

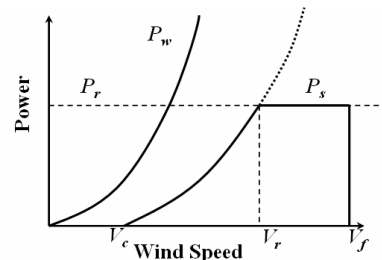
최대연간에너지 생산량을 위한 MADS기반의 풍력발전기 최적설계

박지성*, 정호창* 이철균**, 김종욱*, 정상용*
 *동아대학교 전기공학과, **동의대학교 전기공학과

Optimal Design of Wind Generator based on MADS for Maximum Annual Energy Production

*Ji-Seong Park, *Ho-Chang Jung, **Cheol-Gyun Lee, *Jong-Wook Kim, *Sang-Yong Jung
 Department of Electrical Engineering, Dong-a University*
 Department of Electrical Engineering, Dong-Eui University**

Abstract - 풍력발전기 최적 설계시, 해석특성상 발생하는 막대한 계산 시간문제를 개선하기 위해, 본 논문에서는 최대 연간 에너지 생산량(AEP)을 위한 풍력발전기 최적설계를 빠른 탐색 기법인 MADS(Mesh Adaptive Direct Search)를 기반으로 최적화를 수행하였다. 또한, MADS와, 병렬 분산컴퓨팅 시스템과 결합된 유전알고리즘(Genetic Algorithms)간의 최적화 수행시간을 비교하였다.



<그림 1> 풍속별 유효터빈출력

1. 서 론

직접 구동 풍력발전기는 감속기어를 사용하지 않으므로, 중량과 노이즈 문제를 해결 할 수 있으며, 비용 절감효과와 장점이 있다. 이와 같은 직구동형 풍력발전기에 대해 유효한 모델은 표면 부착형 영구자석 동기발전기(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator, SPMSG)로서, 높은 효율과 토크, 공간 효율적 특징등이 있다.[1]

최대연간에너지 생산량은 풍속의 통계학적 확률분포를 고려하여 풍속별 생산되는 에너지의 총합으로 나타내며, 운전 풍속 영역 모두를 고려하기 위해 풍속 확률밀도 함수는 Rayleigh 함수를 사용하여 AEP를 계산하였다.[2]

본 논문에서는 최대연간에너지 생산량을 목적으로 풍력발전기 최적설계시, F.E.M(Finite Element Method)과[3] 진 풍속영역에서의 해석을 고려함으로써 발생하는 막대한 연산 시간을 개선하기 위해 MADS를 적용하였으며, 병렬 분산 컴퓨팅 시스템을 결합한 유전알고리즘의 수행결과[4]와 연산 시간결과를 비교하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기 최적 설계

본 논문에서 고려하는 영구자석 풍력발전기는 표 1과 같은 시스템 특징을 지니며, 피치 제어 블레이드형(Pitch Control Blade) 구조이다. 발전기 형태는 저속구간에서 높은 토크 발생 및 고효율성을 지니는 다극 표면부착형 영구자석 동기기이다.

<표 1> 풍력발전기 시스템 사양

Rated Power output(Pr)		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	SPMSG
Turbine Rotor	Diameter	39 m
	Rotational	0~32rpm
	Rotational speed range	1207m ²
Control System	Pitch control	

2.1.1 풍력에너지의 특성

풍속에 대한 터빈 출력은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, ρ : 공기밀도 [kg/m³], v : 풍속 [m/s], A : 발전기의 면적 (πR^2)

발전기로 전달되는 유효터빈 출력(Pr)은 유효출력계수(Cp)와 팁 속도비(λ)를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

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

Pr : 터빈의 유효출력, Cp : 유효출력계수, λ : 팁 속도비 (tip speed ratio)

풍속에 대한 발전기의 입력은 식 (2)를 통하여 아래와 같이 정의된다.

$$P_i = \omega T [W]$$

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

이를 통해, 풍력발전기의 출력전류는 아래와 같다.

$$i = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{\rho \lambda_{pm} \lambda(v)} C_p(v) v^2 [A] \quad (4)$$

여기서, p : 발전기의 극쌍수, λ_{pm} : 상당 쇄교자속

2.1.2 풍속 확률분포와 연간 에너지 생산량

풍속에 대한 정보는 확률분포 모델을 적용하였으며, 범용적인 Rayleigh 분포를 적용하였다. 풍속에 대한 확률은 식 (5)와 같다.

