

고조파전류 감소용 유니버설모터 속도제어기에 관한 연구

임홍우\*, 조금배\*, 백형래\*, 장용해\*\*, 신사현\*\*\*  
 조선대학교\*, 광주기능대학\*\*, 광주송신공고\*\*\*

A Study on the Universal Motor Speed Controller for Eliminating Harmonic Current

Hong-Woo Lim\*, Young-Hae Jang\*\*, Geum-Bae Cho\*, Hyung-Lae Baek\*  
 Chosun University\*, Kwangju Polytechnic college\*\*, Kwangju Sungsin High-school\*\*\*

**Abstract** - Phase angle control ac drives system gains a high popularity due to their simple implementation despite the disadvantage of their poor input power factor especially for large values of phase delay angle. Furthermore it generates subharmonic current at specific phase angle. As input current of dc drive systems are sinusoidal, the power factor and subharmonic current characteristics are improve.

This paper presents the application of a PWM control technique of dc chopper system to reduce the subharmonic current and its characteristics using single-phase dc chopper drive system of universal motor.

1. 서 론

교류전력제어에 있어서 유용한 형태의 컨트롤러로서 자연전류 특성을 갖는 사이리스터를 사용한 위상각 제어 방법이 사용되어 왔다. 이러한 종류의 회로들은 부하전력의 최대값에 대해서만 선로측 역률과 부하측 역률이 일치하는 반면 저전력 값에 대해서는 현저하게 부하역률이 감소하게 되고 전력제어의 구성이나 제어에 있어서 대단히 유리하나 근본적인 위상각제 특성으로 인해 공급전류와 부하전류에 왜곡이 발생하여 공급측과 부하측에서 저차 고조파가 발생한다. 이러한 저차고조파 전류는 통신회로나 컴퓨터에 장애를 주며, 회전기의 과열, 보호계전기의 오동작, 전동기 운전 시 고조파전류로 인한 손실과 맥동 토크가 발생하기 때문에 평활회로가 요구되며 순저항 부하에 있어서도 점호각이 지연되므로 부하전류는 불연속적으로 흘러 교류전력 변환기의 역률과 효율이 더욱 저하하게 된다.

전기기기 중 진공청소기의 경우는 일반적으로 슬라이드 가변저항과 콘덴서의 시정수에 의한 위상각제어 방법을 이용하여 소비자가 원하는 소비전력 위치에서 사용하다보니 그들이 연결된 시스템으로 고조파전류의 유입으로 인해 전력의 품질을 저하시켜 각종사고 및 전력계통에서의 장애의 요인이 되고 있는 실정이다.

유니버설모터는 직류직권전동기와 같은 기계적 구조를 가지며 AC 전원 뿐만 아니라 DC 전원에서도 구동이 가능하므로 위상각 제어기에서 나타나는 역률감소와 저차고조파전류를 감소시키기 위해 직류전원으로 구동시킨다. 교류 상용전원을 브리지 다이오드를 통해 직류전원으로 변환한 후 DC 초퍼에 의해 모터에 입력되는 전압을 가변하여 속도를 제어한다. 그러나 위상각제어기에 비해 DC 초퍼시스템은 제어기의 비용이 상승하고 시스템이 복잡해질 수 있으나 파워일렉트로닉스 기술의 보편화에 기인하여 시스템의 안정화와 소형화의 장점을 얻는다.

본 논문에서는 진공청소기 구동용 모터인 유니버설모터에 입력되는 전원을 DC전원으로 변환한 후 DC 초퍼 제어시스템에 의해 모터입력전압을 제어할 때 나타나는 저차 고조파전류 특성을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 유니버설 모터의 유도전압

유니버설 모터는 DC 전원 뿐만 아니라 AC에서도 동작하는 소형의 직류 직권전동기이다. 토크는 저속에서 최대가 되며 속도가 점차 상승하면서 감소하는 특성을 갖고 있으며 무부하에서 최대속도가 된다. 이러한 토크-속도 특성 때문에 유니버설 모터는 부하 변화에 직접적인 영향을 많이 받는다. 일반적으로 유니버설 모터의 속도범위는 통상 3,000[rpm]에서 10,000[rpm]이며 드릴과 같은 곳에 사용될 때에는 20,000[rpm]의 고속에서 동작하도록 설계된다.

