

이중 고정자 구조의 소형풍력터빈용 AFPM 발전기의 코깅토크 저감에 관한 연구

(Study on Cogging Torque Reduction for Small Wind Turbine AFPM Generator
of Double Stator Structure)

정태욱* · 배병덕**

(Tae-Uk Jung · Byung-Duk Bae)

Abstract

The cogging torque is important to the cut-in wind speed. And, it causes the acoustic noise and the vibration on the machine. This paper presents a 3D FEA(Finite Element Analysis) to evaluate the effect of magnet skew and stator displacement on cogging torque reduction, for double core AFPM(Axial Flux Permanent Magnet) generator. As a result, the magnet skew and the stator side displacement are proved excellent techniques to reduce the cogging torque.

Key Words : Small Wind Turbine, Double Core AFPM, Cogging Torque, Magnet Skew, Slot Displacement

1. 서 론

초대형 풍력발전기는 설치비 및 유지관리비가 많이 들고 시공기간 및 보수기간이 길어 운용의 효율성이 떨어지는 경향이 있다. 반면에 소형 풍력발전의 경우 설치비가 적게 들고 시공기간 및 보수기간이 짧은 장점을 가지고 있어, 소형 풍력발전 시스템의 설치를 확대하는 추세이다[1].

기존에는 철심이 없는 형태의 AFPM 발전기가 주로 사용되었다. 외경이 크고 두께가 얇은 구조를 가지

며, RFPM 발전기에 비해 출력밀도가 높고 운전 효율이 좋으며 소음 및 진동이 상대적으로 작은 장점을 가진다. 하지만 공극의 자속밀도가 떨어지는 현상이 발생하고 결과적으로 발전기의 출력 및 효율이 감소하는 경우가 발생하였다.

본 연구에서 제안된 이중 고정자 구조의 AFPM 발전기는 출력 및 효율을 향상시키는 전자기 구조를 가진다. 하지만 코깅토크가 상승한다는 단점을 가지고 있어, 코깅토크 저감에 주안점을 두고 설계하였다. 기존의 이중 고정자 발전기는 상하부 고정자가 결합되어 고정자 위치변경 적용시 제작이 복잡한 단점을 가지고 있으나, 본 연구에서 제안된 이중 고정자 AFPM 발전기는 추가적인 가공 없이 쉽게 적용이 가능하다. 그리고 영구자석 스큐 기법을 통하여 추가적인 코깅토크 저감을 실시하였다. 따라서 제안된 이중 고정자 AFPM 발전기는 철심이 없는 형태의 AFPM 발전기

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 석사과정
Tel : 055-249-2628, Fax : 0505-999-2161
E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2011년 12월 19일
1차심사 : 2011년 12월 28일
심사완료 : 2012년 1월 10일

이중 고정자 구조의 소형풍력터빈용 AFPM 발전기의 코깅토크 저감에 관한 연구

수준의 코깅토크의 값을 가지도록 연구가 진행될 것이며, 제작비용 절감 또한 예상된다.

그리고 앞서 언급한 내용들은 3차원 유한요소 해석을 통하여 검증할 예정이다.

2. 이중 고정자 AFPM 발전기의 구조

2.1 이중 고정자 AFPM 발전기 구조

본 연구에 설계된 발전기는 고정자에 철심이 존재하는 AFPM 발전기이며 형상은 그림 1과 같다. 이중 고정자 AFPM 발전기의 형태는 그림과 같이 상하부에 고정자가 위치하고, 고정자 사이에 영구자석이 부착된 회전자 위치하는 구조를 가진다.

