

## 회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구

金敬源, 徐永珉, 洪淳瓚\*

A Study on the Implementation of Inverter Systems  
for Regenerated Power Control

Kyung-Won Kim, Young-Min Seo, and Soon-Chan Hong

## 요약

본 논문에서는 직류모선에서 교류모선으로 회생되는 전력을 제어할 수 있는 3상 전압원 인버터 시스템을 구현하였다. 전체 시스템은 선간전압 및 선전류용 센서, d-q 변환방식을 사용한 실제전력 연산기, PI제어기법을 적용한 복소전력 제어기, 수정  $\alpha$ 통방식을 구현하기 위한 게이팅신호 생성기, 주파수를 추종하기 위한 DPLL과 전력회로로 구성된다. 제어보드는 32비트 DSP인 TMS320C32, EPLD 2개, ADC 6개와 DAC로 구성하였다. 제안한 시스템의 성능을 검증하기 위해 교류 220V에서 5kVA 전력용량인 축소모델을 설계, 제작하였다. 실험결과, 회생 유효전력은 명령값으로 잘 제어되며 회생 무효전력은 운전동안 내내 거의 0의 값을 유지함을 확인하였다.

## ABSTRACT

This paper deals with the implementation of three-phase VSI systems which can control the power regenerated from DC bus line to AC supply. The overall system consists of the line-to-line voltage and line current sensors, an actual power calculator using d-q transformation method, a complex power controller with PI control scheme, a gating signal generator for modified  $\alpha$ -conduction mode, a DPLL for frequency followup, and power circuits. Control board is constructed by using a 32-bit DSP TMS320C32, two EPLDs, six ADCs, and a DAC. To verify the performance of the proposed system, we designed and constructed the propotype with the power rating of 5kVA at AC 220V. Experimental results show that the regenerated active power is well controlled to its command value and the regenerated reactive power still remained at nearly zero through all operating modes.

**Key Words** : Regeneration, Power control, Inverter systems, Implementation

## 1. 서론

직류를 전원으로 하는 전철 시스템에서 전동차가 제동중이거나 하강 경사로 주행시에는 전동차에서 직류

모선으로 전력을 회생하게 되며, 회생된 전력은 동일 구간을 주행하는 전동차에서 사용하거나 보조 설비에서 사용한다. 이때 이와 같이 사용하고도 남는 전력의 양은 교류모선에서 정류기를 통해 직류모선으로 공급하는 에너지량의 10~20%정도인 것으로 보고되어 있다<sup>[1]</sup>. 이 에너지에 의해 직류모선의 전압이 상승하며 이로 인한 과전압에 의해 기기가 손상되는 것을 방지하기 위해 저항열로 소비하고 있다.

전동차로부터 회생된 직류모선의 잉여전력을 다시 교류모선으로 회생시킬 수 있는 직류전력 회생시스템

\*단국대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

E-mail : schong@dku.edu

접수일자 : 2002. 3. 7

1차심사 요청일 : 2002. 3. 9

심사완료일 : 2002. 3.29

은 직류모선의 잉여전력이 회생됨에 따라 시스템의 입력 직류전압이 낮아진다. 또한 회생시스템의 출력단에서 교류모선으로 전력을 회생하려면 출력단 전압의 위상을 제어할 수 있어야 한다. 따라서 시스템의 출력전압을 교류모선전압과 매칭되는 크기와 위상으로 제어할 수 있어야 한다<sup>[2]</sup>.

직류전력 회생시스템에서 에너지를 효율적으로 회생하려면 가급적 교류모선으로 무효전력이 유입되지 않으면서도 원하는 양 만큼의 유효전력을 회생시킬 수 있어야 한다. 더군다나 직류전력을 회생하기 위한 인버터 시스템의 출력에는 고조파가 포함되어 있으므로 기본과 성분에 의한 무효전력뿐만 아니라 고조파에 의해 발생된 무효전력까지 존재한다. 따라서 회생시스템에서 효율적인 전력제어 알고리즘을 구현할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 직류를 전원으로 하는 전철시스템에서 구형파 인버터를 기반으로 한 회생시스템을 대상으로 하여 원하는 양 만큼의 유효전력을 회생하면서도 무효전력을 영에 가깝게 제어할 수 있는 인버터 시스템을 구현하는 기법을 제시하고 실험을 통하여 제시한 기법의 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 직류전력 회생용 인버터 시스템

직류를 전원으로 하는 전철시스템에서는 교류전원에서 공급된 전력이 다이오드 정류기를 통해 정류된 다음에 직류모선으로 공급된다. 국내 지하철시스템의 경우, 전동차에 전력을 공급하는 직류모선 한 구간의 길이는 대략 3~4[km]이며 한 변전소가 두 구간의 직류모선을 담당하고 있다.

전동차로부터 회생된 잉여분의 전력을 직류모선에서 교류모선으로 다시 회생하기 위해 변전소에 설치하는 인버터의 용량은 다이오드 정류기 용량의 7~33% 정도이면 된다<sup>[1]</sup>. 이와 같이 회생시스템의 용량이 작아도 되므로 기존의 정류기 시스템에 부가하여 별도로 용이하게 설치할 수 있다.

그림 1은 직류전력 회생시스템을 나타내고 있다. 시스템의 입력단에는 LC필터를 설치하여 직류전압을 안정화시키며, 고조파를 저감시키기 위해 그림 2와 같이 3상 준구형파 인버터 두 대를 30°의 위상차로 2중화하고 인버터 출력단에 지그재그 결선 변압기를 설치하며 변압기 출력단에 교류필터를 설치한다.

