

PMSM의 약자속 제어 시 과변조 성능 개선을 통한 토크 응답 특성 향상

정혜인, 김상훈

강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

Enhancement of Torque Response through Improvement of Overmodulation Performance in the Flux-weakening Control of PMSMs

Hye-In Jeong, Sang-Hoon Kim

BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

ABSTRACT

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 약자속 제어 시 인버터를 6-스텝 모드까지 운전함으로써 전동기의 출력 토크 능력을 최대로 활용할 수 있다. 그러나 6-스텝 동작을 위해 일반적으로 사용되는 정적 과변조 기법의 경우 구현이 복잡하며, 과도 상태에서의 동작이 고려되지 않기 때문에 토크 응답 특성이 저하된다. 이에 비해 구현이 간단한 동적 과변조 기법을 사용하는 경우 전압변조지수 증가에 따라 인버터의 전압 이득이 1보다 비선형적으로 크게 작아지기 때문에 6-스텝 모드에서의 운전이 힘들다. 이에 본 논문에서는 구현이 용이한 동적 과변조 기법에 대해 과변조 성능이 향상되도록 하는 방법을 제안하며, 제안된 방법에 의해 인버터가 6-스텝 모드까지 운전될 수 있으므로 구동 전동기의 출력 토크 능력을 최대한으로 활용할 수 있으며, 향상된 토크 응답 특성을 얻을 수 있다.

1. 서 론

PMSM의 약자속 동작 시, 직류 입력 전압의 이용률을 높이기 위해 인버터를 6-스텝 모드로 운전함으로써 전동기의 출력 토크 능력을 최대한으로 활용할 수 있다. 그러나 6-스텝 동작을 위해 사용되는 정적 과변조 기법의 경우 구현이 어려우며, 과도 상태에서의 동작이 고려되지 않아 전동기의 토크 응답 특성이 저하된다. 이에 비해 구현이 쉬운 동적 과변조 기법의 경우 전압 변조 지수가 증가함에 따라 과변조 영역에서의 전압 이득이 1보다 비선형적으로 작아지기 때문에 인버터가 6-스텝 모드로 운전될 수 없다. [1]에서는 6-스텝 모드에서의 동작과 빠른 토크 응답 특성을 얻기 위해 정적 과변조 기법 외에 별도의 동특성 향상 방법을 사용한다[1]. 그러나 [1]에서 제안한 방법은 구현이 어려우며, 제어 알고리즘을 복잡하게 만든다. 따라서 본 논문에서는 구현이 용이한 동적 과변조 기법의 과변조 성능을 개선하는 방법을 제안하며, 제안된 방법은 간단한 알고리즘에 의해 인버터가 6-스텝 모드까지 운전될 수 있도록 하여 출력 토크 능력을 최대한 활용할 수 있도록 하며, 빠른 토크 응답 성능을 얻을 수 있도록 한다. 제안된 방법을 800W PMSM에 적용하여 그 효용성을 확인하였다.

2. 기존의 동적 과변조 기법

그림 1은 인버터의 6-스텝 동작을 위해 동일 위상 과변조 기법(Minimum-phase-error OVM), 최소 거리 과변조 기법(Minimum-distance-error OVM), 스위칭 상태 유지 과변조 기

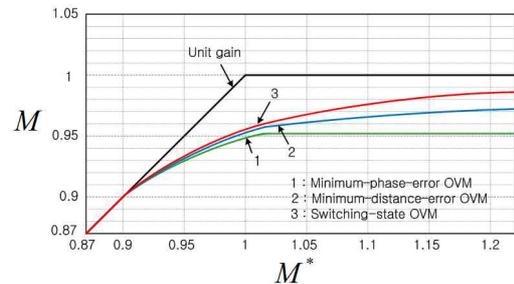


그림 1 동적 과변조 기법에 대한 인버터의 출력 전압 변조 성능

법(Switching-state OVM)을 적용한 경우의 지령 전압 변조 지수 M^* 에 대한 인버터의 출력 전압 변조 지수 M 을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 동적 과변조 기법을 적용한 경우, 과변조 영역에서 인버터의 전압 이득이 1보다 비선형적으로 작아지게 된다[2]. 따라서 PMSM 구동 시 인버터는 6-스텝 모드까지 운전될 수 없으며, 출력 토크의 응답 특성이 저하된다.

