated 100[kw].

Key Words : regeneration inverter, active power filter, traction system

1. 서 론

세계적으로 환경에 대한 관심과 대책에 대한 중요성이 절실한 현 시점에서 에너지 사용의 억제 및 재활용은 국가의 경쟁력으로 이어질 수 있다. 특히 화

* 주저자 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
Tel : 031-290-7115, Fax : 031-290-7179
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr
접수일자 : 2005년 12월 21일
1차심사 : 2005년 12월 22일
심사완료 : 2006년 1월 23일

능동전력필터를 가진 지하철 회생인버터 시스템

석연료의 사용으로 인한 환경오염 및 에너지 고갈의 위험성은 인류가 앞으로 해결해야 할 가장 큰 과제이다. 지하철과 같은 커다란 전력 부하시설에서 일정한 수준의 전력 낭비를 억제할 수 있다면 국내 전력 부하 상승에 따른 추가 발전소 건설을 억제할 수 있다.

직류를 전원으로 사용하는 전동차 운행 시 하구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 많은 양의 잉여전력이 발생하게 된다.

이 에너지는 투입된 에너지의 약 40[%] 정도이며 직류 가선 전압을 상승시키는 원인이 된다. 이렇게 생성된 에너지에 의해 직류 가선 전압이 상승되며 이로 인한 과전압에 의해 기기가 손상되는 것을 방지하기 위해 저항을 이용하여 열로 소비하고 있다[1-2].

따라서 본 논문에서는 직류 전압을 사용하는 전동차 시스템에서 하강 경사로 주행이나 감속 운행 시에 발생하는 잉여전력을 교류모선으로 회생하여 직류 가선 전압의 상승을 억제하고 에너지를 절약할 수 있는 회생인버터를 제안한다.

그리고 잉여전력 발생이 없을 시에는 직류 전동차 시스템에는 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류 발생, 역률저하, 전압의 왜곡 등이 수반되므로 능동전력필터(active power filter : APF) 기능을 추가하였다.

본 논문에서는 시뮬레이션과 실험으로 회생 및 능동전력필터 동작을 확인하였고 축소모델[3.7kW]을 설계·제작하였다.

2. 제안된 회생용 인버터 시스템

전동차가 운행 중인 구간이 하구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 에너지가 회생되어 많은 양의 전력이 발생하게 된다.

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

PWM DC/AC 전력 변환장치를 이용하여 가선전압의 상승분을 교류 모선으로 회생시킬 경우 직류 가선전압의 상승을 억제할 수 있고, 회생되는 양만큼 에너지를 절약할 수 있다[3].

또한 전동차 시스템에는 평상시 전력변환 장치의

사용으로 고조파 전류발생, 역률 저하, 전압의 외형이나 불 평형이 수반되어 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생된다.

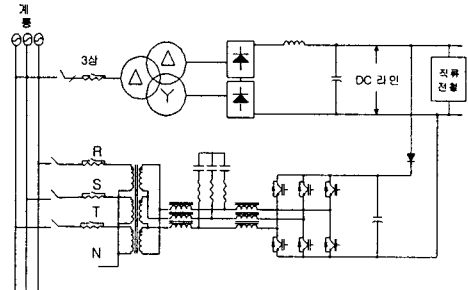


그림 1. 회생 인버터 시스템이 적용된 지하철 시스템
Fig. 1. Traction system applied regeneration inverter system

이 경우에는 능동전력필터의 기능을 함으로써 두 가지 동작모드를 가지는 직류전력 회생용 인버터를 제안한다[4-5].

그림 1은 기존 다이오드 정류기 시스템에 본 논문에서 제안한 회생 인버터 시스템이 추가된 지하철 시스템을 나타낸다.

3상 PWM 인버터는 고조파 및 무효전력 발생을 줄이기 위하여 전압과 전류가 동상이 되도록 제어할 수 있고, 전력의 흐름을 양방향으로 제어할 수 있기 때문에 직류 급전선의 잉여 에너지를 전원 측으로 회생할 수 있어 장치의 효율을 높이는 특징을 가지고 있다.