구형파 인버터에서 출력전압의 크기를 제어하기 위해 전 구간에서 180°도통방식으로 운전하여 출력전압

을 제어할 수 있는 수정 α도통방식이 제안되었다<sup>[3]</sup>. 수정 α도통방식으로 그림 2의 INV #1과 같은 3상 구형파 인버터를 제어할 때의 출력선간전압은 그림 3과 같으며, 푸리에 급수로 전개하면 다음과 같다.

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

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

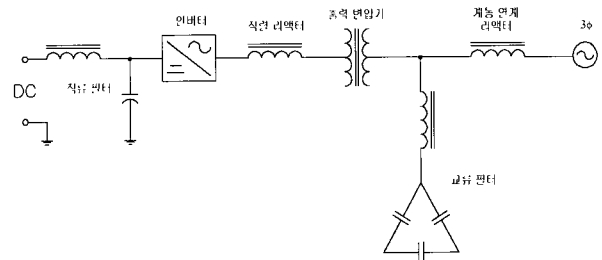


그림 1 직류전력 회생시스템  
Fig. 1 DC power regenerating system

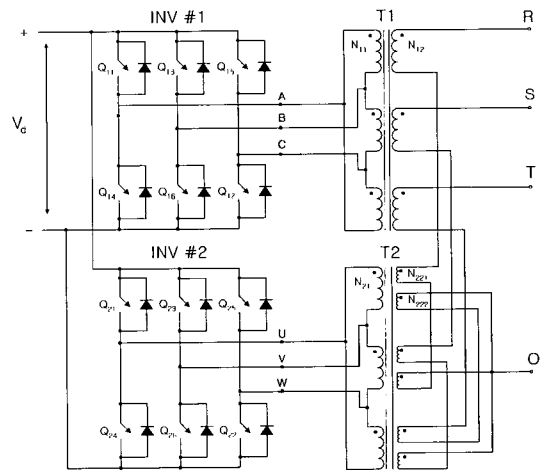


그림 2 회생전력 제어용 인버터 시스템  
Fig. 2 Inverter system for regenerated power control

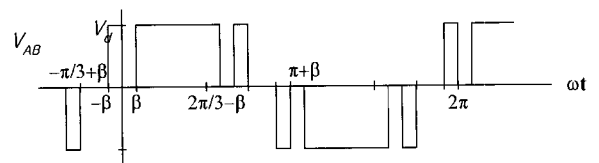


그림 3 수정 α도통방식의 출력전압  
Fig. 3 Output voltage in modified α-conduction mode

3상 VSI를 수정 a도통방식으로 운전하면서 인버터를  $\pi/6$ 의 위상차로 2중화하여도 THD는 감소하지만  $(6m\pm 1)$ 차의 고조파가 남게 된다. 이때 그림 2의 출력 변압기에서  $N_1=N_{12}/N_{11}$ ,  $N_2=N_{221}/N_{21}=N_{222}/N_{21}$ 라 할 때  $N_1=\sqrt{3}N_2$ 의 관계가 성립하면  $6(2k-1)\pm 1$ 차의 고조파가 추가로 제거되어  $(12k\pm 1)$ 차의 고조파만 남게 되며 존재하는 고조파의 최저 차수는 11차가 된다<sup>[4]</sup>. 인버터를 2중화하고 지그재그 결선 변압기를 사용한 회생용 인버터의 선간 출력전압은 다음과 같다.

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

교류필터는 잔존하는 고조파를 더 저감시켜 시스템의 출력전압이 보다 정현파에 가까워지도록 설치한 것으로 11차 필터 대신에 12차 필터를 설치하는 것이 더 효과적이며, 전압 THD를 1.52%까지 낮출 수 있다.<sup>[4]</sup>

### 3. 회생전력 제어

회생시스템이 직류모선에서 발생하는 잉여전력을 교류모선으로 효율적으로 회생하려면 먼저 원하는 양 만큼의 유효전력을 회생시킬 수 있어야 한다. 또한 회생되는 무효전력을 0에 가깝도록 제어하면 에너지 절감 측면에서 매우 유리하다. 본 논문에서는 기본파 성분을 기반으로 하여 회생되는 복소전력을 해석하고 이를 기반으로 하여 회생전력을 제어한다.

#### 3.1 복소전력 해석

직류전력 회생용 인버터 시스템은 3상 대칭이므로 한 상에 대해서 해석한 후에 각 값을 3상으로 치환하면 된다. 인버터 시스템의 출력전압에서 기본파 성분만을 고려할 경우, 시스템의 상당 등가회로는 그림 4와 같으며 두 전원 사이에 연계리액터만 존재하므로 전력원선도는 그림 5와 같다. 그림 4의 상당 등가회로로부터 교류모선으로 전달되는 복소전력은  $S_{ac}=P_{ac} + jQ_{ac}$ 이며, 이때의 유효전력 및 무효전력은 다음과 같다.<sup>[5]</sup>

$$P_{ac} = \frac{|V_{R1}| |V_a|}{X_l} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q_{ac} = \frac{|V_a|^2}{X_l} (|V_{R1}| \cos \delta - |V_a|) \quad (4)$$

