

회전자의 영구자석 위치 이동을 이용한 이중 고정자 RFPM 발전기 코깅토크 저감 연구

(A Study on Cogging Torque Reduction of Dual Stator Radial Flux Permanent Magnet Generator Using the Permanent Magnet Displacement Design of Rotor)

이경찬* · 정태욱**

(Gyeong-Chan Lee · Tae-Uk Jung)

Abstract

In this paper, we propose the cogging torque reduction technique of the dual stator radial flux permanent magnet generator. The cogging torque is caused by the torque ripple increase and vibration and noise of the generator. And it is important factor determining cut-in speed of the small wind generator. To reduce cogging torque, permanent magnet displacement was studied. And the theory of the permanent magnet displacement was formulated and the cogging torque reduction according to the permanent magnet displacement was confirmed through the finite element method.

Key Words : Cogging Torque, Radial Flux Permanent Magnet Generator, Permanent Magnet Displacement

1. 서 론

풍력에너지는 무한한 자원과 공해 없는 에너지원으로 바람을 이용하여 전기를 생산하는 기술로 근래 들어 가장 주목받는 에너지이다.

기본적으로 영구자석을 활용한 소형 풍력 발전기로는 AFPM(Axial Flux Permanent Magnet)발전기와

* 주저자 : 경남대학교 첨단공학과 박사수료
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 부교수
* Main author : Advanced Engineering at
Kyungnam Univ. Ph.D Candidate
** Corresponding author : Electrical Engineering at
Kyungnam Univ. Professor
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161
E-mail : channy@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2013년 12월 31일
1차심사 : 2014년 1월 7일
심사완료 : 2014년 3월 10일

RFPM(Radial Flux Permanent Magnet) 발전기를 들 수 있다.

AFPM 발전기는 고정자에 철심이 없는 coreless 형태로 많이 사용되어져 왔다. Coreless형 AFPMM발전기는 구조가 간단하고 코깅토크가 발생하지 않아 넓은 구동속도 영역을 가지고 있다. 그러나 고정자에 철심이 없는 구조적인 특징으로 인해 공극간의 자기저항이 커져 출력전압이 상대적으로 낮은 단점이 있다.

이에 반해 고정자에 철심이 있는 형태를 많이 사용하는 RFPM 발전기는 coreless AFPMM 발전기에 비해 제조가 쉬우며, 출력 전압 및 전력, 효율이 높은 특징이 있다. 그러나 고정자에 철심이 있기 때문에 코깅토크가 크게 발생하게 된다.

코깅토크는 영구자석을 사용하는 발전기의 고정자 철심과 회전자 영구자석 상호간 릴럭턴스변화에 의해

발생하며, 발전기의 토크리플의 증가 및 진동, 노이즈 발생 등에 영향을 미치며, 풍력발전기가 발전을 시작할 수 있는 최소 바람의 세기를 결정하는 중요한 요인이 된다[1].

코깅토크 저감을 위해 다양한 방법[2-4]들이 연구되어 왔고 대표적으로 슬롯 오프닝[5], 영구자석 극호비[6], 영구자석 스쿼[7], 고정자 노칭[1] 등이 있다. 그러나 앞서 언급한 대표적인 코깅토크 저감 기법들은 발전기의 출력을 저하시킬 수 있는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 이중 고정자형 RFPM 발전기의 코깅토크를 저감할 수 있는 방법을 제안한다. 코깅토크 저감을 위해 내부 고정자와 외부 고정자 사이에 위치한 회전자에 부착된 내부 및 외부 영구자석의 위치를 이동시켰으며, 영구자석 위치 이동의 이론을 정립하고 유한요소해석을 통해 영구자석 위치 이동에 따른 코깅토크 저감을 확인하였다. 또한 영구자석 위치 이동 전·후의 발전기 무부하 출력 전압을 비교하였다.

