

# LC필터를 이용한 3상유도전동기의 전류파형 개선에 관한 연구

남택근<sup>1)</sup>, 박진길<sup>2)</sup>

## A Study on the improvement for current waveforms of a three-phase induction motor with LC filter

Taek-Kun Nam, Jin-Gil Park

### Abstract

An AC induction motor of constant speed characteristics has been widely used as power source because of simple structure and low maintenance cost in industrial field.

The variable frequency AC source with a conventional inverter which is composed of power semi-conductors and drive systems contains much noises in sine wave current due to high speed switching of direct current.

In this paper, the low pass LC filter for a variable speed induction motor driven by a full bridge inverter is introduced to solve EMI problem originated by much noise current. The modified LC filter based on the 3rd order Butterworth LC filter is used for the computer simulations and real experiments. The characteristics of proposed LC filter are investigated through FFT analysis.

---

1) 한국해양대학교 기관공학과 진기제이전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

## 제 1 장 서 론

최근 AC모터는 그 구조가 간단하고 보수가 용이하며 내구성을 특징으로 산업계에 널리 쓰이고 있다. 각종 전력변환소자(SCR, GTO, TR, 전력용 MOSFET)들의 응용기술의 진보와 마이크로 프로세서의 발달, 주변회로소자의 개발, 디지털제어 기술 및 정보처리 기술의 현저한 진보 등은 기술적, 경제적인 이유로 곤란했던 AC모터의 주파수 및 토크제어를 가능하게 하였고 보다 용이하게 정현파 전류를 얻기 위한 PWM(Pulse Width Modulation)에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

일반적으로 사용되어지는 인버터를 이용한 PWM방식의 전원 변환에는 구형파의 특성으로 인해 출력전원에도 많은 잡음(Noise)이 발생하게 되어 모터의 효율적인 운전에 있어서 문제점으로 등장하게 된다. 이 문제점을 해결하기 위해 LC필터를 도입하여 정현파의 출력전원을 얻을 수 있는지 살펴 보았다.

## 제 2 장 전동기용 저역 통과 LC필터

### 2.1 LC필터 회로의 구성

본 연구에서는 그림2.1과 같이 3차계의 저역통과 LC필터를 구성하여 실험하였다.

### 2.2 LC필터 회로의 해석 및 설계

그림 2.1에서 LC필터가 없는 경우를 본다면, Kirchhoff 제 2 법칙으로부터

$$v(t) = L_m \frac{d}{dt} i_m(t) + R_m i_m(t) \quad (2.2.1)$$

식(2.2.1)을 라플라스 변환하면

$$V(s) = (sL_m + R_m)I_m(s) \quad (2.2.2)$$

식(2.2.2)으로부터  $I_m(s)/V(s)$ 의 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{I_m(s)}{V(s)} = \frac{1.0}{A_{11}S + A_{10}} \quad (2.2.3)$$

여기에서,

$$A_{11} = L_m$$

$$A_{10} = R_m$$

그림 2.1에서 3차계 필터를 사용한 경우에 대해서는  $I_m(s)/V(s)$ 의 관계식이 식(2.2.4)로 주어진다.

$$\frac{I_m(s)}{V(s)} = \frac{1.0}{A_{33}S^3 + A_{32}S^2 + A_{31}S + A_{30}} \quad (2.2.4)$$

여기에서,

$$A_{33} = L_1 C_2 L_m$$

$$A_{32} = L_1 C_2 R_m$$

$$A_{31} = L_1 + L_m$$

$$A_{30} = R_m$$

### 2.3 필터의 시뮬레이션 및 결과 분석

필터를 사용하지 않은 경우에 모터에 흐르는 전류  $I_m(s)$ 와 직류 전원전압  $V(s)$ 의 관계식을 구하면 식(2.3.1)과 같다.

$$I_m(s) = \frac{V_s}{S} \frac{1.0}{(A_{11}S + A_{10})} (e^{-as}) \quad (2.3.1)$$

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

한편, 3차계 필터에 흐르는 전류  $I_m(s)$ 와 직류 전원전압  $V(s)$ 의 관계식을 구하면 식(2.3.2)와 같다.

$$I_m(s) = \frac{V_s}{S} \frac{1.0}{(A_{33}S^3 + A_{32}S^2 + A_{31}S + A_{30})} (e^{-\alpha S}) \quad (2.3.2)$$

식(2.3.1) - 식(2.3.2)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.

