

가변속 유도 전동기를 구동하기 위한 PWM인버터의 새로운 변조 방식

윤병도* 권희중** 김국진*** 정을기● 손진근**
 *중앙대학교 **송실대학교 ***현대정공(주)연구소

A Novel Modulation Techniques for Driving a Variable-Speed Induction Motor

Byung-Do Yoon* Hi-Jong Jeon** Kuk-Jin Kim*** Eull-gi Jeong* Jin-Geun Son**
 *Chung-Ang UNIV. ** Soong-Sil UNIV. *** HYUNDAI Tech. Inst.

ABSTRACT

In this paper, an advanced PWM modulation strategy for driving a variable-speed induction motor is introduced. According to this method, the technique of efficiently eliminating harmonics component is achieved.

A switching pattern was computed making use of the near-proportionality of voltage and frequency in AC machines operating with constant flux. At low magnitudes and low frequencies of the fundamental, many more harmonics are eliminated than at high magnitudes and frequencies. In order to keep the inverter switching frequency constant over the output frequency range, chopping times diminishes as the frequency of the fundamental increases.

인버터의 스위칭 패턴을 구하기 위해 이론을 근거로 하여 시뮬레이션을 행하고, 이를 실험을 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. PWM 인버터의 스위칭 패턴 계산

인버터에 대한 출력파형을 반주기내에서 복수개의 펄스로 분할하여 각각의 펄스폭을 제어함으로써 출력전압의 제어 및 출력파형을 개선하는 방법에는 여러 방식이 제안(5)(6)되고 있으나, 본 연구에서는 최적의 펄스 폭을 이론적 시뮬레이션을 통해 산정하여 EPROM에 저장한 후 이를 인출하는 방식을 적용한다.

1. 서론

전력용 반도체 소자의 발전은 전력 변환기의 발달을 가속화 시켰으며 이것은 다시 반도체 디바이스의 보다 진보된 형태로의 발전을 촉진시키고 있다. 특히 인버터의 기술 개발은 유도 전동기의 정속 운전을 광범위한 가변 구조 시스템으로 전환 가능케 하였다. 가변속 유도 전동기의 제어를 위한 시스템에는 자기소호형 반도체 소자를 사용한 PWM인버터가 주로 사용되고 있다. 이 인버터는 가변 전압과 가변 주파수(VVVF)의 출력을 동시에 제어하여 자속을 일정하게 유지해 광범위한 가변속 운전에 대하여 전동기의 효율, 역률의 저하없이 속도를 제어한다. 이것은 또 특정고조파를 제거 혹은 감소 시킬수 있는 이점이 있으므로 교류 전동기의 속도 제어와 최대 토크 운전에 많이 쓰이고 있다. 따라서 특정 고조파를 제거하거나 감소 시킬 수 있는 여러 방식들이 제시되고 있다. (1)(2)(3) 이러한 연구들은 출력파형의 정현파 특성 개선을 그 목적으로 하고 있다.

본 연구에서는 스위칭 소자의 ON, OFF 작용으로 인한 고조파 성분의 제거 및 보다 효과적인 가변속 유도 전동기를 구동하기 위한 기존의 PWM 방식과는 다른 PWM 변조 방식을 제시 하였다. 본 방식은 전력용 트랜지스터를 사용하여 스위칭 주파수의 일정 한계내에서, 저주파 출력에서는 스위칭 횟수를 늘려서 동작시키고 반면 고주파 출력에서는 낮은 스위칭 횟수로 동작하게끔 하는 다단 변조 방식으로서 인버터 출력단에서의 고조파 성분을 효과적으로 제거하고자하는 방식이다.

2-1. 인버터의 기본원리

본 연구에서는 전압제어를 위한 주 회로의 구성이 간단하고 저차 고조파의 제거가 유리한 전압형 인버터를 사용하였으며 그 구성은 그림1과 같다.

