

최적화를 통한 PHEV용 전동기의
출력밀도 향상 설계
손 동 균* · 정 영 훈 · 윤 명 환 · 홍 정 표
한양대학교 미래자동차공학과

Power Density Improvement Design of Motor for
PHEV by Optimization

Dong-Kyun Son* · Young-Hoon Jung · Myung-Hwan Yoon · Jung-Pyo Hong

Department. of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

Abstract : This paper presents a design method for improving the power density using the reluctance torque of Interior a permanent magnet synchronous motor(IPMSM) for Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV). First, the different of the d-axis inductance and the q-axis inductance is increased in order to increase the power density of the motor. And Through the EL map, the characteristics of the motor according to the range of the inductance and the back electromotive force (Back-EMF) are calculated. And the stability is verified by the rotor structure analysis at the maximum speed. We select the bridge thickness, the permanent magnet angle, and the distance between the 1-layer and the 2-layer as the optimal design parameters, and proceed through the optimal design through the reaction surface method. Finally, the electrical characteristics and mechanical stability of existing models are discussed.

Key words Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(매입형 영구자석 동기전동기), Power density(출력밀도), Plug in Hybrid Electric Vehicle(플러그인 하이브리드 자동차), Reluctance Torque(릴럭턴스 토크), Back EMF(역기전력)

Nomenclature

v : voltage, V
 i : current, A
 R_a : armature resistance, Ω
 ψ_a : linkage flux by armature, wb
 L : inductance, H
 T : torque, Nm
 ω : rotor synchronous angular speed, rad/s
 P : the number of Poles
 t_m : bridge thickness, mm
 l_m : 1-layer and 2-layer separation distance, mm
 θ : permanent magnet angle, $^\circ$

Subscripts

d : d-axis
 q : q-axis

* 손동균, thschdrbs92@hanyang.ac.kr.

1. 서론

최근 환경문제와 화석연료의 수급 불안정으로 인해 자동차 시장은 전기 자동차와 수소를 연료로 하는 연료 전지차량에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 연구의 일환으로 화석연료와 전기 에너지를 모두 사용하는 자동차인 하이브리드 자동차가 있으며 이는 운전모드에 따라 동력을 선택적으로 사용하여 연비를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 그리고 하이브리드 자동차의 배터리를 외부 전원으로 충전하는 방식을 Plug-in Hybrid Electric Vehicle(PHEV)라고 한다.

PHEV용 전동기는 고폭 특성고 고속 특성 모두 만족해야 한다. 고폭 구간에서 높은 출력밀도를 발생시키는 전동기이며 고속에서 회전자 원심력에 의한 자석의 비산 방지를 위해 고장력 강판을 사용하여 설계 및 해석을 진행 했다.

본 논문은 최적화 기법을 이용하여 PHEV용 Interior Permanent Magnet Synchronous Motors(IPMSM)의 출력 밀도 향상과 회전자의 기계적 안정성을 만족하는 개선 설계를 진행한다. IPMSM은 d축과 q축의 인덕턴스의 크기 차이로 인해 발생하는 톨러턴스 토크를 이용하기 때문에, d축과 q축의 인덕턴스의 차를 크게 하여 톨러턴스 토크를 증가시켜 출력밀도를 향상시킬 수 있다. 한편 IPMSM의 경우, 리브와 브릿지의 두께가 얇기 때문에 회전 시에 응력이 집중되어 고속 운전 시에 파단이 발생할 수 있다. 이러한 부분을 고려하여, d축과 q축의 인덕턴스 차를 증가시키고 동시에 기계적 안정성을 만족하도록 영구자석 두께, 브릿지 두께 등을 설계 변수로 하여 회전자 형상 최적화를 진행했다.

2. 대상 모델

본 논문에서 선정한 기준 모델은 Fig.1 과 같은 8극 48슬롯 매입형 영구자석 동기전동기이며 최대 토크는 기저속도에서 143[Nm], 최대출력 39[kW]이다. 그리고 전동기의 기저속도는 2600[rpm]이고 최고속도는 11000[rpm]이다.

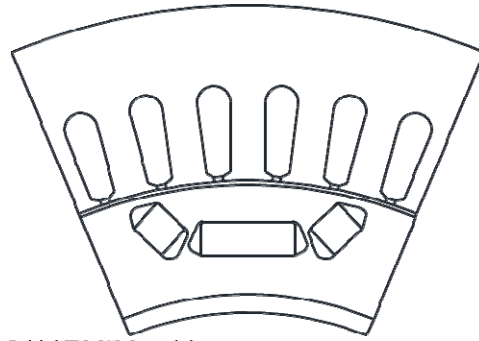


Fig. 1 Initial IPMSM model

전동기에 사용한 영구자석은 상온에서 잔류자속 밀도가 약 1.25[T]의 Nd자석을 사용했다. 또한 PHEV용 전동기의 고속 저토크 영역에서 회전자 원심력에 의한 자석의 비산 방지를 위해 고장력 강판을 사용하여 설계 및 해석을 진행 했다.

