
SHE PWM 인버터를 이용한 영구 콘덴서형 단상 유도전동기의 가변속 구동

이수원* · 전칠환*

Variable Speed Drive of Permanent Split-Capacitor Single Phase Induction Motor Using SHE PWM Inverters

Su-won Lee* · Chil-hwan jeon*

이 논문은 2003년도 군산대학교 두뇌한국21사업에 의하여 일부 지원되었음

요 약

본 논문에서는 V55 마이크로프로세서로 제어되는 반브릿지 인버터를 사용하여 영구 콘덴서형 단상유도 전동기의 가변속 구동에 대해 연구하였다. Patel의 알고리즘을 이용한 SHE(Selected Harmonic Elimination) PWM 구동방식에 의한 V/F 제어로 출력전압의 고조파분을 제거할 수 있으며, 속도의 제어 범위가 넓어짐을 알 수 있었다. 제안한 방법을 시뮬레이션과 실험의 결과로 입증하였다.

ABSTRACT

This paper describes speed control of a permanent split capacitor single phase induction motor using SHE PWM inverters. The inverter is controlled by V55 microprocessor and its range is larger than other systems. Due to the V/F control with SHE(Selected Harmonic Elimination) PWM, continuously variable speed is attained and THD(Total Harmonic Distortion) is decreased. This is verified by simulations and experimental results.

키워드

영구 콘덴서형 단상 유도전동기, SHE PWM 인버터, 속도 제어

1. 서 론

자동화 및 에너지 절약화를 추진함에 있어서 유도전동기의 가변속 제어는 필요한 과제로 관심이 모아지고 있다. 유도전동기는 직류전동기에 비해 소형, 경량, 견고한 구조, 고효율, 보수점검이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 특히 가정과 사무실에는 단상 전원이 공급되고 있으며, 가정용·

사무용 전기용용기기에서 단상 유도전동기의 사용은 증가 추세에 있다. 단상 유도전동기는 단일 전압원에서 동작하도록 설계되어 있으므로 전동기 자체는 회전 자속이 발생되지 않기 때문에 기동토크를 발생하기 위해 보조권선에 콘덴서를 사용한다. 단상유도전동기의 속도제어로는 기어등을 사용하는 기계적인 방법과 탭변환, 극수변환 등의 전기적인 방법을 사용하고 있다^[1,2,3]. 이러한

*군산대학교

접수일자 : 2003. 10. 29

속도제어 방법은 제어가 불연속적이고 비효율적이며 제어성능과 신뢰성이 낮고, 또한 제작이 복잡하며 제어기의 부피가 커지는 단점들이 있다. 이를 해결하기 위해 1995년에 A. L. Julian, R. S. Wallace 그리고 P. K. Soods는 유체부하에 주로 사용되는 영구콘덴서형 유도전동기에 전기적 극수 변환방법을 이용하여 전동기 연속 제어를 할 수 있게 하였다^[4]. 그러나 이 방식은 장치자체는 간단하나 전압에 비례하여 주파수를 가변시킬 수 없으며, 기본주파수 f_s 가 60[Hz]일때 Triac의 스위칭에 따라 제어 주파수는 f_s , $2f_s/3$, $f_s/2$, $f_s/3$ 등에서만 동작 가능하다는 단점이 있다. 이로 인해 속도제어 범위는 좁아지고 출력전압은 왜형율이 큰 저차의 고조파분을 포함하고 있어 전동기의 진동, 손실의 발생 요인이 된다^[5].

이러한 점을 해결하기 위해 본 논문에서는 3상 유도전동기에 주로 사용되는 V/F 일정제어를 영구콘덴서형 단상유도전동기에 적용하였다. 구동장치로는 단가를 고려하여 반브릿지 인버터를 사용하였으며, 고조파 성분을 제거하기 위하여 특정 고조파 제거(SHE : Selected Harmonic Elimination) PWM구동방식(이하 SHE PWM 인버터라 칭함)을 이용하였다.

