

회전자의 정적 편심을 고려한 극 수 슬롯 수에 따른 EPS용 PMSM 특성 비교

이정민* · 박진철 · 윤명환 · 홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

Analysis of PMSM Characteristic for EPS according to Pole and Slot Combination considering the Effect of Static Eccentricity of Rotor

Jeong-Min Lee* · Jin-Cheol Park · Myung-Hwan Yoon · Jung-Pyo Hong

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

Abstract : The steering system for drivers has been developed. In the existing steering system, Hydraulic Power Steering (HPS) system that is always operated by engine is substituted to the electric power steering (EPS) Systems. The EPS system is more effective system for fuel economy, CO₂ emission reduction and removal of lubricating oil, than HPS. Also, it is more environmentally friendly and economical. The car steering system is directly connected to the driver's safety so, it should be designed carefully about cogging torque and torque ripple. However, PMSM for EPS is subject to static eccentricity due to process errors and mechanical defects, which affects the stability of the steering system. This paper compares and analyzes the effect of static eccentricity according to the number of poles and slots in PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) for EPS. The target models are 8 poles 9 slots and 8 poles 12slots. In the same outer diameter of stator and rotor, the models will be compared and analyzed back electro-motive force and cogging torque, torque ripple with a result of harmonic analysis.

Key words : Back Electro-motive Force(역기전력), Cogging Torque(코깅 토크), Electrical Power Steering(EPS), Permanent Magnet synchronous Motor(PMSM), Static Eccentricity(정적 편심)

Nomenclature

e : displacement of eccentricity, mm

1. 서론

전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 발전으로 운전자의 편의를 위한 다양한 어플리케이션이 개발되고 있다. 다양한 어플리케이션 중 Steering 시스템은 자동차의 핸들조작에 편의를 더하기 위한 시스템이다. 과거 기존 엔진에 의해서 상시 운전되는 유압에너지를 이용하는 Hydraulic Power Steering(HPS) 시스템을 사용하였다. 반면, 최근에는 전동기를 이용한 Electrical Power Steering(EPS)시스템을 사용하고 있다. EPS 시스템은 조향의 안정성을 증가시키고, 메커

* 이정민, E-mail: jmlee0228@hanyang.ac.kr.

니즘 구성상 엔진의 부하를 줄여 연비가 향상되는 등 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 EPS 시스템은 운전자가 조향을 할 때 직접적으로 느낄 수 있으며, 전동기가 기어박스 시스템과 벨트 시스템 등 다른 어플리케이션과 직접적으로 연결되므로 전동기 설계 시, 코깅토크 및 토크리플에 유의하여 설계하여야 한다. 하지만 기계적 결합 및 공정 오차 등에 의하여 정적 편심이 발생하게 되고 전동기의 특성에 영향을 주게 된다.

본 논문은 먼저, 목표 출력을 만족하는 범위 내에서 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 모델을 공간고조파를 이용하여 회전자 설계를 하고, 자기저항이 최소가 되는 고정자의 치 슬롯 폭을 산정하였다. 8극 9슬롯의 경우 전기적 특성은 뛰어나지만 기계적 공차에 매우 취약하다는 특성을 가진다. 그 다음으로 8극 9슬롯과 8극 12슬롯에 정적 편심에 따른 영향을 보기 위하여 유한요소해석을 통해 해석하였다. 동일 편심량을 주어 역기전력과 코깅토크를 분석하고 코깅토크 고조파 차수를 비교한다. 마지막으로 두 모델의 토크리플에 대해 비교한다.

2. 전동기 초기 설계

8극 9슬롯과 8극 12슬롯 두 모델이 동일한 목표 출력을 만족할 수 있도록 전동기를 설계한다. 고정자와 회전자 외경, 공극길이, 점적률, 전류밀도는 동일하다. 두 모델의 설계를 위해 공간고조파를 이용하여 회전자 영구 자석의 pole angle을 선정하고, 자기저항이 최소가 되는 고정자 치와 요크 폭을 설계한다.