$$F(v) = \frac{\pi v^2}{2v_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서, v_a : 연평균 풍속[m/s]

한편, 연간에너지 총 생산량은 각 풍속에 대한 확률(F(v))와 발전기 출력(Po(v))를 통해 예측할 수 있는데, 우선 특정 풍속이 일 년간 유효한 총 시간은 다음과 같다.

$$H(v) = 8760 \times F(v) \Delta v [h] \quad (6)$$

특정 풍속에서 운전시간이 정해지면, 각 풍속별 전력총량이 계산되며, 궁극적으로 연간 운전 시간을 곱하여 다음과 같은 총 에너지 생산량을 구하게 된다.

$$AEP_{total} = \sum_{v=0}^n aep(v) [Wh] \quad (7)$$

여기서, $aep(v) = P_o(v) \times H(v)$

2.1.3 Mesh Adaptive Direct Search(MADS)

MADS는 CS(Compass Search), GSS(Generating Set Search)와 같은 휴리스틱 탐색 기법(heuristic search method)중의 하나이다. 또한, GSS

의 단점중 하나인 탐색방향과 이웃점 생산이 제한적이라는 점을[5] 보완하기 위해서 MADS를 적용하였으며, MADS는 탐색 공간상에서의 탐색 방향이 제한적이지 않는 장점이 있다.

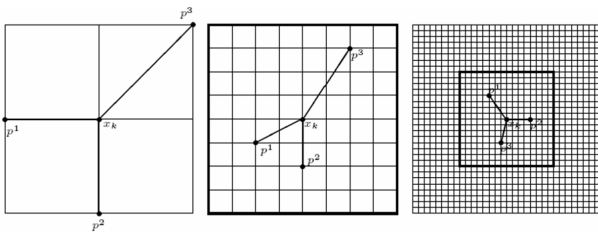
특히, MADS는 임의적, 혹은 경험적으로 산출된 초기해로부터 지역 최적해로 수렴해가는 방식으로서, 미분정보를 요구하지 않기 때문에 응답속도 및 연산시간이 빠른 장점을 지니고 있으며, 이러한 특징은 국소 최적화에 매우 유용하다. 또한, 해 영역 분할상태에서 Multi-start를 함으로서, 전역 최적해를 찾을 뿐만 아니라, 정밀도가 높은 해의 접근이 가능하다.[6]

반복 알고리즘으로서의 MADS는 반복계수 k에 따라 분할 크기는 다음과 같이 정의된다.

$$M_k = \bigcup_{z \in S_k} \{x + V_k^m D_z : z \in N^{mD}\} \quad (8)$$

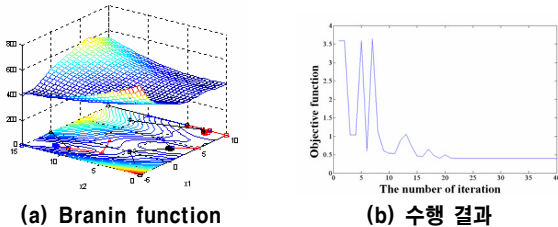
S_k : the set of points, V_k^m : mesh size parameter, D_z : a positive spanning set

MADS의 간단한 실험적 예를 LTMADS라 한다. LTMADS에서의 지역 최적해를 탐색하기 위한 접근 방식은 프레임내에서의 탐색영역을 일정하게 분할(Mesh)한 후, 최적해를 탐색하며, 최적해가 선정 될 시 그 해를 중심으로, 탐색영역을 조밀하게 재분할하여, 다시 이웃해를 발생시켜 최적해를 재탐색한다. 이와 같은 방식으로 국소 최적점으로 수렴해가며, 그에 대한 도시적 예는 아래 그림2와 같다.[6]



〈그림 2〉 LTMADS의 프레임의 예

MADS의 효용성을 위해, 대표적 테스트 함수인 Branin function의 테스트 결과는 아래 그림 3와 같다.



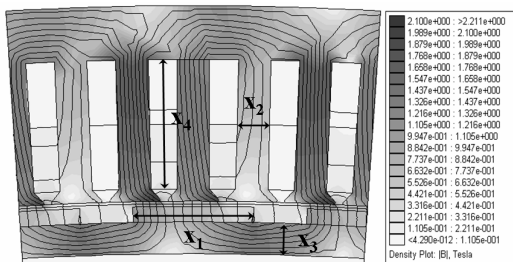
(a) Branin function (b) 수행 결과

〈그림 3〉 Branin Function에 대한 MADS의 수행 결과

수행결과는 MADS의 빠른 수렴성을 도시하고 있으며, 이는 직구동형 풍력발전기 최적설계의 시간적 소요문제에 대해 효율적 결과를 나타 낼 수 있다.

