

MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

(Optimal Design of Direct-Driven Wind Generator Using
Mesh Adaptive Direct Search(MADS))

박지성* · 안영준 · 이철균 · 김종욱 · 정상용**

(Ji-Seong Park · Young-Jun An · Cheol-Gyun Lee · Jong-Wook Kim · Sang-Yong Jung)

요 약

본 논문에서는 FEM(Finite Element Method)을 이용한 직접구동형 영구자석 풍력발전기의 최적설계를 위해 최신의 최적화 기법인 MADS(Mesh Adaptive Direct Search)를 적용하였으며, 최적설계 목표는 연간 에너지 생산량(Annual Energy Production : AEP)을 최대화 하는 방향으로 선정하였다. 또한, 풍력발전기의 전 운전영역을 고려하기 위해 해당풍속에서의 통계적 확률밀도와 연간 운전시간을 적용하여 연간 최대에너지 생산량을 산정하였다. 아울러, MADS의 최적설계 결과와 병렬분산 컴퓨팅을 결합한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)의 최적설계 결과를 비교하였으며, MADS는 병렬분산 유전알고리즘에 비해 상대적으로 빠른 수렴성을 나타내었다.

Abstract

This paper presents optimal design of direct-driven PM wind generator using MADS (Mesh Adaptive Direct Search). Optimal design of the direct-driven PM Wind Generator, combined with MADS and FEM (Finite Element Method), has been performed to maximize the Annual Energy Production (AEP) over the whole wind speed characterized by the statistical model of the wind speed distribution. In particular, the newly applied MADS contributes to reducing the computation time when compared with Genetic Algorithm (GA) implemented with the parallel computing method.

Key Words : Mesh Adaptive Direct Search(MADS), Finite Element Method(FEM), Annual Energy Production(AEP), Direct-Driven PM Wind Generator

1. 서 론

풍력 발전 시스템은 구동형식에 대해 증속기(Gear Box)의 유무로 구분되며, 증속기가 없는 경우를 직접 구동(Direct-driven)형이라 한다[1]. 최근의 풍력 발전 시스템은 증속기의 빈번한 유지보수 문제를 해결하기 위해 직접 구동형을 주로 채택하고 있다. 발전기는 저속에서 운전되어 상대적으로 높은 토크밀

* 주저자 : 동아대학교 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 동아대학교 전기공학과 조교수

Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743

E-mail : syjung@dau.ac.kr

접수일자 : 2009년 3월 3일

1차심사 : 2009년 3월 6일, 2차심사 : 2009년 7월 31일

심사완료 : 2009년 9월 7일

도를 가져야 하므로 고토크 밀도와 고효율의 특성을 가지는 다극의 표면부착형 영구자석 동기발전기 (Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator, SPMSG)가 주로 사용되며[2-3], 본 논문에서는 이러한 특성을 가지는 표면부착형 영구자석 동기발전기를 대상으로 최적설계를 수행하고자 한다.

풍력발전기 설계는 풍력 발전 시스템이 정격풍속에서만 운전되는 것이 아니므로 알맞은 운전풍속영역을 고려할 필요가 있다[4]. 운전풍속영역을 고려하는 방법으로, Grauers[5]은 정격풍속에서 발전기의 손실을 기준으로 각 풍속에서의 손실 비례계수를 구할 때 풍속분포를 고려하는 방법을 사용하고 있으나 계산법이 복잡하여 실용적이지 못하다. Inoue[6]는 풍속 확률분포 함수로서 Weibull function을 사용하고 있으나, 이 경우에는 발전기가 설치되는 지역의 풍속분포에 대한 자세한 데이터(shape factor와 scale factor 등)가 필요하다. 본 논문에서는 운전풍속영역을 고려하는 방법으로 발전기가 설치되는 지역의 평균풍속에 대한 데이터만으로도 적용이 가능한 Rayleigh 함수를 풍속 확률밀도 함수로 사용하여 풍력발전기의 연간에너지 생산량(Annual Energy Production, AEP)을 산정하였다. 아울러 풍력발전 시스템을 설치하는 궁극적인 목적이 에너지 생산에 있으므로 최대 연간에너지 생산량을 최적설계의 주목적으로 선정하였다.

근래에는 최적화 기법에 대한 이론적인 연구의 진전과 컴퓨터의 발달에 힘입어 비선형 최적화 기법 등이 발전하였다. 전기기기 설계에도 최적화 기법을 적용한 최적설계를 다룬 연구결과들이 다수 발표되었으며, 풍력발전기 최적설계에 대해 병렬분산 유전알고리즘을 이용한 최적설계 모델은 기존모델에 대비하여 향상된 특성해석 결과를 나타내었다[7].

일반적으로 전기기기 최적 설계 프로그램은 목적 함수 계산을 위한 특성해석 부분과 최적화 알고리즘 부분으로 구분된다. 여기서 수렴시간 중 대부분을 특성해석 부분에서 차지하므로 수렴 시간을 줄이기 위해서는 목적함수 호출 횟수를 최소화하여야 하며, 동시에 높은 최적해 탐색 기능을 수반하여야 한다. 본 논문에서는 풍력발전기의 최적설계에 있어서, 발

전기의 제반 특성을 계산하기 위해 FEM(Finite Element Method)를 이용하였으며, 최적화 기법으로는 MADS(Mesh Adaptive Direct Search)를 이용하였다.