유니버설 모터는 동급의 출력에서 다른 전동기에 비해 속도가 높기 때문에 견고하고 소형화로 만들 수가 있어 핸드드릴이나 청소기등과 같은 가볍고 컴팩트한 곳에 적용이 적합하다.

그림 1에서와 같이 단일 전기자 코일을 가진 2극 직권전동기는 두 개의 주 자극 때문에 공극자속밀도의 공간적 분포는 주기적으로 교번한다. 전기자가 회전함에 따라 두 개의 코일변에서 전자기력을 유도하는 방향은 벡터생성값  $v \times B$ 으로 나타낼 수 있다. 정류자와 브러시가 연결되지 않는다면, 각속도  $\omega$ 로 회전할 때 코일에 유도된 전자기력은 자속밀도 B의 공간분포의 형태와 유사한 시간에 대한 파형으로 나타나게 된다.

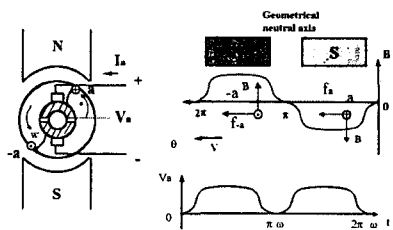


Fig. 1 Induced emf in the coil of an elementary machine

정류자와 브러시 코일축이  $\pi/2$ 와  $3\pi/2$ 를 지나게 될 때마다 외부결선에 의해 접촉하게되고 결과적으로 외부 단자에서 전압은 실제 코일전압을 정류하게 된다. 매극당 발생하는 자속은 식(1)과 같다.

$$\Phi = \int_0^r B_c(\theta)Lrd\theta = B_c Lr \quad [\text{Wb}] \quad (1)$$

여기서 D가 전기자의 지름이라고 하면 한 자극피치에서  $\tau$ 는  $\pi D/2P$ 이내의 범위가 된다.

한 극에서의 자속밀도 값은 식(2)와 같다.

$$B_c(\theta) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_c(\theta)rd\theta \quad [\text{Wb/m}^2] \quad (2)$$

회전자 코일의 권선수가  $n_c$ 인 두 코일변이  $\alpha$ 와  $\alpha + \beta$ 에 각기 위치할 때 자속은 식(3)과 같다.

$$\lambda_c = n_c L \int_a^{\alpha+\beta} B_c(\theta) r d\theta \quad [\text{Wb} \cdot \text{turn}] \quad (3)$$

또한, 코일주위에 유기된 전압은 식(4)와 같다.

$$e_c = \frac{d\lambda_c}{dt} = n_c L \frac{d}{dt} \int_a^{\alpha+\beta} B_c(\theta) r d\theta \quad [\text{V}] \quad (4)$$

식(4)에서 전 코일에 유기되는 전압은 식(5)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_a^{\alpha+\beta} f(\theta, t) d\theta = \int_a^{\alpha+\beta} \frac{\partial}{\partial t} f(\theta, t) d\theta + f(\alpha+\beta, t) \frac{d(\alpha+\beta)}{dt} - f(\alpha, t) \frac{d\alpha}{dt} \quad (5)$$

공극자속밀도분포  $B_c(\theta)$ 는 시불변적이며 각속도  $\omega$ 로 회전하는 코일에서 유도된 전압은 식(6)과 같다.

$$e_c = n_c L r \omega \{B_c(\alpha+\beta) - B_c(\alpha)\} \quad [\text{V}] \quad (6)$$

여기서,  $\omega = d(\alpha+\beta)/dt = da/dt$

반대극의 브러시 그리고  $n_c$ 와 동일한 코일  $n_s$  사이에 전기자 병렬회로수  $a$ 를 가진 회전자 권선이 각각 직렬로 결선되어 있고 브러시 양단의 합성전압은 직권 코일 전압의 합 식(7)과 같다.

$$V_s = \sum_{i=1}^m e_{ci} = n_s r \omega \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta) - B_c(\alpha_i) \quad [\text{V}] \quad (7)$$

여기서  $\alpha_i$ 는 직권열의  $i$ 번째 코일변중 하나의 각위치를 나타낸 것이다.

간격이 정확하게 1극 피치인 코일에서  $\beta$ 는  $r$ 와 같다.