또한 능동전력필터 기능을 추가하더라도 별도의 전력변환회로 없이 제어가 가능하다.

2.1 회생인버터 모드의 제어

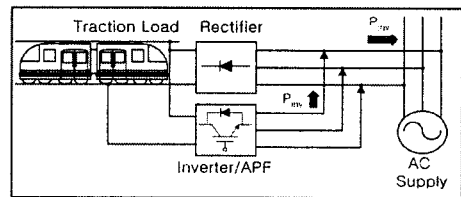


그림 2. 제안된 시스템의 회생인버터 동작
Fig. 2. Regeneration inverter operation of the proposed system

직류가선 전압이 일정전압 이상 상승 시 회생인버터로써 동작하여야 한다. 그림 2는 회생모드로 동작 시 급전시스템의 전력흐름을 나타내고 있다.

PWM DC/AC 전력 변환장치의 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e_a &= L_i \frac{di_a}{dt} + V_a \\ e_b &= L_i \frac{di_b}{dt} + V_b \\ e_c &= L_i \frac{di_c}{dt} + V_c \end{aligned} \quad (1)$$

e_a, e_b, e_c 는 전원 전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, V_a, V_b, V_c 는 제어 전압이다. L_i 는 인터페이스 인덕터이다.

정지좌표계에서의 d-q전압 방정식은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} e_d^s &= L_i \frac{di_d^s}{dt} + V_d^s \\ e_q^s &= L_i \frac{di_q^s}{dt} + V_q^s \end{aligned} \quad (2)$$

동기좌표계에서의 d-q전압 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} e_d^e &= L_i \frac{di_d^e}{dt} - \omega L_i i_q^e + V_d^e \\ e_q^e &= L_i \frac{di_q^e}{dt} + \omega L_i i_d^e + V_q^e \end{aligned} \quad (3)$$

전원 전압이 각주파수 ω 를 가진 평형 3상 정현파 전압이라면 a상 전압을 기준각으로 하여 3상 전원전압을 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_a &= E \sin \omega t \\ e_b &= E \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c &= E \sin \omega t (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 E는 상전압의 최대치이다. 그러므로 전원 전압은 d-q 정지좌표계에서 다음과 같이 표현되고,

$$\begin{aligned} e_d^s &= E \sin \omega t \\ e_q^s &= -E \cos \omega t \end{aligned} \quad (5)$$

d-q 동기좌표계에서는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} e_d^e &= E \\ e_q^e &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (3)에 대입하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E &= L_i \frac{di_d^e}{dt} + \omega L_i i_q^e + V_d^e \\ 0 &= L_i \frac{di_q^e}{dt} - \omega L_i i_d^e + V_q^e \end{aligned} \quad (7)$$

지금까지 언급한 3상 DC/AC 전력 변환장치의 전체 제어블록도는 그림 3과 같다. 여기서 q축 동기좌표계에서의 전류는 q축 전류기준값과 비교한 값을 q축 전류제어기를 거쳐 기준전압을 만든다. 또한 d축 동기좌표계에서의 전류는 Vdc단 전압을 검출한 값과 Vdc기준전압 값을 비교한다. 전압제어기를 거쳐서 만들어진 d축 전류 기준값과 비교한 값을 d축 전류제어기를 거쳐 기준전압을 만든다[6-7].

