

# 매입형 영구자석 전동기의 최고속도 맞춤 설계를 위한 D-축 인덕턴스 최적화

이민혁, 이태연, 남광희  
포항공과대학교 전자전기공학부

## Optimizing D-axis Inductance for Maximum Speed Requirement in IPMSM

Minhyeok Lee, Taeyeon Lee, Kwanghee Nam  
Dept. of Electrical Engineering, POSTECH

### ABSTRACT

현재 전기자동차용으로 높은 출력 밀도와 넓은 속도 영역을 가지는 매입형 영구자석 전동기(IPMSM)가 널리 사용되고 있다. 매입형 영구자석 전동기의 높은 돌극비는 큰 킬러턴스 토크를 만들 수 있어 기저 속도 이하에서는 높은 토크를 보장한다. 하지만 고속 영역에서도 킬러턴스 토크를 이용하여 출력을 보장하지만 큰 전류가, 즉 큰 음의 D-축 전류를 요구한다. 이는 전동기가 고속으로 갈수록 제어의 어려움으로 나타난다. 그러므로 D-축 인덕턴스의 변화에 따른 고속 영역에서 전류 지령치의 변화를 분석한다. 고속 영역에서 전류크기 및 전류각을 감소하고 정출력 범위를 증가시킬 수 있는 D-축 인덕턴스를 조사한다. 시뮬레이션을 통하여 출력을 검증한다.

### 1. 서 론

매입형 영구자석 전동기는 킬러턴스 토크를 사용하여 높은 출력 및 토크를 보장한다. 이러한 특징은 D-축 인덕턴스가 작은 특징에 의해 나타나는데 이를 위해 회전자의 레이어를 다층으로 설계하는 방법 등으로 D-축 인덕턴스를 감소시킨다<sup>[1]</sup>. 하지만 작은 D-축 인덕턴스는 고속영역에서 사용되는 약계자 제어에 의해 큰 음의 D-상 전류를 요구하여 최고속도를 제한하고 고속제어에 어려움을 가중시킨다<sup>[2]</sup>. 그러므로 전기자동차를 위한 다양한 형상의 매입형 영구자석 전동기의 인덕턴스 및 출력 변화가 연구되었다<sup>[3]</sup>. 본 연구에서는 D-축 인덕턴스의 변화에 따른 고속 영역에서 전류 지령치의 변화를 분석하고 D-축 인덕턴스의 변화가 최고속도와 출력에 미치는 변화를 분석한다. 시뮬레이션을 통하여 출력을 검증한다.

### 2. 고속영역에서 D-축 인덕턴스 변화에 따른 전류분석

#### 2.1 Maximum Torque / Flux Control (MTPF)<sup>[2]</sup>

매입형 영구자석 전동기는 모터의 속도에 따라 전류제어 방법이 달라진다. 기저속도 이하에서는 MTPA를 통해 최대토크를 낼 수 있는 전류로 제어되고 기저속도 이상에서는 약계자 제어를 이용하여 제어한다. 모터가 극 고속으로 향하면 MTPF 제어를 적용한다. 수식 (1), (2) 는 MTPF 제어에서 얻어지는 D상 자속과 전류 명령치를 수식으로 나타낸다<sup>[2]</sup>.

$$\lambda_d^* = \frac{-L_q\psi_m + \sqrt{L_q^2\psi_m^2 + 8(L_d - L_q)^2(V_s/\omega_e)^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (1)$$

$$i_d^* = \frac{\lambda_d^* - \psi_m}{L_d} \quad (2)$$

$$i_q^* = \frac{\sqrt{(V_s/\omega_e)^2 - \lambda_d^{*2}}}{L_q}$$

극 고속에서 사용되는 MTPF 전류점은 전압 제한 타원과 토크 곡선의 접점에서 얻어진다. 그림 1은 표 1의 파라미터를 이용하여 3가지의 D상 인덕턴스에 따른 MTPF 점들을 나타낸다. 전압 타원식에 의해 D상 인덕턴스가 커질수록 타원의 중심은 Q-축에 가까워지고 장축은 짧아져 타원에서 원으로 바뀐다. 그림 2는 10000rpm에서 D상 인덕턴스 변화에 따른 MTPF 전류점들의 분포를 나타낸다. D상 인덕턴스를 감소시키면 약계자를 위해 큰 D상 전류를 요구하여 전류크기가 전류제한을 넘어선다. 반대로 D상 인덕턴스가 감소하면 전류크기도 감소한다.

