

인버터 고조파 저감을 위한 새로운 공간벡터 변조기법에 관한 연구

이상택* 김희준* 오원석** 신태현**
 한양대학교* 유한대학**

A Study on the Novel Space Vector Based Harmonic Elimination Method of Inverter

Lee, Sang-talk* Kim, Hee-jun* Oh, Won-seok** Shin, Tae-hyun**
 Hanyang University* Yuhan College**

Abstract - This paper considers the problem of eliminating harmonics in the inverter output waveforms. The approach is based on the minimization of the current harmonics in the induction motor by space vector modulation method. Reference voltage is compensated with injection of controlled current harmonics which are calculated to reduce current harmonics through sampled current harmonic analyzing algorithm. The theoretical analysis is carried out using computer simulation. It is verified that proposed SVM technique could reduce current harmonic component and improve THD.

1. 서 론

최근 가정용기기 및 산업용기기의 제어 장치들은 고정도의 제어 성능은 물론 에너지 절감 차원에서 효율을 개선하는 목적으로 개발되고 있다. PWM 인버터도 전압과 주파수를 동시에 제어하고 효율을 개선할 수 있어 유도전동기의 속도제어에 널리 응용되고 있다. 그러나, 인버터는 스위칭 소자의 스위칭 작용으로 출력단에는 많은 고조파 성분을 포함하게 된다. 이는 전동기의 과열과 토오크 맥동, 자기적 소음등의 원인이 되므로 결국 유도전동기의 손실을 증가시키게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 여러 가지 방식의 고조파 저감법이 연구되고 있으며, SHE (Selected Harmonic Elimination) PWM 기법과 최적 PWM 법(Optimal PWM method) 등이 각광을 받고 있다. [1,2,3,4,7] 그러나 이들 방법은 특정고조파를 저감시켜 고조파에 대한 영향을 최소화 하는 이점이 있으나 계산 시간이 많이 소요되고, 정확한 스위칭각을 결정하기가 어렵고, 미리 파형을 구해서 각 동작 주파수에 따라 해당하는 스위칭 패턴을 저장할 많은 메모리가 필요로 된다. 또한, 오프라인으로 스위칭 파형이 결정되기 때문에 인버터의 데드타임, 스위칭 노이즈, 전동기의 기계적인 구조, 부하변동, 포화 등에 의해 생성되는 전류 고조파 성분을 구조적으로 고려할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구는 인버터의 출력단에 나타나는 전류의 고조파 성분을 저감하여 고조파로 인한 손실을 줄이기 위한 연구로 전류의 고조파 성분을 측정하여 검출된 고조파를 온라인으로 저감하는 방법을 제안한다. 인버터의 스위칭 기법은 공간 벡터변조 (SVM: Space Vector modulation) 기법을 사용하여 고조파 성분이 보상된 전압제어가 가능하도록 한다. 이를 위하여 분석된 전류 고조파 성분은 제어를 거쳐서 인버터의 전압명령으로 변환하는 방법과, 계환된 고조파 성분을 저감하도록 인버터를 스위칭하는 방법을 제시한다. 시뮬레이션을 수행하여 본 연구의 타당성을 검토한다.

2. 전동기 전류에 나타난 고조파 특성

전동기에서의 고조파 영향, 즉, 고조파 손실, 토오크 맥동, 전자기적 소음 및 진동들은 결국 고조파 전류에 기인하게 되며 이 고조파 전류는 인버터의 특성상 피할 수 없는 요소라 할 수 있다. 인버터가 그림 1과 같은 전압 명령으로 스위칭 된다고 할 경우에 대해서 분석을 해 보기로 한다. 그림 1의 파형은 인버터의 상전압 $V(\alpha)$ 라고 할 수 있으며 연속적인 $\pm V_B/2$ 값으로 구성된다.

α_i 각은 $i=1,2,3,\dots,M$ 까지이며 식(1)과 같다. (1)
 $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \dots \leq \alpha_M < \pi/2$

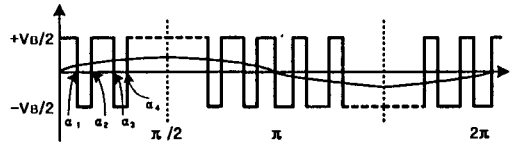


그림 1 인버터의 PWM 전압 파형
 그림 1의 파형은 단지 홀수 고조파만을 가진다. 위상은 0도와 180도에서 동일하여 피크 값은 아래와 같다.