MADS는 연산 소요 시간의 절감효과 및 빠른 수렴성을 나타내는 지역 최적화 기법이다. MADS는 지역 최적화 기법인 GPS(Generalized Pattern Search)에서 개선된 알고리즘으로 기본적인 원리는 GPS와 동일하다. 즉, 현재해에 대한 이웃해의 생성 후, 각각의 해들에 대한 목적함수 값의 비교평가를 통해 해를 개선시키는 방식이다. 그러나 탐색전략에 기인하는 poll size 파라미터와 mesh size 파라미터에 대해, GPS에서는 두 파라미터의 크기가 동일하나, MADS에서는 두 파라미터 간에 전략적으로 차이를 둬으로써 변수영역에서의 지역탐색방향에 제한적이지 않게 되므로 GPS에 비해 효율적인 탐색이 가능하다[8-9].

MADS가 가지는 빠른 탐색성과 신뢰성 높은 수렴 결과를 검증하기 위해 multimodal한 특성을 나타내는 대표적 테스트 함수인 Branin 함수와 Shubert 함수에 적용하여, 전역 최적화 알고리즘인 GA와의 비교 검토를 수행하였으며, MADS는 최적해 탐색성과 연산 횟수의 최소화 면에서 우수한 성능을 나타내었다.

마지막으로, 본 논문에서는 MADS 기반의 최적설계 결과와 기존에 수행되었던 병렬분산 유전알고리즘의 최적설계 결과들을 비교 검토하였으며, MADS를 이용한 최적설계 기법은 기존설계모델 대비 향상된 결과 도출 및 연산 수행시간에 있어서 상당한 절감효과를 얻을 수 있었다.

2. 풍력 발전 시스템

2.1 풍력에너지의 특성

단위시간에 대한 공기의 부피변화 $A \cdot v[m^3/s]$ 와 질량변화 $\rho \cdot A \cdot v[m^3/s]$ 를 고려한 순수 풍력량 P_w 는 다음과 같다.

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

MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

여기서, ρ : 공기밀도[kg/m³], A : 블레이드 통과면적[m²]

아울러 풍력 P_w 는 터빈에 의해 기계적인 동력으로 변환되며, 변환효율인 출력계수 (Power coefficient, C_p)를 적용하면, 동력 P_s 는 식 (2)와 같다[1].

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

2.2 풍력발전시스템의 구성

영구자석 풍력발전기가 사용되는 풍력 발전 시스템의 구성 및 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 풍력 발전 시스템 사양
Table 1. Specification Of Wind Generation System

정격 출력(Ps)		500[kW]
설계 속도	컷 인(Cut-in) 속도	3.5[m/s]
	정격 속도	13.5[m/s]
	컷 아웃(Cut-out) 속도	26[m/s]
발전기	형 식	SPMSG
터빈 회전기	외 경	39[m]
	회전 속도	0~32[rpm]
	블레이드 통과 면적 (Blade swept area)	1207[m ²]
제어 시스템	피치 제어(Pitch Control)	

3. 풍력 발전기 최적설계

3.1 풍력발전기의 출력전류 산정

풍력 발전기의 입력 P_i 는 다음과 같다.

$$P_i = \omega T \quad [W] \quad (3)$$

ω : 각속도 [rad/s], $T = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q$: 토크[Nm],

λ_{pm} : 극당 쇄교 자속수, $\lambda(v) = \frac{R\omega}{v}$: 주속비(tip speed ratio), p : 극 쌍수, R : 터빈의 반경

식 (3)을 다시 쓰면, 풍력 발전기의 입력은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \frac{v \lambda(v)}{R} \quad [W] \quad (4)$$

증속기를 사용하지 않는 직접 구동 풍력 발전 시스템의 터빈에 의한 출력 P_s 는 풍력발전기의 입력 P_i 와 같으므로, 식 (2)와 식 (4)로부터 풍력발전기 출력전류를 산정하며, 여기에 블레이드 통과면적과 반경사이의 관계식 $A = \pi R^2$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$i_q = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda_{pm} \lambda(v)} C_p(v) v^2 \quad [A] \quad (5)$$

이와 같이 산정된 출력전류로부터 발전기의 특성 해석을 수행하여 발전기의 손실인 동손과 철손을 계산하고 발전기의 출력 P_o 을 계산할 수 있게 된다[5].

