

직류전철용 에너지 회생장치 성능개선

(Improving the capability of energy regeneration inverter for dc electric traction system)

방효진* · 김용기*** · 장수진* · 송상훈** · 안규복**** · 원충연*

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

(성균관대학교* · 한국철도기술연구원*** · 산업기술시험원** · 인택 FA****)

Abstract

Recently, when electric traction system used DC 1500[Vdc] runs on decline of rail road track and slows down, dc voltage goes beyond regular voltage. In this case extra power is forcibly wasted by resistor because rectifier of substation and electric train including power converter and so on are out of order.

Therefore this paper proposes that the extra power is regenerated through regeneration inverter to AC utility in result this system obstruct to go beyond regular voltage and improve the efficiency. In addition, electric traction system products harmonic current and voltage distortion and reactive power because power converter is used so regeneration inverter normally runs such as active power filter(APF) for improving power quality.

1. 서 론

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. 따라서 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하다.

현재의 경우 이 잉여 전력의 상당 부분을 강제 소모하여 손실이 되고 있는 실정이다.^{[1][2]}

현재 적용된 정류기 및 회생용 인버터가 하나로 구성된 더블 컨버터(Double Converter) 시스템에 의해 에너지를 회생시킬 수도 있으나 다음과 같은 이유로 회생용 인버터를 별도로 설치하는 것이 유리하다.

일반적으로 경사로 구간이 많은 전철 시스템에서는 (인버터 용량)/(정류기 용량)의 비율이 1/3정도이며 평탄한 구간만 있는 전철 시스템에서는 7~13% 정도이다. 그러므로 회생용 인버터를 별도로 설치하면 인버터의 용량이 작아도 되고 기존의 정류기 시스템에 부가하여 설치할 수 있으므로 경제성이 높다.

따라서 본 논문에서는 1500[Vdc] 직류 전압을 사용하는 전동차 시스템에서 하강 경사로 주행이나 감속 운행 시에는 발생하는 잉여전력을 교류모션으로 회생하여 직류 가선 전압의 상승을 억제하고 에너지를 절약할 수 있는 회생인버터 기능을 한다.

그리고 평상시에는 직류 전동차 시스템에는 전력변환

장치의 사용으로 고조파 전류 발생, 역률저하, 전압의 왜곡 등이 수반되므로 능동전력필터(active power filter : APF) 기능을하는 두 가지 동작모드 전력변환 장치를 제안한다.

또한, 시스템 제어 알고리즘과 현장적용 가능성을 확인하였으며 축스타입 설계를 위한 제어기 구성을 제안하였다.

2. 제안된 회생인버터 직류 급전 시스템

전동차가 운행 중인 구간이 하구배 구간이나 감속 운행 시에는 전동차에서 발전 제동이 되어 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 남고, 이 전력은 직류 가선 전압을 상승시킨다.

그러나 기존의 PWM DC/AC 전력 변환장치를 이용, 가선전압의 상승분을 교류 모션으로 회생시킬 경우 직류 가선전압의 상승을 억제할 수 있고, 회생 되는 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 발생되므로 이때는 능동필터의 기능을 함으로 두 가지 동작모드를 가지는 직류전력 회생용 인버터가 연구되고 있다.^{[4][5]}

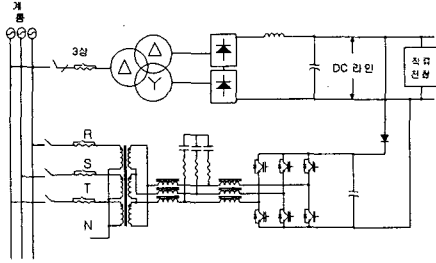


그림 1. 직류전력 회생 인버터 시스템
Fig 1. DC power regeneration inverter system

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

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

또한 능동전력필터 기능을 추가하더라도 별도의 전력 변환회로 없이 한 시스템에서 제어가 가능하다.

