

SHE PWM 인버터의 Notch Angle 선형화에 관한 연구

김 권 호*, 윤 관 철*, 김 광 배*, 류 경**, 박 귀 태**

* 한국과학기술연구원 제어시스템연구실, ** 고려대학교 공과대학 전기공학과

A Study on the Linearization of Notch Angles of SHE PWM Inverters

Kwon-Ho Kim*, Kwan-Cheol Yoon*, Kwang-Bae Kim*, Kyoung Ryou**, Gwi-Tae Park**

* Control Systems Lab., KIST, ** Dept. of Electrical Eng., Korea University

ABSTRACT :

The fully digitalized inverter has some difficulties in implementation because of the limitation of available memory capacity and computation time. In this paper schemes suitable for a one-chip microprocessor-based realization, which linearize notch angles of selected harmonic elimination (SHE) PWM, are presented. Also the detailed description of the scheme along with the realization is described. The simulation and experiment results show that proposed schemes have the predicted advantages such as good voltage waveforms and a memory-saving.

I 서 론

PWM (Pulse Width Modulation) 인버터는 전압 및 주파수를 동시에 제어할 수 있어 UPS (Uninterruptable Power Supply) 및 유도 전동기의 속도제어 등에 널리 응용되고 있다. 그러나 인버터는 스위칭 素子의 스위칭 작용으로 인해 많은 高調波를 발생시켜 전동기의 振動 및 발열의 원인이 되며 토크 리플 (Torque Ripple) 및 電磁氣의 騒音을 야기시킨다. 이러한 고조파를 제거하기 위하여 SHE (Selected Harmonic Elimination) PWM 방법 및 OPWM (Optimal PWM) 방법등이 개발되어 크게 각광을 받고 있다. 그러나 SHE PWM 이나 OPWM 은 특정 고조파를 감소시켜 고조파에 의한 영향을 최소화 하는 이점이 있으나 계산 시간이 많이 소요되어 정확한 스위칭 각 (Switching Angle) 을 결정하기가 어렵고 각 출력 주파수에 해당하는 스위칭 패턴 (Switching Pattern) 을 저장할 많은 메모리가 요구된다. 특히 常用 주파수 (60 Hz) 보다 높은 주파수에서 응용할 경우 Microprocessor 를 이용한 제어를 구성하는데 많은 어려움이 따른다.

本 研究에서는 스위칭 각을 결정하는데 소요되는 시간을 줄이고 스위칭 패턴을 저장할 메모리를 極小化 하기 위하여 스위칭 각 (α) 의 특성을 선형화하는 방법들을 제시하고 그

중에서 삼각파로 선형화 하는 방법을 이용하여 5, 7, 11차 고조파 성분을 억제하는 簡略한 제어를 구성하여 高周波 電動 그라인더 (High Frequency Electric Grinder : 400 Hz, 3 φ 200 Vac, 2.7 KVA)에 적용 하였으며 토퍼파 및 사다리꼴로 선형화 하는 방법의 시뮬레이션 결과들을 비교 검토하였다.

II 고조파 제거 방법

3 상 인버터의 특징은 파형의 대칭성에 의해 우수배 고조파가 제거되고 3 상 결선에 의해 3의 정수배 고조파가 제거된다. 또한 유도성 부하에서는 낮은 차수의 고조파가 문제가 된다. 3 상 Transistor Inverter 의 기본 구성은 그림 1 과 같으며 제 5, 7, 11 차 고조파 성분을 제거하기 위한 전압 파형은 그림 2 와 같다.

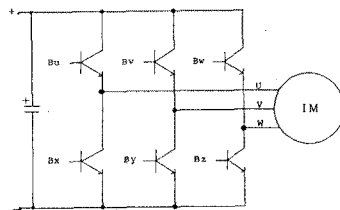


그림 1 인버터의 기본 구성도

일반적으로 주기함수를 푸리에 급수 (Fourier Series)로 전개하면 식 (1) 과 같다.

