

# DEAS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

(Optimal Design of Direct-Driven Wind Generator Using Dynamic Encoding Algorithm for Searches(DEAS))

정호창\* · 이철균 · 김은수 · 김종욱 · 정상용\*\*

(Ho-Chang Jung · Cheol-Gyun Lee · Eun-Su Kim · Jong-Wook Kim · Sang-Yong Jung)

## 요 약

본 논문에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 기반으로 하는 직접 구동형 영구자석 풍력발전기를 DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)를 이용하여 연간 최대에너지 생산량(Annual Energy Production : AEP) 최대화를 목표로 최적설계 하였다. 특히, 풍력발전기의 전 운전영역을 고려하기 위하여 해당풍속에서의 통계적 확률밀도와 연간 운전시간을 적용하여 연간 최대에너지 생산량을 산정하였으며, 여기서 발생한 과도한 해석수행 연산시간을 줄이기 위해서 전역 최적화 알고리즘인 DEAS를 적용하여 풍력발전기 최적설계를 수행하였다.

## Abstract

Optimal design of the direct-driven PM Wind Generator, combined with DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches) and FEM(Finite Element Method), has been proposed to maximize the Annual Energy Production(AEP) over the whole wind speed characterized by the statistical model of wind speed distribution. In particular, DEAS contributes to reducing the excessive computing time for the optimization process.

Key Words : Dynamic Encoding Algorithm for Searches(DEAS), Finite Element Analysis(FEA), Annual Energy Production(AEP), Direct-Driven PM Wind Generator, Scheme

## 1. 서 론

현대 사회에 들어서면서 천연자원이 고갈되고, 가전제품 사용의 증가로 전력사용이 급증하여 대체 에너지 개발이 시급하다. 이러한 현상과 더불어 최근 풍력 발전 시스템은 에너지 생산 비용의 감소와 친환경적인 특성을 통해 비약적으로 발전하고 있다. 따라서 최근 기존구동 방식에서 탈피한 새로운 구동 방식에 대한 연구가 이루어지고 있는데 이러한 풍력

\* 주저자 : 동아대학교 전기공학과 석사과정  
\*\* 교신저자 : 동아대학교 전기공학과 조교수  
Tel : 051-200-7733, Fax : 051-200-7743  
E-mail : syjung@dau.ac.kr  
접수일자 : 2008년 6월 25일  
1차심사 : 2008년 7월 7일  
심사완료 : 2008년 8월 7일

발전기의 분류는 연결 구조에 따라 기어형과 직접 구동형으로 나뉜다. 기어형은 저렴한 제작비와 기술적인 노하우 축적을 바탕으로 높은 신뢰도를 지니지만 증속기어의 기계적 마모나 이에 따른 유지 관리상의 문제, 기계적 소음 발생 등의 문제점을 가지고 있다. 이에 반해서, 직접 구동형은 증속기어 장치등 많은 동력 전달 부품들을 제거하여 시스템 구조가 단순화 되었고, 유지 보수의 간편성 및 기계적 소음 저감 효과를 실현한다. 한편 저속에서 운전되는 풍력 발전기는 높은 출력, 토크 밀도, 고효율, 소형화의 장점과 더불어 친환경적인 측면에서 영구자석형의 채용이 확대되고 있다. 그러므로 본 논문에서는 영구자석형 발전기 중에 표면부착형 동기발전기(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator, SPMSG)를 채택하였고 유한요소법(FEM)과 Dynamic Encoding Algorithm for Searches(DEAS)를 이용하여 최적설계를 수행하였다[1-2].

풍력발전기 최적설계에 이용된 최적화 알고리즘인 DEAS는 독자적으로 개발된 최적화 기법으로서, 이진 스트링의 독특한 특성을 수치 최적화에 적용함으로써 순수한 컴퓨터 연산만으로도 부드럽지 않은 비용함수에 대하여 최적해를 효율적으로 찾을 수 있다. DEAS는 지역탐색(Local search) 전략으로서 이진 행렬로 표현되는 동적인 이웃점들 가운데에서 최선의 것을 선택하는 방식으로 파라미터들을 점진적으로 최적화한다. 그리고 전역탐색(Global search) 전략으로서 임의의 초기값으로부터 지역탐색을 수행한 후 만족한 해를 찾지 못한다면 새로운 임의의 초기값으로부터 재시작하는 multistart기법을 활용했다[3-5].

풍력 발전기를 설치하는 궁극적인 목적이 에너지 생산에 있으므로 연간 최대 생산량(Annual Energy Production)을 설계 목표로 설정하였다. 또한 연간 최대 에너지는 풍속밀도를 고려한 통계학적 확률분포를 사용하여 풍속별 생산되는 에너지의 총합으로 나타내었다. 한편, 최적화 알고리즘의 함수 호출 및 비교수행과 유한요소해석에 따른 과도한 연산시간을 고려하여 기존의 확률론적 최적화 알고리즘이 아닌 결정론적 최적화 알고리즘인 DEAS를 적용하여

연산 수행시간을 단축시켰다[6].

