

FEA 기법을 이용한 수력용 영구자석 다극형 동기발전기 최적 설계

김경수*, 박성준*, 이성호**, 차현록**,
전남대*, 한국생산기술연구원**

Design of Permanent Magnet Synchronous Generators with Multi-Pole Rotor Motor for Water Power application by using FEM Analysis Method

Kyung-su Kim*, Sung-jun Park*, Sung-ho Lee**, Hyun-Rok Cha**
Chonnam National University*, Korea Institute of Industrial Technology**

Abstract - 현재 화석에너지 고갈에 따른 다양한 신재생에너지의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문은 영구자석을 사용한 수력용 영구자석 다극형 동기발전기의 기동토크 저감을 위한 최적설계방안에 대해 연구를 수행하였다. 먼저 FEA 해석기법을 이용한 수력용 영구자석 다극형 동기발전기의 설계 및 발전기 기동토크에 가장 큰 영향을 주는 코깅토크 저감 방안에 대해 연구하였다. 코깅토크 저감을 위해 고정자 skew비에 따른 코깅토크의 변화를 FEA해석기법을 통해 알아보고, 실제 고정자에 skew를 적용하였을 때, 코깅토크의 최소화에 가장 적합함을 알 수 있었다. 또한 실제 설계된 영구자석 다극형 동기발전기의 출력 및 코깅토크 측정 결과와 FEA해석결과를 비교 및 분석하여 FEA해석방법의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

최근 국제유가 상승 및 화석연료 고갈에 따른 에너지 시장의 위협에 따라 신·재생에너지가 새로운 에너지원으로 전 세계적으로 관심이 증가하고 있다. 이러한 시장 변화에 따라 여러 친환경 신재생에너지를 이용한 발전기의 개발에 대한 관심 및 수요가 증가하고 있으며 이와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다.

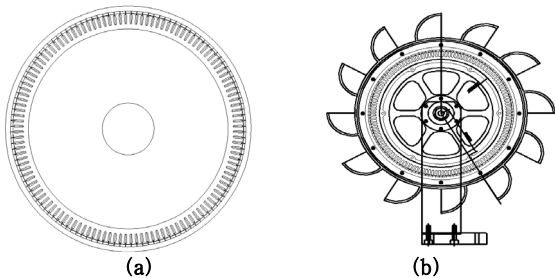
이중 영구자석형 동기발전기는 고밀도 에너지를 가지는 회도류계 영구자석의 사용으로 높은 운전 효율을 갖게 되며, 계자권선과 전류를 필요로 하지 않기 때문에 일반적인 유도기 및 동기기에 비해 구조면에서 단순화가 가능하며 다극 발전기의 제작이 용이한 장점을 가진다. 하지만 영구자석형 동기발전기는 고정자의 구조로 인한 공극의 불균형 때문에 발생하는 코깅토크에 의해 큰 기동토크를 필요로 한다는 문제가 있다.

따라서, 우리는 FEA해석기법을 이용하여 영구자석 다극형 동기발전기의 설계 및 기동토크 저감 방안에 대해 논하고자 한다. 먼저 FEA 해석기법을 이용하여 설계된 동기발전기의 최적설계방안에 대해 논의한 후, 고정자에 스류를 적용하였을 때, 기동토크에 미치는 영향 역시 FEA 해석을 이용하여 최적설계 방안을 제시하였다. 마지막으로 실제 제작된 다극형 동기발전기의 실험적 측정으로 FEA해석기법의 타당성 및 기동토크 저감 및 그 결과를 확인하였다.

2. 본 론

2.1 영구자석 다극형 동기발전기 설계 및 FEA 해석

그림 1은 영구자석형 동기발전기 설계 및 FEA해석에 사용될 모델이며, 표 1은 그림 1의 구체적인 설계사양을 나타내었다. 본 논문에서는 수력용 동기발전기의 소형화, 고효율 화를 위한 다극형의 형태의 영구자석형 동기발전기를 설계하였으며, 자기벡터자위와 2차원 극좌표계를 이용한 공극에서의 자계분포 해석 및 FEA해석 결과를 분석하였다. 다음으로 발전기 기동토크에 가장 큰 영향을 주는 코깅토크 계산을 위해 자속밀도 특성식을 이용하여 그 결과를 분석 하였다.



〈그림 1〉 (a) 설계된 모델 (b) 수력용 영구자석 동기발전기 적용모델

〈표 1〉 수력용 영구자석 다극형 동기발전기 설계사양

항목	제원	
고정자	재질	S60(silicon steel)
	외경	250mm
	상당 권선 수	50 turns
	선간 저항	17.2Ω
공극	공극길이	0.5mm
	극수	128 poles
회전자	외경	220mm
	회전속도	60rpm
	재질	Sm-co
영구자석	잔류자속밀도	1.382T

2.2 영구자석에 의해 나타나는 공극의 자계분포

우리는 다극형 동기발전기 모델의 영구자석에 의한 회전자 내부와 외부의 자계위상을 알아보기 위해 다음과 같은 방정식을 이용하였다. 이와 같은 계산방법은 고정자 구조를 슬롯리스 구조로 변환 후 계산한 방법이지만, 이미 많은 논문에서 이러한 구조적인 변화가 해석해의 신뢰성에 크게 영향을 주지 않음을 나타내고 있다, [1-2]

