

유니버설모터 속도제어기의 고조파전류 특성에 관한 연구

林 洪 雨, 朴 秀 剛, 白 亨 來

A Study on the Harmonic Current Characteristics of Universal Motor with Speed Controller

Hong-Woo Lim, Soo-Kang Park, Hyung-Lae Baek

요 약

유니버설모터는 소형의 직류 직권전동기와 같은 기계적 구조를 가지며 교류·직류 전원을 양용할 수 있는 장점으로 동급의 일반전동기에 비해 높은 속도로 구동이 가능하므로 핸드드릴이나 진공청소기, 세탁기 등의 가정용 기기 등에 일반적으로 사용된다.

위상각제어기를 이용하여 모터로 입력되는 전압을 제어하는 방법은 간단한 구조 때문에 위상지연으로 인해 입력 역률 및 저차 고조파 전류특성이 좋지 않음에도 불구하고 널리 사용되고 있다.

브리지 정류기를 사용하여 교류 전원을 맥동하는 직류 전원으로 변환한 후 DC 초퍼로써 유니버설모터에 입력되는 평균전압을 제어하는 방법은 제어기의 효율을 높일 수 있고 저차 고조파전류를 감소시킬 뿐만 아니라 저전력값에 대해서도 부하역률의 저하를 막을 수 있다.

본 논문에서는 기존의 제어기의 방법으로 저가의 위상각 제어기를 구성하고 또한 저가의 마이크로 컨트롤러를 이용한 DC 초퍼시스템을 각각 구성하여 저차 고조파전류 특성을 비교 분석하였다.

ABSTRACT

A universal motor is a small dc series machine motor that is designed to operate from an ac machine. The characteristics of universal motors are high no-load and high starting torque. Because of the high operating speed, the size of these motors for a given hp rating is typically smaller than other fractional hp ac machine, making it ideal for hand-held tools and appliances where weight, compactness, and speed are importance factors.

A phase-angle control with AC drive system gains a high popularity due to their simple implementation, but contains the disadvantage of their poor input power factor, subharmonic current.

Pulse width modulation controll with DC drive systems increase the power factor as without delay phase angle.

This paper analyzed the subharmonic characteristics of the phase angle control system that is controlled by zero voltage crossing similar to traditional method, and the dc chopper system that is used PWM.

Key Words : Universal motor, Phase-angle control, Harmonic current, Power factor, DC chopper

1. 서 론

최근 들어 반도체 소자의 기술발달에 따른 전력전자 기술은 가정용, 업무용에서 부터 산업용에 이르기까지 널리 이용됨에 따라 에너지 절감 및 기기의 조작성 향상에 기여하고 있다.

그러나 이러한 시스템들은 고조파전류로 인하여 전력계통 전압이 왜곡되며, 이에 접속된 고압기나 저압기기의 장애가 현저해지고 있다.

고조파 장애의 발생상황을 고찰할 때 고조파전류로 인해 발생하는 큰 피해는 전력용 콘덴서, 브레이커 등의 동작장애 뿐만 아니라 심지어는 변압기의 과피 등을 유발시키기도 하는데 기기의 개선과 같은 방법들은 긴 시간이 소요되므로 최신 전력전자 디바이스 기술을 활용해서 고조파 발생량이 적은 전력변환기의 개발 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전력변환장치로 제어되는 유니버설모터는 소형의 직류 직권전동기와 같은 기계적 구조를 가지며 교류·직류 전원을 양용할 수 있는 장점이 있다. SRM 등과 같은 고속구동이 가능한 특수모터의 사용이 점차 넓어지고 있으나 현재 홈 어플리케이션에 많이 사용되고 있는 유니버설모터는 동급의 일반전동기에 비해 10,000 [rpm] 이상의 높은 속도로 구동이 가능하므로 핸드드릴이나 진공청소기, 세탁기 등의 가정용 기기 등 사용범위가 넓고 저가로 속도제어기 구성이 용이하다.^[1~3]

유니버설모터의 속도를 제어하는 경우 현재 TRIAC의 게이트 트리거 신호에 의한 교류 위상각 제어방법으로 모터에 입력되는 평균전력을 가변하고 있으나 위상각 제어방법은 제어가 연결된 계통선으로 고조파전류의 유입이 많고 조절장치 유무에 상관없이 방해전파가 유입할 수 있으며, 고조파전류의 유입으로 인해 전력의 품질을 저하시켜 각종사고 및 전력계통에서의 장애요인이 되고 있다.

