

철손을 고려한 SPMSM의 MTPA 제어

김도현, 김상훈
강원대학교 전기전자공학전공

A MTPA Control of SPMSMs Considering Core Losses

Do Hyun Kim, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 철손을 고려한 SPMSM(Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)의 모델로부터 출력 토크를 향상시킬 수 있도록 하는 개선된 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 제어 기법을 제안하였다. d축 전류를 0으로 사용하는 SPMSM의 기존 MTPA 제어 방식보다 철손을 고려한 MTPA 전류로 운전하는 제안된 방식이 더 큰 출력 토크를 얻을 수 있음을 800W PMSM에 대한 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서 론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 효율이 좋으며, 전동기 무게에 대한 출력 토크의 비가 크며, 빠른 동특성을 얻을 수 있기 때문에 순시 토크 제어가 요구되는 고성능 전동기 구동분야에 그 사용이 크게 증가하고 있다.^[1]

PMSM의 벡터 제어 시 동손을 최소로 구동하기 위해서는 주어진 고정자 전류로부터 최대 토크를 얻을 수 있는 d, q축 전류 조합으로 운전하는 것이 바람직하다. 이와 같은 운전 방식을 MTPA 제어라 한다. 기존의 MTPA 제어는 철손을 고려하지 않은 PMSM의 출력 토크 식을 기반으로 하는데 철손을 고려한 경우의 출력 토크 식은 기존과 달라지므로 MTPA 운전점 또한 달라진다.

본 논문에서는 철손 등가 저항을 고려한 SPMSM의 모델링을 통해 출력 토크 식을 도출하고, 이를 이용하여 벡터 제어 시 주어진 고정자 전류로부터 최대의 토크를 발생시키는 d, q축 전류 조합으로 운전하는 향상된 MTPA 제어 기법을 제안하였다. 800W급 SPMSM 구동시스템에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

2. 철손을 고려한 SPMSM의 MTPA 제어

2.1 SPMSM의 등가회로 및 전압방정식

SPMSM의 회전자 좌표계 등가회로에 철손 등가 저항 R_c 를 고려해두면 철손이 포함된 전동기 모델을 구할 수 있다.^[2] 그림 1은 철손 등가 저항을 포함한 SPMSM의 등가회로를 나타내며 이때 d, q축 전압방정식 및 철손 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_s \frac{di_{dm}^r}{dt} - \omega_r L_s i_{qm}^r \quad (1)$$

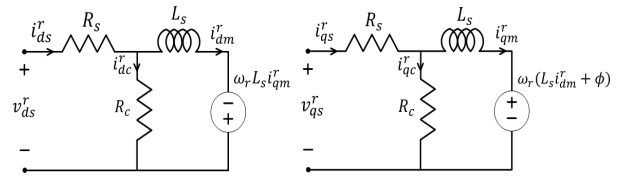


그림 1 철손 등가 저항을 고려한 SPMSM의 등가회로

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_s \frac{di_{qm}^r}{dt} + \omega_r (L_s i_{dm}^r + \phi) \quad (2)$$

$$i_{dc}^r = \frac{L_s di_{dm}^r/dt - \omega_r L_s i_{qm}^r}{R_c} \quad (3)$$

$$i_{qc}^r = \frac{L_s di_{qm}^r/dt - \omega_r (L_s i_{dm}^r + \phi)}{R_c} \quad (4)$$

정상상태에서 d, q축 고정자 전류와 자화 전류 i_{dm}^r , i_{qm}^r 의 관계는 식(5)와 같고 q축 자화 전류는 식(6)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\omega_r L_s}{R_c} \\ \frac{\omega_r L_s}{R_c} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dm}^r \\ i_{qm}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r \phi}{R_c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$i_{qm}^r = \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2} \left(-\frac{\omega_r L_s}{R_c} i_{ds}^r + i_{qs}^r - \frac{\omega_r \phi}{R_c} \right) \quad (6)$$

2.2 철손이 고려된 SPMSM의 출력 토크

철손을 고려하면 정상상태에서 입력 전력은 식(7)과 같이 표현되는데 동손, 철손, 기계적 출력 성분으로 구성된다. 기계적 출력 성분을 기계적 각속도로 나누면 출력 토크 식(8)을 얻을 수 있고 식(6)을 이용하면 d, q축 고정자 전류에 관한 출력 토크 식(9)을 얻을 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} [R_s (i_{ds}^r{}^2 + i_{qs}^r{}^2) + R_c (i_{dc}^r{}^2 + i_{qc}^r{}^2) + \omega_r \phi i_{qm}^r] \quad (7)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi i_{qm}^r \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2} \left(-\frac{\omega_r L_s}{R_c} i_{ds}^r + i_{qs}^r - \frac{\omega_r \phi}{R_c} \right) \quad (9)$$

식(9)로부터 철손을 고려하지 않는 경우와는 달리 d, q축 전류 모두 토크 발생에 관련된 전류임을 알 수 있다.

