

HEV용 전동기의 회전자 형상 변화를 통한 유기전압 고조파 저감 설계

손 동 균¹⁾ · 정 영 훈¹⁾ · 조 민 복¹⁾ · 임 명 섭²⁾ · 홍 정 표^{*1)}

한양대학교 미래자동차공학과¹⁾ · 영남대학교 기계공학과²⁾

Harmonic Reduction Design of Induced Voltage through Rotor Shape Change for HEV motor

Dong-Kyun Son¹⁾ · Young-Hoon Jung¹⁾ · Min-Bok Cho¹⁾ · Myung-Seop Lim²⁾ · Jung-Pyo Hong^{*1)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, 280 Daehak-Ro, Gyeongsan, Gyeongbuk 38541, Republic of Korea

Abstract : In IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor), the induced voltage increase in high speed driving and then the THD (Total Harmonic Distortion) of induced voltage will be increased because of the local saturation of the air-gap magnetic flux density during field weakening control. This paper proposes a method of reducing the line to line induced voltage not to exceed the voltage limit in high speed driving. The first method is to define the air-gap length as ICF(Inverse Cosine Function), and the other is to apply the eccentricity in rotor. When ICF and eccentricity are applied, the spatial distribution of the magnetic flux density can be sinusoidal. This paper compares the maximum values of the induced voltage changing the ratio of d axis and q axis air-gap length and eccentricity radius. As a result, the specification can be satisfied when the q axis air-gap length is 4 [mm] in ICF model.

Key words : Eccentricity(편심), Hybrid Electric Vehicle(하이브리드 자동차), ICF(Inverse Cosine Function), IPMSM(매입형 영구자석 동기전동기), Induced Voltage(유기전압), THD(전고조파 왜곡률)

Nomenclature

A : Area, [m²]
 B : Magnetic Flux Density [T]
 F : Magnetic Motive Force, [A]
 l : Length, [m]
 R : Reluctance, [A/Wb]
 Φ : Magnetic Flux, [Wb]
 μ : Magnetic Permeability, [H/m]
 θ : Electrical Angle, [°]

Subscripts

g : Air-gap
 m : Permanent Magnet
 d : d Axis
max : Maximum Value
0 : Vacuum

* 손동균, thschrbs92@hanyang.ac.kr

1. 서론

최근 화석연료의 고갈 및 환경오염 문제로 인해 기존의 엔진 자동차에서 전기 자동차에 대한 관심과 수요가 많아지고 있으며 핵심 부품인 고성능 EV (Electric Vehicle) 구동용 모터에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히 HEV (Hybrid Electric Vehicle)용 전동기의 구동점은 저속 고폭토크 영역부터 고속 저토크 영역까지 넓은 운전 영역을 가지며 이러한 특성을 만족시키는 전동기는 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)이 있다. 차량의 한정된 사이즈에서 높은 출력밀도를 확보하기 위해서 고속으로 전동기를 구동 시킨다.

하지만 전동기가 고속으로 회전함에 따라 유기전압이 증가하게 되고 단자 전압을 전압 제한 이하로 유지하기 위해 약제자 운전을 하는데 이때 전류위상각에 따라 공극 자속 밀도의 국부적 포화로 인해 유기전압의 THD(Total Harmonic Distortion)가 높아진다. 이로 인해 유기전압의 크기가 전압제한을 초과 시 정상적인 구동 및 제어가 어려워진다.

본 논문은 IPMSM의 회전자 형상 변화를 통해 고속영역 구동 시 합성 공극 자속밀도의 고조파 저감을 통해 유기전압을 전압제한 이하로 감소시키는 방법을 제시한다. 기존 모델, ICF (Inverse Cosine Function)을 이용한 모델 그리고 회전자 편심(Eccentricity)모델에 대해 고속 영역에서 선간 유기전압 THD 및 Peak치의 저감 효과를 확인한다.¹⁾

2. 대상 모델

본 논문의 대상 모델은 Fig.1 과 같은 8극 48슬롯 HEV용 Multi-layer IPMSM으로 기존의 Single-layer 대비 d-q축 인덕턴스의 차이를 크게 하여 토크턴스 토크를 활용하는 기기이다.

전동기의 최대속도는 11000[rpm], 전압제한 사양으로부터 결정되는 선간 유기전압 최대치는 400[V]이다. 기존의 대상모델은 목표 사양인 34[Nm]는 만족하지만 최고 속도에서 선간 유기전압의 Peak치는 Fig.2 와 같이 473.42[V]로 전압제한을 초과하며 THD 분석 결과 26.1[%]이다.