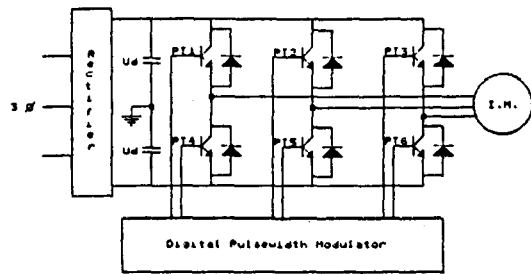


그림1. 전압형 PWM인버터의 구성도

기본 전압에 대한 스위칭 해를 갖는 디지털 펄스폭 변조기를 통하여 6개의 전력용 트랜지스터(PT1 ~ PT6) 배이스를 구동하며 각 상에 대해서 120° 만큼 위상을 지연시켜 구동한다.

2-2. 특정한 고조파 제거의 이론적 해석

그림1에서의 인버터 출력파형을 그림2와 같이 $\pi/2$ 에서 대칭인 4분파 대칭으로 가정한다.

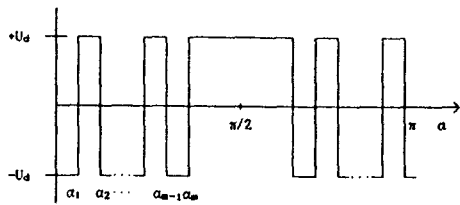


그림 2. 인버터의 전압 출력 파형

여기서 펄스의 크기는 $\pm U_d$ 이고 $0 \sim \pi/2$ 사이의 스위칭 수 $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 일때 스위칭 각 α_i 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 \dots < \alpha_{m-1} < \alpha_m < \pi/2 \quad \dots \dots (1)$$

그림 2의 출력전압을 Fourier 급수로서 전개하여 고조파 전압의 크기를 구하면 다음식과 같다.

$$U_k = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} (u_a) \sin k\alpha \, d\alpha = \frac{4U_d}{k\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos k\alpha_i \right] \quad (2)$$

이 식은 설정 가능한 α 의 값이 m 개이고, m 개의 자유도를 갖는다. 따라서 필요하다면 $m-1$ 개의 저차 고조파 제거가 가능하며 이식에서 $k=1$ 인 기본파 전압의 크기는 다음 식과 같이 표현된다.

$$U_1 = \frac{4U_d}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos \alpha_i \right] \quad \dots \dots (3)$$

식(1)과 식(3)에서 기본파 전압의 출력범위는 식(4)를 만족한다.

$$0 \leq U_1 \leq 4U_d/\pi \quad \dots \dots (4)$$

식(4)에서 기본파의 크기는 $0 \leq U_1 \leq 1.27 U_d$ 가 된다. 식(3)에서 규격화(normalize)한 기본파의 크기는 식(5)로 표현된다.

$$U_1(\alpha) = 1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos \alpha_i \quad \dots \dots (5)$$

1/4주기당 인버터의 스위칭수 m 대하여 $(m-1)$ 개 고조파 성분을 제거한 방정식은 식(6)과 같이 $n=(m-1)$ 개의 방정식이 얻어진다.

$$f_n(\alpha) = 1 + 2 \sum_{i=1}^m (-1)^i \cos k\alpha_i = 0 \quad \dots \dots (6)$$

$(n = 1, 2, \dots, m-1)$

이 방정식은 비선형이므로 이의 해를 구하기위해 본 연구에서는 Newton Raphson의 수치해법 이론을 적용하였다.

2-3. 가변속 운전을 위한 스위칭 패턴의 계산

유도 전동기를 가변속 운전할 때 정모모드 운전 영역에서는 일정 자속을 유지해야 한다. 이때의 일정 자속을 위한 V/f특성은 그림3과 같다. 그림3의 낮은 전압과 낮은 주파수 영역에서는 높은 주파수 영역보다 더 많은 스위칭 수를 허용하므로 다단 변조 방식이 가능하게 된다.

따라서 본 연구에서는 스위칭 소자의 최대 허용 스위칭 주파수를 300[Hz]로, 각 단의 스위칭 수는 $m = 23, 13, 9, 7, 5, 3, 1$ 로 선택한 7-step 다단 방식을 채택하였으며

이의 인버터 주파수에 대한 스위칭 주파수(변조 주파수)를 그림4와 같이 나타내었다.

그림5는 앞절에 의하여 각 전압에 대한 스위칭 각을 구한 후 그림3과 그림4에 의해 각 단계에서의 주파수에 대한 스위칭 해를 결정한 스위칭 패턴의 예이다.

