

# 誘導電動機의 矩形波電壓에 對한 토크特性에 關한 研究

이 홍 찬<sup>1)</sup>, 노 창 주<sup>2)</sup>

## A Study on the Torque Characteristics of Induction Motor Driven by Square Wave Voltage

Hong-Chan Lee , Chang-Ju Noh

### Abstract

Squirrel cage induction motor has been most widely used in the industry field, by the reason why

- ① Simple and durable structure, low price and high performance.
- ② Low operation and maintenance cost and high efficiency.
- ③ Suitable to severe tough surroundings condition.
- ④ Good compatibility owing to international standard.

By the way, it is necessary to control speed because of requiring the followings.

- ① Reduced operation and maintenance cost, and prolonged life time on mechanical parts thanks to smooth starting.
- ② Increased productivity caused by high speed operation over rating speed.
- ③ Reduced power consumption.
- ④ Better quality of goods owing to optimal speed control.

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 전기제어공학 전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

In case of controlling the speed of induction motor, it need to control voltage, current and frequency supplied according to the characteristics of motor used as load. Control method is classified into open-loop control and closed-loop control which feed back motor speed. Open-loop control is classified into v/f control, and closed-loop control is classified into slip-frequency and vector control.

In this paper, the characteristics of induction motor is studied when v/f constant control is adopted.

## 第 1 章 序 論

直流電動機는 자속 및 토오크 제어가 간단하고 정밀하여 可變速 驅動裝置로써 많이 사용된다. 그러나 정류자와 브러시의 接觸通壓 및 마모부분이 있으므로 정기적인 보수, 점검이 필요하며, 整流子の 정류 한계상 고속화 및 고압화에 문제가 있고, 대응량화에도 한계가 있으며, 설치하는 환경에도 큰 제약이 따른다.<sup>1)~4)</sup>

따라서 이러한 短點 등을 극복하기 위해 直流電動機를 交流電動機로 대체하여 可變速 制御하는 방법의 연구가 오래 전부터 지속되어 왔다.

이러한 방법에 사용되는 농형 유도전동기는 運轉與件의 악화에 따른 補修 輕減, 에너지 절약 및 고효율화의 요구에 부합되며 다음과 같은 잇점때문에 산업체에서 널리 사용되고 있다.

- ① 단순하고 견고한 구조이므로 가격이 저렴하고 신뢰도가 높다.
- ② 효율이 높고, 유지·보수 비용이 적으므로 운전 비용이 저렴하다.
- ③ 가혹한 환경에 적합하다.
- ④ 국제적인 표준 설계로 호환성이 좋다.

그러나 다음과 같은 이유 때문에 可變速 制御를 해야 할 필요성이 있다.<sup>5)</sup>

- ① 소프트 기동에 의한 기계 계통의 수명연장, 유지·보수 비용의 절감.
- ② 정격속도 이상의 고속 운전에 의한 생산성 증가.
- ③ 정격속도 이하의 저속 운전에 의한 전력 절감.

한 최적의 정밀한 속도 운전에 의한 품질 향상.

이러한 필요성에 의한 교류 가변속 구동시스템의 실용화가 급성장하게 되었다. 그 主要因으로써는 새로운 電力用 半導體 素子の 개발과 더불어 전력 변환기의 主回路 기술진보 및 마이크로프로세서 기술에 의한 정밀하고 고속응답을 갖는 제어기술 등의 발전으로 실용화가 더욱 가속화되었다.<sup>1)</sup> 이 중 일반적으로 전력용 반도체 소자로서 가장 널리 이용되어온 다이리스터의 高電壓 大電流化는 대용량 전동기의 가변속 제어를 가능하게 했으며, 특히 Power transistor나 GTO thyristor(gate turn-off thyristor) 등의 自己消弧 능력을 가진 전력용 반도체 소자들의 발전은 전력 변환기의 소형화, 고속화, 고주파화를 촉진하여 전동기 가변속 구동시스템의 성능 향상에 크게 이바지하고 있다.

따라서 유도전동기를 가변속하는 경우, 부하에 사용되는 전동기의 특성에 따라 공급되는 전압, 전류, 주파수 등을 적절하게 제어해야 한다.