II. 비대칭 2상 유도전동기

일반적으로 영구콘덴서형 단상유도전동기(Permanent Split-Capacitor induction Motor)는 그림 2.1과 같이 비대칭 2상 유도전동기로 해석된다 [6,7]. 그림 2.1의 등가회로로부터 비대칭 2상 유도전동기의 전압방정식 및 토오크 방정식은 각각 식(2-1)과 식(2-2)와 같으며, 식(2-2)를 비정현함수 해석을 위한 정상상태의 토오크 방정식으로 나타내면 식(2-3)과 같다.

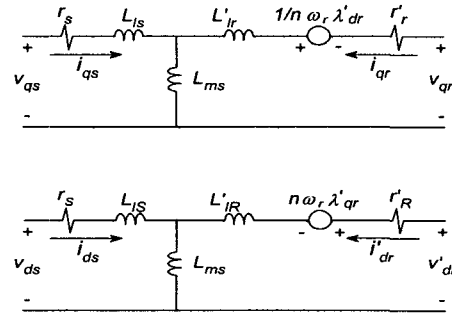


그림 2.1 비대칭 2상 유도전동기의 등가회로
Fig. 2.1 Equivalent circuit for an unsymmetrical 2-phase induction motor

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ \dot{v}_{qr} \\ \dot{v}_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} & 0 \\ 0 & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ss} \\ \frac{p}{\omega_b} X_{ms} & -\frac{1}{n} \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ms} \\ n \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ms} & \frac{p}{\omega_b} X_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{p}{\omega_b} X_{ms} & 0 \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{ms} \\ r'_r + \frac{p}{\omega_b} X'_{rr} & -\frac{1}{n} \frac{\omega_r}{\omega_b} X'_{RR} \\ n \frac{\omega_r}{\omega_b} X'_{rr} & r'_R + \frac{p}{\omega_b} X'_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \left(n \lambda'_{qr} i'_{dr} - \frac{1}{n} \lambda'_{dr} i'_{qr} \right) \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} T_e = & \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{N_s}{N_r} \right) \left(\frac{X_{ms}}{\omega_b} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{K=0}^{\infty} \\ & [R_e (\bar{T}'_{qsk} \bar{T}'_{drK} - \bar{T}'_{dsk} \bar{T}'_{qrK}) \cos(\omega_{esk} - \omega_{esK}) t \\ & + R_e (\bar{T}'_{qsk} \bar{T}'_{drK} - \bar{T}'_{dsk} \bar{T}'_{qrK}) \cos(\omega_{esk} + \omega_{esK}) t \\ & + R_e (-j \bar{T}'_{qsk} \bar{T}'_{drK} + j \bar{T}'_{dsk} \bar{T}'_{qrK}) \sin(\omega_{esk} - \omega_{esK}) t \\ & + R_e (-j \bar{T}'_{qsk} \bar{T}'_{drK} + j \bar{T}'_{dsk} \bar{T}'_{qrK}) \sin(\omega_{esk} + \omega_{esK}) t] \end{aligned} \quad (2-3)$$

III. SHE PWM 인버터

3.1 SHE PWM 인버터

그림 3.1은 전압과 주파수를 제어하기 위한 SHE PWM 인버터의 구성도로써 영구콘덴서형 단상유도전동기, 반브릿지 인버터, 구동회로, 직류전원으로 이루어져 있다.

여기서 콘덴서 C_1 , C_2 는 인버터 출력전압의

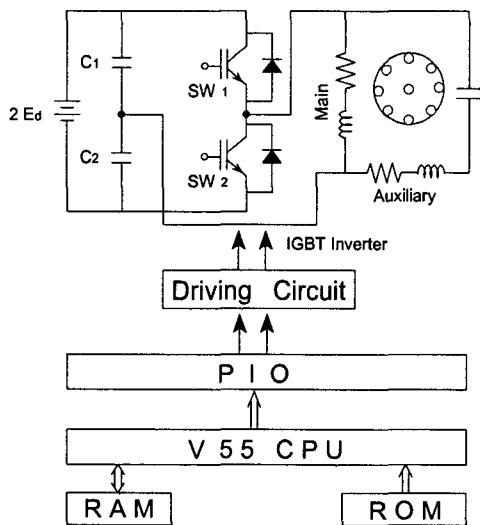


그림 3.1 V55 마이크로 프로세서로 제어되는 PWM 인버터

Fig. 3.1 PWM inverter fed PSC(Permanent Split Capacitor) induction motor controlled by V55 microprocessor

영전위를 보장하는 기능을 가진다. 따라서 직류전원의 크기가 $2E_d$ 라면 인버터의 출력전압의 크기는 $\pm E_d$ 가 된다. 그림 3.2는 PWM 인버터의 스위칭 신호와 이때의 출력전압 파형이다.