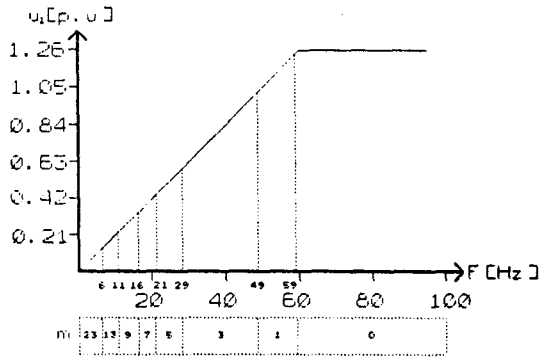


그림 3. 일정 자속에 대한 V/f특성

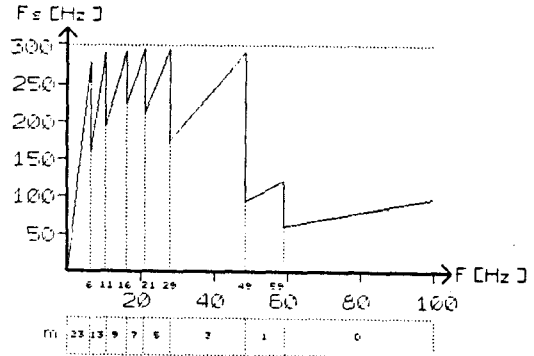


그림 4. 주파수에 대한 인버터의 스위칭 주파수

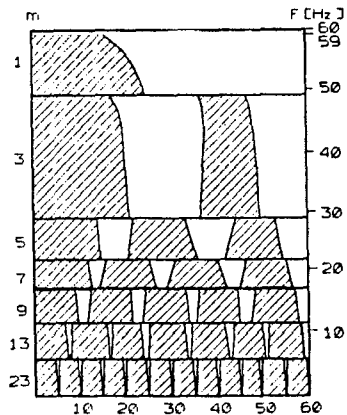


그림 5. PWM인버터 제어용 위한 스위칭 패턴
(빛금친 부분: $-U_d$ 에서 동작, 빛금치지 않은 부분: $+U_d$ 에서 동작)
(가로축: 스위칭 각, 세로축: V/f일정에 의한 1/4 주기당의 초핑의 수)

3. 실험장치의 구성

그림6은 PWM 파형발생을 위한 블록 다이어그램을 나타낸다. 주 프로세서로는 INTEL社의 8086 16Bit μ -processor를 사용하며, 인버터의 가변전압과 가변주파수를 제어하기 위하여 스위칭 정보가 저장되어 있는 EPROM의 16개 Address Line을 분할하여 사용한다. 이때의 가변 주파수 출력은 Programmable Interval Timer(INTEL 8253)를 사용하고 이에 의해 가변된 구형파는 4040(Pulse Counter)의 클럭으로 입력되어 EPROM Address에 출력된다. 또한 가변전압의 출력 제어를 위하여 Programmable Peripheral Interface(INTEL 8255)를 이용하여 EPROM Address에 신호를 출력한다.

그리고 본 연구에서 사용한 EPROM은 27512(64K byte)를 사용하였으며 앞절의 수치해석에 의하여 얻은 스위칭 정보를 디지털 계수처리하여 ROM에 저장하였다. 이때의 Data처리는 360°의 한 주기를 0.5°씩 분해하여 720개의 Data를 사용하였으며, 만일 더욱 분해도를 높인다면 보다 정확한 출력 파형의 결과를 얻을 수 있다. 또한 스위칭 정보를 처리할 때에는 전력용 트랜지스터의 ON, OFF 동작시 시간지연을 고려하여 같은 상의 스위칭 소자가 단락되지 않도록 주의할 요하며, EPROM에 저장된 모든 스위칭 정보는 Buffer를 통하여 PWM인버터의 트랜지스터 베이스를 구동하게 된다.

