

# EV 구동용 120kW 권선계자형 동기 전동기 토크 리플 저감설계

이재웅\* · 차경수 · 윤명환 · 홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

## Torque Ripple Reduction of 120kW Wound Rotor Synchronous Motor for EV

Jae-Ung Lee\* · Kyoung-Soo Cha · Myung-Hwan Yoon · Jung-Pyo Hong

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

**Abstract** : Recently, as automotive tends to be electricized and leisure space, traction motor of automotive become more important. In addition to price of rare earth magnet is flexible. So nonrare earth magnet traction motor should be studied. This paper presents a design strategy of Wound Field Synchronous Motor(WFSM). The design strategy is that confirm main factors which have an major effect on torque and torque ripple through design of experiments. Then, confirm change tendency of torque, torque ripple and induced voltage through main design factors which are pole arc, thickness of rotor and stator, and eccentricity using response surface methodology. With this strategy, this paper presents an improved model for torque ripple reduction and induced voltage compared to initial model.

**Key words** : EV traction motor(전기차 구동 전동기), Pole arc(폴 아크), Rare earth magnet(희토류 자석), Torque ripple(토크 리플), WFSM(권선계자형 동기 전동기)

### Subscripts

p.u. : per input voltage

## 1. 서론

최근 환경규제가 심화됨에 따라 국제 자동차 시장은 하이브리드 자동차를 넘어 전기자동차로 전장화 되어가고 있다. 전기자동차의 상용화를 위해 고효율 고효율의 구동용 전동기 개발의 필요성이 대

두되고 있다.

2017년 현재 희토류 영구자석의 가격은 감소하고 있는 추세이지만 유한한 광물의 특성상 2011년 희토류 파동 때처럼 수급이 어려워지는 상황이 발생할 가능성이 있다. 그렇기 때문에 영구자석을 권선계자로 대체할 수 있는 권선계자형 동기 전동기에 대한 연구가 필요하다. 본 연구를 통해 전기자동차 구동용 계자 권선형 동기 전동기의 최적화에 대해 논하고 희토류 저감에 기여할 것이다.

또한 인포메이션과 엔터테인먼트의 합성어인 인포테인먼트가 차세대 자동차의 한 트렌드인 것처럼 최근 자동차는 기존 이동수단의 개념뿐 아니라 하나의 여가공간으로 자리매김하고 있다. 전동기의 토크 리플은 소음과 진동의 원인이 되기 때문에 토

---

\* 이재웅, E-mail: leejea54@hanyang.ac.kr

크 리플 저감은 필수적인 요소이다.

본 논문에서는 동일한 출력을 만족하는 권선계자형 동기 전동기의 토크 리플 저감설계를 할 것이다. 우선 실험계획법을 통해 토크 리플에 영향을 미치는 주요 설계 변수들을 산정하고 설계 변수의 변화에 따른 토크 리플 경향성을 확인하여 최적설계 방안을 제시할 것이다.

## 2. 초기 모델

최적 설계를 진행할 대상전동기는 120kW의 출력 조건을 만족하는 EV 구동용 8극 48슬롯의 권선계자형 동기 전동기 모델이다. Fig.1은 대상 전동기 초기 모델형상이고 Table 1은 초기모델에 대한 정보이다.

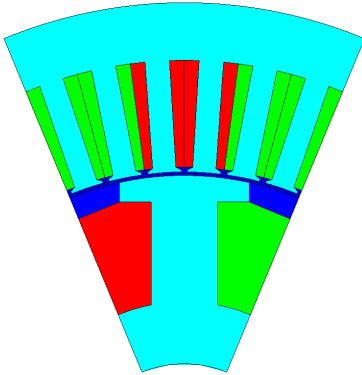


Fig. 1 Initial model

Table 1 Data of initial model

항목	값	단위
극/슬롯 수	8/48	
철심 재질	35PN230	
전동기 타입	WFSM	
출력	120	kW
최고속도	12000	rpm
기저속도	4800	rpm
입력전압	1	p.u.

