



비희토류 매입형 영구자석 동기 모터의 다층 회전자 설계 기술

Multi-layer Rotor Design of Rare-earth Free Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

박민로 | 순천향대학교 정영훈 | 현대자동차

임명섭 | 한양대학교

Park, Min-Ro | Soonchunhyang University

Jung, Young-Hoon | Hyundai Motor Company

Lim, Myung-Seop | Hanyang University



요 약

본 원고는 비희토류 원소인 Ferrite 영구자석을 이용한 다층 IPMSM의 회전자를 설계하는 방법을 제시한다. Ferrite 영구자석의 잔류자속밀도와 보자력을 보완하기 위해 다층의 영구자석 배치와 고정자 코일의 권선 수를 증가시키지만, 이는 회전자의 기계적 안정성 저하, 전압 초과, 영구자석 불가역 감자를 야기하게 된다. 따라서 본 원고에서는 이러한 특성들을 고려하는 설계 방법을 소개하고 검증한다.

Abstract

This paper presents a method for designing a multi-layer rotor of a IPMSM using ferrite permanent magnets, a non-rare earth element. To compensate for the low remanence and coercive force of ferrite permanent magnets, the multi-layer arrangement of the permanent magnets and the winding number of stator coils are increased, but this causes a decrease in mechanical stability of the rotor, overvoltage, and permanent magnet irreversible demagnetization. Therefore, in this paper, a design method considering these characteristics is introduced and verified.

1. 서 론

최근 전기 자동차에 관한 관심이 높아지면서 내연기관을 대체할 수 있는 전기 모터의 수요가 증가하고 있다. 차량을 구동하는 전기 모터는 한정된 공간 내에서 목표 출력과 효율을 충족해야 하므로 고출력 밀도와 높은 효율을 요구한다. 따라서, 네오디뮴(Nd, Neodymium) 영구자석을 사용한 매입형 영구자석 동기 모터(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 이러한 특성을 만족시키는 가장 매력적인 모터 중 하나이다[1]. 그러나 Nd 영구자석은 공급이 불안정하고 국제 상황에 따라 가격

변동이 크다는 문제가 있다. 이러한 이유로, Nd 영구자석을 사용한 IPMSM을 대체할 수 있는 비희토류 또는 희토류 저감 모터에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 영구자석을 사용하지 않는 유도 모터, 권선 계자형 동기 모터, 동기 릴럭턴스 모터가 대표적이며 최근에는 소량의 Nd 영구자석 또는 페라이트(Ferrite) 영구자석을 사용한 영구자석 보조 동기 릴럭턴스 모터도 활발히 연구되고 있다. 또한, Ferrite 영구자석의 사용량을 극대화하기 위하여 자석의 구조를 Spoke 형태로 배치한 자속 집중형 동기 모터와 영구자석을 다층으로 배치한 다층 IPMSM 연구되고 있다. 그중에서도, Nd 영구자석 대비 낮은 잔류 자속 밀도의 Ferrite 영구자석을 사

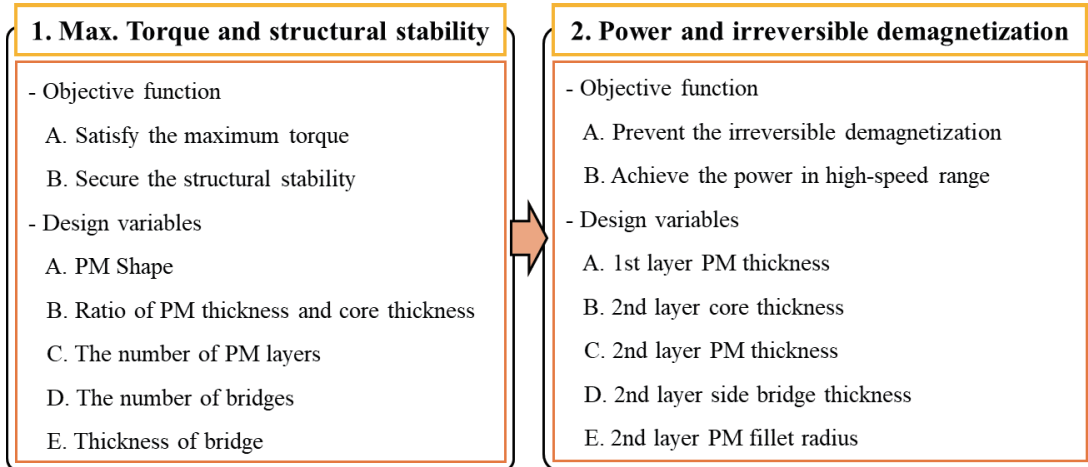


그림 1 Ferrite 영구자석을 사용한 다층 IPMSM 설계 과정

용한 다층 IPMSM은 릴럭턴스 토크 (Reluctance torque)를 적극적으로 활용하여 부족한 마그네틱 토크 (Magnetic torque)를 보완하기 때문에 비히토티류 IPMSM으로 주목받고 있다[2].

