



# 2015 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회

## KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

기간: 2015. 11. 18(수)~21(토)

장소: **HICO** 경주화백컨벤션센터  
GYEONGJU Hwabaek International Convention Center

후원:  **KOFST**  
한국과학기술단체총연합회

 **Gride**  
Gyeongbuk

 **Gyeongju**  
CVB

 **Gyeongju**  
CVB



Km/h



**한국자동차공학회**  
The Korean Society of Automotive Engineers

1234 전기자동차용 히팅시스템 개발을 위한 난방유량 설계

조종표\*(한국에너지기술연구원), 표영덕(한국에너지기술연구원), 김강출(한국에너지기술연구원)

1235 헤어핀 권선을 이용한 전기자동차 구동용 권선 계자형 동기전동기의 출력 밀도 개선 설계

차경수\*(한양대학교), 박진철(한양대학교), 채승희(한양대학교), 홍정표(한양대학교)

1239 마이크로하이브리드자동차에 대한 시스템출력 적용성 연구

최동석\*(교통안전공단)

1240 EV Traction Motor의 토크 성능 향상을 위한 노치설계

홍년한\*(한양대학교), 윤명환(한양대학교), 홍정표(한양대학교)

# 헤어핀 권선을 이용한 EV 구동용 WFSM의 출력 밀도 개선 설계

차경수\* · 박진철 · 채승희 · 홍정표  
한양대학교 미래자동차공학과

## Power Density Improvement Design of WFSM for EV Traction Motor Using Hair-pin Windings

Kyoung-Soo Cha\* · Jin-Cheol Park · Seung-Hee Chai · Jung-Pyo Hong

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

**Abstract** : The rare earth material are dependent on imports from China for unstable supply and demand. Therefore the wound field synchronous motor (WFSM) which doesn't use rare earth material is being studied. The most commonly used wire shape is circular, with fill factor of 40%. If the fill factor can be increased, the slot area can be decreased. The hair-pin winding used wire shape is square and fill factor of 60%. So, if the slot area is designed for using hair-pin winding, it can be designed smaller than slot area of initial model. By reducing the slot area, it is possible to increase the stator inner diameter and the rotor outer diameter. Then it is possible to reduce the stack length while maintaining the same torque. In conclusion, it is possible to reduce the motor weight and volume. Moreover, by designing a square shaped slot, it is possible to increase the width of teeth. This also reduces the saturation level, which in turn reduces the total harmonic distortion (THD) of the back electromotive force (BEMF). Therefore, by using a hairpin winding in motor design, the same output can be maintained while the volume and weight is decreased. The power density is increased. In this paper, by using a hairpin winding, stack length is reduced by 10% compared to the initial model while maintaining the same output. The initial and improved model is compared by calculating the power density and efficiency of the motor by using a Two-Dimensional Finite Element Method (2-D FEM).

**Key words** : Electric vehicle (전기자동차), Hair-pin windings (헤어핀 권선), Motor efficiency (전동기 효율), Power density (출력밀도), Two-dimensional finite element method (2-D 유한요소해석), Wound field synchronous motor (권선 계자형 동기전동기)

### Nomenclature

$F$  : force, N  
 $i$  : current, A  
 $L$  : inductance, H  
 $P$  : pole pair number  
 $r$  : radius of airgap, m  
 $T$  : torque, Nm

$\Psi$  : linkage flux, Wb

### Subscripts

$d$  : direct axis  
 $q$  : quadratic axis  
 $a$  : armature

\* 차경수, E-mail: chakungsoo@hanyang.ac.kr

## 1. 서론

전기자동차(Electric Vehicle, EV)의 견인용 전동기는 자동차 연비 및 성능에 전동기의 질량이 직접적인 영향을 주기 때문에 출력밀도가 매우 중요한 사양이다. 희토류 영구자석을 사용한 매입 자석형 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 출력밀도가 높기 때문에 EV 견인용 전동기로 적합하여 많이 사용되고 있다.