3.2 풍력확률밀도와 목적함수의 산정

Rayleigh 함수는 그 지역의 평균 풍속만으로도 전 반적인 풍속의 분포를 알 수 있으며, 식 (6)과 같이 표현된다[4].

$$F(v) = \frac{\pi v}{2v_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right] \quad (6)$$

여기서 v : 특정풍속[m/s]

v_a : 연평균 풍속[m/s]

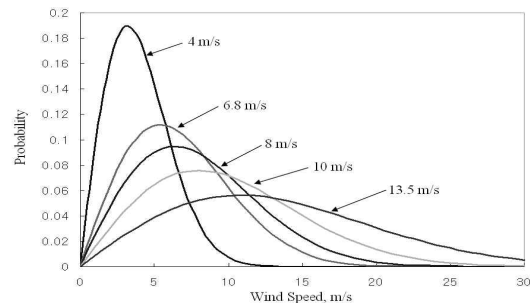


그림 1. 풍속의 분포
Fig. 1. Distribution of wind speed

그림 1은 Rayleigh 분포를 사용하여 연 평균풍속 4.0, 6.8, 8.0, 10.0[m/s]일 때의 각 풍속의 확률분포를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 최적설계를 수행하기 위한 평균풍속을 대관령 풍력실증단지의 연 평균풍속인 6.8[m/s]와[11] 정격속도인 13.5[m/s]로 설정하였다.

풍력 발전 시스템의 연간에너지 생산량(AEP)은 각 풍속에 대해 1년 동안 부는 시간과 그 풍속에서의 발전기 출력 P_o 를 이용하여 계산한다[4]. 우선 특정 풍속 v 가 1년 동안 부는 시간 $H(v)$ 는 풍속 v 일 때의 확률을 이용하여 구할 수 있다.

$$H(v) = 365 \times 24 \times \text{풍속 } v \text{ 일 때의 확률} \quad (7)$$

$$= 8760 \times F(v) \Delta v \text{ [hour]}$$

여기서 $H(v)$: 특정풍속 v 가 1년간 부는 시간,
 $F(v)$: 특정풍속 v 의 확률밀도 함수, Δv : 풍속 한 구간의 크기

그리고 풍속 v 일 때, 연간 에너지 생산량은 다음과 같게 된다.

$$aep(v) = P_o(v) \times H(v) \text{ [Wh]} \quad (8)$$

여기서 $P_o(v)$: 특정 풍속 v 에서의 발전기의 출력

그러므로 전 풍속영역에 의한 전체 연간 에너지 생산량은 각 풍속에서의 에너지 생산량을 합산하면 된다.

$$AEP_{total} = \sum_v aep(v) \quad (9)$$

본 연구에서는 이러한 연간에너지 생산량(AEPtotal)을 풍력발전기 최적설계의 목적함수로 선정하였다.

3.3 MADS(Mesh Adaptive Direct Search)

MADS는 비용함수의 미분정보를 필요로 하지 않는 non-gradient 지역 최적화 기법으로서 지역해로의 빠른 수렴성을 갖는 반면 수학적으로 그 수렴성

이 증명된 최신의 최적화 알고리즘이다[8]. MADS의 기본 원리는 탐색영역 내에서 현재해를 기준으로 이웃해를 발생시켜, 목적함수 결과에 대한 비교평가를 통해 최적해로 개선해가는 방식으로, CS (Compass Search), GPS(Generalized Pattern Search)와 같은 휴리스틱 탐색 기법(heuristic search method) 중의 하나이다. 그러나 MADS는 GPS의 성능을 개선한 알고리즘으로서, 탐색영역 상에서의 탐색방향이 제한적이지 않으므로 다양한 탐색전략이 구현가능하다.

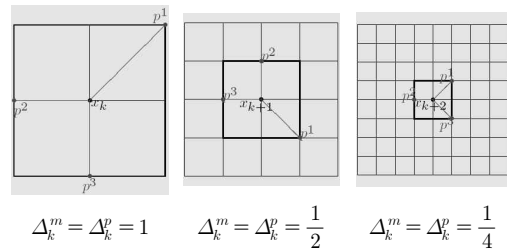


그림 2. GPS 프레임 구성의 예
 Fig. 2. GPS : Example of frame

그림 2는 GPS의 특징을 나타낸 것으로, 굵게 도식된 라인을 프레임(frame)이라고 하며, 일반적으로 탐색하고자 하는 해 영역의 범주를 의미한다. 이웃해 선정에 관련된 파라미터를 poll size 파라미터라 하며, Δ_k^p 으로 나타낸다. 여기서 현재해 x_k 를 프레임 센터(frame center)라 하며, 프레임 센터를 중심으로 Mesh를 생성하여 이웃해를 선정한다. 또한, 이웃해는 반드시 Mesh상에 존재해야 한다. Mesh 생성에 관련된 파라미터를 Mesh size 파라미터라 하며, Δ_k^m 으로 나타낸다. 현재해를 중심으로 선정된 이웃해에서 개선된 결과가 도출시, 그 이웃해는 프레임 센터가 되며, 개선된 해를 중심으로 프레임을 구축 후, Mesh를 재생성 시켜 다음 반복차수에 대한 새로운 이웃해를 선정한다. 그리고 동일한 과정으로 목적함수 평가를 수행한다. 이때 Mesh size 파라미터는 동일하게 유지되거나, 증가하게 된다. 그러나 개선된 해가 도출되지 않을 시, 현재해 또는 이웃해 중 임의의 한 점을 프레임 센터로 설정하여, 보다 조밀한 Mesh를 생성시킨다. 즉 Mesh size 파라미터가 감소

MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

하게 되며, 프레임 센터를 기준으로 조밀해진 Mesh 상의 이웃해를 선정하여 목적함수 평가를 수행한다.

