



## EPS용 SPMSM의 토크 리플 분석 및 저감 설계

Torque Ripple Analysis and Reduction Design of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor for EPS

---

저자 (Authors)	김재현, 김두영, 박권일, 윤명환, 홍정표 Jae-Hyun Kim, Doo-Young Kim, Kwon-Il Park, Myung-Hwan Yoon, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	<a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2017.5, 1107-1111 (5 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">한국자동차공학회</a> The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205065">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07205065</a>
APA Style	김재현, 김두영, 박권일, 윤명환, 홍정표 (2017). EPS용 SPMSM의 토크 리플 분석 및 저감 설계. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1107-1111.
이용정보 (Accessed)	한양대학교(서울) 166.***.168.148 2017/11/30 23:30 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

## EPS용 SPMSM의 토크 리플 분석 및 저감 설계

김재현\* · 김두영 · 박권일 · 윤명환 · 홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

### Torque Ripple Analysis and Reduction Design of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor for EPS

Jae-Hyun Kim\* · Doo-Young Kim · Kwon-Il Park · Myung-Hwan Yoon · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang Univiesity, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : Recently, hybrid vehicles and electric vehicles are attracting attention as eco-friendly vehicles, and many devices of automobiles are being replaced by electronic control devices. Hydraulic power steering(HPS) has been mainly used as a steering device for automobiles until now, but recently electric power steering(EPS) has been spreading. Since the vibration of the steering device is transmitted directly to the driver, the vibration problem must be carefully considered in the motor design for EPS. Therefore, torque ripple in the EPS should be reduced to improve the vibration characteristics. In this paper, in order to reduce the torque ripple of surface mounted permanent magnet synchronous motor(SPMSM) for EPS, the harmonic component of induced voltage is analyzed. To reduce the harmonic component of induced voltage, eccentric rotor shape is applied. Space harmonic analysis is used to determine eccentric length, and torque ripple is reduced from 8.6% to 4.2%.

**Key words** : Electric Power Steering(전동식 동력 조향장치), Induced Voltage(유기전압), Space Harmonic Analysis(공간 고조파 해석), Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor(표면부착형 영구자석 동기전동기), Torque Ripple(토크 리플)

#### Nomenclature

$e$  : induced voltage, V  
 $i$  : current, A  
 $L$  : inductance, H  
 $M$  : magnetization, A/m  
 $t$  : time, s  
 $T$  : torque, Nm  
 $\beta$  : phase difference, rad  
 $\lambda$  : linkage flux, Wb  
 $\theta$  : mechanical angle, rad

$\omega$  : angular frequency, rad/s  
 $\mu$  : permeability, H/m  
 $\Phi$  : magnetic scalar potential, A

#### Subscripts

avg : average  
 $m$  : permanent magnet  
 $I$  : airgap region  
 $II$  : permanent magnet region

\* 김재현, E-mail: zerg1258@hanyang.ac.kr

## 1. 서 론

최근 하이브리드 자동차와 전기자동차가 친환경 자동차로 주목받으면서 자동차의 많은 장치들이 전자제어장치로 대체되는 추세이다. 자동차의 조향장치도 이전까지는 유압식 동력 조향장치(Hydraulic Power Steering: HPS)가 주로 사용되어 왔지만 최근에는 전동식 동력 조향장치(Electric Power Steering: EPS)가 확산되고 있다. HPS는 유압으로 작동하기 때문에 정비가 어렵고 복잡한 구조로 인해 연비가 좋지 않은 반면, EPS는 구조가 간단하기 때문에 유지 보수가 쉽고 연비가 좋다는 장점을 가진다.

조향장치의 진동은 운전자에게 직접적으로 전달되기 때문에 EPS용 전동기 설계에 있어 진동 문제는 세심하게 고려되어야만 한다. 토크 리플은 전동기의 진동을 유발하므로 EPS용 전동기의 토크 리플이 클 경우 자동차의 조향 성능이 떨어지고 운전자가 피로감을 느낄 수 있다. 따라서 EPS에서 토크 리플은 저감되어야 한다.<sup>1)</sup>

본 논문에서는 EPS용 표면부착형 영구자석 동기전동기(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor: SPMSM)의 토크 리플을 저감하기 위하여 토크 리플의 원인이 되는 유기전압의 고조파를 분석하였다. 전동기의 토크는 유기전압과 전류의 곱으로 표현되며 전류가 정현파일 때 유기전압의 고조파성분이 토크 리플의 주요 성분이 된다. 따라서, 토크 리플에 주된 영향을 미치는 유기전압 고조파분석을 통해 토크 리플 개선 방향을 결정하고 저감 설계를 진행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 대상 전동기 모델

Fig. 1은 대상 전동기 모델의 초기 형상을 나타낸 그림이다. 대상 전동기는 BLAC 구조 6극 9슬롯 집중권 SPMSM 모델이다.