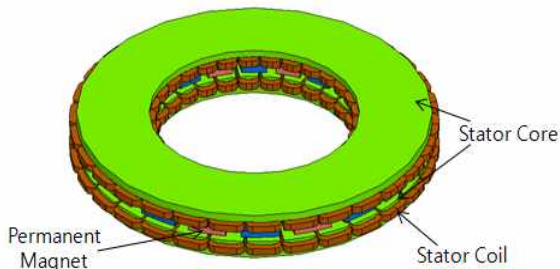


그림 1. 이중 고정자 AFPM 발전기의 구조
Fig. 1. Structure of double stator AFPM generator

본 연구에 제안된 이중 고정자 AFPM 발전기의 전자기 구조는 그림 2와 같다. 그림 2 (a)는 기존에 존재하는 형태로 영구자석에 철심이 없는 구조이다. 이러한 구조를 사용하는 것이 발전기 전체 체적이 작고 유리한 형태이지만, 본문에 언급될 발전기의 코깅토크를 줄이기 위한 고정자 치의 이동을 적용 시에 자속의 이동경로가 안정하지 않아 정확한 출력특성을 얻을 수 없다. 따라서 그림 2 (b)와 같이 영구자석에 자속이 이동할 수 있는 철심을 추가시켜 고정자 치의 위치가 변경이 되더라도 안정된 자속의 이동경로를 확보할 수 있도록 그림에서와 같은 전자기적 구조 개선을 선택하였다.

본 연구에 제안된 이중 고정자 AFPM 발전기의 세부사항은 표 1과 같이 나타내었다.

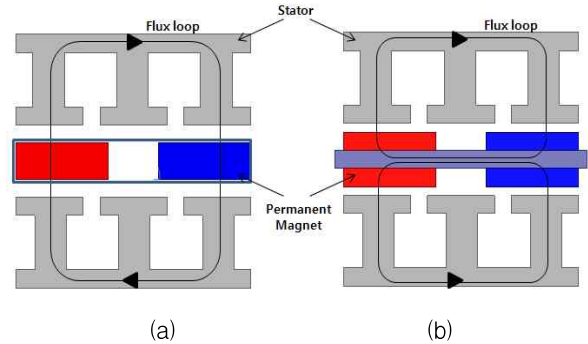


그림 2. 전자기 구조개선 전과 후
Fig. 2. Electronic structure improvement of before and after

표 1. 풍력 발전기의 사양
Table 1. Specification of wind generator

	AFPMSG
Pole number	20
Number of stators	2
Number of phases	3
Number of slots	30
Number of turns	16
Outer diameter[mm]	220
Inner diameter[mm]	122
Axial length[mm]	30
Air-gap length[mm]	1
Core steel grade	S18
Magnet grade	NdFeB
Remanent flux density [T]	1.2
Coil diameter [mm]	1.02
Connection	Y

2.2 코깅토크

코깅 토크는 그림 3에서 보이는 것과 같이 회전자의 영구자석이 회전할 때 공극의 회전자와 고정자 사이의 슬롯(slot) 및 슬롯티스(slot teeth)의 퍼미언스(permanence) 및 릴럭턴스(reluctance)의 변화에 의해 발생한다. 즉 영구자석에서 나오는 자속이 자기저항이 최소가 되는 그림 3 (a)의 안정위치에서 그림 3 (b)

의 불안정한 위치로 변화하였을 때, 불안정한 상태를 벗어나 다시 안정위치로 복귀할 때 반대방향으로 작용하는 힘에 의하여 발생하게 된다.

코깅토크는 회전자의 회전 위치에 따른 공극에 축적된 에너지의 변화량을 계산해서 얻을 수 있으며, 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$T_{\text{cog}}(\theta_r) = -\frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{dR}{d\theta_r} \quad (1)$$

여기서 ϕ_g 는 공극 자속, R 는 공극 릴럭턴스, θ_r 는 회전각이다.

이러한 코깅토크는 발전기의 초기 기동에 필요한 풍속에 많은 영향을 미친다. 만약 코깅토크가 크다면 초기 기동에 필요한 풍속이 커지게 되며, 그 결과 발전기의 운용 및 효율성이 떨어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 코깅토크의 크기는 소형 풍력발전시스템에서 중요시 여겨지는 부분 중의 하나이다.

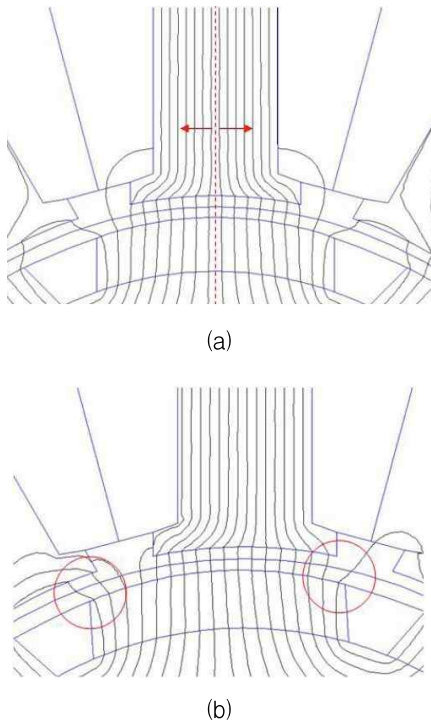


그림 3. 회전자 위치 변경에 따른 코깅토크의 발생
Fig. 3. Cogging torque generation by rotating rotor position