본 논문에서는 DEAS를 적용하여 AEP최대화를 목적으로 하는 최적설계 수행의 결과를 병렬 분산 유전 알고리즘을 적용하여 수행한 설계결과와 연간 에너지생산량, 수행시간측면에서 비교, 검토하여 DEAS를 이용한 AEP최대화 최적설계의 타당성과 효율성을 나타내고자 한다[7].

## 2. 풍력 발전 시스템

### 2.1 풍력에너지의 특성

공기 중에 질량  $m[\text{kg}]$ 이 속도  $v[\text{m/s}]$ 로 이동할 때 운동에너지는 SI 단위 상으로는 식 (1)과 같다.

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

그리고 바람에 의한 동력(Power)  $P_w$ 는 단위 시간당 운동에너지의 변화량이 되므로, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

단위시간에 대한 공기의 부피변화는  $A \cdot v[\text{m}^3/\text{s}]$ 이며, 질량 변화는  $\rho \cdot A \cdot v[\text{m}^3/\text{s}]$ 가 되므로  $P_w$ 는 다음과 같다.

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

여기서,  $\rho$ : 공기밀도[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

A: 블레이드 통과면적[ $\text{m}^2$ ]

풍력  $P_w$ 는 터빈에 의해 기계적인 동력으로 변환되는데 그 변환 효율을 출력계수  $C_p$ 라고 한다. 이러한 출력계수(Power coefficient)  $C_p$ 를 적용하면 바람으로부터 얻을 수 있는 동력  $P_s$ 는 식 (4)와 같다.

DEAS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 직적설계

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

실제 풍력 발전 시스템의 운전 시에는 시스템의 기계적 관성·마찰 및 전기적 손실 등에 의해 시동 풍속(Cut-in speed)  $v_c$  이상의 풍속에서만 시스템의 출력이 생산되기 시작하고 정격풍속까지는  $v^3$ 에 비례하여 출력을 나타내게 된다. 그리고 정격 풍속  $v_r$  부터 정지 풍속(Cut-out speed)  $v_f$ 까지는 시스템의 출력이 정격출력으로 일정하게 유지되도록 한다. 이러한 정격출력의 일정한 유지는 터빈의 날개 각도를 변경하는 즉 피치제어(pitch control)시스템을 통하여 이루어지며 터빈의 출력계수  $C_p$ 가 조정되게 된다. 풍속이 정지풍속  $v_f$  이상이 되면 터빈의 파손방지나 내부시스템의 안정을 위하여 공회전상태가 되어 더 이상 발전을 하지 않는다. 그림 1은 본 논문에서 사용될 풍력 발전 시스템의 출력 특성을 나타내고 있다.

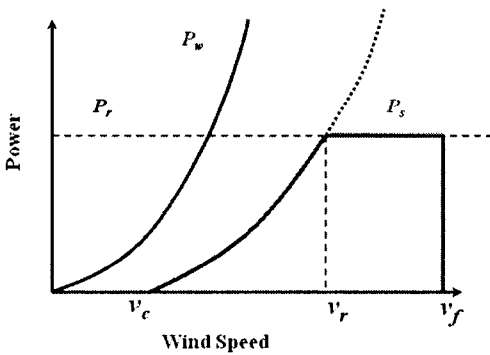


그림 1. 풍력 발전 시스템의 출력특성  
Fig. 1. Output characteristics of a power wind generation system

2.2 풍력시스템의 구성

본 논문에서 설계할 영구자석 풍력발전기가 사용되는 풍력 발전 시스템의 구성 및 사양을 표 1에 나타내었다. 시스템의 운전방식은 증속기가 없는 직접 구동방식이며, 피치제어를 통하여 발전기의 출력량을 제어한다[1].

표 1. 풍력 발전 시스템 사양

Table 1. Specification Of Wind Generation System

정격 출력 ( $P_s$ )		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 <sup>2</sup> ]
제어 시스템	피치 제어(Pitch Control)	

3. 풍력 발전기의 출력전류 산정 및 연간에너지 생산량 산정

3.1 풍력발전기의 출력전류 산정

본 절에서는 풍력 발전시스템 터빈의 출력식과 SPMSG의 특성식을 이용하여 각 풍속에 따른 발전기의 출력전류를 계산하고자 한다. 본 연구에 적용되는 풍력 발전시스템의 출력계수  $C_p$ 는 그림 2에 나타내었다. 출력계수  $C_p$ 를 이용하여 구한 터빈의 출력  $P_s$ 도 같이 나타내었다. 그림 3은 풍력 터빈의 주속비(tip speed ratio)와 출력계수  $C_p$ 의 관계를 보여준다.

