

토크 향상을 위한 영구자석 보조 권선계자형 동기전동기 설계

류준열* · 황성우 · 임명섭 · 홍정표
한양대학교 미래자동차공학과

Design of Permanent Magnet-assisted WFSM for Torque Improvement

Junyeol Ryu · Sungwoo Hwang · Myungseop Lim · Jungpyo Hong*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 135-791, Korea

Abstract : In order to improve the performance of Wound Field Synchronous Motor (WFSM), Permanent Magnet assisted(PM-assisted) WFSM is proposed and investigated in this paper. The effects of the inserted permanent magnet are increase of the air gap flux and mitigation of the magnetic saturation of iron core. The increase of the air gap flux and mitigation of the magnetic saturation leads to increase torque. Therefore, the torque of PM-assisted WFSM is improved. To verify the torque improvement, the most effective position of the permanent magnet insertion in PM-assisted WFSM is decided by comparing average torques in PM-assisted WFSM with the original one. The torque is calculated by 2-D finite element analysis. With the result, the PM-assistance is applied to a WFSM designed for Electric Vehicle traction motor. By comparing the results of simulated average torques of the original WFSM and the PM-assisted WFSM, the improvement of the torque is figured out.

Key words : Electric Vehicle(전기 자동차), Permanent Magnet(영구 자석), Power Density(출력 밀도), Traction Motor(견인 모터), Wound Field Synchronous Motor(권선 계자형 동기 전동기)

Nomenclature

I : current, A
N : the number of turn
PM : permanent magnet
PMSM : permanent magnet synchronous motor
 R_m : reluctance
WFSM : wound-field synchronous motor
 ϕ : magnetic flux

1. 서론

최근 환경 문제가 대두되면서 전기모터로 구동

하는 하이브리드 자동차나 전기 자동차와 같은 친환경 제품이 각광을 받고 있다.

현재 전기 자동차의 주행 거리를 늘리기 위해서, 더욱 높은 효율과 출력 밀도의 견인 모터의 개발이 필요한 시점이다. 이러한 관점에서, 희토류를 사용하는 영구 자석형 동기 전동기는 다른 종류의 전기 자동차용 견인 모터보다 더 큰 장점이 있다.¹⁾ 하지만, 희토류 자원 채굴 시 발생하는 환경 파괴와 국제 시장에서의 수요와 공급의 불균형에 의한 희토류 자원의 심각한 가격 변동으로 인해, 많은 산업에서 희토류 자원의 사용을 줄이려는 움직임이 활발해지고 있다.

이 논문에서, 영구 자석형 동기 전동기(PMSM)를 대체하기 위해 권선 계자형 동기 전동기(WFSM)를 사용하였다. WFSM은 PMSM과 구조적으로 비슷하지만

* 류준열, jesus0925@hanyang.ac.kr

자기장을 발생시키는 영구 자석을 전자석으로 대체한 구조이다. WFSM은 회로류 자석을 사용하지 않는 종류의 모터 중에서 높은 출력 밀도를 가지는 장점으로 인해 전기 자동차용 견인 모터에 적합하다. 그럼에도 불구하고, WFSM의 출력 밀도는 PMSM를 대체하기에는 아직 부족하다. 그러므로, 이 논문에서는 WFSM의 출력 밀도를 높이기 위한 방법으로 hybrid excitation²⁾으로 알려진 영구 자석 보조를 적용하였다. 또한, 영구 자석 보조를 활용하면 모터의 효율을 높이는 데에도 이용할 수 있다.

영구 자석 보조의 영향을 살펴보기 위해 WFSM이 사용되었다. 영구 자석 보조를 적용함에 있어 영구 자석 삽입 위치의 최적점을 살펴본 후에, 선택된 모델에 적용할 것이다. 또한, 2D 유한요소해석을 통해 영구 자석이 보조된 WFSM의 출력 밀도가 향상되는 것을 확인할 것이다.

2. 영구 자석 보조

이 논문에서의 영구 자석 보조란, WFSM의 출력 밀도를 높이기 위해 회전자 부분에 추가적으로 자석을 삽입하여 모터의 출력 밀도를 높이는 방법을 말한다.

2.1 영구 자석 보조 원리

영구 자석 보조를 이용해 출력 밀도를 높이는 원리는 자속의 2가지 영향에 의해 설명이 가능하다. 영구 자석 보조 WFSM의 자속 경로는 Fig. 1에 나타난다. 이 때, 영구 자석에 의한 자속은 공극 쪽으로 가는 방향의 자속과 공극과 반대 방향의 자속으로 나뉘고, 이 나뉘어진 두 가지 자속의 영향에 의해 영구 자석 보조의 원리를 설명할 수 있다.

첫째, 추가적으로 삽입된 영구 자석에 의해 발생하는 자속으로 인해, 공극을 통과하는 자속은 증가한다. 따라서, 전기자 쇄교 자속 또한 증가하고 이것이 토크의 증가로 이어진다.