GPS의 특징은 poll size 파라미터와 mesh size 파라미터가 동일하다. 즉 프레임 상의 해집합과 Mesh 상의 해집합이 동일하며, 해 영역 내에서의 탐색방향은 제한적이다[8].

GPS의 제한적 탐색범위의 개선을 위해 제안된 알고리즘이 MADS이며, 특징은 아래의 그림과 같다.

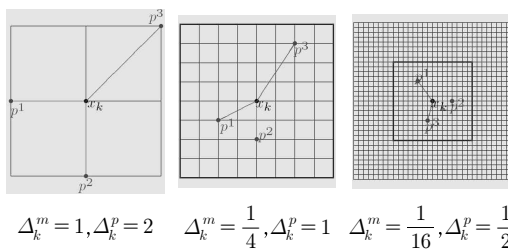


그림 3. MADS 프레임 구성의 예
Fig. 3. MADS : Example of frame

반복 횟수 k에 대해, MADS의 Mesh에 대한 집합은 다음과 같이 정의된다.

$$M_k = \bigcup_{x \in S_k} \{x + \Delta_k^m D_z : z \in N^{m,D}\} \quad (10)$$

여기서, S_k : 목적함수 평가에 적용된 해집합, Δ_k^m : Mesh size 파라미터, D_z : Mesh 전개를 위한 Spanning 집합

GPS와 구분되는 MADS의 특징은 poll size 파라미터와 mesh size 파라미터가 동일하지 않다는 것이며, 일반적으로 $\Delta_k^m \leq \Delta_k^p$ 의 관계를 갖는다. MADS에서 mesh size 파라미터는 다음과 같다.

$$\Delta_{k+1}^m = \tau^{\omega_k} \Delta_k^m \quad (11)$$

$$\omega_k = \begin{cases} \{0, 1, \dots, \omega^+\} & \rightarrow (가) \\ \{\omega^-, \omega^- + 1, \dots, -1\} & \rightarrow (나) \end{cases}$$

(가) : 개선된 해를 발견 하였을 때

(나) : 해가 개선되지 않았을 때

해의 개선을 위해 MADS에서의 mesh size 파라미터는 poll size 파라미터에 비해 빠르게 수렴하며, 탐색하고자 하는 해 영역에서의 Mesh가 보다 조밀해짐에 따라 GPS와 달리 해 선정에 대한 제한적 탐색범위를 개선할 수 있게 된다. 또한 프레임 센터에서부터 난수 발생적으로 이웃해 생성이 가능해지므로, 다양한 탐색전략의 가미가 가능하게 되며, 아울러 결정론적 최적화 기법의 문제점인 국소최적화 문제를 일정부분 개선할 수 있게 된다.

다음은 GPS와 MADS의 수렴과정에 대해 알아보려 한다. 식 (12)의 최적화 문제에 대해 GPS는 전역최적해로 수렴하지 못하는 것으로 알려져 있다 [11].

$$f(x) = (1 - \exp(-\|x\|^2)) \times \max\{\|x-c\|^2, \|x-d\|^2\} \quad (12)$$

여기서, $c = -d = (30, 40)^T$

그림 4는 식 (12)의 등고선으로 표현된 그래프이며, 전역 최적해는 $(0,0)^T$ 에 목적함수 최소값은 0이다. MADS와 GPS를 목적함수에 대해 최적화 수행시, 초기해는 $x_0 = (-2.1, 1.7)^T$ 로 선정하였으며, 반복연산에 대한 수렴결과는 그림 5와 같다.

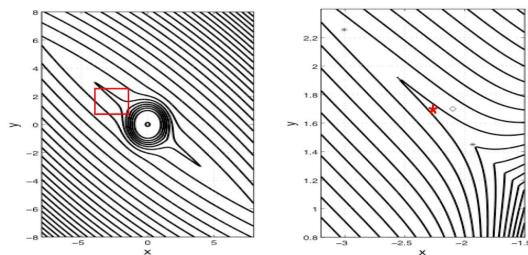


그림 4. 식 (12)의 Level Sets
Fig. 4. Level sets of Formula 12

그림 5에 도시된 바와 같이 MADS에 대한 테스트는 5회에 걸쳐 수행되었다. MADS는 이웃해 생성시 난수 발생적 특징을 수반하고 있기 때문에, 각각의 수행결과에 대해 다른 패턴의 수렴결과를 나타내고 있다. 그림 상단의 2n과 n+1은 이웃해 선정에 대한 조합을 의미한다. 예를 들면, n이 2일 경우, n+1은 3

개의 이웃해를 선정하며, $2n$ 의 경우 4개의 이웃해를 선정한다. 종료조건은 poll size 파라미터가 10^{-10} 이 하일 때이다.

