

# 부하각 정보를 이용한 이중회전자 영구자석동기전동기의 MTPA 특성 해석

임재환, 김성훈, 박정익, 조관열<sup>†</sup>, 김학원  
한국교통대학교

## MTPA Characteristic Analysis based on Load Angle for Dual-Rotor PM Synchronous Motor

Jae Hwan Lim, Seong Hoon Kim, Jeong Ik Park, Kwan Yhul Cho<sup>†</sup>, Hag Wone Kim  
Korea National University of Transportation

### ABSTRACT

영구자석 동기전동기와 마그네틱 기어가 결합된 구조의 이중회전자 영구자석 동기전동기(DR-PMSM)는 내측 회전자와 외측 회전자 사이에 부하에 따라 변하는 부하각과 변조자속이 존재하기 때문에 전체 토크는 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크 및 변조자속 토크를 고려해야 한다. 본 논문은 부하각과 변조자속을 고려한 이중회전자 영구자석 동기전동기의 토크 방정식을 바탕으로 MTPA(Maximum torque per ampere) 운전점을 MATLAB/Simulink을 통해 해석하고 실험을 통해 부하각과 변조자속을 고려한 DR-PMSM의 MTPA 특성을 검증한다.

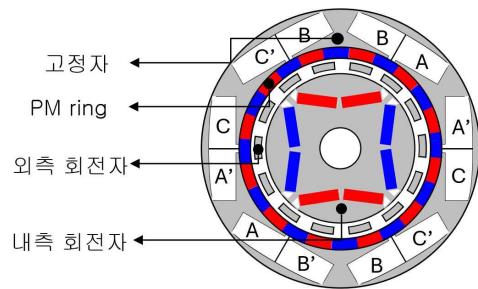


그림 1 이중 회전자 동기전동기 구조

### 1. 서 론

이중회전자 구조를 갖는 영구자석 동기전동기(DR-PMSM)는 비접촉 방식의 마그네틱 기어(Magnetic Gear)와 견인 전동기가 일체화된 구조로 기계식 감속기를 사용하는 기존 견인 전동기에 비해 전동기와 부하가 직접 체결되어 있다. 따라서 감속기의 기계적 손실의 존재하지 않으므로 출력밀도가 높고 효율 및 유지보수에 유리하다. 그림 1에 나타난 DR-PMSM의 내측 회전자는 고정자의 회전자계와 동기되어 회전하며 외측 회전자(Pole-piece)에 의해 변조된 자속이 고정자에 부착된 PM ring과 동기되어 외측 회전자가 회전한다.

DR-PMSM의 외측 회전자는 내측 회전자에 대해 위상차를 갖고 회전하는 부하각이 존재하며 부하각은 부하에 따라 변한다. 일반적으로 DR-PMSM의 마그네틱 기어의 특성은 마그네틱 스프링으로 모델링됨에 따라 토크는 부하각( $\theta_L$ ) 크기에 의해 결정한다<sup>[1]</sup>. 이는 DR-PMSM의 고효율 운전 해석에 적합하지 않고 파라미터의 불확실성 등에 제한되는 요소가 존재한다.

DR-PMSM의 구동 토크는 부하와 직접 연결된 저속 고투출 토크의 특성을 갖는 외측 회전자에서 발생한다. 외측 회전자의 토크는 기존 단일 회전자 영구자석 동기전동기(PMSM)와 다르게 DR-PMSM의 구조적 특징으로 인해 발생하는 변조 자속, 부하에 따라 변동하는 부하각, 마그네틱 기어로 인해 내측에서 외측으로 전달되는 기어비에 의해 결정된다. 따라서 DR-PMSM의 토크 방정식은 이러한 성분을 고려하여 모델링되어야 한다.

본 논문에서는 부하각과 변조 자속 성분을 고려한 토크 방정식을 이용하여 MATLAB/Simulink을 통해 MTPA의 궤적을 모의 해석하고 실험을 통해 DR-PMSM의 MTPA 특성을 검증한다.

