

## 저역통과 LC필터를 가진 전브리지형 인버터로 구동되는 3상 유도전동기의 속도제어 시스템에 관한 연구

박      진      길\*

### A Study on the Speed Control System of a 3 phase Induction Motor driven by the Full Bridge Inverter with a Low Pass LC Filter

J.G.Park\*

**Key words** : Full bridge inverter with a 3rd order low pass LC filter, (3차저역통과 LC 필터를 가진 전브리지 인버터), EMI(전자파 장애), Digital speed control of a 3 phase induction motor(3상유도전동기의 디지털 속도제어)

#### Abstract

The variable frequency and variable voltage AC source made by a conventional inverter which is composed of power semi-conductors includes much noises in sine wave due to high frequency switching of DC source. In this paper, the 3rd low pass LC filter for a variable speed 3 phase induction motor driven by a full bridge inverter is introduced to solve the EMI problem by serious noise current. The utility of a modified 3rd order Butterworth LC filter is confirmed through FFT analysis of sine waves and noiseless AC source can be obtained by the proposed LC filter. The speed of a 3 phase induction motor driven by a full bridge inverter with a LC filter is satisfactorily controlled by a digital PID controller under the condition of stepwise load and setpoint changes.

#### 1. 서      론

최근 각종 전력반도체소자들의 응용기술과 마이크로프로세서의 발달로 구조가 간단하고 보수가 용이하며 고장이 적은 3상 유도전동기의 속도 및 토크제어가 가능하게 되어 동력기계로 사용됨

은 물론 대형 서보기구로도 산업계에 널리 쓰이고 있다<sup>1)~4)</sup>. 가변전압가변주파수(VVVF)를 얻는 방법으로 보통 PWM(pulse width modulation)방식을 많이 이용하고 있다<sup>2)~6)</sup>. 본 연구에서는 programmed PWM 방식을 이용하였다. 이 방식은 지정된 고조파 성분의 제거가 가능하고 양호한 PWM과

\* 한국해양대학교 교수(원고접수일 : 97년 4월)

형을 얻을 수 있는 장점이 있다. DC전원을 가변주파수의 AC전원으로 변환하는 인버터에는 구형파 전압이 입력되므로 전원에 많은 잡음(noise)이 포함되고 이로 인하여 유도전동기의 자기소음, 전자파 장애 및 과열등으로 효율적인 운전에 문제점으로 되어 왔다. 여기에서는 3상 유도전동기의 각 상을 분리하여 전브리지형 인버터와 전동기의 각 상의 권선을 포함하여 적합한 3차계의 저역통과 LC 회로를 설계하였고 실제 유도전동기를 구동하여 여러 주파수 영역에서 정현파에 가까운 VVVF(가변전압 가변주파수)전원을 얻을 수 있었다. 인버터의 구동과 속도 및 토크제어에는 180C196KC 원칩 마이크로 프로세서를 사용한 제어기를 이용하였고 PID알고리즘으로 속도제어를 시험하여 얻은 결과를 분석하였다. 자료수집은 PC와 디지털 오실로스코프를 사용하였고 정현파의 파형은 FFT분석으로 잡음이 사라짐을 확인하고자 하였다.

## 2. 저역통과 LC필터 설계

LC필터에는 저역통과필터(Low Pass Filter), 고역통과필터(High Pass Filter), 대역통과필터(Band Pass Filter), 대역제거필터(Band Rejection Filter)등이 있으며 본 연구에서는 브리지 인버터에서 출력되는 구형파의 전압으로부터 유사정현파를 얻기위해 저역통과 LC필터를 이용하였다. Fig 2.1과 같은 LC필터에 있어서 구성요소인 R,L,C에 따라서 2차부터 n차에 이르는 필터를 구성할 수가 있으나<sup>69) 71)</sup> 여기에서는 경제성과 실용성을 고려하여 Fig 2.1과 같이 3차계 필터를 구성하였다. Lm 및 Rm은 3상 유도전동기의 인덕턴스와 저항으로 LC필터의 한 요소로 사용하였다.

Fig 2.1에서 3차계필터를 사용한 경우에 대해서는  $I_m(s)/V(s)$ 의 전달함수는 식 (2.1)로 주어진다.

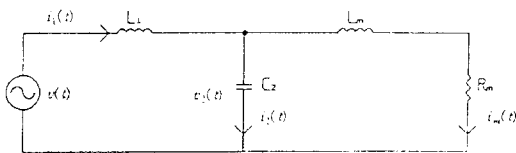


Fig 2.1 The 3rd order low pass filter for a 3phase AC motor

$$\frac{I_m(s)}{V(s)} = \frac{1.0}{A_{33} S^3 + A_{32} S^2 + A_{31} S + A_{30}} \quad (2.1)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} A_{33} &= L_1 C_2 L_m \\ A_{32} &= L_1 C_2 R_m \\ A_{31} &= L_1 + L_m \\ A_{30} &= R_m \end{aligned}$$

Fig 2.2는 전브리지형 인버터의 개략도이다. 5분주(Half-cycle)된 파에 기준한 전력이용률로 IGBT1, IGBT4가 통전되면 부하의 양단에 정전압인  $+V_s$ 의 전압이 흐르게 되고, 반주기 후 IGBT3, IGBT2가 통전되면 부하의 양단에 역전압인  $-V_s$ 의 전압이 흘러 교류를 얻게 된다. 전류를 차단할 때 발생하는 고전압은 IGBT에 내장되어 있는 순환 다이오드(Wheeling Diode)를 통하여 환원되도록 되어 있다. Fig 2.3은 각 IGBT1~IGBT4의 통전과 출력전압과의 관계를 나타내고 있다. 80C196KC의 HSO출력을 입력전압으로 한 IGBT의 출력파형을 나타낸 그림으로서 1주기(Tp)를 10분주하고 사인파형에 기준한 전력이용률로 정현파에 가까운 전류파형을 얻고자 하였다. 각 샘플링 시간(Ts)과 기준 정현파형의 값을 조절하여 전원의 주파수와 전류의 크기를 가변시킬 수 있다. 이때 LC필터에 주어지는 공급전압 V(s)와 직류전원 전압  $V_s$  사이의 전달함수는 식 (2.2)와 같다.