Table 1 8극 9슬롯과 8극 12슬롯의 사양

	8극 9슬롯	8극 12슬롯
모터 종류	SPMSM	
자석 종류	희토류 자석	
정격 속도	1000 [rpm]	
정격 토크	5.5 [Nm]	
정격 출력	600 [W]	

2.1 회전자 설계

정확한 전동기 특성 예측을 위해 유한요소해석을 사용하지만, 유한요소해석은 파라미터 변화에 따라 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다. 그러므로 단시간 내에 많은 결과를 검토해야 하는 초기 설계 단계로는 부적합하다. 이에 공간고조파는 모터 형상을 단순화 하여 전자계 지배방정식을 직접 푸는 해석적 방법으로, 유한요소해석에 비해 정확도는 떨어지나 여러 변수에 대해 빠른 시간 내 확인이 가능하다. 공간고조파 해석의 가정은 철심 코어는 등방성 재질, 투자율은 무한대이고 와전류는 무시하며 단부 효과도 무시한다.

Fig. 1은 공간고조파를 이용하여 회전자의 pole angle에 따른 역기전력, 역기전력 THD, 코깅토크의 크기를 나타낸 그래프이다. 두 모델의 역기전력 THD와 코깅토크가 작은 지점을 고려하여 회전자를 설계하였다.

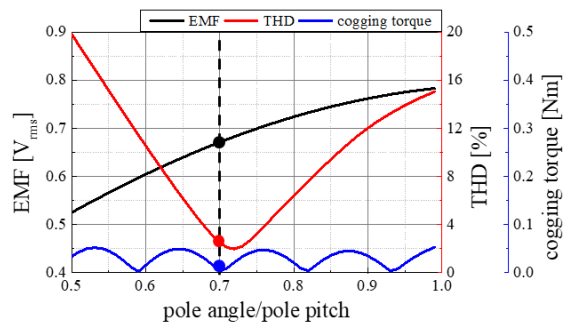


Fig. 1.1 8극 9슬롯의 pole angle/pole pitch에 따른 역기전력, THD, cogging torque

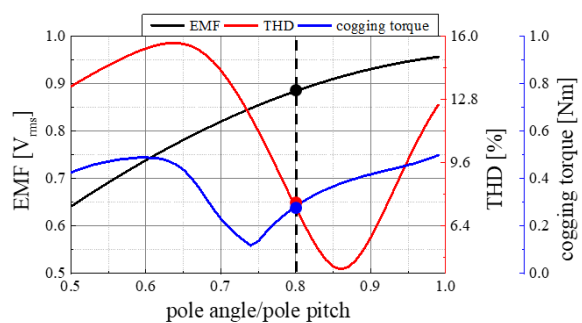


Fig. 1.2 8극 12슬롯의 pole angle/pole pitch에 따른 역기전력, THD, cogging torque

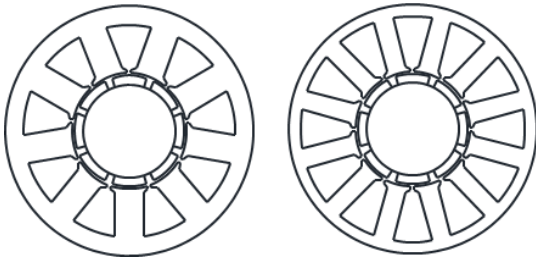


Fig. 2 8극 9슬롯 (좌), 8극 12슬롯(우) 형상

2.2 고정자 설계

고정자의 슬롯 면적에 따라 고정자 치와 요크 폭이 결정된다. 슬롯 면적은 전류 밀도와 점적률, 상당 직렬 턴 수를 고려하여 산정한다. 전류 밀도는 인버터 사양 및 전동기의 한계전류 등에 의해 결정되며, 점적률은 권선 방법이나 권선의 단면적에 의해 결정된다. 이를 고려하여 자기저항이 최소가 되는 치와 요크 폭을 선정한다. Fig. 2는 초기 설계된 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 모델의 형상이다.