이러한 제어방식으로 개루프 제어(open-loop control)와 전동기 속도를 軌環하는 폐루프 제어(closed-loop control)로 나뉘어지며, 개루프 제어는 V/F 제어, 폐루프 제어는 슬립 주파수 제어 및 벡터 제어로 구분된다.<sup>2)</sup>

본 논문에서는 Power transistor를 사용, 矩形波電壓을 발생하는 인버터를 이용한 인가전압과 주파수의 비, 즉 1차 주파수가 변화하면 1차 전압도 주파수에 비례하여 변화되는 제어방식으로, 극히 간단한 제어회로 및 변환회로를 이용하여도 뛰어난 제어특성이 나타나는 V/F일정제어방식을 채택하였다. 또한 제어회로 및 변환회로를 제작하였으며 마이크로프로세서를 이용하여 여러가지 운전조건을 변환시키면서 유도전동기의 速度特性 및 Torque特性에 관하여 연구하였다.

## 第 2 章 理論的 考察

### 2.1 對稱 Y形 回路

전동기는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 相等한 LR 회로가 Y형으로 연결되어 상호인덕턴스 M으로 연결되어 있다고 볼 수 있고, 전원측은 스위치

$S_1, S_2, S_3$  의 순차적으로 질서있게 접속을 바꿔주므로써 각 코일에 걸리는 전압은 Fig. 2와 같다. 이렇게 인가된 구형파전압에 따라 3상의 코일에 흐르는 전류에 의하여 전기적으로  $60^\circ$  (기계적으로는  $\frac{60^\circ}{(P/2)}$ )의 step 角 변위를 가진 회전자계가 생기게 된다.

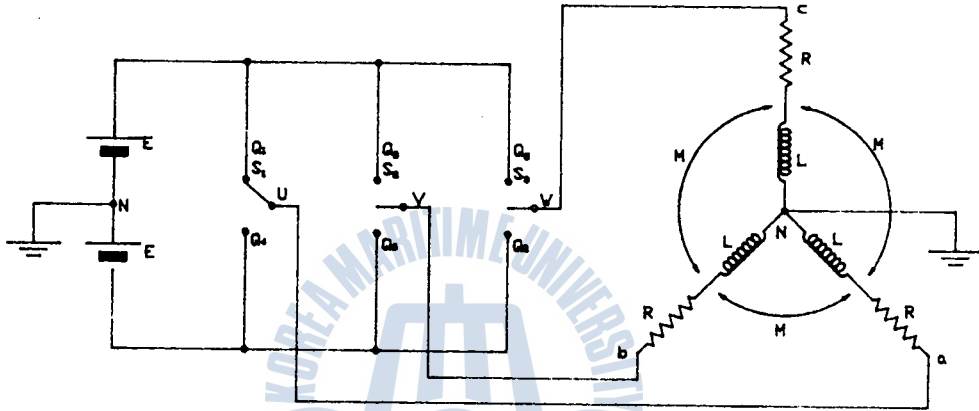


Fig. 1 Symmetric Y type circuit

이 회전자계를 수식적으로 해석하면 다음과 같다. 먼저 A coil에 인가된 전압에 대해서 생각하면 Fig. 2와 같이 週期的으로  $\langle + \rangle, \langle - \rangle$  전압이 인가되므로 이를 Fourier급수로 전개하여 다시 수열합으로 표시하면

$$E_{aN} = \frac{(-1)^{n-1}}{\pi} [ 2\sin(6n-5)\omega t + 4\sin(6n-3)\omega t + 2\sin(6n-1)\omega t ] \quad (1)$$

여기서,  $n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$ 로 된다.

또한 전동기의 회전력은 일반적으로

$$T = 3 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k E_r^2}{4.44nfN_r} \cdot \frac{\frac{R_r}{ns}}{\left(\frac{R_r}{ns}\right)^2 + (2\pi n f L)^2} \quad (2)$$