3. 유한요소 해석 및 코깅토크 저감기법

3.1 발전기의 모델링 및 해석

기존의 RFBPM의 경우에는 2차원 해석이 주로 사용되어져 왔지만, AFPBM은 자속의 흐름이 수직축으로 존재하기 때문에 2차원 유한요소 해석에 어려움이 존재한다. 따라서 유한요소 해석의 타당성을 위해 3차원 유한요소해석을 통해 이중 고정자 AFPBM 발전기의 모델링 및 특성해석을 실시하였다.

유한요소 해석에서는 요소의 수가 증가할수록 해석의 정확도가 높아지는데 이러한 요소의 증가로 인해 해석시간 또한 비례하여 증가하게 된다. 특히 3차원 유한요소 해석의 경우 2차원 유한요소 해석에 비해 많은 요소수로 인해 오랜 해석시간이 소요된다. 그중에서도 공극이 존재하는 밴드는 회전시 요소의 변화가 발생하는 부분으로 해석의 정확성을 위해 밴드 부분에 요소를 밀집하여 생성하였다. 이에 따라 유한요소 해석에 소비되는 시간이 더욱더 증가하게 되었다.

유한요소 해석시간을 감소시키기 위하여 사용되어지는 기법 중 하나인 대칭 모델을 이용함으로써 해석시간을 단축시켰다. 그림 4는 이중 고정자 AFPBM 발전기의 1/5 대칭 모델을 나타낸다.

3.2 코깅토크 저감기법

영구자석 발전기에 대한 코깅토크 저감 기법은 크게 고정자 형상변경과 회전자 형상변경으로 나눌 수 있다. 고정자 형상의 변경방법은 고정자 치의 치수변경에 의한 슬롯 개구부의 크기변경, 고정자 치의 크기를 각각 다르게 변경시키는 방법 및 고정자 치에 홈을 삽입하는 방법 등 다양한 방법이 존재한다. 하지만 제작 비용이 많이 들고 제작에 어려움이 있어 회전자 형상변경에 비해 일반적으로 선호하지 않는 형태의 기법이다. 회전자 형상의 변경방법은 영구자석의 간격과 영구자석의 극호의 비를 변경하는 방법 및 영구자석에 스큐를 적용하는 방법이 존재한다. 회전자 형상변경 기법은 고정자 형상에 비해 적용이 용이하며 비용

또한 작게 들어 영구자석 동기발전기의 코깅토크 저감기법으로 흔히 사용된다.

하지만 본 연구에 제안된 이중 고정자 AFPM 발전기의 경우 고정자가 상부와 하부로 나뉘어져 기존의 고정자 발전기에 비해 특별한 가공이나 제작 없이 쉽게 코깅토크를 저감시키며, 추가적인 코깅토크 저감을 위하여 영구자석 발전기에 흔히 적용되는 회전자의 영구자석 스큐 변경 기법을 적용시킬 것이다.

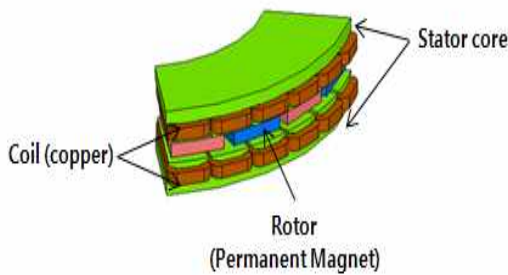


그림 4. 이중 고정자 AFPM의 3D 유한요소 해석 대칭모델
Fig. 4. 3D FEA symmetry model of stator core AFPM

3.2.1 영구자석 스큐기법

영구자석 스큐는 간단하면서도 효과적으로 코깅토크를 저감하는 방법의 하나로서 영구자석 발전기에서 가장 많이 사용되어지는 방법 중의 하나이다. 또한 영구자석 스큐는 기존의 RFPM 발전기보다 표면이 평면이고 구조가 간단한 AFPM 발전기에 보다 쉽게 적용이 가능하다. 그림 5는 본 논문에서 적용되어진 skewed 영구자석 형상을 나타낸다. 최초 설계된 영구자석의 형상은 ABCD와 같고 스큐기법을 적용한 형상의 영구자석은 A'B'CD와 같다. 아래의 형상과 같이 θ 를 변경시킴에 따라 코깅토크의 감소를 이뤄낼 수 있다.