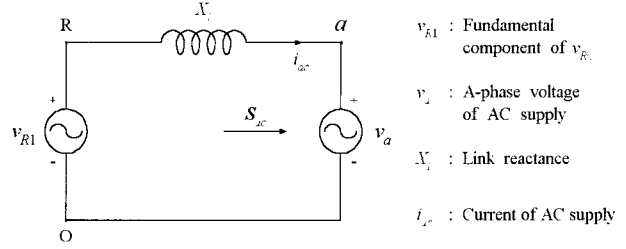


그림 4 상당 등가회로  
Fig. 4 Per-phase equivalent circuit

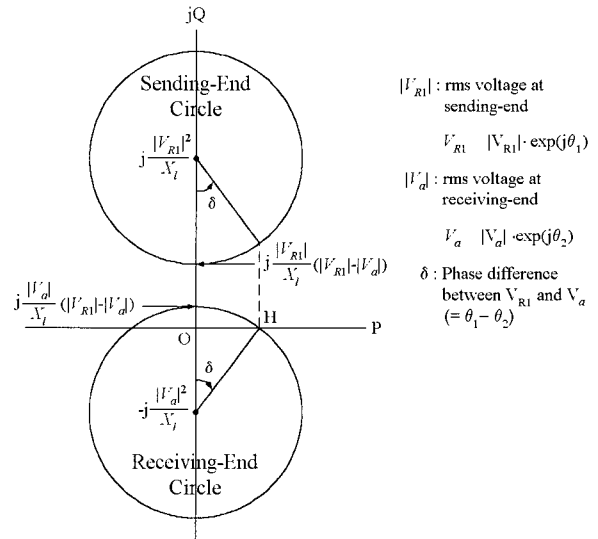


그림 5 전력원선도  
Fig. 5 Power circle diagram

그림 4에서  $|V_{R1}| < |V_a|$ 이어도 수전단으로 전력을 전달할 수 있다. 그러나 그림 5에서 두 원의 반경이 같으므로  $|V_{R1}| < |V_a|$ 이면 수전단에는 유효전력 외에 무효전력이 전달된다. 따라서 수전단에서 무효전력을 0으로 하면서 유효전력을 전송받으려면  $|V_{R1}| > |V_a|$ 가 되어 수전단 전력원이 P축과 교차하여야 하며, 이때 회생되는 유효전력의 크기는  $\overline{OH}$ 가 된다.

#### 3.2 전력제어 알고리즘

회생되는 무효전력  $Q_{ac}$ 가 0이 되려면 식 (4)에서 다음을 만족하여야 한다.

$$|V_{R1}| = |V_a| / \cos \delta \quad (5)$$

이때 교류모선으로 회생되는 유효전력은 다음과 같다.

$$P_{ac} = |V_a|^2 \tan \delta / X_l \quad (6)$$

그러므로 교류모션으로 회생시키고자 하는 유효전력의 양을 먼저 결정하면 식 (6)에서  $|V_a|$ 와  $X_l$ 의 값이 일정하므로  $V_{Rl}$ 과  $V_a$  사이의 위상차  $\delta$ 값이 결정된다. 이때 무효전력을 0으로 제어하려면 식 (5)의 관계가 만족되어야 하므로  $|V_a|$ 와  $\delta$ 의 값으로  $|V_{Rl}|$ 을 산출할 수 있으며  $|V_{Rl}|$  값에 해당하는  $\alpha$ 값을 결정할 수 있다.

유효전력을 제어하기 위해 출력이  $\delta_k$ 인 PI제어기를 구성하고, 위상차가  $\delta_k$ 일 때 무효전력이 0인 조건에서의 도통각  $\alpha_{k,ref}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha_{k,ref} = 2 \sin^{-1} \left( \frac{\pi |V_a|}{12\sqrt{2} N_2 V_d \cos \delta_k} + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

그러나 실제 인버터의 출력전압은 완전한 정현파가 아니기 때문에 고조파에 의해서도 무효전력이 발생한다. 따라서 고조파에 의해 추가로 발생하는 무효전력을 제어기에서 보상하여야 한다. 본 논문에서는 구간별로 제어변수에 대한 감도를 구해 상대적으로 감도가 큰 변수만을 고려하는 방법을 사용한다.

유효전력을 제어하기 위한 PI제어기, 등가회로모델을 이용한 보상기와 유효전력 및 무효전력의 연산부를 포함한 전체 제어시스템의 블록도는 그림 6과 같다.

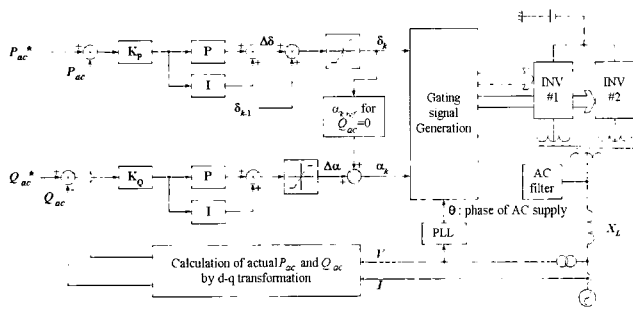


그림 6 전체 제어시스템의 블록도  
Fig. 6 Overall block diagram of control system

### 4. 시스템의 구현

#### 4.1 소프트웨어

모든 제어 프로그램은 TMS320C32의 어셈블리 언어를 사용하여 작성하였다. 제어 프로그램은 제어 보드

의 EPROM 27C512에 내장되고, CPU가 부팅될 때 이 프로그램이 고속의 SRAM으로 로드되어 실행된다.