$$\begin{aligned} V(s) = \frac{V_s}{S} & (e^{-A_1 S} - e^{-B_1 S} + e^{-A_2 S} - e^{-B_2 S} + e^{-A_3 S} - \\ & e^{-B_3 S} + e^{-A_4 S} - e^{-B_4 S} + e^{-A_5 S} - e^{-B_5 S} - \\ & e^{-C_1 S} + e^{-D_1 S} - e^{-C_2 S} + e^{-D_2 S} - e^{-C_3 S} + \\ & e^{-D_3 S} - e^{-C_4 S} + e^{-D_4 S} - e^{-C_5 S} + e^{-D_5 S}) \\ & = \frac{V_s}{S} e^{-6S} \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} A_1 &= kTp + dt \\ B_1 &= kTp + T_s \sin(\pi/6) \\ A_2 &= kTp + T_s \\ B_2 &= kTp + T_s [1 + \sin(\pi/3)] \\ A_3 &= kTp + 2 T_s \\ B_3 &= kTp + T_s [2 + \sin(\pi/3)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_4 &= kTp + T_s [3 + (1 - \sin(\pi/3))] \\
 B_4 &= kTp + 4 T_s \\
 A_5 &= kTp + T_s [4 + (1 - \sin(\pi/6))] \\
 B_5 &= kTp + 5 T_s \\
 C_1 &= kTp + dt + 5 T_s \\
 D_1 &= kTp + T_s [5 + \sin(\pi/6)] \\
 C_2 &= kTp + 6 T_s \\
 D_2 &= kTp + T_s [6 + \sin(\pi/3)] \\
 C_3 &= kTp + 7 T_s \\
 D_3 &= kTp + T_s [7 + \sin(\pi/2)] \\
 C_4 &= kTp + T_s [8 + (1 - \sin(\pi/3))] \\
 D_4 &= kTp + 9 T_s \\
 C_5 &= kTp + T_s [9 + (1 - \sin(\pi/6))] \\
 D_5 &= kTp + 10 T_s
 \end{aligned}$$

단,  $k=0, 1, 2, \dots$   
 $T_p$  : 주기 (Period),  $T_s$  : (Sampling Time),  
 $dt$  : Dead Time

식 (2.1)과 식 (2.2)로부터 3차계 필터에 흐르는 전류, 즉 전동기의 권선에 흐르는 전류  $I_m(s)$  와 직류 전원 전압  $V_s$ 의 관계식을 구하면 식 (2.3)과 같다.

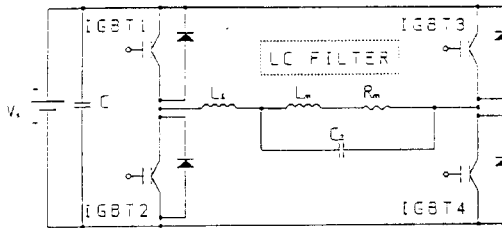


Fig 2.2 The Circuit of full-bridge inverter with a low pass filter

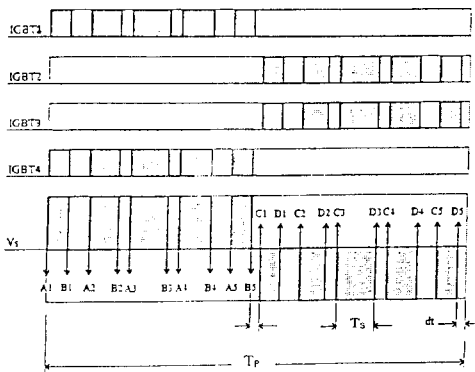


Fig 2.3 The Time chart of a full-bridge inverter

$$I_m(s) = \frac{V_s}{S} \frac{1.0}{(A_{33}S^3 + A_{32}S^2 + A_{31}S + A_{30})} e^{-ts} \tag{2.3}$$

식 (2.1)과 식 (2.2)에서도 알 수 있는 바와 같이 전동기에 흐르는 전류  $i_m(t)$ 의 파형에 영향을 가장 많이 미치는 것은  $C_2$  와  $L_1$ 에 의하여 결정되는 특성방정식의 각 파라메타의 값이며 이 값들은 필터의 종류에 따라 달라진다. 식 (2.2)의  $A_1 \sim A_5, B_1 \sim B_5, C_1 \sim C_5, D_1 \sim D_5$ 의 값들도 전류파형  $i_m(t)$ 에 있어서 진폭과 파형에 영향을 미친다. 필터설계에 있어서 각 계수값은 표준 3차 Butterworth 필터를 참고로 하였고<sup>5)</sup> 실제 모터를 구동시키기 위한 제안된 필터의 계수값은 전동기의  $L_m, R_m$  값이 일정하므로 알맞은 필터를 구하기가 쉽지 않으므로 각 주파수에서 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 좋은 파형을 구하면 아래의 Table 2.1과 같이 주어진다.

Table 2.1 Parameters of the 3rd order LC filter

Hz	$L_1$	$C_2$	$L_m$	$R_m$
20Hz	270mH	110 $\mu$ F	275mH	85 $\Omega$
50Hz	80mH	40 $\mu$ F	275mH	85 $\Omega$
80Hz	40mH	26 $\mu$ F	275mH	85 $\Omega$

위의 값을 식 (2.3)에 대입하여 컴퓨터시뮬레이션한 결과는 Fig 2.4와 같으며 좋은 정현파 전류를 얻을 수 있었다.

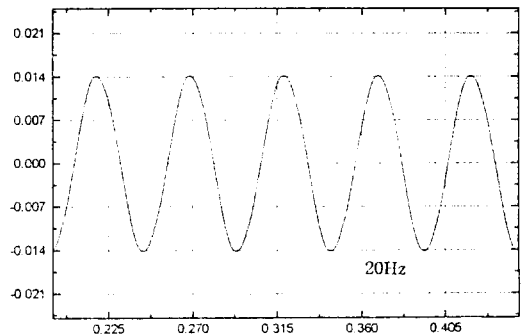


Fig 2.4-1 Current waveforms of a induction motor with the revised 3rd LC filter at various frequencies

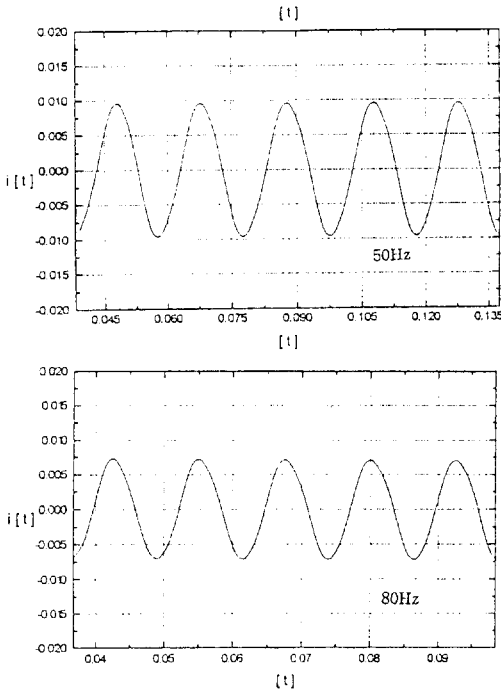


Fig 2.4-2 The Current waveforms of a induction motor with the revised 3rd LC filter at various frequencies

### 3. 유도전동기 속도제어시스템의 구성 및 설계

#### 3.1 실험장치의 구성

Fig 3.1은 전체적인 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 AC전원의 직류전환부, 인버터, LC필터, 3상유도전동기, DC발전기, 저항부하, TG(타고발전기), IGBT드라이브, 원칩마이크로 제어기, PC등으로 이루어져 있다. 구동대상인 3상유도전동기의 결선은  $\Delta$ (delta)결선방식이 되어 있으나 각 상을 독립적으로 분리시켜 3상을 구성하고 있다. 각 상을 완전하게 독립시킴으로써  $\Delta$ (delta)결선시 발생하는 각 상간의 간섭을 완전히 방지할 수 있는 장점이 있다.