기존의 연구에 따라[3-4], 최소 코깅토크를 위한 최소 skew각은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{skew} = \frac{2\pi}{N_c} \quad (2)$$

또한 슬롯수 / 영구자석수 = 정수이면 식 (3)과 같이

나타낼 수 있다.

$$\theta_{skew} = \frac{2\pi}{N_s} \quad (3)$$

하지만 일반적으로 영구자석의 내/외 극호의 누설 자속으로 인해 코깅토크 최소 skew각은 식 (2), (3)과 같지 않고 대부분 약간 크다.

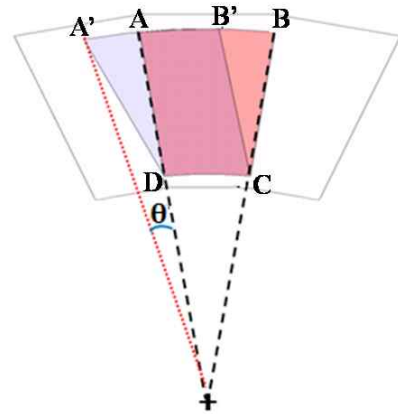


그림 5. 영구자석 스큐형상
Fig. 5. Shape of permanent magnet skew

3.2.2 고정자 위치 변경기법

고정자 위치 변경기법은 고정자의 상부와 하부에 위치하는 고정자를 어긋나게 배치하여 코깅토크를 저감시키는 기법이다. 그림 6 (a)와 같이 코깅토크 저감기법을 적용 전 상태는 상부와 하부의 고정자의 위치가 동일한 선상에서 존재하지만, 고정자 슬롯을 그림 6 (b)와 같이 회전시켜 상하부의 고정자가 각기 다른 위치에 존재하게 된다. 상하부 고정자 위치가 동일한 구간에서의 톨럭턴스 변화는 각 슬롯마다 일정한 크기의 코깅토크 변화를 발생시키는 반면, 상하부 고정자가 회전한 형태의 고정자 형상에서는 각 슬롯마다 각기 다른 톨럭턴스의 변화가 발생하여 결과적으로 코깅토크의 감소를 이뤄낸다.

기존의 연구에 따라[5-6] 최소 코깅토크를 위한 회전한 슬롯과 슬롯피치와의 비는 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_d = \frac{a_t}{a_{sp}} \quad (4)$$

여기서 a_t 는 기준에서 고정자 치가 회전한 각도를 나타내며, a_{sp} 는 고정자 치와 고정자 치의 각을 나타낸다.