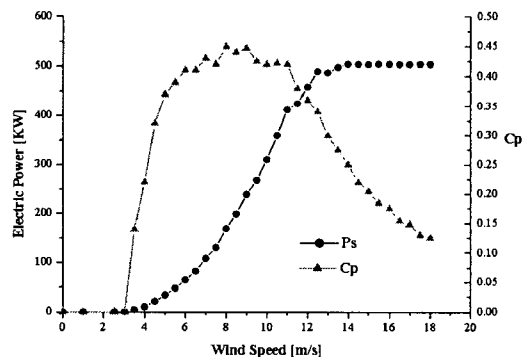


그림 2. 출력곡선과 출력계수  
Fig. 2. Power curve and power coefficient

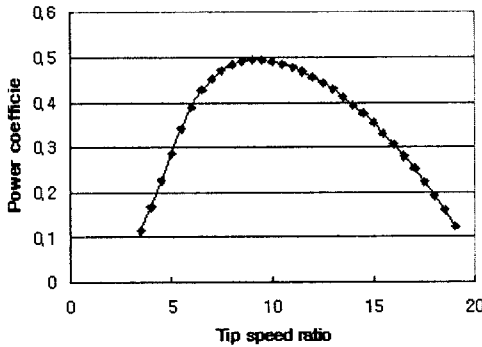


그림 3. 풍력터빈의 성능 곡선  
Fig. 3. Performance curve of wind turbine

풍력 발전기 SPMSG의 입력  $P_i$ 는 다음과 같다.

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

여기서,  $\omega$  : 각속도 [rad/s],  $T = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q$ : 토크 [Nm],  $\lambda(v) = \frac{R\omega}{v}$ : 주속비(tip speed ratio),  $\lambda_{pm}$ : 극당 쇠교자속수,  $p$ : 극 쌍수,  $R$ : 터빈의 반경

식 (5)를 다시 쓰면, 발전기의 입력은 다음과 같게 된다.

$$P_i = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \frac{v \lambda(v)}{R} \quad [W] \quad (6)$$

증속기를 사용하지 않는 직접 구동 풍력 발전 시스템의 터빈에 의한 출력  $P_s$ 는 풍력 발전기의 입력 ( $P_i$ )과 같으므로, 식 (4)와 식 (6)으로부터 풍력 발전기 출력전류는 다음과 같다.

$$i_q = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda_{pm} \lambda(v)} C_p(v) v^2 \quad [A] \quad (7)$$

출력계수( $C_p$ )와 주속비( $\lambda$ )는 풍속의 함수이므로 그림 2와 3을 이용하여 구한다. 이러한 출력전류로부터 발전기의 특성해석을 수행하여 발전기의 손실인 동손과 철손을 계산하고 발전기의 출력  $P_o$ 를 계산할 수 있게 된다.

### 3.2 풍력확률밀도

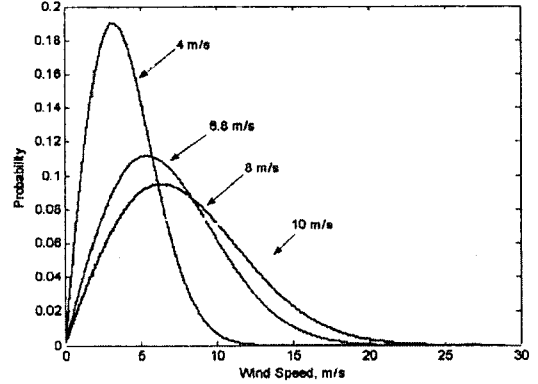


그림 4. 풍속의 분포  
Fig. 4. Distribution of wind speed

풍력발전 시스템이 설치되는 특정한 지역의 풍속 특성을 파악하기 위하여 사용되는 풍속 확률밀도 함수로는 Rayleigh 함수가 사용된다. 식 (8)과 같은 Rayleigh 함수는 그 지역의 평균 풍속만으로 풍속의 분포를 알 수 있으므로 본 논문에서 사용하였다.

$$F(v) = \frac{\pi v}{2v_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right] \quad (8)$$

여기서  $v$ : 특정풍속[m/s],  $v_a$ : 연평균 풍속[m/s]

그림 4는 레일레이 분포를 사용하여 연 평균풍속 4.0, 6.8, 8.0, 10.0[m/s]일 때의 각 풍속의 확률 분포를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 발전기가 설치되는 지역의 평균 풍속을 대관령 풍력실증단지 연 평균풍속인 6.8[m/s]이라고 가정하였다.

