



[2020-6-WD-002]

# 도서지역 적용을 위한 230 kW급 저풍속 중형 풍력발전기의 전자장해석

최만수<sup>1)</sup> · 최혜원<sup>2)</sup> · 이창민<sup>3)</sup> · 최현준<sup>2)\*</sup>

## Electromagnetic Field Analysis of 230 kW-class Low Wind Speed Medium Wind Turbine for Island-area Application

Mansoo Choi<sup>1)</sup> · Hyewon Choi<sup>2)</sup> · Changmin Lee<sup>3)</sup> · Hyenjun Choi<sup>2)\*</sup>

Received 15 October 2019 Revised 7 February 2020 Accepted 2 March 2020 Published online 9 April 2020

**ABSTRACT** Recently, a project to build a carbon zero island with no carbon emissions has been carried out by replacing diesel generators with renewable energy sources in island areas where diesel generators supplied local loads as independent systems. To minimize damage to the lives of islanders, low noise wind generators should be installed by adjusting the rated speed. In islands with low loads, wind turbines that are more efficient than medium-sized wind turbines should be installed. In this study, the generator field analysis and characteristics were analyzed to develop 230 kW-class low wind medium-wind turbine technology. The electromagnetic field analysis program used Maxwell. As a result, the cogging torque was reduced, and the initial maneuver wind speed and loss value were lowered. Hence, the output amount was increased with high efficiency.

**Key words** Electromagnetic field(전자장), Generator(발전기), Island area(도서지역), Medium size(중형), Wind turbine(풍력발전기)

### 1. 서론

국내에는 아직도 계통연계가 되지 않는 도서지역이 약 100여 개 이상이 존재하고 있다. 도서지역은 지역 내에 디젤 발전기를 이용해 독립 발전소를 운영하여 전력을 공급하

고 있다. 도서지역의 경우 전력을 공급 및 운영하는데 있어 도심 지역에 비해 평균 490원/kWh로 약 4배 비싼 비용으로 전력을 공급받고 있다<sup>[1~2]</sup>. 또한, 연료 운송에 따른 문제점 및 보완점도 남아있는 상태이다.

이에 따라 도서지역에 디젤발전기 대신에 매연이나 이산화탄소 등 유해물질을 발생시키지 않아 환경문제도 해소할 수 있는 풍력, 태양광 등 신재생에너지를 활용하는 방안으로 에너지자립섬 구축이 진행되고 있다.

에너지자립섬 구축을 위한 전력공급원은 태양광발전, 풍력발전, 조류발전 등 여러 신재생에너지원이 있지만, 풍력발전의 경우 육지보다 우수한 바다의 바람을 이용하여 발전하므로 유리한 면이 있다<sup>[1~5]</sup>.

1) Ph.D. Chief Researcher, Department of Wind-Ocean Power R&D, Green Energy Institute

2) Ph.D. Senior Researcher, Department of Wind-Ocean Power R&D, Green Energy Institute

3) Researcher, Department of Wind-Ocean Power R&D, Green Energy Institute

\*Corresponding author: [hjchoi@gei.re.kr](mailto:hjchoi@gei.re.kr)

Tel: +82-61-288-1054 Fax: +82-61-287-8006

도시지역의 경우 부하가 작고 입지조건상 주택 인근 거주지에 발전소가 위치하므로 대용량 풍력발전기보다, 소음이 적고 저 풍속에서도 출력이 많은 고효율의 중소형 풍력발전기를 설치하는 것이 중요하다<sup>[4~5]</sup>. 또한, 대형 풍력발전기는 1~2기 설치하는 것보다 중소형 풍력발전기 다수를 설치하는 것이 도시지역 소규모 계통의 안정화에 도움이 된다.

영구자석을 이용한 발전기는 구조가 단순하고 유지보수가 용이한 장점이 있다. 그러나 필연적으로 초기기동을 어렵게 하고 진동과 소음을 발생시키는 코깅토크가 발생된다<sup>[6]</sup>.

이에 본 논문에서는 코깅토크를 최소화한 230 kW급 저풍속 중형 풍력발전기를 제안하여 전자장해석을 통해 성능을 분석하였다.

