

## SEV용 IPMSM의 토크리플 및 철손 저감을 위한 회전자 형상 설계에 관한 연구

### A Study on Rotor Shape Design to Reduce Torque Ripple and Core Loss of IPMSM for SEV

강정인<sup>1</sup>, 정태욱<sup>2\*</sup>

Jeong-In Kang<sup>1</sup>, Tae-Uk Jung<sup>2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

As interest in eco-friendly and fuel-efficient electric vehicles has increased globally, there has also been a growing interest in the efficiency, vibration, and noise of motors for electric vehicles. Electric vehicles generally have significantly lower driving ranges per charge compared to the maximum driving range per fueling of internal combustion engine vehicles. Additionally, there are issues with various vibrations and noise generated by the motor that can cause discomfort for passengers. Therefore, research is necessary to reduce losses, vibration, and noise of the motor to improve the driving range of electric vehicles. IPMSM with a purchased design can obtain additional reluctance torque by utilizing the difference in inductance between the d and q axes. However, due to this reluctance torque, torque ripple occurs larger than other motors. The increase in torque ripple also increases noise and vibration. Since the reluctance torque, which is the main cause of torque ripple, is determined by the shape of the motor components, torque ripple can be reduced through shape optimization. In this paper, a rotor shape for reducing torque ripple and core loss that causes vibration, noise, and efficiency to decrease of IPMSM for electric vehicles was proposed. Optimization design was carried out by changing the shape of the q-axis path of the rotor to reduce the difference in inductance of the d and q-axis of the rotor. Finally, in order to verify the validity of the design variables derived

---

1 주저자, 경남대학교 메카트로닉스공학과, 석사과정  
E-mail: xpion37@naver.com

2\* 교신저자, 경남대학교 전기공학과, 교수  
E-mail: tujung@Kyungnam.ac.kr

1 Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungnam University

2\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

through the optimal design, the original model and the improved model were compared through the FEM. Compared to the original model, the improved model's torque verifying ripple was reduced by about 62% and core loss was reduced by about 29%, the superiority of the improved model.

*Keywords : Core Loss, IPMSM, Reluctance Torque, Torque Ripple*

## 1. 서론

전 세계적으로 소형전기자동차는 연간 1,000만 대가 생산되며 핵심부품인 트렉션 모터는 2조 4천억 원의 큰 시장을 형성하고 있다. 이처럼 소형전기자동차의 관심이 높아짐에 따라 소형전기자동차 전동기의 저속 운전에서의 진동 및 소음을 저감하기 위한 연구의 중요성이 대두되고 있으며, 소음의 주요 원인이 되는 토크 리플을 저감하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. IPMSM은 영구자석을 회전자 철심에 매입하여 기계적으로 강인한 회전자 구조로 d, q축 인덕턴스 차이에 의해 발생한 릴럭턴스 토크가 마그네틱 토크와 결합하여 단위 체적 당 발생하는 토크가 SPMSM 보다 크다[1]. 그러나 영구자석 사이의 릴럭턴스 차이로 인해 토크 리플이 발생한다. 또한 영구자석의 종류에 따라 브릿지 경계에 잔류 자속밀도에 의한 자속 변화가 생겨 토크 리플이 증가한다. 토크 리플은 전동기의 진동과 소음, 그리고 효율의 저하를 유발하며 제어기가 어려워지고 전동기 구동 시스템에서 전류의 왜곡뿐만 아니라 고장 발생의 원인이 되며 운전 특성상 고속에서 높은 주파수 특성으로 인하여 철손이 많이 발생하기 때문에 열화에 의한 자석 감자 위험 및 효율 저하의 원인이 된다. 전기기기에서 손실은 기기의 운전조건이나 효율을 결정하는 중요한 요소이므로 이러한 손실을 정밀하게 예측하여 설계하는 것이 매우 중요하다[2].

본 논문은 SEV용 IPMSM의 토크 리플과 철손을 저감하기 위해 회전자 d,q축의 인덕턴스 차이를 줄이고자 회전자의 q축 경로의 형상을 변화시켜 최적화 설계를 진행하였으며, 유한요소해석법을 통하여 타당성을 검증하였다.