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)] \quad (1)$$

여기서
$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t$$

그런데 그림 2는 90° 에 대해 대칭이므로 기수배의 고조파 성분과 sin 성분만 남아 고조파의 전압의 크기는 식 (2)와 같게 된다.

$$A_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^k (-1)^i \cos(n\alpha_i) \right] \quad (2)$$

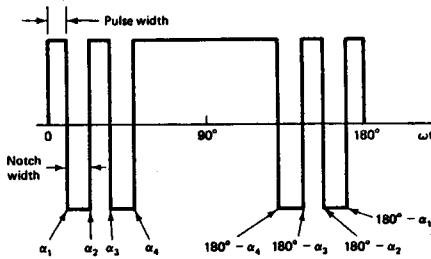


그림 2 제 5, 7, 11차 고조파 성분을 제거하기 위한 상 전압 (Phase Voltage)

그림 2와 같이 1/4 주기 동안에 4개의 Notch Angle (α)이 존재할 때 제 5, 7, 11차 고조파 성분을 식 (3), (4), (5), (6)으로부터 제거할 수 있다.

$$\frac{A_1 \pi}{4} = 1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3 + 2 \cos \alpha_4 \quad (3)$$

$$0 = 1 - 2 \cos 5\alpha_1 + 2 \cos 5\alpha_2 - 2 \cos 5\alpha_3 + 2 \cos 5\alpha_4 \quad (4)$$

$$0 = 1 - 2 \cos 7\alpha_1 + 2 \cos 7\alpha_2 - 2 \cos 7\alpha_3 + 2 \cos 7\alpha_4 \quad (5)$$

$$0 = 1 - 2 \cos 11\alpha_1 + 2 \cos 11\alpha_2 - 2 \cos 11\alpha_3 + 2 \cos 11\alpha_4 \quad (6)$$

위의 식은 비선형이므로 Trial and Error 방식에 의해 그림 3과 같이 α 값을 구할 수 있다. 이와같이 5, 7, 11차 고조파를 제거하였을 경우, 기본파 변화에 따른 13, 17, 및 19차 고조파 성분비는 그림 4와 같다.

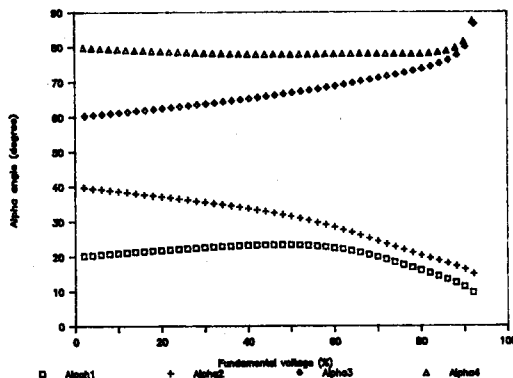


그림 3 기본파 전압 변화에 따른 α 특성

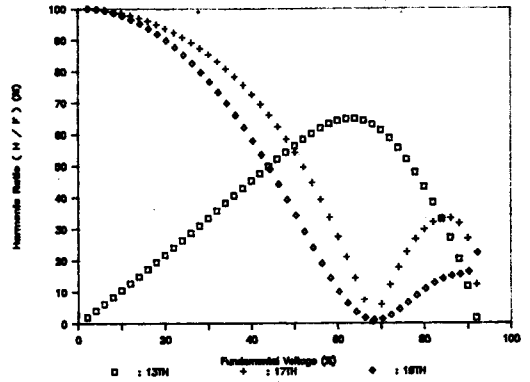


그림 4 기본파 전압변화에 따른 13, 17 및 19차 고조파 성분비

그림 3과 같이 기본파 전압 변화에 따라 α 값을 변화시켜 고조파를 제거하기 위해서는 각 기본파 전압에 대한 α 값을 Look-up Table에 저장하거나, α 특성을 선형화하여 마이크로 프로세서에 의한 스위칭 각 계산을 용이하게 하여야 한다.

본 연구에서는 그림 2와 같이 4개의 Notch Angle을 발생시켰을 경우, 그림 3의 α 특성을 선형화한 다음 이 특성에 따라 EPROM (P 2764 A)에 저장되어 있는 3개의 기본 Pulse Pattern을 조합하여 스위칭 각을 손쉽게 구할 수 있는 방법을 실현하였다. 여기서 α 특성을 선형화하는 방법은 다음 4가지가 있다.