시스템은 PC에서 운용프로그램을 원칩마이크로 제어기에 down load시키고 PC에서 실험시작 신호를 내려보내면 마이크로 제어기에 내장되어 있는 ADC에서 현재의 전동기속도 신호와 설정속도 신호를 디지털 신호로 바꿔게 되고, 오차디지털

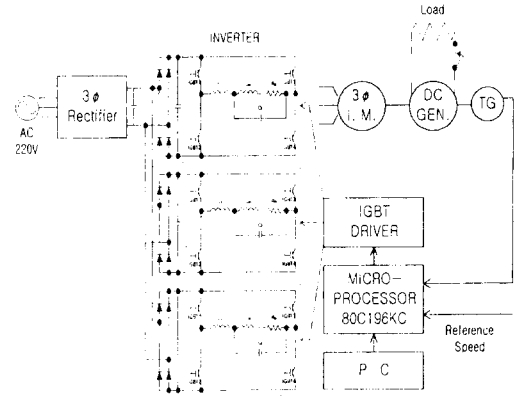


Fig 3.1 Schematic diagram of experimental equipments

털 신호는 제어 알고리즘에 따라 연산과정을 거쳐 IGBT구동회로에 신호를 보내게 된다. 인버터는 IGBT의 구동신호에 따라 주파수와 전압크기를 조정하여 3상 유도전동기의 속도 및 토크가 제어 된다.

#### (가) 원칩마이크로 제어기(80C196KC)

가변주파수의 인버터를 구동하기위해 80C196KC의 HSO출력으로 IGBT에 트리거링 신호를 내보내도록 하였다. 현재 80C196KC는 산업현장에 널리 사용되고 있으며 MCS-96CHMOS형으로서 기존의 NMOS형의 3분주 클락시스템과는 다른 2분주 클락을 이용함으로써 전체적인 처리속도가 월등하게 빨라졌으며 기존의 8비트 마이크로콘트롤러에 비해 현저하게 빠른 속도의 16비트 연산기능과<sup>621-661</sup> 외부입출력을 빠르게 처리해주는 고속 I/O Subsystem, 디지털 신호의 아날로그 변환등 다양한 기능을 가지고 있다. Fig 3.2는 80C196KC의 구조를 나타내고 있으며 그림에서 보는 바와 같이 레지스터파일과 RALU (Register/Arithmetic Logic Unit)로 구성되어 있는 CPU와 각 주변장치로 구성되어 있다.

PWM을 만드는데는 인터럽트시스템과 고속출력장치(HSO)를 이용하였다. 80C196KC는 28개의 인터럽트소스를 갖고 18개의 인터럽트 출력백터에 의해서 처리된다. 루틴상에서 인터럽트가 실행되기까지는 인터럽트 소스로부터 3개의 레지스

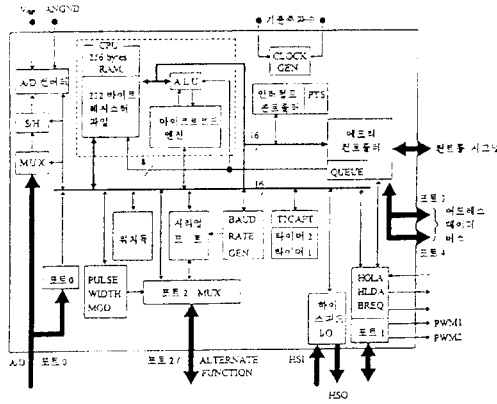


Fig 3.2 Schematic diagram of one chip micro-controller (i80C196KC)

터 과일(Interrupt Pending, Interrupt Mask, Program Status Word)을 거치게 된다. 먼저 인터럽트 소스로부터 사건이 발생하면 이결과는 Interrupt Pending Register ⇒ Interrupt Mask Register ⇒ Program Status Word(9번비트)의 실행 순서대로 각 레지스터의 AND GATE를 통해 인터럽트 발생기로부터 해당 인터럽트결과를 출력하게 된다. 인버터의 IGBT소자를 구동시킴에 있어서는 80C196KC에 내장된 HSO기능을 이용하였다. HSO는 정해진 시간(내부timer 기준)에 펄스 또는 인터럽트를 발생시킬 수가 있다. 발생시킬 사건의 내용은 hso\_command에, 발생시킬 시점은 hso\_time (timer1과 timer2 이용가능)에 기록하여 원하고자 하는 인터럽트를 출력시킬 수 있다.

(나) IGBT 구동회로

IGBT는 고내압, 대용량의 특성과 초고속 스위칭이 가능한 소자로서 실험장치에 사용한 IGBT는 TF1205이다. Fig 3.3은 스위칭타임을 나타내

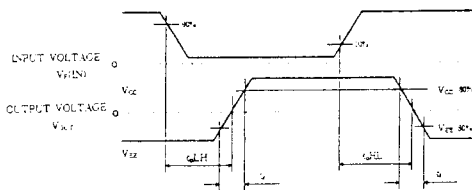


Fig 3.3 Switching time condition

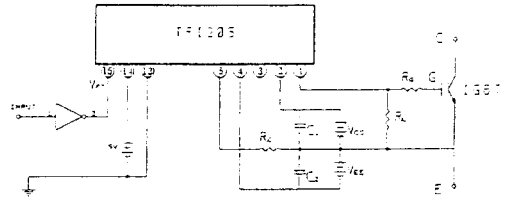


Fig 3.4 Circuit of IGBT drive

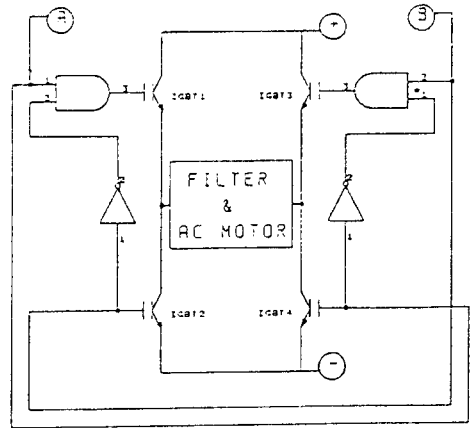


Fig 3.5 Logic circuit of IGBT

고 있는데 IGBT소자에 트리거링(ON) 신호가 입력되었을 때의 응답시간  $t_{pLH}$ 는  $0.5 \sim 1 \mu\text{SEC}$  정도이고 ON상태에서 OFF신호에 대한 응답시간은  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{sec}$  정도로 아주 빠른 응답속도를 나타내고 있다. 이때의 출력전압은  $V_{cc}$ ,  $V_{EE}$ 이고 전압의 크기는 각각  $+15V$ ,  $-15V$ 이다.

