

EPS용 표면부착형 영구자석 동기전동기의 토크 리플 저감

(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Design for Torque Ripple Reduction in EPS)

임승빈* · 박현중 · 강동우 · 함상환 · 이 주**

(Seung-Bin Lim · Hyun-Jong Park · Dong-Woo Kang · Sang-Hwan Ham · Ju Lee)

요 약

EPS(Electrical Power Steering)에서 전동기의 토크 리플은 조향장치의 진동 문제를 야기한다. 따라서 EPS에서 전동기의 토크 리플 저감은 중요한 문제이며, 본 논문에서는 EPS에서 사용하는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 토크 리플 저감에 대해 논하였다. 유한요소법을 이용하여 영구자석과 고정자 슈의 형상 변화를 통해 역기전력을 분석하였으며 이를 바탕으로 토크 리플 저감 방안을 제시하였다.

Abstract

Torque ripple of the motor used in EPS raises vibration problem on steering system. To solve this problem, this paper proposes a optimum design for torque ripple reduction of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor(SPMMSM) in EPS. Through analysis back-EMF using Finite element method as changing the shape of permanent magnet and stator shoe, we presented the method of torque ripple reduction.

Key Words : EPS, SPM, Permanent Magnet, Torque Ripple

1. 서 론

1.1 연구의 배경

최근 하이브리드 자동차 및 전기 자동차 산업이 각광 받으면서 자동차에서 전동기가 엔진을 대신하고 있는 추세이다. 자동차에서 전동기는 엔진뿐만 아니라 조향장치에서도 주목받고 있다. 지금까지 조향장치는 유압을 이용한 유압식 조향장치가 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 경차 및 소형차를 중심으로 전동

* 주저자 : 한국에너지기술평가원
** 교신저자 : 한양대학교 전기생체공학부 교수
Tel : 02-3369-8427, Fax : 02-554-0660
E-mail : sblim@ketep.re.kr
접수일자 : 2010년 2월 24일
1차심사 : 2010년 3월 4일
심사완료 : 2010년 6월 28일

기를 이용한 EPS(Electrical Power Steering)의 적용이 확산되어 가는 추세이다. EPS는 유압을 사용하지 않기 때문에 연비 향상, 시스템의 단순화, 차량제작 비용의 절감 등 여러 가지 장점을 가진다[1].

EPS용 전동기 설계에 있어 중요한 사항으로 진동문제를 고려하지 않을 수 없다. 조향장치의 진동문제는 운전자에게 큰 피로감을 안기고 자칫 큰 사고로 이어질 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 조향장치의 신뢰성 및 안정도 증대를 위해 EPS에 사용할 표면부착형 영구자석 동기전동기의 토크 리플 저감 방법을 제시하였다.

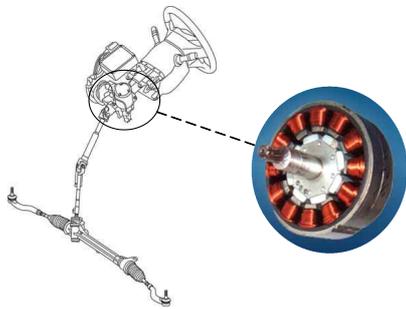


그림 1. EPS System
Fig. 1. EPS System

2. 본 론

2.1 기본모델설계

최적설계에 사용하게 될 EPS용 표면부착형 영구자석 전동기(SPMSM)의 설계 사양은 다음과 같다.

표 1. EPS용 전동기 설계 사양
Table 1. Specifications of the motor for EPS system

EPS용 SPMSM 설계사양	
상수	3
극수	8
정격전류	102[A]
정격속도	1,700[rpm]
정격토크	3.44[Nm]
영구자석종류	NdFeB
목표 토크 리플	정격토크의 10[%] 이하

2.2 최적설계 프로세스

SPMSM의 토크 방정식 및 역기전력의 식은 다음과 같다[2].

$$T = \psi \cdot i \cdot p \cdot \sin\beta$$

$$e = d\psi/dt$$

(ψ : 쇠교자속, i : 고정자 인가전류, p : 극쌍수, β : 전류 위상각)

위의 식에서 역기전력은 쇠교자속의 변화율과 같으므로, 정현적인 역기전력은 정현적인 자속이 쇠교하고 있음을 의미한다. 토크 식에 따라 정현적인 3상 전류를 인가할 때, 정현적인 쇠교자속이 발생된다면 일정한 토크를 얻을 수 있고, 역기전력을 정현적으로 만들 수 있다면 토크 리플을 저감할 수 있다는 것을 알 수 있다.