$$i = 2a-1, \quad a = \text{자인수}$$

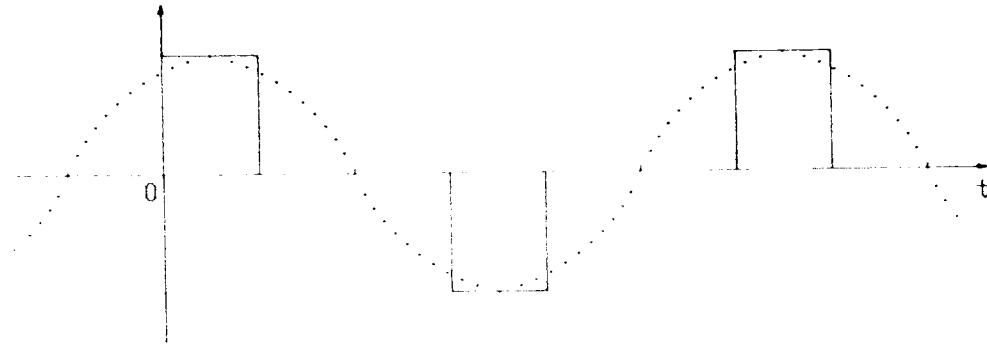


Fig. 2 The waveform of phase voltage

식으로 표시할 수 있고, 기본파를 제외한 홀수배 고조파에 의한 회전력은 고조파의 최대치가 적으므로 무시할 수 있을 뿐만 아니라 같은 방향의 동기속도로 회전하므로 이때 슬립  $S$ 가  $1/n$ 에 가까운 값이 되어 더욱 토크의 영향이 약해지고 있음을 알 수 있다.

### 第 3 章 實驗回路의 構成

본 실험회로의 구성은 Fig. 3과 같이 전동기, 인버터, 정류기부 및 제어부로 구성되어 있고, 본 연구에 사용된 전동기는 1/4 HP(0.2Kw), 4極, 농형 3相 誘導電動機로써, 전동기 운전을 위하여 교류를 정류하였고, 인버터를 거쳐 可變周波數 矩形波電壓을 만들어 내고, 이 전원에 전동기를 연결하고 속도를 측정할 수 있도록 軸端에 타코미터를 설치하였다. 구동부의 신호를 받아 구동되는 인버터회로는 6개의 Power Transistor로 구성하였다.

파워 트랜지스터 베이스 驅動回路 및 保護回路는 CPU에서 나오는 제어 신호를 인버터회로에 보내는 역할을 하는데, 인버터회로의 過渡電壓이나 서지(Surge)전압 등으로부터 인터페이스 회로나 마이크로프로세서를 보호하기 위하여 Photo Coupler(4N28)를 이용하여 接地를 分離하였다.

입·출력 장치로서 인텔사의 i8255, 8비트 CPU로서 Z-80A 및 기타 소자들이 사용되고 있다. 입·출력(I/O) 인터페이스 회로는 마이크로프로세서와 인버터 구동회로의 신호 및 주파수 제어부의 신호를 연결시켜 주는 기능을 맡고 있다. 주파수 제어 프로그램은 A/D 변환기에서 나오는 신호를 받아 정확한 주파수를 출력시키도록 구성하였고, 전동기의 토크는 동력계를 사용하여 측정하였다.

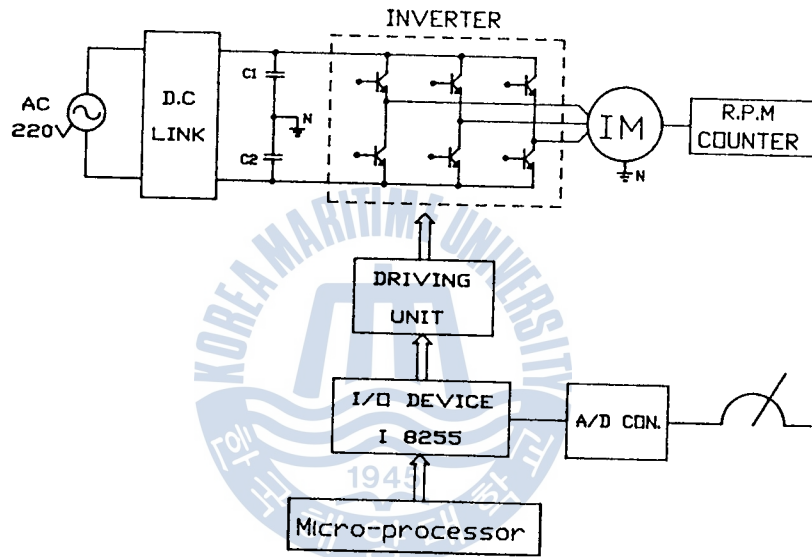


Fig. 3 Block diagram of overall system

### 3.1 인버터 회로

Fig. 4에서 구형파전압 출력형 인버터방식으로 제어할 경우 TR1과 TR4, TR3과 TR6, TR5와 TR2는 각각 입력신호가 반대상태를 갖는다. U상의 경우 TR1에 ON 신호가 가해지고 TR4에 OFF신호가 가해졌을 때에는, U상의 전류방향에 따라 TR1 이 ON되고 TR4는 OFF 되어 電源의 [+] 단자에 연결된다. 반대로 TR1이 OFF, TR4가 ON 신호일 경우, TR4가 ON되어 U상은 [-]電源에 연결된다.