Fig 3.4은 IGBT의 드라이브소자의 회로도이다. 15번 핀은 드라이브의 구동신호 입력선이고 입력신호의 ON, OFF동작에 따라서 IGBT의 Gate에 동작 신호를 보내 주게 된다.

Fig 3.5는 3상유도전동기의 한 상에 대한 로직 회로이다. 각 상의 인버터에는 4개씩의 IGBT소자가 필요하여 전체적으로 12개의 소자를 이용하게 되는데 HSO출력단은 6개라는 제한이 있게된다. 이것을 극복하는 방법으로 로직회로를 구성하여 HSO출력단 2개씩으로 각 상의 인버터를 구동하도록 하였다. 로직회로의 작동은 간단하다. Fig 3.4의 A와 B는 마이크로 프로세서로부터의 HSO

신호 입력단이다. A의 입력선에 ON신호가 가해지면 IGBT1, 4가 통전되어 +전원전압이 걸리게 되고 B에 ON신호가 입력되면 IGBT2, 3이 통전되어 전압이 인가된다. 아울러 IGBT소자의 스위칭시 발생할 수 있는 오동작이나 회로상의 단락을 막을 수 있는 특성도 갖고 있다.

(다) 3상 유도전동기 및 DC 발전기

실험에 사용한 3상유도전동기는 영국 Feed Back사에서 교육용으로 제작한 것으로 무부하 시험과 구속시험을 행하여 측정된 값으로부터 계산한 1상의 권선의 저항은  $R_m = 851\Omega$  정도이고 인덕턴스  $L_m = 2751mH$  정도 되었다. DC 발전기도 Feed Back사에서 만든 것으로 저항부하를 걸 수 있도록 하였다. TG는 발전기나 전동기에 부착하여 속도를 측정하도록 되어 있다. 여기에는 DC 발전기축에 연결하여 전동기의 속도를 전압신호로 측정하여 원칩 마이크로 제어기에 내장되어 있는 ADC에 보내진다. Fig. 3.6은 실험장치의 전체 사진이다.

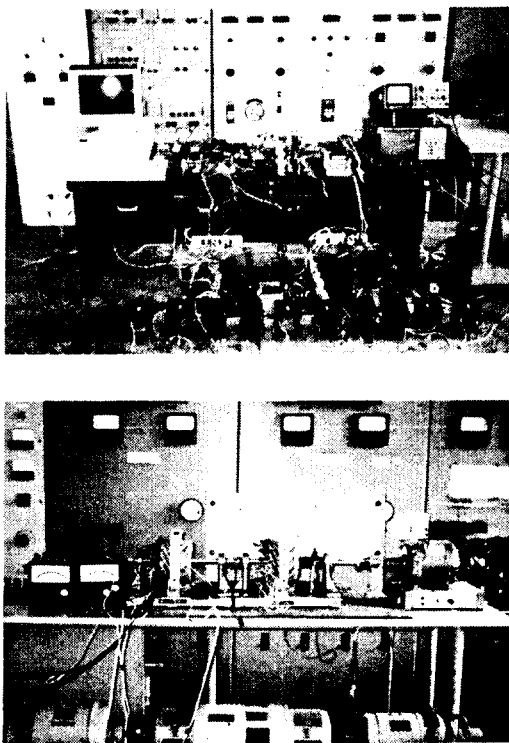


Fig. 3.6 Photograph of the experimental apparatus

3.2 속도제어시스템의 설계

3상유도전동기는 속도와 토크관계가 비선형의 특성을 가지고 있고, 특히 실험장치에는 전동기의 구동회로, DC발전기, TG등의 부속장치들이 설치되어 있으므로 회전수제어계통의 정확한 전달함수를 구하는 것은 어려운 과제이나 실험에서 사용한 속도제어시스템을 블록선도로 표시하면 Fig 3.7과 같다.

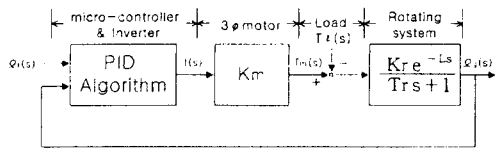


Fig 3.7 Block Diagram of the speed control system

$Q_r(s)$ 는 가변저항기로 1~5V의 설정값과 TG에서의 실제 회전수 신호값  $Q_g(s)$ 을 마이크로 제어기의 ADC에 보내면 디지털 오차신호가 i80C196KC 마이크로 제어기에서 PID 제어알고리즘에 의하여 제어신호가 연산되고 IGBT 구동회로를 거쳐 인버터를 작동시켜 가변주파수 가변전압의 전원을 만들고 3상 전동기를 돌려 전동기의 토크  $T_m$ 을 얻는다.  $T_m$ 과 슬립사이의 관계는 비선형이나 슬립 0~0.2 사이는 선형에 가깝고 최대 토크가 발생하는 슬립설정치 속도에 추종하도록 하였다. Fig. 3.7에서 수동으로 주어지는 설정치 속도신호  $Q_r(s)$ 와 TG의 실제 속도신호  $Q_g(s)$ 일 때, PID제어기에 대한 전달함수는 아래와 같다.

$$E(s) = Q_r(s) - Q_g(s) \tag{3.1}$$

$$f(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \tag{3.2}$$

- 여기에서 E(s) : 오차신호
- f(s) : 주파수
- $K_p$  : 제어기의 이득
- $T_i$  : 적분시간
- $T_d$  : 미분시간

식 (3.2)를 디지털제어의 속도형 전달함수로 구하면 다음식과 같다.

$$f(k) - f(k-1) = \Delta f(k) = Kv[e(k) - e(k-1)] + Ki[e(k)] + Kd[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (3.3)$$

여기서

$$\begin{aligned} K_v &= K_p - K_i/2 \\ K_i &= K_p T_s / T_i \\ K_d &= K_p T_d / T_s \end{aligned} \quad (3.3A)$$

전동기의 이득 Km은 비선형이나 최대토크의 슬립이하에서는 슬립이 토크에 비례한다고 볼 수 있으므로 동작점 부근에서 선형화하면 3상 유도전동기의 토크 Tm(s)는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$T_m(s) = -K_m \cdot f(s) \quad (3.4)$$

3상 유도전동기에 연결된 직류발전기에 저항부하 Tr이 가해질 때 전동기의 토크 Tm와 차에 의하여 회전계는 가속 혹은 감속하게 된다. 회전계속의 속도 Ωg(s)는 다음식과 같이 주어진다.

$$T(s) = T_m(s) - T_r(s) \quad (3.5)$$

$$\Omega_g(s) = \frac{K_r e^{-Ls}}{T_r s + 1} T(s) \quad (3.6)$$

여기에서

- Kr : 회전계속의 이득
- Tr : 회전계속의 시정수 (sec)
- L : 회전계속의 지연시간(Dead Time)(sec)

## 4. 실험 및 결과 분석

### 4.1 LC필터의 특성 실험

LC필터에 의한 잡음제거의 효과는 전동기 권선과 IGBT사이에 설치한 LC필터 양단에 전압과 전류의 파형을 측정할 수 있도록 하였고 Lecroy사의 디지털 오실로스코프로 이들을 기록하였다. 실제 전동기를 구동하여 20Hz, 50Hz, 80Hz에서 전류 및 전압의 파형을 관찰하고 필터를 부착하였을 때와 제거하였을 때의 이들을 비교하고 FFT분석을

통하여 LC필터의 잡음제거 효과를 살펴보았다.