2. 이중 고정자형 RFPM 발전기 설계

RFPM발전기는 내부 회전자 타입(Inner rotor)과 외부 회전자(Outer rotor) 타입으로 나눌 수 있다. 그림 1은 내부 회전자 RFPM발전기를 나타낸다. 내부 회전자 구조의 RFPM발전기는 회전자가 고정자 안쪽에 위치해 있어 견고한 기구적 구조를 가지며, 양산성이 우수하다. 그러나 영구자석이 부착되는 회전자가 내측에 위치해 있어 회전자 직경이 구조상 작게 설계되어 전체 체적대비 유효출력 단면적이 작아 상대적으로 고출력화가 어렵고 다극 구조설계가 어려워 저속 회전시 발전전압이 낮게 형성되어 발전기와 블레이드 사이에 증속기어가 요구된다.

그림 2는 외부 회전자 RFPM 발전기를 나타낸다. 외부 회전자 구조의 RFPM 발전기는 회전자가 외부에 위치해 있어 공극 직경이 커서 유효출력 단면적이 내부회전자 구조에 비해 커지므로 출력 측면에서 더욱 유리하며, 다극 구조로 설계가 쉬워 저속발전이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 고정자 내부가 비어 있어 공간적 효율성이 떨어지며, 영구자석이 외부에

위치하여 내부 회전자 발전기에 비해 공극 면적이 넓어 코깅토크가 크게 발생된다.

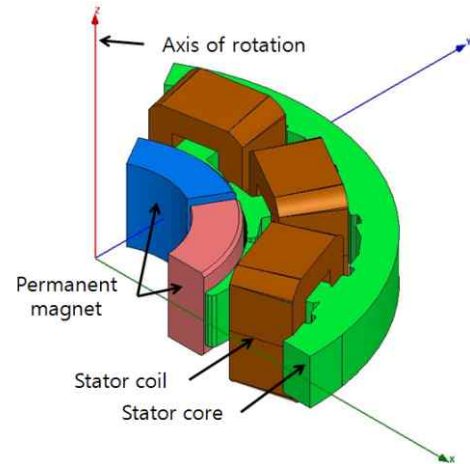


그림 1. 내부 회전자 RFPM 발전기
Fig. 1. Inner rotor type RFPM generator

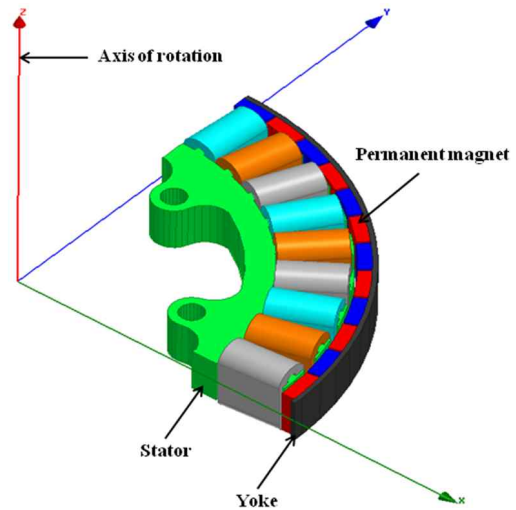


그림 2. 외부 회전자 RFPM 발전기
Fig. 2. Outer rotor type RFPM generator

본 논문에서는 소형풍력 발전기를 위하여, 내부 회전자 타입과 외부 회전자 타입을 결합한 이중 고정자 구조의 RFPM 발전기의 전자계 구조설계를 실시하였다. 이중 고정자형 RFPM 발전기는 6상 발전이 가능하며, 발전기 내·외부에 고정자를 설계하여 발전기 체적대비 출력을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

그림 3은 이중 고정자 RFPM 발전기의 구조를 나타

낸다. 이중 고정자 RFPM 발전기는 이중 발전을 위해 내부 고정자와 외부 고정자로 나누어져 있으며, 고정자 사이에 영구자석이 부착되어 있는 회전자가 있는 형상을 가지고 있다. 표 1은 이중 고정자 RFPM 발전기의 설계 사양을 나타낸다.