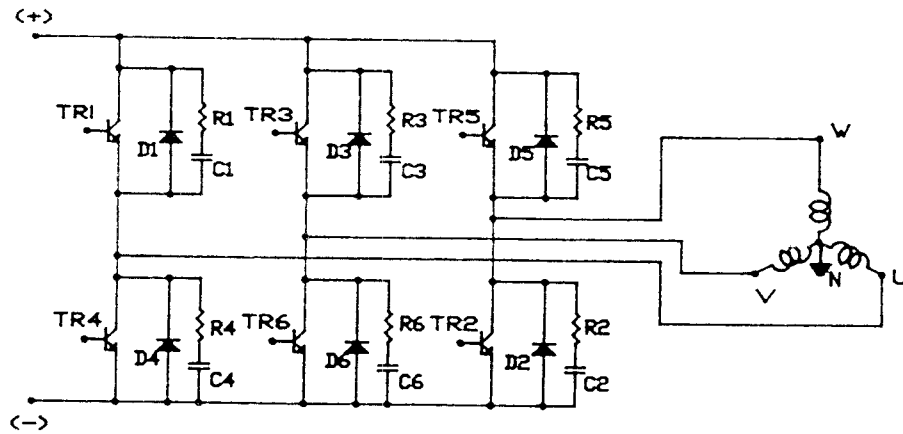


Fig. 4 Inverter circuit

### 3.2 INTERFACE 回路와 周波數制御 PROGRAM

8 bit CPU Z-80A와의 입출력(I/O)용 Device로는 INTEL社의 i8255를 사용하여 A포트를 파워 트랜지스터의 구동신호의 출력포트, B포트는 A/D 컨버터로부터 주파수지령신호, C포트는 B포트 입력값을 Display하도록 하였다.

I/O Device를 선택하기 위해 Address출력  $A_2 \sim A_7$ 을 74LS138의 입력으로 하였으며, 본 회로에서는  $Y_3$ 을 i8255의 CS신호로 지정하였고,  $A_0 \sim A_1$ 은 i8255의 포트지정으로 하였다.

입출력 장치의 i8255 A포트에  $PA_0 \sim PA_5$ 까지 01H의 값이 Rotate되도록 하였으며, B포트로 부터 시간지연값을 받아들여 시간지연 Sub-routine에서 시간지연값으로 이용하였으며, 이 값은 C포트로 Display되도록 하였다. 또한 B포트에서 A/D변환기 256스텝을 이용하여 주파수를 5~100Hz까지 한 스텝당 5Hz 상승하도록 프로그램 하였다.

## 第 4 章 實驗結果 및 考察

본 연구에서 제작한 인버터의 출력을 유도전동기에 공급하여 그에 대한 速度特性, 무부하 및 부하시의 토크 특성을 고찰하고 각 부의 波形을 오

실로스코프로 관찰하였다.

周波數를 변화시켜 속도를 制御하거나 변속할 때는 공극磁束을 거의 일정하게 유지하기 위하여 공급전압의 크기를 周波數에 비례하여 변화시켜야 한다. 공급전압식은

$$E = K \cdot f \cdot \phi_m \quad (3)$$

이고, (3)식에서 매 극의 자속  $\phi_m$  의 값을 일정하게 하려면 공급전압  $E$  을 주파수  $f$ 에 비례하도록 하여야 한다. 실제로 (3)식과 같이 실험한 결과에서도 周波數와 電壓은 비례함을 알 수 있고, 일정한 주파수와 전압의 비 ( $v/f$ )보다 크거나 작을 경우에는 각각 회전수는 증가, 감소하였으며 그 변화량은 2~3 R.P.M 정도로 측정되었다.