토크 리플을 줄이는 방법에는 슬롯 개구폭 감소, 공극 증가, 영구자석이나 슈의 형상 변화, 고정자나 영구자석에 skew를 주는 방법 등 전동기의 형상을 바꾸는 방법이나 전류 제어를 통한 방법 등이 있다[2]. 본 논문에서는 이미 설계된 전동기에서 크게 형상을 바꾸지 않는 범위에서 정격과 목표조건을 만족시키기 위해 영구자석과 슈의 형상을 바꾸는 방법을 택하였다.

최적 모델을 위해 그림 2의 영구자석과 슈의 형상을 설계변수로 선정하여 이에 대한 유한요소법을 시행한다. 해석결과 중 역기전력의 전고조파왜율(THD)과 기본파 성분을 분석하여 최적모델을 찾는다. THD 값이 작으면 고조파 성분이 적으므로 정현파에 가까운 파형이라는 것을 알 수 있다. 또한 역기전력의 크기는 순시 토크의 크기에 영향을 미치므로 정격 토크보다 작아지지 않도록 역기전력 기본파 성분에 주의하여 최적 모델을 찾는다.

2.3 전동기 형상에 따른 역기전력 분석

영구자석과 슈의 형상 변화는 다음과 같다.

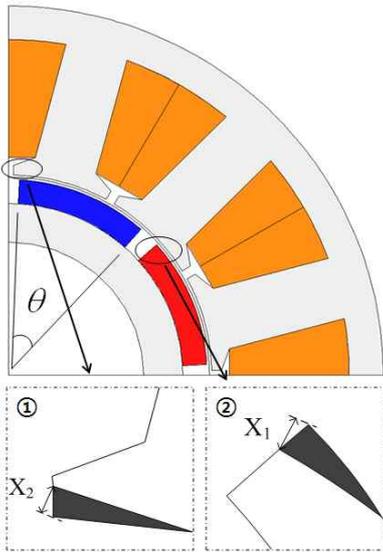


그림 2. 전동기 설계 변수
Fig. 2. Design variables of the motor

먼저 영구자석 크기의 최적점을 찾기 위해 영구자석의 극호각 θ 를 바꿔가며 역기전력 파형을 얻어냈다.

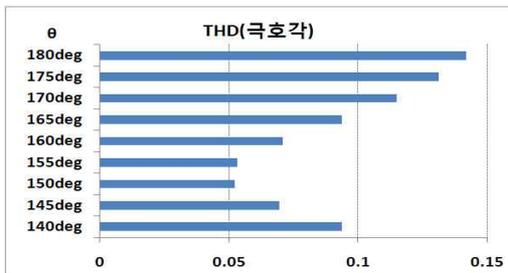


그림 3-1. 극호각에 따른 역기전력 THD
Fig. 3-1. THD of back-EMF for pole pitch angle

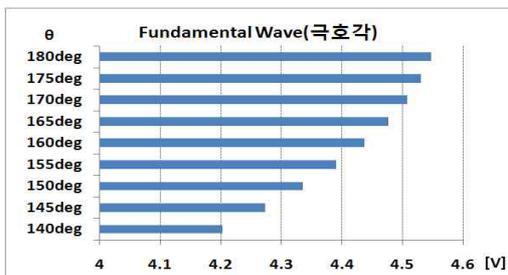


그림 3-2. 극호각에 따른 역기전력 기본파 성분
Fig. 3-2. Back-EMF of the fundamental for pole pitch angle

그림 3-1을 보면 극호각 150[°] 부근에서 THD가 최저치를 갖으며 영구자석을 무조건 작게 혹은 크게 한다고 THD가 줄어들지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 THD가 최저로 나오는 극호각을 기계각으로 바꾸면 슬롯 간격 30[°]와 비슷하다는 것을 알 수 있다.

그림 3-2에서 알 수 있듯이 영구자석의 극호각을 작게 할수록 기본파 성분이 감소한다. 이는 자석 양이 줄어들면서 자속이 전체적으로 감소함에 따른 결과이다. 여기서는 THD가 작고, 같은 값에 대해 기본파 성분이 큰 극호각 155[°]에서 최적점을 찾았다.

다음으로 영구자석 형상의 x_1 을 바꿔가며 역기전력 파형을 해석한 결과이다.

