

## EV용 CFSM의 극 수, 회전자 형상에 따른 특성 분석 및 토크 밀도 향상 설계

Characteristic Analysis according to Pole Number and Rotor Shape of CFSM for EV and Design for Improving Torque Density

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| 저자<br>(Authors)    | 박진철, 박민로, 박현진, 홍정표, 박수환, 이의천<br>Jin-Cheol Park, Min-Ro Park, Hyeon-Jin Park, Jung-Pyo Hong, Soo-Hwan Park, Eui-Chun Lee                         |
| 출처<br>(Source)     | <a href="#">한국자동차공학회 춘계학술대회</a> , 2019.5, 1279-1282(4 pages)  |
| 발행처<br>(Publisher) | <a href="#">한국자동차공학회</a><br>The Korean Society Of Automotive Engineers  |
| URL                | <a href="http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748090">http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE08748090</a> |
| APA Style          | 박진철, 박민로, 박현진, 홍정표, 박수환, 이의천 (2019). EV용 CFSM의 극 수, 회전자 형상에 따른 특성 분석 및 토크 밀도 향상 설계. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1279-1282                                  |
| 이용정보<br>(Accessed) | 한양대학교<br>166.***.168.162<br>2019/10/04 12:56 (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.

# EV용 CFMS의 극 수, 회전자 형상에 따른 특성 분석 및 토크 밀도 향상 설계

박진철<sup>1)</sup> · 박민로<sup>1)</sup> · 박현진<sup>1)</sup> · 홍정표<sup>\*1)</sup> · 박수환<sup>1,2)</sup> · 이의천<sup>1,2)</sup>

한양대학교 미래자동차공학과<sup>\*1)</sup> · 한국생산기술연구원<sup>2)</sup>

## Characteristic Analysis according to Pole Number and Rotor Shape of CFMS for EV and Design for Improving Torque Density

Jin-Cheol Park<sup>1)</sup> · Min-Ro Park<sup>1)</sup> · Hyeon-Jin Park<sup>1)</sup> · Jung-Pyo Hong<sup>\*1)</sup>  
Soo-Hwan Park<sup>2)</sup> · Eui-Chun Lee<sup>2)</sup>

<sup>\*1)</sup>Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

<sup>2)</sup>Korea Institute of Industrial Technology Mechatronics Convergence Research Group, 320 Techno sunhwan-ro, Yuga-myeon, Dalseong-gun, Deagu 42990, Korea

**Abstract** : In this paper, the advantages of the CFMS (Concentrated flux synchronous motor) using ferrite permanent magnet are introduced. Also, the direction of rotor design for improving torque density is presented. In addition, the CFMS using ferrite permanent magnet was designed and compared with the IPMSM (Interior permanent magnet synchronous motor) using Nd permanent magnet considering the same design specifications. First, the advantages of the CFMS are described by comparing the rotor shape of IPM and the rotor shape of CFMS. And then, the air gap flux density of CFMS was converted to mathematical modeling. The design parameters for improving the torque density are also summarized. Secondly, the tendency of air gap flux density according to pole number and rotor shape was confirmed. The design direction for increasing the torque density is presented and the design of the CFMS is carried out based on the design specifications. Finally, CFMS and IPMSM were compared by volume, weight and torque density.

**Key words** : Electric vehicle (EV, 전기자동차), Concentrated flux synchronous motor (CFMS, 자속 집중형 동기 전동기), Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM, 매입형 영구자석 동기 전동기), Torque per rotor volume (TRV, 회전자 부피 당 토크), Shape ratio (SR, 형상 비)

### Nomenclature

$A_g$  : cross section area of air gap per pole, m<sup>2</sup>.

$B_{rem}$  : residual induction, T

$B_g$  : air gap flux density, T

$D_r$  : rotor diameter, m

$g$  : air gap length, m

$p$  : pole pair

$h_m$  : PM height, m

$t_m$  : PM thickness, m

$\mu_0$  : vacuum permeability, H/m

$\mu_{rec}$  : recoil permeability

\* Corresponding Author, Email: hongjp@hanyang.ac.kr

## 1. 서 론

최근 대기오염의 적극적인 해결을 요구하는 여론이 자동차 시장에 빠르게 반영되고 있다. 다양한 해결 방향 중 하나로 모터를 이용한 전기자동차 (Electric Vehicle, EV)/하이브리드자동차 (Hybrid Electric Vehicle, HEV)에 대한 공급 확대를 검토하고 있다. 하지만 EV/HEV용 전동기는 희토류 영구자석을 사용하는 경우가 대부분이다. 희토류 영구자석은 공급 및 가격의 불안정성이 존재한다.<sup>1,2)</sup> 결국 EV/HEV의 생산을 어렵게 하는 원인이 된다. 따라서 탈희토류 전동기의 개발이 활발히 진행되고 있다. 탈희토류 전동기로는 IM (Induction Machine), Ferrite 영구자석을 사용하는 CFSM (Concentrated Flux Synchronous Machine)이나 Multi-layer IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine), WFSM (Wound Field Synchronous Machine) 등이 있다.

