

# PMSM의 약자속 제어 시 과변조 기법에 따른 출력 토크 성능 비교

정혜인, 김상훈  
강원대학교 전기전자공학전공

## Comparison of Output Torque Performances according to Overmodulation Schemes for Flux Weakening Control of PMSMs

Hye In Jeong, Sang Hoon Kim  
Kangwon National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 PMSM의 약자속 제어 시에 적용된 과변조 기법에 따른 출력 토크 성능을 비교 및 분석하였다. 기존의 약자속 제어 시 사용되는 동적 과변조 기법 대신 정적 과변조 기법을 적용하는 경우 6 스텝 모드까지 출력 전압의 선형성이 원활하게 유지되어 전동기의 최대 출력 토크 성능을 충분히 활용할 수 있음을 확인하였다.

### 1. 서 론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 높은 전력 밀도와 효율, 우수한 동특성으로 인해 여러 응용 분야에서 사용되고 있다. 전기 자동차, 전동차, 세탁기 등의 분야에 사용되는 PMSM은 넓은 속도 범위에서 동작이 되어야 하므로 약자속 운전이 반드시 필요하며, 공간의 제약으로 인해 전동기와 구동 시스템의 크기가 제한되므로 주어진 조건에서 최대한 큰 출력 토크를 얻는 것이 효율적이다. 전압 변조 범위를 과변조 영역까지 확장하면 선형 변조 영역으로 제어하는 것보다 PMSM의 출력 토크 성능을 향상시킬 수 있고, 6 스텝 모드까지 운전하면 전압 이용률이 최대가 되어 주어진 조건에서 최대한 큰 출력 토크를 얻을 수 있다. 이를 위해 과변조 범위를 활용하는 약자속 제어 기법<sup>[1]</sup>이 제안되었다. 그러나 이 경우 사용된 동적 과변조 기법은 지령 전압에 대한 인버터 출력 전압이 비선형적이기 때문에 6 스텝 모드까지 원활하게 운전되지 못하므로 출력 토크 향상 효과가 충분하지 못하다. 본 논문에서는 정적 과변조 기법을 적용하여 지령 전압에 대한 인버터 출력 전압의 선형성을 유지하고 6 스텝 모드까지 원활하게 운전되도록 하였는데, 그 결과 출력 토크 성능이 향상됨을 확인하였다.

### 2. 과변조 범위에서의 약자속 제어

#### 2.1 약자속 제어 기법

본 논문에서 사용된 약자속 제어 기법의 블록도가 그림 1에 보인다<sup>[1]</sup>. 이 약자속 제어는 과변조 범위까지 운전을 확장시킬 수 있는 장점이 있다. 이 제어에서는 전류제어기 출력 전압과 인버터 출력 전압 사이의 오차( $V_{ds}^{r*} - V_{ds}^r$ ,  $V_{qs}^{r*} - V_{qs}^r$ )를 폐환하여 이로부터 보상전류  $i_{ds,c}^{r*}$ 를 얻고, MTPA 운전에 의해 결정된  $i_{ds}^{r*}$ 를  $i_{ds,c}^{r*}$ 만큼 감소시킴으로써 약자속 운전을 한다. 이때

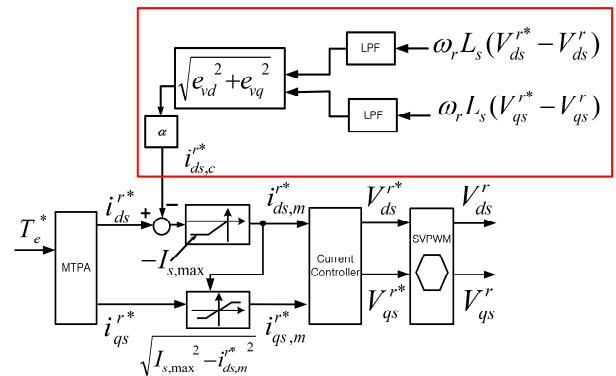


그림 1 약자속 제어 기법의 블록도

폐환 이득  $\alpha$ 에 따라 약자속 제어의 과도 특성과 출력 토크 특성이 달라진다.  $\alpha$ 를 크게 하면 얻을 수 있는 출력 전압 변조 지수가 작아져 출력 토크는 감소하지만 토크 리플은 줄어든다. 반면,  $\alpha$ 를 작게 하면 토크 리플이 커지지만 출력 전압 변조 지수를 증가시킬 수 있어 큰 출력 토크를 얻을 수 있다.

