

연간 최대 에너지 생산량을 위한 직접구동 영구자석 풍력 발전기의 최적설계

조명수, 이철균
동의대학교

Optimal Design of Direct-driven PM Wind Generator for Maximum Annual Energy Production

Myung-Soo Cho, Cheol-Gyun Lee
Dong-Eui University

Abstract - In this paper, annual energy production(AEP) of the wind generator system is analogized considering the regions of a variable wind speed and it is applied to optimal design of the PM wind generator for capturing maximum energy in the operating regions. In addition, internet parallel computing is used to loose excessive calculation times through optimization of the finite element analysis(FEA).

1. 서 론

최근 신·재생에너지 기술개발의 관심이 고조되고 있으며, 실용화에 대한 연구가 추진되고 있다. 특히, 자연 에너지를 이용한 발전시스템이 주목을 받고 있으며, 대표적으로 풍력 발전을 들 수 있다. 풍력 발전 시스템은 운전 방식에 따라 증속기(Gear box)를 갖는 경우와 갖지 않는 경우인 직접 구동(Direct-drive)형으로 나누어진다. 증속기를 갖는 경우 증속기로 인해 많은 기계적 손실이 발생되며, 풍력 발전 시스템의 수명을 단축하는 단점을 지니고 있다. 따라서 풍력 발전 시스템은 대형화, 고효율, 고성능 관점에서 직접 구동형이 채택된다. 직접 구동형은 저속에서 운전되므로 상대적으로 높은 토크밀도를 갖는다. 따라서 직접구동형 풍력 발전 시스템의 발전기는 고 토크밀도와 고 효율의 특성을 가지는 다극 영구자석 동기발전기가 주로 채택되어진다.

본 논문에서는 대형 풍력 발전시스템에 적용되는 다극 영구자석 동기발전기인 표면 부차 영구자석 동기발전기(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Generator: SPMSG)의 최적설계를 수행하였다. 일반적으로 풍력발전기의 최적설계의 목적함수로는 정격출력시의 효율이 선정된다. 그러나 풍력 발전시스템은 1년내내 정격풍속에서 운전되는 것이 아니므로 운전 풍속 영역 모두를 고려하여야 한다. 또한, 풍력 발전 시스템이 설치되는 지역의 풍속 분포 특성도 고려하여야 한다. 따라서 풍력발전기의설계시에 연간 에너지 생산량(Annual Energy Production: AEP)을 최적설계의 목적함수로 선정하였다.[1]

SPMSG의 경우 슬롯 및 자석의 형상에 따른 정밀한 해석이 필요한 경우 발전기 특성계산을 위해 FEA가 요구된다. 하지만 과도한 해석 시간 때문에 FEA해석을 통한 최적화는 실용적이지 않은 것이 일반적이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 병렬 계산을 통해 전체 계산시간을 분할하는 분산 컴퓨팅 알고리즘을 사용하였다. 본 논문은 이런 분산기법을 Internet Web Service를 통해서 실현하였다.[2]

2. 풍력 발전 시스템

2.1 풍력에너지의 특성

공기 중에 질량 m 이 속도 v 로 이동 할 때 운동에너지는 SI 단위상으로는 식(1)과 같다.

$$kinetic\ Energy = \frac{1}{2}mv^2 \quad [joules] \quad (1)$$

그러므로 공기의 흐름에 의한 에너지는 단위 시간당 운동에너지의 변화량이 되므로, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot (mass\ flow\ rate\ per\ second) \cdot v^2 \quad [W] \quad (2)$$

여기서, P_w : 풍력에너지의 총량[W]
 ρ : 공기밀도[kg/m³]
 A : 블레이드 통과면적[m²]
 v : 풍속[m/s]

라 한다면, 단위시간에 대한 공기의 부피변화는 $A \cdot v[m^3/s]$ 이며, 질량의 변화는 $\rho \cdot A \cdot v[m^3/s]$ 가 되므로, 풍력에너지는 다음과 같다.

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho v A)v^2 = \frac{1}{2}\rho A v^3 [W] \quad (3)$$

P_w 의 에너지는 터빈에 의해 기계적인 동력으로 변환 되는데, 터빈의 이상적인 회전의 경우 즉, 각 운동량의 변화가 없고 터빈 끝의 간섭흐름이 없는 경우 변환효율을 표시하는 출력계수 C_p 는 이론적으로 0.593임을 Betz 가 밝힌 바 있으나, 공기의 점성과 회전자 끝의 간섭 흐름 등 여러 가지 원인에 의해서 설계와 운전 상태에 따라 달라진다. 따라서 풍력터빈에 따른 출력계수 C_p 를 적용하면 풍속에 갖는 에너지는 식 (4)와 같다.

$$P_s = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p [W] \quad (4)$$

그림 1은 프로펠라형의 일반적인 주속비(tip speed ratio)에 따른 출력계수 C_p 의 관계를 보여준다.