본 논문은 다양한 탈희토류 전동기 중에서 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM의 장점을 분석하고 토크 밀도 향상을 위한 회전자 설계 방향을 제시하였다. 그리고 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM의 설계를 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM과 동일 조건에서 진행하고 비교하였다. 먼저 CFSM rotor 형상과 IPM rotor 형상을 비교하여 CFSM의 장점을 소개한다. CFSM의 장점은 극 수가 증가하면 공극자속밀도도 증가한다는 것이다. 그러므로 CFSM의 장점을 분석하기 위하여 공극자속밀도를 수학적 모델링 하여 극 수 및 회전자 형상에 따른 공극자속밀도의 경향을 확인하였다. 공극자속밀도의 경향으로부터 토크 밀도가 증가하는 설계변수와 방향을 제시하고 설계 사양을 기반으로 CFSM의 회전자 설계를 진행하였다. Nd 영구자석을 이용한 IPMSM과 동일한 전류 밀도와 점적률을 고려하여 고정자 형상을 결정하였다. 마지막으로 두 전동기의 부피, 무게, 토크 밀도를 비교하였다.

## 2. IPM Rotor 와 CFSM Rotor 의 공극자속밀도

그림 1은 극 수에 따른 IPM rotor 형상을 도식화한 것이다. 그림 2는 극 수에 따른 CFSM rotor 형상을

도식화한 것이다. 두 모델의 공통적인 가정으로 회전자 외경, 공극 길이, 총 자석사용량이 동일할 경우를 고려하여 극 수 증가에 따른 공극자속밀도를 비교하면 경향성이 각각 다르다. IPM rotor 형상에서 극 수가 증가하면 극당 공극단면적과 자석 폭이 같은 비율로 감소한다. 따라서 극 수가 증가하면 공극자속밀도가 일정하다. 반면에 CFSM rotor 형상에서 극 수가 증가하면 자석 폭은 일정하지만 극당 공극단면적이 감소한다. 따라서 극 수가 증가하면 공극자속밀도가 증가한다. 그러므로 CFSM의 장점은 극 수가 증가하면 큰 공극자속밀도를 확보할 수 있다. 그래서 잔류자속밀도가 Nd 영구자석보다 낮은 Ferrite 영구자석을 사용하더라도 CFSM 구조의 장점을 활용한다면 Nd 영구자석을 사용한 IPMSM과 동등한 공극자속밀도 확보가 가능하다.

그림 2에서 고정자를 평활철심으로 모델링하여 슬롯에 대한 효과를 무시하고 철심투자율은 무한대로 가정하여 CFSM 형상에 대한 공극자속밀도 식을 정리하면 식 (1)과 같다. 식 (1)에서 공극자속밀도의 영향을 주는 요인은 극 수, 회전자 외경, 자석의 폭, 길이이다. CFSM의 자석 폭과 길이는 회전자 형상에 상관관계가 있고 따라서 극 수 뿐만 아니라 회전자 형상 변화에 따라 공극자속밀도가 변화한다.

$$B_{gm} = \frac{B_{rem}}{\frac{\pi D_r}{4p h_m} + \frac{2g\mu_{rec}}{t_m}} \quad (1)$$