3.2 PWM 전압파형의 계산

일정한 크기의 직류전원을 인버터에 인가했을 경우, 인버터의 출력전압의 기본파 및 고조파의 크기는 PWM 파형의 스위칭각에 따라 결정된다.

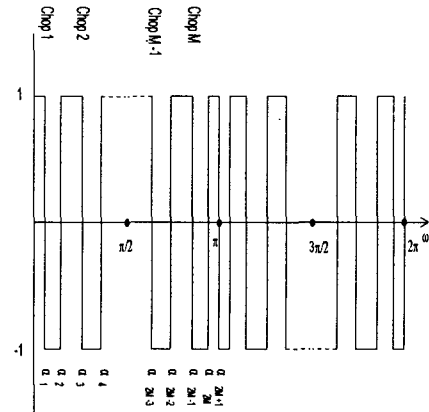


그림 3.2 반브릿지 인버터의 출력 파형
Fig. 3.2 Output waveform of a half bridge inverter

PWM 인버터를 효율적으로 수행하기 위해서는 인버터 출력전압 파형 중에서 시스템에 영향을 주는 저차의 고조파분은 제거되어야 한다. 이를 위해서 Patel이 제시한 SHE (Selected Harmonic Elimination) PWM[8,9]의 이론을 이용하여 인버터의 출력파형의 스위칭 각을 계산하였다.

그림 3.2은 인버터 출력전압의 가로축에서 $\pi/2$ 에 대해 대칭인 반파 대칭으로 가정한다. 여기서 출력전압의 크기는 ± 1 이고 스위칭각의 스위칭 순서를 $0 \sim \pi/2$ 사이에서 $k=1,2,\dots,M$ 이라고 할 때 스위칭 각은 다음 식(3-1)을 만족해야 한다.

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_{(M-2)} \leq \alpha_{(M-1)} \leq \pi/2 \quad (3-1)$$

그림 3.2의 인버터 출력 전압을 Fourier급수로 전개하면 식(3-2)와 같다.

$$V_n = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{4}{n\pi} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos n\alpha_k \right) \sin n\omega t \right\} \quad (n=1, 3, 5, 7, \dots) \quad (3-2)$$

식 (3-2)을 실효치로 표현한 기본파 전압의 방정식은 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (1 - 2\cos\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos\alpha_M) \quad (3-3)$$

고조파 전압을 제거하고 기본파 전압은 일정한 크기를 갖도록 하기 위해서는 다음 식(3-4)와 같은 M개의 방정식을 만족하는 M개의 스위칭각 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$ 을 계산해야 한다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (1 - 2\cos\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos\alpha_M) \\ 0 &= \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} (1 - 2\cos 3\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos 3\alpha_M) \\ 0 &= \frac{2\sqrt{2}}{5\pi} (1 - 2\cos 5\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos 5\alpha_M) \\ 0 &= \frac{2\sqrt{2}}{7\pi} (1 - 2\cos 7\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos 7\alpha_M) \\ &\vdots \\ 0 &= \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} (1 - 2\cos n\alpha_1 + \dots + (-1)^M 2\cos n\alpha_M) \end{aligned}$$

IV. 시뮬레이션 및 검토

4.1 영구콘덴서형 단상유도전동기의 출력토크 특성

V/F 일정제어를 영구콘덴서형 단상유도전동기에 적용하면 토크-속도 곡선은 그림 4.1과 같다. 그림 4.1에서 볼 수 있듯이 기본주파수의 약 50[%] 이하의 주파수에서는 최대토크가 현저히 작아지며, 선전류는 증가한다. 또 전동기 구동을 위한 한계주파수 이하에서는 정격토크를 발생시키지 못하므로 V/F 일정제어시 제어 가능한 최저주파수를 고려해야한다.

