

IPMSM의 6-스텝 운전을 위한 동적 과변조 기법

김민우, 김이삭, 이승준, 박정욱
연세대학교

Dynamic Overmodulation Method for Six-step Operation of IPMSM

Minwoo Kim, Issac Kim, Seungjun Lee, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기 전동기 (IPMSM)의 6-스텝 운전을 위한 새로운 동적 과변조 기법을 제안한다. 제안하는 과변조 기법은 지령 전압의 크기에 따라 지령 전압을 전압 육각형의 변 또는 꼭짓점으로 수정하기 위한 각도를 계산하고 변조한다. 이를 통해 지령 전압이 증가함에 따라 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환이 가능하다. 또한, 기존 동특성 향상 기법에 계인을 적용하여 전류 제어의 동특성을 향상시키면서 d -축 전류의 오버 샷을 조절할 수 있다. PSIM 시뮬레이션을 통해 제안된 과변조 기법의 유효성을 검증하였다.

1. 서론

공간 벡터 전압 변조 (SVPWM)에서 지령 전압이 전압 육각형을 벗어나는 비선형 변조 영역에서는 지령 전압 보다 작은 전압이 출력된다. 이러한 비선형 변조 영역에서 인버터의 출력 전압을 높이기 위해 과변조와 6-스텝 운전이 사용된다. 특히 6-스텝 운전은 인버터의 출력 전압을 최대로 하여 IPMSM의 출력 토크를 높일 수 있다. 이러한 6-스텝 운전의 장점을 효과적으로 활용하기 위해서는 과변조 영역의 모든 전압을 변조하여 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환할 수 있어야 한다.

동적 과변조 기법은 과도 상태에서 육각형 외부에 위치한 지령 전압을 순시적으로 육각형 변 상으로 수정하여 제어의 동특성을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 그림 1은 구현이 쉽고 간단하여 널리 사용되는 동적 과변조 기법인 동일 위상 과변조 기법 (MPEOVM)과 최소 거리 과변조 기법 (MDEOVM)을 나타낸다. V_{dq}^{s*} 는 지령 전압을, $V_{dq,MPE}^{s*}$ 와 $V_{dq,MDE}^{s*}$ 는 각각 MPEOVM과 MDEOVM에 의해 수정된 지령 전압을 나타낸다. 여기서, 위 첨자 's'는 고정자 좌표계를 의미한다. 두 기법은 지령 전압을 순시적으로 적절히 수정하여 제어의 동특성을 향상시키기 위해 사용된다. 하지만 두 기법은 지령 전압이 증가하더라도 6-스텝 운전을 보장할 수 없다. MDEOVM의 경우, 지령 전압이 무한히 커지게 되면 6-스텝 운전이 가능할 수 있지만, 주파수 변조 지수 혹은 지령 전압의 샘플링 위치에 영향을 받는다. 또한, 실제 PI 전류 제어기의 성능을 고려했을 때 지령 전압이 무한히 커지기까지 시간이 소요되므로 전류 피드백 제어의 성능은 매우 악화될 수 있다. 더욱이, MPEOVM과 MDEOVM은 동적 과변조 기법임에도 불구하고 지령 전압이 커짐에 따라 출력 전압의 비선형성이 매우 심해지기 때문에 전류 제어의 동특성이 좋지 못하다. 이에 따라, 동특성 향상을 위한 과변조 기법에

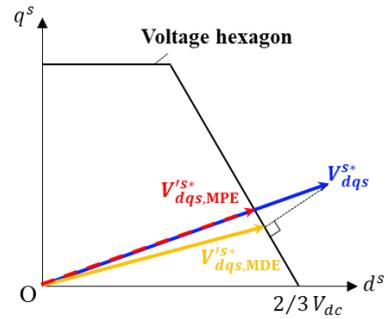


그림 1. MPEOVM과 MDEOVM.
Figure 1. MPEOVM and MDEOVM.