표. 1 Base motor parameters

DC link	360 V <sub>dc</sub>
상 저항, R <sub>s</sub>	0.0207 Ω
D축 인덕턴스, L <sub>d</sub>	0.348 mH
Q축 인덕턴스, L <sub>q</sub>	0.654 mH
역기전력 상수, ψ <sub>m</sub>	0.09 Vs/rad
극 수, P	8

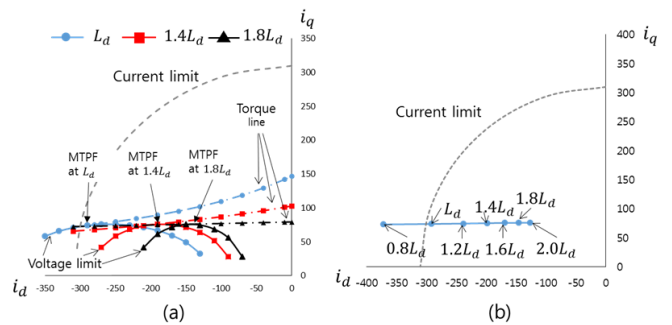


그림 1 (a) MTPF points in three d-axis inductance cases, (b) MTPF current points in various d-axis inductances at 10,000rpm

#### 2.2 토크 스피드 곡선과 전류 궤적

D상 인덕턴스가 변함에 따라 토크 수식이 영향을 받아 모터의 출력도 달라진다. 그림 3 (a)는 전류제한을 만족하는 D상 인덕턴스중 3가지의 경우에 대해 토크 스피드 곡선을 나타낸다. 최고속도는 전류각 77° 이하로 제한하였다. D상 인덕턴스

가 증가할수록 출력은 낮아지지만 최고속도는 증가한다. 그림 3 (b)에서 확인할 수 있듯이 D상 인덕턴스가 증가할수록 사용되는 전류 크기와 전류각은 감소한다.

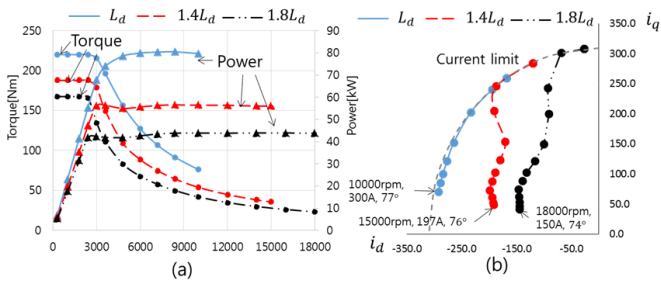


그림 2 D-axis inductance variation effect: (a) torque-speed curve, (b) current trajectory.

### 2.3 Driving Cycle 분석

D상 인덕턴스에 따라 토크 스피드 곡선이 변화하므로 차량에서 요구하는 최고속도와 출력을 만족하는 모터 파라미터 선정이 필요하다. 차량 무게 1600kg, 타이어 반지름 0.309m, 최고속도 150km/h, 감속비 7.767, 정면 면적 1.746m<sup>2</sup>의 차량 조건에서 운전조건에 따른 토크 및 속도 요구치를 분석하였다. 최고속도가 8000rpm에서 요구되므로 D상 인덕턴스의 크기는 L<sub>d</sub>가 적합하다.