하지만, 앞서 언급하였듯이 Ferrite 영구자석은 낮은 잔류 자속 밀도와 보자력을 가지기 때문에 이를 사용한 모터 설계 시에 다음과 같은 특성들을 고려해야 한다. 먼저, 낮은 잔류 자속 밀도로 인한 토크 감소를 극복하기 위해 영구자석 사용량을 증가시키고, 영구자석의 층수를 증가시켜, 마그네틱 토크 감소를 최소화하고 릴럭턴스 토크를 최대화해야 한다. 하지만, 이는 고속 운전 시 회전자의 기계적 안정성을 저하시키게 된다. 또한, 고정자 코일의 권선 수를 증가시켜 전기자 기자력을 확보하여 부족한 계자 기자력을 보완할 수 있지만, 이는 인덕턴스 전압 강하를 상승시켜 부족한 전압으로 인한 출력 저하를 초래하게 된다. 그리고 Ferrite 영구자석의 낮은 보자력과 증가된 전기자 기자력은 결국 영구자석의 불가역 감자를 발생시키는 원인이 된다.

따라서, 본 원고는 전기 자동차 구동용으로 Ferrite 영구자석을 사용하는 다층 IPMSM의 출력 및 토크뿐만 아니라 불가역 감자, 기계적 안정성과 같은 특성들을 분석하고 이를 개선하는 설계 방법을 제안한다. [그림 1]은 본 원고에서 제안하는 Ferrite 영구자석을 사용하는 다층 IPMSM의 설계 과정과 목표 그리고 주요 설계 변수를 보여준다. 먼저, 모터의 사이즈와 직결되는 특성인 토크와 기계적 안정성에 대해 분석하고 이를 확보하는 설계를 진행한다. 주어진 사이즈 내에서 목표하는 최대 토크를 달성하고 기계

적 안정성이 보장되는지를 결정한다. 다음으로 고속 영역에서의 출력 만족과 불가역 감자를 방지하기 위한 설계를 수행한다. 모터가 고속으로 구동되면 유기 전압의 크기가 증가하여 단자 전압에 이르게 되며, 약자속 제어에 의한 전류 위상각이 증가하게 된다. 따라서 고속 영역에서 출력 만족과 불가역 감자 여부를 검토하고 이를 개선한다. 마지막으로, 설계된 모터를 제작하여 실험한 결과를 통해 제안한 설계 방법을 검증한다.

2. 해석 및 설계 조건

모터의 특성을 해석하고 설계하기 위한 조건은 다음과 같다. 모터의 고속 회전을 고려하여 회전자 철심은 고강도 전기강판인 35PNT600Y가 사용되었다. 35PNT600Y의 두께는 0.35 mm이며 항복 강도는 620 MPa이다. 고정자 철심은 두께가 0.27 mm인 27PNX1350F이며, 자속 밀도가 1.0 T, 주파수가 400 Hz 조건에서 철손이 13.5 W/kg이다. Ferrite 영구자석의 잔류자속밀도는 100 °C에서 0.392 T이며, Ferrite 영구자석의 저온 불가역 감자 특성을 고려하여 불가역 감자 특성은 -40 °C에서 검토되었다. 불가역 감자는 감자 해석 전과 후의 무부하 쇄교자속 비를 감자율(DR, Demagnetization Ratio)로 정의하여 약조건인 최대 전류 300Arms의 1.2배, 전류 위상각 90° 조건에서 감자율이 1% 미만이면 불가역 감자가 발생하지 않았다고 판단하였다[3]. 기계적 안정성은 전기강판의 항복강도 대비 최대 응력의 비를 안전 계수

(SF, Safety Factor)로 정의하여 최대 속도 15,000rpm의 1.2배 속도에서 안전 계수가 1.2 이상이면 기계적 안정성이 확보되었다고 판단하였다.