- 1) 삼각파로 선형화하는 방법
- 2) 톱니파로 선형화하는 방법
- 3) 사다리꼴로 선형화하는 방법
- 4) 위의 세가지 파형중 두가지 혹은 세가지를 혼용하여 선형화하는 방법

III 제어기 설계

본 절에서는 스위칭 각 (α) 특성을 삼각파로 선형화하는 방법을 사용한 제어기의 구성을 설명하고 컴퓨터 시뮬레이션 및 이를 응용한 고주파 전동 그래인더에 인가되는 전압, 전류의 파형을 비교 검토하며, 삼각파 및 톱니파로 선형화하는 방법과 사다리꼴로 선형화하는 방법의 시뮬레이션 결과를 제시하고자 한다.

1. 삼각파로 선형화하는 방법

그림 5는 그림 3의 α 특성을 2개의 삼각파로 선형화하였을 경우의 α 특성을 나타내며, Transistor의 지연 시간

(Delay Time, 약 14 μ s) 을 고려하여 α_3, α_4 를 기본파 전압의 80 % 까지만 설정 하였다. 그림 6 은 이때의 고조파 성분 비를 나타낸다.

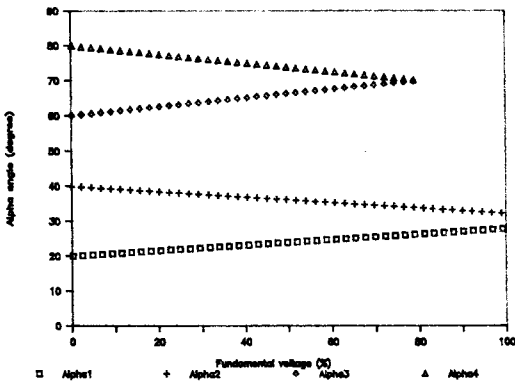


그림 5 삼각 파로 선형화시킨 α 특성

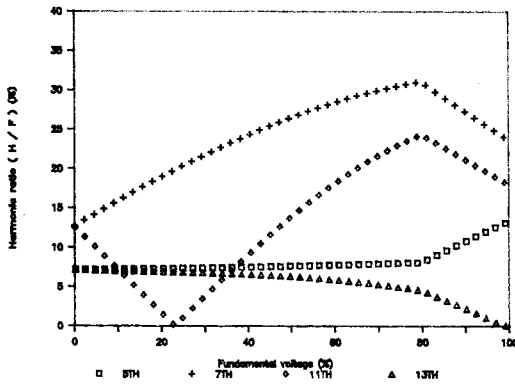


그림 6 α 특성을 삼각파로 선형화 하였을 경우의 고조파 성분 비

그림 5 의 삼각파로 선형화 한 α 특성은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha_1 = 0.1 A_1 + 20 \quad (7)$$

$$\alpha_2 = -0.1 A_1 + 40 \quad (8)$$

$$\alpha_3 = 0.13 A_1 + 60 \quad (9)$$

$$\alpha_4 = -0.13 A_1 + 80 \quad (10)$$

그림 5 및 식 (7), (8), (9), (10) 으로부터 스위칭 각 α 는 다음과 같은 특성이 있음을 알 수 있다.

- 1). α_1, α_2 는 30° 를 중심으로 $\pm 10^\circ$ 에서부터 시작하여 기본파 성분이 100 % 일때 약 30° 가 된다.
- 2). α_3, α_4 는 70° 를 중심으로 $\pm 10^\circ$ 에서부터 시작하여 기본파 성분이 80 % 일때 약 70° 가 된다.

- 3). α_1, α_2 의 기울기 보다 α_3, α_4 의 기울기가 더 크다. 즉, 임의의 기본파 성분을 발생시키기 위해서는 그 시각의 α_1, α_2 의 간격이 α_3, α_4 의 간격보다 더 커야 한다.
- 4). 기본파 성분이 0 ~ 80 % 까지는 스위칭 각이 4개 이고 80 % 이상에서는 30° 를 중심으로 2개 이다.