브리지 정류기를 사용하여 교류 전원을 맥동하는 직류 전원으로 변환한 후 DC 초퍼로서 유니버설모터에 입력전압을 제어하는 방법으로 모터자체의 리액턴스가 필터 역할을 하므로 제어기의 효율을 높일 수 있고 저차 고조파전류를 감소시킬 뿐만 아니라 저 전력값에 대해서도 부하역률의 저하를 막을 수 있다. 또한 액티브 필터등과 같은 고가의 제어기를 이용하여 고조파를 줄이는 방법이 있으나 유니버설모터를 제어하는데 있어서는 효율성이 떨어진다.^[4]

본 논문에서는 기존의 제어기의 방법과 같은 저가의 위상각 IC를 이용하여 제어기를 구성하고 또한 저가의

원칩 마이크로 컨트롤러로 DC 초퍼시스템을 각각 구성하여 고조파특성을 비교 분석한 자료를 근거로 유니버설모터의 입력전력 제어시 위상각 제어보다 DC 초퍼를 이용한 시스템에서 저차 고조파전류가 감소함을 실험을 통해 입증하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 유니버설모터

유니버설모터의 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 계자회로는 전기자회로와 직렬로 연결된 직류 직권전동기와 같은 기계적 구조를 가진다.

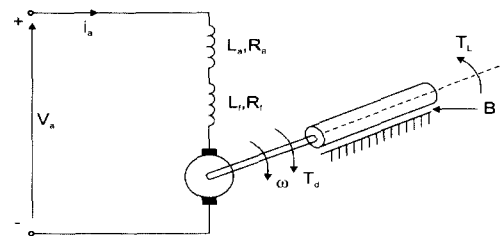


그림 1 유니버설모터의 등가회로
Fig. 1 Equivalence circuit of universal motor

유니버설모터의 정상상태에서의 전기자전압, 입력전압, 토크는 다음과 같다.

$$E_g = K_v \omega \Phi_a \tag{1}$$

$$V_a = R_a I_a + E_g \tag{2}$$

$$= R_a I_a + K_v \omega \Phi_a \tag{3}$$

$$T_d = K_t I_a \Phi_a \tag{4}$$

$$= B_w + T_L \tag{5}$$

- 여기서 ω = 전동기 속도 [rad/s]
 B_w = 점성마찰상수 [N · m/rad/s]
 K_v = 전압상수 [V/A-rad/s]
 $K_t = K_v$ = 토크상수
 L_a = 전기자회로인덕턴스 [H]
 L_f = 계자회로인덕턴스 [H]
 R_a = 전기자회로저항 [Ω]
 R_f = 계자회로저항 [Ω]
 T_L = 부하토크 [N · m]

모터의 속도는 식 (2)로 부터 구할 수 있다.

$$\omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K_v \Phi_a} \quad (6)$$

속도는 전기자전압 V_a 와 전기자 전류 I_a 를 제어하여 변화시킬 수 있다.

그림 2는 유니버설모터의 특성곡선을 나타낸 것이다.

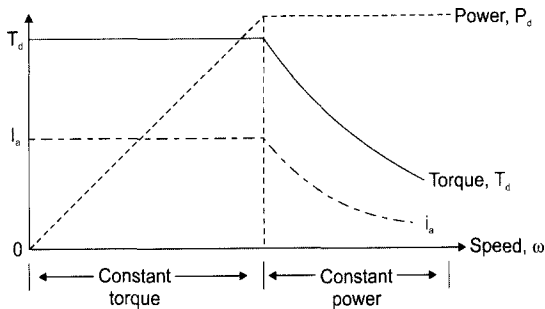


그림 2 유니버설모터의 특성곡선
Fig. 2 The characteristics graph of universal motor

2.2 교류 위상각제어

위상각제어는 zero crossing 함으로서 교류 정현파의 턴-온되는 시간을 간단하게 제어할 수 있으나 전압과 전류의 위상차로 인한 역률이 현저하게 저하되고 전동기의 가청소음과 고조파성분을 많이 포함하며 모터에서 발생하는 열화가 심해진다는 문제점 있다.^[5,6]

유니버설모터의 인덕턴스 때문에 스위칭소자의 전류는 입력전압이 부(-)로 되기 시작하는 $\omega t = \pi$ 에서 0으로 떨어지지 못한다. 소자에 흐르는 전류 i_1 이 $\omega t = \beta$ 점에서 0으로 떨어질 때까지 도통을 계속한다. 소자의 도통각은 $\delta = \beta - \alpha$ 이며 이것은 지연각 α 와 부하의 역률각 θ 에 의존한다.