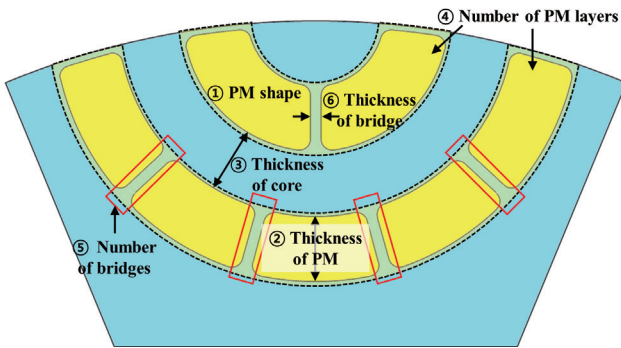
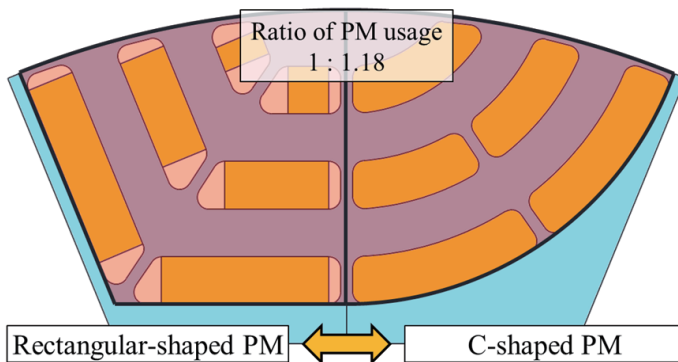
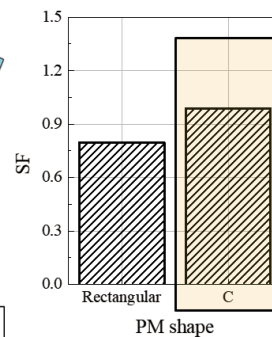


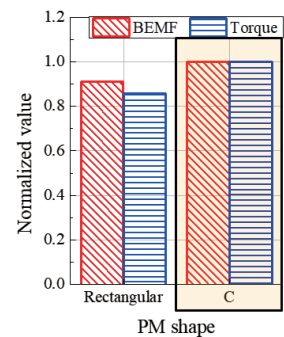
그림 2 토크 만족 설계를 위한 설계 변수



(a) 영구자석 형상



(b) 안전 계수



(c) 역기전력 및 토크

그림 3 영구자석 형상에 따른 특성

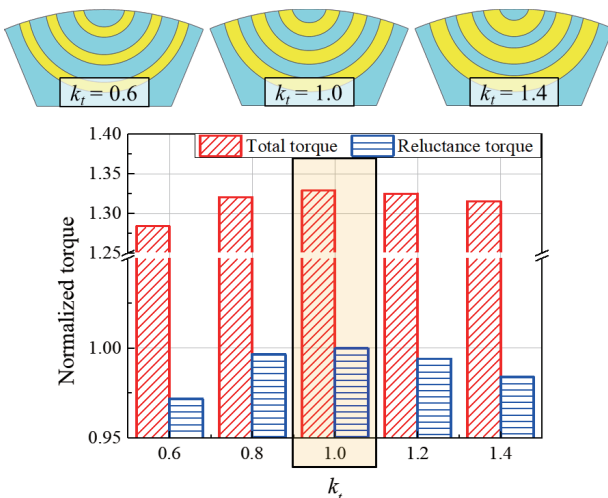


그림 4 k_t 에 따른 토크 특성

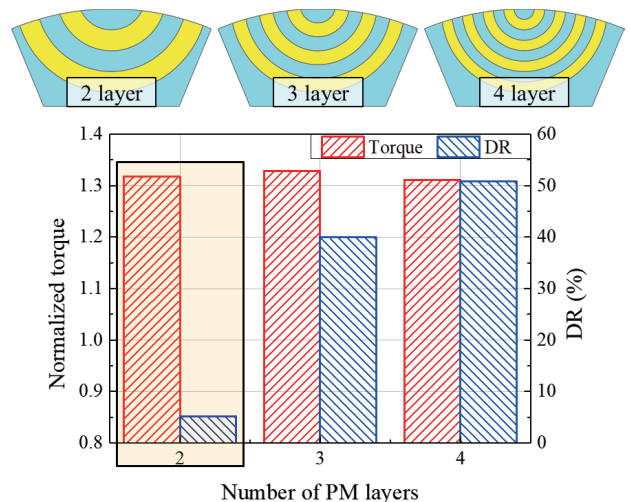


그림 5 영구자석 층수에 따른 특성

3.1 영구자석 형상

첫 번째로, 구조적 특성에 주요한 영향을 미치는 영구자석 형상을 결정한다. 본 원고에서는 일반적으로 사용하는 직사각형의 영구자석과 C 형상의 영구자석을 비교하였다. 일반적으로 모터에 가해지는 최대 응력은 [그림 3(a)]의 빨간 영역이 작아질수록 감소한다[4]. 따라서 C 형상의 영구자석을 사용할 경우, 영구자석 사용량을 증가시키면서 회전자의 최대 응력을 감소시킬 수 있다. 그 결과, [그림 3(b)]에서 보여주듯이 C 형상의 영구자석을 사용하여 직사각형 영구자석보다 최대 응력이 감소하고 SF가 증가하였다. 또한, [그림 3(c)]에서 볼 수 있듯이, C 형상 영구자석 사용량이 직사각형 형상 영구자석보다 많아서, C 형상 영구자석의 BEMF와 토크가 더 높게 발생하였다. 따라서 이 원고에서는 C 형상 영구자석을 사용하였다.

