

개선된 고조파 성능을 갖는 동기 과변조 기법

강나현, 황철민, 하정익
 서울대학교 전기·정보공학부

Synchronous Overmodulation Method with Improved Harmonic Performance

Nahyun Kang, Cheolmin Hwang, Jung-Ik Ha
 Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

영구 자석 전동기에서는 고속 운전 영역에서 인버터의 출력 전압을 증폭하기 위해 과변조 기법과 식스-스텝 운전이 사용되고 있다. 그러나, 식스-스텝 운전 시 기본파 주파수와 샘플링 주파수가 동기되지 않은 경우 비이상적인 전류 고조파가 발생한다. 이를 해결하기 위해 샘플링 주파수를 기본파 주파수의 정수배로 유지하는 동기 PWM을 활용하고 샘플링 시간 간격을 가변해주어 PWM과 식스-스텝 운전 간 절환을 원활하게 해주는 과변조 기법 EOVM이 기존에 제안된 바 있다. 추가로 EOVM은 스위칭 손실을 줄이고 단위 전압 이득을 달성할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, EOVM은 MI가 낮을 때 기존 과변조 기법보다 wTHD 값이 커진다는 한계가 있다. 본 논문에서는 기존에 제안된 EOVM을 소개 및 분석하고 해당 기법에서 고조파 성능을 개선한 새로운 동기 과변조 기법을 제안한 뒤 wTHD 값을 EOVM과 비교해본다.

1. 서론

영구 자석 전동기의 고속 운전 영역에서 과변조 기법(OVM)과 식스-스텝 운전을 통해 추가적인 하드웨어 없이 인버터의 출력 전압을 증폭할 수 있다. 식스-스텝 운전의 경우, 스위칭 주파수와 출력 전압의 기본파 주파수가 일치하기 때문에 스위칭 손실이 적고, 공간 벡터 펄스 폭 변조(SVPWM)에 비해 전압 변조 지수(MI)를 약 10.27% 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

하지만, 고정 샘플링 주파수 시스템에서 식스-스텝 운전 시 낮은 차수의 고조파가 증가한다는 한계가 있다. 특히, 기본파 주파수에 대한 샘플링 주파수의 비율 $F_{ratio}(=f_{samp}/f_{fund})$ 의 값이 6의 배수가 아닌 경우, 평균 전압 각 오차 등의 이유로 비이상적인 전류 고조파가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 식스-스텝 운전에서의 다양한 스위칭 기법이 제안되었다. 동기 펄스 폭 변조(동기 PWM)는 샘플링 주파수를 기본파 주파수의 정수배로 유지해 전동기의 회전 속도에 관계없이 F_{ratio} 가 일정한 값을 갖도록 하는 방법이다. [1]에서는 동기 PWM으로 샘플링 시간 간격을 가변해 식스-스텝 운전으로의 절환을 용이하게 하는 Edge voltage vector OVM(EOVM)을 제안하였다. 해당 연구에서는 푸리에 분석을 통해 MI에 따른 가중 전 고조파 왜곡(wTHD)을 최소화하는 전압 벡터(VV)를 구한다. 이때, 전압 이득은 1을 만족한다. 이 방법은 전압 벡터가 항상 모서리나 꼭짓점에 존재하기 때문에 기존 OVM에 비해 스위칭 횟수가 적어 스위칭 손실이 줄어드는 장점이 있다. 그러나, 이 방법은 출력 전압의 기본파 성분이 육각형 내부에 존재하는 경우에도 모서리에 위치한 전압 벡터를 사용하기 때문에 그림 1에서 확인할 수 있듯이

MI가 작을 때 기존 과변조 기법에 비해 wTHD가 크다.

