

# 연 풍력시스템의 회전속도 측정 및 발전기 시스템에 적용 가능한 영구자석 발전기 설계에 관한 연구

신유정\*, 김수현\*\*, 김진호\*\*\*, #

\*한국섬유기계연구원, \*\*영남대학교 신소재공학과, \*\*\*영남대학교 기계공학과

## Study on Rotating Speed of Kite Wind Turbine System and Design of PM Generator

Yujeong Shin\*, Soo-Hyun Kim\*\*, Jin Ho Kim\*\*\*, #

\*Korea Textile Machinery Research Institute, \*\*School of Materials Science and Engineering, Yeungnam University, \*\*\*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received 27 January 2016; received in revised form 22 March 2016; accepted 3 June 2016)

### ABSTRACT

A direct PM generator has the effect of reducing the mechanical noise and ease of maintenance by eliminating a number of power transmission components. In addition, wind turbines operating at low speed with the advantages of high output, high efficiency, and small size. The generator was designed as a small direct-drive PM generator that can be applied to a kite even at low wind speeds. The RPM (Revolutions Per Minute) of the reel was measured in two ways using a cadence/speedometer sensor and a tachometer while the actual kite. The RPM derived from the experiment was applied to the simulation on the designed generator. The no-load characteristic analysis for the magnetic fields produced for the permanent magnet generator by a permanent magnet and stator winding currents is achieved using a 2D coordinate system. A commercial electromagnetic analysis program, ANSYS Maxwell, was used to model the electromagnetic dynamics.

**Key Words** : Kite(연), Direct-Driven(직접 구동), Permanent Magnet(영구자석), Generator(발전기), RPM(회전수)

### 1. 서 론

신재생 에너지는 석유, 석탄, 천연가스 등 화석 연료의 자원 고갈에 대처하기 위한 에너지 생산에 있어 환경오염이 없는 풍력, 태양광, 지열에너지 등을 말한다. 1997년 12월 기후변화 협약에 따른

교토의정서를 시작으로 지구 온난화 규제 및 방지를 위한 세계 각국의 에너지정책에 발맞춰 풍력 발전 시스템 등 대체 에너지 시스템과 개별 독립형 발전 시스템의 성능 향상과 개발이 요구되고 있다<sup>[1]</sup>. 세계 각국은 풍력발전설비의 실용화 보급에 차츰하면서도 보다 경제적이고 신뢰성 있는 독립형 풍력발전기를 개발하려는 노력을 진행하고 있다. 특히 해안가와 주요 산맥에 집중되어 대단위 단지로 조성되어 집중되어 있는 풍력발전기와는 다르게 농어촌, 도서지역, 산간지역 등 다양한

# Corresponding Author : jinho@ynu.ac.kr

Tel: +82-53-810-2441, Fax: +82-10-2881-8215

수요에는 독립형 소형 발전기가 적합하게 대응할 수 있으며, 이 경우 중형의 풍력발전기에 비해 설비 발전단가 등의 면에서 보다 경제적인 장점을 갖는다. 수 kw급 이하의 소형 풍력 발전기들은 저비용으로 개인이 직접 설치하여 에너지 절약 효과를 느낄 수 있는 장점이 있기 때문에 단순히 풍력발전기의 대형화 시스템과는 별도의 시장을 확보하고 있으며 지속적으로 혁신적인 기술 개발이 이루어지고 있다. 현재 개발되고 있는 혁신적인 기술을 가진 풍력발전기 연구는 운전고도 300m에서부터 10km에 이르기까지 다양하며 비행선 형태, 연, 선형발전기 등 다양한 종류에 대한 연구개발이 이루어지고 있다<sup>[2]</sup>.

본 연구에 적용한 시스템은 육상에 장착하여 풍력에너지를 회전운동을 발생시키는 연을 공중에 설치하고 전력을 생산하는 이태리에서 개발 중인 Kite Gen이다<sup>[3]</sup>. Kite Gen은 연이 지상에 설치된 권양기와 발전기에 연결되며 연이 연결선이 바람에 의해 풀릴 때 권양기가 회전하면서 발전기의 역할을 수행하여 전력을 생산하게 된다. 연을 이용한 풍력발전 시스템은 멈춰있는 날개를 회전시키기 위해 정지마찰력보다 큰 회전력이 필요하며 높은 위치에 블레이드를 설치해야하는 대형 발전기의 단점을 개선할 수 있다<sup>[4,5]</sup>.