### 3.3 풍력발전시스템의 연간에너지 생산량

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

## DEAS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

$$H(v) = 365 \times 12 (= 8760 \text{시간}) \times \text{풍속 } v \text{ 일 때 확률} \quad (9)$$

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

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

그리고 풍속  $v$ 일 때 연간 에너지 생산량은 다음과 같게 된다.

$$aep(v) = P_o(v) \times H(v) \quad [Wh] \quad (10)$$

여기서  $P_o(v)$ : 특정 풍속  $v$ 에서의 발전기의 출력

그러므로 전 풍속 영역에 의한 전체 연간 에너지 생산량은 각 풍속에서 에너지 생산량을 합치면 된다.

$$AEP_{total} = \sum_v aep(v) \quad (11)$$

본 연구에서는 이러한 연간 에너지 생산량(AEPtotal)을 풍력발전기 최적설계의 목적함수로 선정하였다. 풍속 구간을 많이 나누게 되는 경우 즉,  $\Delta v$ 가 작을수록 AEP의 계산은 정확하게 되나 최적화시에 계산 시간이 증가하기 때문에 절충해서 선정할 필요가 있다. 본 논문에서는 2.5[m/sec]로 선정하였다.

## 4. DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)

### 4.1 DEAS 소개

DEAS는 크게 지역최적화와 전역최적화과정으로 나눌 수 있으며, 지역최적화는 탐색점 주변을 면밀히 탐색하는 bisectional search(BSS, 양분 탐색)와 BSS에서 얻은 정보를 기반으로 이웃 영역을 확장 탐색하는 unidirectional search(UDS, 단향 탐색)로 나눌 수 있다. 그리고 전역최적화를 위해서는 가장 용이하면서도 간단하게 구현할 수 있는 multistart 기법을 채용했다. multistart 기법은 임의의 시작점

에서 지역최적화를 통해 지역해를 발견한 후 다시 임의의 시작점으로부터 지역최적화를 반복하는 방법으로 전역해를 찾는 전역최적화법이다. 이 방법에서 전역해는 탐색된 모든 지역해 중에서 최소 혹은 최대(최대화 문제의 경우)인 것으로 선택된다. 이진 스트링에서의 돌연변이에 의한 영향을 많이 받는 유전 알고리즘의 단점에 비해, DEAS는 전 파라미터의 이진 스트링을 한 줄로 붙이는 것이 아니라 차례로 쌓음으로써 이진 행렬을 구성한다. 그리고 지역탐색을 수행함에 따라 이진 행렬의 가장 오른쪽 열에 0 또는 1로 구성된 최적의 이진 열을 계속해서 붙여 나간다. 최적의 이진 열을 찾기 위해서는 현재의 최적점 근처에서 가능한 모든 탐색 방향으로의 이웃점을 찾아내어서 비용함수를 계산 및 비교하는 과정(BSS)이 필요하다[3-4].

DEAS는 이웃 행렬을 구성하는 방법에 따라 현재까지 eDEAS(exhaustive DEAS)와 uDEAS(univariate DEAS)가 개발되었다. eDEAS는 가장 초기 알고리즘이며, 전체 변수에 변화를 줌으로써 생성되는 이웃점이  $2^n$  개가 되므로 계산량의 부담이 큰 단점이 있다. 이에 각 변수 별로 BSS와 UDS를 생성하는 알고리즘인 uDEAS가 개발되었으며 다차원 문제나 비선형 문제에 대해 탁월한 최적화 성능을 보였다[5]. 본 논문에서는 많은 계산량을 요구하는 풍력발전기 최적설계에 uDEAS를 적용하였다.

### 4.2 지역탐색(Local search(BSS/UDS))

DEAS는 지역탐색(local search)을 위해서 BSS와 UDS라는 탐색 루틴을 갖는다.

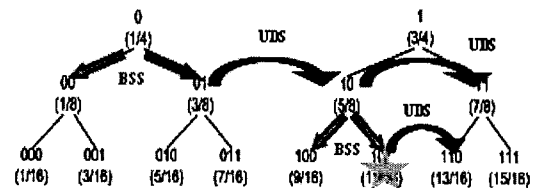


그림 5. BSS와 UDS의 1차원 지역탐색 구조 및 특성  
 Fig. 5. Local search aspects of BSS and UDS in one dimension

BSS에서는 그림 5에서 보는 것처럼 이진 스트링에 0과 1을 붙여서 복호화하고 비용함수를 계산 후 최적의 탐색 방향을 선택하는 과정을 수행한다. 그리고 UDS에서는 비용함수가 계속해서 감소할 때까지 BSS에서 계산된 최적 방향으로 확장된 탐색을 수행한다.