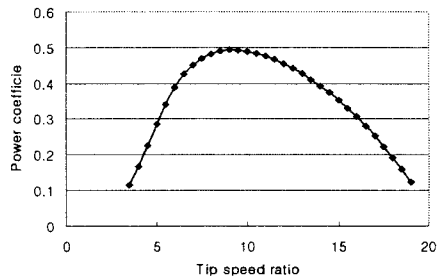


그림 1. 풍력터빈의 성능
Fig. 1 Performance of wind turbine

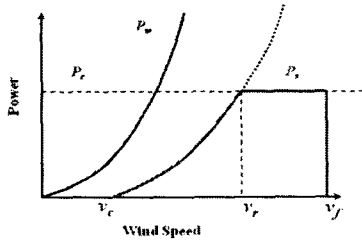


그림 2. 풍력 발전 시스템의 출력 특성
Fig. 2 Output characteristics of a power wind generation system

또한, 실제 풍력 발전 시스템의 운전 시에는 시스템의 기계적 관성, 마찰 및 전기적 손실 등에 의해 시동풍속 v_c 이상의 풍속에서만 시스템의 출력이 생산되기 시작하고, 정격풍속 v_r 에서의 정격출력 P_r 까지는 v^3 에 비례하여 출력을 나타내며, 그 이상의 풍속에서는 시스템의 출력이 일정하게 유지된다. 이러한 정격 상태에서 정격출력의 일정한 유지는 터빈의 날개 각도를 변경하는 즉 피치제어(pitch control)시스템을 통하여 이루어지며, 결국 날개 각도의 변경을 통하여 터빈의 출력계수 C_p 를 조정함으로써 이루어진다. 풍속이 정지풍속 v_j 이상이 되면 터빈의 파손방지나 내부시스템의 안정을 위하여 공회전 상태가 되어 더 이상 발전을 하지 않는다. 그림 2는 일반적인 풍력 발전 시스템의 출력 특성을 나타내고 있다.

2.2 풍력 시스템의 구성

그림 3은 본 논문에서 제안한 풍력 발전 시스템의 구성을 나타낸다. 시스템의 운전방식은 직접 구동방식이며, 터빈의 날개는 피치제어를 통하여 발전기의 출력량을 제어하며, 또한 시스템의 발전기는 다극 SPMSG이다.

표 1은 제안된 시스템의 사양을 나타낸다.

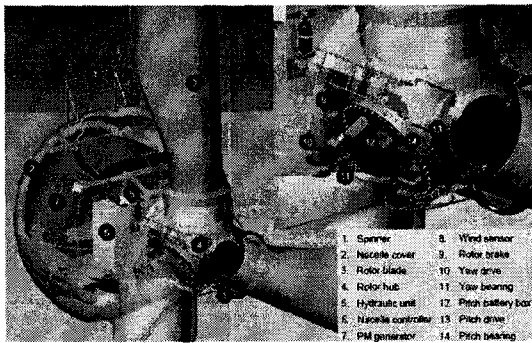


그림 3. 풍력 발전 시스템의 구성
Fig. 3 Structure of wind generation system

표 1. 풍력 발전 시스템의 사양
Table 1 Specification of wind generation system

Rated Power output(P_s)		500kW
Design speed	Cut-in wind speed	3.5 m/s
	Rated wind speed	13.5 m/s
	Cut-out wind speed	26 m/s
Generator	Type	Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Generator
	Diameter	39 m
Turbine Rotor	Rotational speed range	0-32 rpm
	Swept area	1207 m ²
	Control system	Pitch control

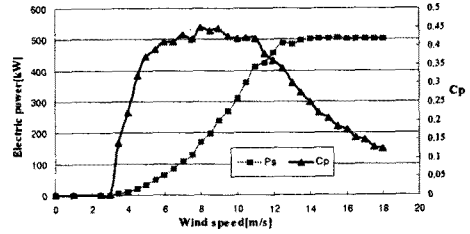


그림 4. 출력곡선과 출력계수
Fig. 4 Power curve and power coefficient

3. 풍력 발전기의 최적설계

3.1 풍력 발전기의 출력전류 산정

풍속에 따른 터빈의 출력(P_s)은 식 (4)와 같으며, 본 논문에 적용되는 풍력 발전시스템의 터빈 출력(P_s)과 출력계수(C_p)는 그림 4에 나타낸다.