#### 2.2 동적 과변조 기법

그림 1의 약자속 제어에는 과변조 범위의 운전을 위해 최소 거리 과변조 기법을 사용하고 있다. 최소 거리 과변조 기법을 포함한 스위칭 상태 유지 과변조 기법, 동일 위상 과변조 기법 등의 동적 과변조 기법은 그림 2에 보이듯이 지령 전압에 대한 인버터 출력 전압의 관계가 비선형적이며, 6 스텝 모드로 쉽게 운전하기 힘들다. 따라서 약자속 제어 시 6 스텝 운전 시의 최대 출력 전압을 얻기 어려워 출력 토크 능력을 충분히 활용할 수 없고 좋은 동특성을 얻기 어렵다.

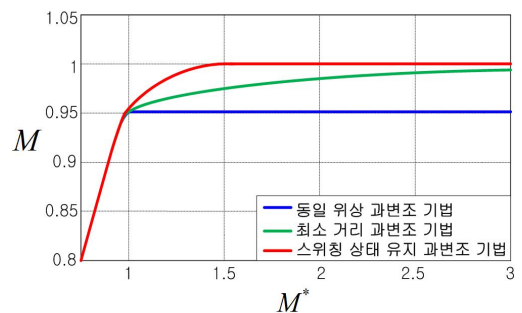


그림 2 동적 과변조 기법의 비선형성

### 2.3 정적 과변조 기법

정적 과변조 기법은 지령 전압과 한 주기 평균적으로 동일한 전압을 생성함으로써 지령 전압에 대한 인버터 출력 전압의 선형성을 유지한다<sup>[2]</sup>. 따라서 정적 과변조 기법을 약자속 제어에 사용하는 경우 과변조 범위에서 6 스텝 모드까지의 전압 지령을 선형적으로 원활히 발생하기 때문에 전압 이용률이 최대가 되어 출력 토크를 향상시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 참고문헌 [3]에서 제안된 정적 과변조 기법을 적용한 약자속 제어를 실행하였다.

## 3. 시뮬레이션 결과

약자속 제어 시 과변조 기법에 따른 성능비교를 위하여 11kW, 1500r/min SPMSM에 대해 시뮬레이션 하였다. 스위칭 주파수는 5kHz,  $V_{dc}$ 는 185V, 전류 제어기의 대역폭은 500Hz, 토크 지령은 70N·m로 하였다.

그림 3~6은 전류 제어가 가능한 범위 내에서 지령 전압의 변조 지수를 최대로 언도록 궤환 이득  $\alpha$ 를 조절하였을 때로서 각각 스위칭 상태 유지 과변조 기법( $\alpha=1.5$ ), 최소 거리 과변조 기법( $\alpha=2$ ), 동일 위상 과변조 기법( $\alpha=2.5$ )의 특성을 보인다. 이 경우 출력 전압의 변조 지수는 스위칭 상태 유지 과변조 기법의 경우 0.999, 최소 거리 과변조 기법의 경우 0.97, 동일 위상 과변조 기법의 경우 0.951까지로 제한되어 6 스텝 모드까지의 운전이 가능하지 않음을 알 수 있다. 반면에 그림 6에 나타난 정적 과변조 기법을 적용했을 때( $\alpha=2.3$ )의 특성을 보면, 6 스텝 모드까지의 운전이 가능하여 최대 출력 토크 능력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 이들 4가지의 과변조 기법에 따른 출력 토크 특성을 알아보기 위해 가속 성능을 비교한 것이다. 정적 과변조 기법을 사용한 경우 동일한 속도에 도달하는데 걸리는 시간이 가장 짧다는 것을 알 수 있으며, 따라서 정적 과변조 기법을 사용한 경우 동적 과변조 기법보다 큰 출력 토크 능력을 발휘함을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 과변조 기법에 따른 PMSM의 약자속 제어 시 출력 토크 성능을 비교 및 분석하였다. 정적 과변조 기법을 약자속 제어에 적용하면 전압 지령에 대한 인버터 출력 전압의 선형성이 유지되고 6 스텝 모드의 운전이 가능하여 동적 과변조 기법을 적용한 경우보다 출력 토크 성능을 향상시킬 수 있으며 동특성 역시 개선할 수 있다. 따라서 전동기와 구동 시스템의 크기가 제한되는 PMSM의 응용 분야에서 약자속 제어 시 정적 과변조 기법을 적용하는 것이 주어진 조건에서 최대 출력 토크 능력을 얻을 수 있으므로 효율적이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 권태석, "영구자석동기기의 출력토크 향상을 위한 새로운 약자속 제어기", 박사학위논문, 서울대학교, 2007.
- [2] Sang Hoon Kim, *Electric Motor Control, DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch 7, 2017.
- [3] 한대용, "폴전압을 이용한 SVPWM 인버터의 과변조 기법", 석사학위논문, 강원대학교, 2002.