### 2.3.1 LC필터를 사용하지 않은 경우

LC필터를 사용하지 않고 모터권선만을 고려한 경우의 모터의 파라메타값은 전동기의 회전자 구속시험(Blocked-rotor test)과 무부하시험(No load test)을 통해 근사적으로 구할 수 있다.

슬립은 5-10 %로 간주한 상태에서 측정결과 근사적인 모터의 파라메타값은 저항  $R_m=85.0[\Omega]$ , 인덕턴스  $L_m=275[mH]$ 이었다.

이 값들을 식(2.2.4)에 대입하여 모터의 권선에 흐르는 전류  $I_m(s)$ 를 구하면 식(2.3.3)과 같다.

$$I_m(s) = \frac{V_s}{S} \frac{3.636}{(S+309.0)} (e^{-\alpha S}) \quad (2.3.3)$$

여기에서 유도전동기의 입력전압 ( $V_s$ )이 1[v]의 단위계단상 전압으로 주어질 경우 식(2.3.3)을 라플라스 역변환하여  $i_m(t)$ 를 구하면 식(2.3.4)과 같다.

$$\begin{aligned}
i_m(t) = & 0.0117[ (1 - e^{-309.09(t-A_1)})u(t-A_1) - (1 - e^{-309.09(t-B_1)})u(t-B_1) + \\
& (1 - e^{-309.09(t-A_2)})u(t-A_2) - (1 - e^{-309.09(t-B_2)})u(t-B_2) + \\
& (1 - e^{-309.09(t-A_3)})u(t-A_3) - (1 - e^{-309.09(t-B_3)})u(t-B_3) + \\
& (1 - e^{-309.09(t-A_4)})u(t-A_4) - (1 - e^{-309.09(t-B_4)})u(t-B_4) + \\
& (1 - e^{-309.09(t-A_5)})u(t-A_5) - (1 - e^{-309.09(t-B_5)})u(t-B_5) - \\
& (1 - e^{-309.09(t-C_1)})u(t-C_1) + (1 - e^{-309.09(t-D_1)})u(t-D_1) - \\
& (1 - e^{-309.09(t-C_2)})u(t-C_2) + (1 - e^{-309.09(t-D_2)})u(t-D_2) - \\
& (1 - e^{-309.09(t-C_3)})u(t-C_3) + (1 - e^{-309.09(t-D_3)})u(t-D_3) - \\
& (1 - e^{-309.09(t-C_4)})u(t-C_4) + (1 - e^{-309.09(t-D_4)})u(t-D_4) - \\
& (1 - e^{-309.09(t-C_5)})u(t-C_5) + (1 - e^{-309.09(t-D_5)})u(t-D_5)] \quad (2.3.4)
\end{aligned}$$

그림 2.2 - 그림 2.4는 LC필터를 사용하지 않은 경우(1차계) 모터전류의 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 전류파형은 매 사이클당 분주수가 10으로 일정하여 각 샘플링시간( $T_s$ )에 1차계의 파형이 나타나며 주파수가 바뀌어도 비슷한 결과를 보여주나 주파수가 올라감에 따라 전류의 크기는 줄어들음을 알 수 있다.

### 2.3.2 3차계 필터를 사용한 경우

필터설계에 있어서 각 계수값은 표준 3차 Butterworth필터를 참고로 하였고 실제모터를 구동시키기 위한 개정필터의 계수값은 각 주파수에서 Try and error 방법으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구하였다.

가) 20Hz-30Hz범위

A. 20Hz상태에서 필터계수  $R_m=85.0[\Omega]$ ,  $L_1=270[mH]$ ,  $C_2=110[\mu F]$ ,  $L_m=$

275[mH]의 파라메타값을 식(2.3.2)에 대입하여  $I_m(s)$ 를 구하면 식(2.3.5)와 같다.

$$I_m(s) = \frac{V_s}{S} \frac{116044.28}{(S^3 + 309.03S^2 + 66827.7S + 1.040722 \times 10^7)} (e^{-\alpha s}) \quad (2.3.5)$$

여기에서 유도전동기의 입력전압 ( $V_s$ )이 1[v]의 단위계단상 전압으로 주어질 경우 식(2.3.5)을 라플라스 역변환하여  $i_m(t)$ 를 구하면 식(2.3.6)과 같다.

$$i_m(t) = [ 0.011 - 0.007e^{-220.47t} - 0.009e^{-44.27t} \cos(212.7t - 1.08) ] u(t) \quad (2.3.6)$$

B. 30Hz상태에서는  $R_m=85.0[\Omega]$ ,  $L_1=120[\text{mH}]$ ,  $C_2=60[\mu\text{F}]$ ,  $L_m=275[\text{mH}]$ 의 파라메타값을, 40Hz-60Hz범위에서는  $R_m=85.0[\Omega]$ ,  $L_1=80[\text{mH}]$ ,  $C_2=40[\mu\text{F}]$ ,  $L_m=275[\text{mH}]$ 의 파라메타값을, 70Hz-80Hz에서는  $R_m=85.0[\Omega]$ ,  $L_1=40[\text{mH}]$ ,  $C_2=20[\mu\text{F}]$ ,  $L_m=275[\text{mH}]$ 의 파라메타값을 식(2.3.2)에 대입하여  $I_m(s)$ 를 구할 수 있다.