이와 같이 희토류 금속은 수급불안정성이 높기 때문에 희토류 금속을 사용하지 않는 탈 희토류의 움직임을 보이고 있다. 출력밀도가 높은 IPMSM을 대체할 전동기로 권선 계자형 동기 전동기(Wound Field Synchronous Motor, WFSM)를 국내외에서 연구가 활발히 진행되고 있다. WFSM은 계자 자속을 전기자의 형태로 발생시키기 때문에 탈희토류가 가능하며 계자 기자력의 세기를 조절하기 쉬워 넓은 운전영역에서 사용하기에 적합하다.<sup>1)</sup>

현재 가장 일반적으로 사용되는 전동기 권선은 원형 동선을 이용하며, 점적률은 약 40[%] 수준이다. 그에 비해 헤어핀 권선의 점적률은 약 60[%] 수준으로 동일한 권선 수를 유지할 때 고정자의 슬롯 면적을 원형 동선을 사용할 경우보다 50[%] 저감하여 설계할 수 있다. 이를 통해 고정자 치의 포화도를 개선하여 역기전력의 외형률(Total Harmonic Distortion, THD)이 줄어들고 회전자의 외경을 증가시켜 동일 출력 조건에서 적층 길이를 약 10[%] 저감할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 WFSM에 헤어핀 권선을 적용하여 같은 성능에서 전동기의 부피를 줄이는 출력밀도 개선 설계를 진행했다. 2-D 유한요소해석(Two-Dimensional Finite Element Method, 2-D FEM)을 통해 두 전동기의 성능 및 효율을 검증하고 출력밀도를 산정하여 비교할 것이다.

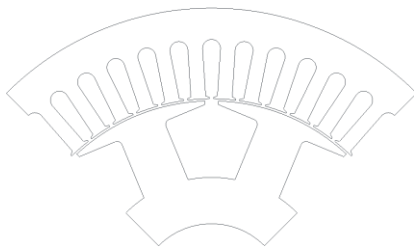


Fig. 1 Shape of initial model

## 2. 대상 전동기

WFSM의 회전자 권선에는 브러쉬와 슬립링이 연결되어 회전자에 연속적인 DC전류를 인가해주게 된다. 회전자에 인가되는 전류에 의해 회전자 권선은 일정한 방향으로 자속을 생성하게 되는 전자석의 형태로 IPMSM의 영구 자석을 대체한다. 식 (1)은 권선 계자형 동기전동기의 토크 수식이다.<sup>2)</sup>

$$T = P \left\{ \psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right\} \quad (1)$$

Fig. 1은 대상 전동기의 형상이다. Table. 1은 대상 전동기의 형상 치수 및 사양을 나타내었다.

대상 전동기는 8극 48슬롯의 구조이며 출력은 120[kW]이며 출력밀도는 2[kW/kg]이다. 권선방식 및 방법은 원형 도선을 사용해 치에 권선을 감아주는 일반적인 권선 방식을 사용한 분포권이다.

## 3. 출력 밀도 개선 설계

### 3.1 헤어핀 권선

헤어핀 권선은 평각동선을 헤어핀(Hair-pin) 형태로 성형하여 고정자의 슬롯에 삽입하여 끝 부분을

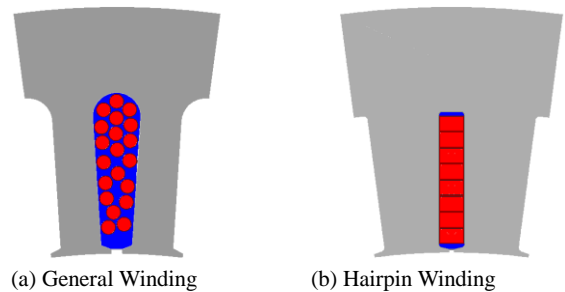


Fig. 2 Comparison of the general winding and hairpin winding

Table 1 Shape dimension and spec of initial model

종류	Unit	초기 모델
항목		
극수 / 슬롯수	-	8/48
출력	kW	120
권선법	-	분포권
출력 밀도	kW/kg	2

용접하는 권선 방식을 말한다.<sup>3)</sup>

Fig. 2은 일반적인 권선 방식과 헤어핀 권선 방식을 그림으로 나타낸 것이다. 점적물은 고정자의 슬롯면적 대비 동선의 면적을 나타내는 척도이다. 일반적인 권선 방식은 원형동선을 사용하기 때문에 슬롯 안에 차곡차곡 동선을 감더라도 점적률이 약 40[%]이며 슬롯 면적의 약 60[%]가 권선이 차지하지 않는 면적이며 이를 사 공간(Dead Space)이라 한다. 점적률이 낮을수록 사 공간이 슬롯 면적에서 차지하는 비율이 증가하게 되어 동일한 출력에서 전동기의 부피를 키우고 무게를 늘려 동일한 출력하에 출력밀도를 낮추는 원인이 된다.