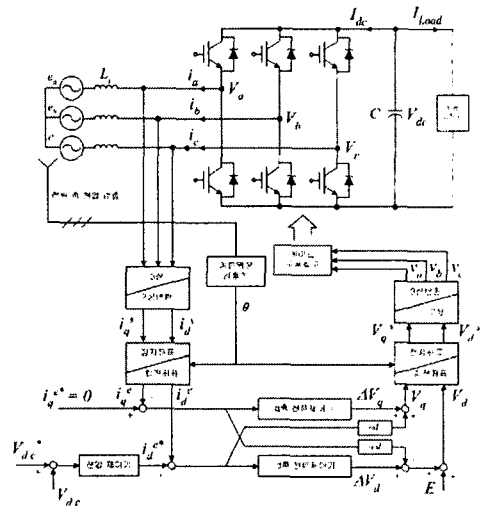


그림 3. 회생 인버터 전체 제어 블록도
Fig. 3. The overall control block diagram of regeneration inverter

그리고 각각의 성분을 de-coupling 하게 되고 전류제어기의 응답성을 위해서 E가 추가된다. 이렇게 만들어진 d, q축 전압을 다시 역변환을 하여 게이트

능동전력필터를 가진 지하철 외생인버터 시스템

구동회로에 기준값으로 들어가게 된다.

역률을 단위역률로 제어하기 위해 동기좌표계의 회전각 $\theta(=\omega t)$ 를 $E_q=0$ 이 되도록 설정하고 q축 전류를 0으로 제어한다. 이는 곧 유효전력분 전류를 제어함으로써 DC link 전압을 제어하는 것과 동일하다.

2.2 능동전력필터 모드의 제어

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭넓게 보상할 수 있고, 보상되는 양을 순시적으로 가변 제어할 수 있기 때문에 항상 최적의 전력 품질을 유지할 수 있다. 제안된 시스템이 능동전력필터로 동작하는 동안 인버터에서는 전철 부하에 의한 고조파 전류를 보상한다. 그림 4는 능동전력필터로 동작 시 전력흐름을 나타낸다.

기존의 무효전력보상은 정상상태에서 무효전력의 기본과 성분만을 보상하여 역률 보상을 한다. 그 결과로 과도 상태에서 뿐만 아니라 정상상태에서 스위칭에 의한 고조파 성분의 무효전력과 유효전력을 완전히 제어할 수 없었다.

이에 따라 계통 내에 왜곡된 전류가 흐르게 되고, 이는 유도장해, 전력기기의 과열, 공진에 의한 이상 전압 발생 등의 악 영향을 미친다.

이들을 제거하기 위하여 순시무효전력(instantaneous reactive power)을 정의하여, 이전의 무효전력보상 이론보다 일반화되어진 무효전력보상에 pq이론이 사용되고 있다[8-10].

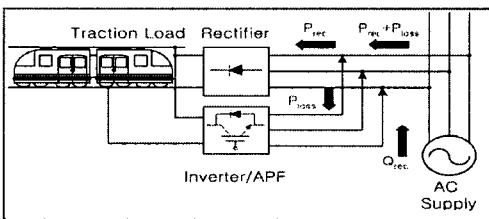


그림 4. 제안된 시스템의 능동전력필터동작
Fig. 4. Active power filter operation of the proposed system

일반적으로 3상 순시유효전력(instantaneous active power)은 식 (8)과 같이 정의 된다.

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (8)$$

순시 유효·무효전력 p와 q를 전기적 양으로 α - β 상에서의 순시유효전력 p와 순시무효전력 q로 나타내면 식 (9)와 같다[10].

$$p = v_a i_a + v_b i_b \quad (9)$$

$$q = v_a i_b - v_b i_a$$

식 (9)를 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_b \\ -v_b & v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 α 상과 β 상에 대한 전류를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{v_a^2 + v_b^2} \begin{bmatrix} v_a & -v_b \\ v_b & v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (11)$$

p, q의 직류성분과 교류 성분을 \bar{p} , \tilde{p} , \bar{q} , \tilde{q} 라고 하고,

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하면, 식 (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a & v_b \\ -v_b & v_a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)으로부터 순시유효전력 p와 순시무효전력 q에 의해서 순시전류 i_a 와 i_b 를 결정할 수 있다. 부하 전류 i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} 를 검출하여 α - β 변환을 하고 순시유효전력 p와 순시무효전력 q를 계산 한다.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_a^2 + v_b^2} \begin{bmatrix} v_a & -v_b \\ v_b & v_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (14)$$