이상의 특성을 고려할 때, 그림 5 의 2개의 삼각 파형에 비례하는 2개의 삼각 Carrier 파형과 ROM 안에 3가지의 기본 Pulse Pattern 만 있으면 기본파 전압 성분 에 따른 α 값을 기억시킬 많은 Memory 가 필요치 않으며 매 순간 스위칭 각을 계산할 필요도 없는 간단 하면서도 비교적 Optimal Inverter 특성에 근사한 인버터를 실현할 수 있음을 알 수 있다. 즉,

- 1). 원하는 주파수의 구형파 (그림 7. d : Pattern A)
- 2). 30° 와 70° 를 중심으로 20° 의 펄스폭을 갖는 파형 (그림 7. e : Pattern B)
- 3). 70° 를 중심으로 20° 의 펄스폭을 갖는 파형 (그림 7. f : Pattern C)
- 4). 원하는 주파수의 주기를 18등분 (20°/pulse)한 구형파 (그림 7. a : Clock Pulse)
- 5). 위의 구형파와 동기된 크기가 다른 두개의 삼각파 (그림 7. b, c : Carrier 파형)

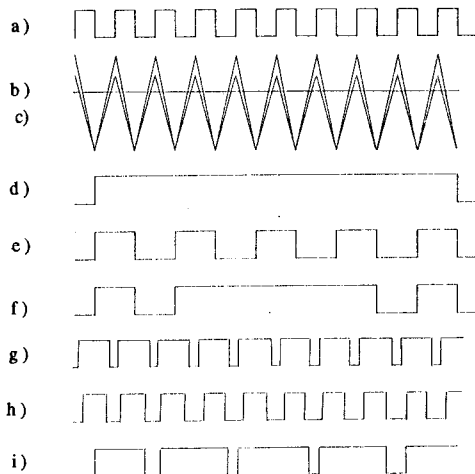


그림 7 기본 Pattern 파형 및 Carrier 파형

- a) Clock 파형
- b), c) Carrier 파형
- d) 기본 Pulse Pattern A
- e) 기본 Pulse Pattern B
- f) 기본 Pulse Pattern C
- g), h) Address 파형
- i) 출력 Pulse Pattern

2. 삼각파 및 톱니파로 선형화하는 방법

그림 3의 α 특성중 α_4 는 기본파 전압 변동에 따른 변화가 작아 톱니파로 선형화가 가능하다. 그림 8은 그림 3의 α 특성을 톱니파와 삼각파로 선형화하였을 경우의 α 특성을 나타내며 이 경우의 고조파 성분비를 그림 9에 나타내었다.

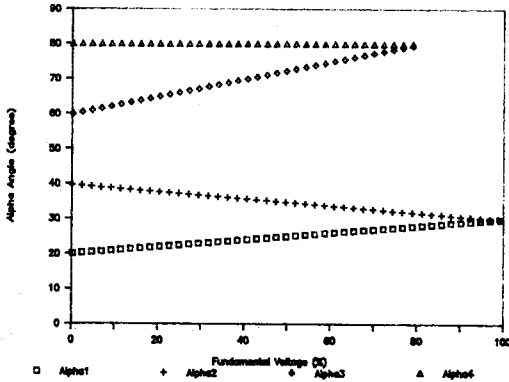


그림 8 삼각파 및 톱니파로 선형화시킨 α 특성

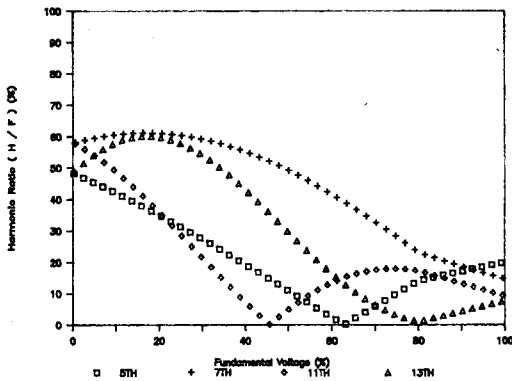


그림 9 α 특성을 삼각파 및 톱니파로 선형화 하였을 경우의 고조파 성분 비

그림 8, 9로부터 5, 7, 11차 고조파를 억제하는 방법으로 는 저속 영역에서 고조파 성분이 증가하여 그림 3의 α 특성을 그림 9와 같이 삼각파 및 톱니파로 선형화하는 방법이 적절하지 못하지만 더많은 고조파 성분을 제거하고자할 때는 유효하리라 본다.