BSS는 이진 행렬로 표현되는 현재의 최적점으로부터 이웃점을 생성하는 과정과 이를 위해 생성된 이진 행렬들을 복호화하고 비용함수를 계산하는 과정, 그리고 그 중에서 최소의 비용함수를 갖는 행렬을 선택하고 최적 탐색 방향으로 도출하는 과정으로 구성된다. BSS가 조밀하게 탐색하는 심화 탐색(exploitation)특성을 가지는 반면에 해 지역에서 넓게 탐색하지 못하는 한계가 있다. BSS의 제한적인 탐색을 보완하기 위해서는 광역 탐색(exploration)의 특성을 가지는 UDS를 같이 수행한다.

DEAS의 특성을 설명하기 위해서 그림 5는 간단한 1차원 문제에 대해 [0]이라는 부모 스트링으로부터 BSS를 수행하여 [00]과 [01]이라는 자식 스트링이 생성되고 비용함수 판별 후 [01]이 선택된 예를 보인다. 첫 번째 BSS 수행 후 다시 스트링을 증가시켜 탐색을 진행시키는데 선택된 [01] 부모 스트링이 되고 [010]과 [011]이라는 자식 스트링이 생성되고 다시 비용함수 판별 후 부모 스트링인 [01]보다 자식스트링 [010]과 [011]의 비용함수가 감소되지 않기 때문에 다음 단계에서 BSS를 수행하지 않고(삭제 요망!!), BSS후 무조건 UDS 수행함) UDS를 통해 [10]으로 확장을 한다. 이렇게 [0]에서 [10]까지 1비트 길어지는 동안 연속적으로 수행된 single BSS-multiple UDS의 조합을 session이라고 한다. 한 번의 session이 완료될수록 이진 스트링의 길이는 1씩 증가한다. 확장된 [10]에서 다시 BSS를 실시하여 비용함수를 비교한 결과 [101]인 11/16에서 지역 최적점을 찾을 수 있다.

### 4.3 전역탐색(Global search)

BSS와 UDS를 이용하여 지역탐색을 수행하고 전역 최적해를 찾기 위해서 Multistart 전략을 적용하였다. 이전 탐색의 최적값 유지를 보장하기 위해 이

전 탐색까지의 비용함수가 가장 낮은 해를 저장한 후 다시 임의의 행렬( $T_{n \times iRowLen}$ )을 시작점으로 탐색을 재시작 한다. 여기서 n은 차원이고  $iRowLen$ 는 행렬에서 열의 길이(row length)이다. 생성된 초기 행렬은 이전에 탐색했던 해인지 아닌지를 확인하여 이전에 탐색된 점이 아니면 초기점으로부터 지역탐색을 마지막 열의 길이( $fRowLen$ )까지 탐색을 수행한다.

```

Initialize a history table.
for i = 1 : numMaxRestart
    Generate a random initial binary matrix  $T_{n \times iRowLen}$ .
    if  $T_{n \times iRowLen}$  is not in the history table of the
    previous initial matrices
    then
        for j=iRowLen:fRowLen
             $T_{n \times (k+1)} = \text{session}(T_{n \times k})$ 
        endfor
    end if
end for
    
```

그림 6. uDEAS의 전역탐색 알고리즘  
Fig. 6. Global search algorithm of uDEAS

또한, 그림 6에 나타냈듯이 코드에서 지역탐색의 루틴은 현재의 최적점을 저장하고 Multistart를 통해 값을 개선시켜며 목적함수를 만족하는 전역 최적점을 탐색하기 위해 최대 Multistart 횟수인  $numMaxRestart$ 까지 탐색을 수행한다.

### 4.4 설계변수 민감도(Sensitivity)

다차원 문제에서 uDEAS는 각각의 파라메타의 방향을 따라 차례대로 목적함수를 최적화 시키는 방식으로 전역탐색을 수행한다.

먼저 첫 번째( $x_1$ ) 파라메타 방향으로 BSS와 UDS를 실시하여 최적해를 찾고 두 번째( $x_2$ ) 파라메타의 방향으로 BSS와 UDS를 실시하여 마지막 파라메타( $x_n$ )까지 지역, 전역탐색 전략을 통해서 최적점을 찾는다. 따라서 uDEAS의 순차적인 파라메타의 탐색에서 탐색순서는 실질적으로 파라메타의 최적해 탐색 및 최적화 수행시간에 중요한 요소가 된다. 특히 순차적인 설계 파라메타 탐색특성을 고려하여 각각

의 설계 파라메타가 목적함수에 얼마나 영향을 미치는지를 알아보기 위해서 식 (12)를 이용하여 각 설계 변수의 파라메타 민감도를 산정하였다.

$$S(x_i^{(k)}) = \frac{|O([x_1, \dots, x_i^{(k)}, \dots, x_n]) - O([x_1, \dots, x_i^{(k-1)}, \dots, x_n])|}{x_i^{(k)} - x_i^{(k-1)}} \quad (12)$$

식에서  $O([x_1, \dots, x_n])$ 는 목적함수 값을 나타낸다. 또한, 파라메타의 민감도 계산을 토대로 어떤 파라메타가 풍력발전기 최적설계에 가장 영향을 미치는지를 조사하여 크게 영향을 미치는 순서대로 해를 탐색하여 해의 정확성과 탐색시간에서 효율적인 최적화를 수행할 수 있다.