그림 2.5 - 그림 2.7은 각 주파수대에 적합한 3차계의 LC필터를 설계하여 시뮬레이션한 전류의 파형이다.

주파수는 20Hz ~ 80Hz범위에서 검토하여 보았고 필터를 사용하지 않은 1차계의 파형에 비하여 현저하게 개선된 전류파형을 얻을 수 있었고 전체적으로 정현파에 가까운 파형임을 알 수 있다. 전류의 크기는 1차계의 결과와 마찬가지로 주파수가 커짐에 따라서 줄어드는 결과를 나타내고 있다.

### 제3장 실험 장치

그림3.1은 전체적인 실험장치를 나타내고 있다.

실험장치는 AC전원의 직류전환부, 인버터, LC필터, IGBT드라이브단, 원칩마이크로 프로세서, PC등으로 이루어져 있다. 그리고 구동대상인 3상유도전동기의 결선은  $\Delta$ (delta) 결선방식이 아니고 각 상을 독립적으로 분리시켜 3상을 구성하고

있다. 각 상을 완전하게 독립시킴으로써  $\Delta$ (delta) 결선시 발생하는 각 상간의 간섭을 방지할 수 있는 장점이 있다.

시스템의 구동은 먼저 통신 프로그램에 의해서 원칩마이크로 프로세서와 PC간의 통신이 이루어지게 되고 PC상에서 원하는 원하는 주파수를 입력하여 20Hz ~ 80 Hz까지 주파수를 가변하면서 모터를 구동할 수 있다.

## 제 4 장 필터를 적용한 3상 유도 전동기의 구동

### 4.1 실험 및 고찰

실험에 있어서는 필터를 사용 하지 않고 인버터의 출력만으로 모터를 구동시켜 모터의 전류, 전압파형을 확인한 후 3차계 LC필터를 적용시켜 모터를 구동하였을 때의 전류, 전압파형을 관측하고 필터링 전.후의 파형을 비교분석하는 한편 FFT 분석을 통하여 LC필터의 노이즈제거효과를 살펴 보았다.

#### 4.1.1 LC필터를 사용하지 않은 경우

그림 4.1 - 그림 4.3은 모터측에 필터를 부착하지 않은 상태에서 모터구동시의 전류, 전압파형을 나타내고 있다.

전압파형은 구형파의 형태가 그대로 나타나고 있으며, 전류파형은 각 샘플링 시간( $T_s$ )에서 1차계의 파형이 나타나는 시뮬레이션과 유사한 결과를 얻을 수 있었고 전류크기는 주파수가 높아짐에 따라 줄어듦을 알 수 있다.

그림 4.1.1 - 그림 4.3.1은 LC 필터를 부착하지 않고 모터를 구동하였을 때의 전류 파형을 FFT분석한 결과이다.

각 주파수대에서 3차, 7차, 9차 고조파가 두드러지게 나타나는 1차계의 결과 라는 것을 알 수 있고 제3고조파 성분이 시뮬레이션 결과에 비해 크게 나타나고 있다.

#### 4.1.2 3차계의 필터를 사용한 경우

본절에서는 각 주파수에 따른 3차계의 LC필터를 설계하여 실제로 모터를 구동하여 전류, 전압 파형을 관측하고 여기에서 얻은 전류파형을 FFT분석해 보았다.

20Hz ~ 80Hz의 주파수 범위에서 인버터의 DC입력전압은 80[V]이고 각 주파수에서의 파라메타값은 다음과 같다.

가) 20Hz :  $L_1=270\text{mH}, C_2=110\mu\text{F}$

나) 50Hz :  $L_1= 80\text{mH}, C_2= 40\mu\text{F}$

다) 80Hz :  $L_1= 40\text{mH}, C_2= 26\mu\text{F}$

그림4.5 - 그림4.7은 위의 가), 나), 다)의 파라메타값으로 설계된 3차계의 LC 필터를 적용하여 모터를 구동하였을 때의 전류, 전압 파형이고 그림4.5.1 - 4.7.1은 실험에서 얻은 전류파형을 FFT분석한 결과이다.