3. 제안된 과변조 성능 개선 방법

본 논문에서는 동적 과변조 기법을 사용한 경우의 인버터의 전압 이득을 증가시킴으로써 과변조 성능을 개선한다. 제안된 방법의 블록도가 그림 2에 보인다. 제안된 방법은 인버터의 과변조 동작 시 제한된 지령 전압의 오차 ($|V_s^*| - |V_{s,ovm}^*|$)를 이용하여 식 (1)처럼 보상 전압 $|V_{com}^*|$ 을 얻은 뒤, 식 (3), (4)를 통해 얻어진 보상된 3상 지령 전압 ($v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*$)을 이용하여 과변조 동작을 수행함으로써 과변조 성능이 개선될 수 있다.

$$|V_{com}^*| = K_c \cdot \frac{\omega_{com}}{s + \omega_{com}} \cdot (|V_s^*| - |V_{s,ovm}^*|) \quad (1)$$

$$V_s^* = \frac{2}{3} \cdot [v_{as}^* + a v_{bs}^* + a^2 v_{cs}^*] \quad (a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (2)$$

여기서 $|V_s^*|$, $|V_{s,ovm}^*|$ 는 각각 직류 제어기로부터 주어진 3상 지령 전압 ($v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*$)의 복소수 공간 벡터 V_s^* 와 주어진 지령 전압 벡터에 대해 동적 과변조 기법을 적용한 경우 제한된 3상 지령 전압 ($v_{as,ovm}^*, v_{bs,ovm}^*, v_{cs,ovm}^*$)의 복소수 공간 벡터 $V_{s,ovm}^*$ 의 크기 성분을 의미하며, 공간 벡터 V_s^* 는 식 (2)를 통해 얻어진다. 또한 ω_{com} 는 LPF(Low Pass Filter)의 차단 주파수이며, 보상 이득 K_c 는 인버터의 과변조 성능에 영향을

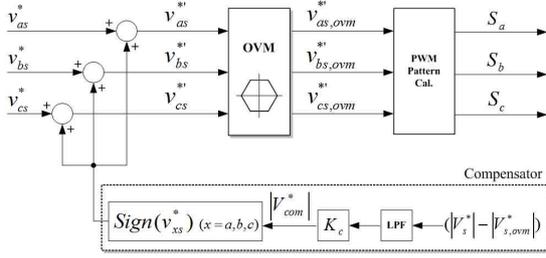


그림 2 제안된 과변조 성능 개선 방법의 블록도

미치는 요소로서, 이득 값이 클수록 인버터의 전압 이득이 증가하므로 더 향상된 출력 토크 능력을 얻을 수 있지만, 이 경우 출력 토크의 리플이 증가하게 된다.

$$\begin{aligned} v_{as}^* &= v_{as}^* + \text{Sign}(v_{xs}^*) \cdot |V_{com}^*| \quad (x=a) \\ v_{bs}^* &= v_{bs}^* + \text{Sign}(v_{xs}^*) \cdot |V_{com}^*| \quad (x=b) \\ v_{cs}^* &= v_{cs}^* + \text{Sign}(v_{xs}^*) \cdot |V_{com}^*| \quad (x=c) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Sign}(v_{xs}^*) = \begin{cases} 1 & (\text{if } v_{xs}^* > 0) \\ 0 & (\text{if } v_{xs}^* = 0) \\ -1 & (\text{if } v_{xs}^* < 0) \end{cases} \quad (x=a, b, c) \quad (4)$$

그림 3은 제안된 방법을 최소 거리, 스위칭 상태 유지 과변조 방법에 적용한 경우 향상된 인버터의 출력 전압 변조 성능을 나타낸다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 두 기법 모두 제안된 방법을 사용하면 기존의 과변조 기법만 사용한 경우보다 과변조 성능이 개선되므로 인버터가 6-스텝 모드까지 운전될 수 있으며, 향상된 출력 토크 응답 특성을 얻을 수 있다.