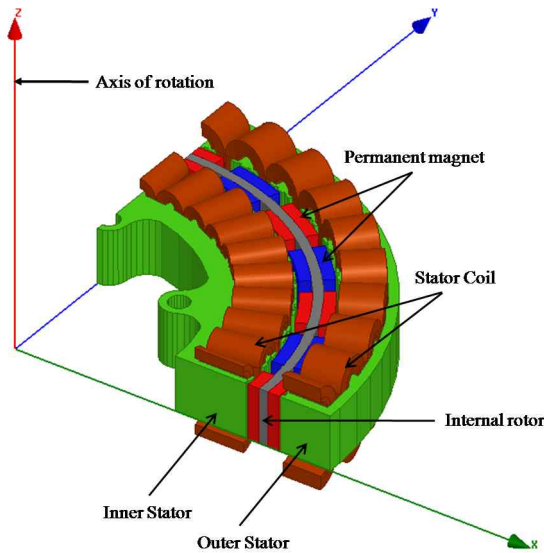


그림 3. 이중 고정자 RFPM 발전기 구조
Fig. 3. Shape of dual stator RFPM generator

표 1. 이중 고정자 발전기 설계 사양
Table 1. Specification of dual stator RFPM generator

	Inner Stator	Outer Stator
Outer diameter [mm]	205	280
Inner diameter [mm]	150	243
Stack length [mm]	30	30
Number of slot	30	30
Material	S18	S18
Air-gap [mm]	1	1
	Inner Rotor	Outer Rotor
Outer diameter [mm]	229	241
Inner diameter [mm]	207	219
Number of pole	20	20
Rotor magnet	7BE(Ferrite)	7BE(Ferrite)
Flux density [T]	0.43	0.43

3. 코깅토크

3.1 코깅토크 발생

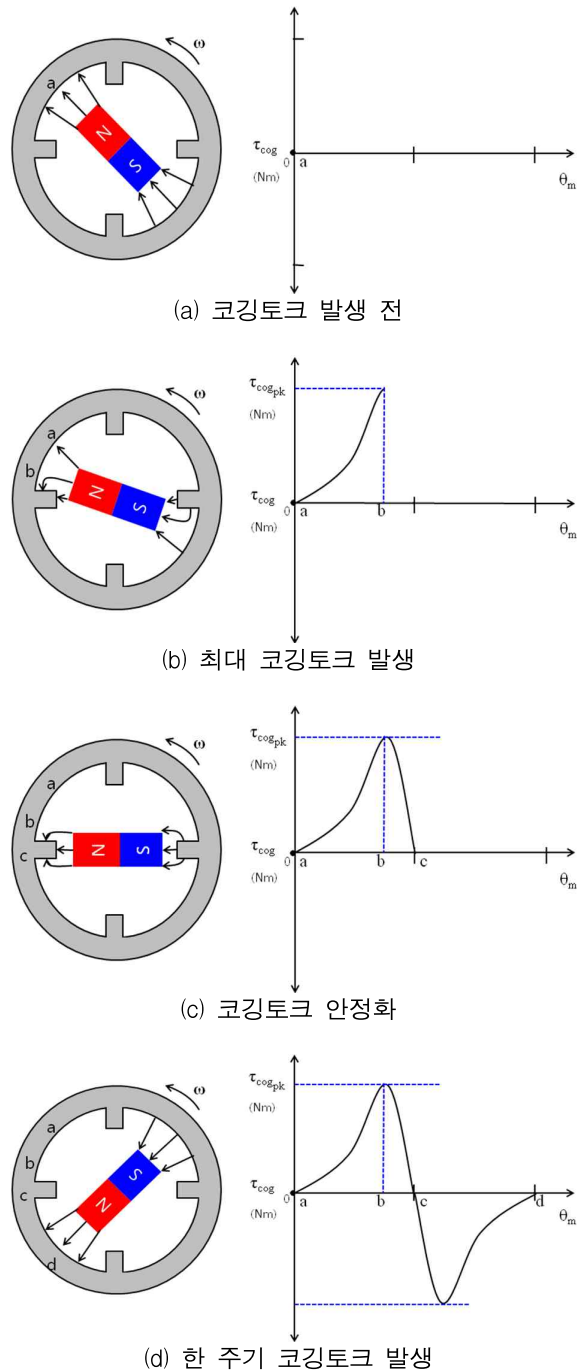


그림 4. 한 주기 코깅토크 발생 사이클
Fig. 4. One period of a cogging torque cycle

코깅토크는 영구자석을 사용하는 발전기에서 고정자 슬롯과 회전자 영구자석 사이 릴럭턴스 변화에 의해 발생한다. 코깅토크는 발전기의 토크리플 증가, 진동 및 소음, 초기 기동 풍속에 영향을 미치며, 발전기 설계의 중요한 요소이다.