본 논문에서는 영구콘덴서형 단상유도전동기에 주로 사용되는 부하는 선풍기, 에어컨등 아주 낮은 속도운전이 필요없는 팬부하임을 고려하여 최저 주파수를 30[Hz]로 제한하고, 40[Hz], 50[Hz], 60[Hz]에 대하여 시뮬레이션을 행하였다.

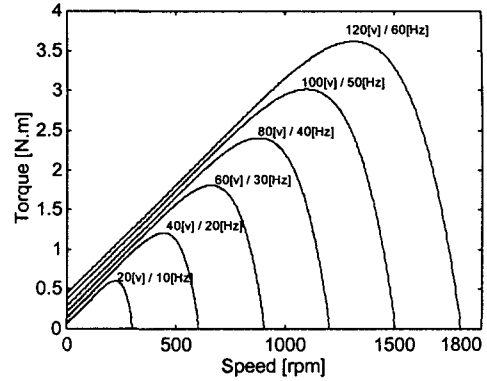


그림 4.1 영구콘덴서형 단상유도전동기의 토크-속도 곡선

Fig. 4.1 Torque-speed characteristics of a PSC(Permanent Split Capacitor) motor

4.2 PWM 인버터 전압 파형과 고조파 분석

특정고조파 제거를 위한 PWM 인버터의 스위칭 각을 결정하기 위해 초기치로써 삼각파와 정현파의 교차점을 이용하였다. 각 주파수 별 1/4주기의 스위칭 수와 인버터 출력전압 제어를 위한 변조지수 (m_a)는 표에 나타나 있다. 이때의 스위칭 수는 V55의 클럭 주파수를 고려하여 결정하였으며, 각각의 주파수에서의 스위칭 수는 동기PWM에 의해서 결정되었다.

그림 4.2에서 그림 4.5까지의 (a)와 (b)는 Newton-Raphson 반복법에 의해 계산된 PWM 파형과 이에 대한 고조파 분석이다. 속도를 제어할 때 전압과 주파수의 크기는 V/F 일정규칙에 따라 비를 2로 결정하였다.

표 4.1 주파수별 스위칭 수와 변조지수
Table 4.1 Switching number and ma

주파수(Hz)	스위칭 수(M)	변조지수(m_a)
60	12	1.0
50	14	0.7
40	16	0.3
30	22	0.3

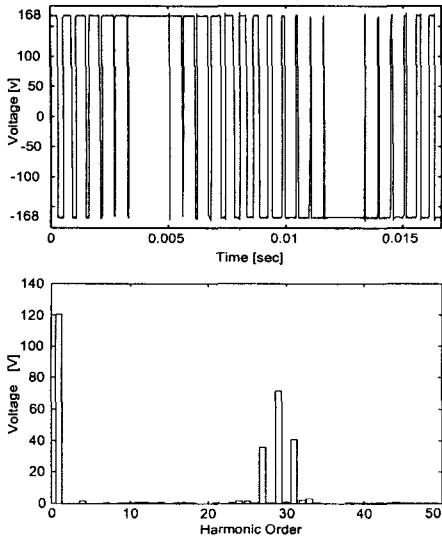


그림 4.2 60[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석
 Fig. 4.2 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 60[Hz]

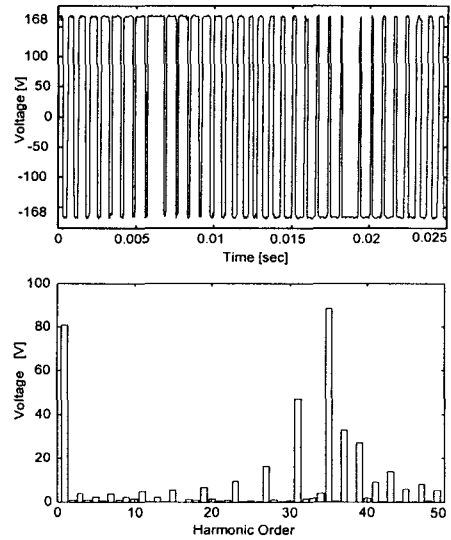


그림 4.4 40[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석
 Fig. 4.4 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 40[Hz]

