

# 주파수 변조 지수가 낮은 전동기 시스템 구동 시 출력 토크 성능 향상

정혜인, 김상훈  
강원대학교

## Performance Improvement of Output Torque in driving a Motor System with Low Frequency Modulation Index

Hye-In Jeong, Sang-Hoon Kim  
Kangwon National University

### ABSTRACT

주파수 변조 지수( $m_f$ )가 낮은 전동기 시스템 구동 시 인버터의 전압 합성을 위해 스위칭 주파수가 고정된 비동기 PWM을 적용하는 경우 지령 전압 한 주기 내에 삼각 반송파가 동기되지 못해 인버터 출력 전압에 기본파 이외에 많은 고조파 성분이 포함된다. 이로 인해 전동기 구동 시 토크 리플이 발생되며, 이는 특히 고속 운전 영역에서 더 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 출력 토크 리플 개선을 위한 동기 PWM 방법을 제안하였다. 또한, 동기 PWM 시 인버터를 six-step 모드까지 구동하여 전동기의 출력 토크 능력을 최대한으로 활용하기 위해 과변조 보상 방법을 제안하였다.

### 1. 서 론

철도 차량용, 고속 운전용 전동기 구동 시스템과 같이  $m_f$ 가 낮은 시스템 구동 시 비동기 PWM을 적용하는 경우 전동기에 출력 토크 리플이 발생하므로 이를 개선해주어야 한다. 또한, 전동기의 고속 운전 시 인버터를 six-step 모드까지 구동하는 경우 주어진 입력 전압을 최대한 활용하여 출력 토크 능력을 향상시킬 수 있으며, 스위칭 손실을 최소화할 수 있다. [1]에서는 이를 위한 동기 PWM 방법을 제안하였다. 이 방법은 전동기의 출력 토크 성능을 향상시킬 수 있으나, 구현 알고리즘이 복잡하고 많은 연산이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 간단한 구현으로 토크 리플을 개선할 수 있는 동기 PWM 방법을 제안하였다. 또한, 전동기의 출력 토크 능력 향상을 위해 인버터를 six-step 모드까지 원활히 전환할 수 있는 과변조 보상 방법을 제안하였다. 210kW급 철도 차량용 IPMSM 구동 시 물래이션을 통해 제안된 방법의 효용성을 입증하였다.

### 2. 제안하는 출력 토크 성능 향상 방법

낮은  $m_f$ 를 갖는 전동기 시스템 구동 시 전동기가 가·감속됨에 따라 샘플링 주기를 가변하는 경우 속도 변화에 상관없이 항상 지령 전압의 기본파 한 주기에 삼각 반송파가 동기화될 수 있어 출력 토크 리플을 개선할 수 있다. 또한, 이러한 동기 PWM 시 상전압의 WTHD를 최소화하기 위한 펄스 패턴으로 전환하면서 구동하는 경우 한 가지 펄스만 이용하는 것 보다 토크 리플 성능을 개선할 수 있다. 이러한 펄스 전환 시에는

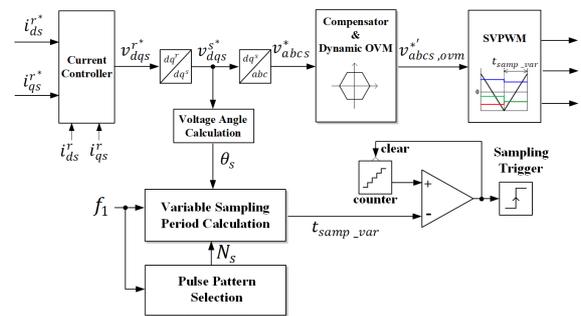


그림 1 전동기 시스템 구동 시 출력 토크 성능 향상을 위한 블록도

토크의 불연속 없이 부드러운 전환이 이루어지는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 동기 PWM 동작을 위해 샘플링 주기 가변 방법과 펄스 전환 방법을 제안하였다. 또한, 전동기의 고속 운전 시 출력 토크 성능 향상을 위해 [2]에서 제안한 과변조 보상 방법을 적용하였다.