### 2. DR-PMSM의 MTPA

#### 2.1 DR-PMSM의 토크방정식

DR-PMSM은 내측 영구자석이 회전하면서 발생하는 자속이 외측 회전자에 의해 변조되면서 변조된 자속과 고정자에 부착된 PM ring이 정렬하려는 힘으로 외측 회전자가 회전한다. 또한 부하 상태에 따라 외측 회전자는 내측 회전자에 대해 위상차를 갖게 되며 부하각이 발생한다. 부하가 클수록 내측과 외측 회전자 간의 위상 차이가 커져 토크 크기에 변화를 일으킨다. 따라서 변조 자속과 부하에 따라 변화하는 고정자와 회전자의 부하각과의 관계가 중요하다<sup>[2]</sup>. 변조 자속과 부하각, 마그네틱 기어의 기어비를 고려한 DR-PMSM의 출력 토크는 외측 회전자에서 발생하는 토크로 식(1)과 같이 주어진다.

$$T_c = \frac{3}{2} p_{ir} g_r (\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q + \phi_m (i_d \sin \theta_L + i_q \cos \theta_L)) \quad (1)$$

식 (1)의 각 파라미터는 DR-PMSM의 외측에서 발생하는 토크 크기를 수학적으로 설명하는 요소들로 시스템의 특성을 결정한다.

$p_{ir}$  은 내측 회전자의 Pole-pair를 의미하며  $g_r (= \frac{p_{or}}{p_{ir}})$  은 마그네틱 기어의 기어비,  $\theta_L$  은 내측 회전자와 외측 회전자 사이의 부하각을 나타내며  $\phi_f, \phi_m$  은 각각 내측 회전자 영구자석의 자속과 변조 자속의 크기를 나타낸다. 식 (1)은 마그네틱 스프링으로 기어비만큼 내측에서 외측으로 전달되는 토크 크기와 변조 자속과 부하각의 크기에 따라 외측 회전자에서 발생하는 토크 크기를 나타내고 있다.

## 2.2 DR-PMSM의 MTPA 궤적

DR-PMSM의 MTPA 궤적은 토크 방정식인 식 (1)로부터 식 (2)와 같이 구해진다. 식 (2)에서  $a = \phi_m \sin \theta_L$ ,  $b = \phi_m \cos \theta_L$  이다. 그림 2는 식(1)을 바탕으로 부하각 정보를 통해 DR-PMSM의 동일 토크 곡선과 MTPA 궤적을 Matlab/Simulink로 모의해석한 결과다. 토크는 각각 5Nm, 11Nm, 17Nm를 나타내며 각각의 부하각의 크기는  $15^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $50^\circ$ 를 갖는다. 부하각 정보를 갖는 DR-PMSM의 MTPA 궤적은 단일 회전자 영구자석 동기 전동기와 다르게  $d$ 축 및  $q$ 축 전류가 모두 양의 값을 갖는 1사분면에 나타난다. 또한 부하각이 커짐에 따라 양의  $d$ 축으로 진상각(Lead angle)이 증가하며 따라서 동일 토크 곡선은 우하향하는 특성을 가지며 토크 곡선의 기울기는 내측 회전자 영구자석의 돌극성(Saliency)이 작아 SPM과 유사한 특성을 보인다. 돌극성이 큰 DR-PMSM의 경우 진상각(Lead angle)이 커진다.

$$i_q = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4(L_d - L_q)[(L_d - L_q)i_d^2 + (\phi_f + b)i_d]}{2(L_d - L_q)} \quad (2)$$

