

전압형 PWM 인버터의 고조파 영향을 저감하기 위한
준최적 스위칭 방식

이 문중 한양대 서 기영 경남대
정 동화*한양대 오 원석 한양대

SubOptimal Switching Strategy
for Decreasing Harmonic Effects
of Voltage Type PWM Inverter

Yoon-Chong Lee Han Yang Univ.
Ki-yung Seo Kyung Nam Univ.
Dong-Hwa Chung* Han Yang Univ.
Won-Seok Oh Han Yang Univ.

1. 서 론

전압형 PWM 인버터는 전압 및 주파수를 동시에 제어할 수 있고 고조파영향을 저감시킬 수 있는 장점 때문에 UPS(Uninterruptable Power Supply)(1), SFC(Static Frequency Changer)(2) 및 VSD(Variable-Speed Drive)(3) 등에 적용되어 일반 산업계에 크게 각광을 받고 있다.

최근에 와서 새로운 고속 스위칭 소자(Fast-switching thyristor, GTO, Power ITR, MOSFET 등)의 개발과 LSI 기술진보로 인해 Microprocessor를 이용한 PWM 제어는 특히 VSD에 많이 응용되어 제어성향상 및 효율향상, 신뢰성 및 저가격화가 한창 이룩되고 있는 실정이다. (4)

이러한 PWM 제어는 3상 유도전동기의 VSD를 위한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되어 왔고(5)-(12) 그 진가의 중요성도 유감없이 발휘되고 있으며 Microprocessor를 사용함으로써 더욱 더 강력하고 다양성 있는 기술이 실현될 수 있는 가능성을 제시해 주었다. 그러나 인버터는 반도체소자로 구성되어 있으므로 이러한 소자의 온, 오프 스위칭 작용으로 많은 고조파가 포함되어 전동기의 손실(9)-(10), 토오크 맥동(11), 전자기적 소음 및 진동(12)의 원인이 된다. 따라서, 이러한 문제는 유도전동기를 가변속 운전할 때 가장 중요한 문제로서 무엇보다도 먼저 해결되어야 할 필수적인 것이라 할 수 있다. 이러한 문제를 해결하려는 노력이 많이 경주되어 왔으며 그림 1.1에서 상세히 알 수 있다.

Optimal PWM 방식은 인버터의 스위칭 작용으로 나타나는 고조파영향 즉, 고조파 손실, 토오크 맥동, 전자기적 소음 및 진동을 최소화 시켜 최적 스위칭패턴을 결정하게 되는데 이때 스위칭각을 개선하는 계산시간이 스위칭 수 M의 증가에 따라 기하급수적으로 증가하게 되어 정확한 스위칭 패턴을 결정하기가 어렵게 되어 일반 산업계의 적용에 많은 제한을 받아왔다. 따라서 본 연구에서는 Optimal PWM 방식의 스위칭 패턴을 결정할 때 스위칭수 M의 증가에 따라 집중적인 문제점이었던 계산시간 문제와 정확한 스위칭 패턴 결정을 해결하기 위하여 Bowers의 Regular PWM 방식(6)을 응용하고 Optimal 기법을 적용하여 스위칭 패턴을 용이하게 결정할 수 있도록 하였으며 스위칭 수 M이 무한히 증가하더라도 스위칭 패턴을 구할 수 있도록 하였다.

