

3상 전압형 인버터를 구동하기 위한 SHE PWM의 최적 스위칭 패턴

이 문 종 한양대학교 . 정 등 화 한양대학교 .
 김 혁 주 *

Optimal Switching Pattern of SHE PWM for drive
 Three Phase Voltage Type Inverter

Yoon Jong Lee Hanyang Uni. Dong Wha Chung Han Yang Uni.
 Kim Hyenk Ju "

This paper is proposed the optimal switching pattern of selected harmonic elimination (SHE PWM). It defined harmonic elimination band (HEB) to find the solution of Constant Voltage (CV), and sought all solutions which we are included HEB. Then, it calculated generalised klirr factor (GKF) by this solution and decided optimal switching pattern is used as initial conditions of newton raphson (NR) method to decide switching pattern at variable voltage (VV).

This strategy is applied to 1HP three phase induction motor. From the result, the validity of theoretical proposition can be verified.

1. 서론

PWM 인버터는 직류전압을 일정하게 유지하여 가변전압, 가변주파수의 출력을 얻을 수 있으며, 출력에 포함되는 고주파 성분을 제거 또는 감소시킬 수 있는 등의 잇점 때문에 최근, 교류 전동기의 주파수 제어 등에 많이 응용되어지고 있다.^{1)~3)}

PTR (Power Transistor) 등의 자기소모 능력을 갖는 소자를 이러한 PWM인버터 등의 회로에 응용할 경우, 자기소모 능력을 갖지 않는 일반 싸이리스터 회로와 비교하여 전류회로가 필요하지 않으므로 회로가 간단하고 고주파화가 가능하며, 또한 연구 단락이 없으므로 회로 동작내의 잡음 특성도 개선될 수 있어 소형, 경량, 고효율 및 고성능도 가능하다. 마이크로 프로세서 등을 이용한 디지털 제어 기술의 발전으로 비교적 소용량 분야에는 PTR을 이용한 PWM인버터가 싸이리스터를 이용한 것 보다 많이 응용되어지고 있다.³⁾

그러나, 인버터는 PTR 등의 스위칭작용으로 고주파가 포함되어 부하인 전동기에 고주파 손실, 토오크 맥동, 전자기적 잡음 및 맥동 등의 문제를 야기시킨다.⁴⁾

이를 해결하기 위하여 종래의 Natural⁵⁾Regular PWM⁶⁾의 최적화 기준에 의한 SHE(Selected Harmonic Elimination)^{7)~8)}, Optimal PWM⁹⁾이 연구되어 왔다.

이중 SHE PWM은 인버터 스위칭주파수를 증가 시킬 때 제거시킬 수 있는 고조파도 증가하기 때문에 전동기의 저속운전 범위에서는 유용한 방식이었으나 전동기의 고속 범위에서는 인버터의 한계 스위칭주파수 내에서 안정운전을 하기 위하여 스위칭수를 감소시키게 되는데 이때 제거되는 고조파수도 매우 적어지게 되어 전동기에 고조파의 영향을 미치게 된다.

그리고, 스위칭 패턴을 결정하는 방정식을 NR (Newton-Raphson)법으로 해를 구하려고 할 때 초기조건을 결정이 매우 어렵고, 계산 시간도 많이 소요 된다.¹⁰⁾

계산시간 문제를 해결하기 위하여 근사 SHE¹¹⁾ 방식이 연구되어 마이크로 프로세서의 On Line, Real time도 가능하지만 결과의 해가 근사해이기 때문에 약간의 오차가 나타나게 된다.

본 연구는 SHE PWM의 정밀한 최적 스위칭 패턴의 한 방식으로 CV(Constant Voltage)에서 HEB(Harmonic Elimination Band)를 정하여 이 HEB에 속하는 모든 해를 구한 다음, 이 해에 해당하는 GKF(Generalized Klirr Factor)를 계산하여 GKF가 최소가 되는 최적 스위칭 패턴을 결정하였다.

이때 계산된 최적 스위칭 패턴의 해를 Nr 법의 초기조건으로 하여 VV(Variable Voltage)의 스위칭 패턴을 용이하게 결정할 수 있도록 하였다.

이러한 이론적 제안의 타당성을 입증하기 위하여 PTR로 구성된 인버터를 설계하여 1(HP) 3상 유도 전동기를 가변속 운전시켜 보았다. 이때 나타나는 결과들을 비교 분석하여 제시하였다.

3상 전압형 인버터를 구동하기 위한 SHE PWM의 최적 스위칭 패턴

2. SHE PWM의 최적 스위칭 패턴

SHE PWM은 저차 고조파를 선정하여 선정된 고조파를 제거하여, 스위칭 패턴을 결정하는 방식으로 CV(Constant Voltage)와 VV(Variable Voltage)가 있다. CV는 전압이 일정하며 자유도가 M으로 M개의 고조파를 제거하며 VV는 전압이 변화되며 (M-1)개의 고조파를 제거한다.