관한 연구가 진행되었다^{[1]-[2]}. [1]에서는 d, q -축 간의 cross coupled 특성을 이용한 지령 전압 수정 기법을 통해 전류 제어의 동특성을 크게 향상시켰으나, d -축 전류에 과도한 오버 샷이 발생하는 문제가 있다. [2]에서 제안된 과변조 기법은 빠른 동특성을 갖지만, 기본적으로 MPEOVM을 활용하기 때문에 6-스텝 운전이 불가능하다는 한계가 있다.

본 논문에서는 6-스텝 운전을 위한 새로운 동적 과변조 기법을 제안한다. 또한, 기존 동특성 향상 기법에 계인을 적용하여 전류 제어의 동특성을 향상시키면서 d -축 전류의 오버 샷을 완화시킨다. PSIM 시뮬레이션으로 IPMSM 구동 시스템을 구성하여 제안된 과변조 기법의 유효성을 검증하였다.

2. 제안하는 과변조 기법

2.1 제안하는 ψ -과변조 기법 (PSIOVM)

제안하는 PSIOVM은 지령 전압의 크기에 따라 지령 전압을 육각형의 변 또는 꼭짓점으로 수정하기 위한 수정 각 ψ 를 계산한다. 지령 전압의 크기를 나타내기 위해 지령 전압 변조 지수, MI^* 를 다음과 같이 정의한다.

$$MI^* = \frac{\sqrt{V_{ds}^{s*2} + V_{qs}^{s*2}}}{V_{dc}/2} \quad (1)$$

제안하는 PSIOVM은 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환되는 기준 MI^* 를 k 로 선정한다(단, $k \geq 1.333$). 이후 MI^* 와 k 를 비교하여 전압 변조 방법을 결정된 뒤, 그에 따른 ψ 를 통해 지령 전압을 수정한다. ψ 를 MI^* 에 따라 식(2)과 같이 정의하며, ψ_{ovm} 과 ψ_{six} 는 각각 과변조 및 6-스텝 운전을 위한 수정 각을 의미한다. 그림 2는 PSIOVM의 지령 전압 수정 방법을 나타낸

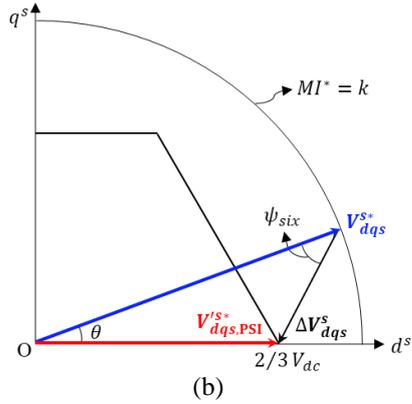
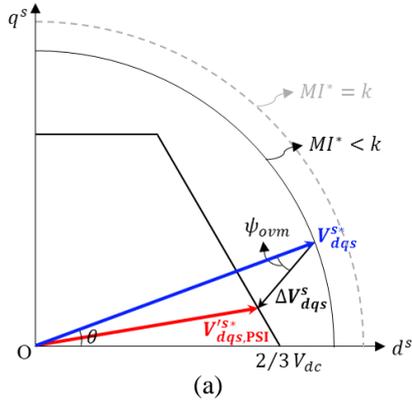


그림 2. 제안하는 PSIOVM. (a) 6-스텝 운전 (b) 과변조
Figure 2. Proposed PSIOVM. (a) Six-step operation (b) Overmodulation

$$\psi = \begin{cases} \psi_{ovm} & (1.154 \leq MI^* \leq k) \\ \psi_{six} & (MI^* \geq k) \end{cases} \quad (2)$$