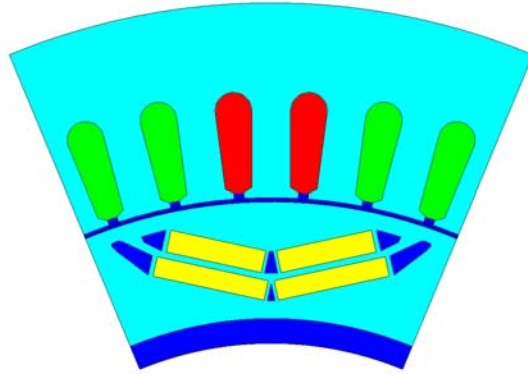


Fig. 1 Original model

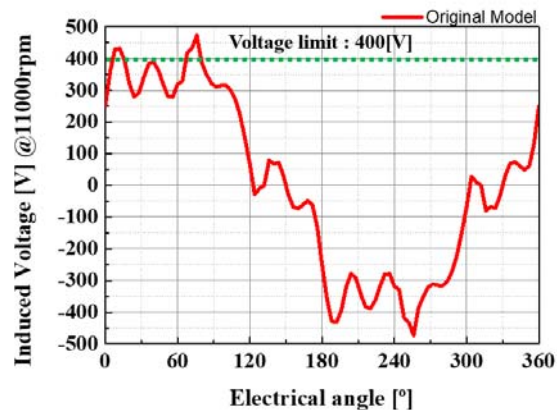


Fig. 2 Induced Voltage Profile of Original model

3. 유기전압 저감 설계

3.1 ICF (Inverse Cosine Function)

유기전압의 크기를 감소시키기 위해서 회전자의 공극 자속밀도를 정현적으로 만들어 개선 할 수 있다. ICF 란 무부하 시의 공극 자속밀도를 Cosine Function으로 하기 위해 공극 길이를 산정하는 수식으로 이때의 가정은 철심의 투자율은 무한하며 고정자 및 회전자의 치 슬롯 구조가 없는 평활 철심으로 가정한다.

이때 영구자석과 공극에서 가우스 법칙을 적용하면 수식 (3)과 같이 공극 길이는 d축 공극 길이에 Inverse Cosine의 곱으로 표현할 수 있다. Fig.3 에서 보는 바와 같이 q축의 양단에서 공극의 길이는 무한히 길어져야 하지만 물리적 제약으로 인해 불가능하므로 적절한 길이를 산정한다.

또한 ICF는 무부하시 공극 자속밀도를 정현적으로 가져갈 수 있는 회전자의 형상 이지만 본 논문에서는 최고 속도에서 부하시 유기전압의 Peak값을 줄이는 것이므로 무부하시와 달라질 수 있다. Fig.5 은 최고 속도에서 δ_q 에 따른 선간 유기전압 Peak값과 평균 토크, 토크리플의 경향성을 살펴 본 것이다.²⁾

$$F_g(\theta) = F_m = \Phi(\theta) \cdot R_g \quad (1)$$

$$B_g(\theta) = \frac{\Phi(\theta)}{A_g} = \frac{\mu_0 F_m}{B_{\max}} \quad (2)$$

$$l(\theta) = \frac{\mu_0 F_m}{B_{\max} \cos \theta} = \frac{l_d}{\cos \theta} \quad (3)$$