교류 60Hz, 220V 전압으로 구동되는 誘導電動機의 주파수와 전압의 비는 약 3.67이고 본 논문에서 제작한 인버터에서는 무부하일 때 최대 속도를 내는 값은 약 1.83이다.

Fig. 5는 주파수를 60Hz로 고정하고, 공급전압만 가변하여 얻은 기동 토크의 그래프이다. 즉, 가변된 전압은 정류회로를 거쳐 60Hz로 세팅된 인버터에 의해 구동된 토크 그래프와 3상 정현파전압을 가변하여 얻은 토크이다.

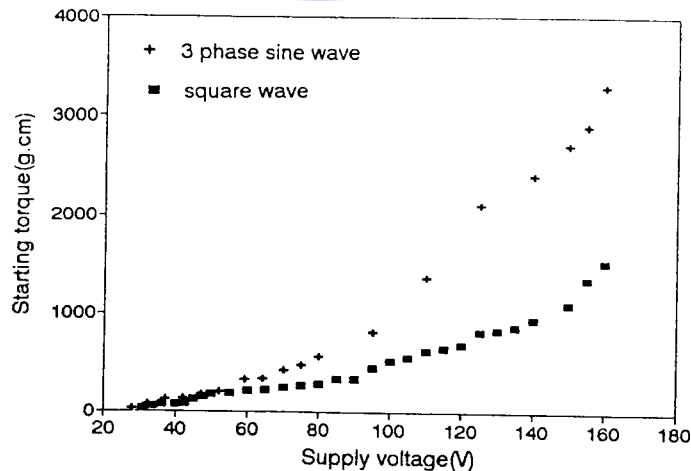


Fig. 5 Characteristics of starting torque



그래프에서 나타난 바와 같이 구형파전압을 3상 정현파전압의 1/6배로 인가했을 때 토오크특성도 1/6배 정도 예상하였으나, 실제 토오크는 1/2배 정도로 토오크특성이 예상치보다 우수함을 나타내고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건으로 공급전압과 전동기 회전수와의 관계를 나타내고 있다. 기동전압이 인버터로 구동될 때 31V이고, 3상 정현파전압으로 구동될 때는 28V로, 기동전압이 약 3V 높게 나타남을 알 수 있으며, 45V 이상에서는 속도특성이 거의 같음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 負荷 및 無負荷상태에서 인버터의 출력전압과 주파수를 가변하여 구동하였을 때 전동기 운전특성을 나타낸 그래프이다. (3)式에서 알 수 있는바와 같이 전압은 주파수와 비례관계가 성립하는 것을 알 수 있었다.

무부하시에는 V/F관계가 선형을 나타내고 있으며, 부하시에는 유도전동기 운전특성 그래프에서와 같이 60Hz이하에서는 定토오크 特性을 나타내고 있으며, 60Hz이상에서는 定出力 特性을 나타내고 있다.

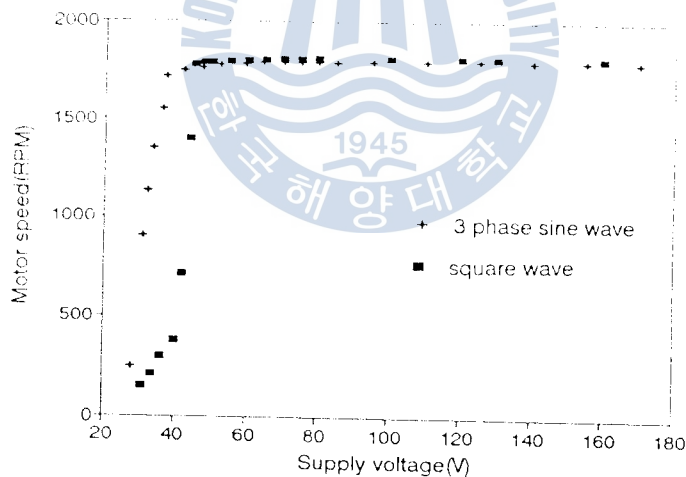


Fig. 6 Characteristics of supply voltage and motor speed under no load at 60Hz

Fig. 8은 전동기가 동기속도로 회전시 인버터의 출력전압 160V, 60Hz로 공급하였을 때 Slip-Torque특성 그래프이며, Slip이 약 2.5%에서 停動토오크(最大토오크)임을 나타내고 있다.

