과변조 기법에 따른 선형성 및 고조파 특성 비교 분석

김민우, 장원용, 윤지현, 박정욱
연세대학교

Comparative Analysis of Linearity and Harmonic Characteristics according to Overmodulation Methods

Minwoo Kim, Won-Yong Jang, Jihyeon Yun, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문에서는 인버터의 전압 변조 범위를 선형 변조 영역에서 과변조 영역으로 넓히기 위해 사용하는 과변조 기법들에 대하여 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성 및 출력 전압의 고조파 특성을 비교하고 분석한다. 과변조 기법에 따른 선형성 및 고조파 특성에 대한 비교 분석은 PSIM 시뮬레이션을 통해 확인되었다.

1. 서 론

SVPWM 기법은 넓은 선형 변조 영역을 가지며 고조파 특성이 우수하여 교류 전동기 구동 시스템에 널리 사용된다. SVPWM 기법의 경우, 지령 전압이 전압 육각형의 내접원을 벗어나게 되면 과변조 상태가 된다. 과변조 상태에서는 지령 전압에 따라 출력 전압이 비선형적으로 출력되어 고조파 함유량이 증가하며, 교류 전동기 구동 시스템 적용 시 순시 토크 제어 성능이 떨어진다.[1] 따라서, 과변조 기법을 통해 인버터가 지령 전압과 최대한 근접한 출력 전압을 발생하도록 할 필요가 있다.

본 논문에서는 SVPWM 기법의 과변조 영역 및 과변조 기법에 대해 설명하고, PSIM 시뮬레이션을 통해 과변조 기법에 따른 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성 및 인버터 출력 전압의 고조파 특성을 비교 분석한다.

2. 본 론

2.1 SVPWM 기법의 과변조

그림 1(a)는 SVPWM 기법에서 출력 전압이 지령 전압의 크기에 비례하여 출력되는 선형 변조 영역을, 그림 1(b)는 출력 전압이 지령 전압의 크기에 비선형적으로 출력되는 과변조 영역을 나타낸다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이, 선형 변조 영역은 전압 육각형의 내접원 내부이며, 이를 벗어나는 경우 과변조 영역에 해당한다. SVPWM의 선형 변조 영역은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V^* \le \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \frac{1}{\sin(60°+\theta)} \tag{1}$$

여기서, V_{dc}는 DC 링크 전압, V^*는 지령 전압 벡터, θ는 지령 전압 벡터의 위상을 의미한다. 지령 전압 벡터의 크기 $|V^*|$와 위상 θ는 각각 식(2), 식(3)과 같이 구할 수 있다.

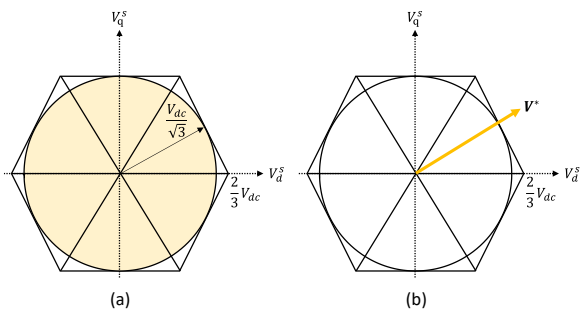

그림 1 SVPWM 기법의 전압 변조 범위 (a) 선형 변조 영역 (b) 과변조 영역
Fig. 1 Voltage modulation region of SVPWM (a) Linear modulation region (b) Overmodulation region

$$|V^*| = \sqrt{V_d^{s*2} + V_q^{s*2}} \tag{2}$$

$$\theta = tan^{-1}\frac{V_q^{s*}}{V_d^{s*}} \tag{3}$$

2.2 과변조 기법

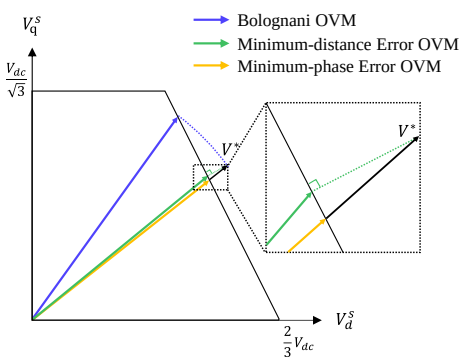

그림 2 과변조 기법
Fig. 2 Overmodulation methods

과변조 기법은 SVPWM 전압 육각형의 내접원을 벗어나는 지령 전압 벡터에 대하여 크기와 위상을 수정함으로써, 전압 변조 범위를 선형 변조 영역에서 과변조 영역까지 넓힐 수 있다.

그림 2는 지령 전압 벡터의 위상을 그대로 유지하며 그 크기

만 육각형으로 제한하는 동일 위상 과변조 기법(Minimum-phase Error OVM), 지령 전압 벡터와 크기 오차가 가장 작도록 수정하는 최소 거리 과변조 기법(Minimum-distance Error OVM), 지령 전압 벡터의 크기를 반지름으로 하는 원과 육각형의 교점으로 변조하는 Bolognani 과변조 기법[2]을 나타낸다. 전압 변조 지수 MI는 인버터의 전압 이용률을 나타내는 지표이며 본 논문에서는 다음과 같이 정의한다.

$$MI = \frac{V_{s1}}{\frac{V_{dc}}{2}} \quad (4)$$

여기서, V_{s1}은 인버터 출력 상전압의 기본파 크기이다. MI가 1.154보다 클 경우 과변조 영역에 해당한다.