3. 정적 편심을 고려한 전기적 특성

3.1 정적 편심

Fig. 3은 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 전동기 모델에 정적 편심이 적용된 경우와 권선 배치를 표현한 그림이다. 정적 편심은 기계적 결함 및 공정 오차 등에 의하여 발생하게 되는데, Fig. 3에서의 e 는 편심에 대한 변위량을 의미한다. 편심에 대한 변위량은 고정자 중심축을 원점으로 할 때, x축 방향으로 회전자의 중심축이 이동한 것을 의미한다. 회전자의 중심축이 e 만큼 이동하게 되면 공극 길이가 불균형한 상태를 유지하며 회전하게 된다. 정적 편심에 대한 영향은 유한요소해석을 수행하였다.

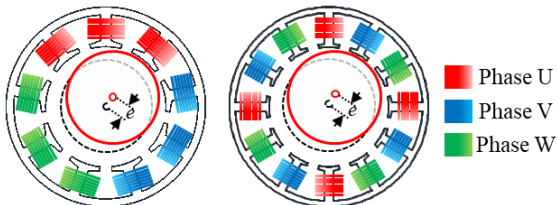


Fig. 3 8극 9슬롯(좌), 8극 12슬롯(우) 정적 편심

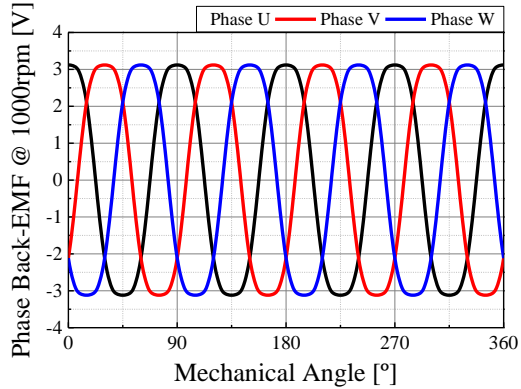


Fig. 4.1 8극 9슬롯 기본모델의 3상 역기전력

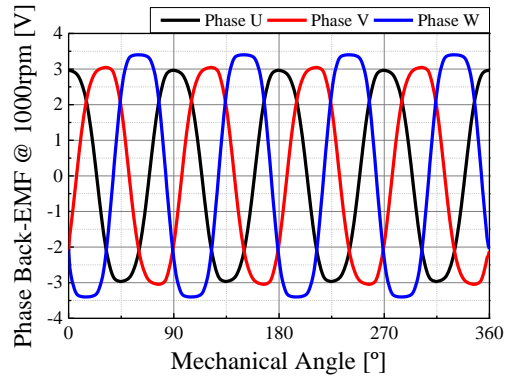


Fig. 4.2 8극 9슬롯 편심이 적용된 모델의 3상 역기전력

3.2 역기전력

3.2.1 8극 9슬롯

Fig. 4는 유한요소 해석을 통하여 8극 9슬롯 기본 모델과 정적 편심이 적용된 모델의 3상 역기전력을 분석한 그래프이다. 기본 모델의 경우, 정적 편심이 적용되지 않았으므로 일정한 공극 길이를 가지며, 역기전력의 3상 평형을 이룬다. 반면, 정적 편심이 적용될 경우, 공극길이가 일정하지 않으므로 3상 역기전력의 불평형이 발생하게 된다.

Fig. 3의 8극 9슬롯의 권선 배치를 보면 한 상의 권선이 이웃한 3개의 치에 모여있다. 이로 인하여 정적 편심으로 공극의 불균형이 발생하면 Fig. 4.2의 그래프와 같이 역기전력의 불평형이 크게 나타난다.

Table 2는 편심에 의해 발생한 역기전력 불평형의 오차를 수치화로 나타낸 것이다.

Table 2 8극 9슬롯 모델의 각 상의 역기전력 비교

	U	V	W
기본 모델[V _{rms}]	2.459	2.437	2.442
편심 적용 모델[V _{rms}]	2.293	2.351	2.733
오차 [%]	-6.72	-3.52	11.93

3.2.1 8극 12슬롯

Fig. 5는 유한요소 해석을 통하여 8극 12슬롯의 기본 모델과 정적 편심이 적용된 모델의 3상 역기전력을 분석한 그래프이다.