3.2 영구자석과 철심의 두께 비

영구자석 두께는 릴럭턴스 토크에 영향을 미치므로 토크 특성을 고려하여 영구자석 두께와 코어 두께의 비율을 결정한다. 이때, 영구자석 두께와 회전자 철심 두께의 비율을 k_t 로 정의하였으며, 영구자석 두께와 코어 두께의 총합은 일정한 조건에서 비교하였다.

[그림 4]는 각각 k_t 에 따른 회전자 형상과 토크 특성을 나타낸다. [그림 4]와 같이 $k_t=1.0$ 일 때 릴럭턴스 토크와 총 토크는 최대값이다. 따라서 영구자석 두께와 회전자 철심 두께의 비율은 1.0

으로 선택한다.

3.3 영구자석 층수

영구자석 층수는 토크 특성과 불가역 감자를 고려하여 결정한다. 영구자석 층수가 증가함에 따라 영구자석 두께는 감소하지만 총 영구자석 두께는 모든 모델에서 동일하다(k_t 일정). 따라서, 불가역 감자 특성은 영구자석 두께에 많은 영향을 받기 때문에 함께 검토되었다. [그림 5]는 영구자석 층수에 따른 회전자 형상을 보여준다. 이때 모든 모델의 리브(Rib)와 브릿지(Bridge)는 무시하여 기계적 특성은 고려하지 않았다. [그림 5]에서 보는 바와 같이 2층의 토크는 다른 층과 크게 다르지 않다. 그러나 영구자석 층의 수가 증가함에 따라 영구자석 두께가 감소하기 때문에 불가역 감자를 방지하는 데 유리한 2층으로 영구자석 층수를 결정하였다.

3.4 브릿지 수

브릿지 수는 토크, 안전 계수, 감자율을 고려하여 결정한다. [그림 6]은 브릿지의 두께는 1.0mm로 고정한 조건에서 브릿지 수에 따른 회전자 형상과 특성을 보여준다. [그림 6]에서 볼 수 있듯이 안전 계수는 브릿지의 수가 증가함에 따라 증가하지만, 감자율과 토크는 브릿지 수가 증가할수록 감소한다. 따라서, 안전 계수를 만족하는 조건에서 토크가 가장 높도록 브릿지 수를 4개로 선정하였다.