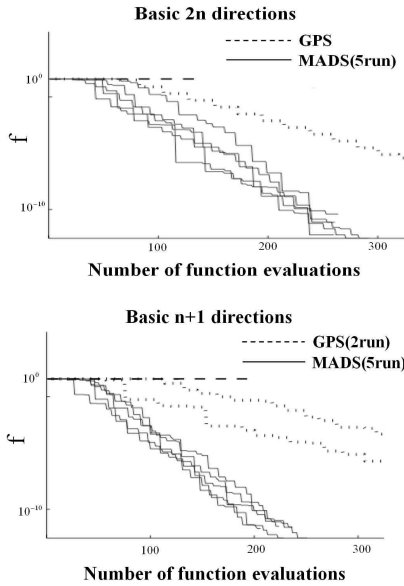


그림 5. MADS와 GPS의 수렴결과
Fig. 5. Convergence results of MADS and GPS

정해진 방향으로 탐색을 하는 GPS는 목적함수값의 일정한 차분이 없는 영역인 $x_2 = -\frac{3}{4}x_1$ 지점에 항상 수렴을 한다. 그러나 MADS는 GPS에 비해 전역 최적해로 빠르게 수렴하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Mesh 사이즈 파라미터와 난수 발생적 이웃해 선정의 영향이 MADS의 탐색전략에 기인하기 때문이다[8].

다음으로 MADS를 대표적 테스트 함수인 Branin 함수에 적용하였다. Branin 함수에 대한 정의는 다음과 같다.

$$f_{BR}(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(1 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10 \quad (11)$$

$$-5 \leq x_1 \leq 10, \quad 0 \leq x_2 \leq 15$$

Branin 함수의 최소값은 0.397887이며, 전역 최적

해는 $x^* = (-3.142, 12.275), (3.142, 2.275), (9.425, 2.425)$ 이다.

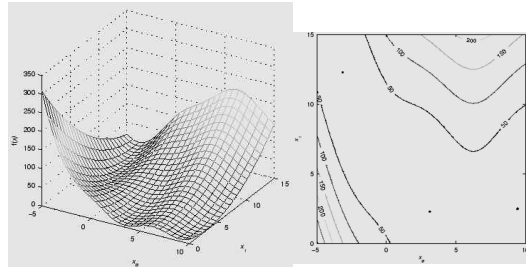


그림 6. Branin 함수
Fig. 6. Branin function

그림 6은 Branin 함수의 형상을 도시하고 있으며, 그림 7은 Branin 함수에 MADS를 적용 하였을 때, 반복횟수에 대한 목적 함수값의 변화를 나타낸 것이다.

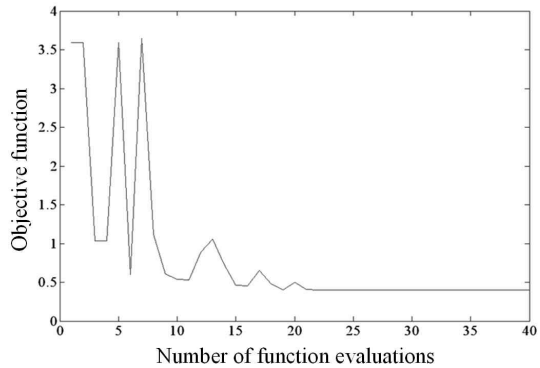


그림 7. MADS의 수렴결과
Fig. 7. Convergence Result of MADS

Branin 함수에 대한 최적화 문제는 목적함수의 최소화로 선정하였다. 그림 7에서 나타나는 바와 같이 초기 목적함수 평가에서 목적함수 값의 변동폭이 큰 이유는 Frame 내에서 발생한 초기의 이웃해가 난수 발생적으로 생성되었기 때문이며, 그림 7의 수렴결과는 MADS의 빠른 수렴성을 도시하고 있다.

그림 8은 유전알고리즘과 MADS를 Branin 함수에 적용 시, 각각의 수렴결과이며, 함수호출 횟수에 대한 목적함수 평가결과를 비교 도시하였다.

MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

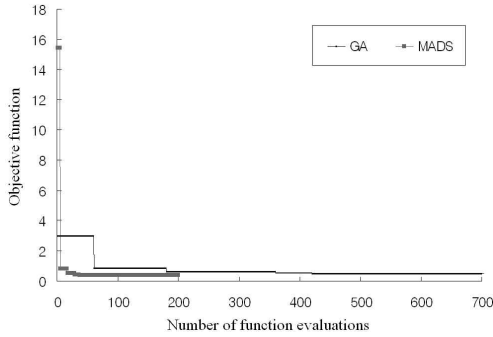


그림 8. GA와 MADS의 수렴결과
Fig. 8. Convergence results of MADS and GA

그림 8에 도시한 바와 같이, GA와 MADS 모두 전역 최적해로 수렴하였으나, 함수호출 횟수 비교 시, MADS는 GA에 비해 빠른 수렴성을 나타내었다.

그림 9에 도시된 Shubert 함수는 720개의 지역해와 18개의 전역해를 가지며, 전기기기 설계에서 나타나는 Multimodal한 특성을 수반하고 있다. 전역 최소값은 -186.730909이며, 함수 정의는 식 (12)와 같다.

$$f_{SH}(x) = \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cos[(i+1)x_1 + i] \right\} \times \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cos[(i+1)x_2 + i] \right\} \quad (12)$$

$$-10 \leq x_1, x_2 \leq 10$$

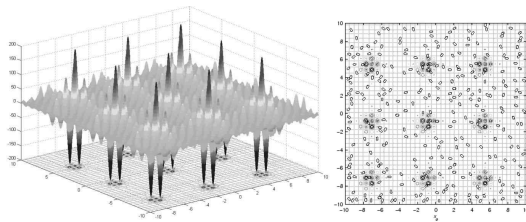


그림 9. Shubert 함수
Fig. 9. Shubert function

그림 10은 Shubert 함수에 대한 GA와 MADS의 수렴 결과이다. MADS의 경우 알려진 전역해의 함수값과 10^{-6} 의 오차를 갖는 전역해를 찾는 데 소요된 함수호출 횟수는 176회인 반면, GA의 경우 5,161회를 나타내었다.