3. 사다리꼴로 선형화하는 방법

그림 3에서 각각의 α 특성에 유사하게 선형화할 수 있으며 이경우 Transistor의 지연시간을 고려하여 기본파 전압의 80%까지만 설정할 경우 α 특성은 사다리꼴이 된다. 그림 10은 그림 3의 α 특성을 사다리꼴로 선형화하였을 경우의

α 특성을 나타내며 이 경우의 고조파 성분비를 그림 11에 나타내었다.

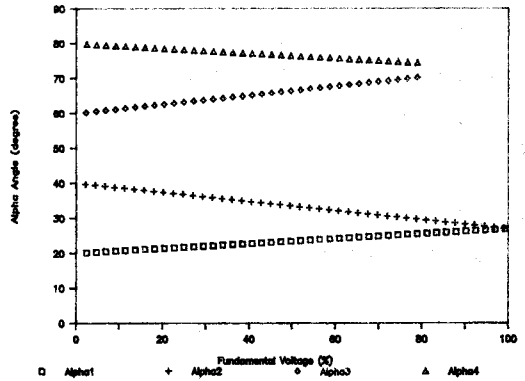


그림 10 사다리꼴로 선형화시킨 α 특성

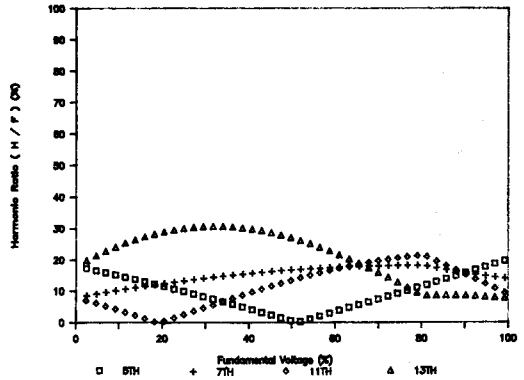


그림 11 α 특성을 사다리꼴로 선형화하였을 경우의 고조파 성분 비

IV. 시스템 구성

전체 시스템의 블록 선도는 그림 12와 같다. 기준 속도 발생기의 출력은 전압/주파수 변환기에서 해당 주파수의 구형파 및 삼각파로 변환되며, 이 삼각파의 전압 이득을 조절하여 또다른 삼각파를 발생한다. 또한 기준속도 발생기의 출력과 출력 전압의 궤환(Feedback) 값과의 오차는 PWM Pattern 발생기에서 삼각파와 비교하여 EPROM(P2764A)에 저장되어 있는 Pulse Pattern을 결정하게 된다. 이때 구형파는 18진 Counter(MC14520)의 Clock 파형으로 사용된다. 즉, 18진 Counter의 출력은 한 주기를 18등분한 3가지의 기본 Pulse Pattern이 저장되어 있는 ROM의 주소를 지정하며, 각 순간의 Pulse Pattern 종류(Pattern A, Pattern B, Pattern C)는 Pulse Pattern 발생기의 2개의 출력이 지정하는 ROM의 주소에 의해서 결정된다. 따라서 이 두개의 출력으로 말미암아

ROM 안에 저장되어 있는 3 가지의 기본 Pulse Pattern 의 Notch Angle 이 주어진 범위 (20° ~ 40°, 60° ~ 80°) 안에서 2개의 삼각파 특성에 따라 연속적인 제어가 이루어 진다.