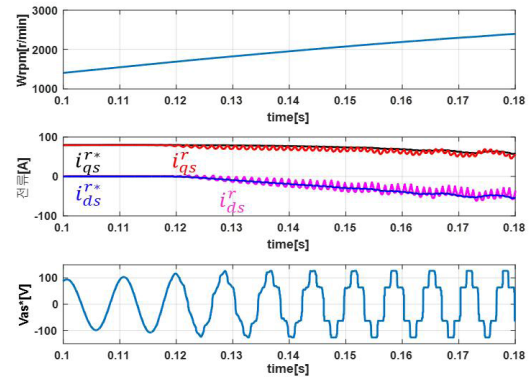


그림 3 스위칭 상태 유지 과변조 기법

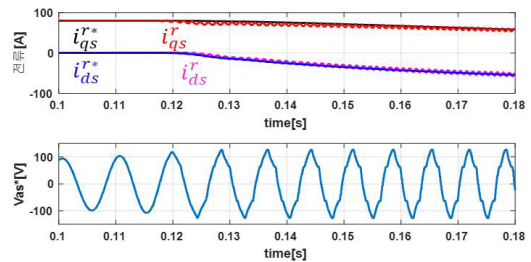


그림 4 최소 거리 과변조 기법

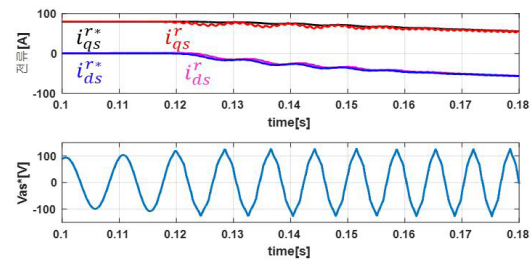


그림 5 동일 위상 과변조 기법

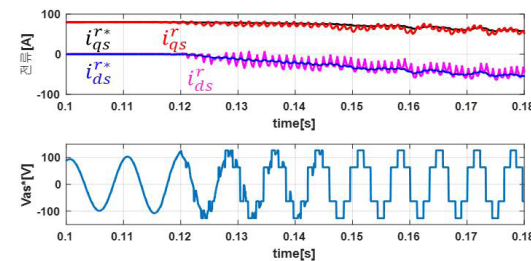


그림 6 정적 과변조 기법

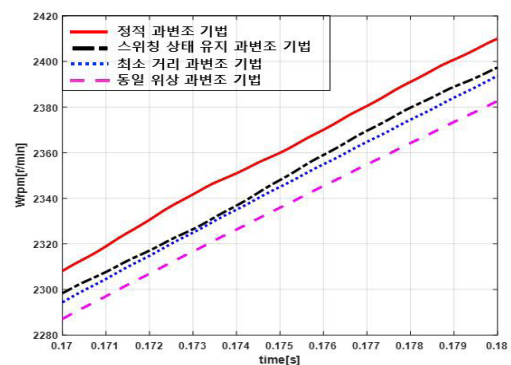


그림 7 과변조 기법에 따른 가속 성능 비교