## 2. 설계

### 2.1 발전기 설계사양

설계된 발전기의 성능은 상전압 및 선간전압, 전류, 자속 밀도, 전류밀도 분포 등의 값으로 확인한다. 그러므로 ANSYS Space Claim Direct M8odeler(SCDM) Maxwell 프로그램을 사용하여 등가회로법을 적용해 설계하였다. 등가회로법은 기기의 회로정수를 이용하는 해석법으로 시스템의 전력, 전류, 전압 등의 운전 특성을 해석하기에 적합하다<sup>[5]</sup>. 등가회로분석 및 유한요소해석에는 ANSYS RMXprt, ANSYS Maxwell 프로그램을 사용하였다.

Fig. 1과 Table 1은 230 kW급 저풍속 중형 풍력발전기

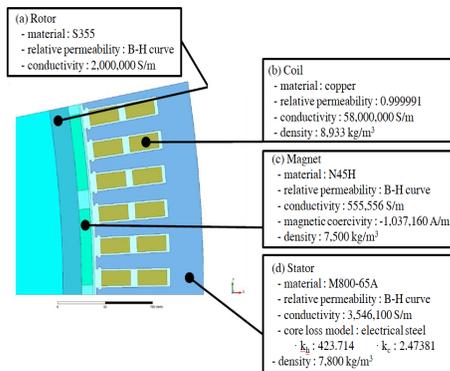


Fig. 1. Slot shape detailed model

Table 1. Generator design parameter

Parameter		Value
Electric power, P [kW]		230
Rated current [A <sub>rms</sub> ]		193
Rated line voltage [V <sub>ll</sub> ]		690
Rated rotation speed [rpm]		34.87
Phase		3
Winding method		Y
Stator	Outer diameter [mm]	2,230
	Inner diameter [mm]	2,000
	Height [mm]	350
	Lamination ratio	0.97
Coil	Pitch	3
	Size [mm]	6.9 × 3.45
Space factor [%]		65.4
Rotor	Outer diameter [mm]	1,992
	Inner diameter [mm]	1,928
	Height [mm]	350
Pole arc ratio [%]		80

의 설계 사양 및 슬롯 형태이다. 발전기는 저풍속, 저소음을 위해 정격 회전속도를 34.87 rpm으로 기어가 없는 직접 구동형의 터빈에 적용될 다극의 구조를 지니는 inner rotor 형태인 영구자석형 발전기를 적용하였다. 정격전압은 690 V, 정격출력은 230 kW, 3상 Y결선이다.

### 2.2 물성

Fig. 1은 부품별 재질에 따른 물성치를 나타낸다. Fig. 1(a)는 회전자인 rotor이고 재질은 S355(강재)이다. Fig. 1(b)는 권선에 적용되는 코일로써 재질은 copper(구리)이고, Fig. 1(c)는 영구자석(PM; Permanent Magnet)으로 N45H, Fig. 1(d)는 고정자인 stator로 재질은 M800-65A(냉간압연전기강판)이다.

Fig. 2와 3은 Rotor와 Magnet 재질인 S355와 N45H의 B-H curve를 나타내고 Fig. 4는 M800-64A의 B-H curve와 주파수 대비 코어 손실 특성을 나타낸다.

### 2.3 손실 계산

시뮬레이션 결과의 유효성을 판단하기 위해 부품별 손실 값을 Steinmetz의 철손 특성 방정식을 이용하였다.

