

PWM 인버터의 출력파형 개선에 관한 연구

전희종 김국진 최영한* 유건수
 숭실대학교 현대정공(주)연구소 숭실대학교 숭실대학교

A Study on the Output Waveform Improvement of PWM Inverter

Hi-Jong Jeon Kuk-Jin Kim Young-Han Choe* Geon-Su Yu
 SOONSIL Univ. HYUNDAI Tech. Inst. SOONGSIL Univ. SOONGSIL Univ.

ABSTRACT

In this paper, two different plusewidth modulation(PWM) for inverter and voltage control technique are described.

Inverter output harmonics are harmful in induction motor drive because it lead to ripple torque and induction interference.

In order to reduce or minimize losses, various forms of PWM strategy such as PM(Positive Modulation) and NM(Negative Modulation) are discussed.

1. 서론

최근 마이크로프로세서를 이용한 제어기술의 발전은 모든 제어대상을 효율적으로 제어하는 추세에 있다. 특히 반도체의 고성능화, LSI기술의 현저한 진보에 따라 고속, 고전압, 고전류 등 높은 신뢰성의 스위칭 소자(GTO, SCR, FET, POWER TR)는 인버터제어시스템에 있어 에너지절약, 보수의 간략화, 고도의 제어성 등의 요구를 만족하게 되었으며 그 결과 전력용 반도체 소자를 이용한 교류전동기의 주파수제어를 용이하게 처리할 수 있게 되었다.^{1) 2) 3)}

그러나 이런 주파수 변환 시스템은 반도체 소자들의 ON, OFF 스위칭작용으로 많은 고조파성분이 포함되어 전동기의 손실을 증가시키고 맥동모모크 및 유도장에 등을 발생, 전동기의 특성을 변화시키는 심각한 문제를 야기한다.^{4) 5) 6)}

따라서 본 연구에서는 PWM인버터의 특정고조파제거(Particular Harmonics Elimination:PHE)를 위하여 PM(Positive Modulation)형과 NM(Negative Modulation)형에 대한 이론적 시뮬레이션을 비교 검토하고 이 결과의 타당성을 입증하기 위해 디지털처리방법으로 이를 구현해 보고자 한다.

2. PWM인버터의 고조파제거 기법

인버터의 출력파형을 개선하는 방법에는 교류필터이용, 인버터의 다중화, 인버터의 펄스폭 최적선형(PWM 방식)등 3가지로 분류된다. 본 연구에서는 PWM방식중 특정고조파제거를 위한 방식을 제안하였다.^{4) 5) 6)}

2-1. 인버터의 기본원리

그림2-1은 본 연구에서 유도전동기의 전압 및 주파수제어를 위한 PWM 인버터의 기본구성도이다.

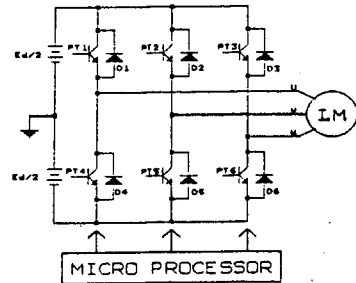
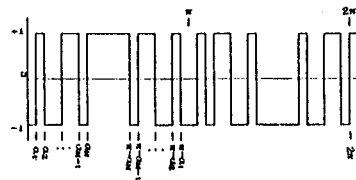


그림2-1. PWM인버터의 구성도

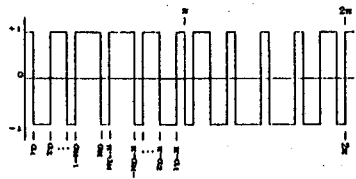
6개의 전력용MOS펌트스터(PT1~PT6)의 일정한 스위칭 패턴에 의해 전동기에 인가되는 전압 및 주파수제어가 가능하게 된다.