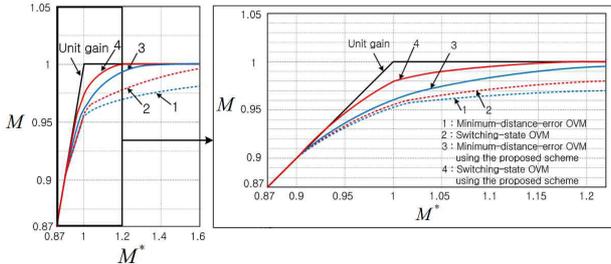


그림 3 제안된 방법에 의해 향상된 인버터의 출력 전압 변조 성능

4. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 효용성 검증을 위해 800W, 2000 r/min PMSM에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 경우 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이며, 전류의 샘플링 주기는 100us이다. 본 논문에서는 [3]에서 제안한 약자속 제어 방법을 사용하였으며, 이 방법은 전동기의 출력 토크 능력을 충분히 활용하기 위해 인버터의 과변조 영역을 활용한다[3].

본 논문에서는 제안된 방법을 최소 거리, 스위칭 상태 유지 과변조 기법에 적용하였다. 그림 4, 5는 각각 최소 거리 과변조와 스위칭 상태 유지 과변조 기법을 적용한 경우의 d, q축 전류 i_{ds}^* , i_{qs}^* , 출력 토크 T_e , 과변조 동작에 의해 육각형 내로 제한된 a상 지령 전압 $v_{as,ovm}^*$, 인버터의 출력 전압 변조 지수 M 을 나타낸다. 그림 4 (a)의 기존의 최소 거리 과변조 기법만 적용한 경우 전압 변조 지수 M 은 0.98로 제한되며, 이 경우 출력 토크의 응답 특성이 크게 저하됨을 확인할 수 있다. 반면, (b)의 과변조 성능 개선 방법을 사용한 최소 거리 과변조 기법

을 적용한 경우 M 은 1로 인버터가 6-스텝 모드까지 동작될 수 있으며, 토크 응답 특성이 향상될 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 5의 스위칭 상태 유지 과변조 기법을 적용한 경우에는 (a)의 기존의 과변조 기법만 사용한 경우와 (b)의 제안된 방법을 사용한 경우 모두 M 은 1로 6-스텝 동작이 가능하지만, (c)에서 알 수 있듯이 제안된 방법에 의해 더 향상된 토크 응답 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 제안된 과변조 성능 개선 방법에 의해 PMSM의 출력 토크 능력이 충분히 활용될 수 있으며, 이를 참고문헌 [4]를 통해 확인할 수 있다[4].

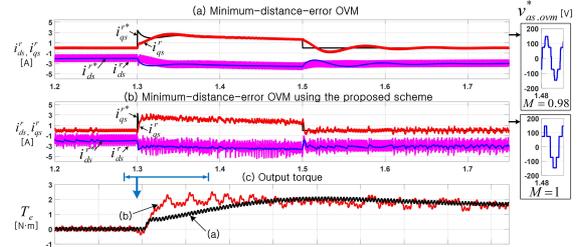


그림 4 최소 거리 과변조 기법에 대한 시뮬레이션 결과

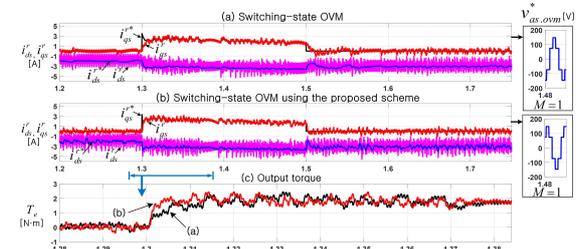


그림 5 스위칭 상태 유지 과변조 기법에 대한 시뮬레이션 결과

5. 결 론

본 논문에서는 동적 과변조 기법에 대해 과변조 성능을 개선하여 인버터가 6-스텝 모드까지 운전될 수 있도록 함으로써 PMSM의 출력 토크 능력을 최대한으로 활용할 수 있도록 하였으며, 토크 응답 특성이 향상될 수 있도록 하였다. 제안된 방법은 6-스텝 동작과 토크 응답 특성 향상을 위한 다른 복잡한 제어 기법들보다 간단하게 구현될 수 있다.

본 연구는 에너지기술평가원(에너지기술개발사업, 산업기술혁신사업 : 과제번호 20183010140980)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. C. Kwon, S. M. 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] S. H. Kim, *Electric Motor Control, DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch. 7, 2017.
- [3] 권태석, "영구자속동기기의 출력토크 향상을 위한 새로운 약자속 제어기", 박사학위논문, 서울대학교, 2007.
- [4] 정혜인, 김상훈, "전압 피드백 보상에 의한 과변조 성능 향상", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp. 181-182, 2018.