프로그램은 주 프로그램과 인터럽트 서비스 루틴으로 구성된다. 주 프로그램에서는 먼저 CPU의 여러 내부 레지스터, I/O, 각종 제어변수들을 초기화시키고 인터럽트 벡터를 초기화하며, 직류전류 및 교류전류를 측정하기 위한 A/D 컨버터의 오프셋 값을 계산한다.

제어변수, I/O, 인터럽트의 초기화가 끝나면 실시간으로 무한 반복되는 메인 루프(main loop)로 들어간다. 메인 루프에서는 먼저 시작 스위치의 상태를 검사하여 STOP의 위치에 있으면 게이트 신호를 차단하고 인터럽트를 disable시킨 후에 LCD에 현재의 상태를 표시한다. 시작 스위치가 START의 위치가 되면 인터럽트를 enable시키고, 키 입력을 검사하여 입력이 있을 경우에는 LCD와 D/A 컨버터의 출력변수를 설정하고 100ms 주기로 LCD에 제어변수, 측정변수 등을 표시한다.

제어프로그램에서 사용하는 인터럽트는 6가지이며, 이 중에서 하드웨어 인터럽트 EINT1, 타이머 인터럽트 TINT0, 직렬포트 인터럽트 SPRT가 주된 처리 루틴이다. 인터럽트의 기능을 요약하면 표 1과 같다.

그림 7은 주요 인터럽트 처리루틴의 순서도이다. 그림 7(a)의 EINT1은 교류모션 전압의 영교차점 검출시에 호출되며, 교류모션의 주파수 계산, 타이머의 초기화, 평균전력 계산, 전력제어 등을 수행한다. 영전위 검출에 의해 인터럽트가 호출되므로 교류모션의 주파수를 추종하게 되며 주기는 1/60 초 정도이다.

내부 타이머 1을 사용하여 현재의 위상정보를 바로

표 1 인터럽트의 기능  
Table 1 Function of interrupt

인터럽트 종류	기능	
하드웨어 인터럽트	EINT0	TMS320C32 boot loader (ROM booting)
	EINT1	교류모션전압 영전위 검출
	EINT2	게이트신호 차단
	EINT3	TMS320C32 boot loader (serial booting)
타이머 인터럽트	TINT0	게이트신호 발생 및 전력 계산
	TINT1	(사용하지 않음)
직렬포트 인터럽트	SPRT	모션 전압과 인버터 출력 전압 사이의 위상차 구현
	SPXT	(사용하지 않음)

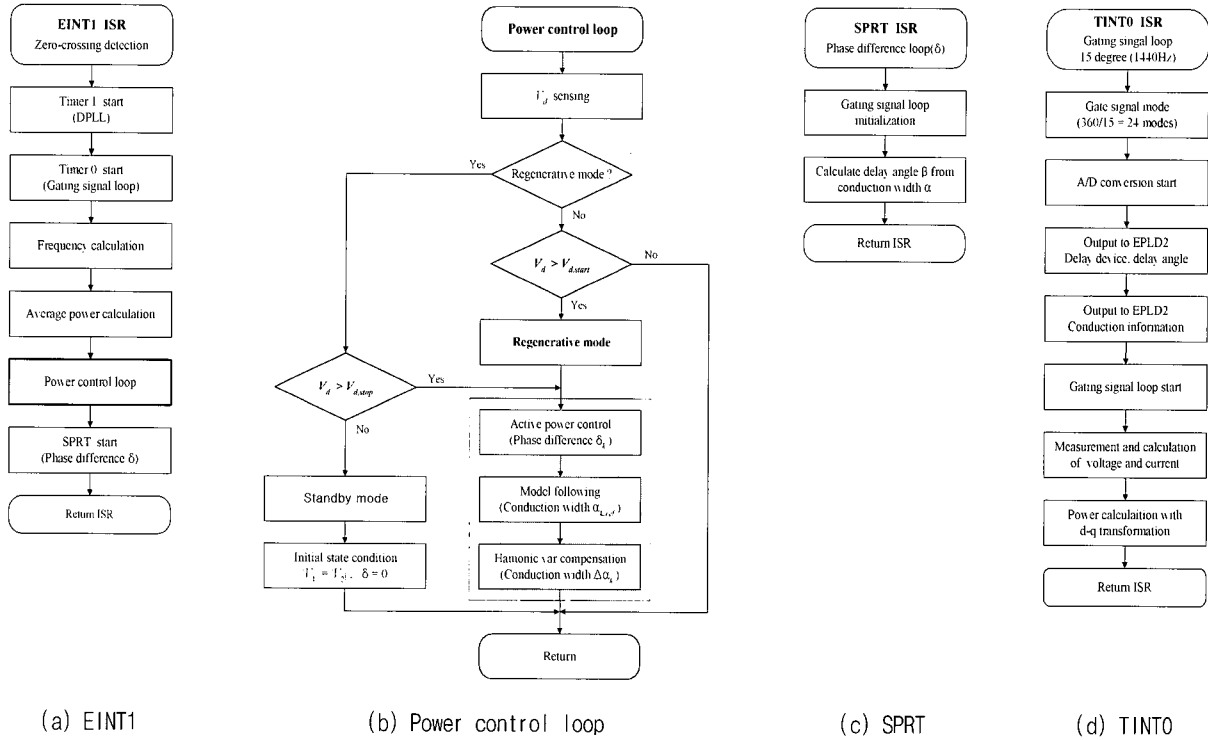


그림 7 인터럽트 처리 루틴의 순서도  
Fig. 7 Flowchart of interrupt service routines

계산할 수 있으므로 DPLL를 구현할 수 있으며, 한 주기에서의 타이머 1 값을 연산하여 교류모션 전압의 주파수를 계산한다. 그림 7(b)의 전력제어루프는 게이팅 신호루프에서 계산된 유효전력과 무효전력을 명령값과 비교하여 인버터 게이팅에 필요한 위상차와 도통각을 구하고, 위상차를 구현하기 위하여 SPRT 인터럽트를 초기화한다.