$$V_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(\alpha) \sin n\alpha d\alpha \quad (2)$$

그림 1과 식(2)로부터 n차 고조파를 구하면

$$V_n = \alpha(-1)^M \frac{2V_B}{\pi n} \left[1 - 2 \sum_{i=1}^M (-1)^{i+1} \cos n\alpha_i \right] \quad (3)$$

만약 $V(\alpha)$ 가 α_M 과 $\pi/2$ 사이에서 $+V_B/2$ 와 $-V_B/2$ 의 값이라면 S는 각각 +1(-1)을 가질 것이다. 두 경우를 +(-)변조라 불리우며 $S = +1(-1)$ 에 대응된다. n=1일 때 식(3)에 의해 기본파 값이 구해진다.

$$V_1 = \alpha(-1)^M \frac{2V_B}{\pi} \left[1 - 2 \sum_{i=1}^M (-1)^{i+1} \cos \alpha_i \right] \quad (4)$$

$$0 \leq V_1 \leq \frac{4V_B}{2\pi} \quad (5)$$

원하는 V_1 의 값을 식(4)를 만족하는 M 각도를 적절히 선정하여 얻을 수 있다. 전동기의 실효치 고조파 전류 (I_o)는 누설 인덕턴스가 선형적이라고 가정하면 식(6)으로 표현된다.

$$I_o = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{\omega_0 L} \right)^2} \quad (6)$$

V_n : 출력전압의 n차 고조파의 최대값

L : 전동기의 누설 인덕턴스 ω_0 : 기본파의 각주파수

식(6)의 전류 파형을 생각해보면 전류는 우선 인가된 출력전압의 고조파 특성에 크게 좌우된다고 볼 수 있다. 그런데 인버터는 데드 타임이나 소자의 스위칭 특성상 전압명령 그대로 동작된다고 볼 수 없으므로 입력전압의 고조파 특성을 개선한다고 해도 한계가 있게 된다. 또한, 누설 인덕턴스 성분도 전류 고조파에 영향을 미치게 되는데, 이 성분도 동작 주파수와 부하전류 등에 따라 일정하다고 볼 수 없다.

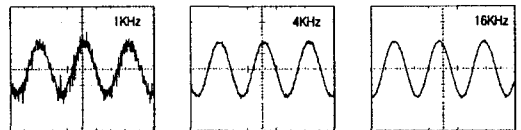


그림 2 인버터의 출력 전류 파형

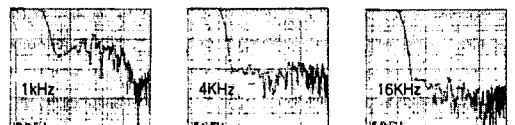


그림 3 인버터의 출력 전류 고조파 분석 결과

그림 2는 스위칭 주파수에 따른 인버터의 출력 전류 파형이고, 그림 3은 인버터의 출력 전류를 고조파 분석한 결과이다. 그림의 실험 결과를 볼 때 인버터 출력 전류의 고조파는 스위칭 주파수에 반비례하는 것을 알 수 있으며, 따라서 고조파를 줄이기 위해서는 스위칭 수를 늘리는 것이 필요하다. 그러나, 대용량 인버터인 경우 전력용 반도체 소자의 정격과 스위칭 손실을 고려해야 하므로 무작정 스위칭 주파수를 올려 고조파를 줄일 수는 없는 일이다. 따라서 적절한 스위칭 주파수의 선택이 필요하고, 일정한 스위칭 주파수내에서 고조파를 줄이는 방법을 찾는 것이 옳다고 하겠다. 또한, 저 스위칭 주파수에서 운전할 경우, 고조파 저감의 전략이 필요함을 알 수 있다.

3. 기존의 고조파 저감기법

인버터의 손실 및 소음진동의 저감을 위한 고조파 저감 기법이 많이 제안되어져 왔다. 대표적인 고조파 저감 기법에는 SHE와 Optimal PWM이 있다. SHE PWM 방식은 인버터의 출력전류에 주요하게 나타나는 저차 고조파 전류를 선정하여 선정된 고조파 전류를 소거하는 방식이다. PWM파형의 스위칭각 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 을 결정하는 것으로 일반적인 PWM 파형을 푸리에 급수 전개한 수식에서 (M-1)항의 고조파를 소거하고 기본파를 최대로 하는 필요충분 조건으로부터 구해진다. ROM과 같은 기억장치에 스위칭 패턴이 미리 결정되어지므로 실시간 제어가 불가능하고 전동기의 특성이 변동하거나 전동기의 부하가 변동될 경우 고조파가 증가하게 된다. Optimal PWM 방식은 전동기에서의 고조파 손실, 토오크 맥동, 전자기적인 소음 및 진동 등을 평가 함수로 설정하고 이 평가함수를 최소화하는 스위칭 패턴을 결정하는 방식이다. 전류 고조파 성분을 최소화한다는 점에서 좋은 방법이나 인버터 스위칭 특성이나 전동기 자체의 동작특성 등을 고려하지 못하며 최적의 파형을 구하는데 많은 시간이 걸린다는 단점을 가지고 있고 역시 실시간 구현은 불가능하다.