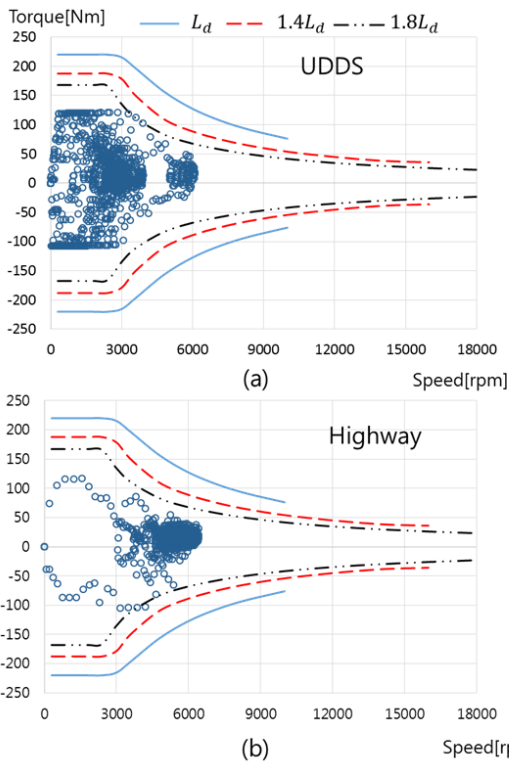


그림 3 Driving cycle: (a) urban dynamometer driving schedule(UDDS), (b) Highway driving.

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 FEM을 통해 기본 D상 인덕턴스 크기일 때 모터의 출력을 검증한 결과이다. 그림 4 (b)에서 나타나듯이 Q상 인덕턴스는 전류의 크기에 따라 변동이 크다. 그러므로 토크 스피드 곡선은 그림 3에 비해 낮은 출력을 보여준다.

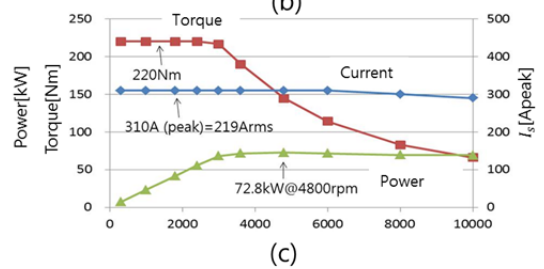
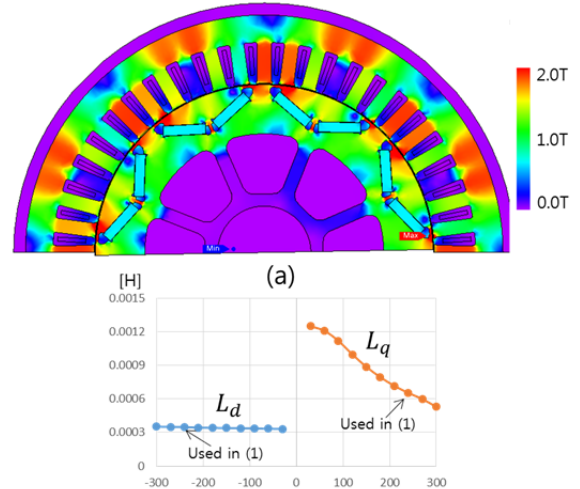


그림 4 FEM simulation results in base d-axis inductance: (a) magnetic flux density at 310Apeak, (b) inductance variations, (c) torque-speed curve

### 3. 결론

전기자동차용으로 높은 출력 밀도와 넓은 속도 영역을 가지는 매입형 영구자석 전동기의 D상 인덕턴스에 따라 변하는 출력 및 최고속도를 분석하였다. 전기자동차용 모터는 기어를 이용하여 높은 속도의 모터를 요구하므로 최고속도 요구치에 따른 D상 인덕턴스를 선정하고 최적 설계가 필요하다

이 논문은 포항공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] Sang-Yub Lee, Sang-Yeop Kwak, Jang-Ho Seo and Hyun-Kyo Jung, "Development of Multi-layer Interior Permanent Magnet Synchronous Machine for Vehicle", Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on
- [2] Sung-Yoon Jung, Jinseok Hong, and Kwanghee Nam, "Current Minimizing Torque Control of the IPMSM Using Ferrari's Method", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 28, NO. 12, DECEMBER 2013
- [3] Xiangdong Liu, Hao Chen, Jing Zhao, and Anouar Belachcen, "Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 63, NO. 6, JUNE 2016