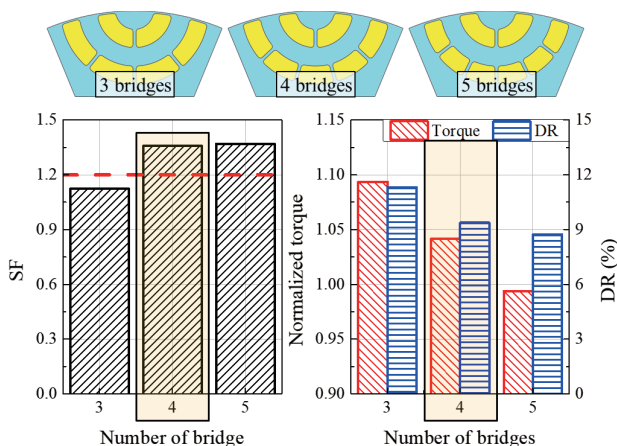


그림 6 브릿지 수에 따른 특성

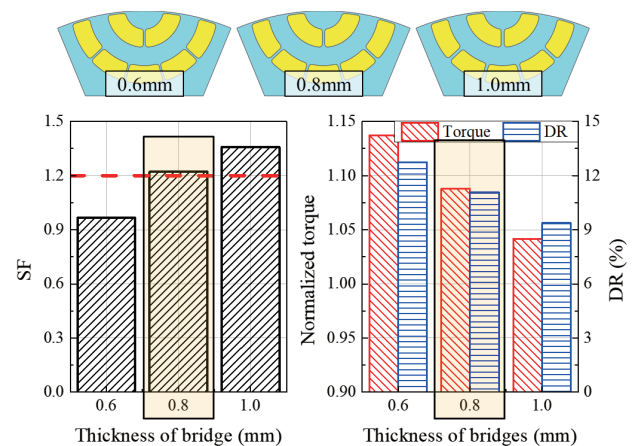


그림 7 브릿지 두께에 따른 특성

3.5 브릿지 두께

브릿지 수와 마찬가지로 브릿지 두께도 토크, 안전 계수, 감자율을 고려하여 결정한다. [그림 7]은 브릿지의 두께에 따른 회전자 형상과 특성을 보여준다. 브릿지의 두께가 감소함에 따라 안전 계수가 감소하고 토크와 감자율이 증가한다. 따라서, 마찬가지로 안전 계수를 만족하는 조건에서 토크가 가장 높도록 브릿지 두께를 0.8mm로 결정하였다.

3.6 초기 모델 성능 곡선

설계된 초기모델의 회전 속도에 따른 토크와 출력 성능 곡선은 d축, q축 등가회로를 이용하여 계산하며, [그림 8]과 같다. 현재 주어진 사이즈, 제한 전류 내에서 최대 토크는 만족하지만, 고속 운전 영역(9,000 rpm 이후)에서는 토크와 출력을 만족하지 못한다. 또한, 초기 모델의 안전 계수와 감자율은 각각 1.22와 11.1%로 불가역 감자가 발생한다. 따라서 다음 단계에서는, 고속에서의 출력 만족과 감자율을 감소시키는 설계를 진행한다.

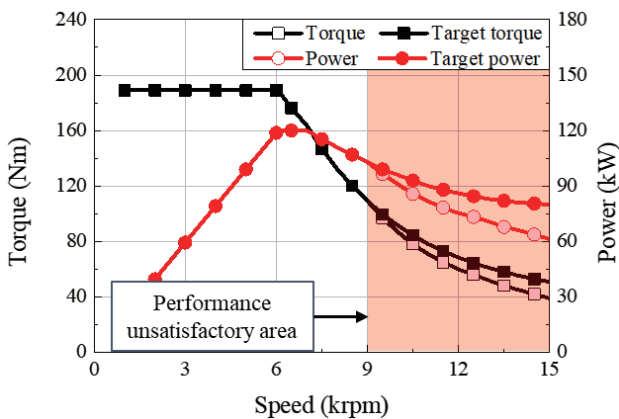


그림 8 초기 모델의 성능 곡선

4. 고속 영역 출력 만족 및 불가역 감자 방지 설계

4.1 설계 방향 결정

앞선 결과에서 볼 수 있듯이, 초기 모델은 속도가 증가함에 따라 유기 전압이 증가하여 고속 운전 영역에서는 충분히 전류를 공급해줄 수 없게 목표하는 토크와 출력을 달성하지 못했다. 이는 초

기 모델의 전압 성분의 벡터도를 나타내는 [그림 9(a)]에서 볼 수 있듯이, 인덕턴스에 의한 전압 강하 성분이 큰 비중을 차지하면서 전압과 전류의 위상차인 역률각이 증가하여 전압 벡터가 3사분면에 위치하며 크기가 증가하였기 때문이다. 따라서, 고속 영역에서의 출력 만족을 위해 유기 전압을 감소시키기 위해서는 전압 벡터를 2사분면에 가깝게 위치시켜야 한다. 그러므로 [그림 9(b)]와 같이 d축과 q축 인덕턴스에 의한 유도 전압은 감소시키고 영구자석에 의한 유도 전압은 증가시켜야 한다.

다음으로, 감자율을 줄이기 위해, 국부적으로 불가역 감자가 발생한 영구자석 부분을 자속 장벽(Flux barrier)으로 대체하는 것이다. 초기 모델의 감자 해석 결과 [그림 10]에서 볼 수 있듯이, 2층의 영구자석에서 회전자 리브에 인접한 영구자석의 불가역 감자는 크게 발생하였다. 따라서, 이 부분에 자속 장벽을 배치하여 리브 근처를 흐르는 자속에 의한 영구자석 불가역 감자를 방지하였다. 또한, 불가역 감자를 고려하여 영구자석의 두께를 결정한다.