2.3 시뮬레이션

과변조 기법에 따른 선형성 및 고조파 특성을 비교하기 위해 PSIM으로 인버터의 전압 변조 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터 및 실험 조건은 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 파라미터 및 실험 조건

Table 1 Parameters and experiment condition in simulation

Parameter	Value [Unit]
Resistor	10 [ohm]
Inductance	5 [mH]
DC-link voltage	100 [V]
Fundamental frequency	60 [Hz]
Switching frequency	10 [kHz]

그림 3은 과변조 기법 별 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성을 확인하기 위해, 지령 전압 변조 지수 MI^*에 따른 전압 변조 지수 MI를 비교한 그래프이다. MI^*가 1.154보다 작은 선형 변조 영역에서는 지령 전압에 대한 출력 전압의 비가 1로 유지되지만, MI^*가 1.154보다 큰 과변조 영역에서는 지령 전압에 대한 출력 전압의 비가 1보다 작아져 선형성이 상실됨을 알 수 있다. 세 기법 중 Bolognani 과변조 기법은 선형성이 가장 높으며 MI^*가 1.33보다 클 때 MI가 1.273($V_{s1} = \frac{2}{\pi}V_{dc}$)이므로, 인버터로부터 최대 출력 전압을 얻는 6-스텝 운전으로 전환이 가능함을 알 수 있다.

그림 4는 과변조 기법 별 인버터 출력 전압의 고조파 특성을 확인하기 위해 MI^*에 따른 인버터 출력 전압의 THD(Total Harmonic Distortion)를 비교한 그래프이다. 과변조 영역에 해당하는 모든 MI^*에 대하여 세 기법 중 Bolognani 과변조 기법이 인버터 출력 전압의 THD가 가장 높은 반면, 동일 위상 과변조 기법은 인버터 출력 전압의 THD가 가장 낮다. 이를 통해, 과변조 기법 활용 시 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성이 높을수록 출력 전압에 고조파 함유량이 많은 것을 알 수 있으며, 두 특성은 trade-off 관계임을 알 수 있다.

과변조 기법의 목적은 과변조 영역에서 인버터가 지령 전압과 최대한 근접하거나 동일한 전압을 출력하도록 하는 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 어떠한 과변조 기법을 활용하는지에 따라 지령 전압과 동일한 출력 전압을 내기 위한 지령 전압 변조 지수는 달라진다. 따라서, 지령 전압 변조 지수와 관계없이 동일한 출력을 낼 때의 고조파 특성을 비교하기 위해, 과변조 기법 별 전압 변조 지수에 따른 인버터 출력 전압의 THD를 비교하였다. 이에 대한 결과는 그림 5에 나타내었다.

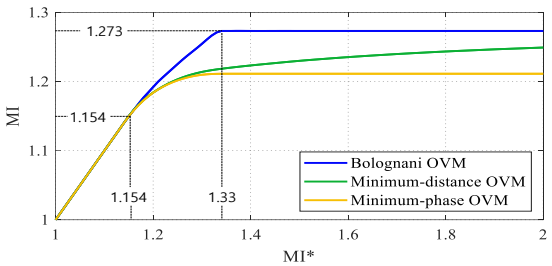

그림 3 지령 전압 변조 지수에 따른 전압 변조 지수

Fig. 3 Modulation index versus reference modulation index

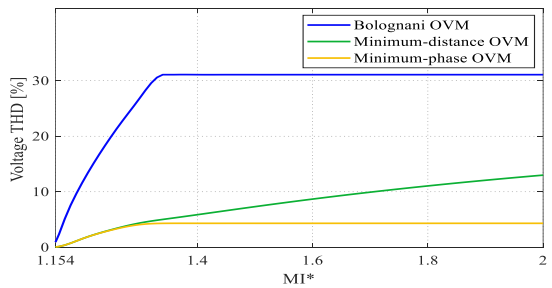

그림 4 지령 전압 변조 지수에 따른 인버터 출력 전압의 THD

Fig. 4 THD of inverter output voltage versus reference modulation index

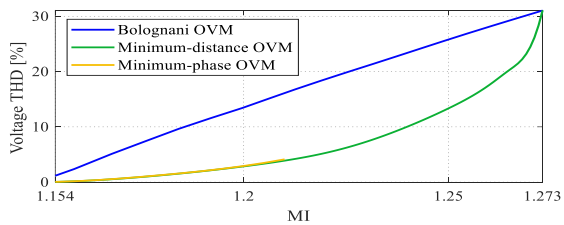

그림 5 전압 변조 지수에 따른 인버터 출력 전압의 THD

Fig. 5 THD of inverter output voltage versus reference modulation index

3. 결 론

본 논문에서는 과변조 기법에 따른 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성 및 출력 전압의 고조파 특성을 비교 분석하였다. 그 결과, 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성이 높을수록 인버터 출력 전압에 고조파 함유량이 많은 것을 확인하였다. 이를 통해, 과변조 기법 활용 시 선형성과 고조파 특성은 trade-off 관계임을 알 수 있다. 따라서, 전기자동차와 같은 고성능 교류 전동기 구동 시스템에 과변조 기법을 적용할 경우, 선형성과 고조파 특성을 모두 고려하여 과변조 기법을 적용해야 한다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

참 고 문 헌

[1] S. H. Kim, *Electric Motor Control, DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier Inc. Ch. 08, 2022.

[2] S. Bolognani and M. Zigliotto, "Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 2, pp. 525-530, March-April 1997.