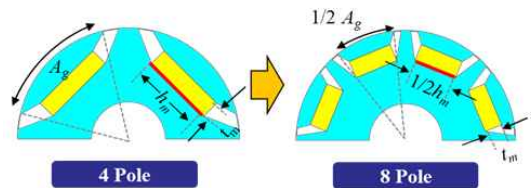


Fig. 1 극 수에 따른 IPM rotor 형상

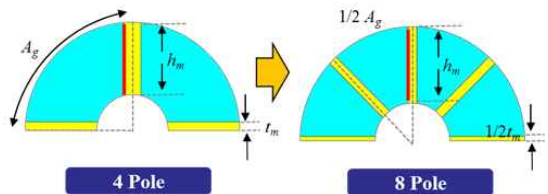


Fig. 2 극 수에 따른 CFSM rotor 형상

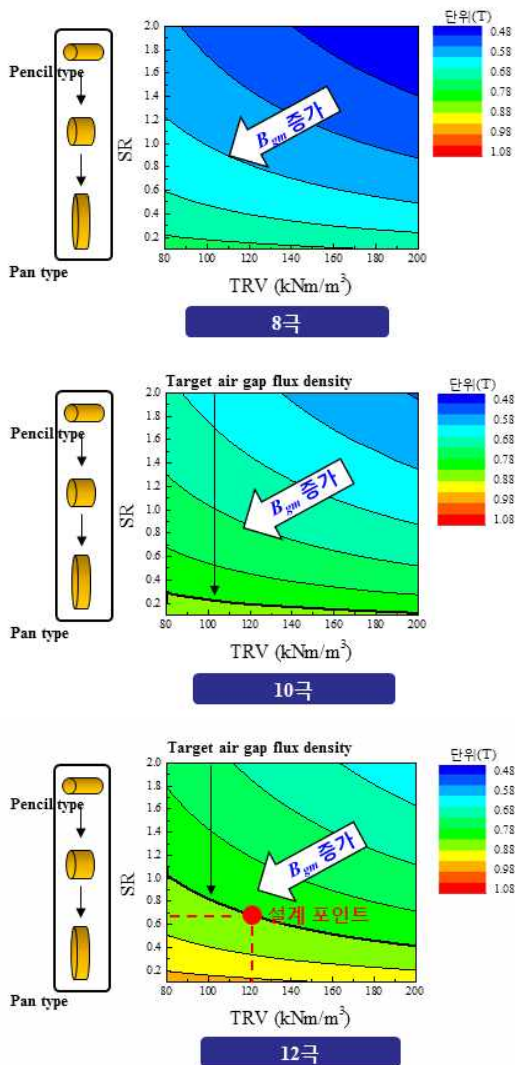


Fig. 3 극 수와 회전자 형상에 따른 CFMS의 공극자속 밀도 경향

### 3. 극 수와 회전자 형상에 따른 공극자속밀도

그림 3는 극 수와 회전자 형상에 따른 공극자속밀도 경향을 표현한 것이다. 식 (1)에서 공극자속밀도의 영향을 주는 변수는 크게 회전자 형상과 극 수이다. 회전자 형상은 TRV(Torque per rotor volume)와 SR(Shape ratio)로 표현이 가능하다. TRV는 동일 토크에서 회전자 부피를 결정한다. SR은 적층 길이와 회전자 외경의 비로 회전자 형상을 표현한 것이다.<sup>3)</sup>

SR이 증가하면 전동기 형상이 Pencil type, 감소하면 Pan type 형태가 된다. 회전자 형상이 동일할 경우, 극 수가 증가하면 공극자속밀도가 증가한다. 또한 극 수가 동일한 경우, 공극자속밀도는 SR과 TRV가 작을수록 증가하는 것을 알 수가 있다. 따라서 토크 밀도가 증가하는 회전자 설계 방향은 극 수를 증가시키거나 SR, TRV를 줄여 Pan type 형태의 회전자 형상이다. 위와 같은 극 수와 회전자 형상을 통해 공극자속밀도의 경향을 확인하고 Nd를 사용한 IPMSM 동일 공극자속밀도와 전원사양을 고려했을 때 12극에서 회전자 형상을 결정하였다.

### 4. 고정자 설계

고정자 설계는 IPMSM의 전류 밀도, 점적률과 동일하게 적용하여 진행하였다. 그림 3처럼 고정자 외경과 슬롯 면적을 증가시키면서 목표 토크에 만족하는 고정자 외경과 슬롯 면적을 선정한다. 그 다음으로 그림 4처럼 슬롯 면적을 고정하고 최대 토크가 발생하는 치, 요크 폭을 찾고 고정자 형상을 결정하였다.