## 2. 본론

### 2.1 토크리플

토크 리플은 토크 맥동의 크기를 의미하며 리플의 양은 최대 토크와 최소 토크의 차이를 평균 토크로 나뉜 크기로 정의할 수 있다[3]. 전동기에서 발생하는 토크 리플은 회전자 자석과 고정자 슬롯 구조에 의한 상호작용, 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화에 의해 발생하는 릴럭턴스 차이, 전기자 전류와 회전자 영구자석 사이에서 발생하는 토크에 의해 발생한다. 토크 리플은 진동을 발생시키고 그로 인한 기기의 수명 및 베어링에 영향을 주기 때문에 저감 설계를 필요로 한다[4].

### 2.2 철손

철손은 재질의 차이에 따라 달라지는 자기이력 특성으로 인해 와전류(eddy current)에 의한 손실과 히스테리시스 손실로 이루어진다. 와전류 손실

이란, 교류전압이 될 때 자기장 역시 시간에 따라 변화하는 시변자장이 발생한다. 이때, 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 의해서 시변자장에 전계가 발생한다. 자성재료 또는 금속에는 전기 전도성이 존재하므로, 저항이 있고 이 저항에 의해  $i^2R$ 의 손실이 발생하며 이 손실이 와전류 손실이다. 와전류 손실이 주는 영향에는 두 가지가 있다. 첫째 전류와 자속이 코어 표면 쪽으로 밀리는 자기 표피 효과로 인해 코어 내부의 자속이 감소하여 자속 도체로서 역할이 감소 된다. 두 번째는 코어는 저항이 있으므로 와전류 손실이 발생하여 열로 에너지가 방출된다[5]. 히스테리시스 손실은 강자성체를 자화할 때 B-H 곡선에서, 자계의 세기와 철심의 세기가 한 선으로 이루어지는 이상적인 상황이 아닌 히스테리시스 루프가 형성되는 경우 그 루프의 면적을 의미한다. 강자성체에 자화가 진행되고 있을 때 갑자기 자속을 중단시킬 때 잔류자기가 남아있게 되고, 잔류자기를 없애기 위해서 역으로 자속을 가할 경우 남아있는 보자력에 의해 강자성체의 히스테리시스 루프가 형성된다[6]. 이때 히스테리시스 루프의 면적은 손실로서, 기기의 온도 상승 및 효율이 저하된다. 와전류 손실과 히스테리시스 손실을 합쳐서 철손(Core Loss)이라고 한다. 일반적으로 단일 주파수에서 교번 하는 자기장의 경우의 철손을 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$P_c = P_h + P_e = K_h f (\hat{B})^n + K_e (\hat{B})^2 f^{2n} \quad (1)$$

위 식에서  $f$ 는 교번 자기장의 주파수이며,  $\hat{B}$ 는 최대 자속 밀도,  $K_h$ ,  $K_e$ 는 히스테리시스 계수와 와전류 계수이다[7].

### 2.3 기존 모델의 제원 및 성능해석

기존에 연구하고 있던 소형전기차 파워트레인용

모터는 IPMSM Type으로 해석 모델의 단면은 아래 Fig. 1과 같으며 모델의 제원을 Table 1에 나타내었고, 기존 모델의 철손 분석 Table 2에 기존 모델 토크 리플 분석을 Table 3에 나타내었다.

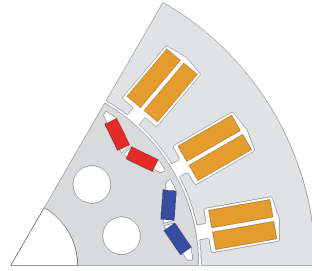


Fig. 1 Geometry of original model

Table 1. Specifications of original model

Parameter	Value	Parameter	Value
Stator Dia. (Outer, Inner)	162/101 [mm]	Rotor Dia. (Outer, Inner)	100/35[mm]
Pole / slot	10 / 12	Magnet	N48UH
Number of Turns	14	Core Material	35PN440
Rated Torque	50[Nm]	Rated Speed	1500[rpm]
Rated Current	200[A]	Rated Output	7.8[kW]

Table 2. Core Loss analysis result of original model

		Specification
Rated Speed[rpm]		1,500
Core Loss[W]	Stator	135.2
	Rotor	13.6
Total CoreLoss[W]		148.8

Table 3. Torque Ripple analysis result of original model

		Specification
Torque Ripple[Nm]		11.4
Reluctance Torque Ripple[Nm]		10.3
Cogging Torque Ripple[Nm]		1.2