따라서 본 논문에서는 연을 적용한 풍력발전기 시스템에 적용이 가능한 영구자석 발전기 설계를 위한 연구를 수행하였다. 실제 연이 하늘을 나는 동안의 RPM을 측정실험을 위하여 타코메타와 케이던스/속도계 센서를 이용한 두 가지 방법을 이용하였다. RPM 측정실험을 통해서 도출된 알레의 회전수를 적용한 영구자석 발전기에 대해 전자기 해석을 수행하였다. 상용 전자기 해석 소프트웨어 Maxwell을 사용하여 2D 직교좌표계를 생성하고 시간에 변화에 따른 무부하 특성을 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 연 알레의 회전수 측정

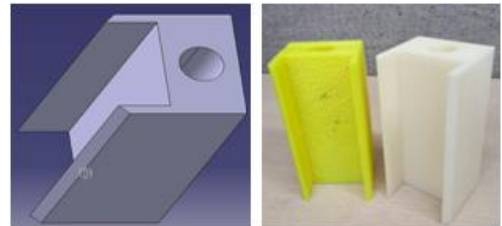


(a) Manufactured test equipment



(b) Cadence/Speedometer sensor

**Fig. 1 Manufactured RPM experimental device using Cadence/Speedometer sensor**



(a) Jig fabrication of a 3D printer



(b) Tachometer (non-contact)

**Fig. 2 Manufactured RPM experimental device using Tachometer (non-contact)**

연을 이용한 풍력발전기 설계에 앞서 실제 연이 하늘을 나는 동안 실이 감겨있는 연 얼레의 회전수를 측정하였다. 비접촉식 타코메타와 케이던스/속도계를 얼레 장착하여 두 가지 방법으로 회전수 측정을 시행하였다. 첫 번째 방법으로 자동차의 회전수를 측정하는 타코메타를 얼레에 체결하기 위해 손잡이 부분에 체결하기 위한 가이드를 제작하였다. Fig. 1의 (a)와 같이 CATIA를 활용하여 3D 형상을 설계하고 3D프린터를 이용하여 지그를 제작하였다. Fig. 1의 (b)와 같이 손잡이에 지그와 타코메타를 체결하여 회전하는 얼레에 반사테이프를 부착하고 타코메타에서 방출되는 레이저가 반사테이프에서 반사되는 레이저 반사각을 되받아 RPM을 도출한다.

타코메타를 이용한 회전수 측정 방법은 연을 상공에 날리는 동안 순간적인 RPM을 도출할 수 있다. 하지만 연을 날리는 동안은 얼레가 풀리고 감기고를 반복하기 때문에 연속적으로 RPM을 측정할 수 있는 방안으로 케이던스/속도계를 이용하여 실험을 추가로 시행하였다. 케이던스/속도계 센서에서 케이던스는 1분당 페달을 밟는 횟수를 의미하기 때문에 회전하면서 일을 하는 장치가 1분 동안 몇 번을 회전하는지를 나타내는 단위인 RPM과 동일한 의미이다. Fig. 2의 (a)와 같이 센서 장착을 위해 얼레의 모서리 양 끝단의 길이에 맞게 자전거 바퀴살을 절단하여 얼레의 모서리 끝단에 구멍을 낸 뒤 삽입하여 가이드를 제작하였다. 바퀴살 가이드에 영구자석을 체결하고 Fig. 2의 (b)와 같이 얼레 손잡이에 센서를 부착하여 회전체에 장착된 영구자석이 케이던스 센서를 일정 거리범위 내로 지나갈 때의 주기를 측정하여 RPM을 도출하였다.

Fig. 3과 같이 얼레에 연을 장착하고 실제 연이 하늘에 나는 동안의 얼레의 회전수를 반복 측정하였다. 측정 기간 동안의 평균 풍속은 약 1~3m/s이다. 반복 측정결과 평균 약 300rpm, 최대 600rpm 까지 측정되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 실험을 통해 측정한 일부 케이스를 나타낸 것이다.