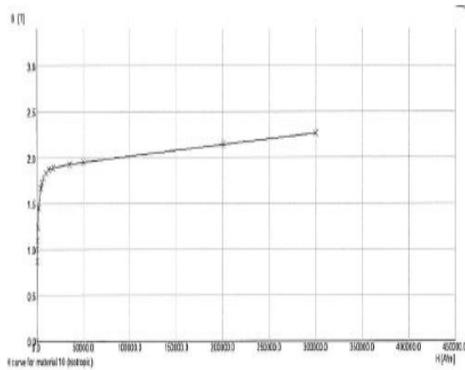


Fig. 2. S355 B-H curve

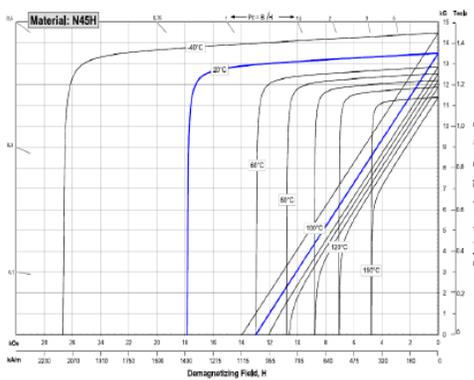


Fig. 3. N45H B-H curve

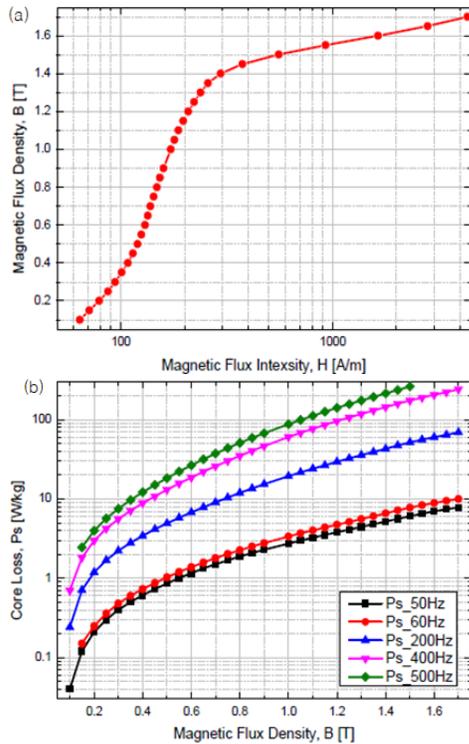


Fig. 4. M800-64A material

$P_i$ 는 철손으로 기본 특성 방정식은 식 (1)과 같다. 식 (1)은 철심 내의 자속 밀도가 1 Tesla 미만이거나 낮은 주파수 영역에 적합하다. 자속밀도와 주파수 영역대가 높을 경우 재료내부에서 결정구조의 변화, 판에 미치는 장력 등에 의해 발생하는 이상 와전류 손실 성분이 존재하기 때문에 식 (1)은 큰 오차가 발생한다. 그러므로 발전기의 부품별 철손 값을 정밀하게 해석하기 위해서 식 (1)에 이상 와전류 손실 성분인  $P_a$ 를 고려한 식 (2)를 이용하였다<sup>[7-8]</sup>.

$$P_i = P_h + P_e = k_h f B_m^2 + k_e (f B_m)^2 \quad (1)$$

$$P_i = P_h + P_e + P_a = k_h f B_m^2 + k_e (f B_m)^2 + k_a (f B_m)^{1.5} \quad (2)$$

Thus,

$P_i =$  core loss,  $P_h =$  hysteresis loss,

$P_e =$  eddy current loss,  $k_h =$  hysteresis constant,

$k_e =$  eddy current constant,  $k_a =$  excess constant,

$f =$  frequency[Hz],  $B_m =$  flux density[wb/m<sup>2</sup>]

## 2.4 해석모델

Fig. 5는 발전기 해석 모델이다. 주기모델을 사용할 경우 정확도 및 해석 시간이 단축 가능하여 해석의 효율성이 향상된다. Fig. 5(a)와 같이 전체모델의 전기적 및 기계적 주기성을 파악한 결과, Fig. 5(b)와 같이 1/36로 주기모델을 생성하였다.

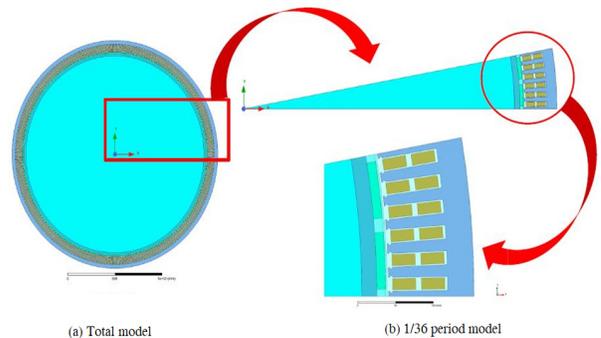


Fig. 5. Generator model

### 2.5 유한요소모델

Fig. 6은 유한요소해석을 위해 기하모델로부터 생성한 요소모델이다. 해석을 위한 전체 격자수는 5,270개이다. 해석의 정확도를 높이고자 에너지 변화량이 큰 회전자와 고정자 사이의 공극에 다른 부분보다 많은 격자를 생성하였고 발전기의 성능 분석을 위해 공극을 비롯한 권선, 회전자, 고정자, 자석의 격자 크기를 조절하였다.