4. 공간벡터 변조(SVM)

공간벡터란 3상 인버터에서 부하 상전압을 d-q 변환하여 얻은 복소수 또는 전압벡터를 말하는 것으로 SVM은 샘플링 시간 동안 인버터의 유효전압과 영전압을 적절히 조합하여 기준 전압과 인버터의 출력전압이 평균적으로 같도록 공간상의 전압벡터를 구현하는 방식이다. SVM은 직류 링크 전압을 최대한 많이 사용할 수 있다는 점에서 다른 어떤 종류의 PWM방법보다도 우수하다고 알려져 있으며, 일반적인 삼각파 비교 PWM방식에 비해 정상상태에서의 전류 고조파 성분을 크게 억제할 수 있음이 밝혀져 있다. SVM은 유효전압이 인가되는 시간을 시간적으로 재배치하는 기법을 응용하여 선형적으로 이용 가능한 최대의 전압을 인버터에서 발생시키도록 설계한 PWM 방법이라고 할 수 있으며, 그림 4와 같이 8개의 전압벡터를 이용하여 기준 전압벡터를 발생하게 된다. 그림 4에서와 같이 기준전압 벡터 V_s^* 는 기준전압 벡터에 가장 근접한 두 개의 유효벡터와 영 벡터의 조합으로 전압 벡터를 구현하며 이러한 관계를 식 (7)에 나타내고 있다. (5,6)

$$V_s^* = x \cdot V_n + y \cdot V_{n+1} + z \cdot V_0 \quad (7)$$

$$x + y + z = 1$$

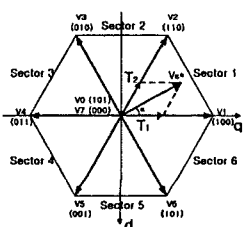


그림 4 공간 전압 벡터도

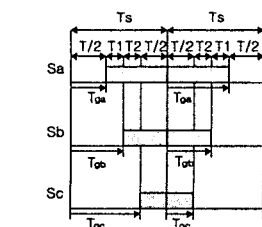


그림 5 공간전압벡터 PWM의 게이팅 신호 패턴

5. 보상법

본 연구에서는 인버터의 스위칭 동작과 입력전압의 고조파, 데드타임, 전동기 동작 특성등이 포함된 전동기의 실제 전류를 검출하여 전류를 고조파 분석을 한 다음, 각 차수의 고조파 성분을 제한하여 제어를 거쳐서 인버터의 기준 전압 벡터에 주입하는 고조파 저감 방법을 제안한다. 그림 4에서 기준벡터 (V_s^*)를 발생하기 위해서는 전압벡터 V1과 V2가 각각 T1과 T2 시간동안 인가되어야 하므로 전류리플을 줄이기 위해 영전압 벡터 성분을 고려하여 그림 5와 같은 게이팅 신호 패턴을 구할 수 있다.



그림 6 공간벡터 고조파 보상 개념도

그림 6은 고조파 보상 개념도이다. 보상전 전압 벡터에 보상벡터를 합성하여 공간벡터 변조시 기준 전압을 보상 후의 전압벡터로 하여 고조파를 저감한다. 그림 7은 제안한 고조파 저감의 기본적인 원리에 대해 설명한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 인버터의 출력전류에 기본파 성분의 n배수 되는 고조파가 섞이게 되면 정현파에 고조파가 합성되어 왜곡된 파형이 될 것이다. 이때 보상파 성분을 주입하게 될 경우 기존의 고조파 성분이 상쇄되어지므로 고조파 함량이 적은 정현파가 구현되는 것이다.