2.1. 회생인버터 시스템의 제어

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

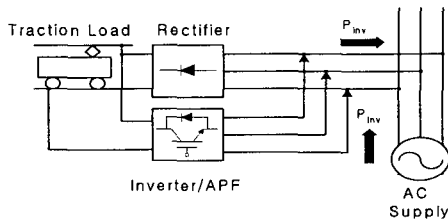


그림 2. 제안된 시스템의 회생인버터 동작
Fig 2. Regeneration inverter operation of the proposed system

기존의 PWM AC/DC 승압형 컨버터를 직류 전철 전력시스템을 위한 회생용 인버터의 알고리즘에 그대로 응용하였다. 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 다음식과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, E는 상전압의 최고치이다. 그러므로 전원전압은 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 다음과 같이 표현된다.

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

식 (6)을 식 (3)에 대입하면

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

식 (7)과 같이 된다.

3상의 전류를 동기좌표계의 d, q로 변환한 다음 전압 지령과 DC link의 전압차로부터 PI전압제어를 행하여 q축 전류지령을 만든다. q축 전류에 d축의 간섭분을 보상하여 q축 전압지령치를 만든다. 역률을 1로 제어하기 위해 동기좌표계의 회전각 $\theta (= \omega t)$ 을 $E_d=0$ 이 되도록 설정하고 d축 전류를 0으로 제어한다. 이는 곧 유효전력분 전류를 제어함으로써 직류링크 전압을 제어하는 것과 동일하다.^{[6][7]}

지금까지 언급한 3상 PWM 컨버터의 전체 제어블록도를 그리면 그림 3과 같다.

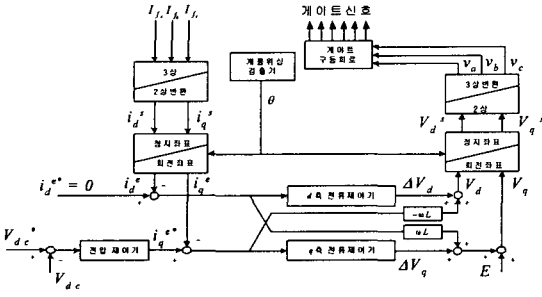


그림 3. 3상 PWM 컨버터 전체 제어 블록도
Fig 3. The overall control block diagram of three phase PWM converter

2.2. 능동전력필터 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.

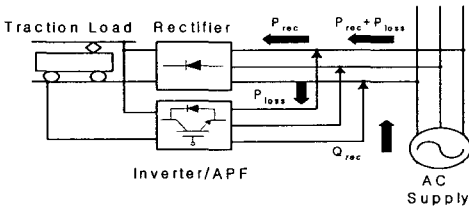


그림 4. 제안된 시스템의 능동전력필터동작
Fig 4. Active power filter operation of the proposed system

기존의 무효전력보상은 정상상태에서 무효전력의 기본과 성분만을 보상하여 역률 보상만을 할 수 있도록 고려되어 왔기 때문에, 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 이상전압 발생 등의 악 영향을 미친다.

이들을 제거하기 위하여 순시무효전력(instantaneous reactive power)을 정의하여, 이전의 무효전력보상 이론보다 일반화되어진 무효전력보상에 \$pq\$이론이 사용되고 있다.^{[8][9][10]}

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

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

3상 순시 유효·무효전력 \$p\$와 \$q\$를 전기적 양으로 \$\alpha\$-\$\beta\$ 상에서의 순시유효전력 \$p\$와 순시무효전력 \$q\$로 나타내면 식 (9)와 같다.^[10]

$$\begin{aligned} p &= v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q &= v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 \$\alpha\$상과 \$\beta\$상에 대한 전류를 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (11)$$

\$p, q\$의 직류성분과 교류 성분을 \$\bar{p}, \bar{p}, \bar{q}, \bar{q}\$라 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.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)으로부터 순시유효전력 \$p\$와 순시무효전력 \$q\$에 의해서 순시전류 \$i_\alpha\$와 \$i_\beta\$를 결정할 수 있다. 부하전류 \$i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}\$을 검출하여 \$\alpha\$-\$\beta\$ 변환을 거쳐 순시유효전력 \$p\$와 순시무효전력 \$q\$를 계산 한다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (14)$$

그리고 식 (14)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_{c\alpha}^*\$를 생성해낸다. \$i_{ja}, i_{jb}, i_{jc}\$는 실제 능동 전력필터의 보상전류를 나타낸다.