3. 출력밀도 향상 설계

기준 모델 대비 출력밀도를 키우기 위해 동일 고정자 외경 대비 적층길이를 줄이고 토크를 크게 하는 설계를 진행 했다. 매입형 영구자석 동기전동기는 d축 인덕턴스보다 q축 인덕턴스가 더 큰 역돌극성을 띈다. d q축 등가회로를 통해 마그네틱 토크와 톨러턴스 토크의 표현은 다음과 같으며 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이를 크게 하면 동일 전류 대비 높은 토크를 얻을 수 있다. 인덕턴스의 차를 크게 하기 위해서 d축 자기저항을 크게 하고 q축 자기저항을 감소시켜 토크를 확보했다.

$$T = \frac{P}{2} \cdot \frac{3}{2} \left(\psi_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (1)$$

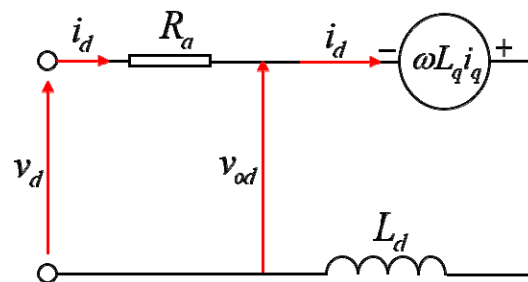


Fig. 2.1 IPMSM d-axis equivalent model

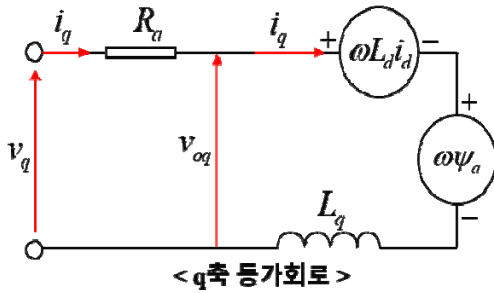


Fig. 2.2 IPMSM q-axis equivalent circuit

3.1 전기적 특성 해석

우선 전동기의 주요 파라미터인 역기전력과 인덕턴스의 범위에 따라 전동기의 특성을 살펴본 후 개선설계 방향을 결정하고 역기전력 및 인덕턴스의 설계 범위를 결정했다. d축 인덕턴스와 무부하 역기전력간의 변화에 따라 필요한 인가전압을 확인했다.

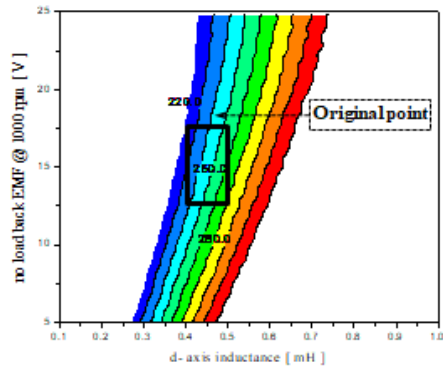


Fig. 3.1 Applied voltage due to the change in Back EMF and d-axis inductance at the base speed

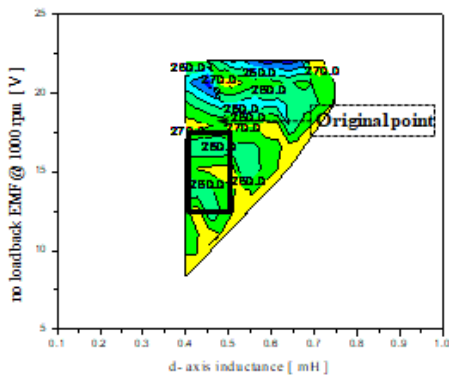


Fig. 3.2 Applied voltage due to the change in Back EMF and q-axis inductance at the maximum speed