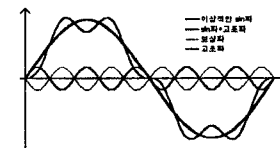


그림 7 제안한 고조파 저감의기본적 원리

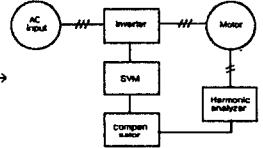


그림 8 제안된 고조파 저감 알고리즘의 블록도

그림 8은 제안한 알고리즘에 대한 블록선도를 보이고 있다. 인버터의 출력전류를 피드백시켜 한 주기간의 전류 파형을 고조파 분석기를 통해 분석하였으며 공간벡터 기준전압과 합성하여 스위칭 패턴을 형성하였다. 식(8)은 기준 전압 벡터에 고조파가 주입된 수식이다. SVM은 기준 전압을 d,q 성분으로 회전시키는 형태이므로 공간벡터 변조기법에 고조파를 주입시키기 위해서는 d,q축 성분치가 요구된다. 분석된 고조파 값은 3상의 값이므로 식(9)를 적용하여 d,q축 성분의 공간벡터의 값으로 변환하여 주입하였다.

$$V_{ds(com)} = V_{ds} + A_d \times i_{ds(n)} \quad (8)$$

$$V_{qs(com)} = V_{qs} + A_q \times i_{qs(n)}$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds(n)} \\ i_{qs(n)} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{an} \\ i_{bn} \\ i_{cn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$V_{ds(com)}, V_{qs(com)}$: 보상후의 d축, q축 전압

V_{ds}, V_{qs} : 보상전의 d축, q축 전압

A_d, A_q : d축, q축 보상 gain

$i_{ds(n)}, i_{qs(n)}$: 3상인 2상 변환된 실제 n차 고조파전류

i_{an}, i_{bn}, i_{cn} : 인버터의 출력 고조파전류

공간벡터에 주입하는 기준 전압은 전압의 형태이며 피드백 되어져 계산되어지는 값은 전류의 값이므로 A_d 와 A_q 의 이득 설정이 중요하다. 본 연구에서는 PI 제어구조로 A_d 와 A_q 를 설정하였다.

종래의 고조파 저감 방법들은 실시간으로 제어가 불가능하며 전동기의 특성이 바뀌게 되면 인버터 스위칭 패턴을 다시 계산해야 하는 단점을 가지고 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 알고리즘은 전동기의 출력전류를 실시간으로 피드백 하여 고조파를 분석한 후 발생된 고조파를 상쇄시키는 알고리즘으로, 전동기의 특성이 바뀌더라도 적용 가능하다.

6. 고조파 분석 알고리즘

본 논문의 고조파 분석은 식(10)과 같은 푸리에 변환을 이용하였다.

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (10)$$

이 수식을 이용하여 각각의 a_n 값과 b_n 값을 결정하고 각 고조파별 진폭을 구하여 식(8)을 이용한 제어를 통하여 고조파를 저감하였다.

7. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안되고 있는 알고리즘을 입증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 수행한 전동기의 파라미터와 입력조건을 표1에 나타내고 있다.

표1 유도전동기 파라미터 및 입력조건

Rs	1[Ω]	Lm	100[mH]
Rr	0.68[Ω]	극수	4
Ls	110[mH]	출력	2.2[Kw]
Lr	110[mH]	정격속도	1720[rpm]
직류링크전압	310 [V]	정격전류	8.3[A]

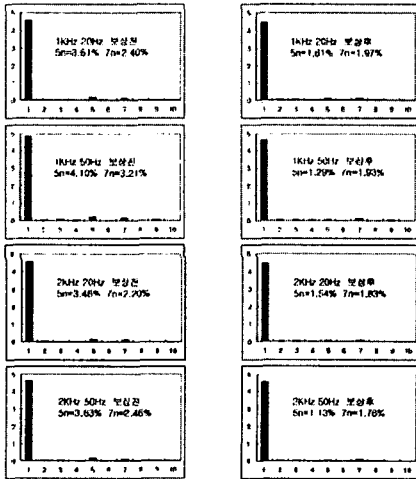


그림 9 인버터 출력전류의 고조파 분석

그림 9는 인버터의 출력전류를 각각의 기준전압 벡터와 인버터의 스위칭 주파수에 따라 고조파를 표시한 것이다.