그리고 식 (14)를 이용하여 레퍼런스 전류 i_{ca}^* 와 i_{cb}^* 를 계산하게 되고 다시 역 α - β 변환을 통해서 보상전류의 지령치 i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^* 를 만든다. i_{fa} , i_{fb} , i_{fc} 는 실제 능동전력필터의 보상전류를 나타낸다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 pq이론에 의한 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다. 계통 측

전압과 전류를 검출하고 2상 정직좌표계로 변환하여 V_α, V_β 와 I_α, I_β 로 변환한다. 이들의 곱으로 순시 무효 전력 p 와 q 를 구한다. 저역필터를 통과한 \bar{p} 와 전압 제어기를 통과한 \bar{p}_{Loss} 의 차와 q 값의 합이 보상해 주어야 할 값이기 때문에 이들의 합을 다시 역변환 하여 3상 좌표계로 변환해 준다.

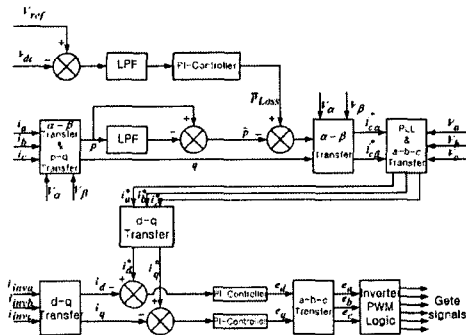


그림 5. 능동전력필터 제어 블록도
Fig. 5. The control block diagram of active power filter

이때 전압제어기를 통과한 \bar{p}_{Loss} 의 값은 유효전력의 값으로 더해주거나 빼주어야 하는 값이기 때문에 유효전력 p 의 값에 관계된다. 위상검출기를 통한 PLL회로를 통해서 리액터와 변압기로 인한 위상지연을 보상해 준다.

최종적으로 실제 인버터 출력 전류 $i_{inv a}, i_{inv b}, i_{inv c}$, 의 값을 d-q변환하여 i_d, i_q 의 값으로 나타낸다. 이때 보상해 주어야 할 지령치 값인 i_d^*, i_q^* 와 전류제어기를 통해 출력되는 값 e_d, e_q 은 3상 좌표계로 변환되어 실제 PWM 회로에 지령치로 입력된다[11].

3. 시뮬레이션 결과

그림 6은 다이오드 정류모드로 동작 시에는 능동 전력필터 기능을 갖고, 직류 가선전압이 상승 시에는 회생인버터로 동작하는 제안된 직류전철 급전시스템의 축소모델을 나타낸다.

제안된 시스템의 PSIM 시뮬레이션은 축소모델과 동일한 파라미터 값을 가지고 12펄스 다이오드 정류기에 능동전력필터 기능이 추가되어진 회생인버터

시스템을 구현하였다. 제어기는 C로 코딩한 DLL 블록을 이용하여 구성하였으며 실제 시스템에 적용할 수 있다.

표 1은 제안한 회생인버터 시스템을 시뮬레이션하기 위한 전력 시뮬레이션 데이터 및 파라미터를 나타내고 있다.

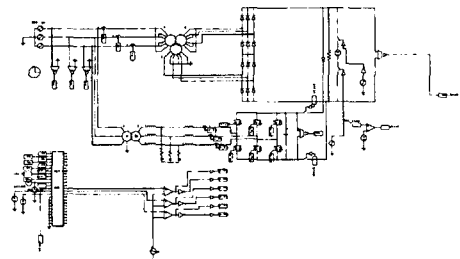


그림 6. 제안된 회생인버터 전력시스템
Fig. 6. Proposed regeneration inverter power system

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Parameter of Simulation

종류	정격
12 펄스 다이오드 정류기	
입력 전압	110 [Vrms]
출력 전압	113 [VDC]
변압기 결선	Δ - Δ -Y
PWM 인버터	
출력 LCL필터	70[mH], 0.1[nF], 50[μ H]
출력 변압기	Δ -Y
입력 커패시터	880[μ F]
전류 제어주기	0.00025[s]
전압 제어주기	0.0025[s]
스위칭 주파수	2[kHz]

시뮬레이션은 역내 부하 조건에 따라 회생되어진 전력이 역내 부하로 공급 또는 교류모션으로 회생하는 경우와 전원측 고조파를 보상하는 경우로 나누어 하였다.