또한  $B_c(\alpha_i + r) = -B_c(\alpha_i)$ 와  $\sum_{i=1}^m B_c(\alpha_i)$ 는  $n_s B_e$ 로 대체될 수 있으므로 이를 식(7)에 대입하면 회전자에 유기된 전압의 평균값은 식(8)과 같다.

$$V_s = 2n_s r \omega m n_c B_e \quad [\text{V}] \quad (8)$$

회전자는 전 코일수  $an_s$  혹은 전 권선수  $an_s n_c$ 가 된다는 점에서 전기자도체 총수와 배극 자속으로  $V_a$ 를 구할 수 있다. 두 개의 코일변에 의해 1개의 권선이 형성되므로 전기자 총도체수  $Z$ 는  $2an_s n_c$ 가 된다. 전기자 도체총수를  $Z$ ,  $\phi = \tau L B_e$ ,  $\tau = \pi D / 2P = \pi r / P$ 라 하면 유기된 전압은 식(9)와 같다.

$$V_a = \frac{PZ}{2\pi a} \omega \phi = k_a \omega \phi \quad [\text{V}] \quad (9)$$

여기서,  $k_a = PZ / 2\pi a$  이다

## 2.2. 고조파 장해 및 규제

위상제어 전력변환장치들은 전원전압의 파고값 가까이에서 피크전류가 흐르는 경우가 있다. 이와 같은 왜곡파형은 기본 주파수 성분과 그 정수배의 주파수 성분이 합성된 것으로서 왜곡파형의 전류를 흘리는 기기는 전력계통에 고조파 전류를 유출시키는 고조파 발생원이 된다.

전력계통에 유일한 고조파 전류는 저압 배전선, 주상 변압기, 고압 배전선을 통해서 상위 계통에 유입해 가는 중에 계통의 내부임피던스에 의해 그 고조파 전류와 동일한 차수의 전압 강하를 초래하여 그것에 의해 고조파가 생기게 된다.

전자기거나 전기기기의 고조파 전류의 측정이나 내량 시험은 IEC (International Electrotechnical Commission : 국제표준전기 연구회)에서 검토되고 있다. 고조파 전류 측정은 IEC Pub.555-2 「일반 저전압계통에 접속되는 기기에 의해 생기는 방해 : 입력전류 16A/상 이하의 기기에 대한 고조파 전류의 한도값에 고조파의 허용 한도값과 시험조건 및 측정법이 정해져 있다.

이 규격은 유럽을 중심으로 검토되기 시작하여 1982년에 제정되고, 그후 계속해서 개정이 심의 되고 있다. 이것은 전원전압이 220~240V, 1상당의 전류가 16A 이하의 기기를 대상으로 하고 있다. 표 1은 전원고조파 왜곡 발생 한도값을 나타낸 것이다. 클래스 A는 다른 클래스에 속하지 않는 기기이고, 클래스 B는 휴대용 공구를 대상으로 클래스 A 한도값의 1.5배를 한도값으로 하고 있

다. 클래스 C는 조명기구를 대상으로 한 것이며 클래스 D는 특수도형에 해당되는 입력전류를 가지는 기기 (전자회로를 가지는 대부분의 기기)를 대상으로하고 있다. 그림 2는 클래스 D로서 판정하는 특수도형으로 입력전류의 피크를 중앙에 맞추고 반주기의 95% 이상이 그 특수도형의 포락선 내에 들어가는 특수파형의 입력전류를 가지는 기기를 말한다.

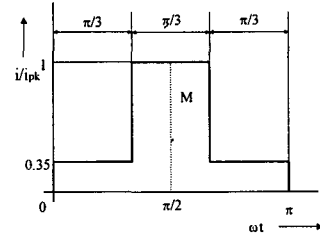


Fig. 2 Specific curve decided class D

Table 1. Limited value of harmonic currents

클래스	A		C		D	
	최대허용 전류차수 n	최대허용 고조파전류[A]	기본입력전류%로 표시하는 최대값[%]	전류와 전력비의 한도값[mA/W]	최대허용 고조파전류	
클래스 A	3	2.30	2	3.4	2.30	
	5	1.44	30×역률	1.9	1.14	
클래스 B	7	0.77	10	1.0	0.77	
	9	0.40	7	0.5	0.40	
클래스 C	11	0.33	5	0.35	0.33	
	13	0.21	3	3.85/n	0.21	
	39까지	0.15×15/n	3	3.85/n	0.15×15/n	
클래스 D	7	1.08	2	-	-	
	4	0.43	-	-	-	
	6	0.30	-	-	-	
클래스 E	40까지	0.23×8/n	-	-	-	

