

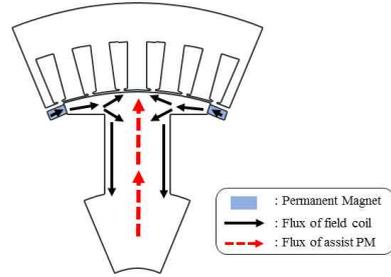
## 영구자석 보조 권선계자형 동기전동기 전기적 특성 분석

조운성, 유준열, 홍정표  
한양대학교 미래자동차공학과

### Electrical Characteristic Analysis of Permanent Magnet-assisted WFSM

Yun-Sung Jo, Jun-Yeol Ryu, Jung-Pyo Hong  
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

**Abstract** - 권선계자형 동기전동기의 성능을 향상시키기 위해 본 논문에서는 대상 권선계자형 동기전동기에 영구자석 보조를 적용하였다. 영구자석 보조의 원리는 영구자석에서 계자자속과 반대방향의 자속이 발생하여 회전자 철심의 자기포화를 저감하여 동일 기자력에 대해 더욱 큰 계자자속을 발생시키는 것이다. 이를 통해 전동기의 출력밀도, 효율과 같은 전기적 성능을 향상시킬 수 있다. 이를 확인하기 위하여 2D FEM을 통해 영구자석 보조 유무에 따른 전기적 성능을 비교하였다. 비교 결과를 통해 영구자석 보조 적용 시 권선계자형 동기전동기의 전기적 성능이 향상됨을 알 수 있다.



〈그림 1〉 영구자석 보조 적용 시 회전자 자속 경로

#### 1. 서 론

최근 국내에서 친환경 정책이 활발히 시행되고 있다. 특히 대기오염과 관련하여 저탄소 녹색마을 조성을 목표로 탄소발생 제품에 대한 규제가 점차 강화되고 있다. 특히 자동차에서 배출되는 탄소를 줄이기 위해서 세계적으로 친환경 하이브리드 자동차, 전기자동차의 보급을 장려하고 있는 추세이다.

이와 같은 이유로, 희토류를 사용한 영구자석 동기전동기(PMSM)는 기존 전동기에 비해 높은 출력밀도와 효율로 인해 널리 이용되고 있다. 하지만, 희토류 자원은 국가별 매장량 차이 및 공급 불균형으로 인해 급격한 가격 변동이 발생할 수 있고, 자원 채굴 시 자연 훼손 등과 같은 치명적 단점이 있다. 따라서, 희토류 영구자석을 사용하지 않는 전동기에 대한 연구가 필요하다.

영구자석을 사용하지 않는 전동기로 권선계자형 동기전동기(WFSM)가 있다. 권선계자형 동기전동기는 영구자석을 권선으로 대체한 전동기이다. 하지만, 권선계자형 동기전동기는 계자권선에서 발생하는 추가적인 동손으로 인해 영구자석 동기전동기에 비해 출력밀도 및 효율이 낮다. 따라서, 본 논문에서는, 영구자석 보조를 통한 권선계자형 동기전동기의 효율 변화를 분석하였다. 또한, 2차원 유한요소법(2D FEM)을 통해 권선계자형 동기전동기의 영구자석 보조 유무에 따른 성능을 비교한다.

#### 2. 영구자석 보조

권선계자형 동기전동기는 영구자석 대신 계자권선을 통해 계자자속을 발생시키므로, 계자권선에서 발생하는 동손으로 인해 낮은 효율을 갖는 단점이 있다. 또한, 회전자의 높은 포화도로 인하여 전기적 성능에 영향을 주게 된다. 이러한, 철심의 자기포화로 인하여 전기자 전류 증가에 따른 토크 증가비가 작기 때문에 철심 포화 저감을 위한 방법이 필요하다. 철심 포화 저감 방법으로는 계자에 추가적으로 영구자석을 보조하는 방법이 있다. 영구자석 보조의 원리는 아래와 같다.

##### 2.1 영구자석 보조 원리

〈그림 1〉은 영구자석 보조 시 회전자 자속 경로를 나타낸다. 계자권선에 의해 계자자속이 발생하고, 영구자석에 의해 발생한 자속은 계자자속과 반대 방향의 자속과 공극 방향의 자속으로

나뉘어진다. 영구자석에서 발생한 두 종류의 자속을 통해 영구자석 보조 원리를 설명한다.