그림 4는 4가지 위치에 따른 코깅토크의 한주기 발생 파형을 나타낸다.

그림 4 (a)는 영구자석이 고정자 슬롯 사이에 위치하는 형상을 나타낸다. 영구자석이 고정자 슬롯 사이에 위치하므로 릴럭턴스 변화가 없어 코깅토크는 발생하지 않는다.

영구자석이 그림 4 (a) 위치에서 회전을 하면 영구자석과 고정자 사이의 공극 릴럭턴스가 변화하게 된다.

영구자석이 그림 4 (b) 위치로 회전을 하게 되면 공극 릴럭턴스는 최대가 되고, 회전자의 영구자석이 안정된 위치로 이동하려는 힘에 의해 코깅토크는 최대 발생한다.

그림 4 (c)는 영구자석이 안정된 위치에 있는 형태로 공극 릴럭턴스가 최소가 되어 코깅토크는 0인 상태가 된다.

그림 4 (c)에서 그림 4 (d)로 영구자석이 회전하게 되면 한 주기 코깅토크가 발생하게 되고, 회전자가 회전을 하게 되면 코깅토크는 주기성이 있는 힘으로 나타나게 된다[8].

3.2 에너지법에 의한 코깅토크 수식화

코깅토크는 회전자 회전량에 대한 에너지의 변화량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = - \frac{\partial W(\alpha)}{\partial \alpha} \tag{1}$$

여기서 T : 코깅토크, W : 공극에너지, α : 회전자 회전각을 나타낸다.

에너지 변화는 공극 부분을 제외하면 거의 발생하지 않으므로 공극 부분의 에너지만 구하면 코깅토크를

구할 수 있다. 공극의 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W(\alpha) &= \frac{1}{2\mu_0} \int [G(\theta) \cdot B(\theta, \alpha)]^2 dV \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{L_s} \int_{R_1}^{R_2} \int_0^{2\pi} G(\theta)^2 \cdot B(\theta, \alpha)^2 d\theta r dr dz \\ &= \frac{1}{2\mu_0} \cdot L_s \cdot \frac{1}{2} (R_2^2 - R_1^2) \int_0^{2\pi} G(\theta)^2 \cdot B(\theta, \alpha)^2 d\theta \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 G : 공극 퍼미언스 함수, B : 자속 밀도 함수, L_s : 적층길이, R_1, R_2 : 회전자 외경 및 고정자 내경을 나타낸다.

식 (2)의 상대 공극 퍼미언스 함수와 자속 밀도 함수를 Fourier급수 전개를 이용하면 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G(\theta)^2 = \sum_{n=0}^{\infty} G_{nN_s} \cos nN_s \theta \tag{3}$$

$$B(\theta, \alpha)^2 = \sum_{n=0}^{\infty} B_{mN_p} \cos nN_p (\theta + \alpha) \tag{4}$$

여기서 N_s : 슬롯 수, N_p : 극 수를 나타낸다.

따라서 식 (3), (4)와 삼각함수의 직교성을 이용하면 식 (2)를 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W(\alpha) &= \frac{L_s}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \\ &\cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} G_{nN_s} B_{nN_p} \int_0^{2\pi} \cos nN_s \theta \cos nN_p (\theta + \alpha) d\theta \right] \\ &= \frac{L_s}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \cdot 2\pi \cdot \sum_{n=0}^{\infty} G_{nN_s} B_{nN_p} \cos nN_p \alpha \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 N_L : 슬롯 수와 극 수의 최소 공배수를 나타낸다.