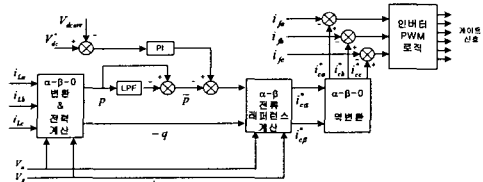


그림 5. 능동전력필터 제어 블록도
Fig 5. The control block diagram of active power filter

그림 5는 본 논문에서 제안하고 있는 pq 이론을 적용한 병렬형 능동전력필터의 제어 블록도를 나타내고 있다.^[11]

3. 직류 전력시스템 시뮬레이션

3-1. 기존 다이오드 정류기 전력시스템

본 연구에서 제안한 직류 전력시스템에 대한 시뮬레이션은 Psim을 이용하였다.

그림 6의 직류 전철 전력시스템 시뮬레이션은 기존 12펄스 다이오드 정류기이다.

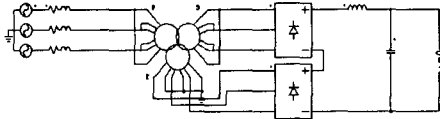


그림 6. 직류 전력시스템용 다이오드 정류기
Fig 6. Dc power system for diode rectifier

표 1은 직류 전철 전력시스템을 수행하기 위한 변전소 전력시뮬레이션 데이터 및 파라미터를 나타내고 있다.^{[11][12]}

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

파라미터	값
주회로	다이오드 정류기
정류기 평균 공급전력	5735[kW]
정류기 평균전류	3828[A]
구동 평균 전압	1500[V]
차량 편성	8량 (2.5분 운전시각)

표 1의 데이터는 “도시철도 에너지 사용 설비 진단 용역”에 관한 연구 보고서(2003년)를 활용하였으며, 인버터가 설치되지 않은 정류기 시스템의 데이터이다.

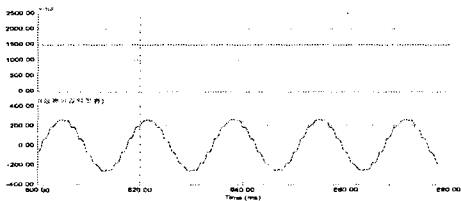


그림 7. 다이오드 정류기 출력전압, 정류기 입력전류
Fig 7. Diode rectifier output voltage, rectifier input current

그림 7은 직류 가선 전압을 나타내고 있으며, 하단의 파형은 다이오드 정류기 입력전류 파형을 나타내고 있다. 그림 8은 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.

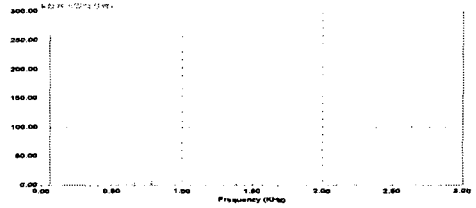


그림 8. 다이오드 정류기 입력전류 FFT 분석
Fig 8. Input current FFT analysis of diode rectifier

3.2. 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터 직류 전력시스템

그림 9는 다이오드 정류모드로 동작 시에는 능동전력 필터 기능을 갖고, 직류 가선전압이 상승 시에는 회생인버터로 동작하는 제안된 직류철도 급전시스템을 나타낸다.

제안되어진 직류 전철 전력시스템의 시뮬레이션은 지하철 7호선 수락산 변전소를 모델로 하였으며, 기존 12펄스 다이오드 정류기에 능동전력필터 기능이 추가되어진 회생인버터 시스템을 적용하였다.

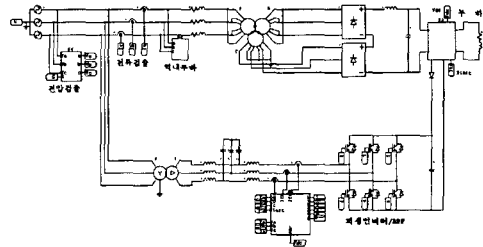


그림 9. 제안된 회생인버터 전력시스템
Fig 9. Proposed regeneration inverter dc power system

표 2는 제안한 회생인버터 시스템을 시뮬레이션하기 위한 전력 시뮬레이션 데이터 및 파라미터를 나타내고 있다. 이 데이터는 “도시철도 에너지 사용 설비 진단 용역”에 관한 연구 보고서(2003년)를 활용하였으며, 정류기에 인버터를 설치한 경우이다.