### 2.1 초기모델 특성

Table 2 characteristics of initial model

유기전압 최대치@12000rpm	1.233p.u.
토크 리플@4800rpm	22%

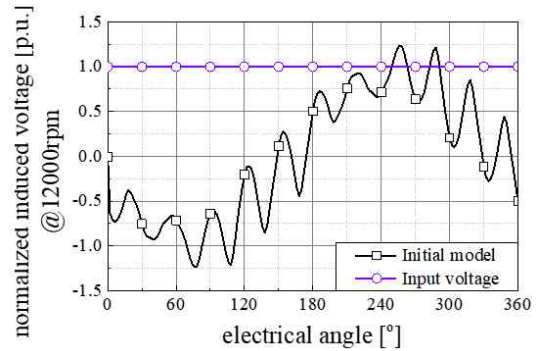


Fig. 2.1 normalized induced voltage of initial model by input voltage@12000rpm

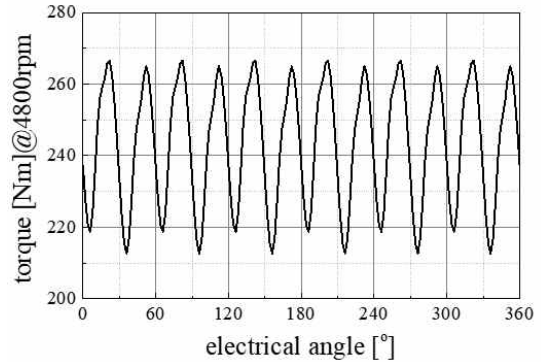


Fig. 2.2 torque of initial model@4800rpm

Fig. 2와 Table 2를 통해 초기모델의 해석 결과, 고조파로 인해 유기전압 peak값이 입력전압보다 높아지는 문제점이 있었고, 토크 리플이 20%로 나타났다. 본 논문에서는 초기모델의 최고속도에서 유기전압의 peak값이 입력전압을 초과하지 않으면서 기저속도에서 토크 리플을 7% 이하로 저감하는 것을 목표로 실험 계획법과 반응 표면법을 이용하여 개선하였다.

## 3. 개선/최적화 방안

토크 리플 저감, 유기전압 고조파 개선과 더불어 EV용 구동 전동기로서의 성능을 향상시키기 위해 같은 고정자와 회전자 사이즈에서 최대 자속이 발생 할 수 있도록 자기저항이 최소가 되는 고정자와 회전자의 치/요크를 설계했다. 또한 실험계획법을 통해 편심, pole arc, 치/요크 폭 등의 변수들을 설정

하고 토크, 토크 리플과 유기전압에 주요한 영향을 미치는 변수를 확인한 후 목표 성능을 만족하는 최적점을 찾아냈다.

### 3.1 치/요크 폭 산정

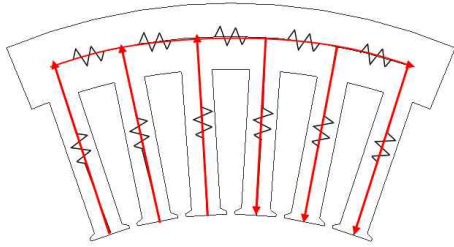


Fig. 3.1 Stator of WFSM

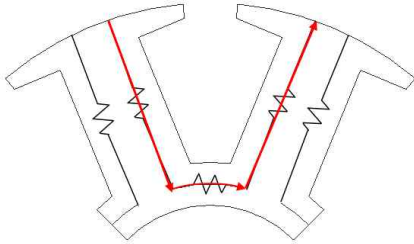


Fig. 3.2 Rotor of WFSM

논문에서 제시한 권선계자형 동기 전동기의 고정자는 분포권으로 권선 되어있다. 고정자에서 자속이 흐르는 경로는 Fig.3.1처럼 나타낼 수 있고 고정자의 형상에 따라 자속 경로의 자기저항이 최소가 되는 치/요크 폭을 산정할 수 있다. 회전자의 계자권선의 경우 DC 전류를 인가하고, 집중권으로 권선되어있다. 고정자와 마찬가지로 치/요크 자속 경로의 자기저항이 최소가 되도록 회전자 치/요크 폭을 산정할 수 있다.

이러한 치/요크 폭 산정을 통해 모델의 자속을 증가시킬 뿐 아니라 해석 과정에 있어서 회전자와 고정자 각각의 치 폭을 요크 폭에 대하여 종속적으로 표현할 수 있어 변수의 개수를 감소시킬 수 있다.

### 3.2 실험 계획법

모델의 형상을 변화시켜가며 특성을 비교할 때 변수를 설정하고, 각 변수에 대해 변화시키며 비교하게 되면 해석 횟수가 급수 형태로 증가하게 된다.