코깅토크는 공극 에너지를 회전자의 회전각으로 편미분함으로써 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$T(\alpha) = -\frac{\partial W(\alpha)}{\partial \alpha} \tag{6}$$

$$= \frac{L_s \pi}{2\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=0}^{\infty} G_{nN_L} B_{nN_L} n N_L \sin n N_L \alpha$$

따라서 코깅토크는 식 (6)과 같이 N_L 주기를 가지는 정현파 함수로 나타낼 수 있다[5].

4. 코깅토크 저감 설계

4.1 영구자석 위치 이동

코깅토크 저감을 위한 영구자석 위치 이동은 내부 고정자 슬롯 잇날 각도와 외부 고정자 슬롯 잇날 각도가 동일할 때 적용가능하며, 그림 5와 6과 같이 나타낼 수 있다.

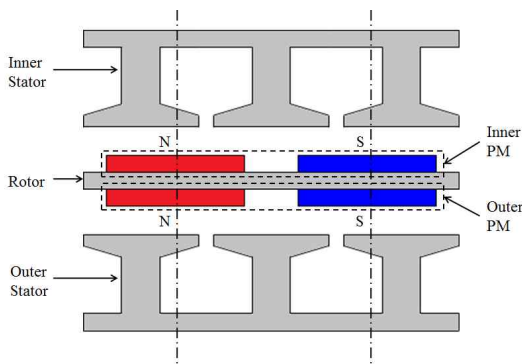


그림 5. 영구자석 위치 이동 전
Fig. 5. Before permanent magnet displacement

그림 5는 영구자석 위치 이동 전을 나타내며, 이중 고정자 RFPM 발전기에서 발생하는 코깅토크는 내부 고정자와 외부 고정자 각각에서 발생하는 코깅토크의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_{outer} \sin \theta_c + T_{inner} \sin \theta_c \tag{7}$$

식 (7)의 외부 고정자에서 발생하는 코깅토크 발생 위상을 그림 6과 같이 영구자석 위치를 전기각으로 180° 이동시키면 식 (8)과 같이 코깅토크의 합을 0으로 만들 수 있다.

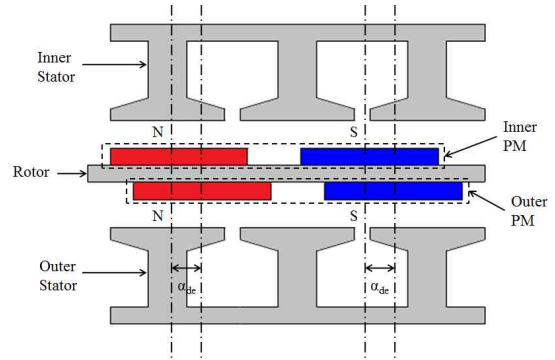


그림 6. 영구자석 위치 이동
Fig. 6. Permanent magnet displacement

$$T = T_{outer} \sin(\theta_c + 180^\circ) + T_{inner} \sin \theta_c \tag{8}$$

$$= -T_{outer} \sin \theta_c + T_{inner} \sin \theta_c$$

$$= 0$$

4.2 영구자석 위치 이동 전이각 도출

코깅토크 저감을 위한 영구자석 위치 이동 전이각은 내부 고정자 및 외부 고정자에서 발생하는 회전자 1회전당 코깅토크 발생 주기를 계산하여 구할 수 있으며, 회전자 1회전당 코깅토크 발생 주기는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다[9].

$$N_c = \frac{N_p \cdot N_s}{HCF[N_s, N_p]} \tag{9}$$

따라서 코깅토크가 한번 발생하기 위한 기계각은 식 (10)과 같으며,

$$\alpha_c = \frac{360^\circ}{N_c} \tag{10}$$

이를 다시 전기각으로 표현하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{ce} = \frac{P}{2} \alpha_c \tag{11}$$

따라서 외부 고정자에서 발생하는 코깅토크 위상을

180° 이동시키는 고정자 위치 변경 전이각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_{de} &= \frac{1}{2} \cdot \alpha_{ce} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{N_p}{2} \cdot \alpha_c \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{N_p}{2} \cdot \frac{360^\circ}{N_c} \\ &= 90^\circ \cdot \frac{HCF[N_s, N_p]}{N_s} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 N_c : 회전자 1회전 시 코깅토크 발생 주기, α_c : 코깅토크 한 주기 기계각, α_{ce} : 코깅토크 한 주기 전 기계각, $HCF[N_s, N_p]$: 슬롯 수 와 극 수의 최대 공약수, α_{de} : 영구자석 위치 이동 전이각을 나타낸다.