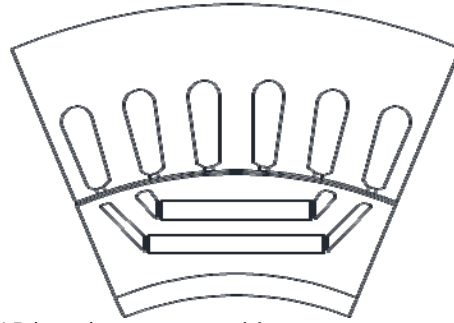


Fig. 4.1 Primary improvement model

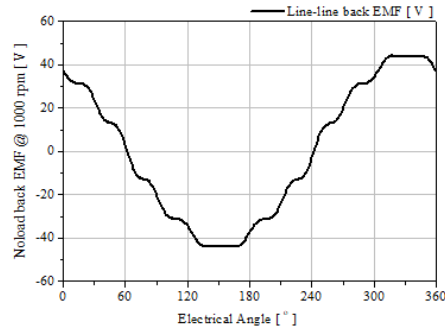


Fig. 4.2 Noload line to line voltage of primary improvement model

EL map을 통해 무부하 상 역기전력은 1000rpm에서 12.5 ~ 17.5 V_{rms} 이며 d축 인덕턴스는 0.4-0.5mH로 결정했다. 이 특성을 만족 하는 전동기 형상은 Fig 4.1과 같고 1차 개선모델은 기존 모델과 동일한 영구자석 사용량을 사용 한다. 그리고 Flux barrier는 응력분산을 위해 1[mm]를 띄운 형상을 설계 했다. 이 모델은 기존모델대비 영구자석을 2층으로 했으며 톨러턴스 토크 증가로 인해 전류를 감소시켜 동손의 영향을 줄일 수 있다. 그리고 토크가 증가한 만큼 적층길이를 기존 모델 대비 약 10% 저감을 통해 출력밀도를 증가 시켰다.

3.2 구조 해석

1차 개선 모델은 d축과 q축 인덕턴스를 크게 하고 역기전력을 확보하는 등 전기적 특성을 만족했다. 그리고 PHEV용 전동기의 고속 운전영역을 고려하여 최대속도 11000[rpm]에서 회전자 영구자석 축의 파단 유무를 확인했다. 회전자의 구조 해석은 최고속도에서 실시 했으며 회전자와 영구자석 사이의 응력을 해석했다.

Table 1 IPMSM material data

Material	회전자 철심	영구자석
Density	7600	7600
Young's Modulus [GPa]	175	120
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Yield Strength [MPa]	440	-

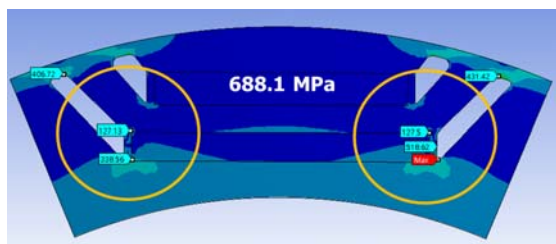


Fig.5 Structure analysis of primary improvement model

Fig 5는 구조해석 결과이며 자석의 끝단 부분에서 응력이 크게 발생하는 것을 보였다. 회전자 철심의 항복응력이 440[MPa] 인데 비해 최고속도에서 회전자가 받는 응력은 688.1[MPa] 로 항복응력보다 커 전동기 파손의 우려가 있었다.

4. 응력 완화 개선 설계

4.1 최적설계

1차 개선 모델에서 최대 응력이 회전자 철심의 항복응력보다 컸으므로 회전자 형상변화를 통해 2차 개선 모델을 선정했다. 2차 개선모델은 1차 개선 모델과 동일한 자석량 및 적층길이이며 응력분산을 위하여 영구자석을 2개로 분리하여 삽입했다.