또한, 해석 결과의 정밀도를 향상시키기 위해 경계지역에 격자를 집중하도록 모델링하였다. 단, 생성된 요소모델의 형태에 따라 해석결과와의 차이는 발생할 수 있으며 본 해석처럼 주기모델을 생성하면 격자수에 대해 자유로워져 원하는 만큼 격자밀도를 높일 수 있다.

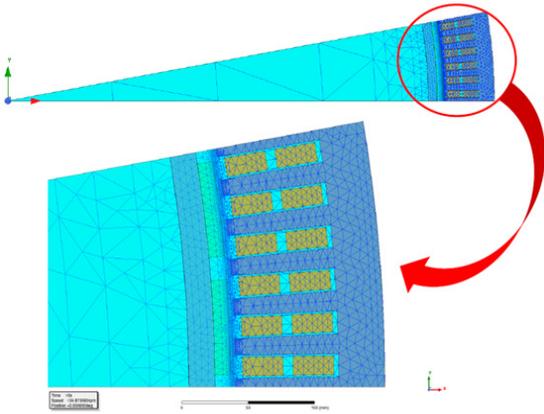


Fig. 6. Generator element model

### 2.6 시뮬레이션 회로

Fig. 7은 전원인 외부회로도이다. 정격 회전에서 발생하는 전압, 전류 등의 출력특성을 확인하기 위해 외부회로를 이용하여 전원부를 설계하였다. 발전기의 출력단에 연계되는 외부회로는 3상이며 부하는 저항과 인덕턴스, 상저항으로 값은 Table 2와 같다.

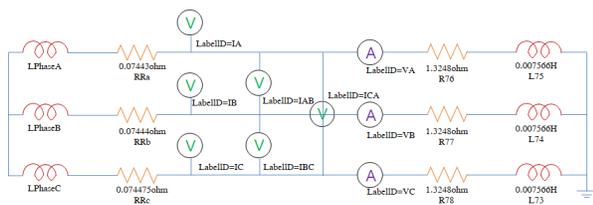


Fig. 7. Test circuit diagram

Table 2. Circuit design parameter

Parameter	Value
Phase	3
Phase resistance, RR [ $\Omega$ ]	0,07443
Load resistance, R [ $\Omega$ ]	1,3248
Load inductance, L [H]	0,007566

## 3. 해석결과

### 3.1 자속밀도

Fig. 8과 9는 Fig. 5와 같은 주기모델의 자속분포를 flux line과 field로 해석한 결과이다. 누설자속을 최소화하기 위해 stator나 PM의 형상을 최적화하여 설계한 결과 Fig.