5. 유한요소해석

본 논문에서 설계된 이중 고정자 RFPM 발전기의 영구자석 위치 이동 전이각은 식 (12)를 이용하여 계산할 수 있으며, 계산상 최적 전이각은 30°이다.

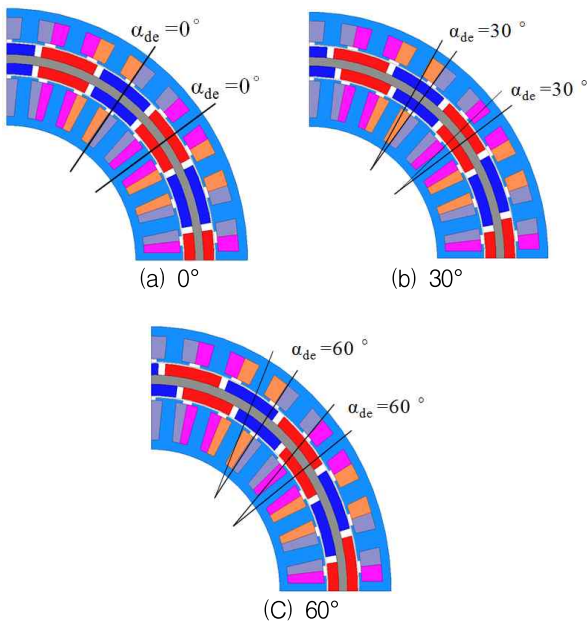


그림 7. 영구자석 위치 이동 유한요소해석 모델
Fig. 7. FEM models of permanent magnet displacement

그림 7은 영구자석 위치 이동의 유한요소해석 모델을 나타내며, 0~60°까지 10° 간격으로 설계하여 영구자석 위치 이동 특성 해석을 실시하였다.

그림 8은 영구자석 위치 이동에 따른 코깅토크 한 주기를 나타낸다. 해석 결과 이론적인 계산치인 30°에서 0.58N·m로 최소 코깅토크가 발생함을 확인할 수 있었다.

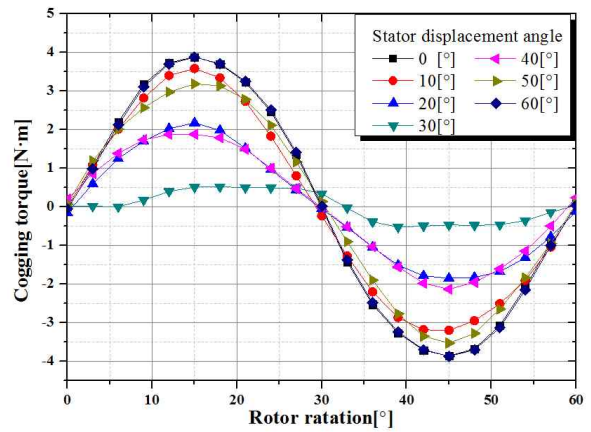
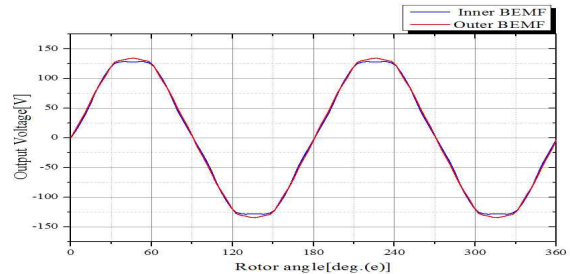
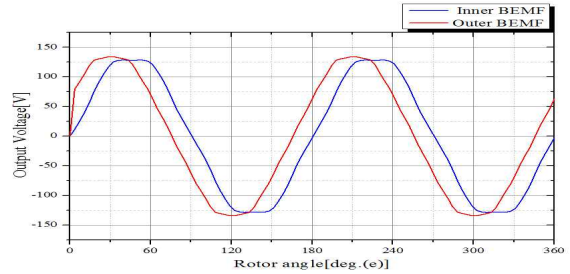