20Hz에서는 약간의 삼각파를 나타내는 파형이나 전체적으로는 유사한 정현파의 형태이다. 50Hz 에서도 미소한 파형의 왜곡현상을 나타내기는 하지만 정현파의 형태를 취하고 있다. 80Hz에서의 파형은 정현파에 대단히 근접한 결과를 얻을 수 있었고 주파수가 높은 영역에서의 파형특성이 주파수가 낮은 영역에 비해 좋아짐을 알 수 있었다.

위의 실험에서의 전류파형에 대한 FFT분석결과를 살펴보면 제 3고조파가 미약하게 나타나고 있으나 전반적으로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.



## 제5장 결론

전브리지 인버터로 저역통과 LC필터가 부착된 AC전동기를 구동시켰을 때 전동기에 흐르는 전류파형을 살펴보았다. 시뮬레이션 결과와 실제적으로 전동기를 구동하면서 얻은 실험결과를 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 전동기의 결선에 있어서 각 상을 독립적으로 분리시켜 실제 구동하였으며 장래 실제적인 속도 혹은 위치제어시 용이한 방법으로 제어가능함을 확인 하였다.
2. 시뮬레이션과 실제 실험에서 1사이클당 10분주의 적은 분주수로도 LC필터를 이용하여 양호한 정현파를 얻을 수 있었다.

정규화된 필터계수값을 기준으로 주파수대에 적합한 필터를 설계하여 모터에 응용함으로써 양호한 전류파형을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 20Hz~80Hz의 주파수영역에서 실험을 행하였지만 같은 실험방법으로 20Hz아래 범위에서는 L,C계수값과 분주수를 높이고 80Hz이상의 영역에서는 L,C계수값과 분주수를 줄여 실험을 행할 경우 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각한다.

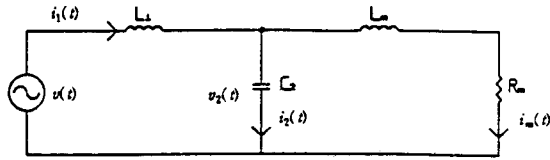


Fig.2.1 Circuit Configuration of the Low Pass LC filter

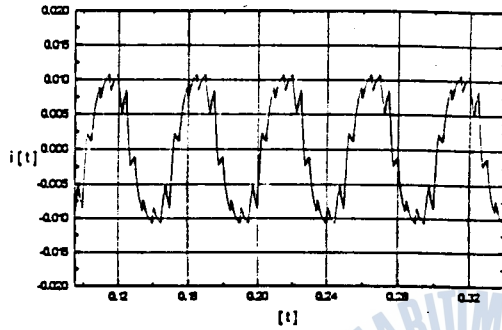


Fig.2.2 Current Waveform of the Induction motor without LC Filter at 20Hz

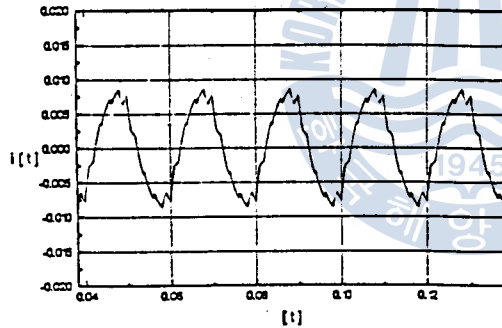


Fig.2.3 Current Waveform of the Induction motor without LC Filter at 50Hz

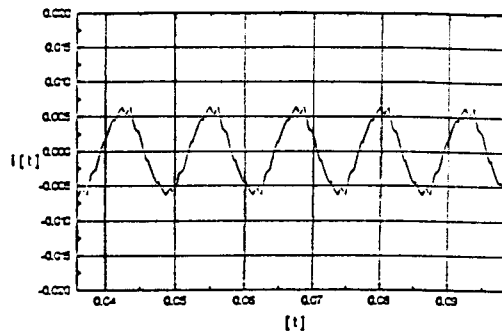


Fig.2.4 Current Waveform of the Induction motor without LC Filter at 80Hz

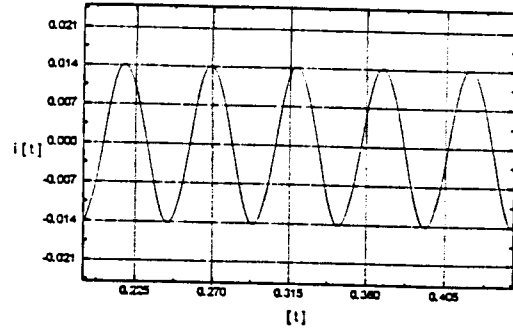


Fig.2.5 Current Waveform of the Induction motor with revised 3rd order LC Filter at 20Hz