그림 7에서 (a)는 정류기 입력 전류를 나타내고 있다. 0.05초 이후에 DC가선 전압의 상승으로 회생인버터가 동작 한다. 회생전류 파형은 그림 (b)와 같다.

(c)는 전압상승으로 인한 d축 전류지령과 실제 d

능동전력필터를 가진 지아철 외생인버터 시스템

축 전류를 나타내는 것으로써 제어기가 빠른 시간 안에 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

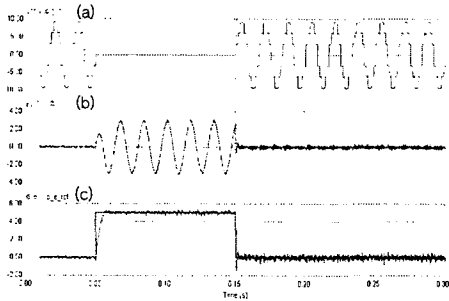


그림 7. 정류 및 회생동작 시 회생전력
Fig. 7. DC trolley wire voltage at rectification and regeneration operation

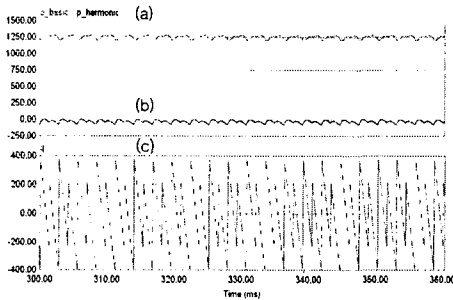


그림 8. 순시유효전력의 2가지 성분과 순시무효전력
Fig. 8. Two components of instant active power and instant reactive power

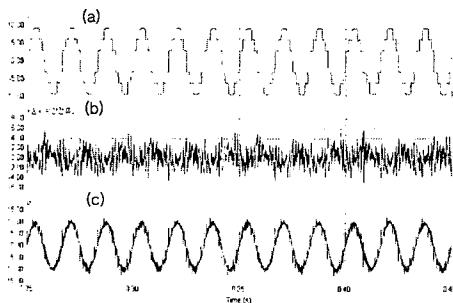


그림 9. 능동전력필터 동작 시 보상전류 파형
Fig. 9. Compensation current at active power filter operation

그림 8의 (a)와 (b)는 정류기로부터 지하철에 공급되는 순시유효전력을 저역필터(low pass filter)를

통과시켜 얻은 직류성분과 교류성분이다.

직류성분을 제외한 교류성분은 왜곡된 전류에서의 고조파 성분이므로 보상해 주어야 한다. 이때 단위역률($\cos\theta = 1$)로 제어하기 위해 무효전력을 보상해 주어야 하기 때문에 순시무효전력 (c)는 전부 보상해 준다.

그림 9는 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 상쇄되어진 전원 측 전류파형이다. 정현파에 가깝게 고조파가 저감되어진 것을 볼 수 있다.

그림 10의 파형은 회생전력 발생 시 회생인버터 동작과 회생전력 발생이 없을 시 능동전력필터로 동작하고 있음을 나타낸다. (a)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 공급함을 (b)에 나타내고 있다. (c)는 전원 측 전류로써 회생전력이 발생하지 않을 시에는 능동전력필터 동작에 의해 고조파가 저감되는 것을 보여준다.