$v_s = \sqrt{2}v_s \sin \omega t$ 가 순시입력전압이고 지연각이 α 일 때 전류는 식 (7)과 같다.

$$L_a \frac{d i_1}{d t} + R_a i_1 = \sqrt{2} V_s \sin \omega t \quad (7)$$

식 (7)의 해는 식 (8)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} \sin(\omega t - \theta) + A_1 e^{(R_a/L_a)(\alpha/\omega)} \quad (8)$$

여기서, 부하임피던스 $Z = [R_a^2 + (\omega L_a)^2]^{1/2}$ 이고, 부하의 역률각 $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ 이다.

상수 A_1 은 $\omega t = \alpha$ 에서 $i_1 = 0$ 의 초기조건으로부터 식 (9)를 구할 수 있다.

$$A_1 = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{(R_a/L_a)(\alpha/\omega)} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하여 산출하면 소자전류는 식 (10)과 같다.

$$i_1 = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} [\sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(R_a/L_a)(\alpha/\omega - \theta)}] \quad (10)$$

전류 i_1 이 0으로 떨어지고 스위칭소자가 턴-오프되는 시각의 각 β 는 식 (10)에서 $i_1(\omega t = \beta) = 0$ 의 조건으로 알 수 있으며 다음의 관계 식 (11)과 같이 주어진다.

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{(R_a/L_a)(\alpha - \beta)/\omega} \quad (11)$$

실효출력전압은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} V_o &= \left[\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} 2 V_s^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[\frac{4 V_s^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= V_s \left[\frac{1}{\pi} \left(\beta - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12) \end{aligned}$$

따라서, α 를 0에서 π 까지 위상각을 가변시킴으로써 V_o 는 V_s 로부터 0까지 제어될 수 있다.

2.3 DC 초퍼제어

DC 초퍼의 경우 브리지 정류기를 사용하여 교류 전력을 맥동하는 직류 전원으로 변환한 후 PWM 제어 기법으로 전동기를 제어함으로써 고조파를 최소화시킬 뿐만 아니라 시스템 입력전압과 전류의 위상지연이 없어 역률이 좋아진다.^[7,8]

그림 3은 DC 초퍼구동 등가회로를 나타낸다. 초퍼가 턴-온될 때 전기자전류는 전동기 단자의 단락 회로 때문에 증가하게 된다. 초퍼가 턴-오프 될 때 다

이오드 D_m 이 턴-온되고 전기자회로 인덕턴스에 축적된 에너지는 전원에 환원된다.

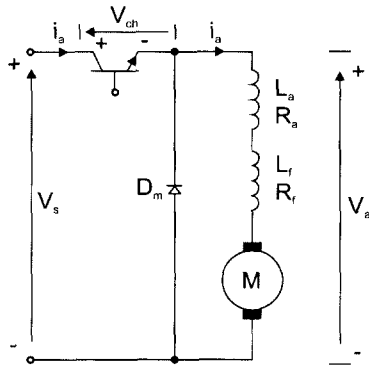


그림 3 DC 초퍼의 등가회로
Fig. 3 The equivalence circuit of DC chopper

모터의 평균 전기자 전압은 식 (13)과 같다.

$$V_a = kV_s \tag{13}$$

여기서, k 는 초퍼의 시비율을 의미한다.

모터로의 공급전력은 식 (14)이다.

$$P_o = V_a I_a = kV_s I_a \tag{14}$$

여기서, I_a 는 전동기의 평균 전기자전류이다.

무손실 초퍼를 가정하면 입력은 $P_i = P_o = kV_s I_a$ 가 된다.

입력전류의 평균치는 식 (15)로 정의된다.

$$I_s = k I_a \tag{15}$$

초퍼구동의 등가입력저항은 식 (16)으로 정의된다.

$$R_{eq} = \frac{V_s}{I_s} = \frac{V_s}{I_a} \frac{1}{k} \tag{16}$$

시비율 k 를 가변함으로써 전동기로의 전력흐름(전동기속도)을 제어할 수 있다. 유한한 전기자회로 인덕턴스에 대해서 다음과 같이 최대 피크 대 최대 리플전류인 식 (17)을 구할 수 있다.

$$\Delta I_{max} = \frac{V_s}{R_a} \tanh \frac{R_a}{4fL_a} \tag{17}$$

여기서, R_a 과 L_a 은 전기자 회로저항과 인덕턴스이다.