따라서 실험 계획법을 통해 해석 횟수를 감소시키면서 각 설계 변수의 영향성을 판단하여 모델의 토크와 토크 리플에 영향을 미치는 주요 설계 변수를 확인했다.

#### 3.2.1 직교배열표

직교배열표를 통해 각 변수의 변화에 따른 모든 경우가 아닌 적은 횟수의 해석을 통해 각 설계 변수의 영향력을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 회전자의 치/요크 폭, 고정자의 치/요크 폭, 회전자 편심, pole arc의 4개 변수에 따른 토크와 토크 리플을 확인하기 위해 4변수, 3수준의 직교배열표 Table 4를 이용하였다. 실제로 4개 변수에 의한 3수준의 변화에 따른 경우들을 살펴보면 최소  $3^4=81$  가지 경우의 해석을 해야 하지만 Table 4에서 볼 수 있듯이 18 가지 경우의 해석을 통해 토크와 토크 리플에 영향을 미치는 주요 설계 변수를 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 해석 시간도 단축시킬 수 있다.

앞서 언급한 4가지의 설계 변수의 범위는 Table 3에 나타났다. Table 4는 4변수 3수준의 직교배열표를 나타낸 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 각 변수들은 0, 1, 2 세 개의 수준으로 설계 범위가 나누어져있다.

Table 3 Orthogonal array table-4 variables, 3 levels

	X1	X2	X3	X4
CASE1	0	0	0	0
CASE2	0	1	1	1
CASE3	0	2	2	2
CASE4	1	0	0	1
CASE5	1	1	1	2
CASE6	1	2	2	0
CASE7	2	0	1	0
CASE8	2	1	2	1
CASE9	2	2	0	2
CASE10	0	0	2	2
CASE11	0	1	0	0
CASE12	0	2	1	1
CASE13	1	0	1	2
CASE14	1	1	2	0
CASE15	1	2	0	1
CASE16	2	0	2	1
CASE17	2	1	0	2
CASE18	2	2	1	0

Table 4 Design range for DOE

설계 변수	0	1	2
pole angle (X1)[°]	25	30	35
rotoryoke (X2)[mm]	13	15	17
eccentricity (X3)[mm]	5	10	15
statoryoke (X4)[mm]	6	8	10

### 3.2.2 실험 계획법 결과 분석

앞서 말했던 직교배열표를 이용한 실험계획법을 통해 토크, 토크 리플에 미치는 4가지 변수(회전자의 요크 폭, 고정자의 요크 폭, 회전자 편심, pole arc)의 영향 정도를 Table 4의 유의수준(p-value)을 통해 확인하였다. Fig.4는 각 변수에 대해 토크와 토크 리플이 얼마나 영향을 받는지를 나타낸다.

Table 4.1 Torque through design parameters

토크	p-value
pole angle (X1)	0
rotoryoke (X2)	0
eccentricity (X3)	0.3249
statoryoke (X4)	0.0013

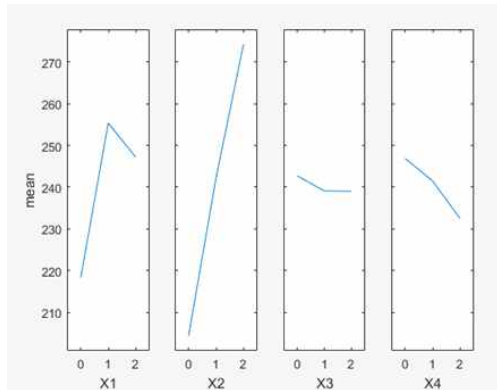


Fig. 4.1 Torque ripple through design parameters

Table 4.2 Torque ripple through design parameters

토크 리플	p-value
pole angle (X1)	0
rotoryoke (X2)	0.0036
eccentricity (X3)	0.0003
statoryoke (X4)	0.152

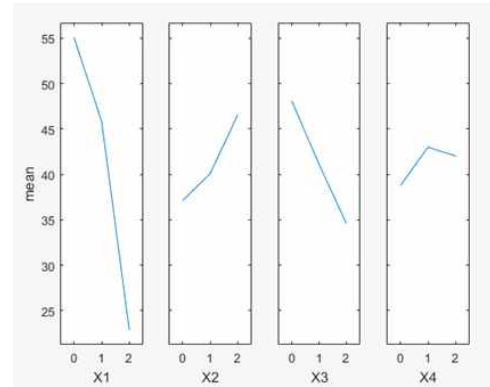


Fig. 4.2 Torque ripple through design parameters

Table 4.1과 Figure.4.1을 통해 해석 모델의 토크 크기에 영향을 미치는 주요 변수로는 pole angle과 회전자 치/요크 폭, 고정자 치/요크 폭임을 알 수 있고 Table 4.2과 Figure.4.2를 통해 토크 리플에 영향을 미치는 주요 변수는 pole angle, 편심임을 알 수 있다.

