

# 고속 소형 PMSM 구동장치의 전류 리플 저감을 위한 인덕터 추가 기법

박재성, 박상욱, 전금상, 안희욱  
금오공과대학교

## Addition of External Inductor for Reduction of current Ripple in High-speed small PMSM Drive system

Jaesung Park, Sangwook Park, Geumsang Jeon, Heewook Ahn  
Kumoh National Institute of Technology

### ABSTRACT

본 논문은 고속 소형 PMSM을 벡터제어 방식으로 구동하는 장치에서 전류 리플을 저감하기 위한 방법으로서 외부 인덕터를 추가하는 기법을 다룬다. 고속 소형 PMSM은 설계 특성상 인덕턴스가 매우 작기 때문에 전류 리플이 크게 나타나는데, 이로 인해 전동기 코어에서의 히스테리시스 손실이 증가하고 제어 시스템이 불안정하게 된다. 이 문제를 해결하면서도 벡터 제어를 용이하게 할 수 있도록 인덕터를 추가하는 기법을 검토하고, 적절한 외부 인덕턴스 값을 정량적으로 결정하는 방법을 제안한다. 100 W급 50,000 rpm의 PMSM 시스템에 대하여 시뮬레이션을 실시하여 제안된 기법의 타당성을 확인한다.

### 1. 서론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 높은 효율과 낮은 토크 리플 특성으로 인해 여러 분야에서 광범위 하게 사용되고 있다. 특히, 최근에는 치과 임플란트 삽입을 위한 드릴 장비로서 고속 소형의 PMSM가 적용 되고 있다.<sup>[1]</sup> 고속 소형 PMSM의 경우 설계 특성상 인덕턴스가 매우 작기 때문에 공간벡터변조 방식의 인버터 출력 전압에 의한 전류 리플이 매우 크다. 전류 리플은 노이즈를 발생시켜 제어 시스템의 불안정을 야기하고 이는 전동기의 기계적 소음 및 진동의 원인이 된다. 또한, 전동기 코어에서 발생하는 히스테리시스 손실로 인해 전동기의 수명을 단축시키게 된다.

이러한 전류 리플 문제에 따른 해결방안으로 전동기 전류 인가 측에 LC 필터의 추가 기법이 사용되고 있다.<sup>[2]</sup> 그러나, 벡터제어 방식에서는 LC 필터에 의한 위상 지연으로 인해 제어 알고리즘이 복잡해진다. 본 논문에서는 전류 리플을 저감하고 벡터제어를 용이하게 할 수 있도록 간단히 인덕터를 추가하는 기법을 적용하며, 전류 리플의 분석을 바탕으로 적절한 외부 인덕턴스를 정량적으로 결정하는 방법을 제안한다. 그리고 고속 소형 PMSM에 대한 시뮬레이션을 통하여 그 효과를 확인한다.

### 2. 전류 리플 분석

#### 2.1 전류 리플 크기의 계산 방법

공간벡터 변조방식(SVPWM)으로 작동되는 인버터에 대하여 전류 리플을 분석하고 계산하는 방법<sup>[3]</sup>을 적용한다. 이 방법

은 그림 1의 3상 인버터 시스템에서 상전류에 발생하는 전류 리플, 즉 실제 상전류와 기본파 성분과의 차이를 비교적 정확하게 분석한다.

그림 2는 하나의 스위칭 주기를 예로 들어 스위치 상태에 따른 전류의 변화를 나타내고 있다. 한 주기는 스위치 상태에 따라 7개의 구간을 가지는데  $t_1, t_2, t_0$ 는 SVPWM에서 기준 전압벡터의 생성을 위해 인가되는 표준 벡터  $V_k, V_{k+1}, V_{0,7}$  ( $k=1\sim5$ )의 시간이다. 각 표준벡터에 의한 전류의 기울기를 이용하여 한 주기 동안의 전류 변화량을 계산할 수 있다.