(가) LC필터를 사용하지 않았을 때

Fig 4.1~Fig 4.3은 모터측에 필터를 부착하지 않은 상태에서 모터구동시의 전류, 전압파형과 FFT분석 결과를 나타내고 있다. 전압파형은 구형파의 형태가 그대로 나타나고 있으며, 전류파형은 각 샘플링시간(Ts)에서 1차계의 파형이 나타난다. 전류크기는 주파수가 높아짐에 따라 줄어들음을 알 수 있다. 전류파형을 FFT분석해 보면 각 주파수대에서 3차, 7차, 9차의 고조파가 두드러지게 나타남을 알 수 있고 특히 제3고조파 성분이 크게 나타나고 있다.

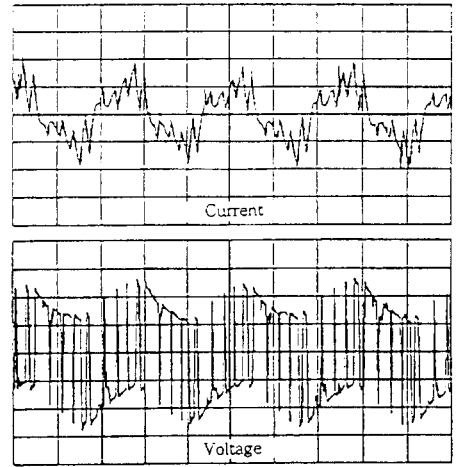


Fig 4.1A Current and voltage waveforms of the induction motor without the LC filter at 20Hz (I : 700mA/div, 20ms/div || V : 45V/div, 20ms/div)

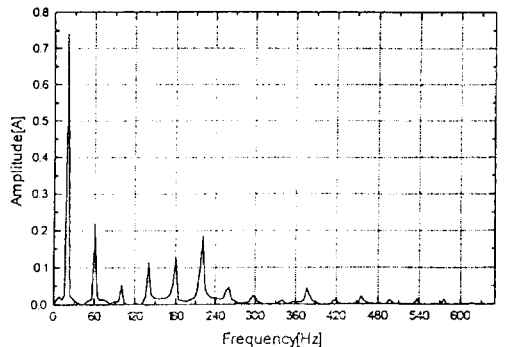
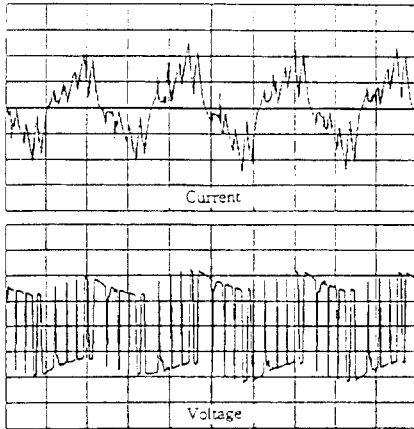
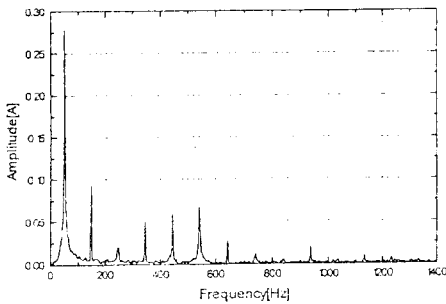


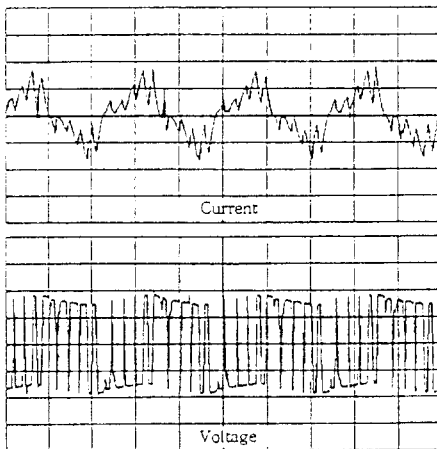
Fig 4.1B FFT Analysis of current wave at 20Hz



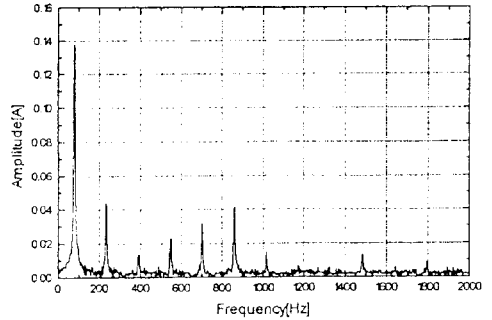
**Fig 4.2A** Current and voltage waveforms of the induction motor without the LC filter at 50Hz (I : 225mA/div, 10ms/div || V : 50V/div, 10ms/div)



**Fig 4.2B** FFT Analysis of current wave at 50Hz



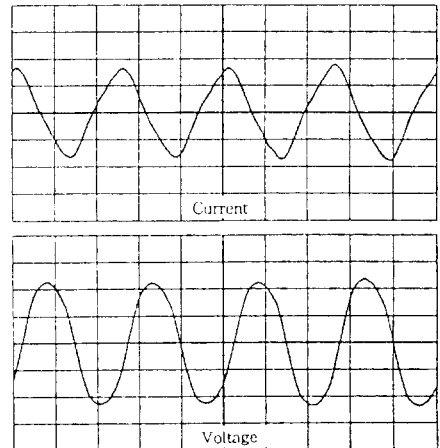
**Fig 4.3A** Current and voltage waveforms of the induction motor without the LC filter at 80Hz (I : 225mA/div, 5ms/div || V : 50V/div, 5ms/div)