첫째, 영구자석으로 인해 계자자속과 반대방향의 자속을 형성 시킴으로써 철심에서의 포화도를 저감한다. 철심의 자기포화 저감은 철심의 자기저항을 낮추어 식(1)과 같이 동일 기자력에서 더 많은 계자 자속이 발생한다.

$$F = R_m \cdot \Phi \quad (1)$$

$F$ 는 기자력,  $R_m$ 은 자기저항,  $\Phi$ 은 자속을 나타낸다.

둘째, 공극 방향의 자속은 계자자속에 더해져 쇄교자속이 증가하므로 동일 전류에서 토크가 증가한다.

#### 3. 영구자석 보조에 따른 WFSM 전기적 특성 분석

영구자석 보조에 따른 전기적 특성 변화를 검토하기 위해 8극 48슬롯 권선계자형 동기전동기를 선정하였다. 2D FEM을 통해 대상 전동기에 영구자석 보조 유무에 따른 전기적 특성을 비교한다. 전기적 특성 비교는 다음의 조건에 대해 진행한다.

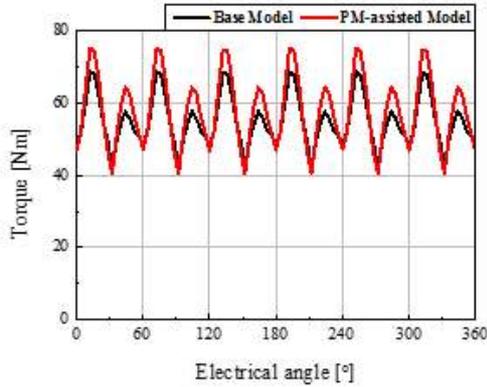
첫째, 동일 전류 인가 시 영구자석 유무에 따른 토크를 비교한다. 둘째, 동일 전압, 전류, 출력조건에서 영구자석 보조 유무에 따른 두 모델의 효율을 비교한다.

##### 3.1 동일 전류 인가 시 토크 비교

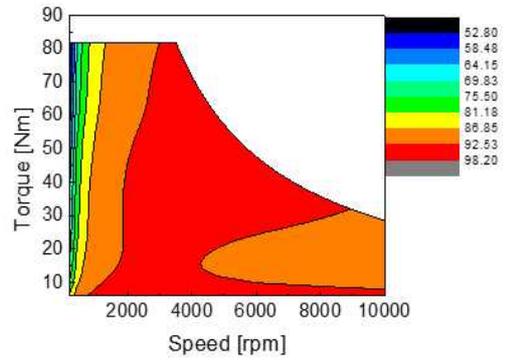
〈그림 2〉는 2D FEM을 통해 산정한 대상 권선계자형 동기전동기의 영구자석 보조 유무에 따른 토크 파형이다. 〈표 1〉에서 나타나는 것처럼, 두 모델의 인가 전류는 동일하다. 동일 전류 인가 시, 토크는 영구자석 보조를 적용한 모델이 그렇지 않은 모델에 비해 9.5% 더 크다. 이는 영구자석 보조를 적용한 모델의 계자자속이 증가하였기 때문이다. 따라서, 이를 통해 영구자석 보조 시 권선계자형 동기전동기의 토크를 증가시킬 수 있다.

〈표 1〉 동일 전류 인가 시 토크

	Base Model	PM-Assisted
전기자 전류[A <sub>rms</sub> ]		128.8
전류 위상각[°]		3.0
계자 전류[A]		3.9
평균 토크 [Nm]	68.6	75.1



〈그림 2〉 동일 전류 인가 시 토크

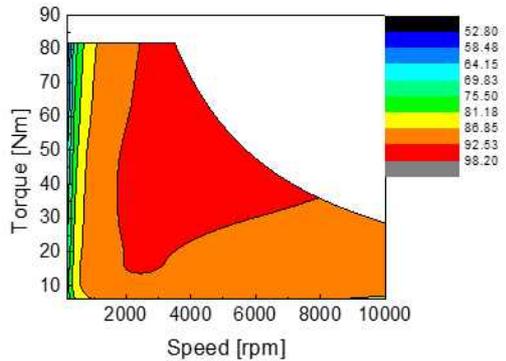


〈그림 3〉 영구자석 보조 미적용 시 효율맵

### 3.2 동일 출력에 대한 효율 비교

영구자석 보조 적용 시 계자 자속의 증가로 목표 출력을 내기 위한 전기자 전류가 감소하기 때문에 전기자 동손이 감소한다. 하지만, 포화 저감에 따른 자속량 증가로 인해 고정자 철손이 증가한다. <그림 3>, <그림 4>는 각각 영구자석 보조 적용 유무에 따른 효율맵이다. <그림 5>는 <그림 3>, <그림 4>에서 보여지는 효율의 차를 나타낸다. <그림 5>에서 빨간색으로 표시된 영역은 영구자석 보조를 했을 때 효율이 상승하는 영역인 반면에, 노란색으로 표시된 영역은 효율이 감소하는 영역이다.