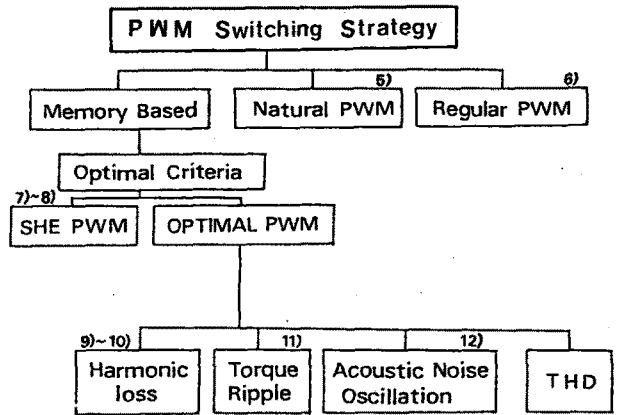


그림 1.1 PWM 스위칭 방식

또한 power TR로 구성된 전압형 인버터를 설계하였고 이를 이용하여 실제 3상 유도전동기를 가변속 운전시켜 인버터의 선간전압 및 전류파형, 전류 스펙트럼, 그리고 고조파의 영향인 소음레벨을 측정하였으며 그 결과로 나타나는 특성들은 종래의 타방식과 비교, 검토하여 본 최적 PWM 방식의 타당성을 입증할 수 있었다.

2. 준 최적 스위칭 방식

2.1 Optimal PWM 방식의 특성

그림 2.1은 $\pi/2$ 에 대해 대칭인 반파대칭으로 가장한 인버터의 선간전압이며 플스의 크기는 +Ud이다.

그림 2.1에서 스위칭각 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$ 은 식(2.1) 조건을 만족한다.

$$0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2, \dots, \leq \alpha_M < \pi/2 \quad (2.1)$$

여기서 M은 0 ~ $\pi/2$ 사이의 스위칭 수이며 전압 피크치를 Fourier 급수로 전개하여 정리하면 식(2.2)와 같다.

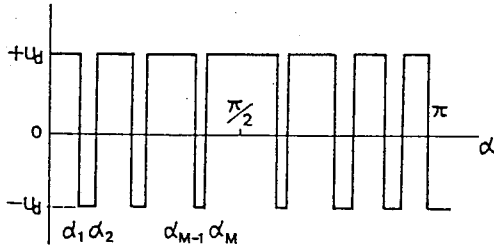


그림 2.1 PWM 파형

$$U_k = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} U_d(\alpha) \sin k\alpha d\alpha$$

$$= \frac{4U_d}{k\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^M (-1)^i \cos k\alpha_i \right] \quad (2.2)$$

식(2.2)에서 $K=1$ 인 기본파 전압의 크기는 식(2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_1 = \frac{4U_d}{\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^M (-1)^i \cos \alpha_i \right] \quad (2.3)$$

식(2.1)과 식(2.3)에서 기본파 전압의 출력범위는 식(2.4)와 같다.

$$0 \leq U_1 \leq \frac{4U_d}{\pi} \quad (2.4)$$

전동기에서의 고조파 영향 즉, 고조파의 손실, 토크 맥동, 전자기적 소음 및 진동을 평가함수로 정하고 이를 최소화하는 스위칭 패턴을 결정하였는데 이때 고조파 영향들은 고조파 전류에 기인됨을 확인하였다. 따라서, 이 고조파 영향을 대표하는 일반적인 평가함수를 THD(Total Harmonic Distortion)로 정할 수 있으며 이 THD는 식(2.5)와 같이 표현할 수 있다.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{k=5}^{\infty} I_k^2}{I_1}} \quad (2.5)$$

고조파 전류 I 는 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_k = \frac{U_k}{KX} \quad (2.6)$$

식(2.2), (2.5) 및 (2.6)은 서로 상호 연관된 식으로 되어 있으므로 최적화 기법을 적용하여 최적 스위칭 패턴을 결정할 수 있으며 그 결과의 예는 그림 2.2와 같다.

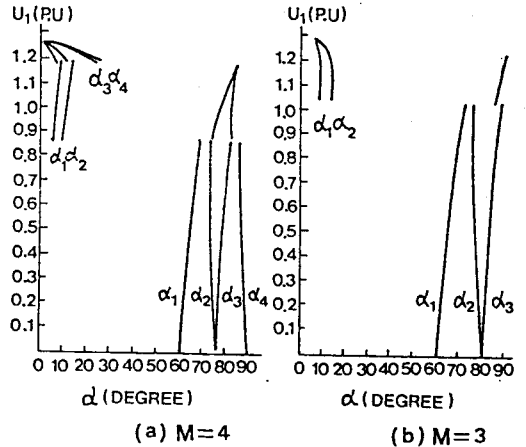


그림 2.2 U1에 대한 스위칭각

2.2 준 최적 스위칭 방식의 이론

그림 2.1의 optimal PWM 파형의 특징이 π 에 대해 점대칭이고 $\pi/2$ 에 대해 선대칭인데 이러한 PWM 파를 좀 더 용이하게 결정하기 위해 Regular PWM 방식을 기초로하여 optimal 기법을 적용한다.