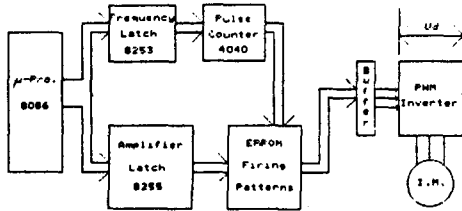
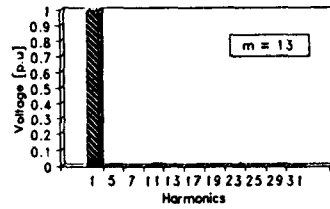
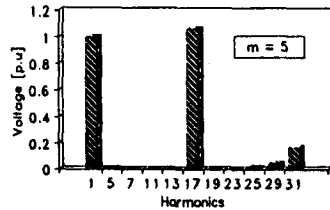


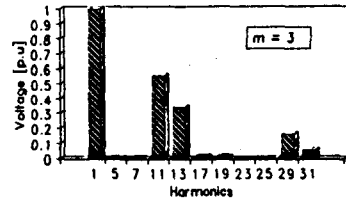
그림 6. PWM 파형 발생을 위한 블록 다이어그램



(b) $m = 13$ 인 경우



(c) $m = 5$ 인 경우



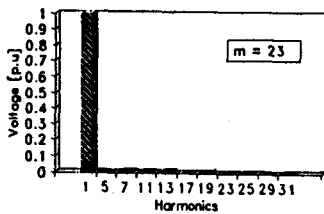
(d) $m = 3$ 인 경우

그림 7. $m = 23, 13, 5, 3$ 일때의 고조파 분석

4. 시뮬레이션 및 실험의 결과

4-1. 시뮬레이션의 결과

스위칭 패턴을 결정한 후 식(2)로부터 각각의 차수에 대한 고조파 성분의 분석을 시뮬레이션할 수 있으며 그 결과는 그림7과 같다.

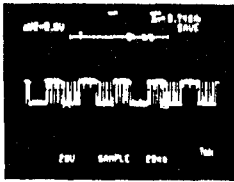


(a) $m = 23$ 인 경우

이와 같은 시뮬레이션의 결과에서 보면 스위칭 수 m 에 따라 $(m-1)$ 개의 특정고조파가 제거됨을 알 수 있다. 또한 이의 결과는 4분파 대칭의 파형에서는 짝수 고조파는 나타나지 않으며 대칭적 3상 부하에 있어서는 3차 배수배의 고조파는 존재하지 않으므로 단지 $6 \cdot 1 \pm 1$ ($1 = 1, 2, 3, \dots$)차 고조파만을 고려해도 된다. 즉, $(m-1)/2$ 를 1로 놓으면 $m=23$ 인 경우에는 67차 고조파까지 제거되고, $m=13$ 인 경우에는 37차 고조파를 제거할 수 있다. 이는 스위칭 패턴이 허용하는 한 스위칭 횟수를 늘려 보다 효과적으로 고조파가 제거됨을 알 수 있다.

4-2. 실험의 결과

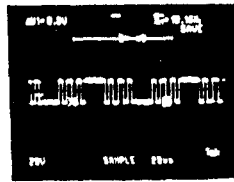
시뮬레이션의 결과를 입증하기 위해 마이크로 프로세서를 이용하여 실험을 행하였으며 그 결과는 그림8에서 그림11까지와 같다.