2-2. 특정고조파제거 및 전압제어의 수치해석

고조파제거 및 전압제어를 이론적으로 해석하기 위해 그림2-1의 출력파형이 그림2-2와 같은 바이폴라형이라고 하자. 여기서 우리는 두개의 서로 다른 Modulation방식을 제안할 수 있다. 그림2-2(a)와 같은 파형을 PM형이라 하고 그림2-2(b)와 같은 파형을 NM형이라고 하자.



(a) PM(Positive Modulation)형



(b) NM(Negative Modulation)형

그림2-2. PWM 인버터의 출력파형

여기서 PM형과 NM형의 차이점을 비교하면, PM형은 그림2-2(a)와 같이 항상 $\omega t = \pi/2$ 에서 양의 값을 가지고 NM형은 $\omega t = 0$ 가 양의 값을 가지느냐 음의 값을 가지느냐에 따라 $\omega t = \pi/2$ 의 값이 결정되어진다.

그림2-2에서 PWM 인버터의 출력파형은 Fourier급수에서 4분파대칭(Quarter wave symmetry)으로 해석이 가능하므로 식(2-1)과 같은 조건이 된다.

$$f(\omega t) = f(\pi - \omega t) \quad \dots\dots (2-1)$$

그러므로 Fourier급수로 전개하면 직류성분과 여현 성분은 0이되고 정현파성분 a_n 만 식(2-2)와 같이 남게 된다.

$$a_n = S^* \times (4/n\pi) \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos n\alpha k \right] \quad \dots\dots (2-2)$$

n:고조파차수 k=1,2,3... ,M M:효핑횟수
S*:PM형은 +1, NM형은 -1

여기서 (M-1)개의 고조파성분을 제거하고 동시에 기본파전압성분을 제어하기 위해서는 M개의 변수가 필요하다. 식(2-2)에서 기본파성분은 식(2-3)과 같이 구할 수 있다.

$$L'(a) = a_1 = S^* \times (4/\pi) \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos \alpha k \right] \quad \dots\dots (2-3)$$

여기서 효핑각 $\alpha_1 \sim \alpha_M$ 은 식(2-4)를 만족해야 한다.

$$0 \leq \alpha_1 < \alpha_2 \dots\dots < \alpha_M < \pi/2 \quad \dots\dots (2-4)$$

(M-1)개의 고조파를 제거하려면 식(2-2)는 식(2-5)와 같이 (M-1)개의 제약함수 $f_i(a) = 0$ 가 얻어진다.

$$f_i(a) = S^* \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos n_i \alpha k \right] \quad \dots\dots (2-5)$$

n_i :제거하고자 하는 고조파차수

식(2-5)을 벡터로테이션으로 표현하면 식(2-6)과 같이 된다.

$$f(a) = 0 \quad \dots\dots (2-6)$$

그리고 (M-1)개의 고조파성분을 제거하고 기본파의 성분을 동시에 제어하기 위해서는 식(2-7)과 같은 Hamiltonian함수(H)의 제어이론이 도입된다.

$$H(a, \lambda) = L(a) + \lambda^T f(a) \quad \dots\dots (2-7)$$

여기서 $\lambda^T = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{M-1}]$:Lagrange multiplier

L(a)의 고정치를 구하기 위한 필요 충분 조건은 식(2-8)과 식(2-9)와 같다.

$$f(a) = 0 \quad \dots\dots (2-8)$$

$$H(a) = \left[\frac{\partial H}{\partial \alpha_1} \frac{\partial H}{\partial \alpha_2} \dots \frac{\partial H}{\partial \alpha_M} \right] = 0 \quad \dots\dots (2-9)$$

식(2-8)와 식(2-9)은 (2M-1)개의 변수 α 와 λ 에 대해 (2M-1)개의 방정식을 준다. 그런데 이 다원1차연립방정식은 비선형연립방정식이므로 수치해석에 의해 구해 질수 있고 식(2-5)에서 기본파전압의 값을 0에서 최대 값까지 변화시키면 특정고조파제거와 동시에 전압제어

도 가능한 효핑각을 구할 수 있다.