## 3. 시스템 구성

### 3.1. 직류구동 유니버설모터 제어기

그림 3은 PWM 제어회로를 이용한 유니버설 전동기 구동제어회로를 나타낸 것이다. AC 전원은 풀 브리지 정류기를 통해 맥동하는 DC 전원으로 변환되고 초퍼회로를 거쳐 유니버설 전동기에 입력되는 전력을 제어하는 강압초퍼 회로로 구성으로 되어있으며 평활용 콘덴서를 사용하지 않으므로 역률이 저하되는 일은 없다. 스위칭 소자로 사용된 MOSFET는 전압제어소자로서 충분히 큰 게이트-소스 전압이 인가되면 소자는 온상태가 되고 그 결과 드레인-소스의 전압강하는 작아진다. MOSFET를 턴온 및 턴오프 하기 위한 구동회로는 BJT의 구동회로보다는 간단하며 온상태에서  $V_{DS}$ 의 변화는  $i_D$ 의 변화에 선형적으로 비례한다.

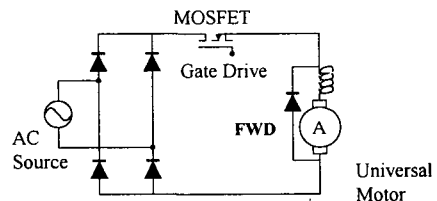


Fig. 3 PWM control circuit using MOSFET

PWM 제어회로는 원칩마이크로 컨트롤러인 PIC 16711을 사용하여 가변저항 전압이 레퍼런스값으로 입력되면 컨트롤러 자체에 내장된 A/D 컨버터로 0에서 256개의 이산화된 값으로 출력되는 PWM신호의 듀티비를 제어하

고 있다. 또한 제어부와 파워부의 절연을 위해 포토커플러를 사용하였으며 MOSFET를 구동하기 위한 바이어스 전압을 얻기 위해 별도의 전원을 가진 드라이브 회로를 구성하였다.

### 3.2. 직류구동 유니버설모터 제어시스템

그림 4는 직류구동 유니버설모터의 제어시스템을 나타낸 것으로 풀 브리지 다이오드의 출력 전압을 DC 초퍼로 전압을 제어함으로써 유니버설모터의 속도를 조절하는 구성이다.

시스템에 사용된 모터는 진공청소기 구동용 유니버설 모터이며 정격 속도 12,000[rpm]이고 출력이 1200[W]이다. 유니버설 전동기의 사양은 표 2와 같다.

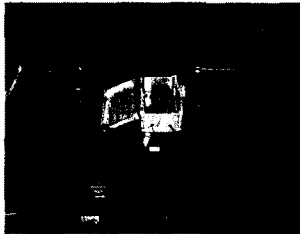


Fig. 4 Configuration of system

Table 2. The specification of universal motor

출 령	1200 [W]	전 압	220 [V]
정격전류	6 [A]	회 전 수	12,000 [rpm]
주 파 수	60 [Hz]	극 수	2
절연계급	E	기동전류	12 [A]

## 4. 실험 및 결과

### 4.1. DC 초퍼에 의한 유니버설모터 구동특성

직류구동 유니버설모터의 속도제어기는 MOSFET의 게이트에 컨트롤러에서 출력되는 듀티비를 가변하여 유니버설 전동기에 입력되는 전압을 조절하여 속도를 제어한다. 컨트롤러에서 출력되는 게이트 입력신호와 전동기 입력전압, 전류를 각각 측정하였다.

그림 5는 MOSFET의 게이트에 입력되는 PWM 신호로서 듀티비가(  $T_{on}/(T_{on} + T_{off})$  ) 0.2일 때의 파형을 나타낸 것으로 이때 DC 초퍼의 입력전류 및 유니버설 전동기의 입력전류(초퍼출력전류)를 그림 6에 나타내었다. 그림 7, 그림 8은 듀티비 0.8일 때의 게이트 PWM 신호 및 DC 초퍼의 입력전류 및 유니버설모터의 입력전류를 각각 측정한 것이다. 듀티비가 낮은 신호가 게이트에 인가되면 유니버설모터의 입력전류가 작고 듀티비가 높아질 수록 전류가 증가함을 알 수 있다.