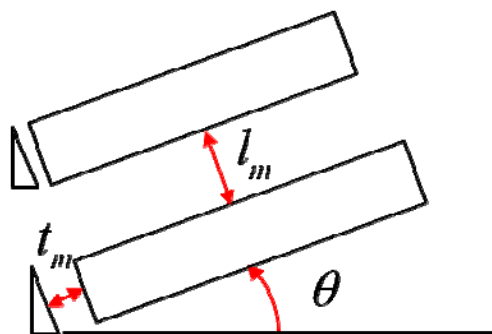


Fig. 6. IPMSM optimal design parameters

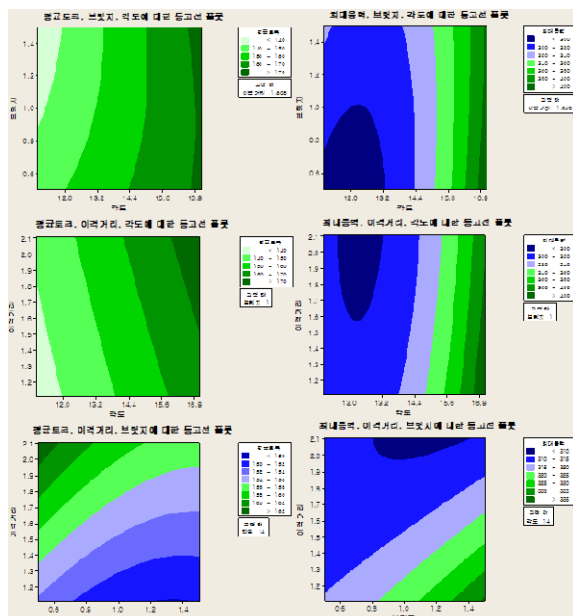


Fig. 7.1 Response surface contour plot

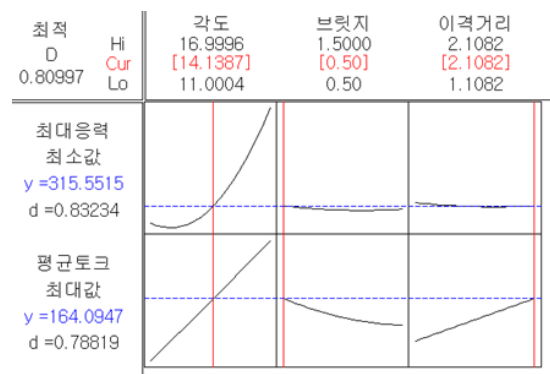


Fig. 7.2 Optimum point through reaction surface method

그리고 분리한 영구자석 사이에 회전자 철심 중앙 부로의 누설을 방지하기 위해 Flux barrier를 설치했다. 회전자 영구자석의 1층과 2층 사이의 이격거리와 브릿지 두께 그리고 영구자석이 이루는 각도를 최적설계 변수로 선정하고 반응표면법을 통해서 최적화를 진행했다. 그리고 이 설계 변수에 따른 평균토크가 최대, 최대응력이 최소가 되는 설계 포인트를 지정했다. 최적 설계 결과 영구자석의 각도는 약 14°, 브릿지 두께는 0.5[mm] 그리고 1-layer와 2-layer사이의 간격은 2.1[mm]이고 Fig. 7과 같이 최적 설계모델을 도출했다. 이 모델의 평균토크는 154.55[Nm]로 기존 모델 대비 약 6.6 [%] 향상 시킨 결과를 얻었다.

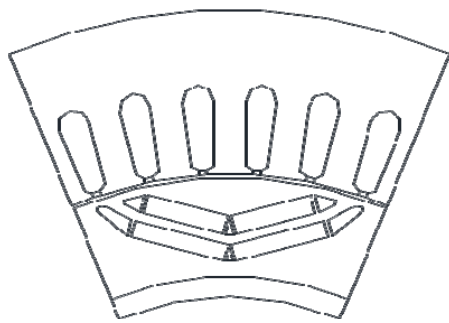


Fig. 8. Secondary improvement model

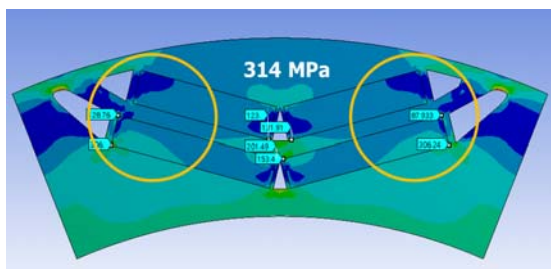


Fig. 9 Structure analysis of secondary improvement model

4.2 구조 해석

해석조건은 1차 개선모델과 마찬가지로 최고속도에서 동일한 경계조건을 적용하여 해석했으며 해석 결과 영구자석 사이의 브릿지를 통해 응력이 분산 되는 것을 확인했다. 그리고 최대응력은 두 영구자석 사이의 브릿지 부분에서 발생했으며 이 최대응력이 항복강도인 440[MPa]보다 약 126[MPa] 작은 314[MPa]로 해석되어 기존 1차개선 모델 대비 구조적 응력 안정성을 확보 했다.

5. 기존 모델과 비교 및 결론

기존 모델과 비교하여 전기적 특성을 개선하기 위해 1차 개선 설계를 하였고 기계적 특성을 개선하기 위한 응력 개선 설계를 진행했다. 최종모델은 기존 모델에 비해 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차를 크게 하여 톨럭턴스 토크를 활용했고 이를 통해 동일한 적층길이 일 때 보다 적은 전류로 동일한 토크를 발생 시킬 수 있었다. 그리고 적층길이를 감소 시킴으로써 출력밀도를 약 10[%] 향상시킬 수 있었으며 기존 모델 대비 회전자의 영구

자석을 Multi-layer로 분할 함으로써 구조적인 안정성을 확보 했다.

Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2012-0-00628)

References

- 1) Young-Hoon Jung, Seung-Hee Chai, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong. "Rotor Shape Change of IPMSM for Power Density Improvement", KSAE, 1331-1335., 2014
- 2) Ho-Yong Park, Min-Ro Park, Myung-Hwan Yoon, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong. "Design for Stress Reduction in Rotor of IPMSM", KSAE, 573-577., 2016
- 3) Jun-Woo Chin, Min-Ro Park, Hae-Joong Kim, Jung-Pyo Hong. "Characteristic Comparison of Concentrated and Distributed Winding of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV Traction", KSAE Spring conf 1030-1034., 2015
- 4) Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong. "Design and Evaluation of a Multi-layer Interior PM Synchronous Motor for High-Speed Drive Applications", Magnetics, 405-412., 2016