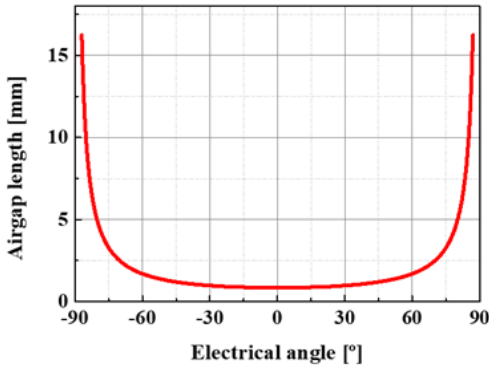


Fig. 3 Airgap length Profile of ICF Model

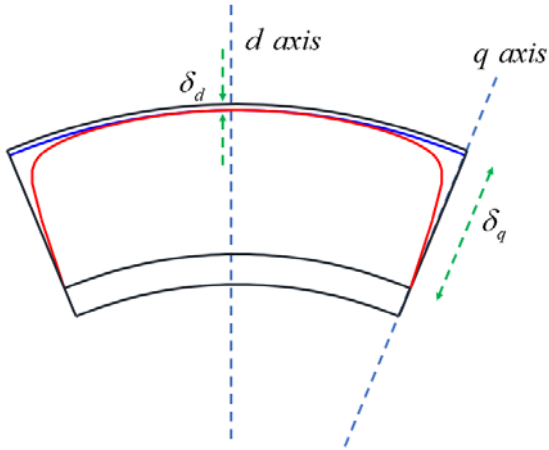


Fig. 4 Geometry Parameter of ICF Model

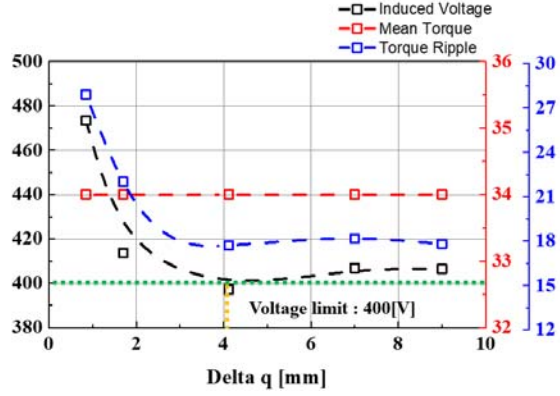


Fig. 5 Characteristic according to δ_q of ICF Model

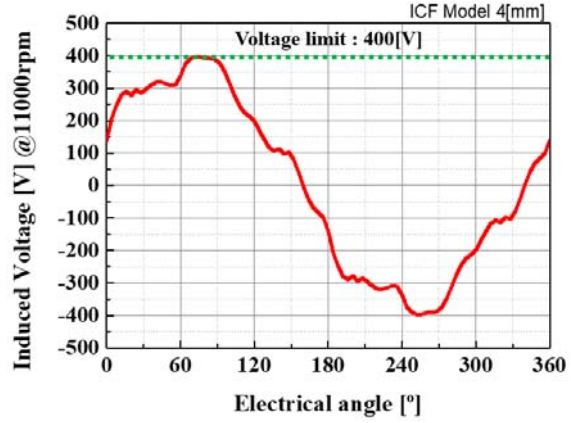


Fig. 6 Induced Voltage of ICF Model

δ_q 가 4[mm]가 되었을 때 선간 유기전압 Peak값은 397[V]로 전압제한인 400[V] 이하로 낮출 수 있었고 최고 속도에서 유기전압의 파형을 기존 모델과 비교 했을 때 선간 유기전압의 Peak치는 76.2[V]가량 낮아졌다. 또한 유기전압의 THD분석 결과 ICF모델이 약 14.2[%] 개선됨을 알 수 있으며 토크 리플 또한 기존 모델 대비 선간 유기전압의 파형의 개선으로 인해 약 10.1[%] 저감됨을 확인 했다.

3.2 회전자 편심 (Eccentricity)

유기전압의 고조파 및 공극 자속밀도를 정현적으로 만들기 위해 일반적으로 사용하는 방법인 회전자 편심에 대해 살펴 본다. 회전자 편심이란 Fig.7 과 같이 d 축 공극 길이와 q 축 공극 길이를 다르게 회전자 형상을 변화 시키는 방법으로 편심 적용하는 방

법은 회전자 외경의 원점과 고정자 내경의 원점을 달리 가져간다. 회전자 편심을 적용하면 정현적인 공극 자속밀도를 얻을 수 있지만 q축의 공극 길이가 길어져 평균 토크 및 토크 리플이 감소한다. 그러므로 원하는 성능을 만족시키기 위해 적절한 편심량이 얼마 인지 확인하는 과정이 필요 하다.³⁾

본 논문에서는 Fig.9와 같이 편심량을 기존 모델과 같은 편심량 부터 회전자 반경의 약 33[%] 까지 경향성을 살펴보았다. 그 결과 편심량이 증가함에 따라 선간 유기전압의 Peak값과 평균 토크 모두 감소함을 보였다. 회전자에 편심을 약15[mm]적용 시 선간 유기전압의 Peak 값은 약 404.5[V]로 기존 모델 대비 약 68.8[V] 감소 했다.

또한 선간 유기전압 THD는 13.5[%] 개선됨을 알 수 있다.