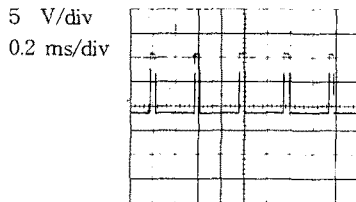


Fig. 5 PWM signal of DC copper at duty ratio 0.2

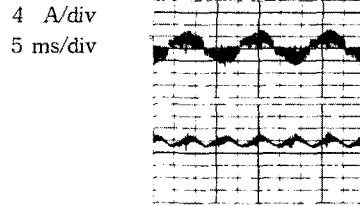


Fig. 6 DC chopper and motor input current at duty ratio 0.2

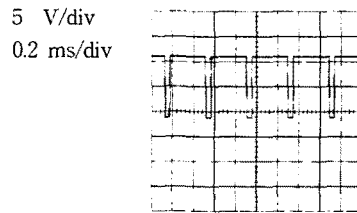


Fig. 7 PWM signal of DC copper at duty ratio 0.8

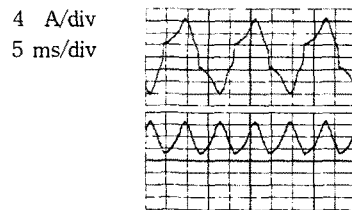


Fig. 8 DC chopper and motor input current at duty ratio 0.8

### 4.2. 직류구동 유니버설모터의 고조파 특성분석

고조파 전류측정은 일반 저전압계통에 접속되는 기기에 의해 생기는 방해 입력전류 16[A] 이하의 기기에 대한 고조파 전류의 한도값으로 고조파의 허용 한도값과 시험조건 및 측정법이 정해져 있다.

본 시스템은 전원전압이 220~240[V], 1상당의 전류가 16[A] 이하의 기기이므로 표 1의 전원고조파 왜곡 발생 한도값에 따라야 한다. 또한 입력전류의 피크를 중앙에 맞추고 반주기의 95% 이상이 그 특수도형의 포락선 내에 들어가는 특수파형의 입력전류를 가지는 기기이므로 클래스 D로 판명된다.

고조파전류를 측정하기 위하여 시스템 입력전류에 대한 고조파 전류를 측정하였으며 측정용 장비는 Hamonalyzer HA-2000 고조파 스펙트럼 분석기를 이용하였다. 또한 게이트에 인가되는 듀티비를 11단계로 나누어 각각에 대한 고조파 스펙트럼을 분석하였다.

그림 9, 그림 10, 그림 11은 1단계에서부터 11단계까지의 속도스텝에 대한 입력전류 및 고조파 스펙트럼 분석 중 1, 5, 9단계의 속도에서의 특성을 나타낸 것이다.

그림 12는 입력전류 및 기본파 전류, 고조파 전류의 추이를 나타낸 그래프이고 표 3은 입력전류에 대한 고조파전류의 값을 나타낸 것이다.