※가정: 단자전압(V_a) ≈ 유기전압(V_g)

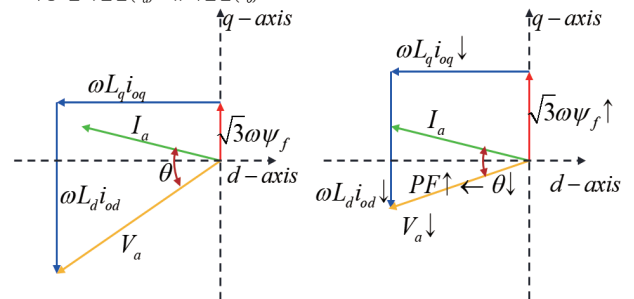


그림 9 전압, 전류 벡터도

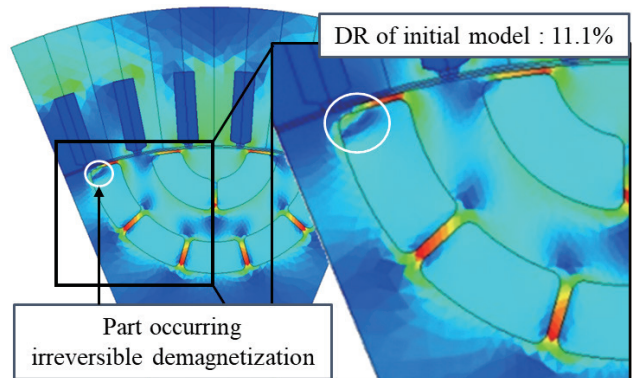


그림 10 초기 모델 감자해석 결과

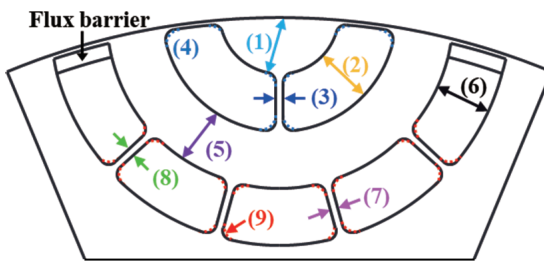
4.2 최적 설계

앞선 설계 방향을 기반으로 회전자의 여러 설계 변수 [그림 11]의 기여율 분석을 통한 주요 설계 인자를 결정하고 이를 통해 RSM (Response Surface Methodology)을 이용하여 최적 설계를 수행한다. 먼저, 분산 분석(ANOVA)을 통해 목적 함수에 크게 기여하는 주요 설계 인자를 결정한다. ANOVA를 사용하여 주요 설계 인자를 결정할 때의 목적 함수는 안전 계수, 기저 속도 (Base speed)에서의 토크, d, q축 인덕턴스, 영구자석에 의한 쇄교 자속 및 감자

율이다. [그림 12]는 목적 함수에 대한 설계 변수의 기여율을 각각 보여준다. 목적 함수에 큰 영향을 미치는 설계 변수는 각 목적 함수에 대한 기여율이 1, 2위인 것으로 선정하였다.

- (2) 1층 영구자석 두께 - (5) 2층 코어 두께
- (6) 2층 영구자석 두께 - (8) 2층 브릿지 두께
- (9) 2층 영구자석의 필렛(fillet) 반경

나머지 설계 변수는 변수 번호순으로 4mm, 0.6mm, 1.5mm, 0.9mm로 선정하였다.



Variable		Level		
No.	Name	Low	Middle	High
(1)	1st layer core thickness	3.5	4	4.5
(2)	1st layer PM thickness	8	8.5	9
(3)	1st layer bridge thickness	0.6	0.7	0.8
(4)	1st layer PM fillet radius	1.0	1.25	1.5
(5)	2nd layer core thickness	3.5	4	4.5
(6)	2nd layer PM thickness	8	8.5	9
(7)	2nd layer center bridge thickness	0.8	0.9	1.0
(8)	2nd layer side bridge thickness	0.8	0.9	1.0
(9)	2nd layer PM fillet radius	1.0	1.25	1.5