**Fig 4.3B** FFT Analysis of current wave at 80 Hz

(나) 3차계의 LC필터를 사용하였을 때

각 주파수에 따른 3차계의 LC필터를 설계하여 실제로 모터를 구동하여 전류, 전압 파형을 관측하고 여기에서 얻은 전류파형을 FFT분석해보았다. 20Hz~80Hz의 주파수 범위에서 인버터의 DC 입력전압은 80[V]이고 각 주파수에서의 파라메타값은 2절의 Table 2.1과 같다. Fig 4.4~Fig 4.6은 Table 2.1의 파라메타값으로 설계된 3차계의 LC필터를 적용하여 모터를 구동하였을 때의 전류 및 전압 파형이고 실험에서 얻은 전류파형을 FFT분석한 결과이다. 20Hz에서는 약간의 삼각파를 나타내는 파형이나 전체적으로는 유사한 정현파의 형태이다. 50Hz에서도 미소한 파형의 왜곡현상을 나타내기는 하지만



**Fig 4.4A** Current and voltage waveforms of the induction motor with the 3rd order LC filter at 20Hz (I : 350mA/div, 20ms/div || V : 20V/div, 20ms/div)



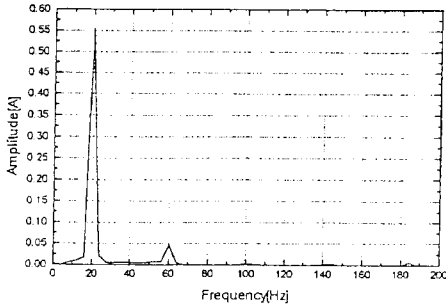


Fig 4.4B FFT Analysis of current wave at 20Hz

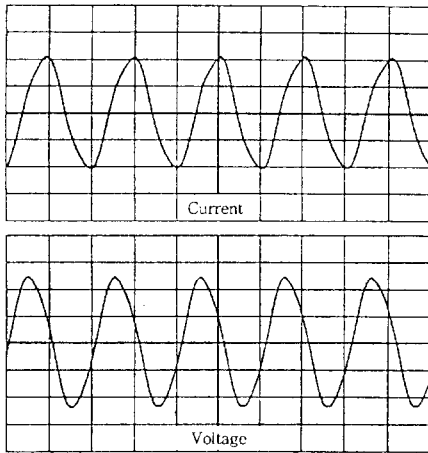


Fig 4.5A Current and voltage waveforms of the induction motor with the 3rd order LC filter at 50Hz  
(I : 250mA/div, 10ms/div || V : 45V/div, 10ms/div)

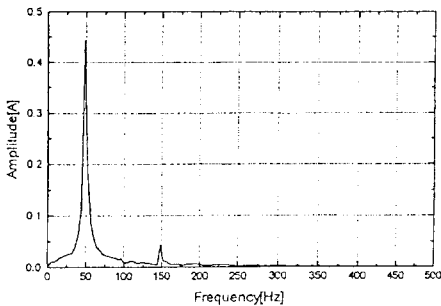


Fig 4.5B FFT Analysis of current wave at 50Hz

정현파의 형태를 취하고 있다. 80Hz에서의 파형은 정현파에 대단히 근접한 결과를 얻을 수 있었고 주파수가 높은 영역에서의 파형특성이 주파

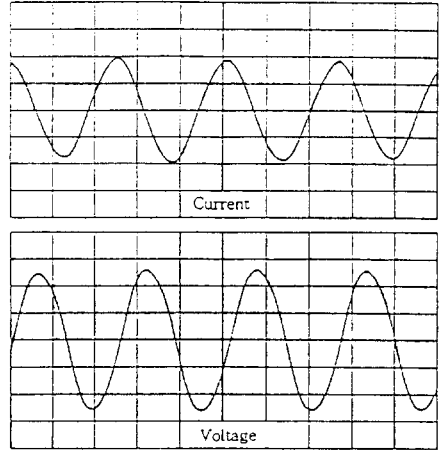


Fig 4.6A Current and voltage waveforms of the induction motor with the 3rd order LC filter at 80Hz  
(I : 200mA/div, 5ms/div || V : 50V/div, 5ms/div)

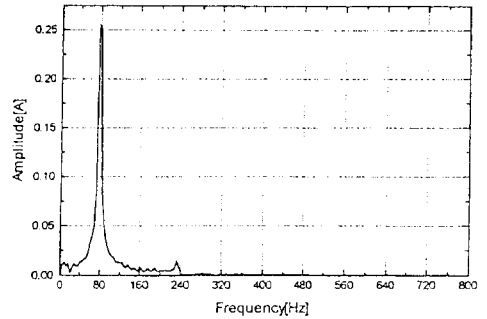


Fig 4.6B FFT Analysis of current wave at 80Hz

수가 낮은 영역에 비해 좋아짐을 알 수 있다.

#### 4.2 전동기의 속도제어

본 연구에서는 식(3.6)의 전동기의 파라미터 Kr, Tr, L의 값을 실험에 의해 추정하고 식(3.2)에서 Kp, Ti, Td의 최적값들은 Ziegler Nichols의 과도응답법으로 구하였다. 지연시간(Dead Time)이 있는 1차계의 전달함수는  $Ke^{-Ls}/(rs+1)$ 로 표현되나 실험에서는 Fig 4.7과 같이 지연시간이 있는 2차계에 가까운 계단응답이 나왔다. Fig 4.7에서  $k=4190\text{rpm}/60=7.8\text{rps}$ , 시정수  $\tau=1.47\text{sec}$ , 지연시간  $L=0.181\text{sec}$ 로 측정되었고 반응을  $R=k/\tau=7.8/1.47=5.3\text{rps/sec}$ 이었다.

위의 값들로부터 PID제어의 최적 계수값들을

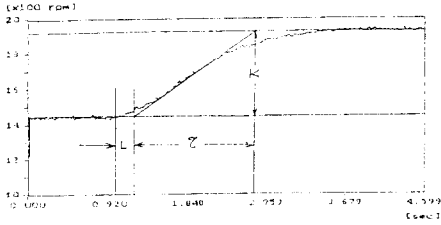


Fig 4.7 Step response of the 3 phase induction motor at no load

Table 4.1 Optimal Parameter

PID	Kp		Ti(sec)		Td(sec)	
P	1/(RL)	1.05	∞		0	
PI	0.9/(RL)	0.94	3.3L	0.594	0	
PID	1.2/(RL)	1.26	2L	0.36	0.5L	0.09

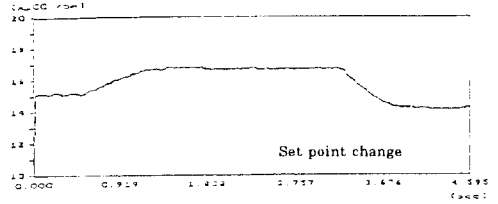


Fig 4.10 Step response of PID control

구하면 아래 표와 같다.