PM형과 NM형에 있어서 고조파에 의한 손실(Harmonic Loss Factor:HLF)은 식(2-10)과 같이 구할수 있다.⁷⁾

$$HLF = \frac{100}{V} \sqrt{\sum_{n=5}^{\infty} \left[\frac{a_n}{n} \right]^2} \quad \dots\dots (2-10)$$

3. 트랜지스터 구동을 위한 Data처리

수치해석에 의해 특정고조파 및 전압제어를 위한 효핑각이 구해졌다고 하면, 그림2-1에 있는 PT_1 를 단속하기 위한 Data파형은 그림3-1과 같다.

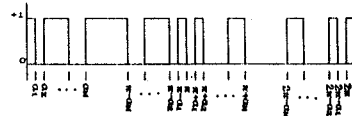


그림3-1. PT_1 의 구동을 위한 Data 파형

$PT_2 \sim PT_6$ 를 구동하기 위한 파형은 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

- 1) PT_2 파형은 PT_1 보다 위상이 120° 지연
- 2) PT_3 파형은 PT_2 보다 위상이 240° 지연
- 3) PT_4 파형은 PT_1 파형의 반전 (180° 의 위상차)
- 4) PT_5 파형은 PT_2 파형의 반전 (180° 의 위상차)
- 5) PT_6 파형은 PT_3 파형의 반전 (180° 의 위상차)

본 연구에서는 $PT_1 \sim PT_6$ 의 트랜지스터 베이스부를 구동하기 위하여 1주기(360°)에 해당하는 Data를 순람 표를 만들어 요구되는 전압에 맞게 ROM에서 인출하여 사용하는 ROM-Based방식을 사용하였다. 여기서 Data의 양은 많이 할수록 이론치에 더욱 근사한 파형을 만들 수 있다. 또한 1주기당 720개의 Data를 사용하였고 전압제어범위는 기본파 제어범위를 31%에서 100%까지로 설정하여 총 140등분하여 64K-byte(27512)EPROM에 저장하여 사용하였다.

Data를 만드는 과정에서 주의할 점은 전력용 트랜지스터의 시간지연에 의해 동시에 같은 상이 ON상태가 되어 단락상태가 될수 있으므로 ON될때의 시간지연을 고려하여 Data를 만들어 주어야 한다. 그림3-2는 이상의 과정을 고려하여 Data를 처리하기 위한 순차도이다.

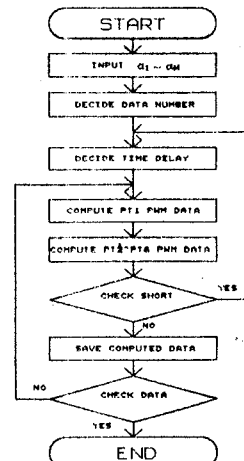


그림3-2. 트랜지스터 베이스부 구동을 위한 파형 발생 순차도

4. 하드웨어의 구성

트랜지스터 베이스구동을 위한 하드웨어의 구성은 그림4-1과 같다. 인버터의 출력주파수 및 전압을 제어하기 위해 Data가 저장되어 있는 ROM의 Address Line $A_0 \sim A_{15}$ 중 주파수 가변은 $A_0 \sim A_9$ 에서 제어되며 전압 가변은 $A_{10} \sim A_{15}$ 에서 제어된다.

인버터의 출력주파수 가변을 위해 8253(Programmable Interval Timer)를 사용하였으며 8253에 의해 가변된 구형파는 4040(Pulse Counter)의 클럭으로 입력되며 4040의 $Q_1 \sim Q_{10}$ 은 ROM Address에 출력된다.