풍력 발전기 SPMSG의 입력(P_i)은 다음과 같다.

$$P_i = \omega T \quad [W] \quad (5)$$

여기서, $T = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q [Nm]$, $\omega = \frac{v(\lambda)}{R} [rad/s]$

중속기를 사용하지 않는 직접 구동 풍력 발전 시스템의 터빈에 의한 출력(P_s)은 풍력 발전기의 입력(P_i)과 같다. 따라서 풍력 발전시스템의 출력전류는 다음과 같다.

$$P_s = P_i = \omega T$$

$$i_q = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda(v)} C_p(v) v^2 [A] \quad (6)$$

여기서, i_q : 발전기 출력전류[A]
 $C_p(v)$: 풍속에 따른 출력계수
 ρ : 공기밀도[kg/m³]
 A : 터빈의 면적(πR^2)[m²]
 p : 극쌍수
 λ_{pm} : 극당평균 자속수
 $\lambda(v)$: 풍속에 따른 주속비

식 (6)을 통해 볼 때 출력계수(C_p)와 주속비(λ)는 풍속의 함수이며, 이를 통하여 풍속의 전 영역에서 발전기의 출력전류를 산출할 수 있다. 이러한 출력전류로부터 발전기의 특성해석을 수행하여 손실을 계산하고 발전기의 출력(P_o)도 계산하였다.

3.2 풍속 확률밀도

풍력발전 시스템이 설치되는 지역의 풍속특성을 파악하기 위하여 풍속 확률밀도 함수로는 일반적으로 식 (7)과 같은 레일레이(Rayleigh) 분포가 사용된다.

$$F(v) = \frac{\pi v}{2v_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right] \quad (7)$$

여기서, $F(v)$: 특정풍속 v 일 확률
 v_a : 연 평균 풍속[m/s]
 v : 특정풍속[m/s]

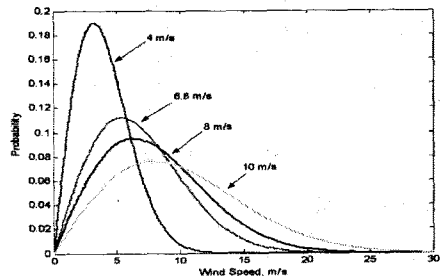


그림 5. 풍속의 분포
Fig. 5 Distribution of wind speed

그림 5는 레일레이 분포를 통하여 연 평균풍속 4, 6.8, 8, 10[m/s]일 때, 각 풍속의 확률 분포를 나타낸다. 이러한 분포는 특정 지역의 연 평균풍속을 통해 풍속의 특성을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 대관령 풍력실증단지 연 평균풍속 6.8[m/s]를 적용하여 최적화를 수행하였다.

3.3 풍력 발전시스템의 연간 에너지 생산량

연간 에너지 생산량(AEP)은 각 풍속에 대한 확률과 발전기의 출력(P_o)을 통해서 예측된다.

특정 풍속 v 가 1년 동안 부는 시간과 연간 에너지 생산량을 구하는 식은 다음과 같다.

$$H(v) = 365 \times 12 (= 8760 \text{시간}) \times \text{풍속 } v \text{ 일 때 확률} \\ = 8760 \times F(v) \Delta v \quad [\text{hour}] \quad (8)$$

여기서, $H(v)$: 특정 풍속 v 가 1년간 부는 시간
 $F(v)$: 특정 풍속 v 의 확률

풍속 v 일 때 연간 에너지 생산량은 다음과 같다.

$$aep(v) = P_o(v) \times H(v) \quad [Wh] \quad (9)$$

따라서 전 풍속 영역에 의한 전체 연간 에너지 생산량은 다음과 같다.

$$AEP_{total} = \sum_{v=0}^n aep(v) \quad (10)$$

3.4 풍력 발전기 최적화 적용

최적화에 적용된 SPMSG 발전기의 사양은 정격출력 500[kW]이고, 100극이며, 300슬롯으로 구성된다. 그림 6은 최적화에 적용되는 SPMSG의 구성과 설계 변수를 나타낸다.

최적 설계 적용시 설계 변수는 SPMSG의 주요 치수인 자극각도(x_1), 고정자 치폭(x_2), 회전자 요크 높이(x_3), 고정자 슬롯 높이(x_4)를 선정하였다. 최적화 수행시 목적함수는 연간 에너지 생산량(AEP)이다. 또한 발전기의 설치공간의 제약을 고려하여 고정자 외경 및 축방향 길이를 고정하였고, 극수 및 공극의 길이도 고정하였다.