### 4.5 uDEAS의 장점과 유효성

과도한 해석시간과 다수의 Sub-optimal을 가지는 풍력발전기의 효율적 최적설계를 위해서는 정확한 탐색과 빠른 수렴성을 가진 최적화 알고리즘이 필요하다. 그러므로 BSS와 UDS의 탐색특성을 가지는 uDEAS의 정확한 최적해 탐색과 빠른 수렴성을 검증하기 위하여 그림 7에 있는 테스트 함수를 통해서 해의 수렴 여부를 기준으로 탐색횟수 및 탐색 시간을 기존의 다양한 최적화 알고리즘과 표 2에서 비교하였다. 테스트함수 최적화를 비교한 결과 기존의 최적화 알고리즘보다 uDEAS의 해의 정확성과 수렴 속도가 현저하게 우수하였다[5].

표 2. 탐색횟수 비교 결과  
Table 2. EVALUATION NUMBERS

	SDE	EA	IA	TS	uDEAS
(a)	2700	430	1354	492	77
(b)	10822	-	326	-	74
(c)	5439	460	-	486	113
(d)	-	2048	-	540	273
(e)	241215	-	7424	727	268

(SDE: stochastic method of Aluffi-Pentini, EA: evolution algorithm, IA: interval arithmetic, TS: tabu search)

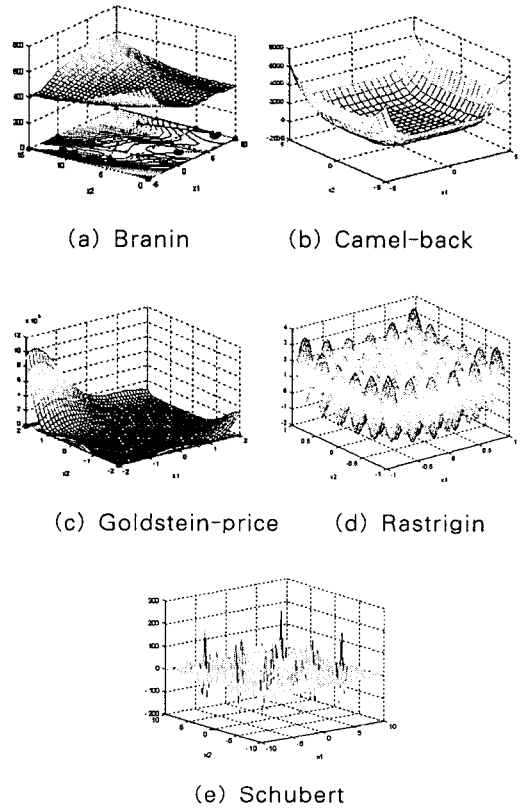


그림 7. Test 함수  
Fig. 7. Test function

## 5. 풍력발전기의 최적설계

### 5.1 유한요소법과 DEAS기반의 SPMSG 최적설계

본 논문에서는 표 1에 그 사양이 나타나있는 500[kW]급 풍력발전 시스템에 사용될 SPMSG의 최적설계를 uDEAS를 이용하여 수행하였다. 그림 8에서 나타내듯이 최적화 수행 시 목적함수로는 앞서 언급한 연간 에너지 생산량(AEP)을 선정하였고 정격 토크를 제한조건으로 사용하였다. 특히, SPMSG 발전기의 사양은 정격출력 500[kW]이고, 100극이며, 300슬롯으로 구성되고, 정격토크는 148[kNm]이다.

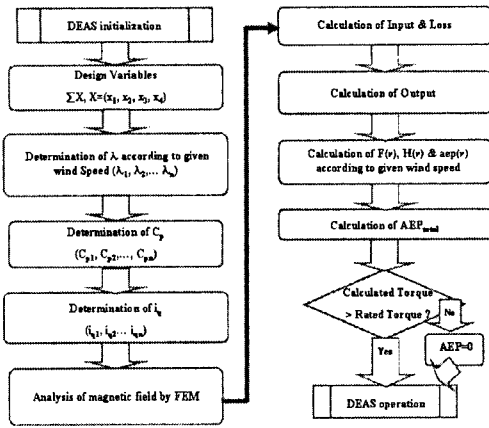


그림 8. DEAS와 F.E.A기반의 SPMSG 최적설계 흐름도  
 Fig. 8. Flow chart of optimal design of SPMSG coupled with uDEAS and F.E.A