Fig. 3 RPM measurement experiments Photos  
(Location: Yeungnam University)

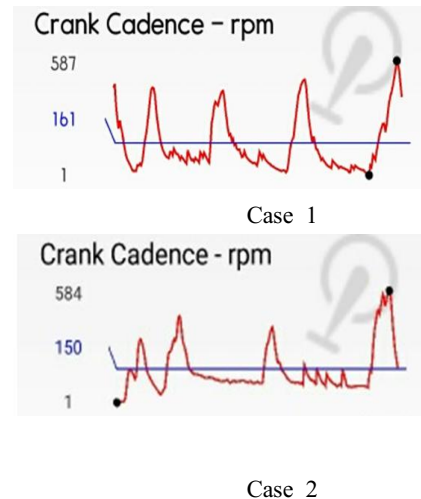


Fig. 4 RPM measurement result case

## 2.2 영구자석 발전기 전자기해석

풍력발전기 시스템에 적용하기 위해 상공에서의 연 얼레의 회전수를 측정하였으며 직접 구동 방식의 영구자석형 발전기 설계에 측정된 회전수의 평균인 300rpm을 기준으로 적용하여 해석을 수행하였다. 과거의 일반적인 풍력발전기는 풍차 로터와 발전기 사이에 축, 베어링, 증속기, 커플링이 끼워져 있어서 부품수의 증가, 증량증가, 소음 발생이라는 결점을 가진다. 그러나 직접 구동 방식의 경우 증속기를 사용하지 않고 다극 저 회전으로 발전기를 구동함으로써 소음이 적고 에너지 취득효율을 높일 수 있는 장점을 가지고 있기에 소형 풍력발전기 사용에 적합한 방식이다<sup>[6,7]</sup>. 그러

나 풍력발전기와 직접 연결된 발전기는 풍력터빈의 속도로 인해 매우 낮은 속도의 영역 범위 안에서 운전하면서 동시에 이 속도에 대응하여 일반적인 주파수 범위를 갖는 전력을 생산해야만 한다. 이를 위해서는 전기기기의 설계 원리에 따라 용량이 큰 경우 발전기는 매우 많은 극수를 가져야 하는 단점을 가진다. 따라서 소형 발전기에서 높은 운전 효율을 얻기 위해서는 네오디뮴합금 계열의 영구자석과 같은 탁월한 화학적, 전기적, 자성적으로 고밀도 에너지 성질을 가지는 희토류계 영구자석이 사용된다. 특히 계자권선과 전류를 필요로 하지 않기 때문에 일반적으로 영구자석이 장착되지 않은 발전기에 비해 구조면에서 단순하여 제작이 용이하다는 장점을 갖는다<sup>[8]</sup>.

따라서 풍력터빈과 발전기를 직접 연결하는 시스템에서 발생하는 어려움을 해결할 수 있는 대안은 영구자석형 발전기를 응용하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 5와 같이 영구자석 발전기의 회전자 영구자석과 고정자 권선으로 구성하였으며 영구자석과 코일간의 자기장 생성을 위한 2차원 직교좌표계를 사용하여 무부하 특성분석을 진행하였다. 상용 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 유한요소 모델링을 하고 전자기해석을 진행하였다<sup>[9]</sup>. 상용 전자기 유한요소 해석 프로그램인 Maxwell을 사용하여 조건은 Fig. 6과 같이 실제 형상의 1/12로 분할된 모델링을 적용하였으며 설계사양은 표 1과 같다. 각 부품별 재질 중 영구자석의 재질은 Nd-Fe35를 사용하였다. Nd자석은 희토류원소의 일종인 Nd와 B, Fe의 산화물을 분말가공, 성형 후 소결 처리하여 만든 금속간 화합물로 이루어져 있다. 이러한 Nd자석은 상용화된 자석 중 최대자기에너지적((BH)<sub>max</sub>)이 가장 높다<sup>[10,11]</sup>. 1980년대 초 일본에서 개발된 네오디뮴-철-붕소 자석은 기존의 알니코 및 페라이트 자석 대비 우수한 자기성능으로 모터의 소형화와 고효율이 가능하게 하였다. 두 번째로 가공성이 비교적 좋아 회전자의 곡선형태 변형에도 적합하다. Stator와 Rotor 코어의 재질은 영구자석과 코일 사이의 자기장 전도체 역할을 위해 steel1010, 코일의 재료는 구리를 사용하였고 재료의 자기 물성치는 표 2에 나타내었다. 실제 Maxwell 해석에서는

자성재료인 steel1010의 경우 Fig. 7과 같이 비선형 초기투자율 곡선(B-H Curve)으로 Relative Permeability 값이 입력된다.