저속 고토크 영역에서는 동손이 지배적이기 때문에 영구자석 보조 적용 시 효율이 상승함을 확인할 수 있다. 하지만, 고속 저토크 영역에서는 철손이 지배적이기 때문에 영구자석 보조 적용 시 효율이 감소한다.



〈그림 4〉 영구자석 보조 적용 시 효율맵

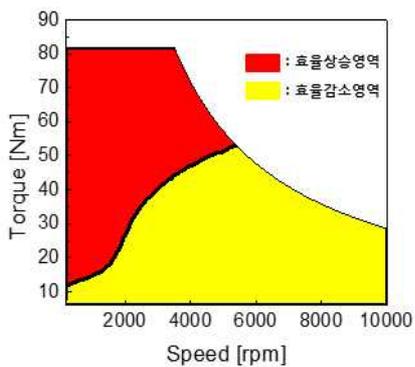
## 4. 결 론

회도류 영구자석을 사용하는 전동기를 대체하기 위해 권선계자형 동기전동기가 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 권선계자형 동기전동기의 단점을 개선하기 위해 영구자석 보조를 적용하였다. 영구자석 보조에 따른 성능 향상을 분석하기 위해 2D FEM을 통해 영구자석 보조를 적용한 모델과 적용하지 않은 모델의 전기적 특성을 비교하였다.

동일 전류 인가 시 토크 비교 결과, 영구자석 보조를 적용한 권선계자형 동기전동기가 그렇지 않은 전동기에 비해 토크가 9.5% 증가하였다.

동일출력에 대한 효율비교 결과 동손이 지배적인 저속 고토크 영역에서는 영구자석 보조 적용 시 효율이 상승한다. 이는 동일 출력을 내기 위해 전기자 전류가 감소하기 때문이다. 결과적으로, 영구자석 보조를 통해 권선계자형 동기전동기의 효율이 최대 4.2% 증가하였다.

따라서, 주 운전영역이 저속 고토크 영역인 모델의 경우, 영구자석 보조 시 출력밀도 증가와 효율 증가효과를 기대할 수 있을 것이다.



〈그림 5〉 영구자석 보조 유무에 따른 효율 비교

### [참 고 문 헌]

- [1] 강준규, 임홍식, 조병욱, 김기찬, “전기자동차용 권선 계자형 동기전동기의 계자전류 리플 저감 연구.” 대한전기학회, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.67-69, 2017
- [2] 류준열, 황성우, 임명섭, 홍정표, “토크 향상을 위한 영구자석 보조 권선계자형 동기전동기 설계.” 한국자동차공학회, 2016년 춘계학술대회, pp.555-558, 2016
- [3] 홍정표, “권선계자 동기전동기의 개발동향.” 한국자동차공학회, Auto Journal : Journal of the Korean Society of Automotive Engineers 35, pp.31-37, 2013
- [4] 이재웅, 차경수, 윤명환, 홍정표, “EV 구동용 120kW 권선계자형 동기 전동기 토크 리플 저감설계.” 한국자동차공학회, 2017년 추계학술대회 및 전시회, pp.1319-1324, 2017
- [5] Sung-Woo Hwang, Jae-Han Sim, Jung-Pyo Hong, Ji-Young Lee, “Torque Improvement of Wound Field Synchronous Motor for Electric Vehicle by PM-assist.” IEEE Conferences, 2016 Energy Conversion Congress and Exposition(ECTC), pp.1-6, 2016
- [6] Young-Chul Shin, Ki-Chan Kim, “Analysis on Current Information of Wound Field Synchronous Motor for Electric Vehicle.” The Korean Institute of Electrical Engineers, Journal of Electrical Engineering & Technology Vol.11 No.5, pp.1190-1194, 2016