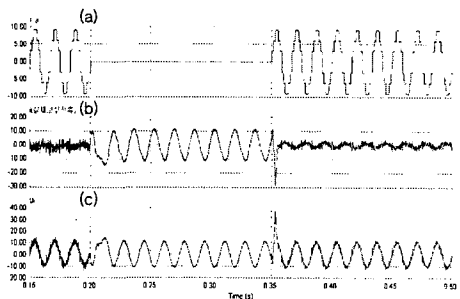


그림 10. 회생동작과 능동전력필터 동작
Fig. 10. Regeneration operation and active power filter operation

4. 실험결과

그림 11은 실험에 사용된 축소모델[3.7[kW]]을 보여준다.

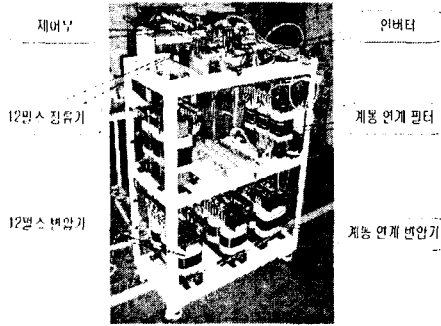


그림 11. 축소모델(3.7(kW))
Fig. 11. Prototype model(3.7(kW))

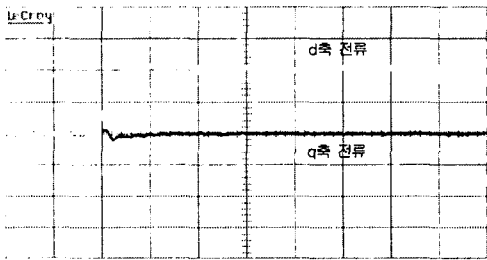


그림 12. d축 전류와 q축 전류
Fig. 12. Current of d axis and q axis
(2.5(A/div), 10(ms/div))

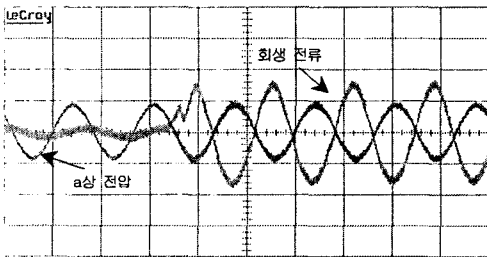


그림 13. a상 전압과 a상 회생 전류
Fig. 13. Voltage of a phase and regeneration current of a phase.
(2(A/div), 100(V/div), 10(ms/div))

그림 12는 직류가선 전압 상승 시 d축과 q축 전류를 나타낸다. q축 전류는 무효전력 성분이고 d축 전류는 회생 유효전력을 나타낸다. 유효전력 성분만이 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 13은 a상 전압과 a상 회생전류를 나타낸다. 디지털 PLL을 거침으로써 변압기에 의한 위상차를 보상하고 전압과 180도 위상차이므로 단위역을

($\cos \theta = 1$)로 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 14는 DC가선 전압과 회생전류를 나타낸다. 회생동작 시 전압제어에 의해 DC가선 전압이 하강하고 상승전압에 따른 d축 전류(유효전력)의 지령치만큼 회생되어지는 것을 알 수 있다.

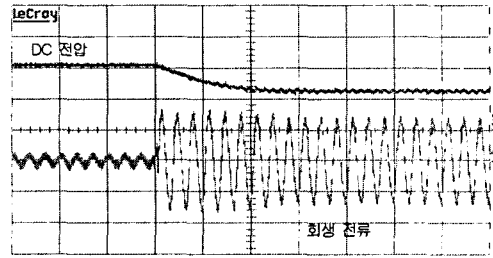


그림 14. DC전압과 회생전류
Fig. 14. DC voltage and regeneration current
(2(A/div), 100(V/div), 50(ms/div))

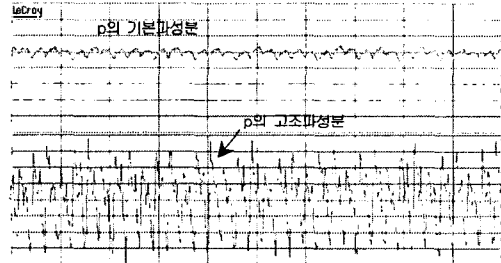


그림 15. 유효순시전력의 기본성분과 고조파성분
Fig. 15. Basic component and harmonic component of active instant power
(0.5(V/div), 10(ms/div))

