

부하각을 고려한 이중회전자 영구자석 동기전동기의 약자속 제어

김진영, 김성훈, 조관열⁺, 김학원
한국교통대학교

Flux Weakening Control considering Load Angle for Dual-Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor

Jin Young Kim, Seong Hoon Kim, Kwan Yhul Cho⁺, Hag Wone Kim
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

이중 회전자 구조를 갖는 영구자석 동기전동기(DR-PMSM)는 비접촉 방식의 마그네틱 기어와 영구자석 동기전동기가 일체화된 형태의 견인 전동기로써 기계식 기어의 견인 전동기 대비 고출력밀도를 갖는다. DR-PMSM은 고속운전 시 일반적인 IPMSM(Interior PM synchronous motor)의 전압 제한 타원과 달리 DR-PMSM의 전압 제한 타원의 원점이 부하각에 따라 변동한다. 따라서 DR-PMSM의 약자속 제어 시 주어진 속도에서 부하 토크를 발생하기 위한 dq 전류는 부하에 따라 원점이 이동하는 전압 제한 타원을 고려하여 해석해야 한다. 본 논문에서는 DR-PMSM의 고속운전을 위한 약자속 제어 시 부하각을 고려하여 dq전류의 운전점을 도출하고 Matlab/Simulink 모의해석을 통해 약자속 제어 알고리즘을 검증한다.

1. 서론

기존 철도차량은 전동기와 부하 사이에 기계식 감속기를 사용하는 간접 구동 방식의 견인 시스템을 통해 동력을 전달한다. 이로 인해 기계적 마찰이 발생하고 동력 손실 및 마모로 인한 추가적인 유지보수가 필요하다. 이러한 기계식 기어장치의 구조적, 성능적 한계를 보완하기 위해 마그네틱 기어(Magnetic gear)를 사용한 직접 구동 방식(Direct-drive system)의 연구가 진행되고 있다^[1].

이중 회전자 구조를 갖는 영구자석 동기전동기는 비접촉 방식의 마그네틱 기어와 견인 전동기가 일체화된 구조로 기계식 감속기를 사용하지 않고 전동기가 부하를 직접 구동시킨다. 따라서 동력 손실 감소로 출력밀도가 높고 효율 및 유지보수 편의성에 유리하다. 그림 1은 DR-PMSM의 구조를 나타낸다. 내측 회전자는 고정자의 회전자계와 동기하여 회전하며 외측 회전자(Pole-piece)에 의해 변조된 자속이 고정되어있는 PM ring과 동기되어 외측 회전자가 회전한다.

DR-PMSM의 토크 전달은 내측 회전자와 외측 회전자의 전기각 차이인 부하각에 의해 결정된다. 부하가 증가할 때 부하각은 벌어지게 되고 그 각이 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 의 범위를 벗어나게 되면 자기적 반발력에 의해 탈조가 발생한다. 본 논문에서는 부하각을 고려한 전압방정식을 이용하여 DR-PMSM의 약자속 제어 시 운전점에 대한 연구를 수행하였다.

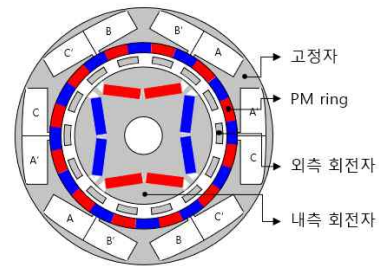


그림 1 이중 회전자 동기전동기의 구조
Fig. 1 Structure of dual-rotor synchronous motor

2. DR-PMSM의 약자속 제어

일반적으로 전동기의 속도가 증가함에 따라 역기전력이 증가하여 전류를 인가할 전압의 여유가 부족해진다. 그러나 전동기에 인가할 수 있는 최대전압은 인버터의 DC 링크 전압에 의해 제한된다. 따라서 일정 속도 이상으로 전동기를 제어하기 위해서는 음의 방향으로 d축 전류를 증가시켜 회전자 영구자석에서 발생하는 자속을 줄여주는 약자속 제어(Flux-weakening)가 필요하다^[2]. 전류제어기의 출력인 전압명령이 선형변조 영역에서 DC 링크가 인버터에 공급할 수 있는 최대전압보다 큰 경우 PI 제어기를 통해 d축 자속을 줄인다.

2.1 DR-PMSM의 전기적 모델링

3상 PMSM과 달리 DR-PMSM은 역기전력 향에 추가된 부하각의 변화와 변조자속 효과로 인한 전압변동을 고려해야 한다. 식 (1)은 부하각을 고려한 DR-PMSM의 전압방정식이다. θ_L 은 내·외측 회전자의 부하각, Φ_m 은 변조 자속의 크기, Φ_f 는 계좌 자속의 크기를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt}L_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R + \frac{d}{dt}L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r \Phi_m \sin(\theta_L) + \frac{d}{dt} \Phi_m \cos(\theta_L) \\ \omega_r \Phi_m \cos(\theta_L) + \omega_r \Phi_f + \frac{d}{dt} \Phi_m \sin(\theta_L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 DR-PMSM의 전압 제한 타원

전동기의 dq축 전압지령은 식 (2)의 전압 제한 조건을 만족

해야 한다. 식 (1)과 식 (2)로부터 저항의 전압강하를 무시하면 정상상태에서 dq축 전류는 식 (3)의 조건을 만족해야 한다.

$$v_d^2 + v_q^2 \leq V_{\max}^2 \quad (2)$$

$$(\Phi_f + \Phi_m \cos \theta_L + L_d i_d)^2 + (\Phi_m \sin \theta_L - L_q i_q)^2 \leq \left(\frac{V_{\max}}{\omega_r} \right)^2 \quad (3)$$

식 (3)으로부터 도출한 DR-PMSM의 전압 제한 타원의 원점 위치는 그림 2와 같이 부하각에 따라 변동한다. 약자속 제어영역에서 속도 증가는 토크 감소 및 부하각 감소로 이어지며 그 예로 부하각 10°인 최대 속도에서의 전압 제한 타원의 원점은 부하각 70°에서의 원점 위치보다 좌하측으로 이동한다.