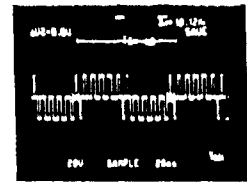
(a) 상 전압



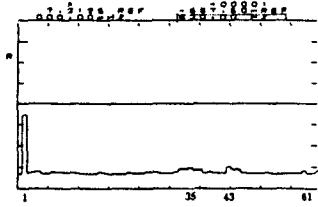
(b) 선간 전압



(a) 상 전압

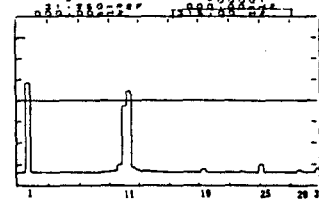


(b) 선간 전압



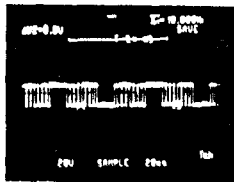
(c) 고조파 분석파형

그림8.μ = 23인 경우의 실험 결과파형

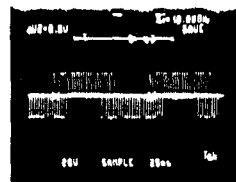


(c) 고조파 분석파형

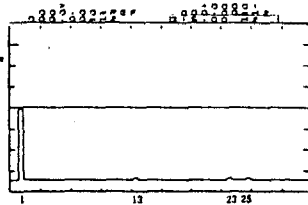
그림11.μ = 3인 경우의 실험 결과파형



(a) 상 전압

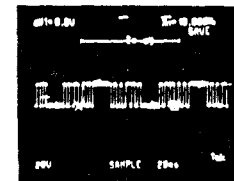


(b) 선간 전압

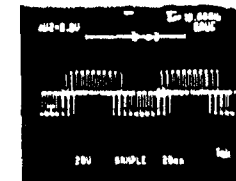


(c) 고조파 분석파형

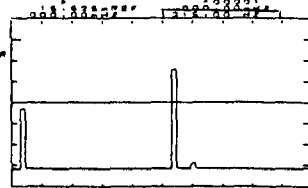
그림9.μ = 13인 경우의 실험 결과파형



(a) 상 전압



(b) 선간 전압



(c) 고조파 분석파형

그림10.μ = 5인 경우의 실험 결과파형

이상의 실험 결과파형에서도 원하는 특정고조파가 모두 제거되었으며, 또한 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. 각각의 그림(a),(b)에서는 입력 전압과 주파수가 화면에 표시되었고 (c)는 동일한 입력조건이며 주파수의 전체 SPAN이 화면 상단에 표시되고 있다.

5. 결론

최근의 전력 변환장치 기술 발전과 더불어 반도체 소자를 이용한 인버터의 가변 구동은 그 적용 범위가 FA용 설비에서 산업용 기계설비 그리고 가정용 기기에 까지 확대되었다. 그러나 아직도 사용자 측면에서는 전동기에서 발생되는 전자적소음 저감, 토크오 맥동의 저감 및 저속 운전시 토크증대와 속도제어 향상이 요구되고 있다.

본 연구에서는 가변속 유도 전동기를 구동함에 있어서 인버터의 출력파형 개선을 위해 스위칭 패턴에 의한 다단 변조방식을 채용하여 고조파 성분을 보다 효과적으로 제거할 수 있도록 실험을 통하여 구한해 보았다. 그 결과 입력 전압의 크기에 상관없이 스위칭 수를 일정하게 유지하여 특정고조파를 제거하는 방법보다 더 효과적이라고 판단되며, 마이크로 프로세서에 의한 디지털 처리기법을 적용하여 실행시간 단축 및 적응성을 용이하게 하였다.

향후 과제는 고조파제거를 위한 스위칭 헤의 디지털 처리에 대한 보다 높은 분해능의 적용과 인버터 출력으로 부터 유도전동기의 가변속 제어를 행하는 것이다.

참고문헌

- (1) Randall, d. Adams, "Several Modulation Techniques for a PulseWidth Modulated Inverter", IEEE Trans., Vol. IA-8, NO. 5, pp636-643, 1972

- (2) Shashi B. Dewan, "Harmonic analysis of a synchronized Pulse Width-Modulated Three Phase Inverter", IEEE Trans., Vol. IA-10, NO.1, pp117-122, 1974
- (3) G.S. Buja and G.B. Indri, "Optimal Pulse width modulation for feeding AC motors", IEEE Tran., Vol. IA-13, pp38-44, 1977
- (4) G.B. Kliman and A.B. Plunkett, "Development of a modulation Strategy for a PWM inverter drive", IEEE Tran. Ind. Appl., Vol IA-15, pp72-79, 1979
- (5) Thomas A. Lipo, "Analysis and Comparison of Two Types of Square-Wave Inverter Drives", IEEE Trans., Vol. IA-11, NO. 2, 1975
- (6) Bowes, S.R, "New Sinusoidal pulse width-modulated inverter", Proc. IEEE, Vol. 122, No. 11, pp1279-1285, 1975
- (7) H.S. Patel and R.G. Hoft, "Generalized techniques of harmonic elimination", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol IA-9, pp310-319, 1973