또한 인버터의 전압 제어를 위하여 8255(Programmable Peripheral Interface)를 이용하여 ROM Address $A_{10} \sim A_{15}$ 에 해당하는 신호를 발생시킨다. 여기서 멱치(74274)의 역할은 이 Data들을 유지시켜 PWM 인버터의 전력을 트랜지스터의 Base 단자를 정확하게 구동시키며 이 멱치에서 나오는 신호는 소신호이기 때문에 버퍼회로를 사용하였다. 또한 이 버퍼회로는 제어부와 전력 시스템사이의 Ground 분리 목적으로도 사용된다.

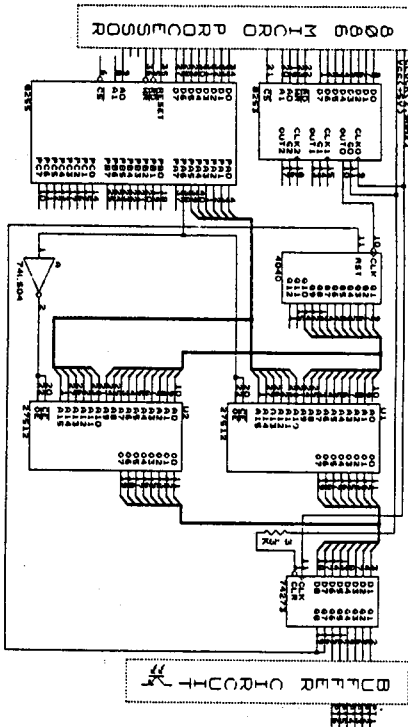
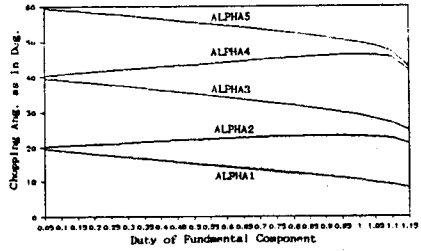


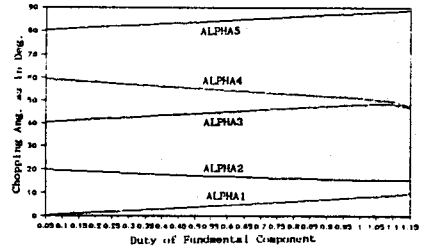
그림4-1. PWM 파형 발생을 위한 하드웨어 구성도

5. 수치해석의 결과

그림5-1은 앞절의 수치해석에 의해 구해진 PM형과 NM형에 있어서의 5, 7, 11, 13차 고조파성분의 제거시 기본파 성분의 크기에 따른 유효각 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 의 변화를 나타내고 있으며, 그림5-2는 이의 17, 19차 고조파성분의 변화를 보이고 있다. 또한 그림5-3은 고조파에 의한 손실(HLF)를 나타내고 있다.