이러한 자속밀도(B) 벡터와 자계의 세기(H) 벡터는 다음과 같은 수식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H}_a & (\text{Air spaces}) \\ \vec{B} &= \mu_m \vec{H}_m + \mu_0 \vec{M} & (\text{permanent-magnet}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \vec{M} 은 잔류 자화 벡터(residual magnetization vector)이며, $\mu_m = \mu_0 \mu_r$ 은 가역투자율(recoil permeability)로 나타낸다. 한편, 영구자석 영역에는 전류가 없으므로 다음과 같은 포아송방정식에 따라 자기벡터 자위 A가 정의된다.[3]

$$\begin{aligned} \nabla \times A &= B \\ \nabla \cdot A &= 0 \\ \nabla^2 A^{L,III} &= 0 & (\text{the air-gap/shaft regions}) \\ \nabla^2 A^{II} &= -\mu_0 (\nabla \times M) & (\text{the permanent magnets}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 M은 영구자석의 자화를 나타내며, 위첨자 I,II,III는 각각 공극, 영구자석 및 축 영역을 나타낸다. 이중 M_m 및 $M_{\theta n}$ 은 각각 영구자석 자화의 반경방향 및 원주 방향 자화성분을 나타내며 평행방향 자화에 대한 식(3)으로 주어진다.

$$M_r = M_0 \alpha_p \sum_{n=1, \text{odd}} (C_n + D_n) \quad (3.a)$$

$$M_{\theta n} = M_0 \alpha_p \sum_{n=1, \text{odd}} (C_n - D_n) \quad (3.b)$$

$$C_n = \frac{\sin[(np+1)\alpha_p/(2p)]}{(np+1)\alpha_p \pi/(2p)} \quad (3.c)$$

$$D_n = \frac{\sin[(np-1)\alpha_p/(2p)]}{(np-1)\alpha_p \pi/(2p)} \quad (3.d)$$

여기서 α_p 는 영구자석 극호비를 나타내며, n과 p는 각각 n번째 고조파 차수 및 극 쌍수를 나타낸다.

2.2.1 코깅토크 특성식

코깅토크는 회전자의 회전에 따른 전기기기내의 에너지 변화로 인해 발생하는 것으로, 이 에너지 변화의 대부분은 공극 에너지로 나타나며 영구자석 및 요크에서의 에너지 변화를 무시하면 영구자석기기의 공극 에너지는 식 (4)로 표현된다.

$$W(a) \approx W(a)_{air} = \frac{1}{2\mu_0} \iiint_v B_{pm}^{slotting}((R_s + R_r)/2, \theta, \alpha)^2 dV \quad (4)$$

여기서 θ 와 α 는 각각 고정 및 회전자 기준 각이며, 둘 사이의 관계식은 식(5)과 같다

$$\theta - \alpha = \omega_r t \quad (5)$$

여기서 ω_r 은 회전자의 회전속도이며, 식 (4)은 식 (6)으로 정리된다.

$$W(a)_{air} = \frac{L_a}{4\mu_0} (R_s^2 - R_r^2) \int_{\theta} B_{pm}^{slotting}(\theta, \alpha)^2 d\theta \quad (6)$$

여기서 L_a 는 기기의 유효 축 방향 길이이며, 이와 같은 식을 슬롯팅을 고려한 자속밀도 식(7)에 대입하여 정리하면 식(8)과 같은 간단한 코깅토크 식을 얻을 수 있다.

$$B_{pm}^{slotting}(\gamma, \theta) = B_{rn}^I(\gamma, \theta) * \lambda(\gamma, \theta) \quad (7)$$

$$T_{cog}(\alpha) = \frac{-\partial W(\alpha)}{\partial \alpha} \quad (8)$$

2.2.2 스큐를 고려한 특성식

코깅토크 저감방법 중 가장 확실한 방법은 고정자 혹은 회전자에 스큐를 주는 것인데, 스큐의 영향에 대한 해석적인 고려는 식(9)로 주어지는 스큐 인자를 도입함으로써 가능해진다.

$$\frac{\sin(h\epsilon/2)}{h\epsilon/2} \quad (9)$$

여기서 $\epsilon = 2 * S_k * \pi / N_s$ 이며 S_k 는 스큐 비이다. 한편 h 는 식 (10)으로 표현된다.

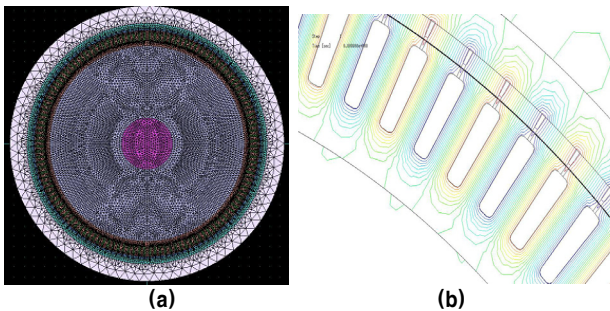
$$\begin{aligned} h &= mN_s \quad m = 1, 2, 3, \dots \\ h &= n\pi \quad n = 1, 3, 5, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

우리는 본 논문에서 고정자에 스큐를 적용하는 모델을 적용하였으며, 식(10)을 식(9)에 적용 후, 고정자 2-d 퍼미언스 함수식(11)으로 스큐 특성식을 얻을 수 있다.