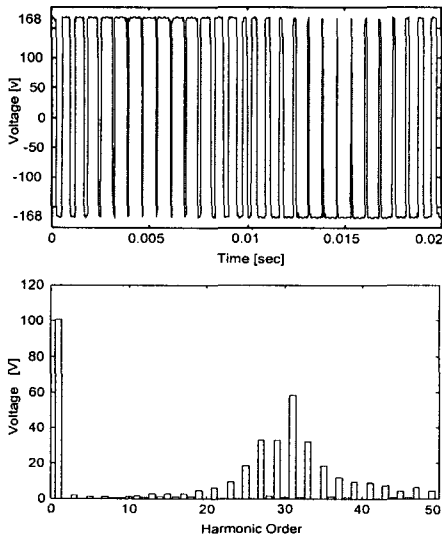


그림 4.3 50[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석
 Fig. 4.3 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 50[Hz]

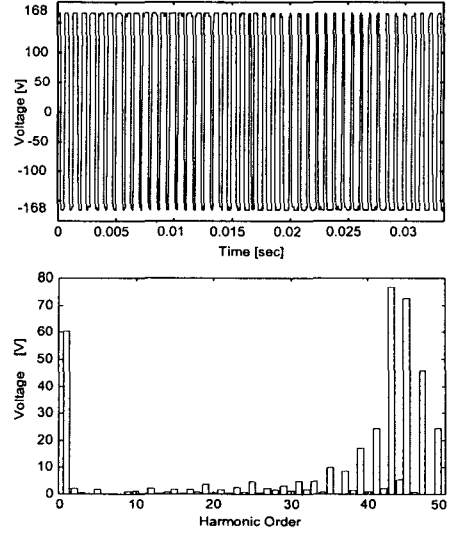


그림 4.5 30[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석
 Fig. 4.5 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 30[Hz]

그림 4.2에서 1/4주기의 스위칭수 M은 12이며, PWM파형의 기본파의 크기는 120[v]이다. 또한 고조파의 경우 제 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21,

23의 고조파가 제거되는 반면 제 25, 27, 29차 고조파는 삼각형의 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 즉 $(2M+1)$ 차의 고조파가 제거되었다. 그러나 기본파의 크기가 작아질수록 $(2M+1)$ 차 고조파가 발생하기 시작하면서 제거되지 못한 고조파는 점점 증가됨을 알 수 있다. 즉, 고조파 제거는 $(M-1)$ 개가 한계임을 보여주고 있다. 그러나 주파수가 낮아질수록 더 많은 고조파를 제거할 수 있기 때문에 모든 주파수에서 약 20차까지의 저차 고조파는 거의 제거되었음을 알 수 있다.

V. 실험결과 및 고찰

영구콘덴서형 단상유도전동기의 연속제어를 위해 반브릿지 인버터의 스위칭 신호 발생기로 V55 마이크로 프로세서를 사용하였다. 본 논문에서는 V55의 타임 인터럽트를 사용하여 신호를 발생시켰으며, 그림 5.1은 로직 어널라이저(Logic analyzer)에 의해 분석된 인버터의 동작신호이다. 그림 5.2에서 그림 5.5는 V/F 일정제어의 스위칭 각에 의한 인버터 출력파형과 고조파 분석이다. 이때 1/4주기당 스위칭 수는 앞에서 언급했던 것과 같이 60[Hz]에서는 12, 50[Hz]에서는 14, 40[Hz]에서는 16, 30[Hz]에서는 22이다.