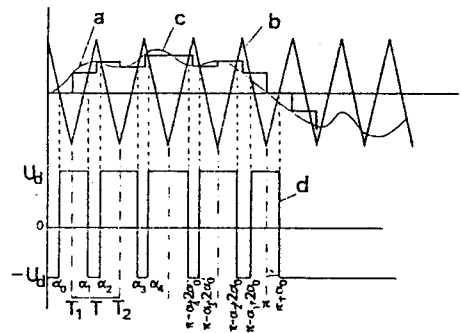


그림 2.3 준최적 스위칭 방식의 변조

그림 2.3은 준최적 PWM 방식을 얻기 위한 변조방식을 나타낸 것인데 여기서 a는 임의의 비정현파라고 가정하여 $e(t)$ 라 하고 변조파 c를 만드는데 사용한다.

c와 b를 중첩, 비교하여 함수 $f(t)$ 의 새로운 optimal PWM파의 스위칭각 α 를 결정하게 된다.

그림 2.4에서 스위칭각 α 는 식(2.7)과 같다.

$$\alpha_{2i} = T_{2i} + \frac{T}{4} [1 - g(T_{2i})] \quad (2.7)$$

$$\alpha_{2i+1} = T_{2i} + \frac{T}{4} [1 + g(T_{2i} + T)]$$

여기서, $i=0, 1, 2, \dots$ 이며 T 는 각도로 표시되고 그림 2.3에서 $\alpha(T_0) = 0$ 이면 $\alpha_0 = T_0 + T/4$ 가 되고 $T_0 = 0$ 일 때 $\alpha_0 = T/4$ 가 된다. 그림 2.4에서 $T/4$ 만큼 이동시키면 식(2.7)은 식(2.8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{2i+1} &= T_{2i+1} - \frac{T}{4} g[T_{2i+1}] \\ d_{2i+1} &= T_{2i+1} + \frac{T}{4} g[T_{2i+1}] \end{aligned} \quad (2.8)$$

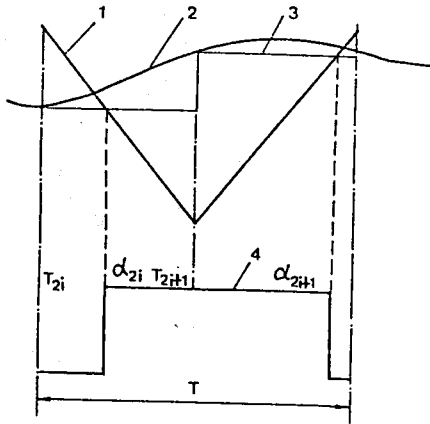


그림 2.4 준최적 PWM 방식

식(2.8)을 일반적인 형태로 표현하면 식(2.9)와 같다.

$$d_i = T_i + (-1)^{i+1} g(T_i) \quad (2.9)$$

$(i = 1, 2, \dots, M)$

식(2.2)에서 $U_d = 1$ (p.u)라 할 때 식(2.10)과 같이 표현할 수 있다.

$$U_k = \frac{4}{k\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^M (-1)^i \cos kd_i \right] \quad (2.10)$$

식(2.9)에서 $\alpha(T_i)$ 만 일반적인 형태로 결정할 수 있다면 α 는 쉽게 결정될 수 있다. 따라서 식(2.10)을 식(2.6)에 대입하고 다시 이를 식(2.5)에 대입하여 THD가 최소가 되는 $\alpha(t)$ 를 구하면 식(2.11)과 같다.

$$g(t) = MD \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{4} \sin(3\omega t) \right] \quad (2.11)$$

식(2.11)을 식(2.9)에 대입하여 쉽게 준최적 스위칭 패턴을 결정한다.