#### 2.2 전류 리플 최대값 계산

SVPWM 방식에서 변조지수(modulation index)가 최대이고 전압 기본파의 크기가 0 일 때 전류 리플은 가장 크게 나타난다. 그림 2는 a상 전압이 이 상태에 가까우므로 이를 이용하여 최대 리플을 계산한다. 표준 벡터  $V_5$ 와  $V_6$ , 그리고 영 벡터가 적용되는 시간은 다음과 같이 각각 계산된다.<sup>[4]</sup>

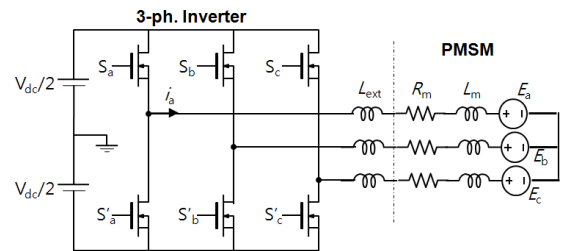


그림 1 PMSM 구동용 3상 인버터 시스템  
Fig. 1 Three-phase PMSM drive inverter system

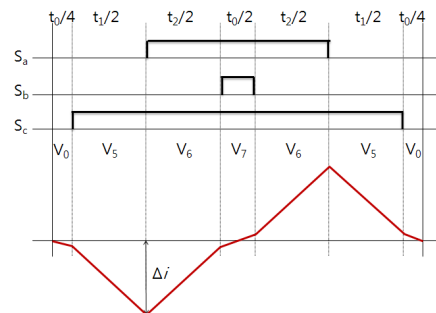


그림 2 한 스위칭 주기의 출력 전압과 전류 리플  
Fig. 2 output voltage and current ripple of one switching period

$$t_1 = \frac{T_s}{2}, t_2 = \frac{T_s}{2}, t_0 = 0 \quad (2)$$

여기서  $T_s$ 는 스위칭 주기이다. 이 시간을 구현하기 위한 스위치들의 듀티비는  $d_a=0.5, d_b=0, d_c=1$  이 되며 이 값들을 이용하여 벡터  $V_0$ 와  $V_5$ 가 각각 인가될 때의 전류의 기울기  $k_1, k_2$ 를 구하면 다음과 같다:

$$k_1 = \frac{V_{dc}}{3L} \cdot (d_b + d_c - 2d_a) = 0 \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{V_{dc}}{3L} \cdot (d_b + d_c - 2d_a - 1) = \frac{V_{dc}}{3L} \cdot (-1) \quad (4)$$

그리고 전류 리플의 피크값은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$\Delta i \cong k_1 \frac{t_0}{4} + k_2 \frac{t_1}{2} = \frac{V_{dc}}{3Lf_s} (-0.25) \quad (5)$$

$$|\Delta i| = \frac{0.08 V_{dc}}{Lf_s} \quad (6)$$

### 3. 적절한 외부 인덕턴스 설정 방법

전동기 전류 리플의 최소화를 위해 식(6)을 살펴보면, 전류 리플의 크기에 영향을 미치는 요소는 인버터의 직류링크 전압, 스위칭 주파수, 인덕턴스 임을 알 수 있다. 일반적으로, 인버터의 링크 전압은 고정전압이며, 스위칭 주파수를 높일 경우 고성능의 MCU가 필요하므로 비용이 증가한다는 점을 감안하여, 간단히 외부에 인덕터를 추가함으로써 전류 리플의 감소시키는 방법을 적용한다. 일반적으로 전류 리플의 허용치는 전류 기본과 성분의 10%이다.<sup>[5]</sup> 이 기준을 만족시킬 수 있는 인덕턴스( $L$ )의 크기를 식(6)으로부터 계산하면 외부에 추가될 인덕턴스를 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$L_{ext} = L \quad (7)$$

여기서  $L_m$ 은 전동기 내부의 상 인덕턴스이다.