다. $V_{dqs,PSI}^{s*}$ 는 PSIOVM에 의해 수정된 지령 전압을, ΔV_{dqs}^s 는 과변조 기법에 의해 수정된 지령 전압과 초기 지령 전압 사이의 오차를, θ 는 V_{dqs}^{s*} 의 위상을 의미한다. 또한, ψ_{six} 와 ψ_{ovm} 은 각각 식(3)와 식(4)을 통해 계산될 수 있으며, ψ_{ovm} 은 MI^* 의 과변조 정도에 대한 비율을 ψ_{six} 에 곱하여 얻는다. 과변조 동작에서 MI^* 가 k 보다 작은 경우, 지령 전압은 ψ_{ovm} 을 통해 육각형의 변상으로 수정된다. 지령 전압이 점차 커져 MI^* 가 k 와 같아지면, 지령 전압은 ψ_{six} 을 통해 육각형의 꼭짓점으로 수정된다. 이 과정을 통해, 수정된 지령 전압이 육각형 변상에서 육각형의 꼭짓점으로 수렴하여 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환이 가능하다.

$$\psi_{six} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \theta - \tan^{-1} \frac{0.5 MI^* \cos \theta - \frac{2}{3}}{0.5 MI^* \sin \theta} & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{6}) \\ \theta - \tan^{-1} \frac{0.5 MI^* \sin \theta - \frac{\sqrt{3}}{3}}{0.5 MI^* \cos \theta - \frac{1}{3}} & (\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\psi_{ovm} = \left(\frac{MI^* - 1.154}{k - 1.154} \right) \times \psi_{six} \quad (4)$$

2.2 전류 제어 동특성 향상 기법

IPMSM의 고정자 전압 방정식에서 고정자 저항에 의한 전압 강하 성분을 무시하면 q -축 전류 i_{qs}^r 의 동특성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

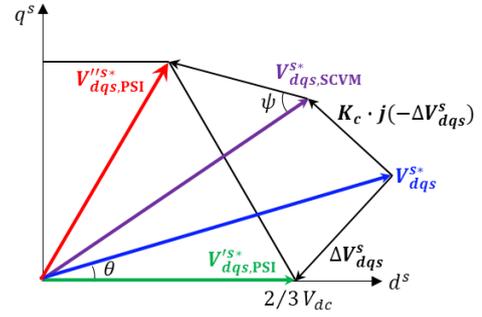


그림 3. 제안하는 PSIOVM에 SCVM을 적용했을 때 지령 전압 수정.
Figure 3. Reference voltage modification of proposed PSIOVM with SCVM.

$$L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} \approx v_{qs}^r - e_{qs}^r \quad (5)$$

$$e_{qs}^r = \omega_r (L_{ds} i_{ds}^r + \lambda_f) \quad (6)$$

여기서, v_{qs}^r , e_{qs}^r , i_{ds}^r , L_{ds} , L_{qs} , λ_f , ω_r 는 각각 q -축 출력 전압과 역기전력, d -축 전류, d, q -축 인덕턴스, 영구자석 자속, 모터 속도를 의미하고, 위 첨자 'r'은 회전자 좌표계를 의미한다. ω_r 가 증가하면 e_{qs}^r 가 커지기 때문에 i_{qs}^r 의 동특성이 악화된다. 이때 i_{ds}^r 를 의도적으로 감소시켜 e_{qs}^r 를 줄이면 i_{qs}^r 의 동특성을 향상시킬 수 있다. [2]에서는 이러한 i_{ds}^r , i_{qs}^r 의 cross coupled 특성을 이용하여 지령 전압을 수정하는 기법 (CVM)이 제안되었다. CVM은 V_{dqs}^{s*} 에 $-\Delta V_{dqs}^s$ 를 90도 회전시킨 전압 벡터 $-j\Delta V_{dqs}^s$ 를 더함으로써 전류의 동특성을 향상시키지만, d -축 전류에 과도한 오버 샷이 발생하는 문제가 뒤따른다. 따라서, 본 논문에서는 d -축 전류의 오버 샷을 조절하기 위해 기존 CVM에 계인 K_c 를 곱하여 $-j\Delta V_{dqs}^s$ 의 크기를 조절하는 기법 (SCVM)을 제안한다. SCVM을 통해 수정되는 지령 전압 $V_{dqs,scvm}^{s*}$ 은 식(7)과 같다.