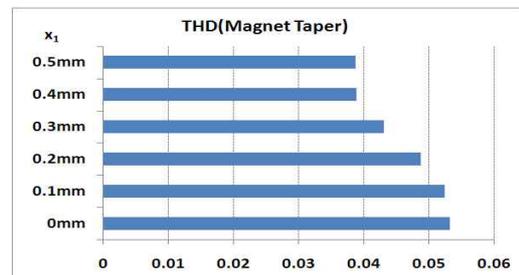


그림 4-1. 자석 형상에 따른 역기전력 THD
Fig. 4-1. THD of back-EMF for PM shape

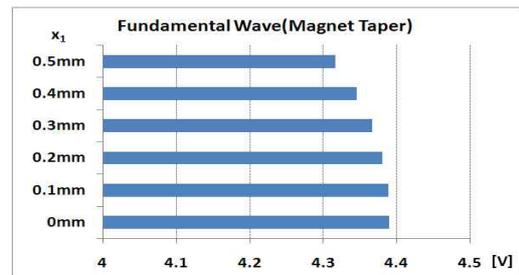


그림 4-2. 자석 형상에 따른 역기전력 기본파 성분
Fig. 4-2. Back-EMF of the fundamental for PM shape

그림 4-1을 보면 영구자석을 많이 깎을수록 역기전력은 정현파에 가까우나 0.4[mm] 이상에서는 그 변화가 거의 눈에 띄지 않는 것을 알 수 있다.

또한 그림 4-2를 보면 자석을 많이 깎을수록 기본파 성분이 감소한다. 따라서 THD가 거의 감소하지 않고, 기본파 성분도 보다 큰 0.4[mm]에서 영구자석 형상의 최적점을 찾았다.

마지막으로 영구자석의 크기는 고정시키고 슈의 형상 x_2 를 바꿔가며 역기전력을 해석한 결과이다.

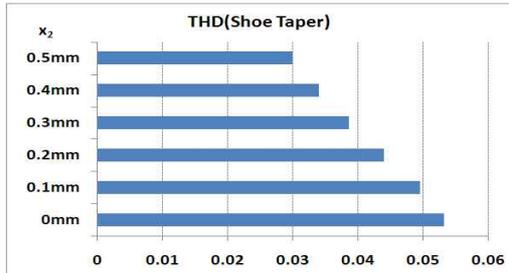


그림 5-1. 슈 형상에 따른 역기전력 THD
Fig. 5-1. THD of back-EMF for shoes shape

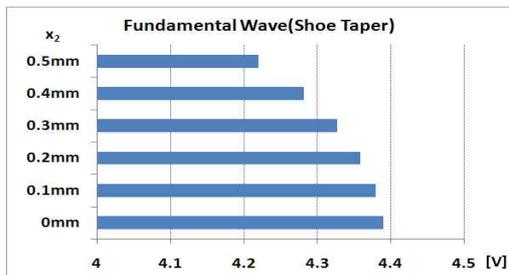


그림 5-2. 슈 형상에 따른 역기전력 기본파 성분
Fig. 5-2. Back-EMF of the fundamental for shoes shape

그림 5-1과 그림 5-2에 따라서 슈를 많이 깎을수록 역기전력의 THD와 기본파성분의 크기가 줄어든다는 것을 확인 할 수 있다. 토크 리플의 최소화를 위해서 역기전력의 THD가 가장 작은 0.5[mm]를 슈 형상의 최적점을 선택하였다.

2.4 최적모델 선정

앞선 결과를 종합하여 역기전력을 가장 정현적으로 얻을 수 있는 모델을 분석한 결과 최적모델로 $\theta: 155^\circ$, $x_1: 0.4$ [mm], $x_2: 0.5$ [mm] 를 선정하였다. 최적 모델의 도면은 다음과 같다.

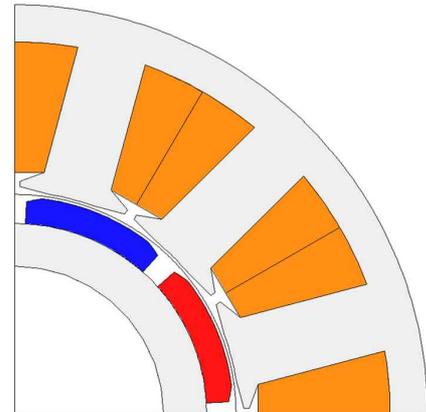


그림 6. 최적설계 모델
Fig. 6. Optimal design model for the motor

설계한 최적모델에 대해 해석을 시행하여 역기전력과 토크를 기본모델과 비교 및 분석하였다.