8극 12슬롯의 권선 배치는 Fig. 3과 같이 한 상의 권선이 동일한 간격으로 분포되어있다. 그러므로, 8극 12슬롯은 정적 편심에 의한 공극 불균형이 발생하더라도 역기전력의 불평형은 일어나지 않는다.

Table 3은 8극 12슬롯 모델의 편심에 의해 발생한 역기전력 불평형의 오차를 수치화로 나타낸 것이다.

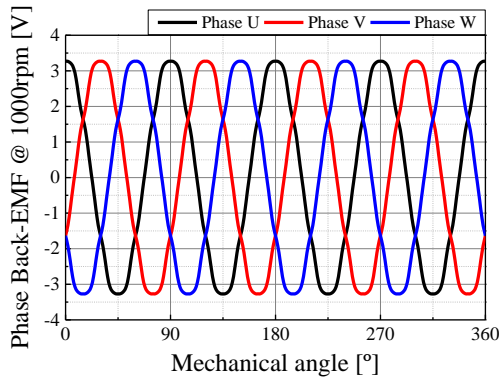


Fig. 5.1 8극 12슬롯 기본 모델의 3상 역기전력

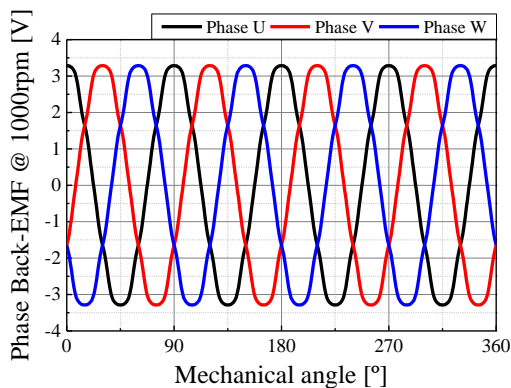


Fig. 5.2 8극 12슬롯 편심이 적용된 모델의 3상 역기전력

Table 3 8극 12슬롯 모델의 각 상의 역기전력 비교

	U	V	W
기본 모델[V _{rms}]	2.367	2.347	2.347
편심 적용 모델[V _{rms}]	2.376	2.356	2.355
오차 [%]	0.38	0.38	0.38

3.3 코깅 토크

Fig. 6은 8극 9슬롯과 8극 12슬롯의 코깅 토크를 나타낸 그래프이다. 8극 9슬롯의 경우 기본모델에 비해 정적 편심이 적용된 모델은 코깅토크가 현저히 커진다. 이에 코깅토크의 고조파 분석을 통하여 고조파를 확인하였고, 정적 편심이 특정 고조파에 미치는 영향을 확인하였다.