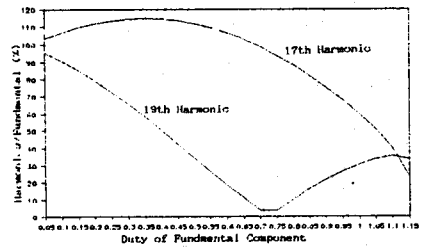


(a) PM형

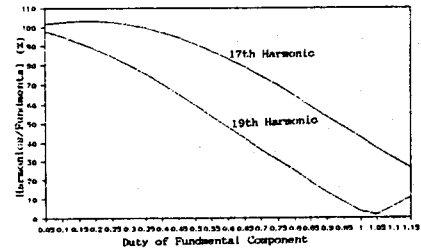


(b) NM형

그림5-1. 5, 7, 11, 13차 고조파성분의 제거시 기본파 크기의 변화에 따른 유효각의 변화



(a) PM형



(b) NM형

그림5-2. 5, 7, 11, 13차 고조파성분의 제거시 17, 19차 고조파성분의 변화

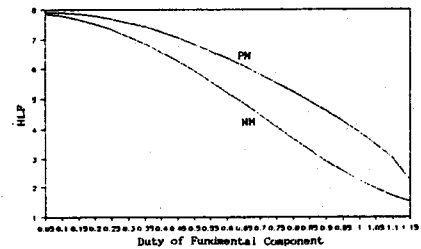


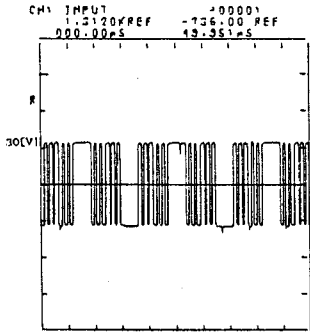
그림5-3. 5, 7, 11, 13차 고조파성분의 제거시 고조파에 의한 손실(HLF)의 변화

이와 같은 수치해석의 결과에서 보면 특정고조파제거에 있어서 제거되지 않은 나머지 고조파성분들에 의한 손실은 PM형 보다 NM형의 경우가 더 작음을 볼 수 있다.

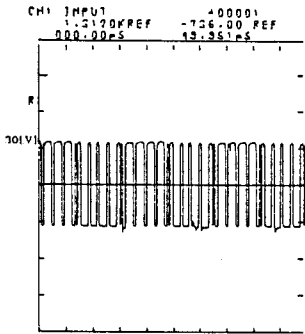
6. 실험결과 및 고찰

수치해석결과의 타당성을 입증하기 위하여 마이크로 프로세서(Intel 8086)를 이용한 디지털 처리법으로 실험을 구현해 보았다.

그림6-1은 5,7,11,13차 고조파성분제거시, 기본파 50%일때의 PM 및 NM형 출력전압파형의 결과이며, 그림 6-2는 이때의 각각에 대한 고조파분석의 결과이다.

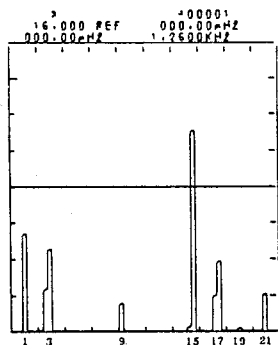


(a) PM형

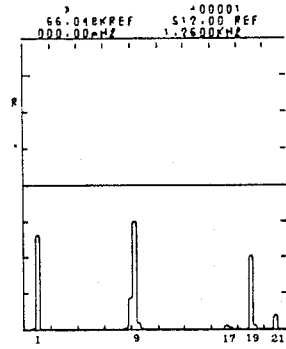


(b) NM형

그림6-1. 5,7,11,13차 고조파제거시 출력전압파형(주파수:60Hz)



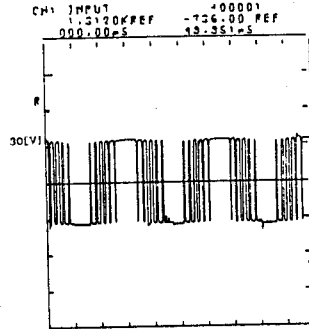
(a) PM형



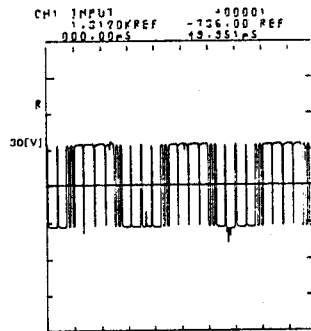
(b) NM형

그림6-2. 5,7,11,13차 고조파제거시 고조파분석(주파수:60Hz)

그림6-3은 5,7,11,13차 고조파성분제거시 기본파 100%일때의 각각의 출력전압파형의 결과이며, 그림6-4는 이때의 고조파분석의 결과이다.