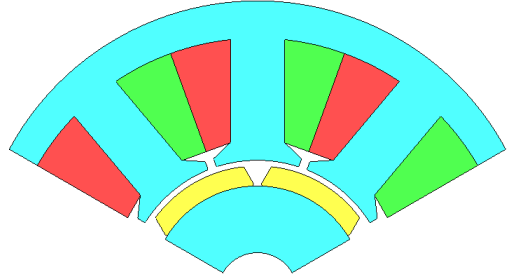


Fig. 1 Initial model shape for EPS

### 2.2 토크 리플

손실을 무시할 경우 대상 전동기의 토크는 식 (1)과 같이 유기전압과 전류의 곱으로 나타난다. 토크 리플은 일반적으로 전원 주파수의 6배가 되는 고조파가 주 요인이 되므로 식 (2)와 같이 평균 토크와 토크 리플 성분들의 합으로 나타낼 수 있다.<sup>2)</sup>

$$T = \frac{3ei}{\omega} \cos \beta \quad (1)$$

$$T = T_{\text{avg}} + \sum_{k=1}^n T_{6k} \quad (2)$$

Fig. 2는 대상 전동기 모델의 토크 파형이며 Fig. 3은 토크에 대해 고조파분석을 하여 나타낸 그래프이다. 평균 토크는 2.9Nm이고 토크 리플은 8.6%이다. 다른 고조파성분들에 비하여 전원 주파수의 6배가 되는 고조파의 크기가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 토크의 6차 고조파성분 크기를 줄임으로써 토크 리플을 줄일 수 있다.

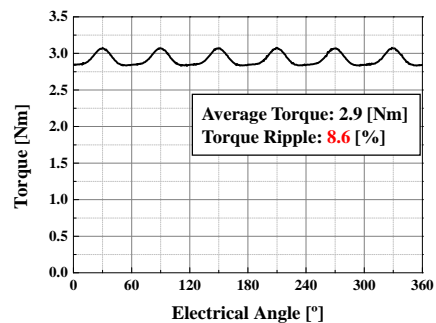


Fig. 2 Torque of initial model

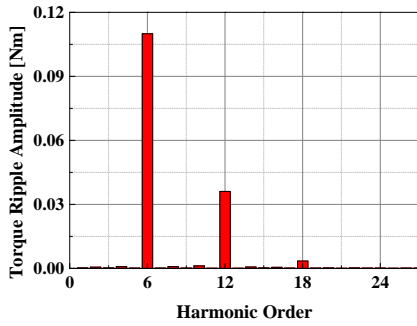


Fig. 3 Harmonic analysis of torque

### 2.3 유기 전압

유기전압은 자속의 시간에 대한 변화량과 같고 다음의 식 (3)과 같이 나타난다.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

Fig. 4는 유기전압 파형을 나타낸 그래프이고 Fig. 5는 유기전압을 고조파분석하여 나타낸 그래프이다. 전류는 기본파만 인가되기 때문에 유기전압의 5차, 7차 고조파성분이 토크 리플의 6차 고조파성분을 만들어낸다. 따라서 유기전압의 5차, 7차 성분을 감소시킴으로써 토크 리플을 저감시킬 수 있다. 따라서 유기전압의 고조파성분을 줄이기 위하여 회전자에 편심을 적용하였다.

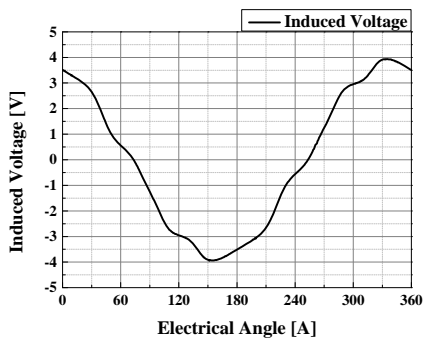


Fig. 4 Induced voltage of initial model

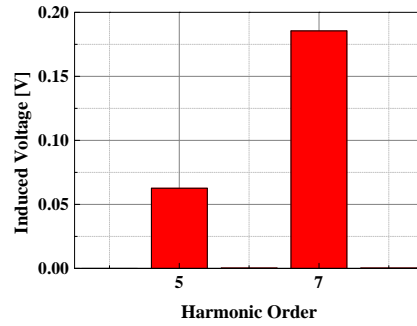


Fig. 5 Harmonic analysis of induced Voltage

### 2.4 공간고조파 해석

편심 양을 결정하기 위하여 공간고조파 해석을 이용하였다.<sup>3)</sup> 공간고조파 해석은 고정자의 치슬롯 구조를 평활 철심으로, 철심의 투자율을 무한대로 가정하여 지배방정식인 식 (6), (7)을 푸는 해석적인 방법이다. 식 (6)과 (7)은 각각 공극과 영구자석 영역에서의 지배방정식이다.

$$\nabla^2 \Phi_I = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 \Phi_{II} = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (7)$$

Fig. 6는 공간고조파 해석을 이용해 편심을 0~10mm로 변화시켰을 때의 역기전력, 역기전력의 전고조파 왜율(Total Harmonic Distortion: THD)과 코깅 토크를 나타낸 그래프이다. THD는 기본파 대비 고조파의 크기이므로 THD의 크기가 작을수록 유기전압의