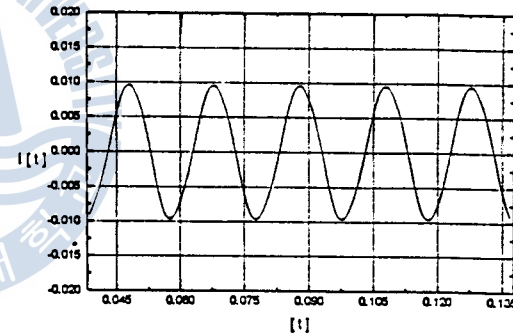


Fig.2.6 Current Waveform of the Induction motor with revised 3rd order LC Filter at 50Hz

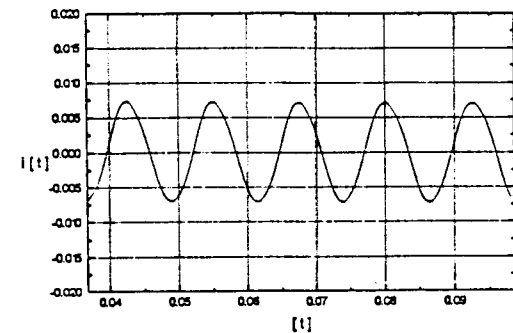


Fig.2.7 Current Waveform of the Induction motor with revised 3rd order LC Filter at 80Hz

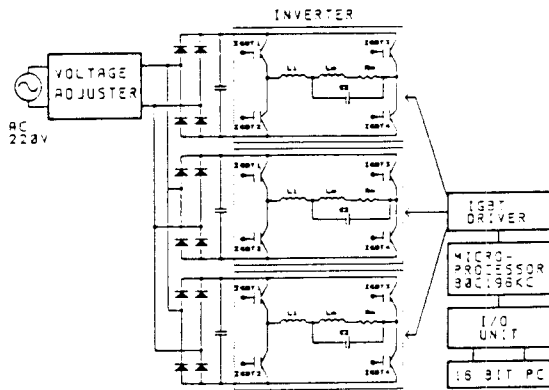


Fig.3.1 Schematic diagram of Experimental Equipments

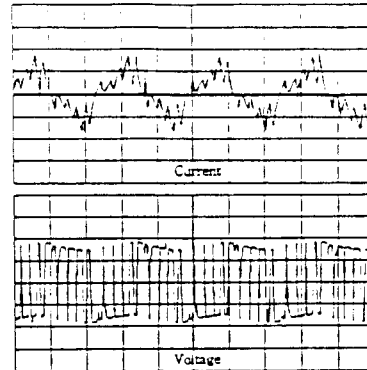


Fig.4.3 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 80Hz  
(I: 225mA/DIV, 5ms/DIV || V: 50V/DIV, 5ms/DIV)

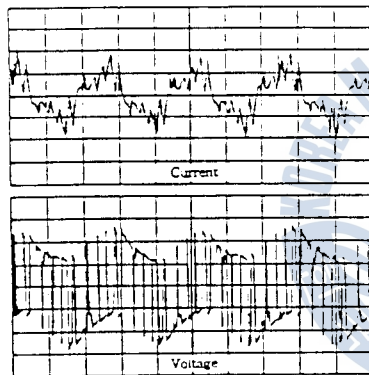


Fig.4.1 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 20Hz  
(I: 700mA/DIV, 20ms/DIV || V: 45V/DIV, 20ms/DIV)

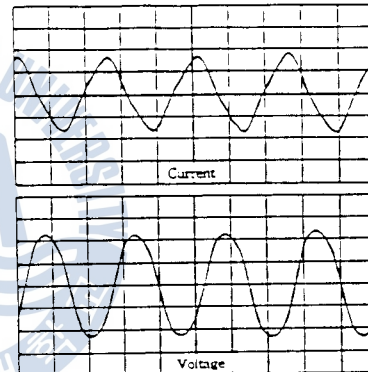


Fig.4.4 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 20Hz  
(I: 350mA/DIV, 20ms/DIV || V: 20V/DIV, 20ms/DIV)