$$V_{dqs,scvm}^{s*} = V_{dqs}^{s*} + K_c \cdot j(-\Delta V_{dqs}^s) \quad (7)$$

SCVM은 기존 과변조 기법에 적용하여 같이 사용될 수 있다. 그림 3은 제안하는 PSIOVM에 SCVM을 적용했을 때의 지령 전압 수정 방법을 나타낸다. 초기 지령 전압 V_{dqs}^{s*} 는 식(7)을 통해 $V_{dqs,scvm}^{s*}$ 로 수정된 이후, 다시 PSIOVM에 의해 $V_{dqs,PSI}^{s*}$ 로 최종 수정된다.

표 1 시뮬레이션 시스템 사양

Table 1 System specification in simulation

Parameter	Value
DC-link voltage	600 [V]
Rated power	100 [kW]
Number of poles	6
Stator resistance	0.00813 [Ω]
Linkage magnetic flux	0.16 [Wb]
Switching frequency	10 [kHz]

3. 시뮬레이션

제안하는 과변조 기법의 유효성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션으로 IPMSM 구동 시스템을 구성했으며, 사

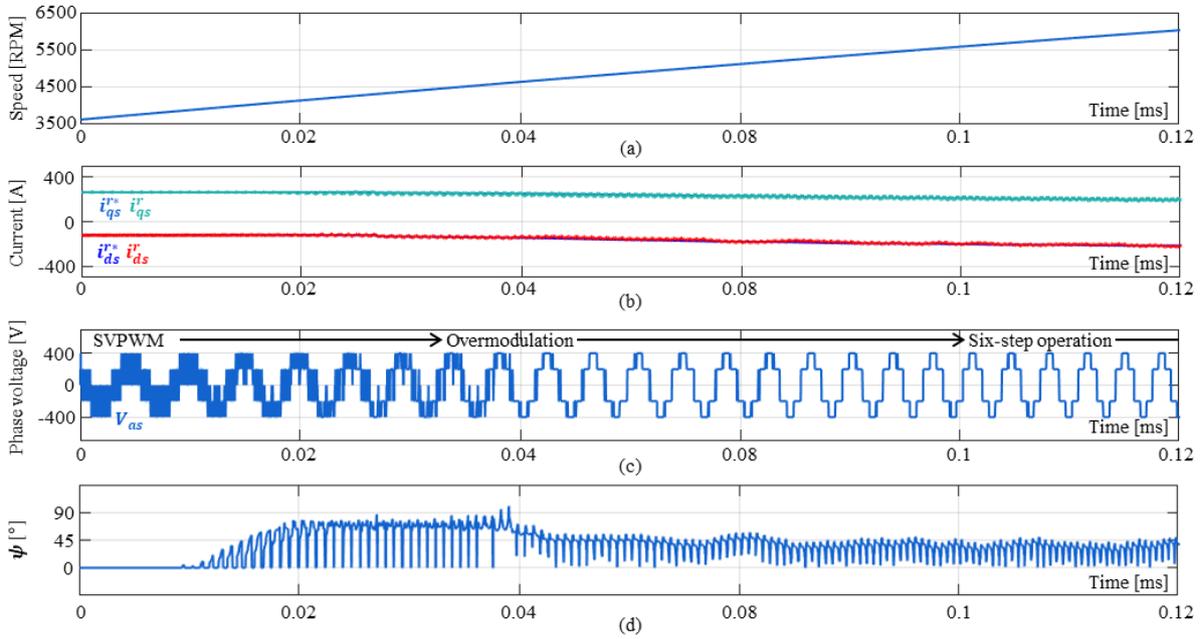


그림 4. 속도 증가에 따른 과변조 및 6-스텝 운전 전환 파형. (a) 모터 속도, (b) 전류, (c) a-상 전압, (d) ψ

Figure 4. Waveforms of transition from overmodulation and six-step operation according to an increase in motor speed. (a) Motor speed, (b) Currents, (c) a-phase voltage, (d) ψ