또한 논문의 목표인 토크가 감소하지 않으면서 토크 리플을 저감하려면 pole angle은 대략 30~35°, 회전자 요크 폭은 14~16mm, 편심은 12.5~15mm 이상, 고정자 요크 폭은 6~8mm 정도가 적당하다고 예측할 수 있다.

### 3.3 반응 표면법

앞서 토크는 감소하지 않고, 토크 리플은 저감시키는 방향의 설계를 위해 설계 변수들의 설계 범위를 예측할 수 있었다. 설정한 변수들의 범위 내에서 목표한 토크와 토크 리플 목표를 만족하기 위한 설계 방향과 유기전압의 peak값이 입력전압을 넘지 않도록 하는 설계 최적점을 반응 표면법을 통해 구체적으로 확인해보았다.

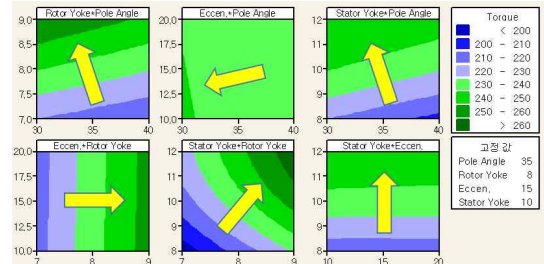


Fig. 5.1 Response surface contour plots of torque

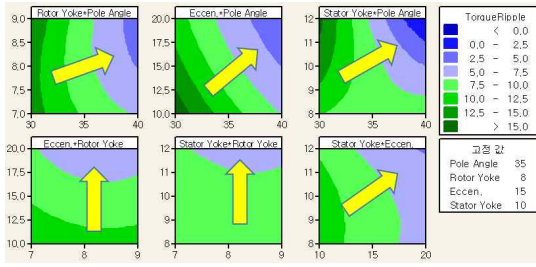


Fig. 5.2 Response surface contour plots of torque ripple

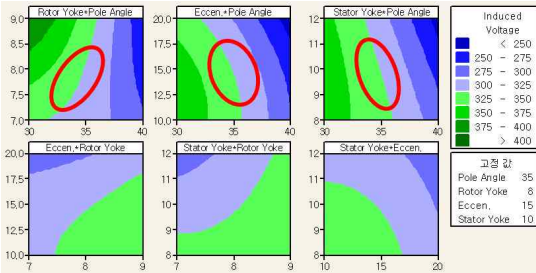


Fig. 5.3 Response surface contour plots of induced voltage

### 3.3.2 토크 리플

Fig.5는 반응 표면법을 통해 얻은 설계 변수에 따른 토크, 토크 리플, 유기전압의 등고선 그래프이다. Fig.5.1을 통해 실험 계획법에서 확인한 것과 마찬가지로 편심에 따라서는 토크가 변화가 없는 것을 알 수 있고 pole angle이 감소하고 고정자와 회전자의 요크 폭이 증가할수록 토크가 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig.5.2을 통해 pole angle과 편심이 증가할수록 토크 리플이 감소하고, 고정자와 회전자의 요크 두께의 영향은 적은 것을 확인할 수 있다. Fig.5.3을 통해서 유기전압이 350V를 넘지 않기 위한 영역을 확인할 수 있다.

반응 표면법을 통해 설계 변수에 따른 토크와 토크 리플 그리고 유기전압의 개선방향과 영역을 확인하여 Table 5의 개선 모델을 선정할 수 있다. Fig.6은 초기 모델과 개선 모델을 나타낸 것이다.