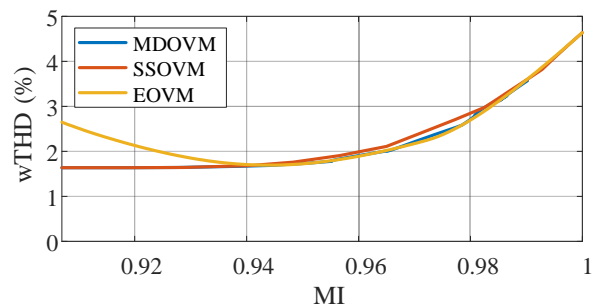


그림 1 각각의 과변조 기법(MDOVM, SSOVM, EOVM)의 MI에 따른 wTHD.
 Fig.1 wTHD with respect to MI for each OVMs(MDOVM, SSOVM, EOVM).

본 논문에서는, [1]에서 제안된 EOVM를 소개하고 해당 기법의 한계점을 개선한 새로운 과변조 기법을 제안한다.

2. EOVM 소개 및 개선된 OVM 제안

2.1 EOVM

2.1 절에서는 [1]에서 제안한 EOVM을 소개 및 분석한다.

2.1.1 전압 벡터

[1]에서는 전압 육각형을 60°씩 6개의 영역으로 나누고 각 영역 당 샘플 개수를 N_s 로 지정한다. 이에 따라 F_{ratio} 의 값은 $6N_s$ 로 결정된다. 본 논문에서는 $N_s = 4$ 인 경우를 소개한다.

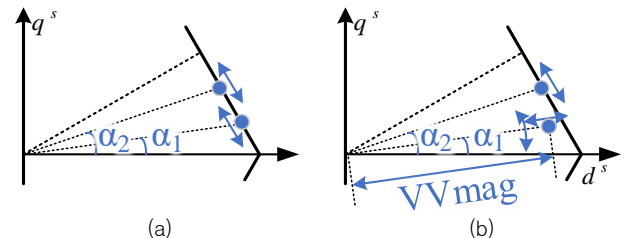


그림 2 전압 벡터 결정 변수 (a) EOVM (b) 제안하는 OVM
 Fig. 2 Parameters for determination of VVs (a) EOVM (b) proposed OVM

한 영역 내 4개의 전압 벡터는 모서리의 중점을 중심으로 대칭이고, 상전압은 반파 대칭성, 1/4파 대칭성을 띠는 3상이다. 이에 따라, 한 영역에서 2개의 전압 벡터가 결정되면 모든 24개의 전압 벡터의 위치가 정해진다. 그림 2에 전압 벡터의 분포를

결정하는 변수들을 나타냈다. 그림 2 (a)에서 볼 수 있듯이 전압 벡터의 분포는 각도 $0^\circ \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq 30^\circ$ 로 결정되는 자유도 2를 갖는다. 이러한 전압 벡터 분포는 짝수차 고조파를 없애는 효과가 있다.

상전압의 기본파 주파수 성분의 진폭을 V_1 , DC 링크 전압의 크기를 V_{dc} 라 하면, 푸리에 분석을 통한 MI는 다음과 같다.

$$MI = V_1 / \left(\frac{2}{\pi} V_{dc} \right) \quad (1)$$

α_1, α_2 가 30° 에 가까워지면 MI는 감소하고, 0° 가 되면 MI는 1이 되고 식스-스텝 운전 상태가 된다.

전류의 전 고조파 왜곡(THD)은 인버터의 출력 전압과 전동기의 역기전력에 의해 결정된다. 그러나, 전동기의 역기전력 성분을 고려하면 복잡도와 시스템 비용이 증가하기 때문에 주로 상전압의 wTHD를 통해 고조파 성분을 파악한다. 전압의 n차 고조파의 크기를 V_n 이라 하면 wTHD는 다음과 같다.

$$wTHD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1} \right)^2} \quad (2)$$

wTHD는 F_{ratio} 에 따라 값이 정해지는데, 동기 PWM의 경우 F_{ratio} 가 고정이므로 wTHD를 분석하는데 적절하다.