Branin 함수와 Shubert 함수에 대한 테스트 결과,

결정론적 기법과 확률론적 최적화 기법이 조화를 갖춘 MADS는 확률론적 최적화 기법인 유전 알고리즘에 비해 상대적으로 빠른 수렴성을 보였으며, 고속 탐색형 비선형 최적화 알고리즘으로서 높은 적합성을 나타내었다.

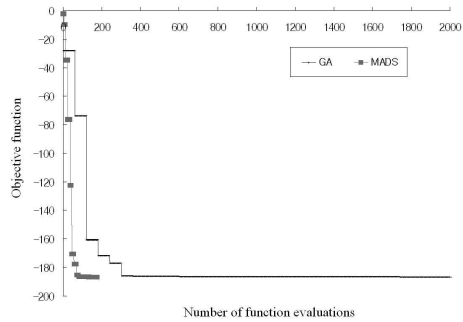


그림 10. GA와 MADS의 수렴결과
Fig. 10. Convergence results of MADS and GPS

3.4 병렬분산 컴퓨팅 시스템을 이용한 GA기반의 풍력발전기 최적설계

표 1의 사양의 최적설계를 수행하기 위한 SPMSG의 정격출력 및 구조는 500[kW]에 100극 300슬롯이며, 정격토크는 140[kNm]이다. 그림 11은 설계변수를 나타내고 있으며, 자극각도(x_1), 고정자 치 폭(x_2), 회전자 요크 두께(x_3), 고정자 슬롯높이(x_4) 등을 설계변수로 선정하였다.

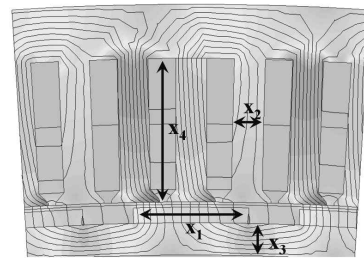


그림 11. 표면부착형 영구자석 동기 설계변수
Fig. 11. Design variable of SPMSG

발전기의 설치 공간 및 재료비의 제약을 고려하여 고정자 외경 및 축방향 길이, 공극의 길이와 보자력 등을 고정하며, 해석상에서 고정자 외경은 1154.9

[mm], 축방향 길이 550[mm], 공극 2.15[mm], 영구 자석의 보자력은 1[T]로 설정하였다.

발전기의 정확한 특성해석과 최적설계를 수행하기 위하여 유한요소법과 유전알고리즘을 적용하였으며, 10대 PC를 네트워크로 구성한 병렬 분산 컴퓨팅 시스템을 접목하였다. 이러한 시스템을 기반으로 연간 최대 에너지 생산량을 목표로 표면부착형 영구자석 동기발전기의 최적설계를 수행하였으며, 최적 설계 결과는 표 2에 나타내었다. AEP 최대화 설계 모델은 연간 에너지 생산량(1234.5MWh)면에서 기존모델대비 3.4%, 개선효과를 나타내었다.

표 2. 최적화 모델의 결과 비교
Table 2. Comparison Results Of Optimally Designed One

구분	설계 변수				AEP
	x_1	x_2	x_3	x_4	
기존 모델	2.5	12.5	13	58	1193.4
AEP 최대화	1.892	8.8	19.6	59.6	1234.5

3.5 MADS를 이용한 풍력발전기 최적 설계

GA기반의 최적설계 수행 결과는 기존모델 대비 향상된 특성해석 결과를 도출하였으나, 영구자석형 풍력발전기가 가지는 비선형성과 FEM을 이용한 특성해석으로 인해 상당한 연산 시간이 소요된다. 아울러, 병렬 분산 시스템을 적용 시, 하드웨어 구성에 따른 비용적인 면을 고려할 때, 이러한 시스템은 최적 설계 프로세스로서는 부적합하며, 비효율적이다. 이러한 연산소요 시간 및 하드웨어 구성에 따른 비용적 특성을 저감시키기 위해서는 빠른 수렴성 및 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있는 최신의 알고리즘과의 접목이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 MADS라는 지역 최적화 기법을 적용하여 영구자석형 풍력발전기 최적설계를 수행하였으며, 기존에 수행된 병렬분산 유전알고리즘을 이용한 최적설계 결과와 비교하고자 한다.

최적화 수행을 위한 목적함수로는 GA기반의 최

적설계와 동일하게 연간에너지 생산량(AEP)을 선정하였으며, 동일한 출력조건을 위해 정격 토크를 제한조건으로 설정하였다.