그림 11 주요 설계인자 선정을 위한 설계 변수

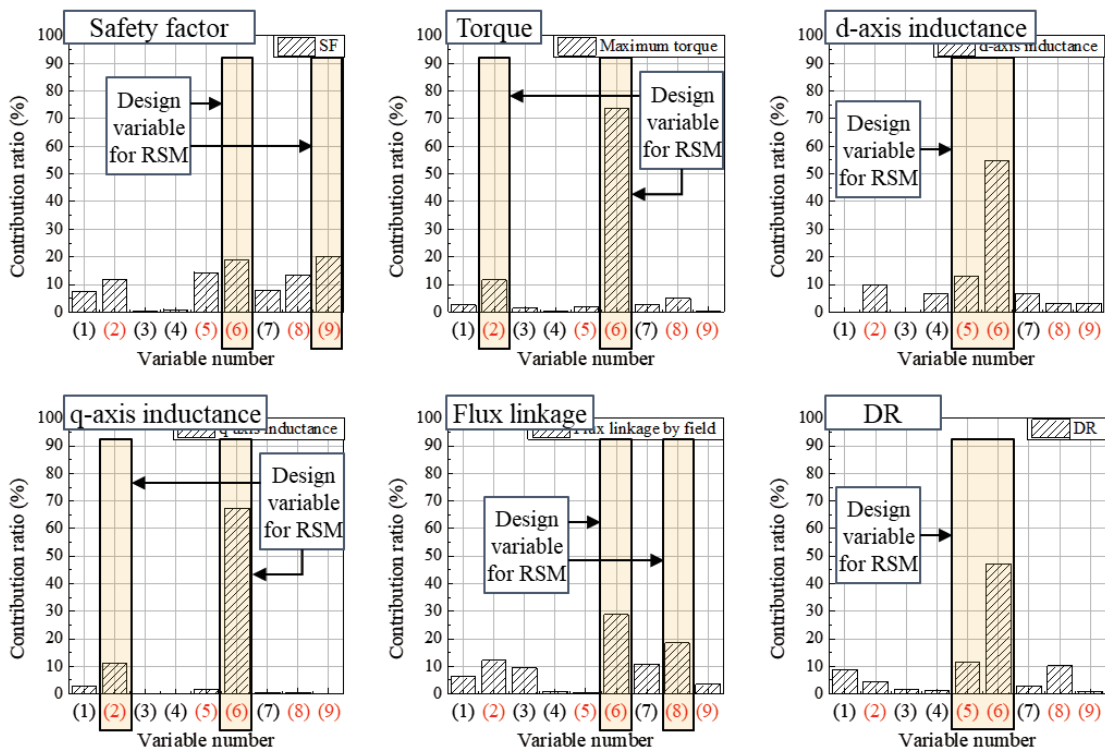


그림 12 설계 변수에 따른 기여율

다음으로 RSM은 ANOVA를 통해 선택된 주요 설계 인자를 이용하여 수행된다. 목적 함수와 설계 제약 조건은 [그림 13]과 같으며, 최적 설계 결과는 [그림 14]에서 보여준다. 안전 계수와 감자율은 각각 1.27과 0.07%이며, 토크와 출력은 초기 모델과 전 영역에서 목표 출력을 만족한다.

5. 실험 검증

설계 결과를 검증하기 위해 최종 모델을 제작하고 실험하여 측정된 실험 결과를 FEA의 결과와 비교한다. [그림 15]는 부하 실험 구성과 결과를 보여준다. 실험은 5,500rpm, 7,500rpm,

15,000rpm으로 진행하였으며, 차이는 5,500rpm에서 1.2%, 7,500rpm에서 1.4%, 15,000rpm에서 0.8%의 오차를 보여주어 실험의 토크와 FEA의 토크가 유사함을 알 수 있다. 또한, 제작된 모터는 최대 속도 15,000rpm에서 안정적으로 구동되어 15,000rpm에서의 기계적 안정성도 실험적으로 검증되었다.

6. 결 론

본 원고는 비회로류 모터 중 하나로 주목받고 있는 Ferrite 영구자석을 이용한 다층 IPMSM의 설계 방법을 제안하였다. Ferrite 영구자석은 희토류 원소인 Nd를 포함한 영구자석과 비교하여 상