표 2. 기본모델과 최적모델의 역기전력 비교
Table 2. Comparison of basic and optimal model

	역기전력 THD	역기전력 기본파
기본모델	0.53	4.39[V]
최적모델	0.19	4.18[V]

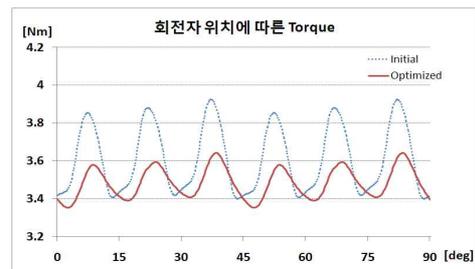


그림 7. 기본모델과 최적모델의 비교
Fig. 7. Comparison of basic and optimal model

표 3. 기본모델과 최적모델의 토크 비교
Table 3. Comparison the torque of basic and optimal model

	평균토크[Nm]	peak to peak[Nm]
기본모델	3.6	0.5
최적모델	3.5	0.3

표 2, 3을 보면 기본모델에 비해 최적모델의 역기전

력이 정현적으로 바뀌었으며 또한 토크 리플 역시 감소하였음을 알 수 있다. 또한 토크 리플 역시 평균토크의 14[%]에서 8.6[%]로 목표 조건을 만족함을 알 수 있다. 따라서 기본모델에 비해 진동을 일으키지 않음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 미리 설계된 EPS용 SPM 전동기의 회전자 영구자석과 고정자 슈의 형상을 변화시키면서 토크 리플을 저감하는 방법을 제시하였다. 3가지 파라미터에 대해서 역기전력 파형을 분석하여 최적모델을 찾았고, 최적모델에서 목표하고자 했던 토크 리플 저감을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 우수제조기술연구센터(ATC) 사업으로 지원된 연구임(과제번호 : 10032866, 고효율 기어드모터 해석 및 착자요크 설계).

References

- [1] “자동차용 모터(Electric motors) 시장과 기술동향”, A&D 컨설턴트.
- [2] J.R.Hendershot Jr and TJE Miller, “Design of Brushless Permanent-Magnet Motors”, 1994.
- [3] Shih-Chin Yang, Yee-Pien Yang and Jieng-Jang Liu, Design and Control Optimization of Surface-Mounted Permanent-Magnet Machines with High Torque and Low Ripples, The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan, pp 198-203, 2007.
- [4] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani, Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, Industry Applications Conference, vol. 1, pp 179-185, 2000.
- [5] Surong Huang, Aydin, M. and Lipo, T.A., Torque Quality Assessment and Sizing Optimization for Surface Mounted Permanent Magnet Machines, Industry Applications Conference, vol. 3, pp 1603-1610, 2001.
- [6] Islam, R., Husain, I., Fardoun, A. and McLaughlin, K., Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction, vol. 45, pp 152-160, 2009.
- [7] Li Zhu, Jiang, S.Z., Zhu, Z.Q. and Chan, C.C., Comparison of Alternate Analytical Models for Predicting Cogging

Torque in Surface-Mounted Permanent Magnet Machines, Vehicle Power and Propulsion Conference, pp 1-6, 2008.

- [8] Jin Hur, Characteristic Analysis of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor in Electrohydraulic Power Steering Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, No. 6, pp 2316-2323, 2008.

◇ 저자소개 ◇



임승빈(任承彬)

1974년 6월 16일생. 2001년 한양대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2008~2009년 전자부품연구원. 2010년~현재 한국에너지기술평가원.

Tel : (02)3369-8427, Fax : (02)554-0660

E-mail : sblim@ketep.re.kr



박현중(朴玄宗)

1986년 4월 1일생. 2009년 한양대 전기공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 석박사통합과정.

Tel : (02)2220-0349

E-mail : hyuntou@nate.com



강동우(姜東佑)

1979년 12월 22일생. 2006년 한양대 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석박사통합과정.

Tel : (02)2220-0349

E-mail : dwkang1222@gmail.com



함상환(咸相煥)

1980년 4월 7일생. 2006년 한양대 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석박사통합과정.

Tel : (02)2220-0349

E-mail : goodhami@hanmail.net



이 주(李柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도 기술연구원 선임연구원.

1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.

Tel : (02)2220-0342, Fax : (02)2295-7111

E-mail : julee@hanyang.ac.kr