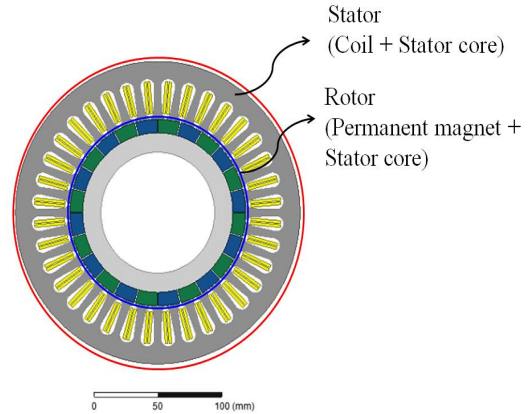


Fig. 5 Schematic geometric layout

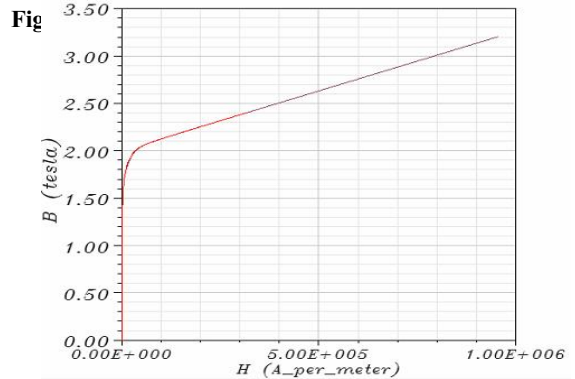
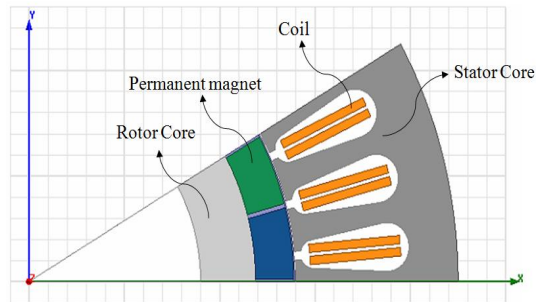


Fig. 7 B-H curve of a steel1010 of magnetic materials

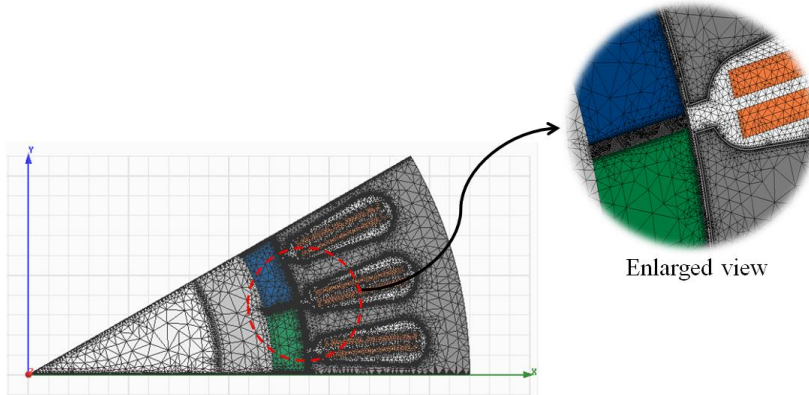


Fig. 8 Meshed model of PM generator

Table 1 Design specifications of Permanent generator

Item		Model
Rotor	Inner diameter	95 mm
	Outer diameter	122 mm
Stator	Inner diameter	140 mm
	Outer diameter	220 mm
Magnet thickness		8.5 mm
Air gap		0.5 mm
Number of pole		24
Number of phase		3
Number of turns		40 turns
Rated speed		300 rpm

Table 2 Magnetic properties of material

	Copper	Steel1010	Nd-Fe35
Electric Conductivity	$580 \times 10^5$	$11 \times 10^5$	$6.25 \times 10^5$
Relative Permeability	0.999	-	1.099

초기 해석 시 적합한 해석을 위해서 격자는 기본적으로 Maxwell에서 제공하는 Auto mesh를 사용하였다. 최종 해석 시 더욱 정확한 공극자속밀도 분석을 위해 특히 Fig. 8과 같이 영구자석과