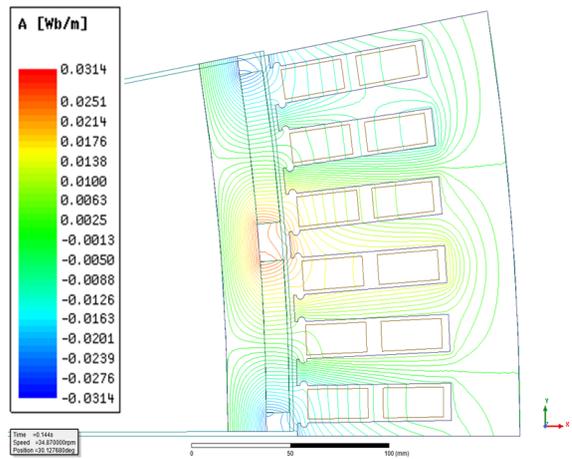


Fig. 8. Flux line

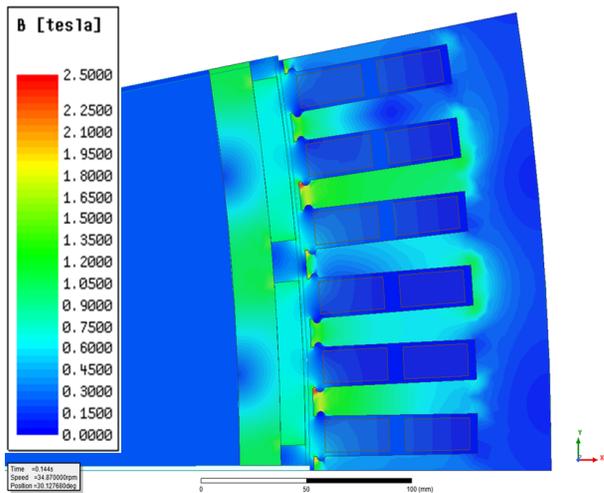


Fig. 9. Flux density field

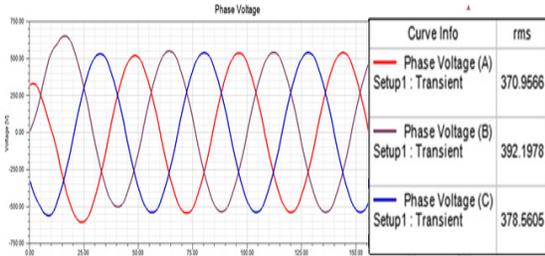
8과 같이 flux line이 형성되었다.

Fig. 9는 자속분포를 field로 나타낸다. 자속이 stator의 edge 부분에 집중되어 자속밀도가 최대 2.5 Tesla 까지 생성되었다. Stator의 재질인 M800-65A의 물성치에서 포화되는 지점은 2 Tesla 이상으로 edge 부분에서 약 0.5 Tesla가 초과되었다.

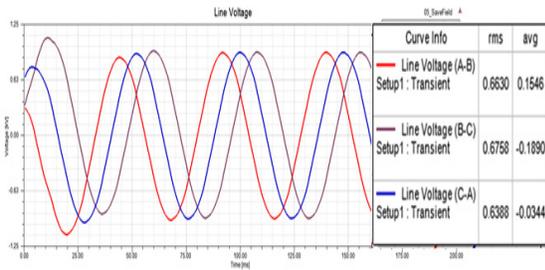
Edge 부분은 단면적이 극단적으로 변화하기 때문에 누설 등이 가장 많이 발생하는 지점이므로 형상 변화를 통해 자기포화, 온도상승에 대한 고려와 보완이 필요하다.

### 3.2 출력량

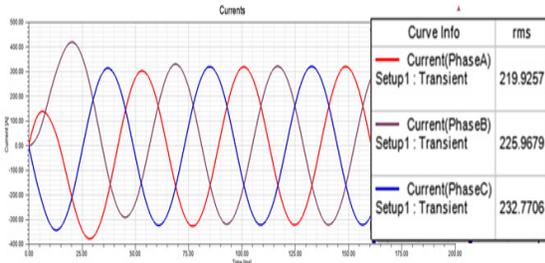
Fig. 10은 발전기의 출력량이다. 정격 회전속도인 34.87 rpm에서 출력전압은 상전압으로 371~392 V이고 선간전압으로 636~676 V이다. 출력 전류는 220~226 A이다.



(a) Phase-voltage [V]



(b) Line-voltage [V]



(c) Current [A]

Fig. 10. Voltage and current waveform

### 3.3 Cogging torque

Fig. 11은 코깅토크 결과이다. 코깅토크는 영구자석형 발전기에서 자석에 의한 흡인력과 반발력으로 생기는 힘이다. 다극 다수의 슬롯 구조를 적용한 결과, 코깅토크가 저감되어 정격속도에서 평균 60.39 kN·m로 측정되었다. 또한, 초기 구동 시 약 50 msec 동안 과도상태가 나타났으나 이후 수렴되는 것을 확인하였다.