그림 7(c)에 나타난 직렬통신 인터럽트 SPRT에서는 인버터 시스템의 출력전압 위상이 교류모션전압의 위상보다 위상차  $\delta$ 만큼 앞서도록 타이머 인터럽트를 초기화시키고, 도통각  $\alpha$ 로부터 게이팅신호 발생시에 필요한 지연시간  $\beta$ 를 계산한다.

그림 7(d)의 타이머 인터럽트 TINT0에서는 게이팅 신호의 발생에 필요한 정보를 하드웨어 게이팅신호 발생회로에 전달하고, 제어에 필요한 전압, 전류 성분을 측정하여 교류모션 전압, 전류의 실효값, 순시 유효전력 및 순시 무효전력, 인버터 시스템의 출력전압의 실효값, 순시 역률 등을 계산한다.

하드웨어 인터럽트 EINT0와 EINT3는 TMS320C32를 마이크로컴퓨터 모드로 설정하기 위한 boot loader

로 사용된다. 이를 위해서는 TMS320C32가 리셋된 직후에 MCBL/MP 단자에 high가 인가되어야 한다. EINT0이 발생되면 boot loader에서 외부 ROM의 프로그램을 외부 SRAM으로 로드하고, EINT3가 발생되면 호스트 컴퓨터로부터 직렬포트를 통해서 SRAM으로 로드된다.

하드웨어 인터럽트 EINT2의 처리 루틴은 각각 IPM fault 신호와 하드웨어 과전류 등에 의해 호출된다. 이 인터럽트가 동작하면 모든 인터럽트를 disable시킨 후에 인버터의 게이트 신호를 차단하는 지령을 출력하여 시스템의 동작을 정지시키고 이를 상태 LED에 표시한다.

게이팅신호 생성기의 블록도는 그림 8과 같다. 인버터 시스템의 출력전압과 교류모션전압 사이의 위상차  $\delta$ 는 SPRT 인터럽트에 의해 구현되며, 도통각  $\alpha$ 에서의 지연각  $\beta$ 를 계산한다. SPRT 인터럽트에 의해서 초기화된 TINT0 인터럽트는 교류모션 한 주기당 24회 호출되어 15° 주기로 게이팅 신호를 발생시킨다. TINT0에서는 24개의 모드를 판별하여 각 모드에 맞는 소자도통정보와 지연소자 정보, 지연각  $\beta$ 를 하드

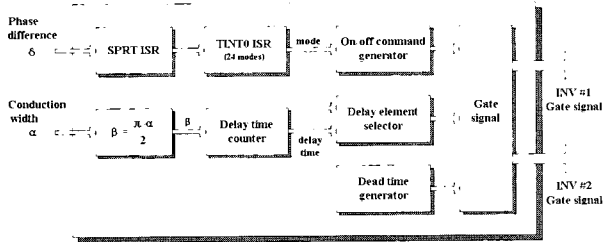


그림 8 게이팅신호 생성기의 블록도  
Fig. 8 Block diagram of gating signal generator

웨어 게이팅 신호 발생회로에 전달하여 게이팅 신호를 발생시킨다.

4.2 하드웨어

인버터 시스템은 IPM을 이용하여 간단한 구조로 설계하였다. 인버터의 출력단에는 고조파를 저감시키기 위해 설치하는 지그재그 출력변압기, 교류필터와 교류 모션과의 연계를 위한 연계리액터가 설치된다.

시스템의 제어보드는 그림 9와 같으며 32비트 DSP 인 TMS320C32, 32kW의 SRAM, 64kB의 EPROM, 8kB의 EEPROM, EPLD 2개, A/D 컨버터 6개, D/A 컨버터 1개와 게이트 드라이브 회로로 구성된다.

제어부는 전체 시스템을 제어하는 부분으로서 출력 전압의 크기와 교류모션전압과의 위상차 제어 등을 위해 각종 입력 데이터 및 출력 데이터를 바탕으로 연산을 수행하고 연산결과에 따라 인버터에 제어신호를 출력한다. 또한 제어에 필요한 내부적인 시간을 계산하거나 시스템의 제어상태를 외부로 출력하기도 한다.

인터페이스는 제어기와 전력회로 사이에 동작지령이나 검출신호 등을 상호 전달하고, 외부에 시스템의 동작상태를 표시하거나 외부에서 각종 지시를 내릴 수 있는 입출력 기능을 수행한다. 본 논문에서는 제어회로를 컴팩트하게 하기 위해 디지털 로직회로는 고집적 EPLD인 EPM7128SLC84와 EPM 7160SLC84에 설계하여 집적화하였다.