최적화 기법인 MADS에 대해, Mesh size 파라미터는 $\tau=4$, $\omega^-=-1$, $\omega^+=1$ 로 설정하였으며, 초기 Mesh size와 Poll size 파라미터는 $\Delta_0^m = \Delta_0^p = 1$ 로 선정하였다. 또한 지역 탐색 기법의 대표적 문제점인 목적함수의 다봉성에 의한 준 최적화 문제를 개선하기 위해, 임의의 초기해를 3개의 다중해로 선정하여 Multi-start 수행을 하였으며, 목적함수 계산과정은 그림 12에 나타내었다.

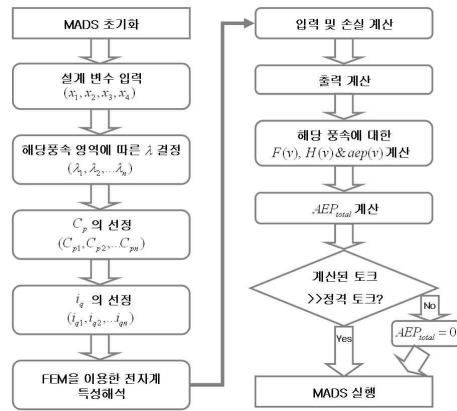


그림 12. 연간에너지 생산량(AEP) 계산 흐름도
Fig. 12. Flowchart of the AEP calculation

먼저, 설계변수가 결정되면 각 풍속에 따른 주속비와 출력계수를 산정하여 출력전류를 계산한다. 출력전류를 이용하여 유한요소해석을 통해 발전기의 손실을 계산하고, 이로부터 발전기의 출력을 계산한다. 그리고 특정 풍속에서의 발전기 출력과 풍속 확률 분포를 이용하여 연간 에너지 생산량을 계산하게 된다. 따라서 이러한 절차를 통해 연간에너지 생산량을 계산하며, 설계변수들에 대해 MADS를 적용하여 연간에너지 생산량의 최대화를 목적으로 알고리즘은 반복적으로 수행하게 된다.

3.6 풍력발전기 최적설계 결과

발전기의 특성해석과 목적함수에 대한 최적화를

MADS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

수행하기 위해 유한요소법과 MADS를 결합하여 일반 PC 1대에서 최적설계를 수행하였으며, MADS의 최적설계 결과와 PC 10대로 계산 구동된 병렬분산 유전알고리즘의 최적 설계 결과를 각 평균 풍속별 표 3과 그림 13에 나타내었다.

최적설계 검토결과, 연 평균풍속이 대관령 풍력실증 단지의 평균 풍속인 6.8[m/s]에서 설계사양의 정격속도인 13.5[m/s]로 상승 시, 대체적으로 AEP가 증대되는 경향을 나타내고 있으며, 이는 주속비에 대한 출력계수의 변화로 인해 출력전류가 상승하였기 때문이다.

MADS 기반의 최적설계 수행 결과는 기존모델과 비교하여 AEP의 개선 및 병렬분산 유전알고리즘의 해석 소요시간에 대해 65[%]정도 향상된 결과를 나타내었다. 또한, 병렬분산 유전알고리즘은 10대의 PC로 병렬 수행된 반면 MADS는 1대의 PC에서 수행되었으며, 병렬분산 유전알고리즘과 MADS간의 하드웨어적 구성관계를 고려하여 소요시간을 비교 검토하였을 때, MADS는 병렬분산 유전알고리즘에

비해 29배 정도의 빠른 수렴성을 나타내었다.

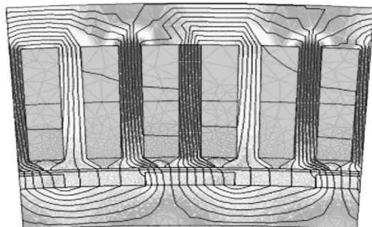
표 3. 최적화 모델의 결과 비교
Table 3. Comparison Results Of Optimally Designed One

(a) 연 평균풍속 (6.8m/s)
(a) Annual average wind speed(6.8m/s)

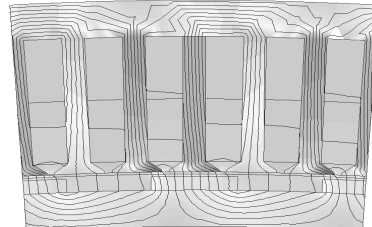
최적화 알고리즘	설계 변수				AEP [MWh]	해석 시간 [min]
	x_1	x_2	x_3	x_4		
GA	1.89	8.8	19.6	59.6	1234.5	820.6
MADS	1.84	9.15	16.6	65.6	1234.01	285

(b) 연 평균풍속 (13.5m/s)
(b) Annual average wind speed(13.5m/s)

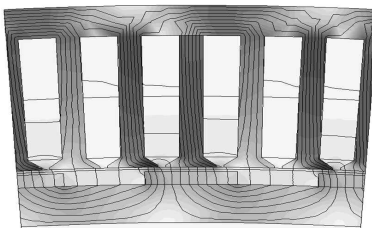
최적화 알고리즘	설계 변수				AEP [MWh]	해석 시간 [min]
	x_1	x_2	x_3	x_4		
GA	1.89	8.8	19.1	64.2	1241.3	721
MADS	1.94	8.6	13.4	66.3	1240.9	274