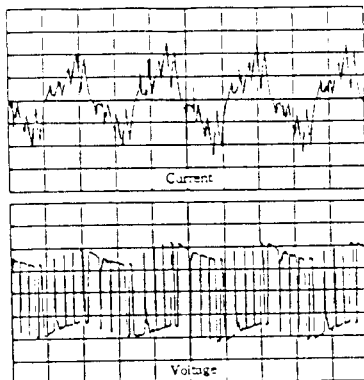


Fig.4.2 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 50Hz  
(I: 225mA/DIV, 10ms/DIV || V: 50V/DIV, 10ms/DIV)

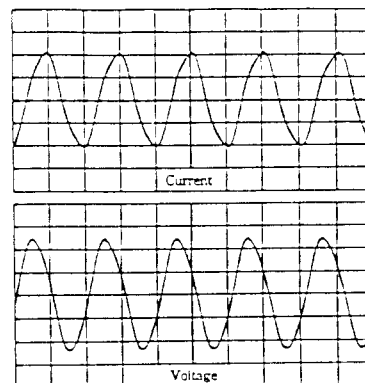


Fig.4.5 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 50Hz  
(I: 250mA/DIV, 10ms/DIV || V: 45V/DIV, 10ms/DIV)

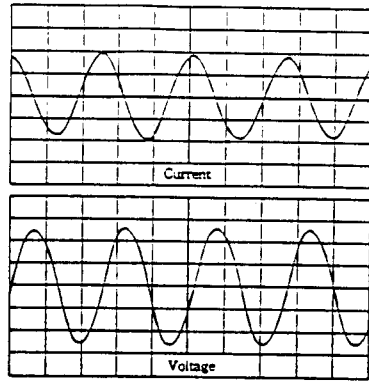


Fig.4.6 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 80Hz  
 (I: 200mA/DIV, 5ms/DIV || V: 50V/DIV, 5ms/DIV)

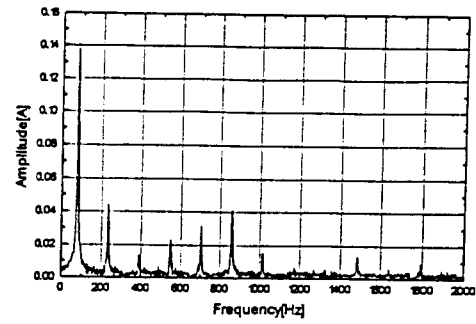
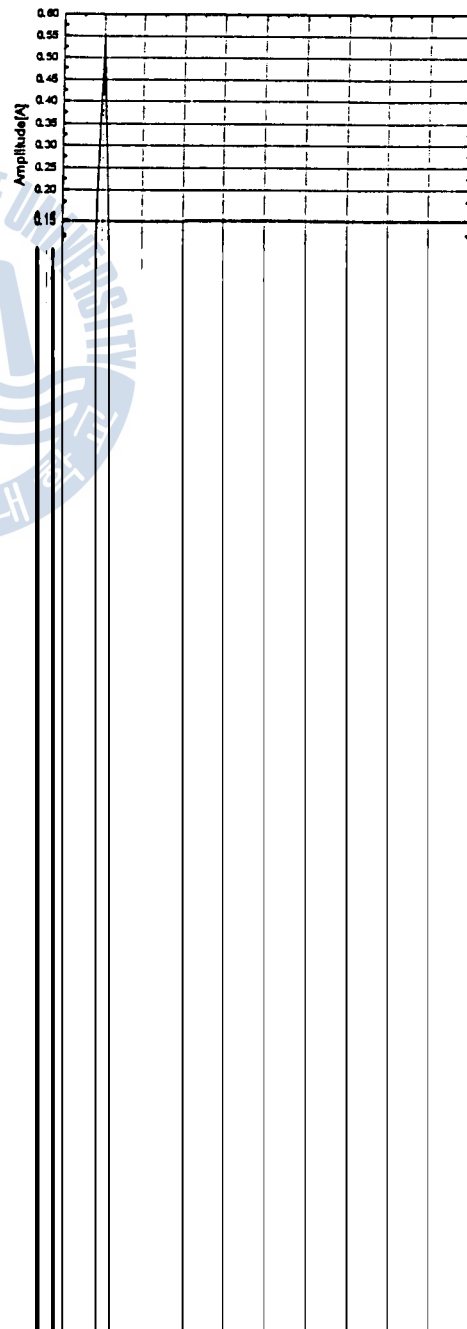