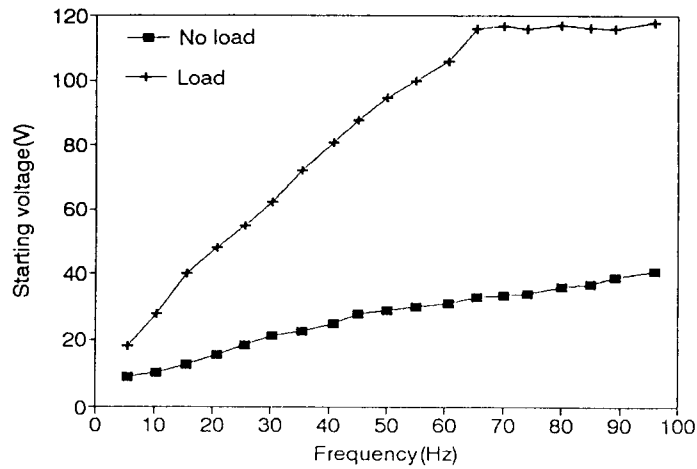


Fig. 7 Characteristics of frequency and starting voltage

Fig. 9는 각 파워 트랜지스터의 베이스 구동신호를 오실로스코프로 잡은 파형으로 6스텝으로 나타내고 있다.

Fig. 10은 3상 유도전동기에서 각 相에 인가되는 相電壓과 相電流의 실측 파형을 나타낸 것이다. 그림 ①에서  $\frac{\pi}{3} \sim \pi$  사이에 나타난 전압파형은 Fig. 2에서 표시된 바와 같이 전동기의 상호인덕턴스 M에 의해 유기된 전압으로 사료된다.

그 이유는  $\frac{\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$  까지 (Fig. 10의 ② 전류파형) 전압은 있고 전류는 흐르지 않으며,  $\frac{2\pi}{3}$  에서  $\pi$ 까지 축적된 전류는 반대방향으로 흐른다. 즉, 코일에 축적된 에너지가 방출되는 것을 알 수 있다.

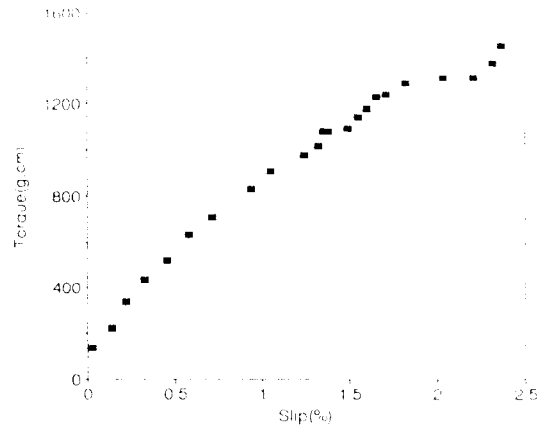


Fig. 8 Slip - torque curve

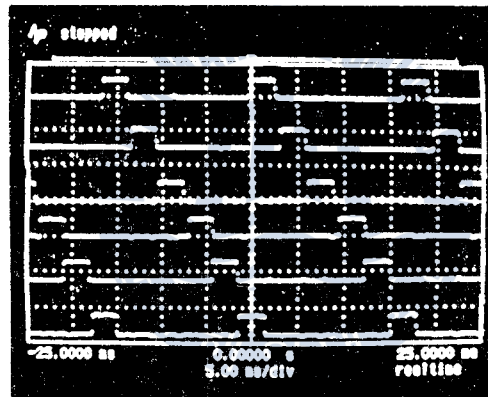
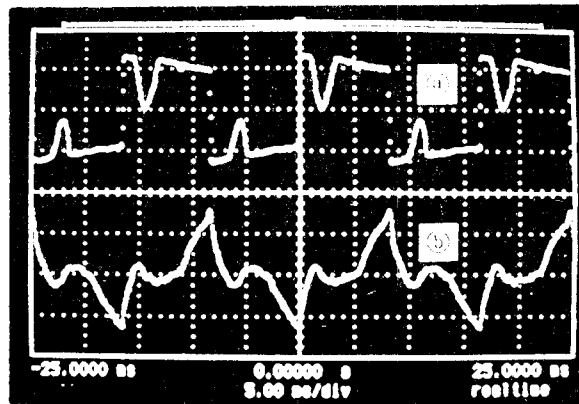