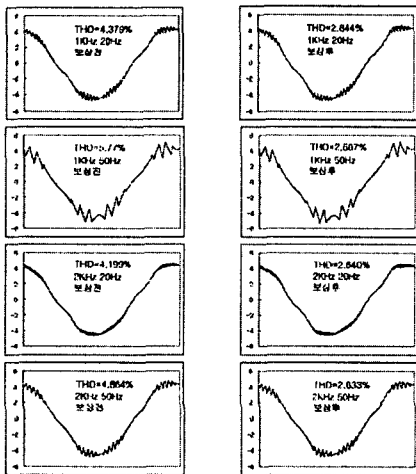


그림 10 인버터 출력전류 파형

기준전압 벡터의 주파수는 20[Hz]와 50[Hz]에서 각각 수행하였으며 인버터의 스위칭 주파수는 1[kHz]와

2[kHz]에서 각각 수행하였다. 가로축은 각각의 고조파 성분들의 차수를 나타내며 세로축은 각 고조파 전류의 크기를 나타내고 있다. 인버터의 출력전류를 분석하여 각각의 5고조파와 7고조파에 대하여 보상을 하였으며 그림에 나타난 결과는 기본과 성분을 100%로 정규화시킨 결과이다. 그림 10은 보상하기전과 보상한 후의 인버터 출력전류의 파형을 나타내고 있다. 인버터의 스위칭 주파수가 증가하면 인버터 출력 전류의 고조파가 감소됨을 알 수가 있다. 표 2에서는 인버터 출력전류의 보상 전후의 고조파 전류의 차이와 THD(Total Harmonic Distortion)를 나타내고 있다. 5고조파와 7고조파를 제어를 통하여 주입함에 따라 각각의 발생 고조파들이 감소함을 볼 수 있었으며 THD도 그에 따라 감소함을 볼 수 있었다.

표 2 인버터 출력 전류의 고조파 전류차 및 THD

보상전후 각 고조파 전류차 [%]	20Hz	50Hz	THD [%]			
			20Hz	50Hz		
1KHz	5조파	1.99	2.81	1kHz 보상전	4.379	5.770
	7조파	0.43	1.28	1kHz 보상후	2.844	2.587
2KHz	5조파	1.92	2.7	2kHz 보상전	4.199	4.864
	7조파	0.37	0.7	2kHz 보상후	2.640	2.633

8. 결 론

인버터를 적용하여 전동기를 운전함에 있어 발생되는 고조파 전류는 손실 및 소음진동의 요인이 된다. 현재 고조파 저감을 위한 PWM 방법들은 off-line으로 입력 전압 파형의 고조파 분석을 통하여 스위칭 패턴이 미리 정해지는 형태이므로 스위칭 조건이나 부하의 변동, 전동기 특성 등의 변화에 따라 고조파전류가 증가되진다. 본 논문에서는 출력전류를 피드백 하고 고조파 분석을 통하여 그 결과를 전압벡터로 보상하고 실시간으로 고조파 전류의 저감제어가 가능하도록 하였다. 공간벡터 변조기법을 이용하였고 타당성을 입증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 여러 동작조건에서 실험한 결과 본 연구의 알고리즘이 적절한함을 입증할 수 있었다. 앞으로 인버터에서 출력전류의 측정시 발생하는 노이즈를 줄이기 위한 Filtering 기법과 퍼지, 신경망 이론등을 이용한 고조파 제어의 연구가 요구된다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. S. Patel and R. G. Hof, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverter : Part I-Harmonic Elimination", IEEE Trans. Industrial Applications, Vol. IA-9, no. 3, p310-p317
- [2] G. S. Buja and G. B. Indri, "Optimal pulse width modulation for feeding ac motor", IEEE Trans. Industrial Applications, Vol. IA-13, no. 1, pp. 38-44
- [3] 정동화, 이윤중, 오원식, "전압원 인버터의 펄스신호를 발생시키기 위한 PWM 방식의 특성비교", KICS, 15년 5호, p384-p398
- [4] Y. Lai and S. R. Bowes, "A Novel Harmonic Elimination Pulse-width Modulation Technique for Static Converter and Drives", APEC98, p108-p115
- [5] 김준석, 설승기, "공간 전압 벡터 PWM의 새로운 기법", KIEE, 44권 7호, p865-p874
- [6] T. P. Chen and Y. S. Lai and C. H. Liu, "A New Space Vector Modulation Technique for Inverter Control", PESC99, p777-p782
- [7] L. laftman, "The Contribution to Noise in an Induction Machine Fed from A Pulse Width Modulated Inverter", European Conference on Power Electronics and Applications, p2.483-p2.488
- [8] B. K. Bose, "Power Electronics And AC Drives", Prntice-Hall, 1987
- [9] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1986
- [10] D. W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prntice-Hall, 1997