Fig.4.3.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.3



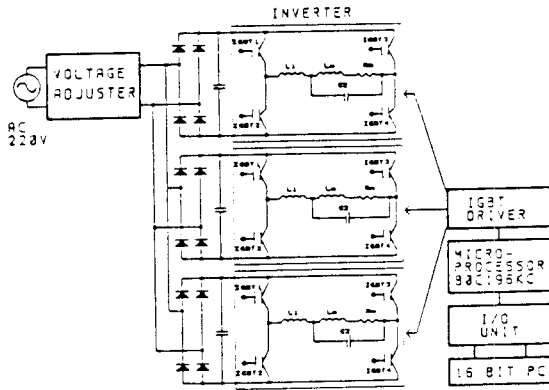


Fig.3.1 Schematic diagram of Experimental Equipments

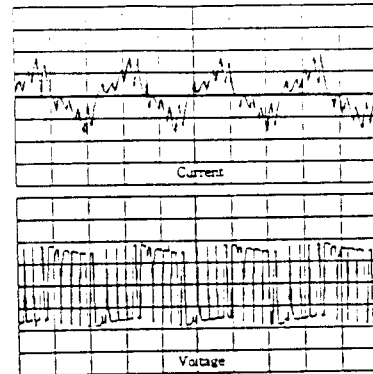


Fig.4.3 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 80Hz

(I: 225mA/DIV, 5ms/DIV || V: 50V/DIV, 5ms/DIV)

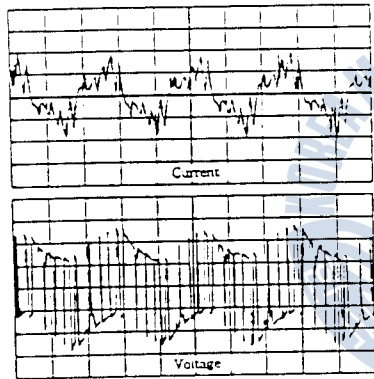


Fig.4.1 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 20Hz

(I: 700mA/DIV, 20ms/DIV || V: 45V/DIV, 20ms/DIV)

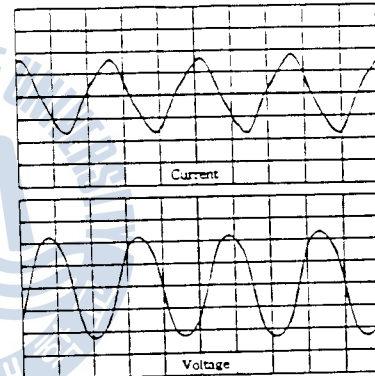


Fig.4.4 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 20Hz

(I: 350mA/DIV, 20ms/DIV || V: 20V/DIV, 20ms/DIV)

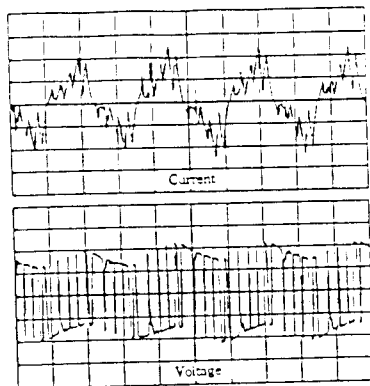


Fig.4.2 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor without LC Filter at 50Hz

(I: 225mA/DIV, 10ms/DIV || V: 50V/DIV, 10ms/DIV)

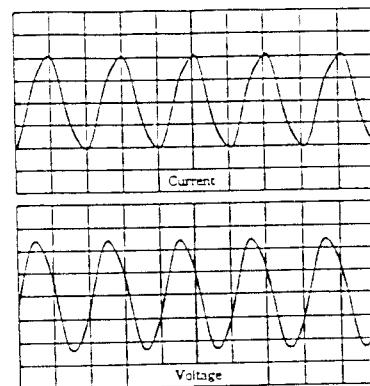


Fig.4.5 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 50Hz

(I: 250mA/DIV, 10ms/DIV || V: 45V/DIV, 10ms/DIV)

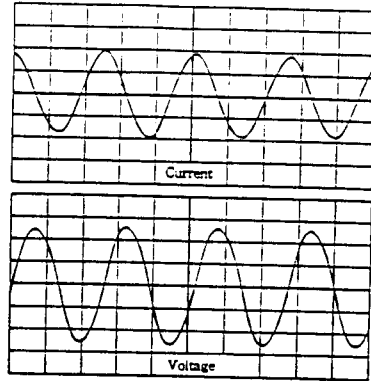


Fig.4.6 Current and Voltage Waveforms of the Induction motor with 3rd order LC Filter at 80Hz  
(I: 200mA/DIV, 5ms/DIV || V: 50V/DIV, 5ms/DIV)