Table 4.1의 최적계수값을 식 (3.3A)에 대입하여 디지털 제어의 Kp, Ki, Kd의 계수값을 정한 후 3상 상유도전동기를 무부하 상태에서 회전수 설정치를 변경하여 실험하였고, 또한 100W 백열전등 부하를 가하거나 제거하여 전동기의 속도가 설정치에 잘 추종하는지를 살펴보았다. Fig 4.8는 P 제어, Fig 4.9은 PI제어, Fig 4.10은 PID제어에서 목표회전수 또는 부하를 갑자기 변경시켰을 때의 속도응답이다. 그림 모두가 오버슈트가 없는 양호한 응답이었으나 P제어의 경우는 정상편차(Offset)가 발생하였으며, 응답속도는 P제어가 가장 느리고 PID제어가 가장 빠름을 알 수 있다. 부하를 급변시켰을 때도 헌팅(Hunting)이 없고 오버슈트도 적은 좋은 응답이었으며 P제어에서는 역시 정상편차가 발생할 뿐만 아니라 가장 느린 반응을 보여주었다. PID제어에서는 오버슈트와 정정시간(Settling Time)이 가장 작고 속응성이 커서 목표치에 잘 추종함을 확인할 수 있었다. 본 실험에서 LC필터와 전브리지 인버터를 이용하여 3상 유도전동기의 각 상에 구형파 전압이 공급되더라도 전류는 여러 영역의 주파에서 사인파에 가까운 파형을 얻을 수 있었고 여러 제어속도에서 60Hz 전원의 정속 유도전동기와 같이 소음이 적었고 정확한 속도제어가 가능하였다.

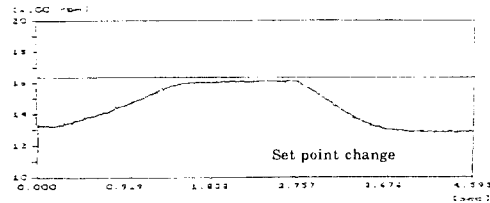


Fig 4.8 Step response of P control

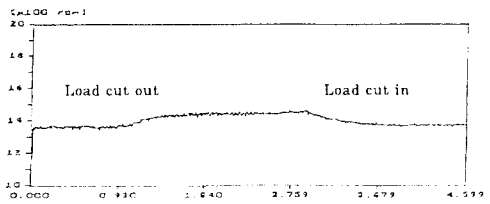
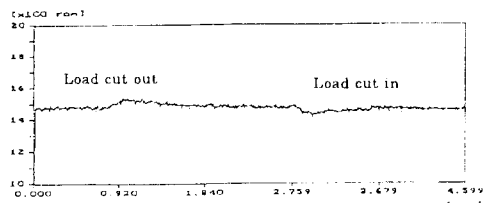
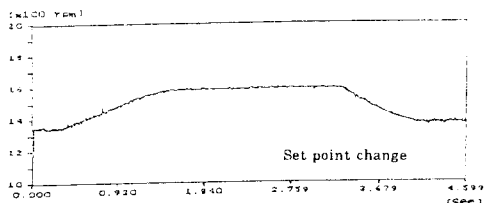


Fig 4.9 Step response of PI control



## 5. 결 론

3상 유도전동기의 각 상을 분리하여 전브리지 인버터로 저역통과 LC필터를 부착하여 전동기를 구동하여 각 상에 흐르는 전류파형을 살펴 보았다. 원칩 마이크로제어기로 PID디지털제어기를 구성하여 속도제어를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원칩 마이크로제어기에 의하여 programed PWM으로 3상 전동기의 각 상을 완전 분리한 후 한 싸이클당 10분주의 적은 분주수에서도 LC필터를 이용하면 여러 영역의 가변주파수에서도 양호한 정현파를 얻을 수 있다.
2. LC필터와 전브리지 인버터를 이용한 3상 유도전동기의 속도를 디지털 PID제어를 하더라도 설정치 변경이나 부하변동에도 설정치에 잘 추종함을 확인 하였다.

5~20Hz의 낮은 주파수에서는 1싸이클당 10분주할 경우에는 상당한 크기의 리플이 내재하므로 향후 완전한 정현파를 얻기 위하여 분주수를 늘이거나 LC필터의 개발이 요구되며, 60Hz이상에서는 1싸이클당 6분주 또는 2분주하여 잡음을 제거하는 LC필터에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 김명호 외 4인, "마이크로프로세서에 의한 직류전동기의 제어기 설계", 대한전기학회, 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
2. 박영진, 윤덕용, 홍순찬, "직류서보 위치제어 시스템을 위한 편차적분 상태궤환 가변구조제어기", 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
3. 안병규, 이해규, 김복수, "PLC를 이용한 항만 하역설비의 MOTOR 속도제어", 대학전기학회 전력전자연구발표회, 1993.5.15
4. Yoon · Ho Kim et al, "PC Based Self Tuning Adaptive Controller", Proceedings ISPE 92, 1992.4
5. 이성백 외 4인, "가변구조 PI제어에 의한 직류전동기의 속도 제어", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 1992.7.23
6. 김윤호, 윤병도, 조성진, "퍼지 알고리즘을 이용한 DC모타 속도제어", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 1992. 7. 23
7. J. Tal, "Design and Analysis of Pulse Width Modulated Amplifiers for DC Servo Systems", IEEE Trans, Ind. Electron. Contr. Instrum., vol. IECI - 23, pp. 47 - 55, Feb. 1976
8. T. J. Maloney and F.L.Alvarado, "A Digital Method for DC Motor Speed Control" IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., vol. IECI - 23, pp. 44 - 47, Feb. 1976
9. J. B. Plant, S. J. Jorna, and Y. T. Chan, "Micropocessor Control of Position or Speed of an SCR DC Motor Drive", IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI - 27 pp. 228 - 234, 1980
10. P. C. Tang, S. S. Lu and Y. C. Wu, "Design and Implementation of a Fully Digital DC Servo System Based on a Single Chip Micro-computer", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE - 29, pp. 295 - 298, Nov. 1982
11. Philippe Mota, "Digital Position Servo System:a State Variable Feedback System", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IA - 20, No. 6, pp.1473 - 1481
12. 장병갑, "마이크로프로세서를 이용한 직류 서보전동기의 위치제어에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1990
13. 박진길, 노영오, "마이크로 프로세서를 이용한 직류전동기의 속도제어에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1986
14. 杉本英彦 編著, "ACサーボシステムの理論と設計の實際", 綜合電子出版社
15. P. C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill
16. Peter Vas, "Vector Control of AC Machines", Clarendon Press, Oxford.
17. Paul C Krause, Oleg Wasynczuk, "Electromechanical Motion Devices", McGraw-Hill.
18. 민경일 외 4인, "부하 인가시 유도전동기의 정속도 제어특성 개선에 관한 연구", 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
19. 양승호 외 3인, "신경회로망을 이용한 유도전동기