### 2.4 토크리플 저감을 위한 회전자 형상 설계

영구자석의 투자율 값은 진공상태의 투자율 값과 유사하므로 영구자석은 공극으로 볼 수 있으며, 영구자석이 철심에 매입된 IPMSM은 회전자의 d축 경로가 q축 경로보다 공극이 길어지게 되고

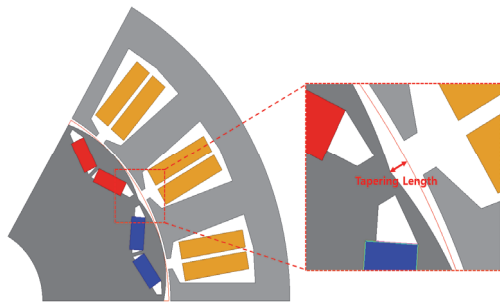


Fig. 2 Design variables

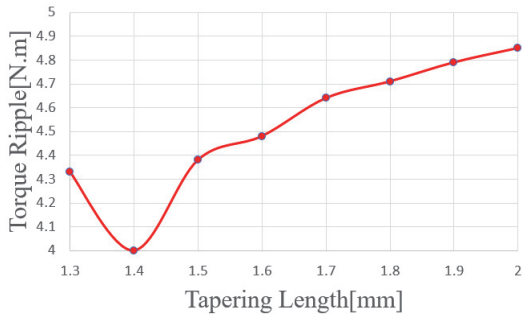


Fig. 3 Variation of torque ripple with tapering length

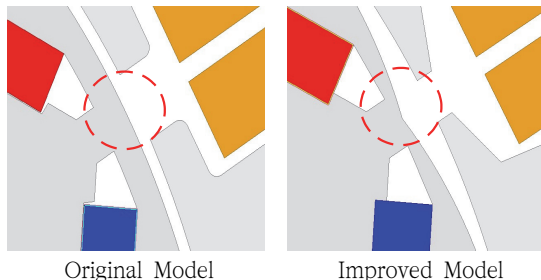


Fig. 4 Rotor shapes of original model and improved model

그로 인해 d축에 비해 q축의 인덕턴스가 커지게 되어 토크 리플을 발생시킨다[8]. 토크 리플 저감을 위한 설계 변수를 Fig. 2에 나타내었다. 본 논문에서는 회전자 립(Rip) 부분의 기계적인 강도와 포화를 고려하여 최소 0.7mm를 확보하면서 q축의 주자로를 형성하는 부분의 설계 변수인 태퍼링 길이를 조절하여 그에 따른 구동 특성을 분석하여 토크 리플 저감을 위한 최적의 길이를 도출하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 1.4mm에서 4Nm로 가장 낮은 토크 리플을 확인하였고 이후 1.3mm 이하부터는 다시 토크 리플이 증가하여 해석모델의 태퍼링 길이를 1.4mm로 선정하였다.

IPMSM은 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 차이가 있다. 이러한 인덕턴스의 차이를 이용하여 추가적인 릴럭턴스 토크를 얻을 수 있지만, 그로 인한 토크 리플의 증가로 소음과 진동 또한 증가하게 된다. Table 3과 같이 기존 모델의 릴럭턴스 토크 리플은 10.3Nm, 코깅 토크 리플은 1.2Nm로 토크 리플 중 릴럭턴스 토크 리플의 영향이 가장 큰 것을 확인하였고, 릴럭턴스 토크 리플을 저감하고자 본 논문에서는 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 차이를 줄여 릴럭턴스 토크 리플을 줄이고 히스테리시스 손실과 와전류 손실에 의한 철손은 회전자의 형상에 따라 달라질 수 있어 철손을 감소하고자 Fig. 4와 같은 회전자 형상을 제안하고 기존 모델과 개선 모델의 릴럭턴스 토크 리플과 철손의 차이를 확인하고자 유한요소해석을 통해 연구를 진행하였다.

### 2.5 기존 모델과 개선 모델의 결과 비교

Fig. 5은 기존 모델과 개선 모델의 정격토크 파형을 나타내었다. 기존 모델의 정격토크는 50Nm, 개선 모델의 정격토크는 49.5Nm로 기존 모델 대비 1% 정도 감소하였지만, 토크 리플이 11.4Nm에

서 4Nm로 약 65% 정도 감소한 것을 확인하였다.