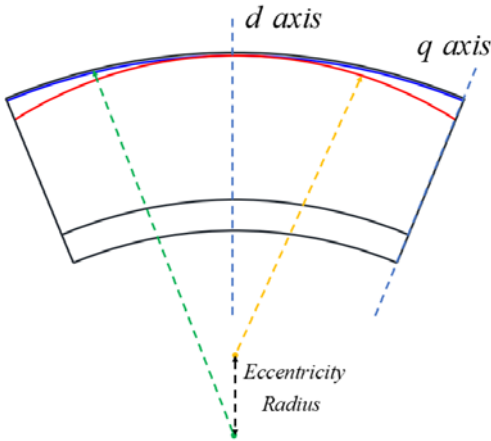


Fig. 7 Geometry Parameter of Eccentricity Model

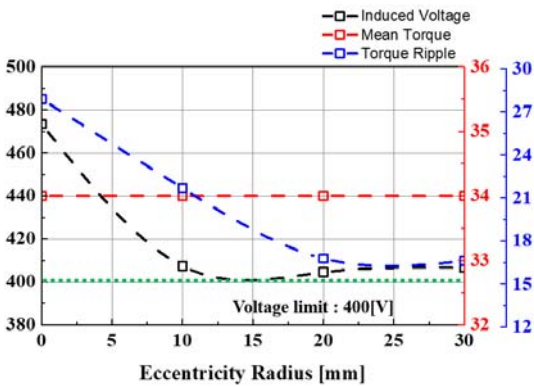


Fig. 8 Characteristic according to eccentricity radius of Eccentricity Model

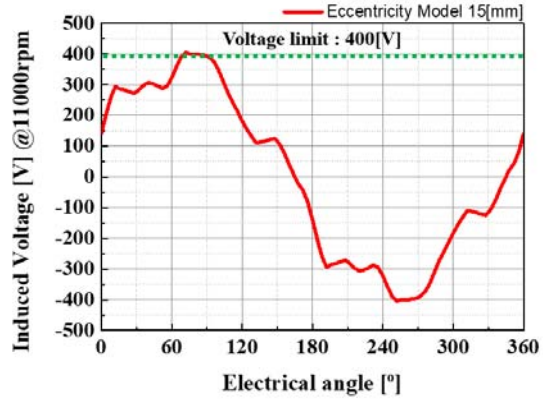


Fig. 9 Induced Voltage of Eccentricity Model

하지만 목표사양인 선간 유기전압의 Peak 값인 400[V]는 편심량을 증가 시키더라도 만족하지 못함을 알 수 있다.

4. 결 론

기존 모델의 경우 목표사양인 유기전압의 Peak 값을 초과 하는 문제점을 가지고 있었다. 그래서 회전자의 형상을 변화시켜 유기전압 저감설계를 진행 하였으며 공극 길이를 Fig.10과 같이 ICF로 해서 무부하 공극 자속 밀도를 정현적으로 하기 위한 방법과 고정자 내경과 회전자 외경의 중심을 달리 가져가는 편심을 적용하였다.ICF 적용 시에 따른 경향성과 편심 적용 시 편심량에 따른 경향성을 살펴보았다.

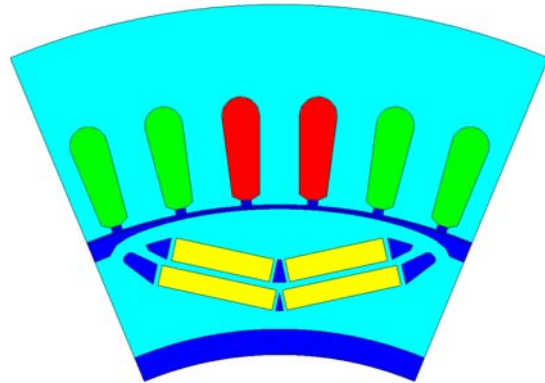


Fig. 10 Final Model

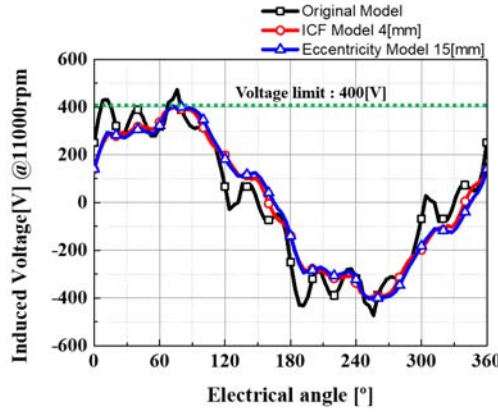


Fig. 11 Induced Voltage Profile of Each Model

그 결과 편심은 편심량을 회전자 외경의 약 30[%]가량 변화 시키더라도 목표 사양을 만족 하지 못했지만 ICF 를 적용 시 가 약 4[mm] 가 되었을 때 Fig.11과 같이 선간 유기전압의 Peak값을 목표 사양을 만족 할 수 있음을 보였다. 결과적으로 일반적인 편심뿐만 아니라 적절한 ICF를 적용하면 목표 사양을 만족할 수 있다.

References

- 1) Y. H. Jung, M. S. Lim, M. H. Yoon, J. S. Jeong, and J. P. Hong, "Torque Ripple Reduction of IPMSM Applying Asymmetric Rotor Shape under Certain Load Condition," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 33, no. 1, pp. 333–340, 2018.
- 2) S. A. Evans, "Salient pole shoe shapes of interior permanent magnet synchronous machines," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- 3) Jae-Yui Kim, Kyoung-Soo Cha, Min-Ro Park, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong. "Design of Traction Motor to Reduce Induced Voltage through Shape Change." *KSAE Spring Conf*, (2016.11): 1258-1262.