헤어핀 권선 방식의 점적률은 약 60[%] 수준으로 사 공간이 약 40[%] 수준으로 일반적인 권선 방식에 비해 사 공간이 줄어 슬롯 면적을 저감시킬 수 있다. 일반적인 권선 방식과 동일한 출력 조건에서 비교할 경우 전동기의 부피와 무게를 저감시켜 출력밀도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

### 3.2 개선 설계

대상 전동기의 고정자 슬롯 면적이 1[p.u.]이라면 반면에 헤어핀 권선 방식을 사용한 개선 설계 모델의 경우 0.5[p.u.]만 필요하다. 고정자 치의 길이가 짧고 폭을 넓게 설계할 수 있어 치의 포화도가 개선되어 역기전력의 THD가 개선된다.

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2)$$

개선 설계 전동기의 경우 고정자의 내경이 증가되어 회전자의 외경을 대상 전동기보다 늘려줄 수 있다. 회전자의 외경을 늘려주게 되면 토크는 식 (2)와 같기 때문에 더 적은 힘으로도 동일한 토크를 발생시킬 수 있으며 전동기의 토크가 동일하게

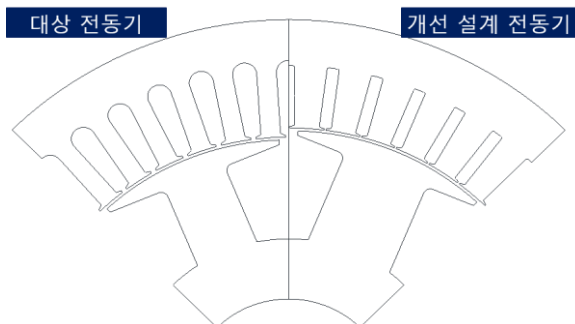


Fig. 3 Shape of initial model and improvement model

발생시키기 위해 개선 모델의 적층 길이를 줄여야 한다. 결과적으로 전동기의 부피와 무게를 줄이고 출력밀도를 개선시킬 수 있다.

### 3.3 전동기 형상 치수 및 사양 비교

Fig. 3에 대상 전동기와 개선 설계 전동기의 형상을 비교해 놓았다. Table 2에는 두 전동기의 형상 치수 및 사양을 나타냈다. Fig. 3으로 두 전동기를 비교해보았을 때 고정자의 외경은 동일한 반면에 개선 설계 모델은 회전자의 외경이 증가했다.

Fig. 4는 기존 모델과 개선 모델의 선간 역기전력을 나타낸 그래프이고 Fig. 5는 그 THD를 나타내었다. 치 폭이 늘어나면서 포화도가 개선되어 역기전력의 THD가 개선되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 기존 모델의 전동기 효율맵이고 Fig. 7은 개선 모델의 전동기 효율맵이다. 기존 모델의 최고

Table 2 Shape dimension and spec of initial and improvement model

종류	Unit	초기 모델	개선 모델
항목			
극수 / 슬롯수	-	8 / 48	
최대 출력	kW	120	
고정자 치 길이	p.u.	1	0.81
고정자 치 폭	p.u.	1	1.33
고정자 외경	p.u.	1	1
회전자 외경	p.u.	1	1.04
적층 길이	p.u.	1	0.89
고정자 치 폭	p.u.	1	1.33
전동기 부피	p.u.	1	0.89
출력밀도	kW/kg	2	2.3

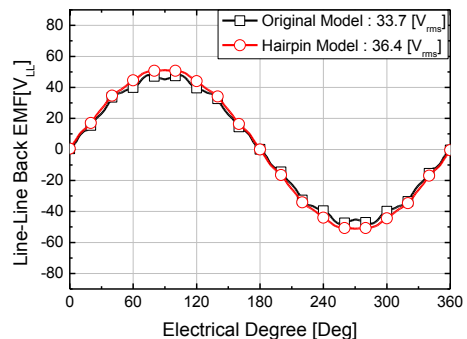


Fig. 4 Line to line BEMF of initial model and improvement model

효율은 95.9[%] 이고 개선 모델의 최고 효율은 95.5[%]로 유사한 수치를 나타낸다.