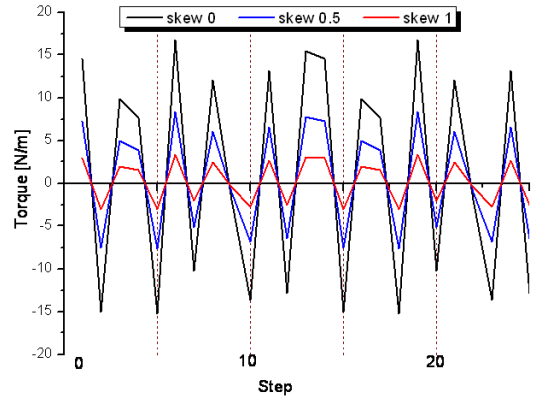
$$\lambda(\theta, \gamma) = \Delta_0(r) \Delta_m(r) \frac{\sin(mN_s \epsilon / 2)}{mN_s \epsilon / 2} \cos mN_s(\theta + \alpha_{ma}) \quad (11)$$

2.3. FEA해석을 이용한 특성 해석 및 검토

그림 2는 실제 이러한 설계요소들이 적용된 FEA 해석 모델이며, 그림 3은 코깅토크 저감을 위한 고정자에 다양한 skew비를 적용 시 나타나는 해석결과와의 비교를 보여준다. 또한 그림 4는 이러한 skew비를 적용한 모델의 FEA 해석 결과 나타나게 되는 출력결과를 보여준다. FEA해석 결과 스큐비가 1일 경우 즉 1슬롯피치 스큐인 경우에 코깅토크가 최소가 됨을 알 수 있었다.

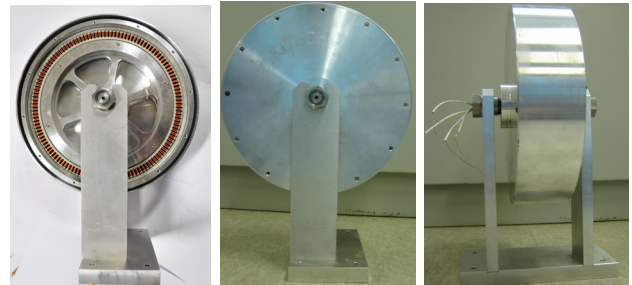


<그림 2> (a) 최적 설계 FEA 해석 모델 (b) 설계 모델 자속 분포도



<그림 3> 고정자 skew비에 따른 코깅토크 FEA 해석 결과

그림4는 위와 같이 기동토크 저감을 위해 고정자에 skew비가 적용된 영구자석 다극형 동기발전기를 실제 제작하여 나타낸 그림이다. 슬롯 피치 스큐를 시행한 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 코깅토크의 저감이 나타남을 알 수 있었다. 또한 표 2는 FEA 해석결과 출력과 실제 제작된 모델의 출력을 비교 분석한 자료이며 FEA 해석의 타당성 및 정밀성을 확인할 수 있었다.



<그림 4> 실제 제작된 수력용 영구자석 다극형 동기발전기

<표 2> 제안된 모델의 FEA 해석 결과와 실제 측정 결과 비교

결과		
FEA 해석 결과	출력 (Output)	1.537 Kw
	코깅토크 (Cogging Torque)	6.14 Nm
실제 측정 결과	출력 (Output)	1.492 Kw
	코깅토크 (Cogging Torque)	6.82 Nm

3. 결 론

본 논문은 수력용 영구자석 다극형 동기 발전기의 FEA해석을 통한 최적 설계 방안 및 그 해석방안의 타당성을 다루었다. 먼저 수력에 적합한 다극형 동기발전기의 설계 및 자체 특성식을 통한 영구자석이 공극에서 나타나는 자계분포 특성식을 도출하였다. 또한 회전자의 회전에 따른 공극의 자계 불균형으로 나타나게 되는 코깅토크의 저감을 위해 고정자에 skew비를 적용한 모델을 FEA해석을 통해 비교 분석하였다. 마지막으로 실제 설계된 모델의 측정을 통해 FEA해석방법의 타당성을 도출하였으며, 이로서 기동토크가 저감된 수력용 영구자석 다극형 동기발전기의 최적 설계 방안을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, Part I : Open-Circuit Field", IEEE Trans. Magn vol. 29, no. 1, pp. 124-135, Jan. 1993.
- [2] David L. Trumper, Won-jong Kim and Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp.371-379, 1996.
- [3] Jiabin Wang, Geratint W. Jewell and David Howe, "A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines," IEEE Trans. Magn, vol. 35, no.3, pp.1986-2000, 1999