

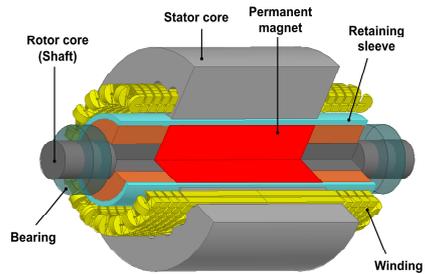
## 해석적인 방법을 이용한 페라이트 영구자석을 갖는 초고속 전동기의 특성 해석

김관호\*\*, 최지환\*\*, 최장영\*, 장석명\*\*\*  
 충남대학교\*, 현대 모비스\*\*, 썸스하이테크엔지니어링

### Characteristics Analysis of High Speed Synchronous Motor Using Ferrite Permanent Magnet

Kwan-Ho Kim\*, Ji-hwan\*\*, Jang-Yuonng Choi\*, Seok-Myeong Jang\*\*\*  
 Chungnam National University\*, HYUNDAI MOBIS\*\*, Sems hightech engineering\*\*\*

**Abstract** - 초고속 전동기의 경우 시스템의 경량화, 소형화를 가능하게 함으로써 에너지 변환 효율을 크게 증가시킬 수 있어 여러 산업 분야에서의 적용이 점차 증가되고 있다. 하지만 초고속 전동기의 회전자에 쓰이는 희토류 영구자석은 높은 가격과 원료 수급의 불안정성으로 인해 대량 생산에 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 저렴한 가격과 재료 수급이 용이한 페라이트 영구자석을 이용한 7.5kW, 60000rpm급 초고속 전동기를 제시하였으며, 공간 고조파법을 사용하여 자계 특성 해석을 수행하였다. 해석 결과의 타당성은 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 타당성을 입증하였다.



〈그림 2〉 초고속 전동기의 구조

## 1. 서 론

최근 전동기 제어 기술의 발달로 전동기의 최대 운전 속도가 높아졌고, 이에 따라 초고속 운전이 필요한 시스템에서 가속 변속기를 제거할 수 있게 되었다. 그 결과 시스템의 경량화, 소형화가 이루어졌고, 동시에 시스템의 에너지 변환 효율 또한 높아지게 되었다[1]. 초고속 전동기는 고속 공작 기계, 터보 분자 펌프, 마이크로 가스 터빈, 터보 압축기, 고속 원심 분리기 등 산업 분야 여러 곳에서 사용되고 있다[2,3]. 기존의 초고속 전동기의 응용 분야는 그림 1에서와 같이 주로 일반 산업분야에서 활용되어 왔으며, 소 품종·소량 생산에 초점을 맞추어 개발되어 왔다. 그로인해 초고속 전동기의 개발에 있어서 가격적인 측면 보다는 보다 나은 성능과 높은 효율을 중심으로 연구가 진행되어 왔다. 하지만 미래의 초고속 전동기의 응용 분야는 전기자동차나 연료전지 차와 같은 교통 및 수송 분야로 확대될 것으로 예상되며, 초고속 전동기의 수요가 확대됨에 따라 대량 생산이 필요하게 될 것이다. 대량 생산 체제에서는 초고속 전동기의 단가 절감이 매우 중요한 요인으로 작용한다. 현재 초고속 전동기의 회전자는 희토류 계열인 NdFeB 또는 SmCo 영구자석을 사용하는데, 이중 온도 특성이 좋은 SmCo 영구자석이 주로 사용되고 있다. 하지만 SmCo 영구자석의 경우 가격이 매우 비싸며 희토류를 사용하기 때문에 재료 수급에 있어 전량 수입에 의존해야 하는 문제점이 있다. 현재는 희토류 가격이 어느 정도 안정상태에 있지만 2010년 중국에서의 희토류 자원 무기화로 인해 희토류 가격이 크게 오른 적이 있으며, 현재도 중국은 희토류에 대한 수출 쿼터제를 유지하고 있다. 따라서 희토류 영구자석을 사용하는 초고속 전동기의 경우 높은 가격이나 재료 수급에 대한 불안정성이 해결되지 않는다면 대량 생산에 큰 걸림돌로 작용하게 될 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 희토류 영구자석을 대체하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[4].

본 논문에서는 높은 가격과 재료 수급이 불안정한 희토류 영구자석을 사용한 초고속 전동기의 회전자를 페라이트 영구자석으로 대체하기 위한 연구를 수행하였다. 페라이트 영구자석의 경우 SmCo 영구자석과 비교하여 약 45% 수준의 잔류 자속밀도를 갖지만 가격이 저렴하며 재료

〈표 1〉 초고속 전동기의 설계사양

사양	모델	Ferrite PM
정격 용량		7.5 [kW]
정격 속도		60,000 [rpm]
영구자석 재질		Ferrite
영구자석 Br		0.45 [T]
Slot 수		24 slot
Stator 외경		97 [mm]
Rotor 외경		51 [mm]
Sleeve 두께		2 [mm]
권선 법		분포권
Stack 길이		72 [mm]
슬롯 당 턴 수		8 턴
점적율		35 %

수급에 있어 산화철을 이용하기 때문에 매우 안정적인 장점을 갖는다. 또한 저온 감자 특성을 갖기 때문에 회전자에서의 손실에 의한 열 발생 시 감자의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 하지만 낮은 잔류 자속밀도와 보자력으로 인해 전동기 체적의 증가가 불가피 하며, 전기자 반작용 자계에 대한 감자의 위험성을 갖는 단점도 존재한다.