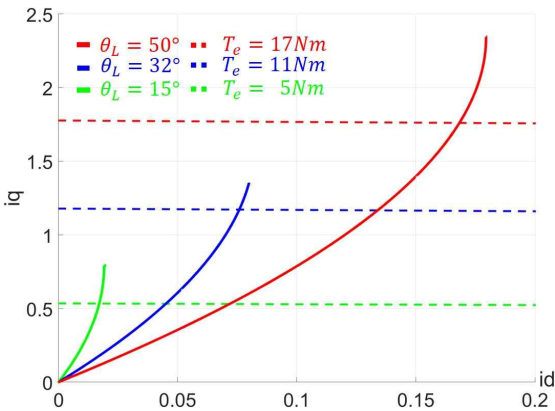


그림 2 DR-PMSM 동일 토크 곡선, 부하각 크기별 MTPA 궤적

## 3. 실험

모의해석과 실험에 사용한 1kW급 DR-PMSM의 파라미터는 표 (1)과 같다. 그림 3은 다이내모 실험 환경을 나타내며 그림 4는 외측 회전자에 부착된 토크 센서에서 동일 토크를 나타내는  $dq$ 축 전류로부터 얻은 최소 전류 크기의 MTPA Points를 나타낸다. 실험 결과 그림 2의 모의해석 결과와 유사하게 동일 토크 곡선은 우하향하는 추세를 보인다. 내측 회전자 영구자석의  $L_d, L_q$ 비 돌극성이 작아 MTPA 진상각이 작으며 SPM에 가까운 특성을 나타낸다. 또한 실험에서의 동일 토크 크기마다 최소 전류 크기를 갖는 MTPA Point가 그림 2의 모의해석 MTPA 궤적과 동일하게 1사분면에 나타남을 확인했다.

표 1 DR-PMSM 파라미터

정격전력 $P_{rated}$	1.0kW	정격 속도 $\omega_{rated}$	480rpm
정격전류 $I_{rated}$	2A	고정자 저항 $R_s$	$7\Omega$
$d$ 축 인덕턴스 $L_d$	133mH	$q$ 축 인덕턴스 $L_q$	155mH
계자 자속 $\phi_f$	391mWb	변조 자속 $\phi_m$	88mWb
내측 폴 페어 $p_{ir}$	2	외측 폴 페어 $p_{or}$	14

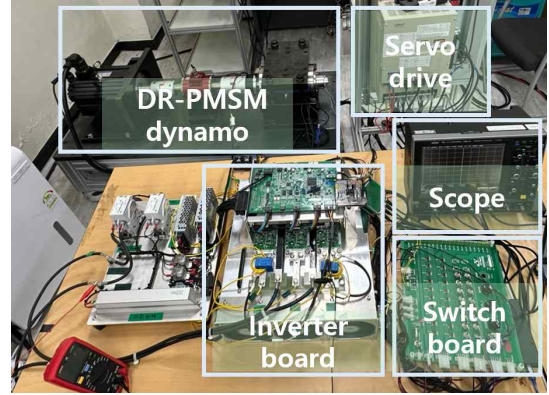


그림 3 1kW급 축소형 DR-PMSM 실험 환경

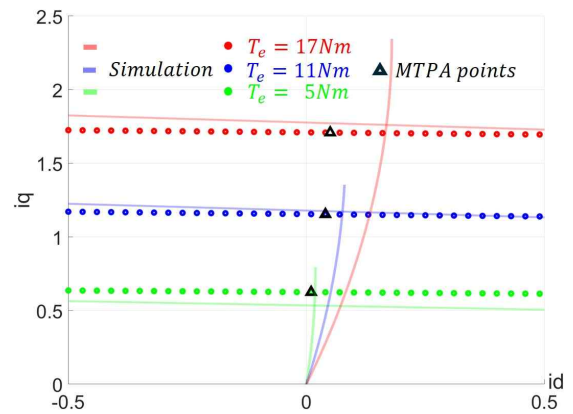


그림 4 DR-PMSM 실험 동일 토크 곡선, MTPA Points

## 4. 결론

본 논문에서는 DR-PMSM의 부하각과 변조 자속을 고려한 토크 방정식을 통해 동일 크기의 토크 커브를 구현하고 부하에 따라 변동하는 부하각 정보를 이용하여 MTPA 궤적을 도출했다. 모의해석을 통해 부하각별 MTPA 궤적이 1사분면에 존재하고 부하각이 커질수록 양의  $d$ 축으로 진상각이 증가함을 확인하였다. 또한 실험을 통해 동일 토크 크기의 토크 커브와  $dq$ 축 전류 크기를 바탕으로 분석한 MTPA points가 모의해석과 유사하게 1사분면에 나타나고 있음을 확인하였다.

이 논문은 2024년 국립한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

## 참고 문헌

- [1] M. Bouheraoua, "Control of pseudo direct drive permanent magnet machines," Ph.D. Dissertation, University of Sheffield, 2013.
- [2] K. Ito and K. Nakamura, "A consideration of efficiency and power factor of IPM-type magnetic-g geared motor," Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 46, No. 1, pp. 16-21, Jan. 2022.