하드웨어 게이팅신호 발생회로는 3단계로 게이트신

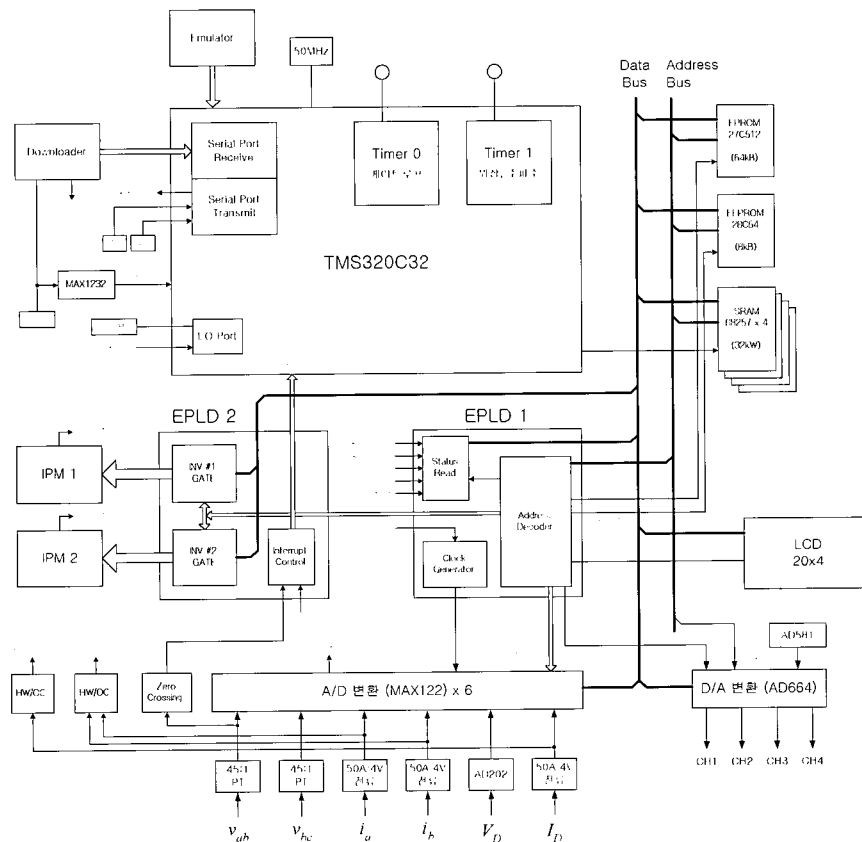


그림 9 제어보드의 구성  
Fig. 9 Construction of control board

호 발생에 필요한 정보를 받게 된다. 우선 소자도통정보를 받아서 각 소자들의 온/오프를 결정하고 지연소자정보를 받아서 지연시간이 필요한 소자를 선택하며 마지막으로 지연각정보를 받은 후에 게이팅 시작신호를 받으면 게이팅 동작이 시작된다. 게이팅 주기는 15°이고, 교류모션전압의 주파수를 검출하여 이에 추종하기 때문에 60 Hz 근처에서 교류모션의 주파수 변동에 따라 시간주기가 변하게 된다. 지연각을 카운팅하기 위한 기준클럭은 직렬포트 송신 클럭단자인 CLKX0 신호선을 사용하고 0.1°의 기준클럭을 발생하도록 설정하였다. 따라서 지연각 카운터에서 0~150 범위의 정수를 입력받아 해당시간만큼 지연시킨 후에 지연소자의 스위칭을 진행하게 된다.

제어보드에 사용된 전압센서는 직류모션전압 검출용 센서, 3상 교류모션전압 검출용 센서 2개이다. 직류모션전압을 검출하기 위해 Analog Device사의 AD202JN을 사용하였으며 교류전압 센서로는 45 : 1인 PT를 사용하였다. 또한 전류센서로는 비접촉식 CT형 홀센서인 HCSA-50-04를 사용하였다.

외부에 시스템의 동작상태를 표시하기 위해 제어보드에 3개의 LED, 20열 4행의 LCD 모듈, D/A 컨버터를 사용하였다. LED는 인버터의 동작상태를 나타내는 용도로 사용되며, LCD 모듈은 전압, 전류, 전력, 역률 등의 제어변수, 파라미터를 모니터링하는 용도로 사용된다.

데드타임은 4비트의 카운터를 사용하여 하드웨어적으로 구현되며, 5[μs] 동안 해당되는 상의 모든 게이팅 신호를 차단한다. 또한 IPM fault, 직류 과전류, 교류 과전류와 같은 하드웨어 및 소프트웨어적인 보호기능이 동작할 경우에는 모든 출력단을 차단하여 전체 게이팅 신호가 출력되지 않도록 한다.

시스템의 보호기능에는 하드웨어적인 보호기능과 소프트웨어적인 보호기능이 있는데 시스템의 안전문제는 완벽해야 하므로 두가지의 기능을 중복하여 처리한다. 직류 및 교류 과전류의 제한값은 임의의 값으로 설정이 가능하나 본 논문에서는 정격의 200%로 하였다.

5. 실험 및 결과 검토

본 논문에서 제시한 기법의 타당성을 검증하기 위해 축소모델을 설계, 제작하였다. 축소모델의 파라미터는 표 2와 같다.

제어프로그램에서 소프트웨어적으로 전력 및 역률을 계산하고, 모든 측정변수 및 제어변수들을 4채널의 전

압출력형 D/A 컨버터인 AD664를 이용하여 출력함으로서 외부에서 오실로스코프를 사용하여 쉽게 측정할 수 있도록 하였다. 실험을 위해 제작한 전체 시스템 및 제어기는 그림 10 및 그림 11과 같다.

회생시스템의 응답을 확인하기 위해 먼저 유효전력의 명령값  $P_{ac}^*$ 와 무효전력의 명령값  $Q_{ac}^*$ 의 초기값을 0으로 한 다음에 t=5[sec]일 때 무효전력은  $Q_{ac}^*=0$ 을 유지하면서 유효전력의 명령값을 4[kW]로 변경한다.