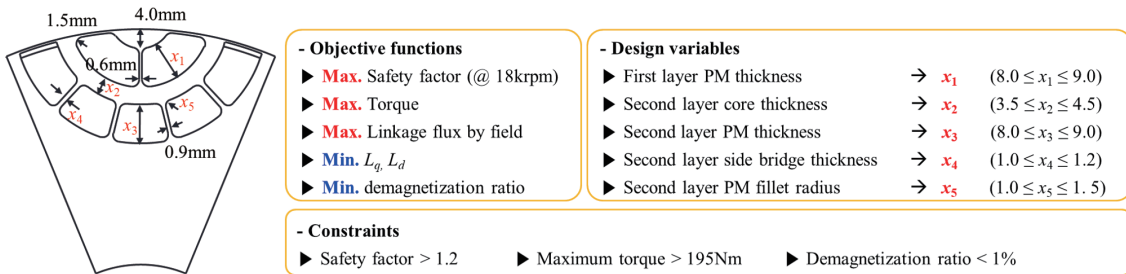


그림 13 최적 설계 목적 함수, 제한 조건, 설계 인자

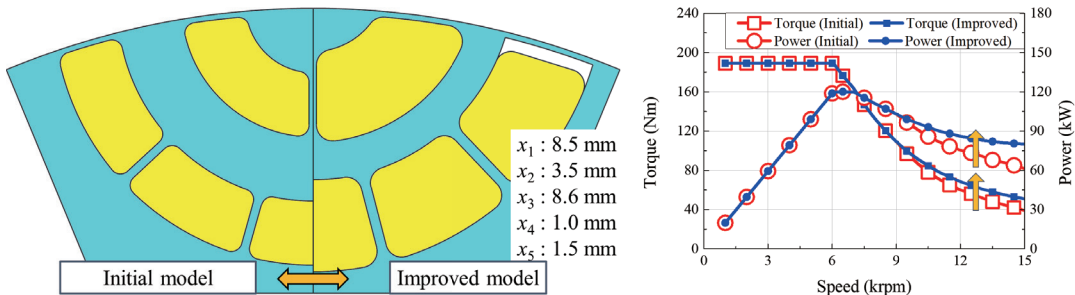


그림 14 최적 설계 결과 및 성능 곡선

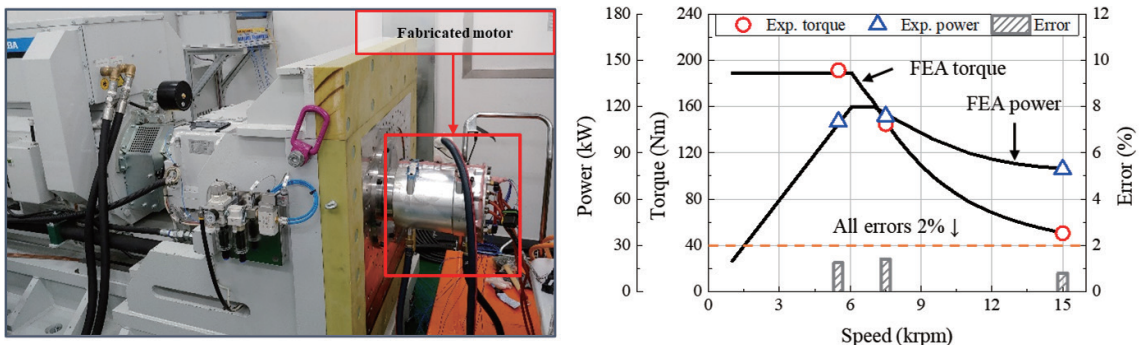


그림 15 부하 실험 구성 및 결과

대적으로 낮은 잔류 자속 밀도와 보자력을 가지기 때문에, 이를 극복하기 위하여 회전자 내 영구자석 사용량을 늘리고 고정자 코일의 권선 수를 증가시켜 설계해야 한다. 이러한 과정에서 모터의 기본적 성능인 토크, 출력 만족뿐만 아니라 기계적 안정성 확보, 영구자석 불가역 감자 특성들도 검토해야 한다. 따라서, 본 원고에서는 이러한 특성들을 만족하기 위한 설계 과정을 보여주었고, 이를 검증하기 위해 최종 설계 모델을 제작하고 실험 평가하였다.

[참고문헌]

- [1] Young-Hoon Jung, et al. "Torque Ripple Reduction of IPMSM Applying Asymmetric Rotor Shape Under Certain Load Condition," IEEE Trans. Energy Convers., 33.1 (2018): 333-340
- [2] Dong-Kuk Lim, et al. "Analysis and Design of a Multi-Layered and Multi-Segmented Interior Permanent Magnet Motor by Using an Analytic Method," IEEE Trans. Magn., 50.6 (2014): Art. no. 8201308.
- [3] Min-Ro Park, et al. "Characteristics of IPMSM According to Rotor Design Considering Nonlinearity of Permanent Magnet," IEEE Trans. Magn., 52.3(2016): Art. no. 8101904.
- [4] Kyong-Soo Cha, et al. "Multipolar High-Speed IPMSM Design for EV Traction Considering Mechanical Stress," in 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 1-6.

저자소개

박민로(Park, Min-Ro)

2013년 충남대학교 전기공학과 졸업
2020년 한양대학교 대학원 졸업(공학박사)
2020년~2022년 한국로봇융합연구원 선임연구원
2022년~현재 순천향대학교 조교수
주 연구분야: 전기기기 전기-기계계 연성 해석 및 설계



정영훈(Jung, Young-Hoon)

2013년 한양대학교 기계공학부 졸업
2020년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
2020년~현재 현대자동차 책임연구원
주 연구분야: 전기기기 해석 및 설계, 차량 구동용 및 초고속 모터 설계



임명섭(Lim, Myung-Seop)

2012년 한양대학교 기계공학부 졸업
2017년 동 대학교 대학원 졸업(공학박사)
2017년~2018년 현대모비스 책임연구원
2018년~2019년 영남대학교 조교수
2019년~현재 한양대학교 조교수
주 연구분야: 전기기기 멀티피직스 해석 및 설계, 모빌리티 시스템 해석