일반적으로 인덕터 전류가 t_1 의 시간 동안에 I_1 에서 I_2 로 선형적으로 증가한다면

$$V_s - V_a = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \tag{18}$$

가 되며 초과출력전압이 된다.

여기서, $t_1 = \frac{\Delta I L}{V_s - V_a}$ 이다.

3. 시뮬레이션

3.1 위상각 제어방식

Matlab simulink를 이용하여 위상각제어시스템으로 유니버설모터의 속도를 제어하기 위한 모델링을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 유니버설모터의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 유니버설모터의 파라미터

Table 1 Parameters of universal motor

Rated Power	1.2 [kW]	Rated Frequency	60 [Hz]
Rated Voltage	220 [V]	Armature Resistance	11.6 [Ω]
Rated Speed	12,000[RPM]	Field Resistance	36 [Ω]
Armature Inductance	6 [mH]	Rotor Inertia	0.015 [Kg m^2]
Field Inductance	6.26 [mH]	Rated current	6 [A]

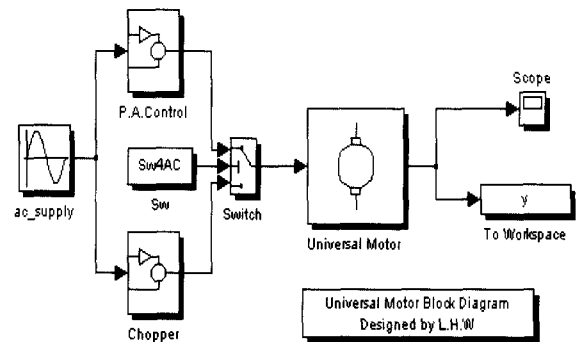


그림 4 유니버설모터의 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of universal motor control system

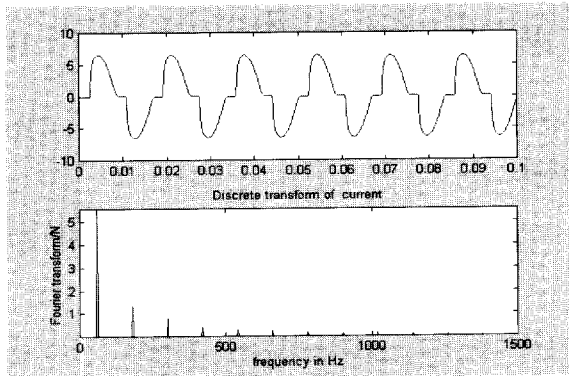


그림 5 위상각 제어시스템의 입력전류와 FFT
Fig. 5 Input current and FFT of phase angle control system