표 2 축소모델의 파라미터  
Table 2 Parameters of prototype

파라미터	값
교류모션전압	3상, 220 [V]
출력용량	5 [kVA]
직렬리액터	0.577 [mH]
변압기 권수비	$N_1=25/49, N_2=15/51$
교류필터 리액터	135 [μH]
교류필터 커패시터	360 [μF]
연계리액터	3.88 [mH]

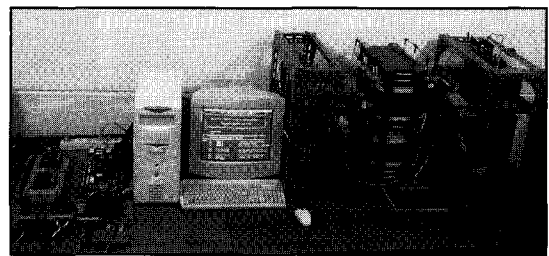


그림 10 전체 회생시스템  
Fig. 10 Overall regenerating system

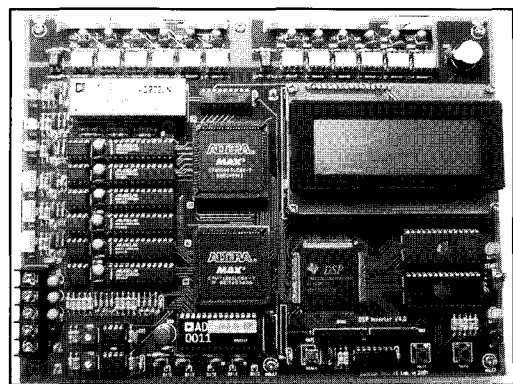


그림 11 제어기  
Fig. 11 Controller

또한 회생시스템의 시동뿐만 아니라 기동중의 특성을 알아보기 위해  $t=25[\text{sec}]$ 일 때  $P_{ac}^*$ 만을 0으로 변경하였다가  $t=45[\text{sec}]$ 일 때 다시  $P_{ac}^*$ 만을 4[kW]로 변경한다. 유효전력과 무효전력의 명령값이 모두 0인 구간은 대기모드로서 인버터 시스템이 회생운전을 하지 않고 공운전을 하는 구간이며, 무효전력 명령값이 0이고 유효전력 명령값이 4[kW]인 구간은 회생모드로서 회생동작을 하는 구간이다.

그림 12는 전력의 명령값 변화에 따른 도통각  $\alpha$ 와 위상차  $\delta$ 의 응답을 나타낸 것이다. 그림 12(a)의 도통각은 파형의 기준선이  $120^\circ$ 인데, 명령값의 변화에 따라 변동함을 알 수 있다. 또한 그림 12(b)의 위상차 파형에서 4[kW]의 유효전력이 회생될 때의 위상각이 대략  $9^\circ$ 임을 알 수 있다.

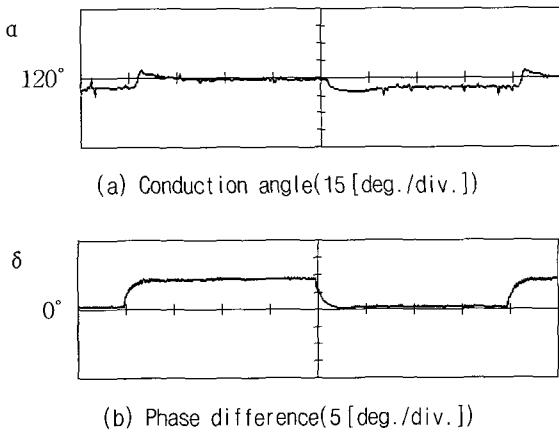


그림 12 도통각과 위상차(시간축 : 5 [sec/div.])  
Fig. 12 Conduction angle and phase difference

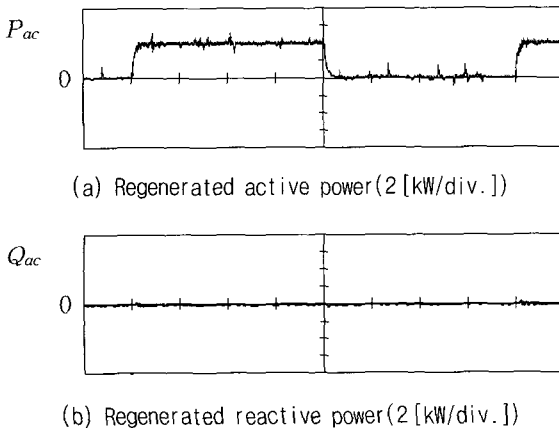


그림 13 회생되는 전력(시간축 : 5 [sec/div.])  
Fig. 13 Regenerated power

그림 13은 명령값 변화에 따른 유효전력과 무효전력의 응답을 측정한 것이다. 그림 13(a)가 교류급전계통으로 회생되는 유효전력인데, 유효전력이 오버슈트 없이 명령값을 잘 추종함을 알 수 있다. 또한 무효전력은 그림 13(b)에서 알 수 있듯이 유효전력의 명령값 변경과 무관하게 여전히 0에 가깝게 제어되고 있다.

그림 14는 회생시스템의 출력전압과 교류전원전압을 비교한 것이다. 그림 14(a)에 보인 것처럼 회생시스템이 대기모드로 운전되고 있을 때에는 시스템의 출력전압과 교류전원전압이 동상임을 알 수 있다. 반면에 회생시스템이 회생모드로 운전중일 때에는 그림 14(b)에서 알 수 있듯이 시스템의 출력전압이 교류전원전압에 비해 위상이 약간 앞서 있음을 확인할 수 있다.