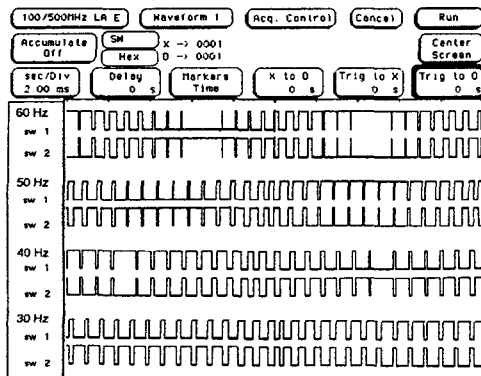
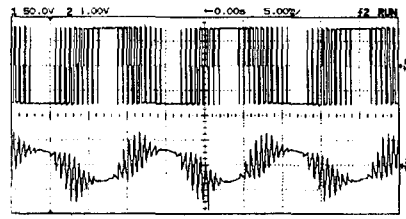
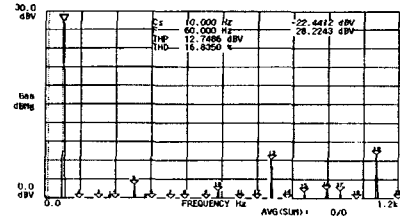


그림 5.1 스위칭 신호
Fig. 5.1 Switching signal



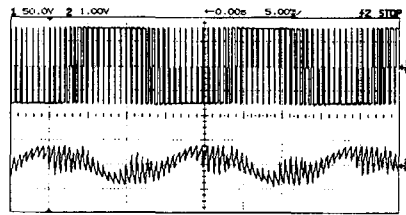
(a) Waveforms of voltage and current



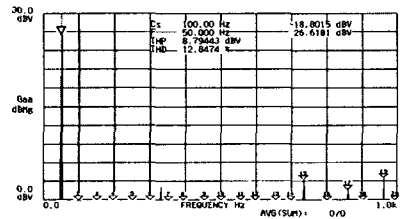
(b) Harmonic analysis

그림 5.2 60[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석

Fig. 5.2 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 60[Hz]



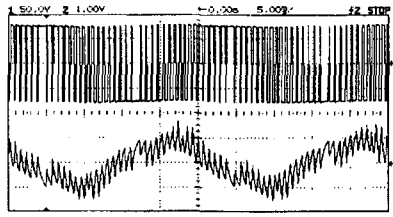
(a) Waveforms of voltage and current



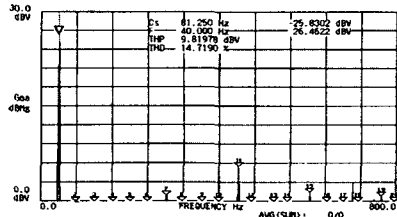
(b) Harmonic analysis

그림 5.3 50[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석

Fig. 5.3 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 50[Hz]



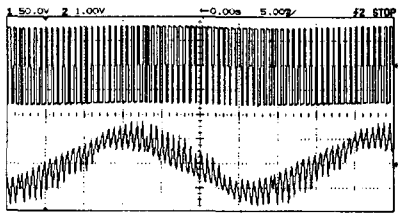
(a) Waveforms of voltage and current



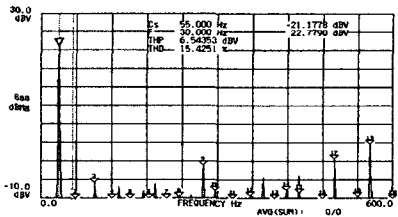
(b) Harmonic analysis

그림 5.4 40[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석

Fig. 5.4 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 40[Hz]



(a) Waveforms of voltage and current



(b) Harmonic analysis

그림 5.5 30[Hz]일 때 SHE PWM의 출력파형과 고조파 분석

Fig. 5.5 Waveform and its harmonic analysis of SHE PWM in 30[Hz]

그림 5.2부터 그림 5.5는 그림 4.2부터 그림 4.5에서 계산된 PWM 파형의 스위칭 각을 순람표(Look-up table)로 작성한 후 이를 실제로 시스템

에서 구동하였을 때 영구콘덴서형 단상유도전동기에서 나타나는 PWM 전압파형과 이에 대한 20차까지의 고조파 분석이다. 이때의 입력전압은 직류전원의 크기를 336[V]로 고정하고 측정하였다. 실험에 의해 나타난 그림 5.2에서 그림 5.5의 고조파 분석을 4장의 시물레이션에 의해 나타난 그림 4.2에서 그림 4.5의 고조파와 비교해 보면 제거 고조파로 선정된 저차의 고조파를 완전히 제거되지 못하였음을 알 수 있다. 이와 같은 불일치의 원인으로서는 컴퓨터에 의해 계산된 데이터를 V55의 스위칭각 순람표로 작성할 때 소수점이하의 데이터는 반올림해야 하며, 인버터 소자 보호용 회로에 의해 인버터의 출력전압이 일그러짐등을 들 수 있다. 표 5.2는 각 주파수에서의 속도이다.