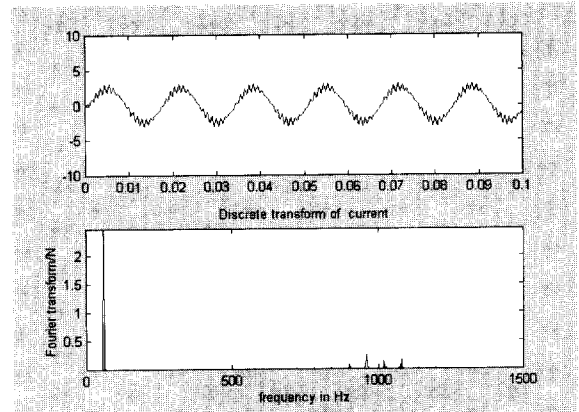


그림 7 DC 초퍼시스템의 입력전류와 FFT
Fig. 7 Input current and FFT of DC chopper

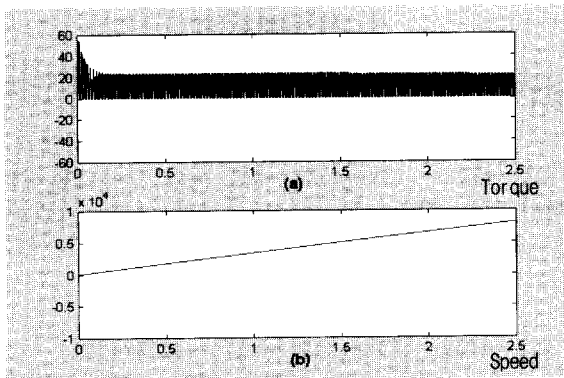


그림 6 기동시의 토크와 스피드 특성
Fig. 6 Torque and speed characteristics at starting mode

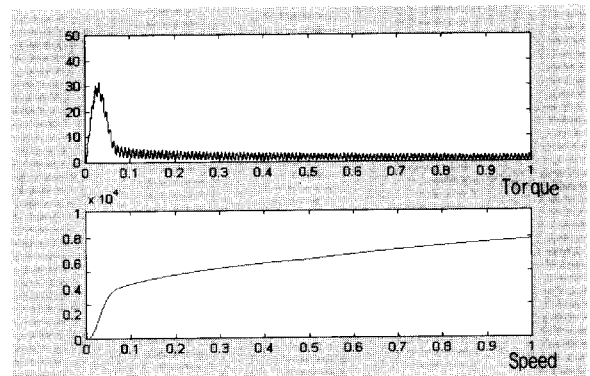


그림 8 기동시의 토크와 스피드 특성
Fig. 8 Torque and speed characteristics at starting mode

그림 4는 위상각제어시스템과 DC 초퍼시스템으로 제어되는 유니버설모터의 전체 제어블록도를 나타낸 것이다. 셀렉트 스위치의 위치에 따라 위상각 제어모드와 DC 초퍼제어모드로 모터를 제어하게 된다.

그림 5는 위상각제어방식을 이용한 유니버설모터의 속도제어시 입력전류에 대한 시뮬레이션 파형 및 입력전류에 대한 FFT 분석을 나타낸 것이다.

그림 6은 기동시 토크와 속도곡선을 나타낸다.

3.2 DC 초퍼 제어방식

그림 7은 DC초퍼 제어방식 유니버설모터의 속도제어시 시뮬레이션으로 입력전류 및 입력전류에 대한 FFT 분석을 나타낸 것이다.

그림 8은 DC 초퍼시스템으로 제어했을 때의 토크와 속도곡선을 나타낸 것이다.

4. 실험

4.1 교류 위상각제어에 의한 구동

그림 9는 교류 위상각제어시스템의 속도제어기이다. TCA785로 위상각을 가변하여 유니버설모터에 입력되는 전압을 제어할 때 모터 입력전압, 전류, 게이트 트리거 신호 그리고 입력되는 동기신호를 측정하였다.

그림 10은 위상각 α 가 90° 일 때 게이트 트리거 신호와 동기신호를 나타낸 것이고, 그림 11은 위상각 α 가 90° 일 때 전동기 입력전압 및 전류를 나타낸 것이다.

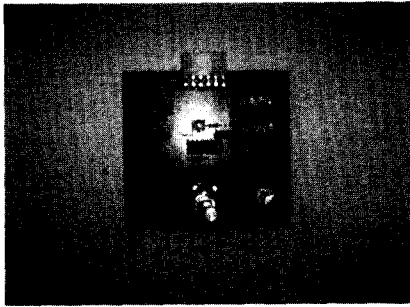


그림 9 교류 위상각제어시스템의 속도제어기
Fig. 9 Speed controller of phase angle control system

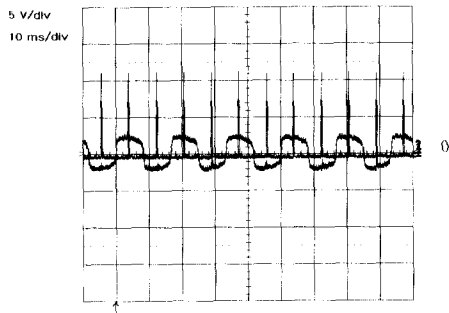


그림 10 위상각 90도에서의 게이트 신호
Fig. 10 Gate trigger signal at phase 90°

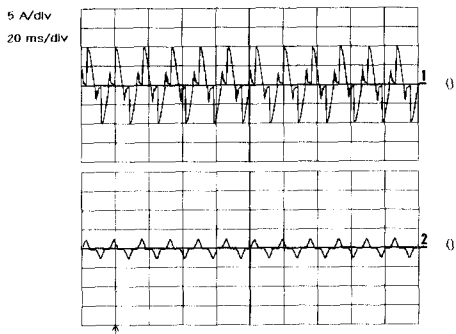


그림 11 위상각 90도에서 입력전압과 전류파형
Fig. 11 Input voltage and current waveforms at phase 90°

그림 12, 13은 위상각 제어시스템의 입력전류를 고조파 스펙트럼분석기로 실측한 전류파형과 고조파 스펙트럼 분포를 나타낸 것이다. 입력전류가 낮을 수록 위상각이 커짐을 볼 수 있고 따라서 스펙트럼 분포도 저차 고조파전류의 함유율이 증가함을 알 수 있다.