Fig. 9 Waveforms of switching order transistors  
( 2V/div, 5ms/div )



(a) Phase voltage  
( 50V/div, 5ms/div )  
(b) Phase current  
( 200mA/div, 5ms/div )

Fig. 10 Waveforms of phase voltage and phase current

## 第 5 章 結 論

본 논문에서는 정현파에 최적으로 설계 제작된 3상 유도전동기에 구형파 전압으로 구동하여 본 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 극히 간단한 制御回路 및 變換回路를 이용하여 유도전동기의 속도제어 시스템을 製作, 實驗한 결과, 뛰어난 제어특성을 나타냈으며 예상하였던 것보다 구동력이 강했다.

2) 출력전압과 주파수를 可變하여 구동하였을 경우, 無負荷時에는 V/T 관계가 선형으로 나타났으며, 負荷時에는 유도전동기 운전특성과 같이 60Hz이하에서는 定Torque 特性, 60Hz이상에서는 定出力 特性을 나타냄을 확인하였다.

3) Slip-Torque 특성에서 정현파전압으로 구동할 경우 정상슬립은 3~5%이하이며, 구형파전압으로 구동하였을 때 슬립이 약 2.5%에서 停動토크(最大토크) 특성을 나타내었다.

4) 장시간 운전하여 과격한 부하상태에서의 耐久力, Power TR.에는 무리가 없는가, Snubber회로의 最適設計 등이 문제점으로, 본 실험에서 제기된 고조파 발생은 PWM, Filter, Snubber회로 등을 통해 除去할 수 있으리라 생각하며, 더 나아가 유도전동기의 토크 增加, 位置制御를 앞으로의 研究課題로 남아 있다.

## 參 考 文 獻

- 1) W. Leonhard, "Control of ac-machines with the help of microelectronics", IFAC Control in Power Electronics and Electrical Drives, pp. 769~792, 1983.

- 2) R.M. Green, J.T. boys, "Inverter AC-drive efficiency "IEE PROC. Vol. 129, Pt. B, No. 2, pp. 75-81, 3, 1982.
- 3) V.R. Stefanovic, "Present trends in variable speed ac drives", IPEC-Tokyo, pp. 438~449, 1983.
- 4) Mahmoud shaket, "A new digital PWM strategy" IEEE IAS Annual meeting Conf. Record. pp. 213-219, 1987.
- 5) 조규진, "인버터용 유도전동기의 특징", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 제43권, 제8호, pp. 60~63, 1991.
- 6) Giuseppe S. Buja, "Microcomputer Control of PWM Inverters" IEEE Trans. Ind. Electronics, Vol. IE-29, No. 3, pp. 212-216, 1982.
- 7) M. Varnovitsky, "A Microcomputer based control signal generator for a three phase switching power inverter" IEEE IAS Annual meeting pp. 836-840, 1982.
- 8) Duncan. A. Grant, "A new high-quality PWM ac drive" IEEE Trans. Ind. Apply, Vol. IA-19, pp. 211-216, 1983.
- 9) 최호현, "VVVF 인버터 기술과 에너지 절약", 대한전기학회지, 제37권, 제6호, 1988.
- 10) 박민호, "유도기기", 동명사, 1975.
- 11) R. K. Sugandhi, K. K. Sugandhi, "Thyristors-Theory and Applications", 2nd Edition, Wiley Eastern Ltd., 1984.
- 12) B. K. Bose, "Power electronics and ac drives", prentice-hall, 1987.
- 13) 전기전자계, "인버터운전에서 트러블과 대책," 1986. 9.
- 14) 安秉植, "誘導電動機의 V / F 制御에 關한 研究," 명지대학교 대학원 학위 논문, 1986.
- 15) J.M.D. Murphy, Thyristor control of AC motors, pp. 104~122, 1973.
- 16) 안병원, "구형파전압 출력형 인버터에 의한 세이딩 코일 전동기의 특성에 관한 연구" 한국해양대학 대학원 논문집, 1991.
- 17) 편집부 역, "최신 인터페이스 소자 규격표", 집문당, pp. 190~191, 1986.
- 18) 이왕현, "메카트로닉스를 위한 모터제어기술", 성안당, 1992.