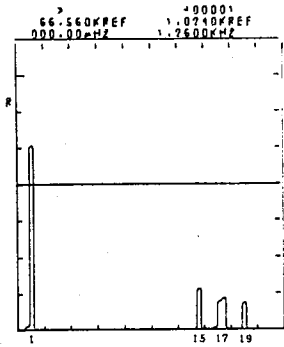


(a) PM형

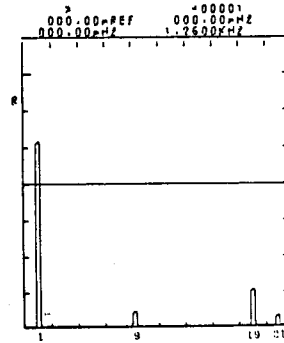


(b) NM형

그림6-3. 5,7,11,13차 고조파제거시 출력전압파형(주파수:60Hz)



(a) PM형



(b) NM형

그림6-4. 5,7,11,13차 고조파제거시 고조파분석(주파수:60Hz)

이상의 결과파형에서 전압의 변화에 따라 PM형과 NM형 모두 제거하고자 하는 고조파성분은 거의 나타나지 않음을 볼수 있었다.

그러나 NM형은 PM형에 비해 제거하고자하는 고조파 이외의 높은 차수의 고조파성분이 작게 나타나고 있으며, 이것은 수치해석의 결과와 일치함을 볼 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 산업분야에 널리 사용되고 있는 유도전동기의 전력변환을 위한 PWM인버터에 있어서 특정고조파제거 및 전압제어 기법을 이론적으로 해석하고 이를 구현해 보았다.

이 결과 PWM 인버터의 특정고조파제거(PHE)에 있어서 PM형에 비해 NM형 경우에 고조파에 의한 영향을 더 효과적으로 제거할수 있을 것으로 사료되며, 또한 이들의 데이터처리시 순탐표방식을 이용하였기 때문에 마이크로프로세서의 실행시간을 단축시킬 수 있었으며, PWM신호발생을 위한 하드웨어구성에 마이크로프로세서를 이용하여 적용성, 회로변경 및 확장성이 용이하였다. 그리고 실험을 통해 이론의 타당성을 입증할 수 있었다.

본 연구에 있어서 앞으로의 과제는 전동기의 모델에 따라 고효율의 운전을 위한 최적의 V/f비율 구하는 것과 특정고조파성분이 제거된 인버터의 출력으로 유도전동기의 가변속제어를 행하는 것이다.

참고문헌

- [1] Vithl V.Athani and Sudhir M.Deshpande, "Micro-processor Control of a Three-Phase Inverter in Induction Motor Speed Control System", IEEE Trans. IECI., Vol. IECI-27, pp291~298, Nov 1980.
- [2] Bimal K.Bose and Hunt A.sutherland, "A High-Performance Pulse Width Modulator for an Inverter-Fed Drive System Using a Micro computer", IEEE Trans. Ind.Appl., Vol. IA-19, pp235~243, Mar/Apr 1983.
- [3] YASUO MATSUDA et al, "Development of PWM Inverter Employing GTO", IEEE Trans. Vol. IA-19, pp335~342, May/June 1983.
- [4] HASMUKE S. PATEL and RICHARD G.HOFT, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters:Part I-Harmonic Elimination", IEEE Trans. Ind.Appl, Vol.IA-9,pp310~317, May/June 1973.
- [5] HASMUKE S. PATEL and RICHARD G.HOFT, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part II-Voltage Control Techniques", IEEE. Trans. Ind.Appl.,Vol.IA-10, pp666~673, Sep/Oct 1974.
- [6] F.C.ZACH and THIEL, " Pulse width modulation (PWM) Inverters for Efficiency Optimal Control of AC drives - switching and efficiency/loss profiles", in proceedings of the Third IFAC Symposium on Control in Power Electronic and Electrical Drives, Lausanne, pp231~238, 1983.
- [7] PRSAD.N.ENJELI et al, "Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics a Critical Evaluation", IEEE IAS Conf. Rec. pp418~429, 1988.