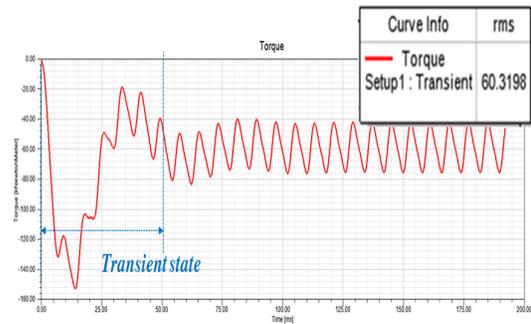


Fig. 11. Cogging torque waveform

### 3.4 고찰

Table 3은 230 kW급 발전기의 유한요소해석 결과를 반영한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 정격 회전속도에서 약

Table 3. Results

Parameter		Value
Line-voltage [V]	Phase A - Phase B	663
	Phase B - Phase C	676
	Phase C - Phase A	639
Voltage [V]	Phase A	371
	Phase B	392
	Phase C	379
Current [A]	Phase A	220
	Phase B	226
	Phase C	233
Phase resistance [Ω]		0.074
Torque [kN·m]		60.39
Copper loss [kW]		1.43
Core loss [kW]	Stator	1.47
	Rotator	0.042
	PM	0.22
Input power [kW]		271.54
Output power [kW]		258.37

258 kW가 출력됨을 확인하였다. 유한요소법을 적용하여 계산된 결과 철손은 1.73 kW, 동손은 11.43 kW로 전체 손실은 13.16 kW이다. 식 (3)에 따라 정격출력에서 효율은 95.15%로 계산되었다.

$$\eta_g = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_l} \times 100[\%] \quad (3)$$

Thus,

$\eta_g = \text{generator efficiency,}$

$P_{out} = \text{output power, } P_l = P_{copper\ loss} + P_{core\ loss},$

본 해석은 상온기준으로 진행되었으므로 온도상승에 따른 발전기의 출력저하가 있을 것으로 사료된다. 반면, 유한요소법을 통한 해석 결과에는 풍손, 마찰손 등과 같은 기계적 손실이 고려되지 않았다. 그러므로 추후 기계적 손실을 추가로 고려해야 한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 도서지역에 적용 가능한 230 kW급 저풍속 중형 발전기 전자장해석을 통해 설계 타당성을 검토하였다. 등가회로법을 적용해 발전기를 설계한 후 유한요소법을 활용하여 검증한 결과, 연속된 flux-line을 통해 누설자속량이 최소화됨을 확인하였다. 또한, 외부 전원 회로와 발전기를 연계해 출력 특성을 분석한 결과, 코깁토크 값이 저감되어 초기 기동풍속이 낮아졌으며 낮은 손실 값으로 인해 약 95% 이상의 높은 효율로 고 전력량이 출력됨을 확인하였다.

추후 온도상승 및 기계적 손실 등 다양한 변수를 고려한 추가해석을 진행하여 230 kW 급 저풍속 중형 발전기의 신뢰도 및 정확도를 향상시킬 경우 도서지역의 전력공급 안정도를 확보하여 공급 신뢰도를 향상시키는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

#### References

- [1] Korea Smart Grid Institute, 2016, "A research project for development of new business of energy industries (Report. P-2015-004-T0)", Ministry of Trade Industry and Energy.
- [2] Kim, S.G., 2019, "A study on procedure for energy independent islands", Master's thesis, Mokpo University.
- [3] Lee, S.H., 2018, "Optimization study of micro-grid for energy self-sufficient islands", Master's thesis, Sejong University.
- [4] Hwang, D.H., Park, D.Y., Kang, D.H., Bae, S.W., Choi, K.H., and Kim, D.H., 2002, "Design and steady-state electromagnetic analysis of a wind energy generator with permanent magnet", Proceedings of the KIEE Conference, **2002**(4), 6-8.
- [5] Jang, S.M., Ko, K.J., and Choi, J.Y., 2010, "Performance evaluation of small-scaled wind power generator with outer permanent magnet rotor considering electromagnetic losses (1) - magnetic field analysis and electrical parameters derivation using electromagnetic transfer relations theorem", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., **59**(12), 5179-2189.
- [6] Kim, T.H., 2010, "Design of 3MW class outer rotor type PMSG for wind turbine", New. Renew. Energy, **6**(4), 41-49.
- [7] Jang, S.M., Ko, K.J., and Choi, J.Y., 2011, "Performance evaluation of small-scaled wind power generator with outer permanent magnet rotor considering electromagnetic losses (2) - electromagnetic losses and performance analysis", Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., **60**(1), 50-61.
- [8] Chen, Y., and Pillay, P., 2002, "An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation", 37th IAS Annual Meeting. Conference Record, **2**.