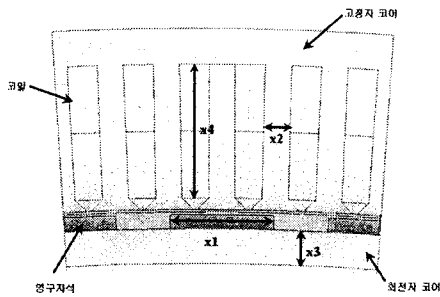


그림 6. SPMSG의 구성
 Fig. 6 Structure of SPMSG

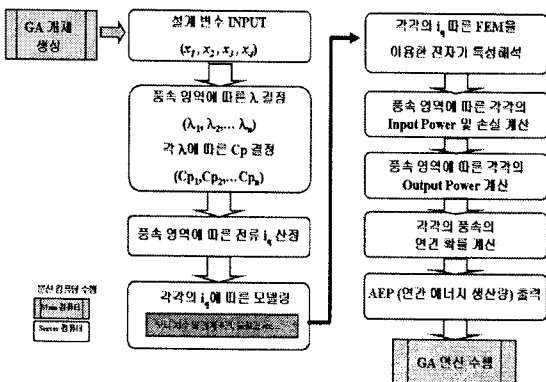
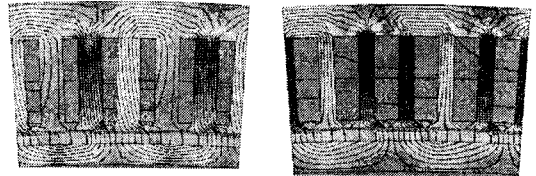


그림 7. SPMSG의 특성해석 흐름도
 Fig. 7 Flow chart of characteristic analysis for SPMSG



(a) 기존모델 (b)최적화 모델(AEP최대화)

그림 8. SPMSG의 자속분포
 Fig. 8 Field distribution of SPMSG

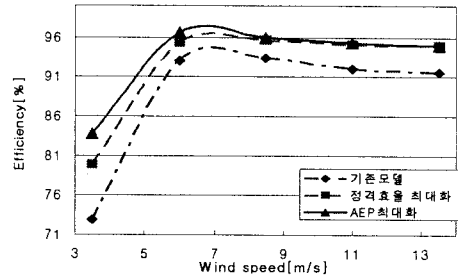


그림 9. 효율 분포
 Fig. 9 Distribution of efficiency

최적화 기법으로는 병렬 유전알고리즘(Parallel Genetic Algorithms)이 사용되었으며, FEA를 사용한 최적화 수행시의 문제점인 수행 시간 단축을 위하여 Internet 분산 컴퓨팅을 사용하였다.[3] 그림 7은 SPMSG의 특성해석 흐름도를 나타낸다.

3.5 최적설계 결과

그림 8은 기존모델과 최적화 모델의 자속분포를 나타낸다. 목적함수로 정격 효율을 사용한 경우와 전 영역의 풍속을 고려한 AEP를 사용한 경우에 대해서 그 결과를 비교하였다. 그 결과 값을 그림 9와 표 2에 나타낸다. AEP 최대화 모델은 초기 모델에 비해 약 3.4%, 정격효율을 최대화 모델에 비해 1.3%정도 연간 에너지 생산량을 더 높일 수 있었다. 그림 9와 같이 AEP최대화 경우 전 풍속 영역에서 효율이 가장 높은 분포를 보인다.

표 2. 최적화모델과 기존모델 비교
 Table 2. Comparison between conventional model & optimal model

목적 함수	설계 변수				AEP [MWh]	정격효율 [%]
	자극 각도 (x_1)	치폭 (x_2)	회전자 요크 높이 (x_3)	슬롯 높이 (x_4)		
기존 모델	2.500	12.5	13.0	58.0	1193.4	91.6
정격효율 최대화	1.948	10.5	22.3	69.2	1218.3	95.0
AEP 최대화	1.892	8.8	19.6	59.6	1234.5	94.9

4. 결론

본 논문에서는 대형 풍력 발전시스템에 적용되는 다극 영구자석 동기발전기인 SPMSG의 최적설계에 목적함수로 운전 풍속 영역과 지역의 풍속 특성을 고려한 연간 에너지 생산량(AEP)을 선정하여 최적설계를 수행하였다. 따라서, 특정 지역에 적합한 풍력발전기를 설계하는 것이 가능하다.

[참고 문헌]

- [1] Khan, M.A et al., "Design of a PM Wind Generator, Optimised for Energy Capture over a Wide operating Range" Electric Machines and Drives IEEE, p.1501, May 15, 2005.
- [2] H.S. Choi et al., "A Distributed Computing Technique for Analysis of Electric Machines Using Internet Web Services," Digest of CEFC 2004, p.124, June 6-9, 2004.
- [3] 이철균, 조명수 etc, "병렬 컴퓨팅을 이용한 영구자석 직류 전동기의 최적설계" 대한 전기기계 학술대회 전기기기 및 에너지 변환시스템 부문, p649-650, 2006. 7. 12.