전압 벡터의 각 α_1, α_2 는 MI 값에 따른 wTHD를 최소화하는 쌍으로 결정된다. 이때, MI의 값은 0.907에서 1.000 사이의 값이다. M개의 MI에 대하여 α_1, α_2 쌍 (α_1^*, α_2^*)을 결정하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\alpha_1^*(i), \alpha_2^*(i)) &= \operatorname{argmin} wTHD(i), (i = 1, 2, \dots, M), \\ \text{s. t. } MI &= 0.907 + \frac{0.093}{M-1}(i-1) \quad (3) \\ 0^\circ &\leq \alpha_1^* \leq \alpha_2^* \leq 30^\circ \end{aligned}$$

위 수식을 MATLAB의 "contour"와 "interp2" 함수를 사용해 수치 해석적으로 풀어 그림 3과 같은 결과를 얻었다.

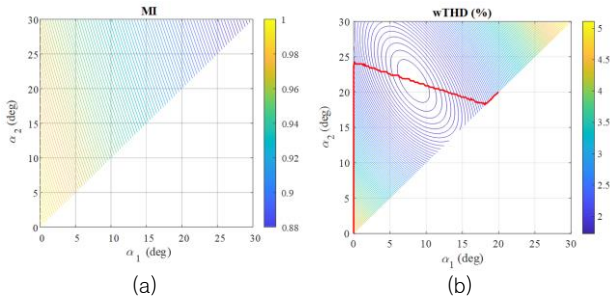


그림 3 (a) α_1, α_2 에 따른 MI (b) α_1, α_2 에 따른 wTHD와 최소 wTHD 궤적

Fig. 3 (a) MI with respect to α_1, α_2 (b) wTHD with respect to α_1, α_2 , minimum wTHD trajectory

MI 값에 따라 최소 wTHD를 갖는 (α_1^*, α_2^*)는 그림 4와 같다.

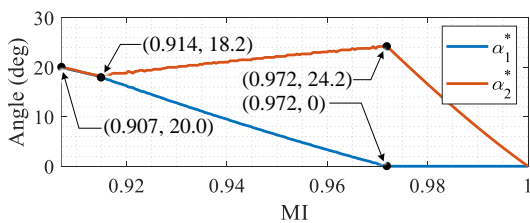


그림 4 MI에 따른 (α_1^*, α_2^*)

Fig. 4 (α_1^*, α_2^*) with respect to MI

EOVM에서는 회전자 좌표계에서의 전압 각도 지령의 변화량 $\Delta\theta_v^*$ 과 회전자의 회전 속도 ω_r 를 이용해 샘플링 시간 간격을 다음과 같이 계산한다.

$$t_{samp} = \left(\frac{\pi}{3N_s} - \Delta\theta_v^* \right) / \omega_r \quad (5)$$

이에 따라, F_{ratio} 값이 6의 배수로 고정되어 식스-스텝 운전에서 비이상적인 저차 고조파 성분이 없어지는 효과가 있다^[2].

2.1.2 기존 방식의 한계

[1]에서 제안한 EOVM은 MI 값에 상관없이 전압 벡터가 항상 육각형의 모서리 혹은 꼭짓점에 위치한다. 그 결과로, MI 값이 작은 경우 최소 거리 과변조 기법(MDOVM), 스위칭 상태 유지 과변조 기법(SSOVM)과 같은 기존 기법에 비해 wTHD의 값이 크다.

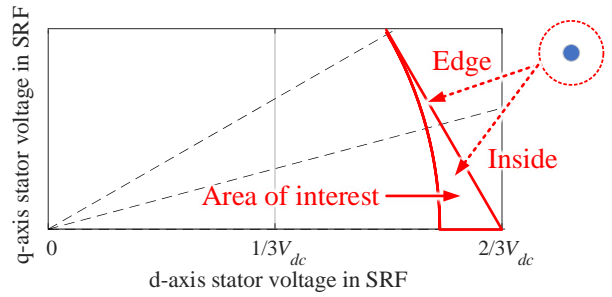


그림 5 제안하는 OVM에서의 전압 벡터 결정

Fig. 5 Determination of Voltage Vector in proposed OVM

2.2 제안하는 OVM

그림 5는 24개의 영역 중 한 영역을 나타낸다. 기존 EOVM에서 $N_s = 4$ 이면, 두 개의 전압 벡터를 모두 전압 육각형의 모서리에 위치시키고 각 위치에 해당하는 각도 (α_1, α_2)를 구하는 문제가 되므로 자유도는 2이다.