2.1.4 최적 설계 결과

표 1에 제시된 기본 모델을 바탕으로, 설계변수를 자각각도(x_1), 고정자 치 폭(x_2), 회전자 요크 두께(x_3), 고정자 슬롯 높이(x_4)를 선정하였다. (그림 4참조)



〈그림 4〉 설계변수의 선정

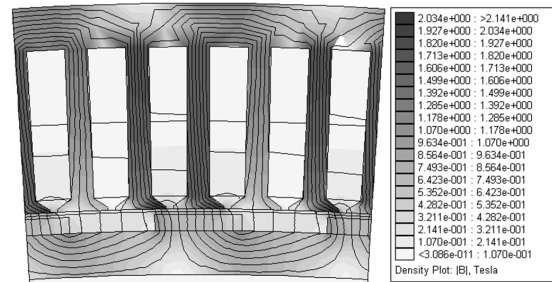
초기해의 선정은 임의의 난수를 발생시켜 선정하였다. 또한 지역 탐색

기법의 대표적 문제점인 목적함수의 다봉성에 의한 준최적화로의 수렴을 개선하기 위해, 초기해를 2개 이상의 다중해로 시행함으로써 이와 같은 문제를 해결하고자 하였다.

유한요소 해석 결과의 비교수행 및 MADS를 적용하여, AEP 최대화 모델의 탐색 및 최적해 수렴 시간에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 아래 표 2는 최적설계 비교결과이며, 그림5은 AEP 최대화 모델의 자속분포를 나타내고 있다.

〈표 2〉 최적설계 비교 결과

구분	설계 변수				AEP [MWh]	소요 시간
	x_1	x_2	x_3	x_4		
GA+분산컴퓨팅	1.89	8.8	19.6	59.6	1234.5	13h
MADS	1.84	9.15	16.6	65.6	1234.01	4h45



〈그림 5〉 AEP 최대화 모델의 자속분포

MADS 기반의 최적설계 수행 결과는 기본모델과 비교하여 AEP의 개선 및 GA와 병렬 분산컴퓨터가 결합된 해석 소요시간에 대해서는 57% 향상된 결과를 나타내었다.

이는 곳, 최대 연간에너지 생산량을 위한 MADS기반의 풍력발전기 최적설계는 빠른 수렴성과 개선된 결과를 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 최대 에너지 생산량을 위한 풍력발전기 최적 설계를 위한 요소법과 MADS를 적용하여 수행하였으며, 유한요소 해석이 사용되는 최적설계의 문제점인 최적화 수행시간을 단축하기 위해 지역 탐색 기법인 MADS를 적용하여, 기존에 수행되었던 GA와 병렬 분산 컴퓨터 시스템의 수행결과에 비해, 빠른 수렴성을 보였다. 또한, MADS는 대표적인 지역 탐색기법으로서, 목적함수의 다봉성에 대해서는 준최적화로 수렴될 가능성이 높기 때문에, 초기해를 2개 이상의 다중해로 선정하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 수렴 결과를 통해 개선된 결과를 도출 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의해 기초전력연구원 (R-2007-2-060) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] Khan, M.A, Pillay, P.Malengret, "Impact of direct-drive WEC Systems on the design of a small PM wind generator," Proc of IEEE Power Tech Conference, Vol. 2, pp. 23-26, June 2003.
- [2] Chen, C.V. Nayar, L. Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines," IEEE Trans. Magnetics, vol.36, pp.3802~3809, September, 2000.
- [3] Yicheng Chen, Pragasen Pillay, Khan.A., "Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, pp. 1444~1447, November, 1997.
- [4] Cheol-Gyun Lee, Hochang Jung, Sung-Chin Hahn, Hyun-Kyo Jung, Sang-Yong Jung, "Optimal Design of Direct-driven PM Wind Generator for Maximum Annual Energy Production," International Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2007), pp. 1139~1140, June, 2007.
- [5] V, Torczno. "On the convergence of pattern search algorithms.,"SIAM Journal on Optimization, 7(1):1-25, February 1997
- [6] C. Audet, J. E. Dennis JR, "Mesh adaptive direct search algorithms for constrained optimization,"SIAM J. Optim., vol. 17, no. 1, pp. 188-217, 2006.