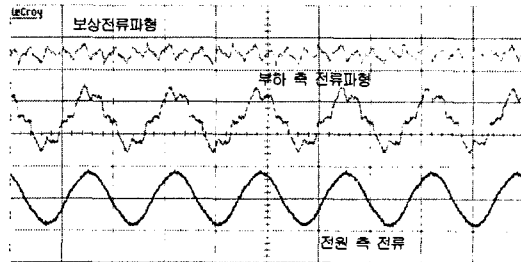


그림 16. 보상된 AC 전원 측 전류 파형
Fig. 16. Compensated AC source current
(2(V/div), 10(ms/div))

그림 15는 식 12에서의 p의 기본파성분과 고조파성분을 나타낸다. 저역필터(low pass filter)를 이용

능동전력필터를 가진 지하철 회생인버터 시스템

하여 순시전력의 고조파를 추출하여 보상전류 파형을 생성하는데 이용한다.

그림 16은 식 14에 의해 구해진 보상전류와 부하 측 전류, 전원 측 전류를 제어장치의 D/A를 통해 본 파형이다. 이는 보상파형이 왜곡된 부하 측 전류의 고조파를 제거하여 정현파에 가깝도록 전원 측 전류를 생성함을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 능동전력필터 기능이 추가된 직류 전력 회생용 인버터 시스템을 구성하였다.

제안된 직류급전시스템을 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존 다이오드 정류기 시스템보다 에너지 활용성 증가 및 입력 전류의 낮은 고조파 함유율을 확인하였다.

실험 결과에 의해 회생동작 시 q축 전류는 0으로 제어되고 d축에 의해 회생전력(유효전력)이 계통에 공급되고 있음을 확인할 수 있다. 고조파 함유율은 30[%] 감소함을 확인할 수 있었다.

본 연구는 국가교통핵심기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, "직류전력 회생 시스템의 역률개선에 관한 연구" 전력전자학회 논문지, 제6권, 제5호, 2001.
- [2] 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구" 전력전자학회 논문지, 제7권, 제2호, 2002.
- [3] 백병산, 김남해, "전기철도 급전시스템에 응용되는 전력 전자 및 제어기술" 전력전자학회지, 제8권, 제1호, 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", 대한전 기학회 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] 조응상, 박기원, 권명기, 박창주, "능동전력필터의 현장 적용 보고", 포스콘기술보, 2002.
- [10] 하요철, "UPOQC의 제어시스템 설계와 성능해석에 관한 연구", 명지대학교 석사학위논문, 2001.
- [11] 한국철도기술연구원, "도시철도표준화 연구개발사업 2003년도 연구중간보고서", 2003.

◇ 저자소개 ◇

장수진 (張水珍)

1976년 12월 6일생. 2002년 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 성균관대 대학원 에너지시스템공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.

김연충 (金淵忠)

1970년 1월 9일생. 1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학). 현재 성균관대 신기술에너지센터 연구원.

이병국 (李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 2001~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005~2006년 성균관대학교 연구교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수. IEEE Senior Member.

원충연 (元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. IEEE Senior Member. 본 학회 편수위원.

배창한 (裨昶漢)

1971년 8월 26일생. 1996년 2월 아주대학교 제어계측 공학과 졸업. 1998년 2월 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 8월 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사) 2002년 8월~현재 한국철도기술연구원 전력 연구팀 선임연구원.

김용기 (金容基)

1959년 11월 3일생. 1987년 서울산업대 화학공학과 졸업. 1991년 연세대 대학원 화학공학과 졸업(석사). 2003년 서울시립대 대학원 화학공학과 졸업(박사). 1994년 8월~현재 한국철도기술연구원.