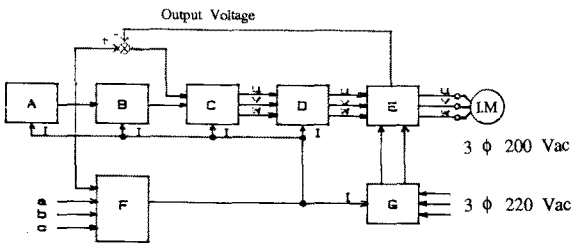


그림 12 시스템 블록 선도

- A: 기준 속도 발생기 B: 전압 / 주파수 변환기
- C: PWM Pattern 발생기 D: Tr. 구동 회로
- E: 인버터 F: 고장 검출기
- G: 정류기 a, b, c: 고장 검출 신호
- I: Inhibition

V 실험 결과

본 연구의 인버터를 高周波 電動 그라인더 (High Frequency Electric Grinder : 400 Hz, 3 φ 200 Vac, 2.7 KVA) 에 적용하였으며 400 Hz, 6극, 8000 rpm 의 능형 유도 전동기를 사용하였다. 그림 13 은 이때의 상전압파형 (U, V, W) 이며 그림 14 는 Spectrum Analyzer 에 의한 선간전압 파형의 Spectrum 을 나타내고 있다

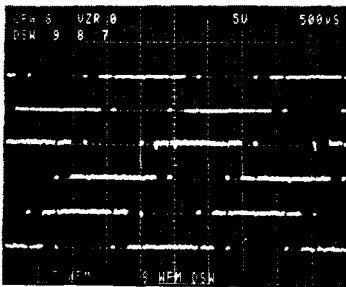


그림 13 상전압파형 (U, V, W) (400 Hz)

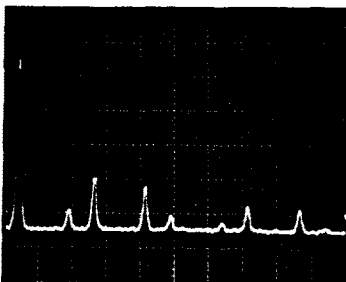


그림 14 선간 전압파형 (U-V) 의 Spectrum (400 Hz)

그림 15 는 400 Hz 에서의 전류파형을 나타낸다.

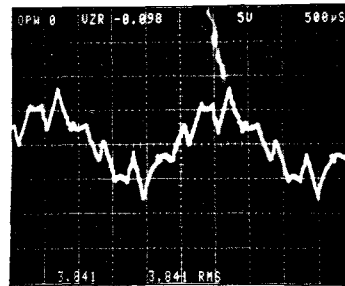


그림 15 출력 전류파형 (400 Hz)

VI. 결론

본 연구에서는 5, 7, 11 차 고조파 성분을 억제하는 PWM 인버터를 많은 메모리나 계산시간을 요하지않는 간결한 제어를 구성하여 400 Hz 용 고주파 전동 그라인더에 응용함으로써 그 실용성을 입증하였다. 여기서는 삼각파에 의한 스위칭 각 특성을 선형화하는 방법을 사용하였으며 그밖에 톱니파형 및 사다리꼴파형에 의한 선형화 방식의 시뮬레이션 결과를 비교 검토 하였다. 그중에서 사다리꼴파형에 의한 선형화 방식이 Optimal PWM 인버터 특성에 가장 유사함을 알 수 있었으며, 이경우 각 Carrier 파형의 동기를 유지시켜주면 구성이 간단하며 성능이 뛰어난 인버터를 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김 광배 외, 수직식 전동 공구 개발에 관한 연구, 한국 과학 기술원 최종 연구 보고서, 1989.
- [2] H. S. Patel and R. G. Hofl, " Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters : Part I - Harmonic Elimination, " IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-9, pp. 310-317, May/June 1973.
- [3] 김 광배 외, Microprocessor 를 이용한 전동기 제어 기술 개발, 한국 과학 기술원 최종 연구 보고서, 1984.
- [4] B.K. Bose, Power Electronics and AC Drives, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [5] 이운중, 정동화, " Optimal PWM 방식에 의한 가변속 유도 전동기의 소음 및 진동 저감 연구, " 대한 전기 학회지, 36권 2호 pp. 27 - 34, 1987.