Table 5 Data of improved model

설계 변수	p-value
pole angle [°]	40
rotoryoke [mm]	9
eccentricity [mm]	20
statoryoke [mm]	12

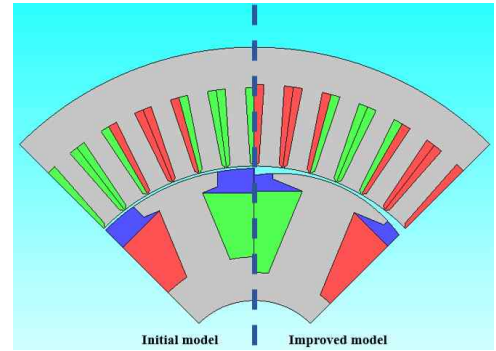


Fig.6 Initial model and improved model

## 4. 결과

초기 모델과 반응 표면법을 통해 얻은 개선 모델의 토크, 유기전압을 비교하였고 Table 6과 Figure.7을 통해 토크 리플과 유기 전압의 목표한 결과가 나온 것을 확인하였다.

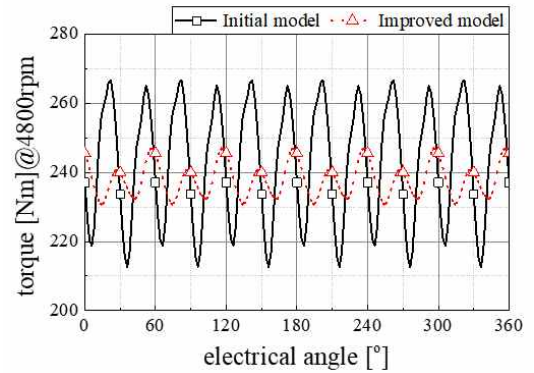


Fig.7.1 Torque of initial model and improved model

Table 6.1 Average torque and torque ripple

	Initial	Improved
average torque[Nm]	243.222	237.833
torque ripple[%]	22.195	6.834

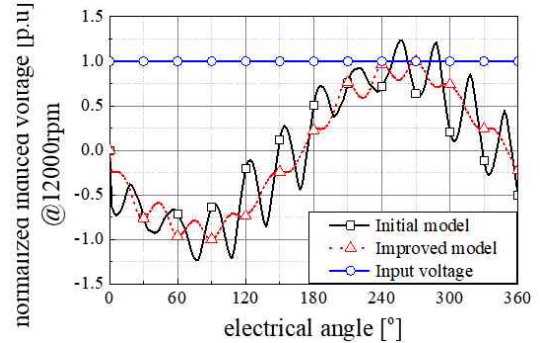


Fig.7.2 Induced voltage of initial model and improved model

Table 6.2 max normalized induced voltage

	Initial	Improved
max induced voltage[p.u.]	1.233	0.998

## 5. 결 론

본 논문에서는 EV구동용 권선계자형 동기 전동기의 승차감 개선을 위한 토크 리플 저감 및 유기전압 최적설계를 진행하였다. 전동기의 여러 설계 변수중에 토크와 토크 리플에 영향을 미치는 설계 변수들을 판별하기 위해 실험 계획법을 이용하였다. 또한 반응 표면법을 이용하여 판별한 pole arc, 고정자 및 회전자 치/요크 폭, 편심에 따라 목표 토크, 토크 리플 그리고 유기전압을 위한 최적화 방향을 제시하고 개선 모델을 선정하였다. 결과적으로 평균 토크가 조금 감소하였지만 만족할 만한 수준이고, 토크 리플은 목표치인 7% 이하로 저감하였으며 유기전압의 peak값이 입력전압을 넘지 않는 것도 확인하였다.

## Acknowledgement

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2017-2012-0-00628)

## References

- 1) Kyoung-Soo Cha, "Multipolar High-Speed IPMSM Design for EV Traction Considering Mechanical Stress", VTC, 1-6, 2016
- 2) Jin-Cheol Park, "Analysis of Back EMF and Cogging Torque in PMSM Considering the Effect of Static Eccentricity", KIEE, 721-722, 2016
- 3) Kyu-Seob Kim, "Taguchi Robust Optimum Design for Reducing the Cogging Torque of EPS Motors Considering Magnetic Unbalance Caused by Manufacturing Tolerances of PM", IET Electric Power Applications, vol10, 909-915, 2016
- 4) Ji-Min Kim, "Analysis of Cogging Torque Caused by Manufacturing Tolerances of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Power Steering", IET Electric Power Applications, vol10, 691-696, 2016