Stator 사이의 공극을 중심으로 격자를 더욱 조밀하게 형성하여 총 격자요소 수는 353,693개 이다. 해석 Type은 Transient mode로 설정하여 시간에 따라 변하는 해석결과를 도출하였다. 총 해석시간은 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다. 1/12로 분할된 형상에서 2개의 극으로 구성된 Rotor가 300rpm으로 회전 시 한 바퀴 회전하는데 걸리는 시간은 0.2s이다. 결과 분석 시 Rotor가 1도 마다 변하는 자속밀도를 확인하기 위해 time step은 360step으로 시간을 분할하여 0.00055s로 설정하였다.

$$Stop\ time = \frac{1}{\frac{RPM}{60} \times \frac{P}{2}} = \frac{120}{RPM \times P} \quad (1)$$

### 2.3 시뮬레이션 결과

RPM의 변화가 없는 초기상태에서의 자속선과 자속 밀도를 벡터는 Fig. 9와 같이 나타난다. Rotor의 반경방향을 기준으로 2개의 극의 착자방향이 반대로 구성되어 있는 것을 Fig. 9 (b)의 벡터방향으로 확인할 수 있다. 실제 연을 상공에 날려서 측정된 RPM의 평균값인 300rpm을 적용하여 회전자의 회전속도가 300rpm 일 때의 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 무부하 조건에 대한 영구자석 발전기 시뮬레이션 수행 결과 Fig. 10과 같이 시간에 따라 변화하는 각 상에 대한 역기전력 최대



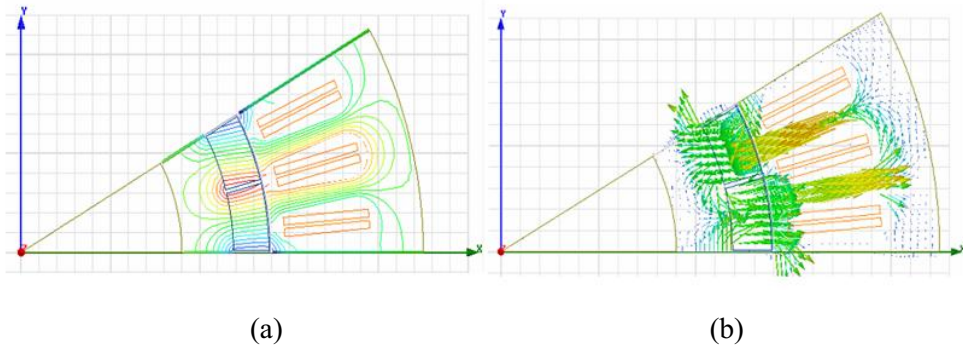


Fig. 9 Magnetic Flux line and Flux density-Vector(Time=0s)

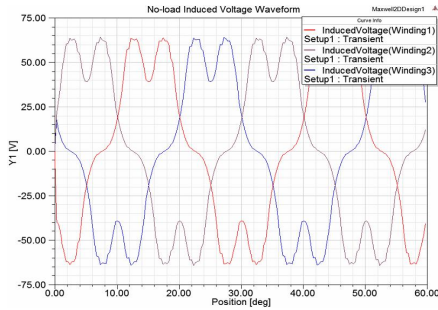


Fig. 10 3-phase Induced Voltage Waveform in no-load condition

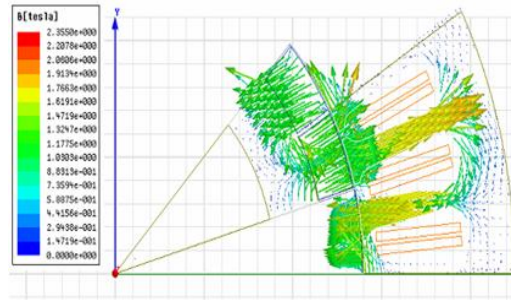


Fig. 11 Flux line and Flux density vector plot at angle 45 °

값은 62.4526V, 62.5220V, 62.5065V 이며 3상의 최댓값 평균은 62.4937V로 도출되었다. RMS(Root Mean Square)값의 경우 각 상에 41.8182V, 41.8826V, 41.8715V가 도출되었으며 이를 통해 3상의 평균은 41.8574V로 확인되었다. 전기, 전자 분야에서는 교류기의 RMS값을 실효값이라고도 부르는데 직류전압과 같은 에너지 전력을 가지는 교류전압을 의미한다. 일반적으로는 교류인 사인파의 경우를 가정하여  $V(t) = V_p \sin(\omega t)$  라고 한다면 식 (2)와 같이 최댓값에 대해  $1/\sqrt{2}$ 를 한 값을 RMS라 한다<sup>[12]</sup>. 그러나 Maxwell에서 적용된 RMS값은 기본파와 정수배의 주파수인 고조파가 포함되어 계산되어진 값이기 때문에 식(2)를 적용하는 이론적인 실효값 44.1897V 보다는 낮은