두 번째 영향은 철심의 자기적 포화 현상의 완화이다. 철심에서 기자력에 의해 자속이 발생하는데, 철심이 자기적으로 포화되면 포화된 영역은 자기적으로 공극과 유사한 특성을 보인다.

다시 말해 철심의 투자율이 감소하고, 이는 자기 저항이 증가했다는 의미이므로, 원하는 만큼의 자속을 얻을 수 없다. 하지만, Fig 1에서 보이는 바와 같이, 영구 자석을 삽입하게 되면 자속의 일부는 계자 권선에서 발생하는 주 자속 방향과 반대로 흐르게 되고, 이로 인해 회전자 tooth에서의 합성 자속이 감소하므로 철심의 자기적 포화 현상을 줄일 수 있다. 결과적으로, 철심의 포화 현상의 완화는 자기 저항 R_m 의 감소를 의미한다. 이를 식(1)을 통해 설명할 수 있다. N과 I는 각각 계자 권선의 턴수와 입력되는 계자 전류의 크기이다.

$$N \cdot I = R_m \cdot \phi \quad (1)$$

위 식에서 N과 I의 곱은 기자력이다. N과 I가 변하지 않는 동일한 기자력 조건에서 포화 현상의 완화에 의한 자기 저항의 감소는 계자 권선에서 발생하는 자속 ϕ 의 증가로 이어진다. 그러므로, 더 많은 자속이 공극을 지나가게 되고, 전기자 쇄교 자속이 증가한다. 궁극적으로, 영구 자석 보조를 이용하면 같은 입력 전류로 더 큰 토크를 발생시킬 수 있다.

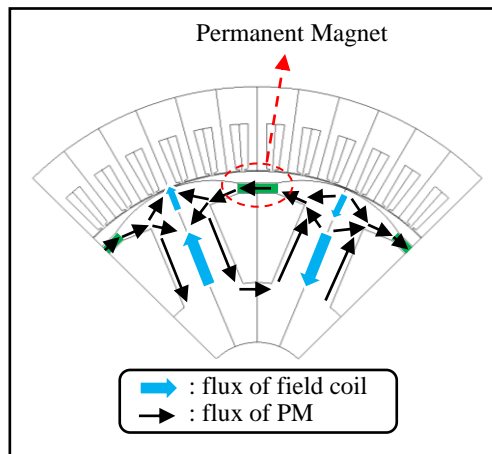


Fig. 1 Rotor magnetic flux path of PM-assisted WFSM

2.2 영구 자석 삽입의 최적의 위치

이전 장에서, 추가적으로 영구 자석을 삽입하면 모터의 토크를 증가시킬 수 있다는 것을 확인했다. 이런 관점에서, 영구 자석을 삽입하는 최적의 위치는 적은 양의 자석을 사용하면서 공극을 지나는 자속을 늘리고 자기적 포화를 줄일 수 있는 위치로 선정해야 한다. 따라서, Fig 2에서 보이는 것처럼, 영구 자석 삽입의 위치는 shoe 부분의 포화를 줄이기 위해 a) shoe 부분, tooth 부분의 포화를 줄이기 위해 b) tooth 부분, yoke에서의 포화를 줄이기 위해 c) yoke 부분, 마지막으로, 전체적인 포화를 줄이기 위해 d) slot opening 부분으로 선정하였다. 삽입 자석으로는 잔류 자속 밀도가 1.2T인 Nd-Fe-B 자석을 이용하여, 2D 유한요소해석을 통해 동일한 전기적 입력에 대해 각 모델의 토크를 비교하였다. 이 때, 영구 자석에 의해 발생하는 자속을 동일하게 하기 위해 모든 모델의 영구 자석 두께를 같게 하였다.

a) shoe에서, 평균 토크는 기존 모델에 비해 감소하였고, c) yoke에서, 평균 토크는 기존 모델에 비해 거의 변화가 없었다. 평균 토크의 증가는 b) tooth와 d) slot opening에서 현저하게 나타났다. 이 부분에서 토크는 각각 4.05%, 6.70% 증가했다. 또한, d) slot opening 모델에서 사용되는 자석량이 b) teeth에서보다 매우 적게 사용되었다. 그러므로, 영구 자석을 삽입하는 최적의 위치는 slot opening 부분으로 결정하였다.

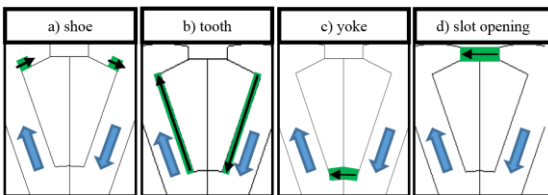


Fig. 2 Positions of permanent magnet insertion

3. 영구 자석이 보조된 WFSM

영구 자석 보조에 의해 출력 밀도가 향상되는 것을 살펴보기 위해 전기 자동차용 전인 모터로

설계된 WFSM 모델을 선정했다.

2장에서 이미 출력 향상에 영향을 주는 영구 자석의 최적의 위치는 회전자 slot opening 부분이 라는 것을 확인한 바 있다. 삽입된 영구 자석에 의한 영향만을 비교하기 위해 설계 도면에서 다른 부분은 그대로 두고 자석 부분만 추가를 하였다.