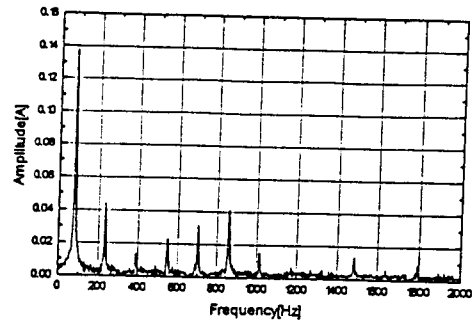


Fig.4.3.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.3

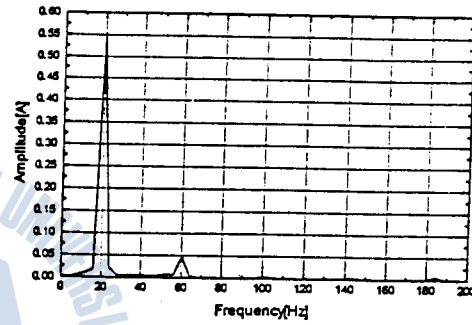


Fig.4.4.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.4

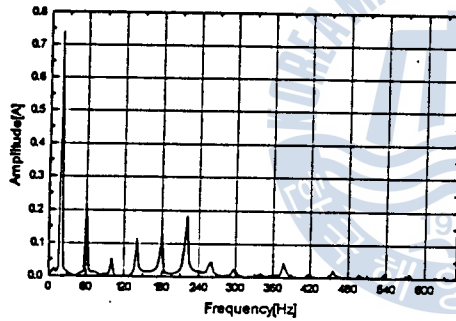


Fig.4.1.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.1

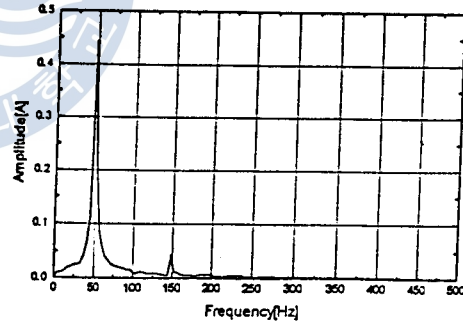


Fig.4.5.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.5

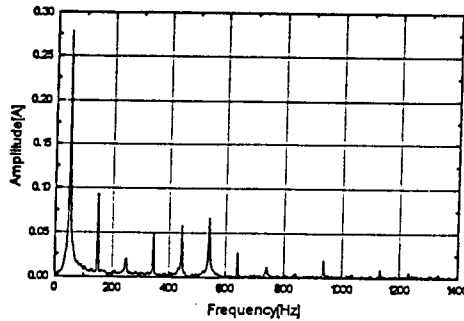


Fig.4.2.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.2

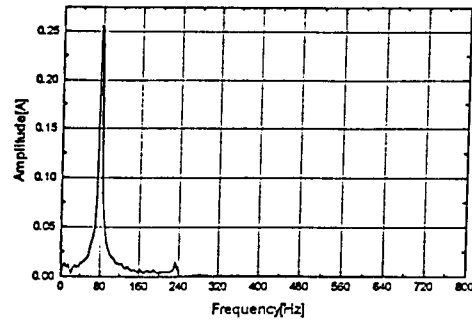


Fig.4.6.1 FFT Analysis of current wave in Fig.4.6

## 참 고 문 헌

1. 정순배,김대근,이우선,“I80C196KC 구조”, 도서출판 인텔기술,1994.
2. INTEL,“ Embedded Applications ”, 1993/1994  
제어 ”,전력전자 연구회 학술연구 발표회, pp41-50,1990
3. 노영오,“전브리지 인버터를 이용한 단상유도전동기의 가변속 구동 시스템에  
관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 논문집, 1994.
4. 홍순덕,차재덕,조규복,“시평균화방법을 이용한 PWM 신호발생에 관한  
연구”, 대한 전기학회 하계학술대회 논문집, 1992.
5. Peter Vas, “Vector Control of AC Machines”,  
CLARENDON PRESS OXFORD.
6. Vincent Del Tore, “ BASIC ELECTRIC MACHINES”,1990, Prentice-Hall
7. B.K.Bose, “Power Electronics and AC Drives”, Prentice-Hall, 1987
8. Arthur B.Williams, Fred J.Taylor, “Electronic Filter Design  
Hand-book”, McGraw-Hill, 1990.