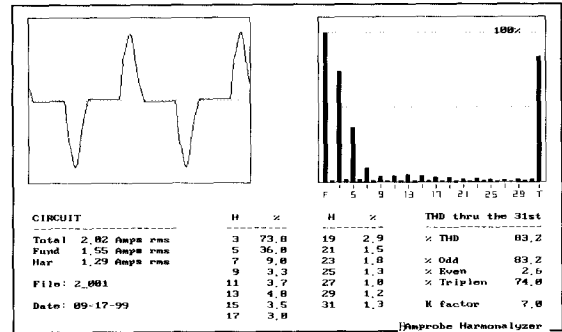


그림 12 위상각제어방식의 입력전류 2.02[A]에서
입력전류와 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 12 Input current and harmonic spectrum analysis using phase angle control (current 2.02 [A])

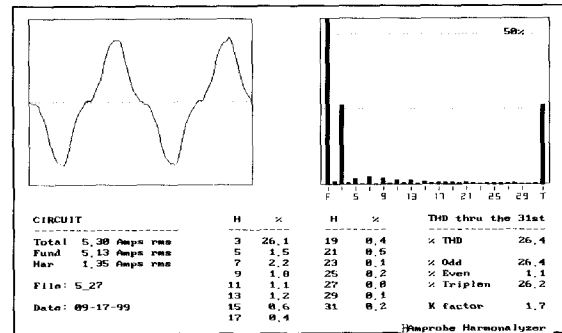


그림 13 위상각제어방식의 입력전류 5.30[A]에서
입력전류와 고조파스펙트럼 분석
Fig. 13 Input current and harmonic spectrum analysis using phase angle control system (current 5.30[A])

4.2 DC 초퍼제어에 의한 구동

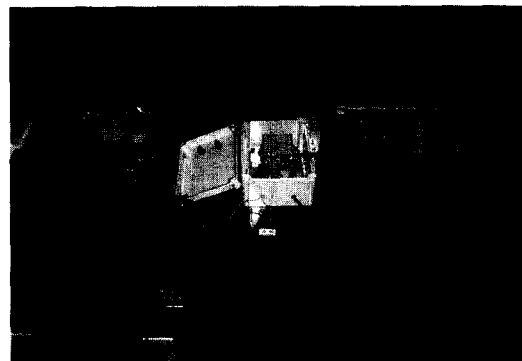


그림 14 DC 초퍼시스템의 속도제어기
Fig. 14 Speed controller of DC chopper system

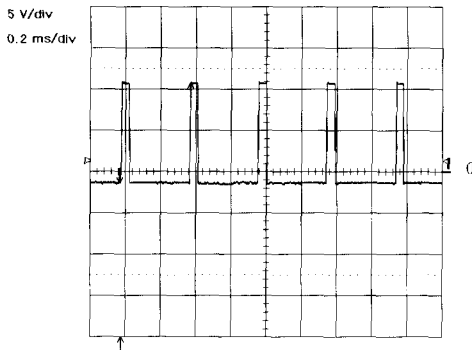


그림 15 듀티 0.2에서 DC 초퍼의 PWM 신호
Fig. 15 PWM signal of DC chopper at duty 0.2

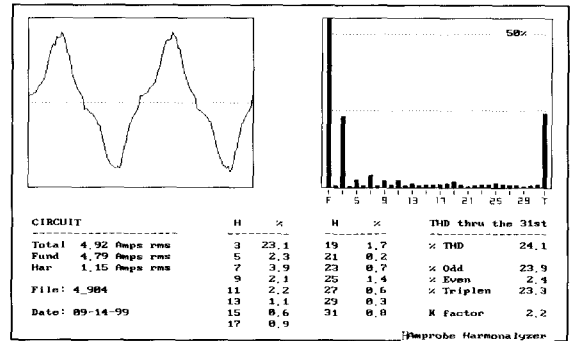


그림 18 DC 초퍼시스템의 입력전류 4.92[A]에서 입력전류와 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 18 Input current and harmonic spectrum analysis using DC chopper(current 4.92[A])