RMS 값이 도출된 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 회전자의 회전위치가 45도 일 때의 자속밀도를 벡터로 표현하였다. 해석모델의 자화된 슬롯에서 공극자속밀도가 다소 크게 발생됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_p^2 \sin^2(\omega t) dt} \\
 &= \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

### 3. 결론

본 연구에서는 연을 적용한 풍력발전기 시스템

에 적용이 가능한 소형 직접 구동형 영구자석 발전기에 관한 연구를 진행하였다. 실제 연이 하늘을 나는 동안의 RPM을 측정하였고 이를 적용한 영구자석 발전기에 대한 전자기해석을 통해 역기전력 값을 도출하였다.

- 얼레의 회전수를 측정하기 위해 두 가지 측정 장치인 자동차 회전수 측정기 타코메타(비접촉식)와 자전거 케이던스/속도계 센서를 활용하였다. 실제 연이 하늘을 나는 동안 얼레의 회전수를 반복 측정하였다. 측정 기간 동안의 평균 풍속은 약 1~3m/s이다. 측정 실험결과 평균 약 300rpm에서 최대 600rpm까지 측정되는 것을 확인할 수 있었다.

- 실험을 통해 측정된 평균 rpm 값인 300rpm을 적용하여 영구자석 발전기를 설계하였고 상용 전자기해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 전자기 해석을 진행하였다. 그 결과 3상의 코일에서 발생하는 역기전력의 최대값의 평균은 62.4937V로 도출되었으며 교류전기의 실효값인 RMS값의 평균은 41.8574V로 도출되었다.

## REFERENCES

1. Cho, S. M., Lee, D. Y., Kim, L. S., Cho, S. P., and Lyu, S. K., "A Study on Optimization of Tooth Micro-geometry for Wind Turbine High Speed Stage Helical Gear Pair", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13 No. 5, pp. 15-20, 2014
2. Kim, S. W., and Kim, H. G., "Technology Development Trends for High Altitude Wind Power Generation", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 30, No. 1, pp. 19-24, 2010.
3. Canale, M., Fagiano, L., Ippolito, M., Milanese, M., "Control of tethered airfoils for a new class of wind energy generator", Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, pp. 4020-4026, 2006.
4. Canale, M., Fagiano, L., Milanese, M., "Power Kites for Wind Energy Generation", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 27, No. 6, pp. 25-38, 2007.
5. Ahmed, M., Hably, A., and Bacha, S., "Power maximization of a closed-orbit kite generator system." 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, pp. 7717-7722, 2011.
6. Grauers, A., 'Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines', A Dissertation for a Doctoral Degree, Chalmers University of Technology, 1996.
7. Chung, D. W., You, Y. M., "Cogging Torque Reduction in Permanent-Magnet Brushless Generators for Small Wind Turbines", Journal of Magnetics, Vol. 20, No. 2, pp. 176-185, 2015.
8. Jang S. M., Choi, J. Y., Lee, S. H., "Reduction and Analysis for Cogging Torque of Permanent Magnet Synchronous Generators with Multi-Pole Rotor for Wind Power Application", The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 57, No. 3, pp. 375-383, 2008.
9. Choi, M. S., Chang, Y. H., Park, T. S., Jeong, M. S., and Moon, C. J., "A Study on Rotor Eddy Current Loss and Thermal Analysis of PM Synchronous Generator for Wind Turbine", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 11, pp. 1575-1581, 2014.
10. Hur, K. D., and Ye, S. D., "Design of Neodymium Permanent Magnetic Core using FEM", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13 No. 5, pp. 70-75, 2014.
11. Seok, N. K., Cho S., G., and Kim, J., B., "Current Status and Research Trend of Rare-earth Permanent Magnet", Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 22, No. 6, pp. 221-227, 2012
12. Kim, S. R., Lee, S. H., Jeong, H. J., Kim, K. H., and Park, S. J., "A New Distributed Resources Monitoring System based TCP/IP using LabVIEW", Power Electronics Annual Conference, pp. 525-527, 2009.