2.1 SHE PWM의 비선형 방정식의 해법

그림 1은 인버터의 상전압을 $\pi/2$ 에 대해 대칭인 반파대칭으로 가정하며 여기서 펄스의 크기는 $+U_d$ 이고 스위칭각은 $0 \sim \pi/2$ 사이의 스위칭수 $i=1, 2, \dots, M$ 이며 다음 조건을 만족한다.

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M < \pi/2 \quad (1)$$

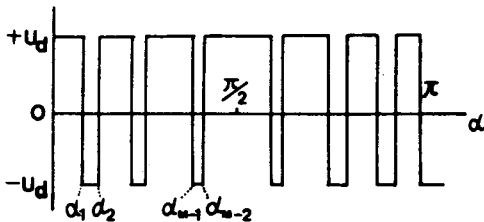


그림 1 인버터의 PWM 파형
Fig.1 PWM Waveform of Inverter

그림 1의 인버터의 상전압을 Fourier 급수로 전개하여 고조파전압의 크기를 구하면 식(2)와 같다.

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

CV에서 1/4주기당 스위칭수 M에 대해 M개의 고조파를 제거 (Zero)한 방정식은 다음과 같다.

$$f_n(\alpha) = 1 + 2 \sum_{i=1}^M (-1)^i \cos k_n \alpha_i = 0 \quad (3)$$

여기서 $n=1, 2, \dots, M$ 이다.

VV를 구하기 위하여 Hamilton 연산자 \mathcal{H} 를 다음과 같이 정의한다.

$$H(\alpha, \lambda) = U_1(\alpha) + \mathcal{H}f(\alpha) \quad (4)$$

여기서 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{M-1}]$

M-1 고조파를 제거하고 U_1 을 최대로 하는 필요충분조건은 식(3)과 식(5)로부터 구할 수 있다.

$$H_\alpha(\alpha, \lambda) = \left[\frac{\partial H}{\partial \alpha_1}, \frac{\partial H}{\partial \alpha_2}, \dots, \frac{\partial H}{\partial \alpha_M} \right]^T = 0 \quad (5)$$

M-1 고조파를 제거시키고 U_1 변화에 대한 스위칭 패턴을 결정하기 위한 NR반복식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{pmatrix}_{p+1} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{pmatrix}_p - \left[\frac{\partial}{\partial \alpha} \begin{pmatrix} +\sin\alpha_1 & -\sin\alpha_2 & \dots & \pm\sin\alpha_M \\ +\sin k\alpha_1 & -\sin k\alpha_2 & \dots & \pm\sin k\alpha_M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ +\sin k\alpha_1 & -\sin k\alpha_2 & \dots & \pm\sin k\alpha_M \end{pmatrix} \right]^{-1} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_k \end{pmatrix} \quad (6)$$

CV에서 NR방정식의 해를 구하려고 할 때 조건에 따라서 많은 해를 얻을 수 있는데 이 해중 GKF가 최소가 될수 있는 조건에서 HEB(Harmonic Elimination Band)를 정하여 HEB에 속하는 범위내의 해를 구한다.

그림 2에서 M=3 일때 GKF의 변화값을 나타낸 것이며 HEB가 범위시에 존재하게 되어 이 범위내 속하는 스위칭 패턴의 해를 구한다.

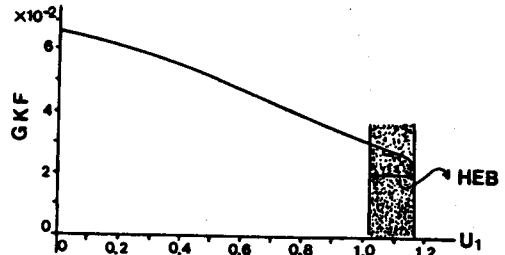


그림 2 M=3에서 U_1 변화에 대한 GKF
Fig.2 U_1 versus GKF value at M=3

그림 3은 CV와 VV 해의 관계를 나타낸 그림으로 HEB에 만족하는 모든 해를 구한 결과이다. 그림 3에서 CV(M=2)의 해는 dot(.)로 표시하였고 VV(M=3)의 해는 점선과 실선으로 표시하였다. CV해(M=2)는 VV해의 초기조건이 됨을 알수 있으며 이를 일반화하여 CV해(M=m-1)은 VV해(M=m-1)의 모든 초기조건이 된다.

이 초기조건이 구해지면 VV 의 NR 반복식(b) 은 쉽게 해를 구할 수 있다.