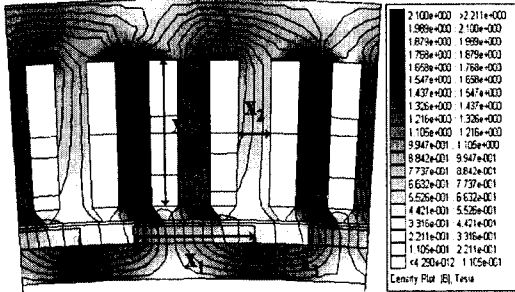


그림 9. 표면부착형 영구자석 동기 설계변수  
 ( $x_1$ : 자극각도,  $x_2$ : 고정자 치 폭,  $x_3$ : 회전자 요크두께,  $x_4$ : 고정자 슬롯 높이)  
 Fig. 9. Design variables of SPMSG( $x_1$ : the pole-arc angle of PM,  $x_2$ : tooth width,  $x_3$ : rotor yoke depth,  $x_4$ : slot depth)

설계 변수는 그림 9에서 볼 수 있듯이 자극각도 ( $x_1$ ), 고정자 치 폭( $x_2$ ), 회전자 요크 두께( $x_3$ ), 고정자 슬롯 높이( $x_4$ )를 선정하였다. 발전기의 설치 공간 및 재료비의 제약을 고려하여 고정자 외경 및 축방향 길이는 고정하였고, 극수 및 공극의 길이도 고정하였다.

### 5.2 최적설계결과

풍력발전기의 정확한 특성해석과 최적설계를 수

행하기 위하여 유한요소법과 DEAS를 기반으로 연간 최대 에너지생산량을 목표로 SPMSG의 최적설계 결과를 표 3에 나타내었으며 비교검토용으로 수렴성이 빠르고 전역최적화 알고리즘으로 잘 알려진 병렬 유전알고리즘에 분산 컴퓨팅기법을 적용하여 최적설계를 수행하였다.

uDEAS에서 예비 탐색(preliminary search)은 기본적으로 목적함수의 범위에 대한 대략적인 정보를 제공함으로써 주 탐색(main search)을 시작할 때 열의 길이(row length)를 결정하기 위해서 필요한 과정이다. 특히, 예비 탐색을 통해 도출한 정보는 주 탐색 시 해당 행렬의 열의 길이를 탐색범위로 포함시킬지 여부를 결정할 수 있는 중요한 기준이 된다. 따라서 SPMSG의 최적설계 수행시 구체적인 수행조건으로인 열의 길이는  $3(iRowLen=3)$ 부터 시작하여  $10(fRowLen=10)$ 까지 해를 탐색하였다.

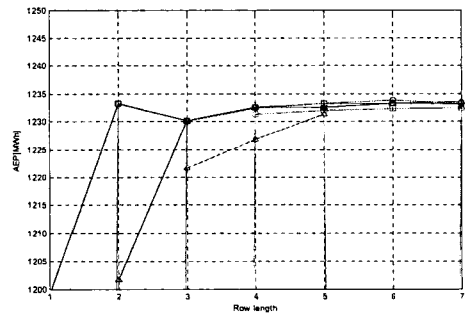


그림 10. 예비 탐색시 열의 길이(row length)에 따른 연간 에너지생산량  
 Fig. 10. Maximization of AEP with respect to row length during the preliminary search of uDEAS(enlarged between 1200 and 1250)

그림 10에서는 예비탐색 수행시 열의 길이에 따른 연간 에너지 생산량을 보여주고 있다. 본 논문에서는 그림 10의 결과를 토대로 열의 길이 3부터 주 탐색을 시작하여 수행 시간을 감소시켰다. 또한 예비탐색동안 앞서 언급한 설계 파라메타의 민감도를 계산한 결과 그 평균값이  $E(S(x_1))=5.2403$ ,  $E(S(x_2))= 3.7280$ ,  $E(S(x_3))=0.0833$ ,  $E(S(x_4))=0.7381$



## DEAS를 이용한 직접구동형 풍력발전기 최적설계

이 되어,  $x_1, x_2, x_4, x_3$ 의 순서로 목적함수에 대해 높은 민감도를 갖는다. 이는 uDEAS로 탐색시 상기한 순서로 탐색하면 가장 탐색 효율이 높을 수 있음을 의미한다.