### 4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제안된 전류 리플 저감을 위한 인덕터 추가 기법을 검증하기 위하여 표 1에 제시된 전동기 모델에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 속도 18,000 rpm, 직류링크 전압 40 V, 스위칭 주파수 20 kHz 이고 정격전류(3Arms)가 흐를 때, 상 전류를 나타낸 것이 그림 3이다. 외부 인덕터를 추가하지 않았을 때와, 식(8)과 같이 계산된 외부 인덕턴스(350 uH)를 추가하였을 때를 비교하였다. 리플 전류는 상 전류에서 기본과 성분을 제거하여 구한 결과이다. 인덕터 추가 전의 리플 전류 최대치는 4 A인데 이것은 전류 기본과 성분의 피크치 4.2 A와 비슷한 수준이다. 인덕터를 추가한 후에는 리플 전류 최대치가 0.4 A로 감소하였고 예상대로 정격전류의 10% 수준에 해당함

표 1 PMSM 모터 상수  
Table 1 PMSM parameter

정격출력	100[W]	정격 전류	3[A <sub>rms</sub> ]
최대속도	50,000[rpm]	상 저항	0.5[Ω]
정격속도	30,000[rpm]	상 인덕턴스	40[uH]
역기전력 상수	0.36[V <sub>rms</sub> /Krpm]	극수	2 pole

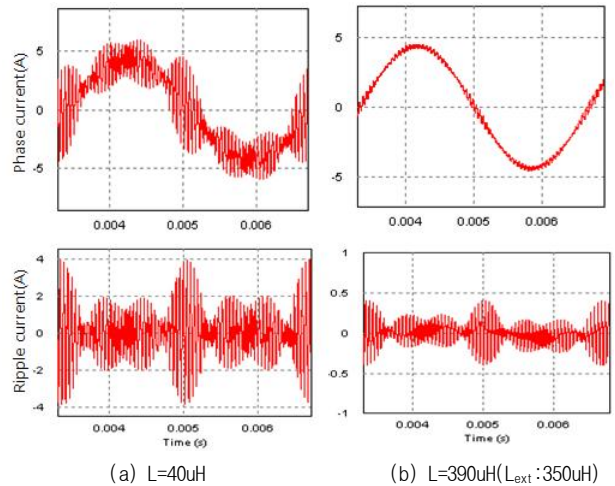


그림 3. 한 스위칭 주기의 전류 리플  
Fig. 3 output current ripple of one switching period

을 알 수 있다.

### 5. 결론

최고 속도 50000 rpm 수준의 고속 PMSM 구동 시스템에 대하여 전동기 전류 리플 저감을 위해 외부 인덕터를 추가할 때, 적절한 외부 인덕턴스를 정량적으로 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 기법으로 결정된 인덕턴스를 추가한 결과, 전류 리플이 정격 전류의 10%이하로 감소함을 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안된 방식은 제어 알고리즘의 변경이 없어도 용이하게 전류 리플을 저감시킬 수 있으므로 구동 장치의 안정성 확보 및 전동기의 손실 저감을 가능하게 한다.

### 참고 문헌

- [1] P. Pillay, R. Krishnan, Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives, (Periodical style), IEEE Trans. Ind. Applications, Vol.27, , pp.986 996 dec/oct 1991
- [2] Gulez, K.; Adam, A.A.; Pastaci, H. 'Torque Ripple and EMI Noise Minimization in PMSM Using Active Filter Topology and Field Oriented Control', Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Jan, 2008, pp.251 257
- [3] Dong Jiang, "Study of Analytical Current Ripple of Three Phase PWM converter", APEC, 2012 Twenty Seventh Annual IEEE
- [4] K. Vinoth Kumar, Prawin Angel Michael, Joseph P. John , "SIMULATION AND COMPARSON OF SPWM AND SVPWM CONTROL FOR THREE PHASE INVERTER", , ARPJ, vol.5, no. 7, July 2010
- [5] Maxon motor PWM Scheme and Current ripple of Switching Power Amplifiers