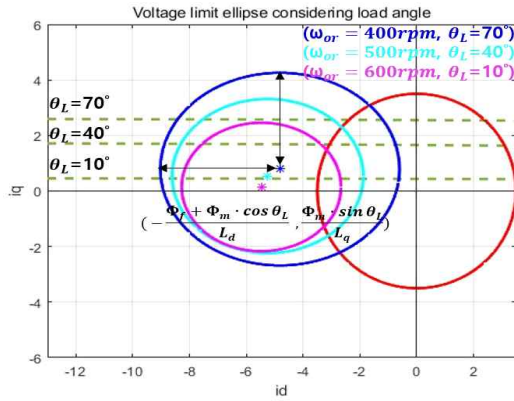


그림 2 부하각을 고려한 전압 제한 타원
Fig. 2 Voltage limit ellipse considering load angle

그림 3은 부하각과 속도의 변화에 대한 DR-PMSM의 전압 제한 타원을 나타낸다. DR-PMSM의 전압 제한 타원은 속도 증가 시 부하각의 변동에 따라 전압 제한 감소 폭이 더욱 크게 나타난다. 따라서 동일 토크 커브를 만족하는 dq축 전류의 운전점이 달라진다.

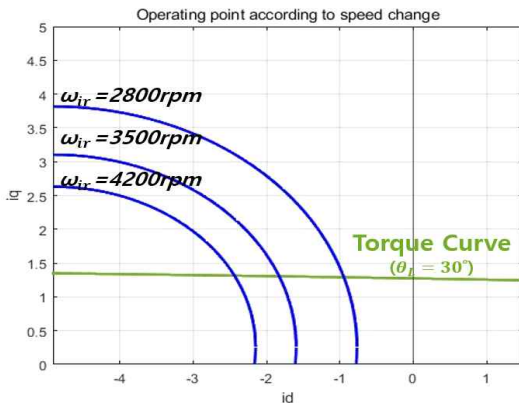


그림 3 속도 변화 따른 운전점
Fig. 3 Operating point according to speed change

3. 모의해석

그림 4는 외측 회전자 400, 500, 600rpm으로 회전할 때 전동기의 토크를 정격 토크의 50%($\theta_L = 30^\circ$)로 제어할 때의 토크 제어 특성을 나타낸다. 외측 회전자가 400rpm으로 회전할

경우 내측 회전자는 2,800rpm으로 회전하며, dq축 전류는 각각 -1A, 1.3A이다. 또한, 외측 회전자의 속도가 600rpm일 때 dq축 전류는 각각 -2.2A와 1.3A로 그림 3의 해석결과와 유사하게 나타남을 확인할 수 있다.

표 1 DR-PMSM 파라미터
Table 1 Parameters of DR-PMSM

정격 출력 P_{rat}	1 kW	극 수 P	4
정격 속도 ω_{ro_rat}	214 rpm	고정자 저항 R_s	7.0 Ω
d축 인덕턴스 L_d	133.3 mH	계자 자속 Φ_f	0.586 Wb
q축 인덕턴스 L_q	155.1 mH	변조 자속 Φ_m	0.079 Wb

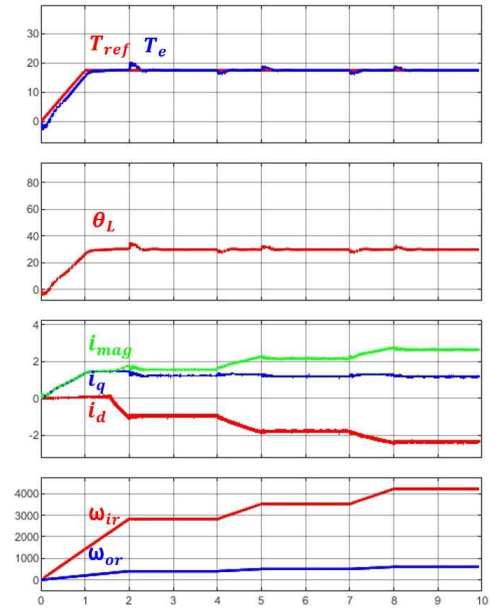


그림 4 속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results for speed change

4. 결론

본 논문에서는 고속운전 시 부하각이 고려된 DR-PMSM의 전압방정식을 통해 전압 제한 타원을 도출하였고 부하 조건에 따라 전압 제한 타원의 원점이 이동함을 확인하였다. 또한, 모의해석을 통해 약자속 제어 특성을 확인하고 dq축 전류의 운전점을 확인하였다.

이 논문은 2023년 (주)브이씨텍과 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고 문헌

- [1] L. S. M. Cheng and H. Jia, "Analysis of a novel magnetic-gear dual-rotor with complementary structure," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 62, no. 11, pp. 6737-6747, Nov. 2015.
- [2] D. Lu and N. C. Kar, "A review of flux-weakening control in permanent magnet synchronous machines," in conf. of IEEE Vehicle Power and Propulsion, pp. 1-6, Sep. 2010.