- 위치 제어”, 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
20. 김덕현 외 3인, “퍼지-가변구조용 유도전동기 서어보 시스템”, 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
  21. Dong - Choon Lee et al, “ Novel Current Regulation for Field Oriented Controlled Induction Motor Drive”, Proceedings ISPE 92, 1992. 4
  22. R. Schonfeld et al, “Cascade State Control of Robust AC Drives”, Proceedings ISPE 92, 1992. 4
  23. S. Y. Jang, S. J. Lee and S.D.Lee, “Performance Improvements in Stator Flux Oriented Induction Machine Drives”, Proceedings ISPE 92. 1992. 4
  24. Nobuyuki Takemoto et al, “A New Strategy of Space Control in a 3Phase PWM Inverter”, Proceedings ISPE' 92, 1992. 4
  25. Seong -Sik Min et al, “A Neuro - Fuzzy Current Controller for Field Oriented Controlled Induction Machine”, Proceedings ISPE 92, 1992. 4
  26. Kwang -Yeon Kim et al, “Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor using MRAS”, Proceedings ISPE 92, 1992.4
  27. Soon - Chang Hong et al, “Performance Improvement of Position Control System with Sliding Mode”, Proceedings ISPE 92. 1992. 4
  28. 김철우, 박성준, 김원호, “ 2차 자속추정에 의한 유도전동기의 벡터제어”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  29. 이윤종 외 3인, “적용제어를 이용한 속도센서 없는 유도전동기 벡터제어에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  30. 김상훈, 설승기, 박민호, “ 유도전동기의 고성능 구동을 위한 고신뢰성 제어시스템”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  31. 허성광, 류홍욱, 한경희, “ 발전소 대용량 FD Fan 전동기의 교류 가변속 장치 (VVVF)적용에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  32. 김운수 외5인, “전압형 PWM인버터 제어 고속엘리베이터 시스템”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  33. 임상권 외 7인, “산업용 ROBOT와 공작기계를 위한 AC SERVO MOTOR제어기 개발”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  34. 윤병도 외 4인, “엘리베이터의 정밀 위치제어를 위한 유도전동기 구동방법”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  35. 이윤종 외3인, “채터링 저감 슬라이딩 모드 제어기에 의한 유도전동기 위치제어”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  36. 홍순일, “삼상 유도전동기의 고정자전류 벡터 제어를 위한 구동회로 설계에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 논문집, 1986.
  37. Ludger Szklarski 외 2인, “Electronics Drive Systems Dynamics”, Elsevier.
  38. B. K. Bose, “Adjustable Speed AC Drives”, Prentice - Hall
  39. Bimal K. Bose, “Adjustable Speed AC Drive System”, IEEE Press.
  40. Yeon Chang Hahm et al, “A New Frequency Modulation Technique for Audible Noise Reduction in PWM Inverer - Fed induction Motors”, Proceedings ISPE' 92, 1992.4
  41. Joachim Holtz and Jens Onno krah, “ Supression of Time - Varying Resonances in the Power Supply Line of AC Locomotives by Inverter Control”, Proceedings ISPE' 92, 1992. 4
  42. 김영철 외4인, “저잡음 PWM 인버터를 위한 최적 패턴에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  43. 장도현, 최규하, “비대칭형 교류효율의 기본과 전압 제어 및 고조파 전압제거”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  44. 조분구, 진명철, 이광원, “고조파를 억제하는 가변 주파수 정현파 PWM의 실시간 구현”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  45. 서영수 외 3인, “고조파 저감을 위한 직접 주파수 변환기에 대한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23
  46. 심광열 외 5인, “콘덴서분할 부하공진형 고주파인버터 특성해석”, 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
  47. 김호근, 설승기, “고주파 공진에 의한 정전압 전원 공급 회로”, 대한전기학회 전력전자연구발표회, 1993. 5. 15
  48. 배영호 외 4인, “출력주파수체배 공진형 고주파 인버터”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23

49. 최장균 외3인, "영전압 스위칭을 위한 공진형 인버터에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23

50. 정연택 외3인, "영전압 스위칭을 위한 공진형 인버터에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23

51. 정용채, 조규형, "낮은 전압Stress를 갖는 새로운 공진형 인버터", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23

52. 김복권 외4인, "클램프드-모우드 직렬 공진형 인버터에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1992. 7. 23

53. Praveen K. Jain and Shashi B Dewan, "A Performance Comparison of Full and Half Bridge Series Resonant Inverters in High-Frequency High-Power Application", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, No. 2, MAR/APR. 1991

54. 김항배, "직렬 브리지 인버터의 전류특성에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1993

55. Arthur B. Williams, Fred J. Taylor, "Electronic Filter Design Handbook", McGraw-Hill, 1990

56. 노창주, 김영길, "마이크로 프로세서에 의한 3상 Regulator Sampled PWM 인버터의 설계", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1986

57. 김병선, "마이크로 프로세서와 인버터에 의한 동기전동기의 구동에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1988

58. 도덕희, "파워 MOSFET PWM 인버터를 이용한 삼상 유도전동기의 속도제어에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1988

59. 임재문, "마이크로 프로세서를 이용한 하이브리드 PWM인버터에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1993

60. 정삼식, "직렬 브리지형 이버터에 의한 단상 유도전동기의 속도제어에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 논문집, 1993

61. 김한태, 권봉환, "농형 유도전동기의 전 다지탈화된 PWM발생 및 베타제어", 대한전기학회 논문집, vol. 40, NO. 6, pp 567-573, Jun, 1991

62. INTEL, "16-Bit Embedded Controllers", 1991

63. 桐山 清 著, "C言語による マイコン制御演習", 共立出版(株), 1992.

64. 風間悦夫 외 2인 著, "C言語による 8086系 制御用

マイコンの 使い方", 日刊工業新聞社

65. "Proceedings of Korea Japan Joint Seminar On Mechatronics", 1991.6

66. Technical Information of KEI Computer System (Japan). Feb, 1993.

67. 한국박용기관학회 기관관리연구위원회, "선박의 경제적 운항관리", 태화출판사.

68. 전기기기 연구회(제32회 학술심포지엄)의 팸플렛. May, 1993.

69. 박진길, 노영오, 신원길, "저역통과 LC필터를 가진 인버터의 특성과 응용에 관한 연구," 한국박용기관학회, Vol.17-5, 1993, 12

70. 노영오, "전브리지 인버터를 이용한 단상유도전동기의 가변속 구동시스템에 관한 연구," 한국해양대학교 박사학위논문, 1994, 2

### 감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 저 자 소 개



#### 박진길(朴進吉)

1939년 1월 1일생. 1963년 2월 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1975년 2월 동대학원 기관학과 수료(공학석사). 1982년 2월 동대학원 기관학과 수료(공학박사). 1963년 2월~1972년 11월 한국전력공사. 1972년 11월~현재 한국해양대학교 기관시스템공학과 교수. 1978년 8월~1980년 2월 미국 NY주 RPI 연구교수. 1996년 10월~현재 한국박용기관학회장.