표 2. 수력산 변전소 및 회생인버터 파라미터

Table 2. Parameter of Suraksan subsystem and regeneration inverter

파라미터	정격
주회로	IGBT 인버터
정류기 평균 공급전력	5738[kW]
정류기 평균 직류전압	3828[V]
구동 평균 전압	1499[V]
회생 평균 직류전압	1573[V]
교류 출력전압	3상 800Vrms/22.9kV
교류 출력 주파수	60[Hz]
차량 편성	8량 (2.5분 운전시격)

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

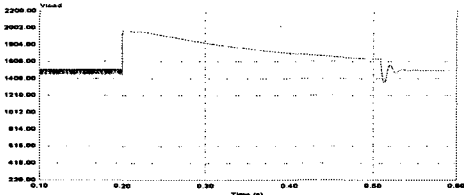


그림 10. 정류 및 회생동작 시 직류 가선전압
Fig 10. DC trolley wire voltage at rectification and regeneration operation

그림 10은 직류전철 회생인버터 시스템의 시뮬레이션 결과 파형을 나타내고 있다. 구동 평균전압 1499V로 정류모드 동작 시, 0.2초 후에 직류 가선전압이 상승하면 다이오드 정류기에 공급되는 입력전류는 흐르지 않는다.

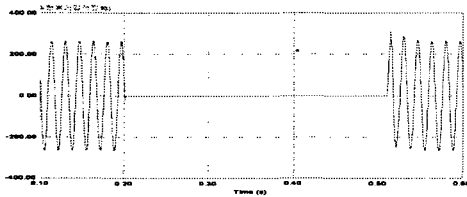


그림 11. 다이오드 정류기 입력전류
Fig 11. Diode rectifier input current

그림 11은 다이오드 정류기 입력전류를 나타낸다. 회생모드 동작에 의해 직류 가선전압이 차량의 구동전압으로 하강하게 되면 다이오드 정류기를 통하여 부하로 전력이 재공급된다.

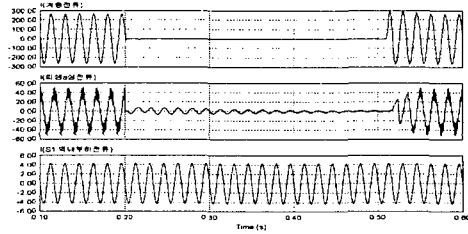


그림 12. 계통전류, 회생전류(보상전류), 역내부하전류
Fig 12. Utility current, regeneration current, load current

그림 12는 전력을 직류전철로 공급하는 정류모드에서 능동전력필터로 동작을 하고, 직류 가선전압이 상승 시에는 회생모드로 동작하여 전력을 계통으로 회생하는 파형을 나타낸다.

직류 가선전압이 상승하기 전 까지 인버터에서는 보상전류가, 가선전압이 상승 후에는 회생전류를 계통에 공급한다.

그림 13,14는 직류 가선전압의 상승으로 회생모드로 동작 시, 부하 조건에 따라 회생되어진 전력의 공급방향을 나타내고 있다.

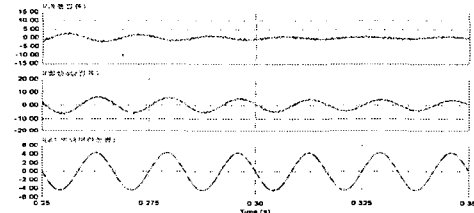


그림 13. 계통전류, 회생전류, 역내부하전류 (회생전력 > 역내부하공급전력)
Fig 13. Utility current, regeneration current, load current (regeneration power > load supply power)