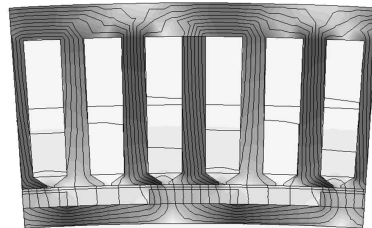
(a) 유전알고리즘 적용 최적화 모델 (6.8m/s)
(a) Optimally designed SPMSG by Genetic Algorithms(6.8m/s)



(b) MADS 적용 최적화 모델 (6.8m/s)
(b) Optimally designed SPMSG by MADS (6.8m/s)



(c) 유전알고리즘 적용 최적화 모델 (13.5m/s)
(c) Optimally designed SPMSG by Genetic Algorithms(13.5m/s)



(d) MADS 적용 최적화 모델 (13.5m/s)
(d) Optimally designed SPMSG by MADS (13.5m/s)

그림 13. 최적화 설계된 표면부착형 영구자석 동기발전기의 정격조건에서의 자속분포비교
Fig. 13. Comparison results of the flux density distribution of the optimally designed SPMSG at the rated condition

4. 결 론

본 논문에서는 최대 에너지 생산량을 위한 풍력발전기 최적 설계를 유한요소법과 MADS를 적용하여 수행하였다. 유한요소 해석이 사용되는 최적설계의 문제점인 막대한 최적화 수행시간을 단축하기 위해 지역 탐색 기법인 MADS를 적용하여, 기존에 수행되었던 병렬분산 유전 알고리즘의 수행결과와 비교하였으며, 병렬분산 유전알고리즘에 비해 상대적으로 빠른 수렴성을 나타내었다. 또한, MADS는 대표적인 지역 최적화 기법으로서, 목적함수의 다봉성에 대해서는 준 최적화로 수렴될 가능성이 높기 때문에, 신뢰성 높은 최적해의 탐색성을 향상시키기 위해 초기해를 3개의 다중해로 선정하여 최적설계를 수행하였으며, 수렴 결과를 통해 개선된 결과를 나타낼 수 있었다.

아울러, 본 논문에서 제시된 최적화 기법인 MADS는 수학적으로 수렴성이 증명된 알고리즘으로서, 타 알고리즘과의 유기적 결합을 통한 최적설계 적용 시, 보다 높은 최적해 탐색성과 수렴성 면에서 시너지 효과를 도출할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원 인력양성사업과 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers, "Wind Energy Theory, Design and Application," John Wiley & Sons, 1st Ed., 2002.
- [2] Y. Chen, P. Pillay and M. A. Khan, "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies," Proc. of 39th IAS Annual Meeting Conference, Vol. 3, No. 3-7, pp. 1405-1412, October.2004.
- [3] 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.
- [4] Zinger, D. S., and Muljadi, E, "Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, pp. 1444~1447, November, 1997.
- [5] Anders Grauers, "Design of Direct-driven Permanent-

- magnet Generators for Wind Turbines," Ph.D Thesis Chalmers University, October 1996.
- [6] Inoue, A., Hasan Ali Mohd., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., Ichinose and M., Kazumasa Ide, "A Calculation Method of the Total Efficiency of Wind Generator," Proc. of PEDS2005, Vol. 2, No. 28-01, pp. 1595-1600, Nov. 2005.
- [7] 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," Magnetics, IEEE Transactions on Vol. 44, Issue 6, pp. 1062 - 1065, June 2008.
- [8] V. Torczon, "On the Convergence of Pattern Search Algorithms," SIAM Journal on Optimization, vol. 7, no. 1, pp. 1-25, 1997.
- [9] 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.
- [10] 유능수 외 2명, "대관령 실증단계에 설치된 J-48 풍력발전기의 출력곡선 측정", 대한기계학회 강원지부 학술대회, 대한기계학회 강원지부, 에너지관리공단, 2003-10-, 제3집, 143~150.
- [11] T. G. Kolda, R. M. Lewis, and V. Torczon. "Optimization by Direct Search: New Perspectives on Some Classical and Modern Methods." SIAM Rev., 45(3):385 - 482 (electronic), 2003.

◇ 저자소개 ◇

박지성 (朴志成)

1982년 9월 17일생. 2008년 동아대 전기공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

안영준 (安映俊)

1983년 9월 19일생. 2009년 동아대 전기공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

이철균 (李哲均)

1967년 1월 28일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1999년 현대중공업 중앙연구소 선임연구원. 2002년 미국 Univ. of Wisconsin 방문연구교수. 1999년~현재 동의대학교 전기공학과 부교수.

김중욱 (金鍾旭)

1970년 10월 24일생. 1998년 포항공과대학교 전기전자공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 2004~2006년 포스코 기술연구소 전기강관연구그룹 연구원. 2006년~현재 동아대학교 전자공학과 조교수.

정상용 (鄭相龍)

1973년 9월 20일생. 1997년 서울대 공대전기공학부 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 2003년 동 대학원 졸업(박사). 2003~2006년 현대자동차 연구개발본부 선임 연구원. 현재 동아대학교 전기공학과 조교수.