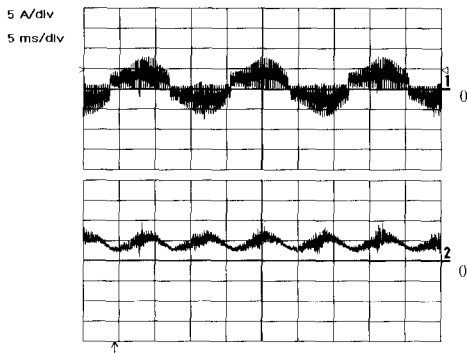


그림 16 DC 초퍼시스템의 듀티 0.2에서 입력전류와 출력전류
Fig. 16 Input and output currents of DC chopper at duty 0.2

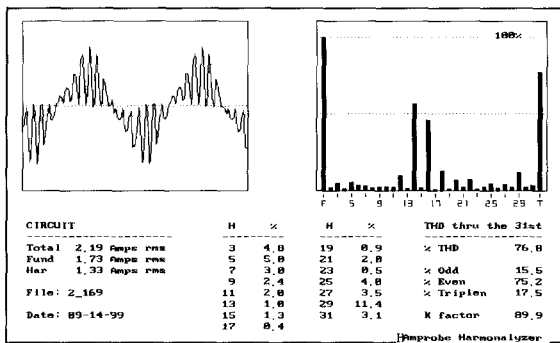


그림 17 DC 초퍼시스템의 입력전류 2.19[A]에서 입력전류와 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 17 Input current and harmonic spectrum analysis using DC chopper (current 2.19[A])

그림 14는 DC 초퍼시스템의 속도제어기를 나타낸 것이다.

그림 15는 MOSFET의 게이트에 입력되는 PWM 신호로써 듀티비가 0.2일때의 파형을 나타낸 것이다.

이때 DC 초퍼의 입력전류 및 유니버설모터의 초퍼 출력전류는 그림 16과 같다.

입력전류의 위상지연이 생기지 않아 역률이 높고 FWD의 영향으로 입력전력에 대한 출력 효율이 증가됨을 알 수 있다.

그림 17, 그림 18은 DC 초퍼시스템의 입력전류에 대한 파형과 고조파 스펙트럼 분포이다.

4.3 실험결과 및 고찰

위상각 제어시스템에서 유니버설모터의 입력전압을 제어할 때 입력전류의 증가를 10단계로 나누어 각각의 기본과 전류에 대한 고조파전류 함유율을 차수별 고조파 전류값의 데이터를 분석하였다. 입력전류가 4.12 [A], 4.6 [A]에서 3고조파전류가 각각 2.12 [A], 2.16 [A]로 최대 고조파전류 한도값 가까이 까지 함유되어 있음을 알 수 있다.

또한 DC 초퍼시스템에서 유니버설모터의 입력전압을 제어할 때 교류 위상제어시스템과의 비교를 위하여 9단계로 나누어 같은 방법으로 측정하여 입력전류 증가에 따른 차수별 고조파 전류값에 데이터를 분석하였으며 3차 고조파 전류가 최대 1.22 [A]를 넘지 않음을 알 수 있고 특히 교류 위상제어의 입력전류값과 근접한 DC 초퍼 입력전류 4.07 [A], 4.65 [A]에서 3고조파 전류는 각각 0.62 [A], 0.79 [A]로 현저히 감소함을 보인다.

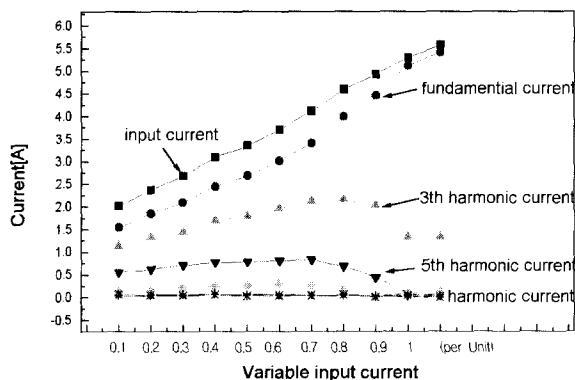


그림 19 위상각 제어기의 입력전류 변화에 따른 고조파전류
 Fig. 19 Harmonic currents to the variation of input current at AC phase angle control