그림 15는 직류전력 회생시스템의 역률로서 시스템

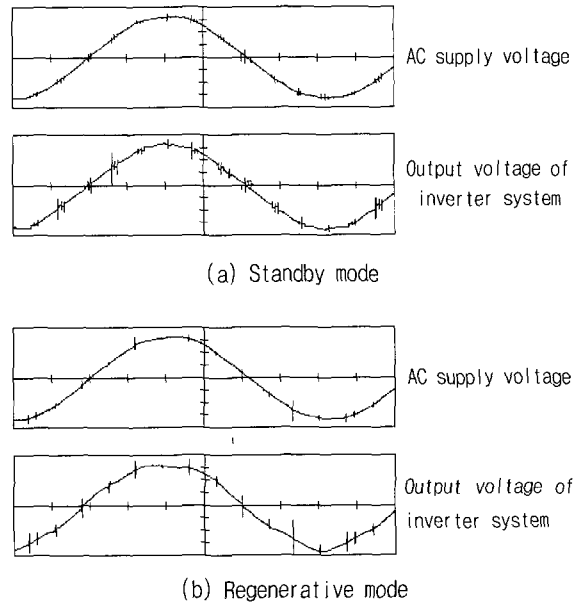


그림 14 출력전압과 교류전원전압의 비교  
(90[V/div.]/2[ms/div.])

Fig. 14 Comparison of output voltages with AC supply voltage

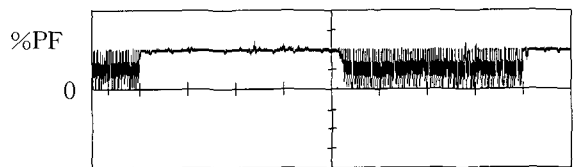


그림 15 역률(50 [%/div.]/5 [sec/div.])  
Fig. 15 Power factor



이 회생모드로 동작중일 때에는 거의 단위역률임을 확인할 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 직류를 전원으로 하는 전철시스템에서 직류모선의 잉여전력을 효율적으로 교류모선으로 회생시킬 수 있는 인버터 시스템을 구현하는 기법을 제안하였으며 축소모델을 사용한 실험을 통하여 제안한 기법의 타당성을 입증하였다.

직류모선의 잉여전력을 효율적으로 회생하기 위해 먼저 출력전압의 기본과 성분을 기반으로 하여 복소전력을 해석하고 고조파 성분에 의한 무효전력까지 제어할 수 있는 제어알고리즘을 적용하였다. 제어 알고리즘에서는 상대적으로 감도가 높은 변수만을 고려하는 방법을 사용하였으며, PI제어기를 기반으로 하였다.

실험을 위하여 220[V], 5[kVA]급의 축소모델을 구성하고 DSP를 사용하여 제어기를 설계, 제작하였다. 실험 결과, 회생되는 실제 유효전력이 명령값을 효과적으로 추종하며 회생시스템의 출력전압에 고조파가 포함되어 있음에도 불구하고 회생되는 무효전력이 거의 0임을 확인하였다. 따라서 적절한 용량의 회생시스템을 설치하면 직류모선의 잉여전력을 모두 교류모선으로 회생시킬 수 있다.

본 논문의 결과는 대용량인 전철시스템에서 사용하는 전력의 양과 앞으로 증설 추세에 있는 상황을 고려하면 전기에너지 절약에 크게 기여할 수 있을 것으로 전망된다. 또한 심야전력을 활용하는 전력저장시스템 등 유사 시스템에도 적용될 수 있을 것이다.

이 연구는 2000학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

### 참 고 문 헌

[1] T. Suzuki and B. Tech, "DC Power-Supply System with Inverting Substations for Traction Systems Using Regenerative Brakes", IEE Proceedings, Vol. 129, Pt. B, No. 1, pp. 18~26, January 1982.

[2] 서영민, 이주훈, 김경원, 윤인식, 유종걸, 윤덕용, 홍순찬, "α도통모드에 의한 직류전력 회생용 인버터 출력전압의 크기 제어", 전력전자학회 전력전자학회 논문집, pp. 351~354, 2000. 7.

[3] 김경원, 홍순찬, 유종걸, 김상근, 박채운, "R-L부하를 가진 구형과 VSI의 전압크기 제어", 전력전자학회 전력전자학회 논문집, pp. 479~482, 2001. 7.

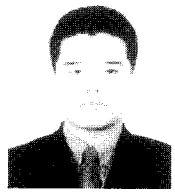
[4] K. W. Kim, J. H. Lee, I. S. Yoon, Y. M. Seo, D. Y. Yoon, C. W. Park, S. S. Han, and S. C. Hong, "Power Control and Design of Regenerative Inverters in DC Traction Systems", Proc. of ICEE, pp. 974~978, 2001.

[5] A. R. Bergen and V. Vittal, *Power Systems Analysis*, Prentice-Hall, Inc., 2000.

### 저 자 소 개



**김경원(金敬源)**  
1973년 10월 30일생. 2000년 단국대 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**서영민(徐永珉)**  
1974년 5월 5일생. 1997년 단국대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**홍순찬(洪淳瓚)**  
1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975년~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학과 전임강사. 1986년~1987년 미국 Texas A&M University 방문 교수. 1978년~현재 단국대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 현재 당 학회 회장.