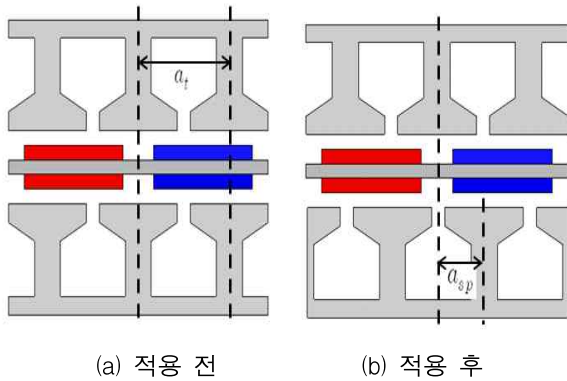


그림 6. 고정자 위치 변경의 정의
Fig. 6. Definition of stator displacement

3.3 유한요소 해석결과

3.3.1 영구자석 스큐기법

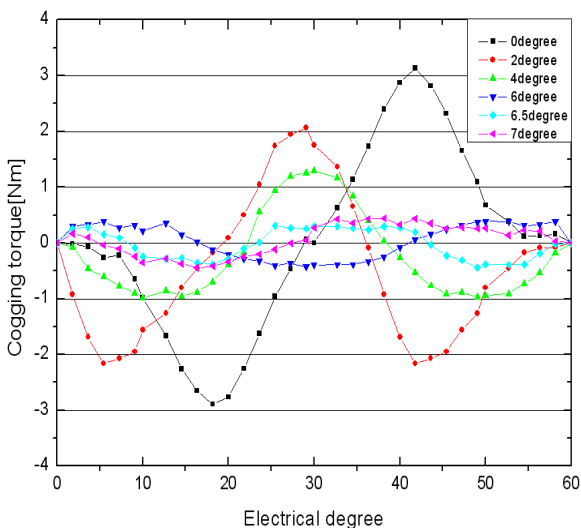


그림 7. 스큐각 변경에 따른 코깅토크 변화 곡선
Fig. 7. Variation of cogging torque waveform with permanent magnet skew to skew angle

그림 7은 스큐 변경에 따른 코깅토크의 변화곡선을 나타낸다. 스큐를 적용하기전 0도에서 가장 높은 5.35 [Nm]를 나타내며, 6.5도에서 가장 낮은 0.92[Nm]의 코깅토크 값을 얻을 수 있었다. 표 2는 스큐를 적용한 각각의 코깅토크 값을 요약하였다.

표 2. 스큐 변경 각도에 따른 최대치 코깅토크 비교
Table 2. Maximum cogging torque comparison according to skew angle

Skew angle	0[°]	2[°]	4[°]	6[°]	6.5[°]	7[°]	8[°]
Cogging torque [Nm]	5.35	4.31	2.27	0.94	0.92	1.0	1.07

3.3.2 고정자 위치 변경기법

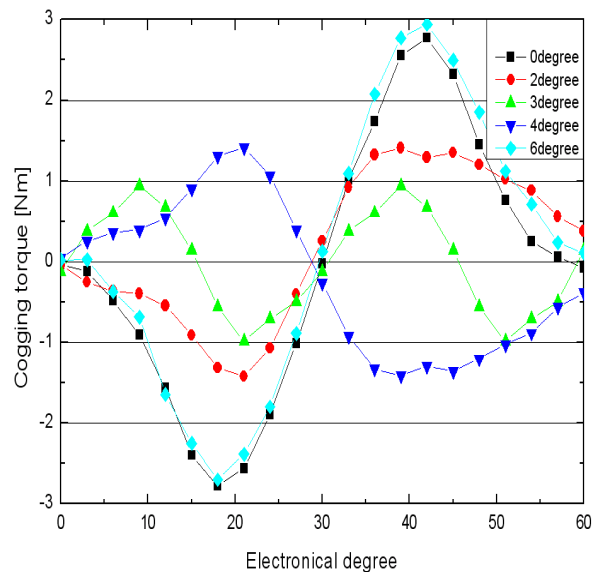


그림 8. 고정자 위치 변경에 따른 코깅토크 변화곡선
Fig. 8. Variation of cogging torque waveform with stator displacement

표 3. 고정자 위치 변경 각도에 따른 최대치 코깅토크
Table 3. Maximum cogging torque according to stator displacement angle

Stator displacement angle	0[°]	2[°]	3[°]	4[°]	6[°]
Cogging torque [Nm]	5.35	2.53	1.95	2.82	5.61

그림 8은 이중 고정자 AFPM 발전기의 코깅토크 저감을 위해 고정자 위치 변경을 통한 회전각도별 최대치 코깅토크의 파형을 나타낸다. 고정자 회전 위치가 기계각으로 3도일 때 1.98[Nm]의 가장 낮은 코깅토크 값이 측정되었지만, 6도를 회전한 결과는 기존의 형태보다 높은 5.61[Nm]가 발생하였다. 표 3은 회전각도별 최대치 코깅토크의 값을 나타낸다.