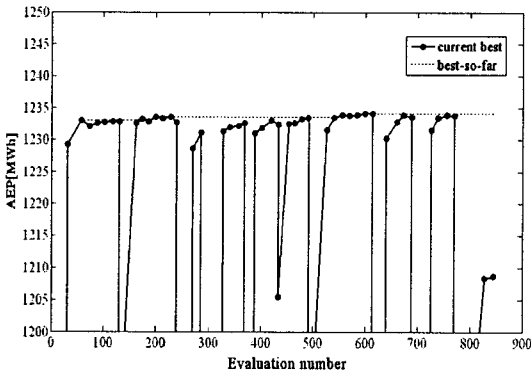


그림 11. 주 탐색시 탐색횟수 따른 최대 연간 에너지생산량(1200~1250(MWh) 사이에서 확대)

Fig. 11. Maximization of AEP with respect to evaluation number during the main search of uDEAS(enlarged between 1200 and 1250)

그림 11에서는  $x_1, x_2, x_4, x_3$ 과 같이 민감도가 큰 순서대로 uDEAS의 최적설계시 탐색 횟수별 목적함수의 추이가 나타나 있다. 민감도가 큰 순서대로 uDEAS를 수행한 결과 5.01시간이 걸렸고 전역 최소값은 1234.3[MWh]를 얻었다. 비교검토용으로 민감도가 낮은 순서대로( $x_3, x_4, x_2, x_1$ ) uDEAS를 수행한 결과 전역 최소값은 1234.0[MWh], 수행시간은 4.98시간 걸렸다. 따라서 uDEAS를 이용한 최적설계에서 변수의 탐색 순서는 해의 정확한 탐색 및 빠른 수렴 면에 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나, uDEAS의 BSS와 UDS의 강인성으로 인해 두 가지의 대표적인 경우에 대해 병렬 유전알고리즘 결과와 비교해서 큰 탐색 성능 차이가 없음을 알 수 있다.

표 3에 나타나듯이 SPMSG의 최적설계 수행결과 uDEAS(300.6[min])를 이용한 풍력발전기 최적설계 수행시간이 병렬 분산 유전알고리즘(820.6[min])을 이용한 결과보다 63[%]이상 해석 시간이 감소하였다. 또한 uDEAS가 컴퓨터 1대로 수행한 반면에 비

교 대상인 병렬 유전알고리즘은 10대의 컴퓨터를 사용하여 최적화를 수행하였다. 따라서 풍력발전기 최적설계시 발생하는 과도한 해석시간을 크게 감소시킴으로써 병렬 분산 유전알고리즘보다 해의 수렴 속도 및 정확성에서 우수함을 알 수 있다.

표 3. SPMSG 최적설계 결과 비교

Table 3. Comparison Results Of Optimal Design for SPMSG

최적화 알고리즘	설계 변수				AEP [MWh]	해석 시간 [min]
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$		
GA	1.892	8.8	19.6	59.6	1234.5	820.6
DEAS	1.864	8.9	16.7	63.3	1234.2	300.6

( $x_1$ : 자극각도,  $x_2$ : 치 폭,  $x_3$ : 회전자 요크,  $x_4$ : 슬롯 높이)

## 6. 결 론

본 논문에서는 유한요소법과 DEAS을 결합하여 연구자식 풍력발전기의 최적설계를 구현하였으며, 풍력발전기 최적설계의 과정에서 발생한 최적화 수행시간을 단축하기 위해 결정론적 알고리즘인 uDEAS를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 또한 목적함수로 정격 풍속에서만 특성을 사용하지 않고 연평균풍속과 풍속 확률분포를 고려한 연간 에너지 총생산량으로 하였다. DEAS를 적용하여 최적화를 수행한 결과 기존 병렬 유전알고리즘 적용모델 대비 63[%]의 해석 수행시간을 감소시켰다.

### 감사의 글

이 논문은 2008학년도 동아대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] Khan, MA, 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] J. 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] J. -W. Kim and S. W. Kim, "Numerical method for global optimization: dynamic encoding algorithm for searches", IEE Proc.-Control Theory and Appl., vol. 151, no. 5, pp. 661-668, Sept. 2004.
- [4] J. -W. Kim and S. W. Kim, "Parameter identification of induction motors using dynamic encoding algorithm for searches (DEAS)", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, no. 1, pp. 16-24, March 2005.
- [5] J. -W. Kim and S. W. Kim, "A fast computational optimization method : univariate dynamic encoding algorithm for searches (uDEAS)", IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E90-A, no. 8, pp. 1679-1689, August 2007.
- [6] 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.
- [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," International Conference on Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG2007), pp. 1139~1140, June, 2007.

## ◇ 저자소개 ◇

### 정호창 (鄭昊彰)

1980년 8월 15일생. 2007년 동아대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

### 이철균 (李哲均)

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

### 김은수 (金銀宿)

1982년 12월 26일생. 2008년 동아대 전자공학과 졸업. 2008년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정.

### 김종욱 (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 전기강판연구그룹 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 선임연구원. 현재 동아대학교 전기공학과 조교수.