자석의 종류로써, 각각의 잔류 자속 밀도가 0.4T, 1.2T인 ferrite와 Nd-Fe-B인 영구 자석이 이용되었다. Fig. 3는 같은 전기적 입력에 대해 각 모델에 2D 유한요소해석을 통해 각각의 영구 자석을 삽입한 모델과 기존 모델과의 토크를 비교한 그래프이다. Fig. 3를 통해 영구 자석을 보조 했을 때, 토크가 기존 모델에 비해 향상됨을 알 수 있었고, Nd-Fe-B의 영구 자석을 이용했을 때의 토크가 ferrite의 영구 자석을 사용했을 때보다 더 크게 향상 되었음을 확인할 수 있다. 이는 Nd-Fe-B의 영구 자석의 잔류 자속 밀도가 ferrite의 영구 자석의 잔류 자속 밀도에 비해 더 크기 때문이다. 출력 밀도는 토크에 비례하므로, Nd-Fe-B의 영구 자석을 이용했을 때의 출력 밀도가 기존 모델에 비해 6.70% 증가 했음을 알 수 있다.

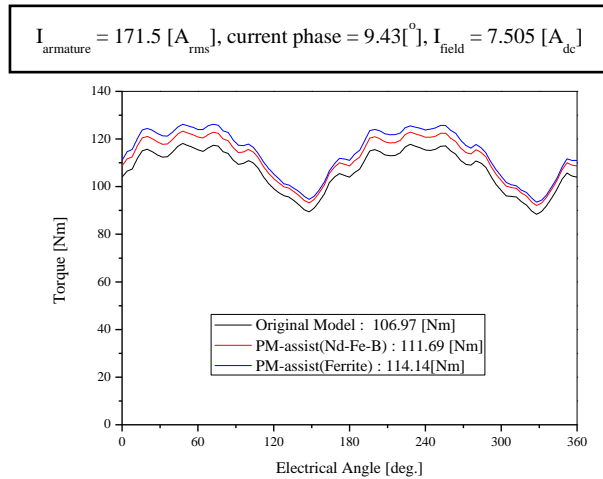


Fig. 3 The torque of original and PM-assisted models

다음으로, 동일한 토크가 발생하는 전기적 입력의 차이를 분석하고, 결과를 Table 1에 나타냈다. 이 결과를 통해 영구 자석 보조에 의해 전기자 전류가 감소했음을 알 수 있다. 그러므로, 영구 자석 보조를 이용했을 때, 모터의 효율이 증가했음을 알 수 있다.

Table 1 Electrical input and efficiency

Model	Armature Current [A_{rms}]	Field Current [A_{dc}]	Efficiency[%]
Original	170	10	94.56
PM-assist	159.7	10	95.03

4. 결 론

회로류 자원의 사용을 줄이기 위해, 현재 일반적으로 전기 자동차용 견인 모터에 사용되는 PMSM을 WFSM으로 대체할 수 있다. 이 논문에서는, PMSM에 비해 상대적으로 낮은 출력 특성을 향상시키기 위해 영구 자석 보조를 대상 모델에 적용하였다. 우선, 2D 유한요소해석을 통해 영구 자석 삽입의 최적의 위치를 살펴보았다. 그 결과를 바탕으로, 영구 자석의 최적의 위치를 대상 WFSM의 slot opening 부분으로 정하였다. WFSM의 출력 밀도는 영구 자석을 보조했을 때, 6.7% 정도 증가했다. 또한, 같은 토크 값에 대한 전기적 입력을 살펴본 결과, 영구 자석 보조를 이용하면 모터의 효율 또한 높일 수 있다.

결과적으로, 영구 자석 보조를 이용하면 적은 양의 영구 자석을 사용해 WFSM의 출력 밀도와 효율을 높일 수 있다. 만약, 자석량과 위치에 대한 최적 설계를 하면, 출력 밀도와 효율을 더 높일 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 1) Jincheol. Park, Nyeonhan. Hong, Sungwoo. Hwang, Seunghee. Chai, Jungpyo. Hong, "Optimum Design for Reducing Field Induced Voltage and Torque ripple of WFSM for ISG using Response Surface Methodology," The Korean Institute of Electrical Engineers, 2015 Annual Summer Conference journal, pp.806-807, 2015
- 2) T. Kosaka, T. Hirose, and N. Matsui, "Brushless Synchronous Machines with wound-Field Excitation using SMC Core Designed for HEV Drives," International power Electronics Conference, 2010, pp.1794-1800.
- 3) K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Shima, T. Fukami, and K. Shirai, "Modeling of Salient-Pole Synchronous Machines Assisted by Permanent Magnets," IEEE Trans. Magn., vol.47, no.10, pp.3028-3031, 2011
- 4) Jungpyo Hong, "Trends of Wound Field Synchronous Motor Development", The Korean Society of Automotive Engineers journal, Vol.35, No.10, pp.31-37, 2013