한편, 제안하는 과변조 기법에서는 고조파 성능 개선을 위해 두 벡터 중 하나의 벡터 위치를 그림 5처럼 관심 영역(Area of interest)에 둔다. 이는 개선된 고조파 특성으로 감소하는 철손이 추가적인 스위칭으로 인한 스위칭 손실 증가분보다 클 때 효과적이다.

그림 2 (b)에서 볼 수 있듯이 제안하는 기법에서는 전압 육각형 내부에 위치하는 전압 벡터의 크기 V_{mag} 도 고려해주어야 하기 때문에 자유도는 3이 된다. $\alpha_1, \alpha_2, V_{mag}$ 값을 결정하는 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\alpha_1^*(i), \alpha_2^*(i), V_{mag}(i)) &= \operatorname{argmin} wTHD(i) \\ (i &= 1, 2, \dots, M) \\ \text{s. t. } MI &= 0.907 + \frac{0.093}{M-1}(i-1) \quad (6) \\ 0^\circ &\leq \alpha_1^* \leq \alpha_2^* \leq 30^\circ, \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \leq V_{mag} \leq \frac{2V_{dc}}{3} \end{aligned}$$

MATLAB에서 위 수식을 "isosurface"와 "interp3" 함수를 사용해 수치 해석적으로 풀어 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 그림 6의 (a), (b)는 각각 $\alpha_1, \alpha_2, V_{mag, norm}$ 에 따른 MI, wTHD를 나타낸다. 이때, $V_{mag, norm} = V_{mag} / (V_{dc} / \sqrt{3})$ 이다. MI에 따라 최소 wTHD를 갖는 $\alpha_1, \alpha_2, V_{mag}$ 는 그림 7과 같이 나타낼 수 있고, 그림 8은 MI = 0.91 일 때 EOVM과 제안하는 OVM의 전압 벡터, 상 전압, 펄스를 나타낸다.

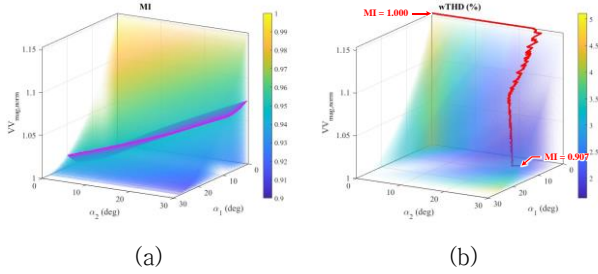


그림 6 (a) $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag, norm}$ 에 따른 MI와 MI = 0.94 곡면.
 (b) $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag, norm}$ 에 따른 wTHD와 최소 wTHD 궤적.
 Fig. 6 (a) MI with respect to $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag, norm}$, MI = 0.94 plane
 (b) wTHD with respect to $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag, norm}$, minimum wTHD trajectory

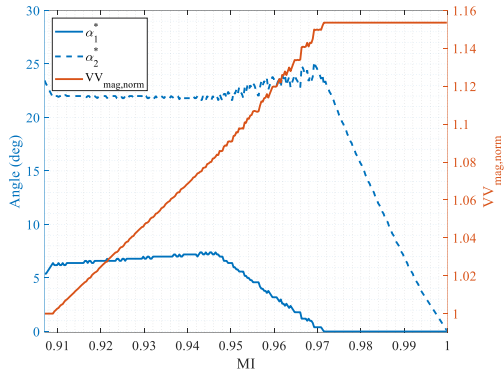


그림 7 MI에 따른 $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag}$ 값
 Fig. 7 $\alpha_1, \alpha_2, VV_{mag}$ with respect to MI