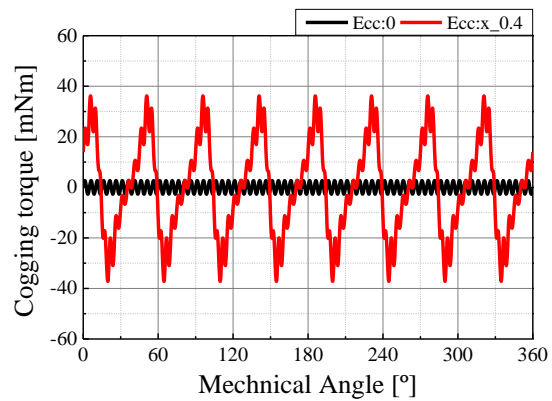


Fig. 6.1 8극 9슬롯 코깅토크

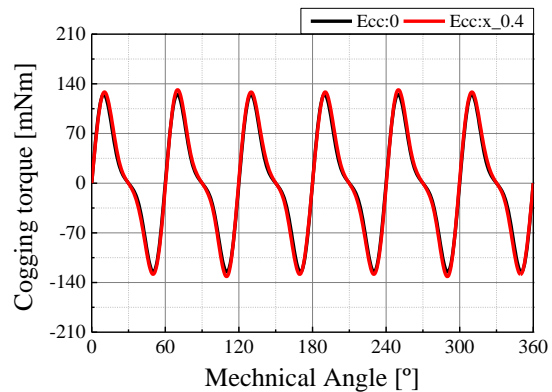


Fig. 6.2 8극 12슬롯 코깅토크

Table 4 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 모델의 코깅토크

	8극9슬롯	8극12슬롯
기본 모델[mNm]	5.44	250
편심 적용 모델[mNm]	73.36	263.28

Table 4는 8극 9슬롯과 8극 12슬롯의 기본모델, 그리고 편심이 적용된 모델의 코깅토크 값을 비교한 것이다. Table. 4에서 확인 할 수 있듯이 8극 9슬롯은 편심이 적용될 경우, 3상 역기전력 불평형이 발생하고 이로 인하여 코깅토크 값이 현저히 증가함을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 기계적 한 주기(360°)에 대하여 두 모델의 코깅토크 파형을 고조파 분석한 것이다. 8극 9슬롯의 경우, 코깅토크 주기인 최소공배수 72차 성분이 발생한다. 8극 12슬롯의 경우, 코깅 토크의 24차 성분의 고조파가 발생한다.

또한, 정적 편심이 발생하게 되면 두 모델 모두 8배수 고조파 성분이 발생하면서 극 수차 배수가 나타나는 것을 알 수 있다.

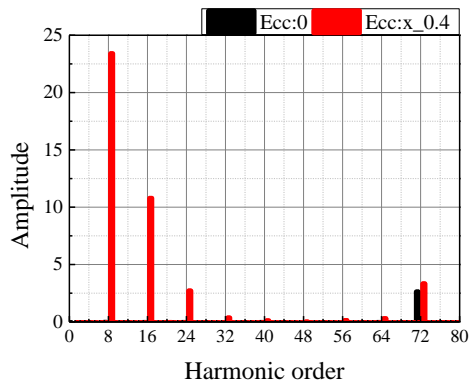


Fig. 7.1 8극 9슬롯의 고조파 분석

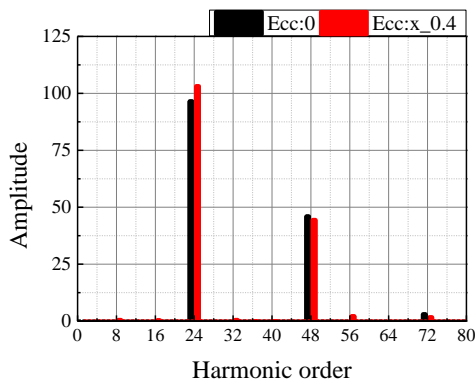


Fig. 7.2 8극 12슬롯의 고조파 분석

3.4 토크 리플

앞서 8극 9슬롯 모델은 정적 편심이 발생할 시, 3상 역기전력 불평형이 발생하고 코깅토크가 증가하였다. 이에 부하가 입력될 시 토크 리플 증가를 확인하기 위하여 유한요소해석을 적용하였다. 두 모델 모두 동일한 부하조건을 입력할 시, Fig. 8와 같은 토크 리플 그래프 확인할 수 있다. 8극 9슬롯의 경우, 기존 모델에서 정적 편심이 적용 되었을 때 토크리플의 크기는 현저히 증가한 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 부하 시에 8극 12슬롯의 경우 정적 편심이 일어나더라도 큰 영향을 받지 않는다.