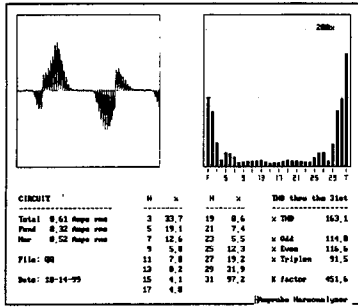


Fig. 9 Analysis of input current and harmonic spectrum at motor speed step 1

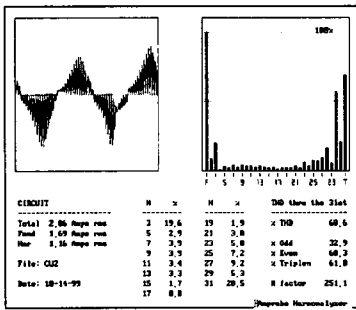


Fig. 10 Analysis of input current and harmonic spectrum at motor speed step 5

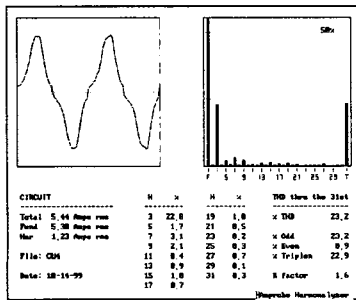


Fig. 11 Analysis of input current and harmonic spectrum at motor speed step 9

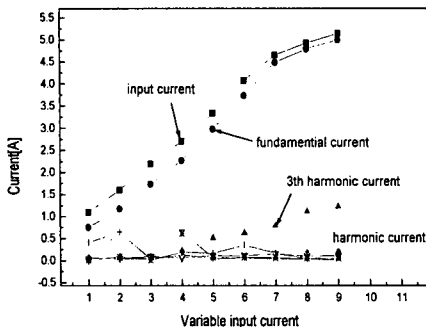


Fig. 12 Harmonic currents using DC chopper system

Table 3. Harmonics currents on increasing input current DC chopper system

입력전류 단위(A)	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11
입력 전류	1.09	1.6	2.19	2.51	2.70	3.33	3.65	4.07	4.65	4.92
저조파 전류	0.75	1.17	1.73	1.82	2.27	2.98	3.21	3.73	4.48	4.79
3차 고조파 전류	0.06	0.08	0.08	0.14	0.22	0.51	0.56	0.62	0.79	1.11
5차 고조파 전류	0.01	0.05	0.09	0.08	0.06	0.11	0.14	0.11	0.15	0.10
7차 고조파 전류	0.01	0.05	0.05	0.09	0.13	0.06	0.08	0.07	0.17	0.19
9차 고조파 전류	0.06	0.04	0.04	0.11	0.12	0.05	0.06	0.08	0.07	0.10
11차 고조파 전류	0.03	0.03	0.03	0.05	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06	0.11
13차 고조파 전류	0.02	0.08	0.01	0.04	0.61	0.07	0.08	0.07	0.06	0.05
15차 고조파 전류	0.05	0.64	0.02	0.32	0.69	0.04	0.05	0.06	0.04	0.03
17차 고조파 전류	0.41	0.64	0.01	0.11	0.19	0.16	0.15	0.35	0.16	0.04

## 5. 결론

본 논문에서는 DC 초퍼구동에 의한 유니버설모터의 속도제어시 발생하는 고조파전류에 대한 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

시스템에 의해 제어되는 입력전류파형이 모두 특수도형의 포락선내에 들어가는 입력전류 파형을 가진다. 또한 본 실험에서 사용된 유니버설모터는 정격전류가 6 [A], 1.2 [KW]이므로 두 제어시스템은 클래스 D로 판정된다.

DC 초퍼시스템으로 유니버설모터의 입력전압을 제어할 때 3차 고조파 전류가 최대 1.22 [A]를 넘지 않음을 알 수 있고, 특히 DC 초퍼 입력전류 4.07 [A], 4.65 [A]에서 3고조파전류는 각각 0.62 [A], 0.79 [A]로 현저히 감소함을 보이고 있다. 입력전류가 증가하여도 3고조파 전류는 최대 1.22 [A]를 넘지 않음을 보이고 있다.

본 논문에서 사용된 유니버설모터의 제어가 클래스 D에 속하므로 IEC 고조파 규제값 중 3고조파 전류의 최대 한도값은 2.3 [A]이하로 발생되고 5고조파 전류도 1.14 [A]이하로 발생됨을 알 수 있었고 DC 초퍼제어시스템에서 저차고조파가 규제치 이하로 발생됨을 실험을 통하여 입증하였다.

## 참고문헌

- (1) Stephen J. Chapman : 「Electric Machinery Fundamentals」, WCB McGraw-Hill, pp.150~214
- (2) Richard Valentine, 「Motor Control Electronics Handbook」, McGraw-Hill, pp 119~161
- (3) T. C. Chen, C. T. Pan, "Modeling and Design of an AC to DC Converter", IEEE Trans. on PE, pp 501~508, 1993
- (4) James B. Williams, "Design of Feedback Loop in Unity Power Factor AC to DC Converter", IEEE PESC, pp 959~967, 1989
- (5) John C. Salmon, "Circuit Topologies Single-Phase Voltage - Doubler Boost Rectifier", IEEE Trans. on PE, pp. 521~529, 1993
- (6) L. H. Diyon, "High Power Factor Peregulator for off-line Power Supply", Unitriode Switching Power Supply Design Seminar Manual.
- (7) S. S. L. Chang, J. H. Karr, "AC Series Motors a Design Method", AIEE Trans., Vol. 69, pp 125 7~1263, 1950
- (8) 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, pp 559~561, 1999
- (9) T. H. Abdelhamid, "Single-Phase Drive System Controlled by Sinusoidal PWM Full-Bridge DC-DC Converter with Improved Input Current Waveform", IEEE IEMDC, pp 670~672, 1999