제안된 방법의 블록도가 그림 1에 나타나 있다. 가변 샘플링 주기  $t_{smp\_var}$ 는 식 (1)~(3)과 같이 계산되며,  $f_1$ 은 기본파 주파수를,  $N_s$ 는 3상 인버터의 유효벡터, 영벡터로 이루어진 육각형 영역에서 한 섹터 당 샘플링 수를 의미한다. 또한,  $\theta_s^*$ ,  $\theta_s$ 는 각각 동기 PWM 시 정지 좌표계 지령 전압각과 실제 전압각을 의미한다.

$$t_{smp\_var} = t_{smp\_1} + t_{smp\_com} \tag{1}$$

$$t_{smp\_1} = \frac{1}{f_1 \cdot 6N_s} \tag{2}$$

$$t_{smp\_com} = \frac{\theta_s^* - \theta_s}{\frac{\pi}{3N_s}} \cdot t_{smp\_1} \tag{3}$$

펄스 전환을 위해 연속, 불연속 동기 PWM 방법<sup>[1]</sup>의 펄스 수에 따른 상전압의 WTHD를 분석한 결과, 1.2kHz의 스위칭 주파수 제한 하에서 연속 변조 동기 PWM 방법의 WTHD 성능이 가장 우수했으므로 이 방법을 펄스 전환에 사용하였다. 표 1은 펄스 전환에 사용되는 연속 변조 동기 PWM 방법의 펄스 수를 나타내며, 그림 2는 섹터 1에서 15 → 9 펄스 전환 예시를 나타낸다.

표 1 펄스 전환에 사용되는 연속 변조 동기 PWM 방법의 펄스 수

펄스 수	$N_s$	샘플링 위치	인버터 출력 전압 벡터 위치
9	3	0°, 20°, 40°	10°, 30°, 50°
15	5	0°, 12°, 24°, 36°, 48°	6°, 18°, 30°, 42°, 54°
21	7	0°, 8.57°, 17.14°, 25.71°, 34.28°, 42.85°, 51.42°	4.29°, 12.86°, 21.43°, 30°, 38.57°, 47.14°, 55.71°

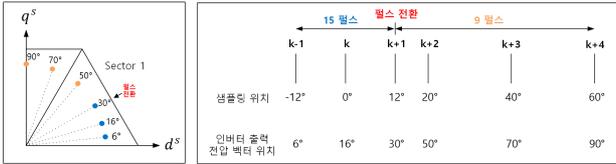


그림 2 섹터 1에서 15 → 9 펄스 전환 예시

펄스 전환은 각 섹터에서 인버터 출력 전압 벡터의 위치가 겹치는 정 가운데에서 이루어지며, 섹터 1의 경우 30°일 때 전환된다. 전환 전 15펄스의 경우 인버터 출력 전압 벡터는 6°, 18°, 30°에 위치되어야 하며, 이 경우 제어 알고리즘의 디지털 구현 시의 시지연을 고려하면 샘플링은 -12°, 0°, 12°에서 이루어져야 한다. k+1 시점에서 9펄스로 전환되면 인버터 출력 전압 벡터는 50°, 70°, 90°에 위치해야 하며, 이를 위해 샘플링은 20°, 40°, 60°에서 이루어져야 한다. 따라서 펄스 전환을 위해 k+1 ~ k+2 시점에서는 식 (1)이 아닌 식 (4)와 같이 샘플링 주기를 계산해주어야 한다. 여기서  $N_{s,bef}$ ,  $N_{s,aft}$ 는 각각 펄스 전환 전, 후의 한 섹터 당 샘플링 횟수를 의미한다. 이 경우, k+1 ~ k+2 시점에서 펄스 전환 샘플링 주기가 변경되므로 k 시점의 인버터 출력 전압 벡터의 위치는 18°가 아닌 16°가 된다. 21 → 15 펄스 전환은 본 논문에서 나타내지 않았지만 15 → 9펄스 전환 시와 동일한 원리로 전환하게 된다.