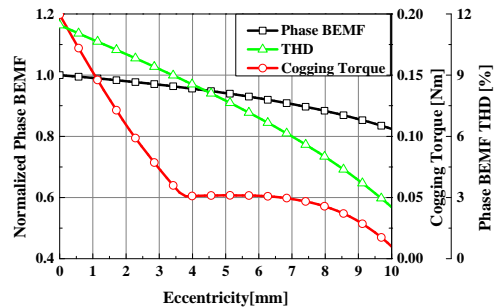


Fig. 6 Result of space harmonic analysis

고조파성분이 줄어들어 토크 리플을 줄일 수 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 편심의 크기가 증가할수록 THD가 감소하지만 역기전력의 크기도 같이 감소하므로 출력이 줄어든다. 따라서 역기전력이 기존 모델의 95% 이상이 되면서 토크 리플의 원인 중 하나인 코깅 토크가 최소가 되는 편심 4mm를 적용하여 설계하였다.

## 2.5 개선모델 결과

초기모델과 편심을 적용하여 설계한 개선모델의 유기전압을 고조파분석 한 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 초기모델에 비하여 개선모델의 유기전압 5차, 7차 성분이 각각 34%, 47% 저감됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 초기모델과 개선모델의 토크 그래프이다. 평균 토크는 2.9Nm로 동일하며 토크 리플은 초기 8.6%에서 4.2%로 감소함을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 초기모델과 개선모델의 토크를 고조파분석하여 나타낸 그래프이다. 초기모델에 비해서 개선모델의 6차 고조파성분이 58%, 12차 고조파성분이 61% 저감됨을 확인할 수 있었다.

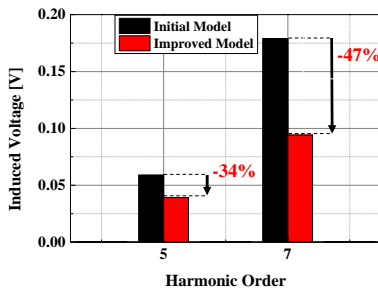


Fig. 7 Harmonic analysis of induced voltage

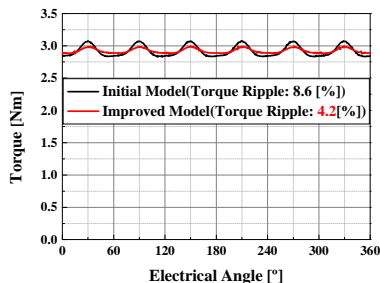


Fig. 8 Torque comparison of initial and improved model

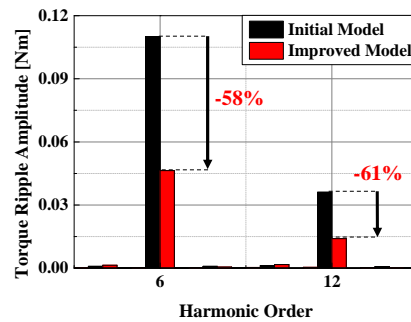


Fig. 9 Harmonic analysis of torque

## 3. 결론

본 논문에서는 EPS용 SPMSM의 진동 특성 개선을 위하여 토크 리플 저감 설계를 진행하였다. 토크 리플은 유기전압의 고조파성분과 전류의 곱으로 나타나므로 유기전압의 고조파성분을 분석하였다. 유기전압의 5차, 7차 고조파 성분이 토크 리플을 만드는 주요 성분이 되므로 이를 저감시키기 위하여 회전자에 편심을 적용하였다. 편심의 크기는 공간고조파 해석을 이용하여 역기전력이 초기모델의 95% 이상이 되면서 토크 리플의 원인 중 하나인 코깅 토크가 최소가 되는 지점을 선택하여 설계하였다. 개선모델의 유기전압 5차, 7차 성분은 초기모델에 비하여 각각 34%, 47% 저감되었다. 토크 리플의 6차, 12차 성분은 초기모델에 비하여 각각 58%, 61% 저감되었다. 전체 토크 리플의 크기는 기존 8.6%에서 4.2%로 51%의 감소율을 가짐을 확인하였다.

## Acknowledgement

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2012-0-00628)

## References

- 1) Hyung-Soo Son, Doo-Young Kim and Jung-Pyo Hong, "Optimum Design for Torque Ripple Reduction of EPS Motor", KSAE Conf., 1214-1217, 2015.
- 2) Chang-Wook Shin, Doo-Yosung Kim and Jung-Pyo Hong, "Torque Ripple Reduction of IPMSM for

EPS using the Harmonic Current Injection Method", KSAE Conf., 1218~1222, 2015.

- 3) Yong-Ho Kim, Sun Tao, Soon-O Kwon, Fang Liang, Hae-Joong Kim and Jung-Pyo Hong, "Design Parameters Analysis Using Space Harmonic Analysis Methods", KIEE Conf., 834~835, 2010.