본 논문에서는 페라이트 영구자석을 이용한 초고속 전동기의 자계 특성 해석을 다룬다. 자계 특성해석은 공간 고조파법을 사용하여 기기의 각 영역에서의 자기벡터퍼텐셜 및 자속밀도 등을 도출하였으며, 공극에서의 자속밀도를 통하여 역기전력을 예측하였다. 최종적으로 공간고조파법을 이용한 자계 특성 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

## 2. 전자기 특성해석

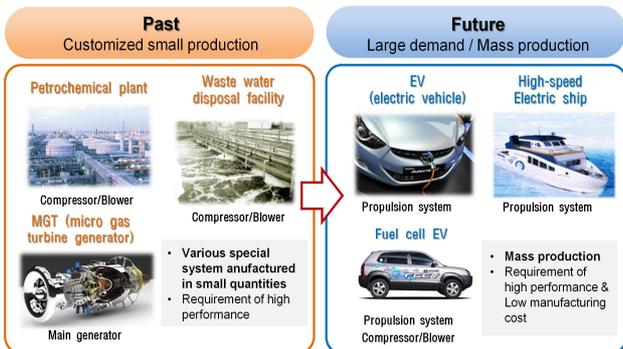
### 2.1 해석모델

초고속 전동기의 기본적인 구조는 그림 2에서와 같이 2극의 영구자석 회전자와 고속 회전 시 영구자석의 비산을 방지하기 위한 슬리브, 치·슬롯 구조를 갖는 고정자를 갖는다. 표 1에서는 본 논문에서 해석할 초고속 전동기의 사양을 보여준다.

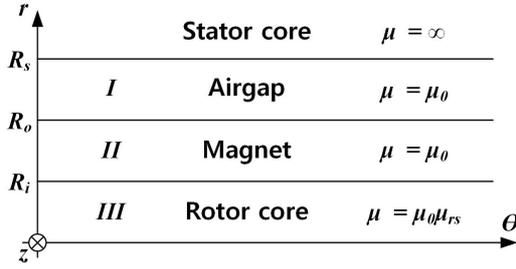
### 2.2 영구자석의 자화 모델링

평행방향 작자를 갖는 영구자석의 자화모델링 식은 다음과 같다.

$$M = \text{Real} \left[ \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} M_{rn} e^{jn p \theta} i_r + M_{bn} e^{jn p \theta} i_\theta \right] \quad (1)$$



〈그림 1〉 초고속 전동기의 응용 분야의 변화



〈그림 3〉 영구자석에 의한 자계 특성 해석 모델

여기서, \$p\$는 극 쌍수, \$n\$은 고조파 차수, \$M\_{rn}\$과 \$M\_{\theta n}\$은 각각 영구자석의 원주방향 및 반경방향 푸리에 계수를 의미한다.

### 2.3 영구자석에 의한 자속밀도 특성

그림 3은 영구자석에 의한 자계 특성 해석을 위한 2차원 해석모델을 보여준다. 영구자석 기기의 자계 분포 예측을 위한 해석은 자계 \$H\$, 자속밀도 \$B\$, 그리고 전류밀도 \$J\$를 갖는 Maxwell 방정식으로부터 \$B = \mu\_0(H + M)\$, \$\nabla \times H = J\$, \$H = B/\mu\_0\$, \$\nabla \cdot B = 0\$으로써 얻어진다. 여기서, \$\mu\_0\$는 공기 중의 투자율을 나타낸다. 영구자석영역은 전류원이 존재하지 않으므로 \$\nabla \times H = 0\$으로 표현된다. 이들 식으로부터 그림 3의 각각의 매질 (I, II, III)에 대한 해석모델의 지배방정식은 식 (2)와 같은 포아송 방정식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 A_n^{II} = 0 \quad \text{공극 영역} \quad (2-a)$$

$$\nabla^2 A_n^{III} = -\mu_0(\nabla \times M_n) \quad \text{영구자석 영역} \quad (2-b)$$

여기서, \$A\_n = \text{Re} A\_{zn}(r)e^{jnp\theta}\$이고, 식 (2-b) 우변의 \$\nabla \times M\_n\$은 식 (3)과 같다.

$$\nabla \times M_n = \frac{jnp}{r}(-M_{rn} + \frac{M_{\theta n}}{jnp})e^{jnp\theta}i_z \quad (3)$$

식 (2)의 지배방정식에 대한 2차원 극 좌표계에서 각각의 매질에 대한 특성식은 식 (4)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 A_{zn}^{II}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{zn}^{II}}{\partial r} - (np)^2 \frac{A_{zn}^{II}}{r^2} = 0 \quad (4-a)$$

$$\frac{\partial^2 A_{zn}^{III}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_{zn}^{III}}{\partial r} - (np)^2 \frac{A_{zn}^{III}}{r^2} = \mu_0 \frac{jnp}{r}(-M_{rn} + \frac{M_{\theta n}}{jnp}) \quad (4-b)$$