2.3 철손이 고려된 MTPA 제어

주어진 고정자 전류로 최대 토크를 발생시키는 d, q축 전류 조합을 찾기 위해 식(9)의 토크 식을 고정자 전류 크기 I_s 와 전류각 β 에 관해 정리하면 식(10)과 같고 이로부터 최대 토크를 발생시키는 최적 전류각 β_{opt} 를 구하면 식(11)이 된다. 이로부터 최적의 전류 지령은 식(12)와 같이 주어진다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2} \left(-\frac{\omega_r L_s}{R_c} I_s \cos\beta + I_s \sin\beta - \frac{\omega_r \phi}{R_c} \right) \quad (10)$$

$$\beta_{opt} = \cos^{-1} \left(-\frac{\omega_r L_s}{\sqrt{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2}} \right) \quad (11)$$

$$i_{ds}^* = -I_s \frac{\omega_r L_s}{\sqrt{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2}}, \quad i_{qs}^* = \sqrt{I_s^2 - i_{ds}^{*2}} \quad (12)$$

이러한 최적의 전류 지령 계산에 필요한 철손을 나타내는 등가 저항 R_c 는 통상 측정을 통해 얻는데 동작 속도에 비례하는 경향을 보인다^[2]. 그림 2는 표 1의 파라미터를 갖는 전동기에 대해 식(11)에 따른 최적 전류각 β_{opt} 을 보인다. SPMSM에 대한 기존 MTPA 제어에서는 고정자 전류를 모두 q축에만 흘려주며 d축 전류는 영이므로 전류각은 90° 이지만 철손을 고려한 경우는 그림 2에 보이듯이 속도에 따라 달라진다.

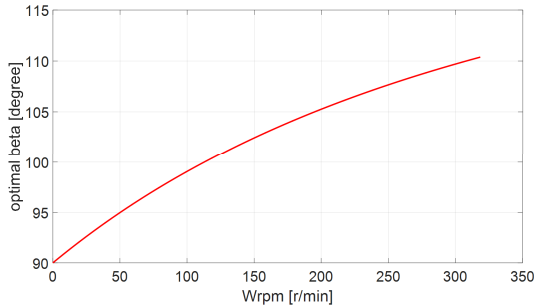


그림 2 철손이 고려된 최적의 전류각 β_{opt}

2.4 기존 MTPA 제어와의 출력 토크 비교

SPMSM에 대해 기존의 MTPA 제어 방법으로 운전 시 철손이 고려된 경우 출력 토크는 식(13)와 같다. 그러나 철손을 고려하여 MTPA 제어를 하는 경우 토크는 식(14)가 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2} \left(I_s - \frac{\omega_r \phi}{R_c} \right) \quad (13)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi \frac{R_c^2}{R_c^2 + \omega_r^2 L_s^2} \left(\sqrt{1 + \frac{\omega_r^2 L_s^2}{R_c^2}} I_s - \frac{\omega_r \phi}{R_c} \right) \quad (14)$$

그림 3은 표 1의 파라미터를 갖는 SPMSM에서 MTPA 운전 시 속도에 대한 출력 토크를 비교한 것이다. 철손을 고려한 제안된 MTPA 기법의 경우가 기존의 MTPA 기법보다 더 큰 출력 토크를 발생하는 것을 확인할 수 있다.

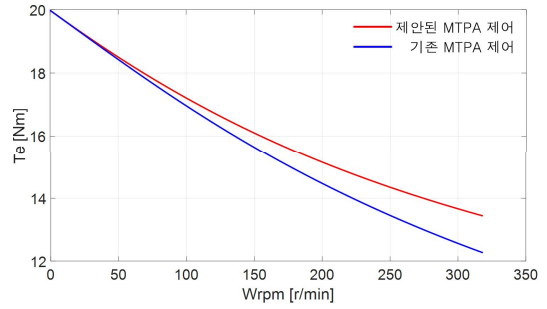


그림 3 출력 토크 비교

3. 시뮬레이션

제안된 기법의 효용성 검증을 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 800W SPMSM 구동시스템에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. 속도지령 300r/min에 대한 속도 응답의 결과가 그림 4에 보인다. 철손을 고려한 제안된 MTPA 제어 시 더 큰 출력 토크가 발생하여 속도 지령에 도달하는 시간이 짧은 것을 확인할 수 있다.

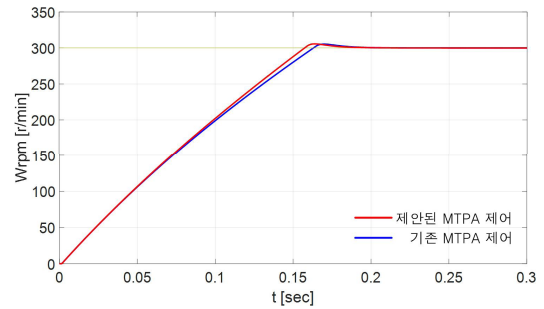


그림 4 속도 응답 비교

표 1 SPMSM 파라미터

Rated power	800 W
Number of Poles	48
Rated speed	300 r/min
Rated current	6 A
R_s	3.6 Ω
L_s	19 mH
ϕ	0.0925 Wb
R_c	$0.02\omega_r + 55 \Omega$

4. 결론

본 논문에서는 철손을 고려한 SPMSM의 출력 토크 식을 이용하여 개선된 MTPA 제어 기법을 제안하였다. 제안된 MTPA 제어 시 d축 전류를 0으로 제어하는 기존의 MTPA 제어 보다 더 큰 출력 토크를 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Sang Hoon Kim, *Electric Motor Control DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch.4, 2017.
- [2] Naomitsu Urasaki, Tomonobu Senjyu and Katsumi Uezato, "A novel calculation method for iron loss resistance suitable in modeling permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 18, pp. 41-47, Mar.2003.