해석 모델에 대해서 유한요소해석법을 이용하여 전류 위상각 변화에 따른 단위전류당 최대토크 운전이 가능한 위상을 확인하였으며, 전류위상각이 19° 일 때 단위전류당 최대토크 운전 위상각인 것을 확인하였다.

정확한 결과 비교를 위해 Table 4에 동일 정격 토크인 50Nm 에서의 릴럭턴스 토크 리플, 토크 리플, 철손, 동손의 비교를 나타내었다. 릴럭턴스 토크 리플은 10.3Nm에서 8.4Nm로 기존 모델 대비 약 19% 정도 저감 되었으며 토크 리플은 기존 11.4Nm에서 4.3Nm로 약 62% 정도 저감 되었고, 철손은 기존 대비 약 29%, 동손은 약 11% 정도 저감 된 것을 확인하였다.

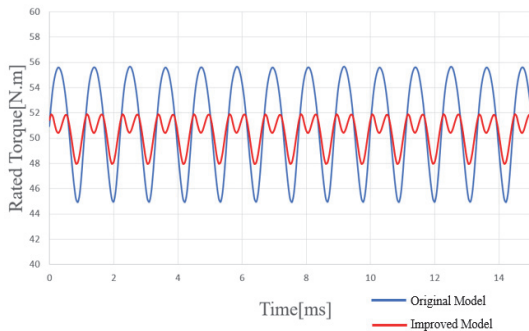


Fig. 5 Rated torque waveform comparison

Table 4. Comparison of result values at the same rated torque

	Original Model	Improved Model	Change Rate
Rated Torque	50[Nm]	50[Nm]	-
Reluctance Torque ripple	10.3[Nm]	8.4[Nm]	-19[%]
Torque Ripple	11.4[Nm]	4.3[Nm]	-62[%]
Core Loss	158[W]	112[W]	-29[%]
Copper Loss	872[W]	776[W]	-11[%]

### 3. 결론

본 논문에서는 소형전기자동차용 IPMSM의 회전자 형상 변화에 따른 토크 리플, 철손 분석을 진행하였다. 이 연구에 대한 타당성을 검증하기 위해 기존 모델과 개선 모델의 유한요소 해석을 통해 토크 리플 값과 철손 값을 도출해냈다. Fig. 5에 나타난 해석 결과에서 기존 모델 대비 개선 모델의 정격 토크가 약 1% 정도 감소하였지만, 토크 리플이 약 65% 정도 저감 되었고, 동일 정격 토크에서 비교 시 릴럭턴스 토크는 약 19% 정도 저감 되었고 토크 리플은 약 62%, 철손은 약 29%, 동손은 약 11% 정도 저감 된 것을 확인하였으며, 소형전기자동차용 IPMSM에 적용 시 소음, 진동 특성 개선 및 효율이 개선될 것으로 사료 된다.

### 사 사

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-003)

### 참고문헌

- [1] 김동영, 강민철, 김규탁, “효율 개선을 위한 매입형 영구자석 동기전동기의 철손 저감 설계”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p.16-19, (2014).
- [2] 이승창, 정사용, “차량 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 노치를 이용한 토크리플 및 철손 저감”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p.216-218, (2018).

- [3] 이승호, 2013 「매입형 영구자석 동기전동기의 토크 고조파 특성분석 및 토크리플 저감 설계」 성균관대학교 일반대학원 석사학위논문.
- [4] 이종훈, 2020 「150kW급 전기차용 겸인모터의 토크리플 저감 설계에 관한 연구」 계명대학교 대학원 석사학위논문.
- [5] G. R. Slemon and X. Liu, "Core Losses in Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Magn., vol. 26, No. 5, pp.1653-1655, (1990).
- [6] M. B. Sung, G. W. Cho and G. T. Kim. "The Design of Iron Loss Minimization of 600W IPMSM by Quasi-newton Method", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.66, No.7, pp. 1053~1058, (2017).
- [7] 우석현, 조규원, 장기봉, 김규탁, "수정된 Steinmetz 방정식을 이용한 IPMSM의 철손산정", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p.67-70, (2011).
- [8] 고병수, 2017 「고출력 Consequent-Pole Type IPMSM의 토크리플 저감을 위한 회전자 형상 연구 및 특성 고찰」 성균관대학교 일반대학원 석사학위논문.

---

(접수: 2023.03.07. 수정: 2023.04.03. 게재확장: 2023.04.05.)