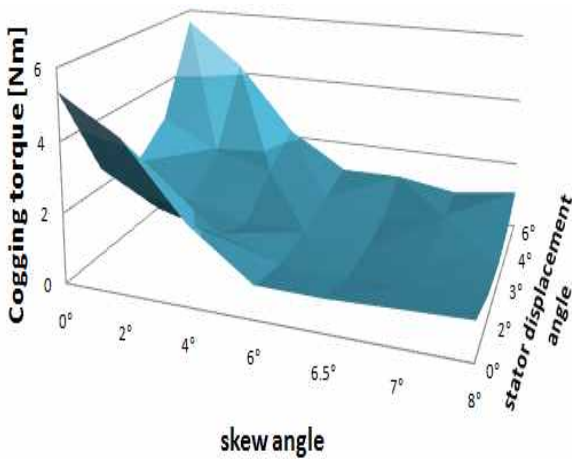


그림 9. 고정자 위치변경과 영구자석 스큐각에 따른 최대치 코깅토크 그래프
Fig. 9. Maximum cogging torque variation as a function of stator displacement and magnet skew

표 4. 고정자 위치 변경과 영구자석 스큐각에 따른 최대치 코깅토크
Table 4. Maximum cogging torque according to stator displacement and magnet skew angle

Displacement \ Skew	0[°]	2[°]	3[°]	4[°]	6[°]
0[°]	5.35	2.53	1.95	2.82	5.61
2[°]	4.31	1.60	1.08	1.93	4.26
4[°]	2.27	1.14	0.62	1.51	2.20
6[°]	0.94	0.59	0.64	0.89	1.09
6.5[°]	0.92	0.46	0.37	0.54	1.10
7[°]	1.0	0.63	0.52	0.85	0.82
8[°]	1.07	0.65	0.5	0.67	1.08

그림 9는 스큐기법과 고정자 위치 변경기법을 동시에 적용한 각도별 최대치 코깅토크 분포곡선을 나타낸다. 회전자 영구자석의 스큐 각도 6.5도와 고정자 위치를 3도 회전시켰을 경우 가장 낮은 최대치 코깅토크 0.377[Nm]을 나타내었으며, 표 4는 회전자 위치 변경과 스큐를 각도별로 적용한 최대치 코깅토크의 값을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 초기 기동에 영향을 미치는 코깅토크를 고정자 위치 변경기법 및 회전자 영구자석 스큐기법을 사용하여 저감시켰다. 이를 수행하기 위하여 3차원 유한요소 해석을 통해 모델링 및 특성해석을 하였다.

기준에 쉽게 적용되어진 영구자석 스큐기법을 적용한 결과 기존 모델의 1/5 정도 수준인 0.92[Nm]의 값을 얻을 수 있었다. 코깅토크의 감소를 이뤄냈지만 여전히 발전기의 초기기동에 영향을 미칠 수 있는 정도의 값을 가진다고 판단하여 추가적인 코깅토크 감소를 위하여 회전자의 상하부를 회전시키는 고정자 위치 변경기법을 적용하였다. 그 결과 영구자석 스큐를 적용한 경우의 1/3 정도인 0.37[Nm]의 값을 얻을 수 있었다. 기존 연구에 비하여 제작비용의 증가 및 제작의 어려움이 없이 적용되어 보다 쉽게 코깅토크를 감소시킬 수 있었다.

이번 연구를 통해 소형 풍력발전 시스템의 활성화에 기여할 수 있을 것으로 사료되며, 추후 시작품 제작을 통해 본 연구를 검증할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No.2011-0005694)
본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 『경남 창원과학연구단지육성사업』 기초·R&D 과제 지원사업으로 수행되었음.

References

[1] A. N. Celik, "Energy Output Estimation for Small scale

- Wind Power Generators Using Weibull Representative Wind Data, "Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 91, pp. 693-707, 2003.
- [2] Gieras J. F, Wang R. J, M. J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines" Kluwer Academic Publishers, pp. 37-41 2004.
- [3] Delvis Anibal González, Juan Antonio Tapia, and Alvaro Letelier Bettancourt, "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machine", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 8, AUGUST 2007.
- [4] 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, Sept 2007.
- [5] Delvis Anibal González, Juan Antonio Tapia, and Alvaro Letelier Bettancourt, "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machine", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 8, AUGUST 2007.
- [6] Nin-Fu Hsieh, D. G. Dorrell, Yu-Han Yeh, Samsul Ekram "Cogging Torque Reduction in Axial Flux Machines for Small Wind Turbines", Industrial Electronics, 2009. IECON 09. 35th Annual Conference of IEEE.

◇ 저자소개 ◇



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학 졸업. 1995년 부산대학교 전기공학 졸업(석사). 1999년 부산대학교 전기공학 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2628

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr



배병덕(裴秉德)

1985년 12월 16일생. 2010년 경남대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (055)249-2628

E-mail : gompooh1216@nate.com