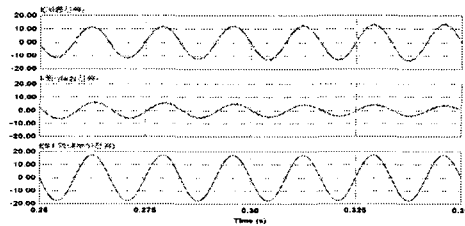


그림 14. 계통전류, 회생전류, 역내부하전류 (회생전력 < 역내부하공급전력)
Fig 14. Utility current, regeneration current, load current (regeneration power < load supply power)

부족 전력은 계통에서 공급되는 것을 볼 수 있고 가 선전압 상승 시 회생된 전력은 교류 모선에 접속되어 있는 다른 부하에서 소비되어 회생전력의 사용 가능함을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

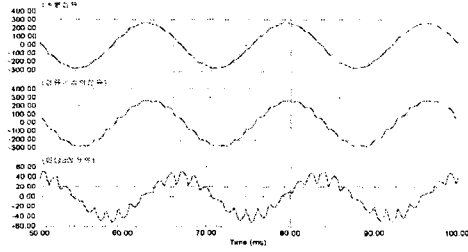


그림 15. 계통전류, 정류기 입력전류,보상전류
Fig 15. Utility current, rectifier input current, compensation current

그림 15는 제안한 시스템이 능동전력필터로 동작 시 계통전류, 정류기 입력전류, 보상전류를 나타낸다. 정류기 입력전류는 11차, 13차 고조파가 함유된 일그러진 파형이나, 회생인버터 시스템의 능동전력필터 기능으로 보상전류를 공급하므로 계통전류가 정현파에 가까운 파형을 나타낸다.

그림 16은 계통전류와 정류기 입력전류의 FFT분석 결과 파형을 나타낸다. 다이오드 정류기 입력전류의 고조파는 $n=12k \pm 1$ ($k=1,2,3...$)의 고조파 성분을 포함하여 11, 13차 고조파의 영향을 받고 있다.

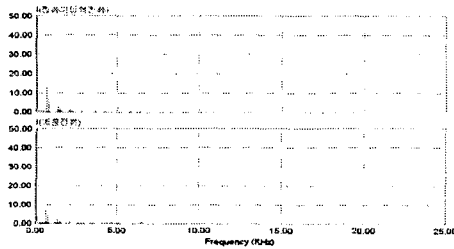


그림 16. 정류기 입력전류, 계통전류 FFT 분석
Fig 16. FFT analysis of utility current and diode rectifier Input current

능동전력필터의 보상전류에 의해 계통전류는 11차, 13차 고조파가 저감됨을 그림 16을 통하여 확인할 수 있다. 계통전류의 경우 출력 LCL필터와 인터페이스 변압기의 최적 설계가 된다면 파형의 고조파 함유율 및 파형의 왜곡을 더욱 개선시킬 수 있다.

4. 결 론

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

제안된 직류급전시스템 시뮬레이션을 통해 기존 다이오드 정류기 시스템보다 에너지 활용성 증가 및 전류의 낮은 고조파 함유율, 듀얼 방식에 따른 소자의 스트레스 감소 등을 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.

축소모형과 실제 시스템의 제어를 동일하게 사용함으로써 축소모형에서 실제 시스템으로 용량 확대 시에도 큰 무리가 없을 것으로 예상된다.

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

참 고 문 헌

- [1] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, “직류전력 회생 시스템의 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 전력 전자 및 제어기술” 전력전자학회지, 제 8권, 제 1호, 2003.
- [4] AHorn, RH.Wilkinson, and THREnslin, “Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations”, ISE of IEEE, Vol.2, pp.802-807, 1996.
- [5] P.J.Randewijk, and J.HREnslin, “Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated”, FESC 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] Chnishi.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”, FESC of IEEE, Vol.3, pp.1420-1425, 2001.
- [9] 조웅상, 박기원, 권명기, 박창주, “능동전력필터의 현장적용 보고”, 포스콘기술보, 2002.
- [10] 하요철, “LPOC의 제어시스템 설계와 성능해석에 관한 연구”, 명지대학교 석사학위논문, 2001.
- [11] 한국철도기술연구원, “도시철도표준화 연구개발사업 2003년도 연구중간보고서”, 2003.
- [12] 산업자원부, “대용량 직류전력 회생인버터 시스템 기술 개발에 관한 최종보고서”, 2001.