식 (4-a), (4-b)의 일반해는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$A_{zn}^{II} = C_0^{II} r^{np} + D_0^{II} r^{-np} \quad (5-a)$$

$$A_{zn}^{III} = C_0^{III} r^{np} + D_0^{III} r^{-np} + \frac{j r \mu_0 np M_n}{(np)^2 - 1} \quad (5-b)$$

식 (6)은 계수를 구하기 위해 변환된 행렬식이다.

$$XY = U \quad (6)$$

행렬식의 해석 결과 영역 IV의 임의의 반경에서 영구자석에 의한 자속밀도는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

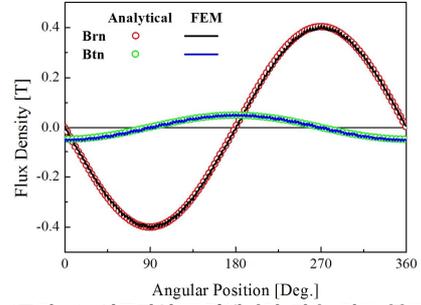
$$B_{rn}^{III}(r) = \frac{jnp}{r} (C_0^{III} r^{np} + D_0^{III} r^{-np}) \quad (7-a)$$

$$B_{\theta n}^{III}(r) = -np (C_0^{III} r^{np-1} - D_0^{III} r^{-np-1}) \quad (7-b)$$

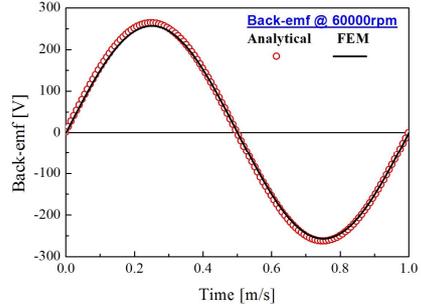
### 2.4 역기전력 상수

역기전력은 쇠교자속의 변화율로 정의되는데, 영구자석에 의한 권선의 중심에서의 자속밀도 \$B\_{rn}^w\$과 권선 표면의 면적 \$S\$에 의해 쇠교자속은 \$d\phi = B\_{rn}^w \cdot S d\theta\$로 표현되고, 1-코일피치를 대해 쇠교하는 자속 \$\lambda\$는 식 (8)과 같다.

$$\lambda = NL_{stk} R_w \int_0^{C_p} B_{rn}^w d\theta \quad (8)$$



〈그림 4〉 영구자석 표면에서의 자속 밀도 분포



〈그림 5〉 역기전력 해석 결과

여기서, \$C\_p\$는 1-코일피치를 나타내며, 이로부터 역기전력은 식 (9)와 같이 계산된다.

$$V_{emf} = -\frac{d\lambda}{dt} = -j\omega N\phi \quad (9)$$

## 3. 특성 해석 결과

그림 4는 영구자석 표면에서의 자속 밀도 분포를 나타낸다. 영구자석 표면에서 공간고조파법을 이용한 결과와 유한요소해석 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 5는 역기전력 해석 결과로써 해석적인 방법과 유한요소해석 모두 잘 일치함을 보여준다.

## 4. 결 론

초고속 전동기의 경우 대량 생산에 있어 높은 단가가 큰 문제점으로 발생한다. 본 논문에서는 이러한 회토투 영구자석의 높은 가격과 재료수급의 불안정성을 해결하기 위해 페라이트 영구자석을 사용한 초고속 전동기를 제시하였다. 공간 고조파법을 기반으로 다중층 특성해석기법을 통한 초고속 전동기의 자계 분포와 역기전력을 예측하였으며, 유한요소해석 결과를 통해 그 타당성을 검증하였다. 따라서, 본 논문에서 제시한 공간 고조파법을 이용할 경우 초고속 전동기의 초기 설계 시 매우 유용할 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 2-D 피미언스를 고려하여 슬롯의 의한 자계 분포를 해석 할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M.A.Rahman, Akira Chiba, Tadashi Fukao, "Super High Speed Electrical Machines Summary", IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp. 1272-1275, 2004.
- [2] N.Taghizadeh Irenji, "Calculation of electromagnetic rotor losses in high-speed permanent magnet machines", PhD. dissertation, Univ. of Southampton, UK, 1998.
- [3] Z. Q. Zhu, K.Ng, N.Schofield and D. How, "Analytical prediction of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surfaced-mounted permanent magnets. Part II : accounting for eddy current reaction field", fifth International Conference in Electrical Machines and Systems, vol.2, pp. 810-813, 2001.
- [4] T. Miura, S. Chino, M. Takemoto, S. Ogasawara, A. Chiba, and N. Hoshi, "A ferrite permanent magnet axial gap motor with segmented rotor structure for the next generation hybrid vehicle," in Proc. Int. Conf. Elect. Mach., Rome, Italy, Sep. 2010, pp. 1.6.