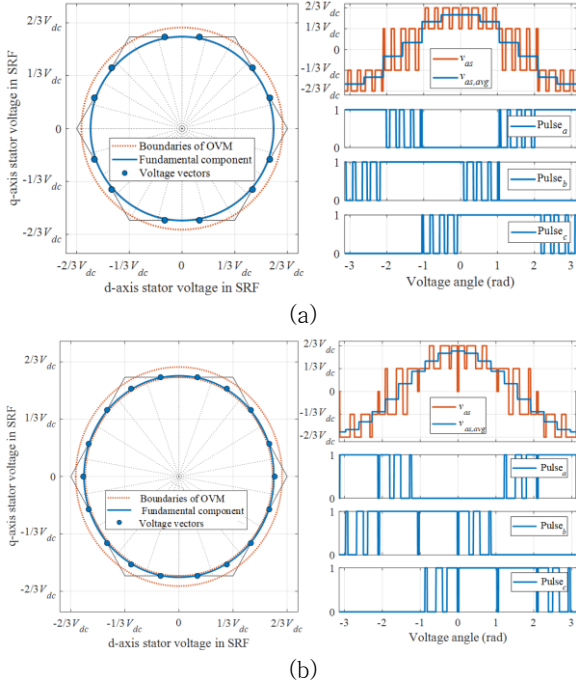


그림 8 MI = 0.91 일 때 전압 벡터, 상전압, 펄스 (a) EOVM (b) 제안하는 OVM
 Fig. 8 Voltage vectors, phase voltage and pulses when MI = 0.91 (a) EOVM (b) proposed OVM

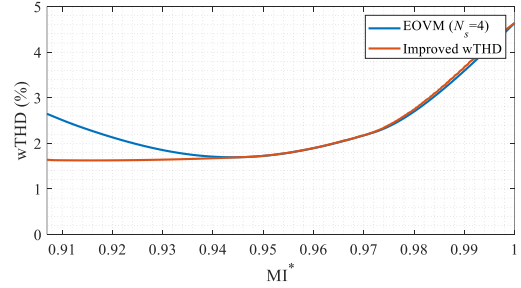


그림 9 EOVM과 제안된 OVM의 MI*에 따른 wTHD 비교
 Fig. 9 Comparison of wTHD with respect to MI for EOVM and proposed OVM

MI*값에 따른 wTHD를 기존 EOVM과 비교한 결과는 그림 9와 같다. 그림 8과 그림 9를 통해 제안한 OVM은 MI가 작은 영역에서 기존 EOVM에 비해 스위칭 횟수는 더 많지만 wTHD는 개선되었음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 일정한 F_{ratio} 를 갖고 샘플링 시간 간격을 가변하는 과변조 기법 EOVM을 소개하고 해당 기법에서 고조파 성능을 개선하는 전압 벡터 선정 방법을 제안하였다. 제안한 방법에서 전압 벡터는 전압 육각형 내부 혹은 모서리나 꼭짓점에 위치하며 이는 MI에 따른 wTHD 분석을 통해 결정된다. wTHD 비교를 통해 제안한 기법에서 고조파 성능이 기존 기법보다 개선되었고 그 결과 해당 기법이 PWM에서 식스-스텝 운전으로의 전환을 용이하게 하는 과변조 기법으로 적합함을 확인하였다.

이 논문은 서울대학교 전력연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] C. Hwang, G. C. Lim, S. Lee, J. -J. Moon, K. -S. Park and J. -I. Ha, "Synchronous Overmodulation With Less Switchings Including Six-Step Operation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 71, no. 10, pp. 11967-11977, Oct. 2024

[2] J. Park, S. Jung, and J.-I. Ha, "Variable Time Step Control for Six-Step Operation in Surface-Mounted Permanent Magnet Machine Drives," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 2, pp.1501-1513, Feb. 2018