그림 8. 영구자석 위치 이동에 따른 코깅토크
Fig. 8. Cogging torque characteristics according to permanent magnet displacement



(a) 영구자석 위치 이동 전



(b) 영구자석 위치 이동 후

그림 9. 무부하 역기전력 파형 비교
Fig. 9. Comparison of no-load BEMF waveforms

또한 영구자석 위치 이동 전·후의 무부하 역기전력을 비교한 결과 무부하 역기전력 위상만 이동하였으며, 출력 저하 없이 코깅토크가 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 영구자석 위치이동을 통한 이중 고정자 RPPM 발전기의 코깅토크 감소를 연구를 진행하였다. 코깅토크는 발전기 토크 리플, 진동 및 소음, 초기 기동에 큰 영향을 미치기 때문에 최소화 해야 한다.

영구자석 위치이동의 유한요소 해석을 진행한 결과 위치 이동 30°에서 코깅토크가 최소가 됨을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 실시된 영구자석 위치 이동 기법은 영구자석 배열에 따른 코깅토크 저감법이므로 설계가 쉽고 제작 비용 또한 적게 드는 장점을 가지므로 이중 고정자를 가지는 발전기 코깅토크 저감 설계에 적합함을 확인할 수 있었다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천 논문으로 선정된 논문임.

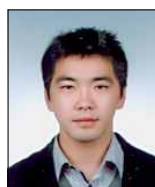
이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (NRF-2013R1A1A2010691)

References

- [1] Z.Q. Zhu, David Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines" IEEE TRAN. ENERGY CONVERSION, VOL. 15, NO. 4, DECEMBER 2000.
- [2] J.W. Moon, S.J. Kim, H.S. Choi, S.K. Park, B.J. Kim, B.I. Kwon, "Design on Magnetic Slot Wedge Shape for Reducing Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Generator of Direct Drive Type" Journal of KIEE, Vol. 26, No. 3, pp. 80-87 2012.
- [3] Z.Q. Zhu, L. J. Wu, M. I. Mohd Jamil "Influence of Pole and Slot Number Combinations on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines With Static and Rotating Eccentricities" Energy Conversion Congress and Exposition(ECCCE), 2013 IEEE, Page: 2834-2841, 2013.

- [4] S.B. Lim, H.J. Park, D.W. Kang, S.H. Ham, J. Lee "Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Design for Torque Ripple Reduction in EPS" Journal of KIEE, Vol. 24, No. 8, pp 27-31, 2010.
- [5] Li Zhu, S.Z. Jiang, Z. Q. Zhu, C. C. Chan, "Analytical Methods for Minimizing Cogging Torque in Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 4, April 2009.
- [6] Aydin. M, Zhu. Z. Q, Lipo. T. A, Howe. D, "Minimization of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines Design Concepts", IEEE Transactions on Magnetics, vol. PS-43, no.9. pp.3614- 3622, Sep. 2007.
- [7] D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 144, no. 5, pp. 325 - 330, 1997.
- [8] Rukmi Dutta, Saad Sayeef and MF. Rahman, "Cogging Torque Analysis of a Segmented Interior Permanent Magnet Machine" Electric Machines & Drives Conference, 2007.
- [9] P. Sivachandran, P. Venkatesh, N. Kamaraj, "Cogging Torque Reduction in Dual-Rotor Permanent Magnet Generator for Direct Coupled Stand-Alone Wind Energy Systems" IEEE International Conference on, Sustainable Energy Technologies, 2008.

◇ 저자소개 ◇



이경찬(李庚贊)

1981년 1월 1일생. 2009년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 첨단공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 첨단공학과 박사과정.



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대공대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년 ~ 현재 경남대학교 전기공학과 부교수.