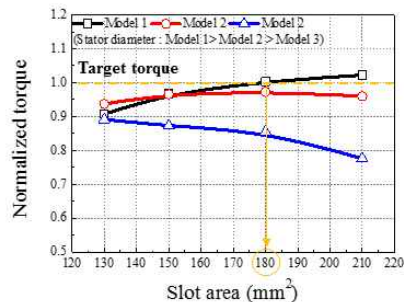


Fig. 4 슬롯과 고정자 외경에 따른 토크

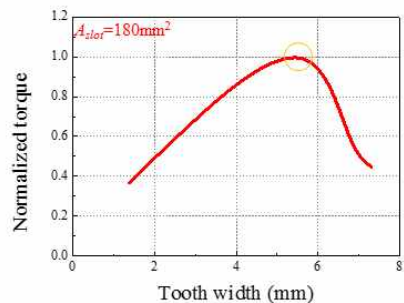


Fig. 5 치, 요크 폭에 따른 토크

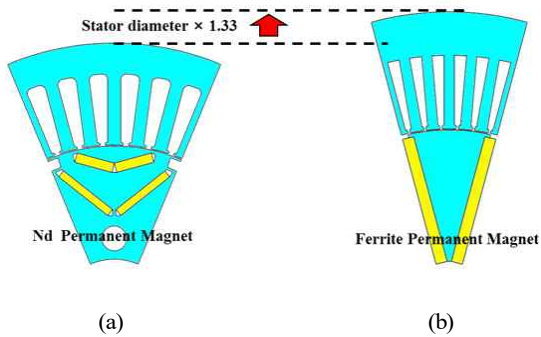


Fig. 5 (a) Nd 영구자석을 이용한 IPMSM (b) Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM

Table 1 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM 과 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM 비교

| Normalized      | IPMSM (Nd) | CFSM (Ferrite) |
|-----------------|------------|----------------|
| Power           | 1          |                |
| Stator diameter | 1          | 1.33           |
| Stack length    | 1          | 0.72           |
| Volume          | 1          | 1.27           |
| Torque density  | 1          | 0.79           |
| Weight          | 1          | 1.13           |

#### 4. Nd 영구자석을 이용한 IPMSM과 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM 비교

그림 5는 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM 형상과 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM 형상을 표현한 것이다. 표 1은 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM 과 Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM의 출력, 부피, 토크 밀도, 무게를 비교한 것이다. 두 모델의 동일 설계 조건은 출력, 공극자속밀도, 전류밀도, 점적률이다. Ferrite 영구자석을 이용한 CFSM이 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM보다 고정자 외경은 1.33배, 부피는 1.27배, 무게는 1.13배 증가하였고 적층길이는 0.72 배, 토크 밀도는 0.79배 감소하였다.

#### 5. 결론

본 논문은 CFSM의 장점과 토크 밀도 향상을 위한 설계 방향을 제시하였다. 그리고 Nd 영구자석을

사용한 IPMSM과 전동기 크기 및 무게를 비교하였다. 먼저 CFSM의 장점을 CFSM rotor 형상과 IPM rotor 형상을 비교하여 서술하였다. CFSM의 장점은 극 수를 증가시키면 공극자속밀도가 증가한다. 따라서 잔류자속밀도가 낮은 Ferrite 영구자석을 CFSM에 적용하더라도 Nd 영구자석을 사용한 IPMSM과 동등한 공극자속밀도를 확보할 수 있다. 그리고 CFSM의 형상으로부터 공극자속밀도를 수학적 모델링 하였다. 수학적 모델링을 기반으로 극 수와 회전자 형상에 따른 공극자속밀도 경향을 확인하였다. 그 결과 극 수가 증가할수록 TRV, SR이 감소할수록 공극자속밀도는 증가하였다. 공극자속 밀도의 증가는 동일 사이즈에서 토크 증가를 의미하므로 토크 밀도의 향상을 위한 설계 방향과 동일하다. 그 다음으로 Nd 영구자석을 이용한 IPMSM 과 비교하였다. 동일 조건인 출력, 공극자속밀도, 점적률, 전류밀도를 기반으로 하여 부피, 토크 밀도, 무게 증감을 비교 평가하였다. 동일 조건에서는 CFSM이 부피와 무게가 증가하였고 토크 밀도는 감소하였다. 하지만 극 수나 회전자 형상 변화를 통해 공극자속밀도를 확보하는 회전자 설계를 진행한다면 토크 밀도의 증대가 예상된다.

#### References

- 1) Jin-Cheol Park, Kyoung-Soo Cha, Seung-Hee Chai, Jung-Pyo Hong, "Efficiency Improvement through Maximum Efficiency Control in WFSM for EV", KSAE Conf., pp.1197-1201, 2015.
- 2) Kyoung-Soo Cha, Dong-Min Kim, Myung-Seop Lim, Jung-Pyo Hong, "Comparison of Vehicle Efficiency Applying Rare Earth Free Concentrated-flux Synchronous Motor and Rare Earth Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to Driving Cycle", KIEE Conf., pp.858-859, 2015.
- 3) Hea-Joong Kim, Jea-Sik Jeong, Myung-Hwan Yoon, Jea-Won Moon, Jung-Pyo Hong "Simple Size Determination of Permanent-magnet Synchronous Machine", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL.64, No.10, pp.7972-7982, 2017.