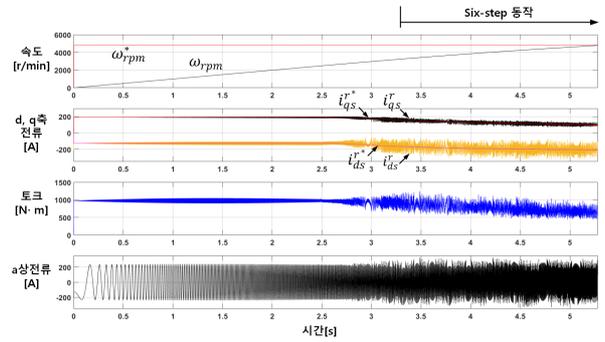
$$t_{smp\_var} = \frac{1}{f_1 \cdot 6N_{s,aft}} - \frac{1}{f_1 \cdot 6N_{s,bef}} \quad (4)$$

### 3. 시뮬레이션 결과

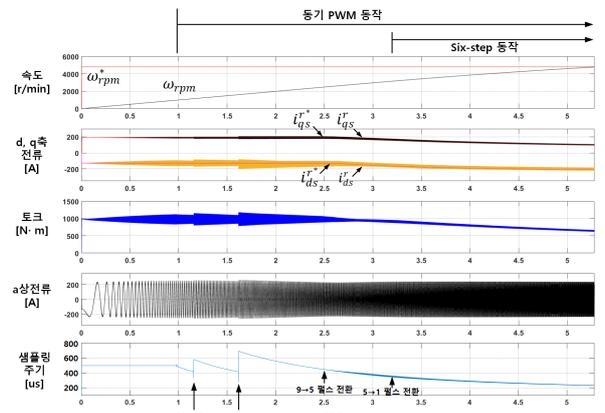
제안된 방법의 유효성 검증을 위해 철도 차량용 210kW급 IPMSM을 이용하여 고속 운전 시뮬레이션을 수행했다. 그림 3(a)는 스위칭 주파수가 2.2kHz로 고정된 비동기 PWM 적용 시의 구동 성능을, 그림 3(b)는 제안된 동기 PWM 방법을 적용하여 그림 3(c)의 펄스 전환 패턴으로 구동했을 때의 성능을 나타낸다. 그림 3(a)와 (b) 모두 스위칭 상태 유지 과변조 기법에 과변조 보상 방법을 적용했다. 제안된 동기 PWM 방법을 적용하는 경우 비동기 PWM 적용 시 보다 출력 토크 리플을 개선할 수 있으며, 펄스 전환 시 토크 불연속 없이 부드러운 전환이 가능함을 확인할 수 있다. 또한, 3(a)와 (b) 모두 과변조 보상 방법을 적용했기 때문에 인버터를 six-step 모드까지 원활하게 절환할 수 있으므로 전동기의 출력 토크 능력을 최대한으로 활용할 수 있다.

### 4. 결 론

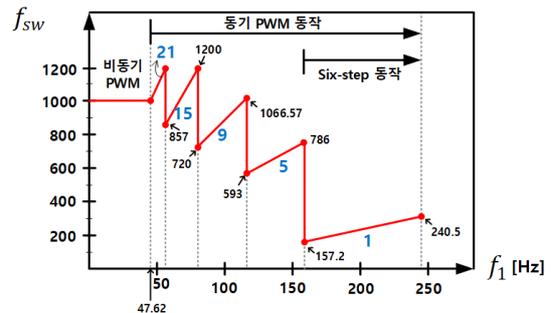
본 논문에서는  $m_f$ 가 낮은 전동기 시스템 구동 시 동기



(a) 비동기 PWM 적용 시 구동 성능



(b) 제안된 동기 PWM 적용 시 구동 성능



(c) 펄스 전환 패턴

그림 3 210kW급 IPMSM 구동 시뮬레이션 결과

PWM 동작을 위해 샘플링 주기 가변 방법과 펄스 전환 방법을 제안했다. 제안된 동기 PWM 방법은 간단한 구현으로 전동기의 출력 토크 리플을 개선할 수 있으며, 펄스 전환 시 출력 토크의 불연속 없이 부드러운 전환이 가능하다. 또한, 과변조 보상을 통해 인버터를 six-step 모드까지 원활하게 절환할 수 있어 전동기의 출력 토크 능력을 향상시킬 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 정상호, “낮은 주파수 변조 지수의 동기 PWM을 이용한 영구자석 전동기 구동,” 서울대학교 공학박사 학위논문, 2016.
- [2] H. I. Jeong and S. H. Kim, “Improved Overmodulation Technique for Enhancing Torque Capability of Inverter-Driven AC Motors,” *Journal of Power Electronics*, Vol. 21, No. 4, pp. 683-692, Apr. 2021.