기존 모델의 부피에 비해 개선 모델의 부피는 약 89[%]로 설계되었으며 출력밀도는 기존 모델의 2[kW/kg]에서 2.3[kW/kg]으로 15[%]만큼 커졌다.

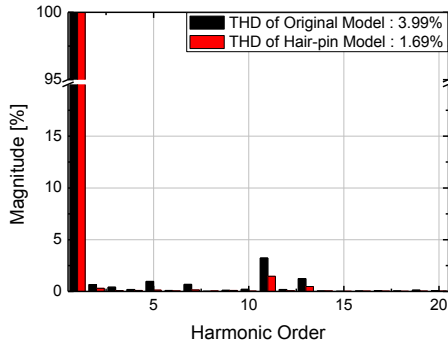


Fig. 5 THD of line to line BEMF about initial model and improvement model

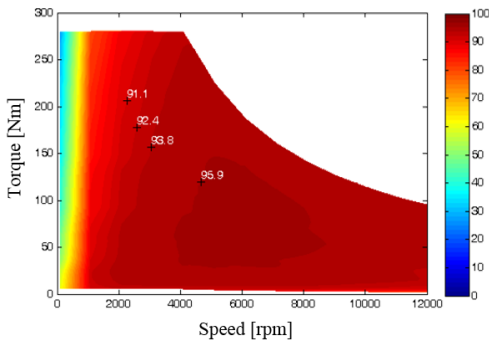


Fig. 6 Efficiency map of initial model

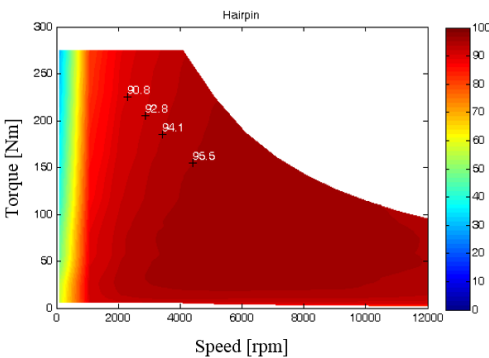


Fig. 7 Efficiency map of improvement model

## 4. 결론

본 논문에서는 기존의 권선 방식이 아닌 헤어핀 권선 방식을 채택하여 전기자동차용 구동전동기인 권선 계자형 동기전동기를 개선 설계하였다. 기존의 권선 방식은 점적률이 낮아 사 공간이 많이 존재할 수 밖에 없어 슬롯을 크게 설계할 수 밖에 없었다. 하지만 헤어핀 권선 방식은 점적률이 약 60[%] 수준으로 일반적인 권선 방식에 비해 사 공간이 적어 슬롯의 면적을 작게 설계할 수 있다. 그리고 슬롯의 면적을 줄임과 동시에 치의 폭을 크게 가져갈 수 있어 역기전력의 THD 개선에도 도움을 주며 동일한 출력을 내는 전동기를 설계할 때 부피와 무게를 저감시켜 출력밀도를 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

전기자동차에 탑재할 전동기는 부피와 무게에 제약이 따르기 때문에 헤어핀 권선 방식을 채택한다면 전기자동차용 구동모터를 설계할 시 이점이 될 것으로 예상된다.

## References

- 1) D.S.Jung, J.H.Song, Y.H.Kim, H.D.Lee, "Optimize Design of the Traction Motor Using the Hairpin Winding", The Korea Society Of Automotive Engineers, pp.1548-1552, 2012.
- 2) B. H. Lee, "Design and Maximum Efficiency Control of Wound Rotor Synchronous Machine for EV", Ph.D. Thesis, Department of Automotive Engineering, Hanyang University, February 2013.
- 3) S.H.Do, B.H.Lee, S.H.Chai, J.P.Hong, "Torque ripple reduction of wound rotor synchronous motor", The Korea Society Of Automotive Engineers, pp.1654-1658, 2012.