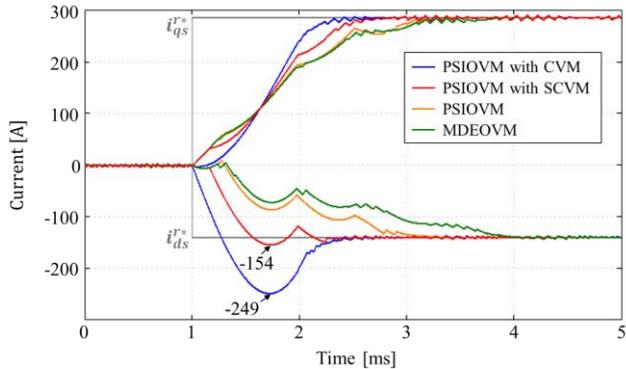


그림 5. 과변조 기법에 따른 전류 파형

Figure 5. Current waveforms according to overmodulation methods.

용된 시스템 사양은 표 1과 같다. 제안된 PSIOVM에서 불필요한 수정없이 지령 전압에 대한 출력 전압의 선형성을 가장 높게 하기 위해 k 를 1.333으로 선정하였다.

3.1 과변조 및 6-스텝 운전 전환

그림 4는 제안된 PSIOVM의 과변조에서 6-스텝 운전으로의 전환을 확인하기 위해 속도를 3620 rpm에서 6020 rpm까지 증가시켰을 때의 파형을 나타낸다. 비교적 저속에서는 SVPWM으로 동작하며 지령 전압이 육각형 내부에 위치하기 때문에 ψ 는 0으로 유지된다. 이후 속도가 점차 증가함에 따라 지령 전압은 육각형 외부에 위치하여 ψ 를 통해 지령 전압을 육각형의 변 또는 꼭짓점으로 수정함으로써 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환된다.

3.2 전류 제어 성능

그림 5는 과변조 기법에 따른 전류 파형을 나타낸다. 부하 모

터로 IPMSM을 3550 rpm으로 유지한 채, 1 ms에 270 N·m의 토크 지령을 인가하였다. 제안된 PSIOVM은 6-스텝 운전을 보장하여 식(5)의 v_{qs}^* 이 MDEOVM보다 크기 때문에 지령 전류를 더욱 빠르게 추종한다. 제안된 PSIOVM에 CVM을 적용한 경우, PSIOVM에 비해 전류 제어의 동특성이 매우 향상되었으나, i_{ds}^* 에 -249 A 만큼의 과도한 오버 샷이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 PSIOVM에 SCVM을 적용 시, 빠른 동특성을 유지하면서도 i_{ds}^* 의 오버 샷이 -154 A로, PSIOVM에 CVM을 적용한 경우 대비 오버 샷이 약 38% 감소하였다.

4. 결론

본 논문에서는 6-스텝 운전을 위한 새로운 동적 과변조 기법을 제안하였으며, 동특성 향상 기법을 추가적으로 적용하였다. IPMSM 구동 시뮬레이션을 통해 제안된 과변조 기법은 과변조에서 6-스텝 운전으로 전환이 가능하고, 전류 제어 시 빠른 동특성을 갖으며 기존 대비 오버 샷이 약 38% 감소하는 것을 확인하였다.

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

참고 문헌

- [1] Y. -C. Kwon, S. Kim and S. -K. Sul, "Six-Step Operation of PMSM With Instantaneous Current Control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 4, pp. 2614-2625, Jul./Aug. 2014.
- [2] J. Yoo and S.-K. Sul, "Dynamic overmodulation scheme for improved current regulation in PMSM drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 37, no. 6, pp.7132-7144, Jun. 2022.