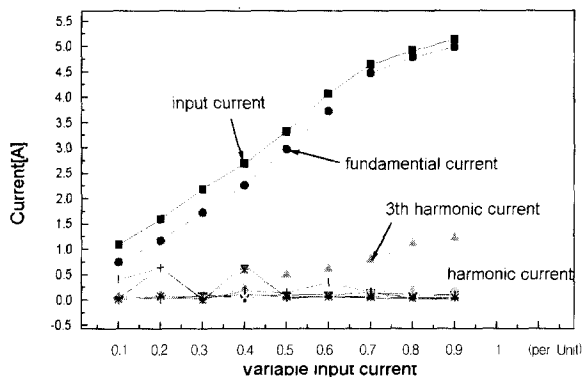


그림 20 DC 초퍼시스템의 입력전류 변화에 따른 고조파 전류
 Fig. 20 Harmonic currents to the variation of input current at DC chopper system

그림 19는 위상각제어를 이용한 고조파전류의 분포를 나타낸 그래프이다. 입력전류의 9단계 전 까지 3고조파전류가 입력전류의 증가에 비례적으로 증가하여 최대 2.16[A]까지 나타남을 알 수 있다.

그림 20은 DC 초퍼를 이용한 유니버설모터의 입력전류 변화에 따른 차수별 고조파 분포를 나타낸 것으로 입력전류가 증가하여도 3고조파 전류는 최대 1.22[A]를 넘지 않음을 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 저가형으로 제작한 위상각 제어시스템과 DC 초퍼제어시스템으로 유니버설모터의 구동시

시스템의 입력전류에서 발생하는 고조파 전류를 비교 분석하였다.

영전압 스위칭 IC를 이용한 교류 위상각제어시스템과 원칩마이크로 컨트롤러를 이용한 DC 초퍼제어시스템의 시뮬레이션을 수행하였으며 제작된 각 제어시스템의 입력전류에 대한 고조파 특성을 실험을 통하여 DC 초퍼제어시스템이 고조파전류가 적게 발생됨을 입증하였다.

특히 고조파전류가 감소한 DC 초퍼시스템에서 위상 지연이 생기지 않아 역률이 좋아졌으며 제어기의 비용을 최소가 되게 제작함으로써 고조파전류가 적게 발생하는 직류구동 유니버설모터 제어기의 가능성을 입증하였다.

이 논문은 1999년도 조선대학교 학술지원비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] T. C. Chen, C. T. Pan, "Modeling and Design of an AC to DC Converter", IEEE Trans. on PE, 1993, pp. 501~508.
- [2] Ren H. Wang, Richard T. Walter, "Computer Aided Simulation of Performance and Brush Commutation for Universal Motors with Two Coil Per Armature Slot", IEEE IEMDC, 1999, pp. 559~561.
- [3] Roderick N. Ebben, John R. Brauer, Zoltan J. Cendes, Nabeel A. Demerdash, "Prediction of Performance Characteristics of a Universal Motor Using Parametric Finite Element Analysis", IEEE IEMDC, 1999, pp. 192~194.
- [4] T. H. Abdelhamid, "Single-Phase Drive System Controlled by Sinusoidal PWM Full-Bridge DC-DC Converter with Improved Input Current Waveform", IEEE IEMDC, 1999, pp. 670~672.
- [5] Ping Zhou, John R. Brauer, Scott Stanton, Zoltan J. Cendes, "Dynamic Modeling of Universal Motors", IEEE IEMDC, 1999, pp. 419~421.
- [6] John C. Salmon, "Circuit Topologies Single-Phase Voltage-Doubler Boost Rectifier", IEEE Trans. on PE, 1993, pp. 521~529.
- [7] L. H. Dixon, "High Power Factor Regulator for off-line Power Supply", Unitriode Switching Power Supply Design Seminar Manual. 1989, vol. 2, pp. 120~195.

- [8] James B. Williams, "Design of Feedback Loop in Unity Power Factor AC to DC Converter", IEEE PESC, 1989, pp. 959-967.

저 자 소 개



임홍우(林洪雨)

1972년 11월 12일생. 1998년 조선대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 현재 동 대학원 박사과정.



박수강(朴秀剛)

1972년 4월 24일생. 1995년 조선대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



백형래(白亨來)

1949년 5월 4일생. 1971년 조선대 전기공학과 졸업. 1992년 건국대 전기공학과 졸업(박사). 2001년 현재 조선대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 기획이사, 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 부회장.