3. 결 론

본 연구에서는 optimal PWM 방식의 문제점인 스위칭 패턴 결정시 계산시간 문제와 정확한 스위칭 패턴을 구하기가 어려웠던 점을 해결하기 위하여 준최적 스위칭 방식을 제시하여 쉽고 용이하게 스위칭 패턴을 결정할 수 있었다. 이러한 스위칭 패턴으로 실제 3상 유도전동기를 가변속 운전시켜 종래의 타 방식과 비교, 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) Bowes씨의 Regular PWM 방식을 기초로 optimal 기법을 적용하여 스위칭 패턴을 용이하고 정확하게 결정할 수 있었다.
- 2) 스위칭 수 M이 증가함에 따라 본 준최적 PWM 방식은 고조파영향을 비교해보면 optimal PWM 방식과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었고 Natural, Regular, SHE PWM 방식보다도 양호함을 알 수 있었다.
- 3) Optimal PWM 방식의 잠재적인 문제점인 스위칭 패턴의 결정시 엄청난 계산시간 문제를 해결할 수 있었다.
- 4) 높은 주파수비와 인버터의 동작 주파수에서 본 준최적 PWM 방식을 사용하기가 가능하므로 PWM 주파수 범위를 확장할 수 있었다.
- 5) Microprocessor의 On-Line, Real Time 실현가능성을 예측할 수 있었다.

따라서, 전압형 PWM 인버터가 앞으로 많이 사용되어질 때 일반 산업계에서도 본 방식의 적용이 가능하리라 생각되며 많은 잇점을 얻을 수 있으리라 기대해 본다.

Reference

- 1) F.D.Ziogas, "Optimum voltage and harmonic control PWM techniques for three phase static UPS systems", in conf. Rec., IAS 1979, pp. 370-374.
- 2) Bowes, S.R., et al, "Transient performance of Inverter systems", IEE Proc. B, Elec. Power Appl., 1982, 129(6), pp. 301-314.
- 3) Bowes, S.R., et al, "Digital computer simulation of variable speed PWM inverter-machine drives", IEE Proc. B, Elec., Power Appl., 1983, 130(3), pp. 149-160
- 4) 難波江章, "最近の可変速電動機の技術動向", 電氣學會雜誌, 103卷(9號), pp. 869-870, 昭58-9.
- 5) A Schonung and H. Stemmler, "Static frequency changer with 'subharmonic' control in conjunction with reversible variable-speed AC drive", Brown Boveri Rev., 1964
- 6) Bowes, S.R., et al, "New sinusoidal pulse width-modulated inverter", Proc., IEE, Vol. 122, NO. 11, November, 1975, pp. 1279-1285.
- 7) Patel, H.S., and Hoft, R.F., "Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverter: part I-Harmonic elimination" IEEE Trans., IA-9, pp. 310-317, 1973
- 8) Patel, H.S., and Hoft, R.F., "Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverter: part II-Voltage control techniques" IEEE Trans., IA-10, pp. 666-673, 1974.
- 9) G.S. Buja and G.B. Indri, "Optimal pulse width modulation for feeding AC motors", IEEE Trans., Vol. IA-13, pp. 38-44, 1977.
- 10) 李允鍾, 鄭東和, "3相誘導電動機の運転을 위한 Optimal PWM에 관한研究.", 大韓電氣學會誌, Vol. 34, NO. 9, pp. 28-35, September, 1985.
- 11) 李允鍾, 鄭東和, "可變速3相誘導電動機の 두오크脫動 最小化를 위한 Optimal PWM 방식", 大韓電氣學會誌, Vol. 35, NO. 6, pp. 9-11, June, 1986.
- 12) 李允鍾, 鄭東和, "Optimal PWM 방식에 의한 可變速 誘導電動機の 騒音 및 振動 低減 研究" 大韓電氣學會, Vol. 36, NO. 2, pp 27-34, 1987.