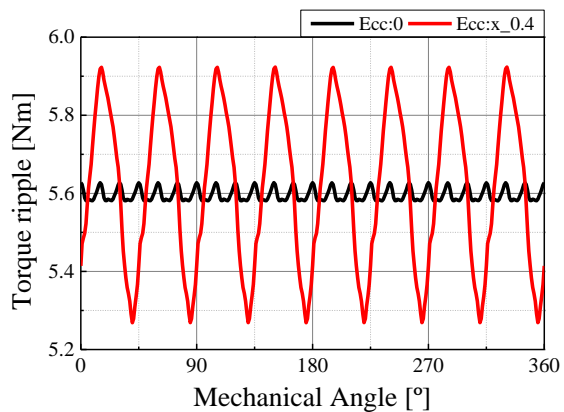


Fig. 8.1 8극 9슬롯의 토크 리플

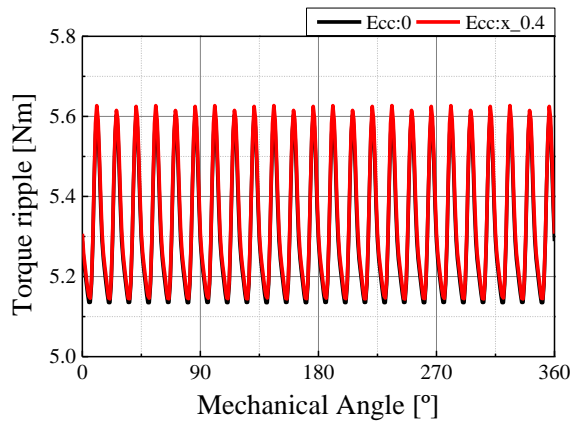


Fig. 8.2 8극 12슬롯의 토크 리플

Table 5 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 모델의 토크 리플

	8극9슬롯	8극12슬롯
기본 모델[%]	0.83	8.81
편심 적용 모델[%]	11.66	9.05

Table 5는 8극 9슬롯과 8극 12슬롯에서 기본 모델과 편심이 적용된 모델의 토크 리플을 수치화한 것이다. 8극 9슬롯의 경우 기본 모델보다 편심 적용 모델이 약 14배 커졌다. 반면에 8극 12슬롯은 약 1.03배 정도 증가한 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은 EPS 시스템에서 정적 편심을 고려한 극 수 슬롯 수 조합으로 8극 9슬롯과 8극 12슬롯 모델을 상대 비교하였다. 정적 편심이 적용되지 않았을 때, 8극 9슬롯 모델은 8극 12슬롯에 비하여 역기전력이 크고 코깅토크가 작아 전기적으로 우수한 특성을 가진다. 하지만 정적 편심이 적용될 경우, 8극 9슬롯은 권선배치 때문에 역기전력의 불평형이 발생하고 코깅토크가 증가한다.

반면에, 8극 12슬롯의 경우 8극 9슬롯에 비해 낮은 전기적 특성을 가지나 정적 편심이 적용되었을 경우, 정적 편심에 대한 강인함을 보였다.

EPS 시스템에 사용되는 전동기는 운전자의 안전과 직접적으로 연결되어 있다. 따라서 8극 9슬롯의 경우 전기적 특성은 우수하나 기계적 공차에 취약하므로 적합하지 않은 극 수 슬롯 수 조합임을 확인하였다.

- 1) 정적 편심이 적용될 경우 8극 9슬롯 모델은 역기전력의 3상 불평형이 발생한다.
- 2) 정적 편심이 적용될 경우 8극 9슬롯은 8극 12슬롯보다 코깅토크가 증가하며, 극 수차 성분이 발생한다.
- 3) 부하가 입력되는 경우, 8극 9슬롯은 8극 12슬롯 보다 더 큰 토크 리플을 가지며, EPS 시스템과 같이 진동, 소음이 증시되는 어플리케이션의 경우 8극 9슬롯을 피해야 한다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2012-0-00628)

References

- 1) Jin-Cheol Park, "Analysis of Back EMF and Cogging Torque in PMSM Considering the Effect of Static Eccentricity", KIEE, 721-722., 2016.
- 2) Ji-Min Kim, "Analysis of acoustic noise and vibration in 8pole 9slot and 8pole 12slot IPM motor", KIEE, 918-919., 2010.
- 3) Kyoung-Soo Cha, "Multipolar High-Speed IPMSM Design for EV Traction Considering Mechanical Stress", VTC, 1-6., 2016.
- 4) Dong-Min Kim, "Response Characteristics of EPS Motor According to Rotor Shape", KSAE, 1307-1312., 2014.