표 5.1 각 주파수에서의 속도

Table 5.1 Motor speed

	60[Hz]	50[Hz]	40[Hz]	30[Hz]
전동기속도[rpm]	1800	1500	1200	900

V. 결론

본 논문에서는 제작단가가 낮고, 출력전압의 고조파분을 제거할 수 있으며, 속도의 제어 범위가 넓은 반브릿지 인버터를 사용하였으며, 고조파 제거 방법으로는 Patel의 알고리즘을 이용한 PWM 구동방식을 사용하였다. 그리고 영구 콘덴서형 단상유도전동기의 속도제어 범위를 확장하기 위해서 V/F 일정제어를 사용하였다. 이를 실현하기 위해 스위칭 각을 계산하여 순람표(Look-up table)를 작성한 다음 V55 마이크로프로세서에 탑재하여 인버터의 스위칭 신호를 제어하였다.

이상과 같은 V/F 일정제어의 시물레이션 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 반브릿지 인버터로 구동시킴으로써 스위칭 소자의 수를 줄여 구동의 간략화와 소형, 경량화를 실현할 수 있었다.
2. V/F 일정제어를 이용하여 기존의 방법보다 속도제어 범위를 넓혔다.
3. 진동과 손실의 원인이 되는 고조파 특성 면에

서 기존의 방식보다 SHE PWM 방법을 사용할 경우 현저히 낮아졌다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 군산대학교 두뇌한국21의 일부 지원에 의해 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Stephen J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", McGraw-Hill, 2nd Edition, 1991.

[2] E. Randolph Collins, Jr., "Torque and Slip Behavior of Single-Phase Induction Motors Driven From Variable Frequency Supplies", IEEE IAS Annual Meeting Conference Record, pp. 61-61, 1990.

[3] E. R. Collins, Jr. and R. E. Ashley, "Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies" in IEEE IAS Annual Meeting Conference Record, pp. 52-56, 1991.

[4] Alexander L. Julian, Richard S. Wallace, "Multi-Speed Control of Single-Phase Induction Motors for Blower Applications", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 10, No. 1, pp 72-77 Jan. 1995.

[5] 원종수, 장도현, "2상유도전동기의 위상차제어시 발생 토크에 대한 해석", 전기학회 논문지, 37권, 5호, 1998.

[6] 오석문, 이수원, 이성룡, 유철로, "가정용 냉방기기의 고효율 구동을 위한 2상 12스텝 PWM 인버터의 개발", 전기학회논문지, 46권 1호, 1997.

[7] P. C. Krause, "Analysis of Electrical Machinery", McGraw-Hill Book Co. 2nd Edition, 1987.

[8] Hasmukh S. Patel and Richard G. Hoft, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters : Part I-Harmonic Elimination", IEEE Trans. on Ins. App. Vol. IA-9, No. 3, pp 310-317, May/Jun. 1974.

[9] Hasmukh S. Patel and Richard G. Hoft, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters : Part II-Voltage Control Techniques", IEEE Trans. on Ins. App. Vol. IA-10, No. 5, pp 666-673, Sep/Oct. 1974.

저자 소개



이수원(Su-Won Lee)

1991년 전북대학교 공학사
1993년 전북대학교 공학석사
1998년 전북대학교 공학박사
2001년~현재 군산대학교 BK21

계약교수

※ 관심분야 : 전력전자, 전기기계, 에너지변환



전철환(Chil-Hwan Jeon)

1980년 서울대학교 공학사
1986년 미국 Vanderbilt Univ. 공학석사
1990년 미국 Vanderbilt Univ. 공학박사

박사

1990년 9월 ~현재 군산대학교 전자정보공학부 정교수

※ 관심분야 : 전력전자, 제어공학, 전기기계