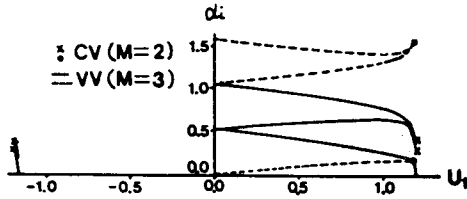


그림 3. CV와 VV해 사이의 관계
Fig.3 Relation between CV and VV solutions

$$G(K) = | U_i(K) - U_j(K) | \quad (10)$$

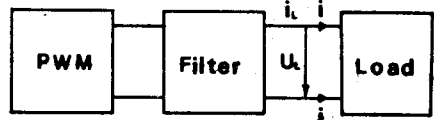


그림 4 PWM 회로의 외로 모델
Fig.4 PWM Circuit Model

2.2 2조각본 해석을 위한 SHE 최적스위칭 패턴

전압제어에 의해서 일만와 맥을 평가하는 SHE 최적 펄스 패턴은 제 K 차 2조각본의 평가 맥중을 G(K) 라고 할 때 선정기본파값 U 에서 제어조건으로 다음과 같은 GKF(Generalized Klirr Facto) 미분형 최소와 문제의 해를 구할 수 있다.

$$U(1) - U = 0 \quad (6)$$

$$GKF = \sqrt{\sum_{k=3,5,\dots} \left\{ \frac{G(k)U(k)}{G(1)U} \right\}^2} \quad (7)$$

이 식에 대한 제약조건을 갖는 최소와 문제는 Lagrange 계수를 이용하여 유도할 수 있으며 이를 절이형식으로 변형하면 Lagrange 계수는 다음과 같다

$$\hat{d} = \sum_{k=3,5,\dots} \left[\left\{ G(k)U(k) \right\}^2 - \lambda (U(1) - U) \right] \quad (8)$$

최적해를 얻는 조건은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \hat{d}}{\partial \alpha_i} &= 2 \sum_{k=3,5,\dots} G(k) \frac{\partial U(k)}{\partial \alpha_i} G(k)U(k) - \lambda \frac{\partial U(1) - U}{\partial \alpha_i} = 0 \\ \frac{\partial \hat{d}}{\partial \lambda} &= -U(1) + U = 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

그림 4에서 표시한 외로에 의해서 제 K 차 2조각본의 일만와 맥중 계수를 구해본다. 부하 2단자에 대해 전 외로의 절점수에 단자번호 i 와 j 라 하면 맥중 계수 G(K) 는 부하의 전류이득을 고려할 때 PWM 전원을 전압원으로 하여 U_i, U_j(K)를 각 단자 i, j 의 전압이라 하면 다음과 같다

2.1 절에서 HEB 내에서 구한 모든 스위칭 패턴의 결과를 식(7)에 대입하여 (7)의 GKF 가 최소가 되는 하나의 스위칭 패턴을 결정한다.

3. 결론

본 연구는 SHE PWM 에서 정확한 스위칭 패턴을 결정하기 어려웠던 방식을 CV 에서 HEB 정하여 이 HEB 에 속하는 모든 맥을 구한 다음 이 맥에 해당하는 GKF 를 최적화 기법에 의해 최적스위칭 패턴을 정밀하게 계산 하였다.

본 이론에 의해서 SHE PWM 의 최적해를 효율적으로 구할 수 있을 뿐만 아니라 계산 시간도 매우 단축되는 오과로 얻을 수 있었으며, 2주파수 위, PTR 에 응용가능하여 실제 실험을 통하여 만족할만한 결과로 얻을 수 있었다.

3상 전압형 인버터를 구동하기 위한 SHE PWM의 최적 스위칭 패턴

4.참고 문헌

- 1) J.Zubek, A. Abbondanti & C.J. Norby, "Pulse Width Modulated Inverter Motor Drives with Improved Modulation" IEEE Trans. Ind. Applic., IA-11, Nov.1 Dec., 695, 1975
- 2) G.B. Kliman & A.B. Plunkett, "Development of a Modulation strategy for a PWM Inverter Drive", IEEE Trans., Ind. Applic., IA-15, Jan. Fed. 72, 1979
- 3) 水谷, "バイポーラトランジスタの大容量インバータへの応用" 図 58 電気学会論文, S.6-3
- 4) 戸田孝, "正之, '高調波の影響と対策', 電気学会誌, 103 卷(9号) pp. 887-890, th. 58-9
- 5) A.A. Schonung and H. Stemmler, "Static frequency Changers 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 Voltage control techniques.", IEEE Trans., IA-10, PP. 666-673, 1974
- 9) 이은종, 정동환, "Optimal PWM 방식에 의한 가변속 유도 전동기의 소음 및 진동 저감 연구", 대한전기학회지, Vol 36, No. 2 PP -34, 1987
- 10) 정동환, "3상 유도전동기의 고조파 영향을 최소화 하기 위한 인버터의 최적 스위칭 방식", 한양대학교 대학원, 박사학위 논문 1987. 6