

DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)를 이용한 풍력발전기 최적설계

정호창¹, 이철균³, 김종욱², 김은수², 정상용¹
 동아대학교 전기공학과¹, 동아대학교 전자공학과², 동의대학교 전기공학과³

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

Hochang Jung¹, Cheol-Gyun Lee³, Jong-Wook Kim², Eunsu Kim², Sang-Yong Jung¹
 Electrical Engineering¹, Electronics Engineering², Dong-A University, Electrical Engineering, Dong-Eui University³

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 has been contributed to reducing the excessive computing time for the optimization process.

다른 과도한 연산시간을 고려하여 기존의 확률론적 최적화 알고리즘이 아닌 결정론적 최적화 알고리즘인 DEAS를 적용하여 연산 수행시간을 단축시켰다. 본 논문에서는 DEAS를 적용하여 AEP최대화를 목적으로 하는 최적설계 수행의 결과를 기존 방식인 GA를 적용하여 수행한 설계결과와 에너지생산량, 수행시간 측면에서 비교, 검토하여 DEAS를 이용한 AEP최대화 최적설계의 타당성과 효율성을 나타내고자한다.

1. 서 론

현대 사회에 들어서면서 천연자원이 고갈되고, 가전 제품 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 기존 풍동 방식에서 탈피한 새로운 구동방식에 대한 연구가 이루어지고 있는데 이러한 풍력 발전기의 분류는 연결 구조에 따라 기어 형과 직접 구동 형으로 나뉜다 [1]. 기존에 많이 사용되어진 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 [2] [3]. 그러므로 본 논문에서는 영구자석형 발전기 중에 표면부착형 동기발전기를 채택하였고 유한요소법(FEM)과 Dynamic Encoding Algorithm for Searches(DEAS)를 이용하여 최적설계를 수행하였다 [4] [5].

DEAS는 독자적으로 개발된 최적화 기법으로서, 이진 스트링의 독특한 특성을 수치 최적화에 적용함으로써 순수한 컴퓨터 연산만으로도 부드럽지 않은 비용함수에 대하여 최적해를 효율적으로 찾을 수 있다 [6]. DEAS는 지역탐색(Local search) 전략으로써 이진 행렬로 표현되는 동적인 이웃점들 가운데에서 최선의 것을 선택하는 방식으로 파라미터들을 점진적으로 최적화한다. 그리고 지역탐색 전략으로써 임의의 초기값으로부터 지역탐색을 수행한 후 만족한 해를 찾지 못한다면 새로운 임의의 초기값으로부터 재시작하는 multistart기법을 활용했다. 풍력 발전을 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 함수호출 및 비교수행과 유한요소해석에

2. 본 론

2.1 풍력 발전 시스템

일반적으로 바람에 의한 동력(Power) P_w 은 단위 시간당 운동에너지의 변화량이 되므로, 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 ρ : 공기 밀도 [kg/m^3], v : 풍속 [m/s]

풍속별 터빈출력(P_p)은 식 (1)과 같이 풍속의 세제곱에 비례하고 터빈의 면적에 비례한다. 하지만 터빈의 출력(P_p)이 모두 터빈의 유효출력(P_s)으로 변환되는 것이 아니다. 즉, 유효출력(P_s)은 팁 속도 비(λ)에 의해 정해지는 출력계수(C_p)에 의해 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 C_p : 출력계수, λ : 팁 속도 비

2.2 풍력 시스템의 구성

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

정격출력(P_r)	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	형식	SPMSG
	외경	39 [m]
풍력 터빈	회전 속도	0'32 [rpm]
	블레이드 통과 면적 (Blade swept area)	1207[m ²]
제어 시스템	피치 제어(Pitch Control)	

2.3 풍력 발전기 출력전류 산정 및 AEP 모델링

2.3.1 풍력발전의 출력전류 산정

터빈의 유효출력(P_p)은 발전기의 입력에 해당하므로 다음 식을 만족한다.

$$P_s = P_i = \omega T [\text{W}] \quad (3)$$

여기서, $T = \frac{3}{2} k_E i_q [\text{Nm}]$, $\omega = \frac{v\lambda(v)}{R} [\text{rad/s}]$, $\omega =$ 터빈의 속도[rad/s], $R =$ 터빈 블레이드의 반지름[m], $p =$ 발전기의 극쌍수, $k_E =$ 역기전력 상수[V/(rad/s)]

본 논문에서는 풍력발전기의 최종 출력을 계산하기 위하여 유한요소법을 적용한 손실계산을 수행하였는데, 선행 조건인 전류원(i_s) 계산을 다음과 같이 산정한다.

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

2.3.2 풍속 확률 밀도

풍력발전 시스템이 설치되는 특정한 지역의 풍속특성을 파악하기 위하여 사용되는 풍속 확률밀도 함수로는 Rayleigh 함수가 사용된다. 식 (5)와 같은 레일리(Rayleigh) 함수는 그 지역의 평균 풍속만으로 풍속의 분포를 알 수 있으므로 본 논문에서 사용하였다.

$$f(v) = \frac{\pi v}{2v_0^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서 v : 특정풍속[m/s]
 v_0 : 연평균 풍속[m/s]

2.3.3 연간 에너지 생산량 산정

전 운전 영역에서의 풍속을 고려한 풍력 발전 시스템의 AEP 최대화는 다음과 같은 유효 운전 시간을 산정하여 적용함으로써 가능해진다.

$$H(v) = N_t \times F(v) \Delta v [\text{h}] \quad (6)$$

여기서 $N_t (=8760)$ 은 매 풍속별 연간 총 운전 시간

특정 속도(v)의 바람이 연간 만들어내는 에너지 생산량(aep)은 연간 운전시간($H(v)$)과 출력(P_o)을 곱함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$aep(v) = P_o(v) \times H(v) \quad (7)$$

따라서 SPMSG 최적설계 목적인 전 운전 풍속을 고려한 연간 총 에너지 생산량(AEP)은 다음과 같다.

$$AEP = \sum_{v=0}^n aep(v) [\text{Wh}] \quad (8)$$

2.4 DEAS(Dynamic Encoding Algorithm for Searches)

DEAS는 크게 지역최적화와 전역최적화과정으로 나눌 수 있으며, 지역최적화는 탐색점 주변을 좀더 면밀히 탐색하는 bisectonal search(BBS)와 BBS에서 얻은 정보를 기반으로 이웃 영역을 확장 탐색하는 unidirectional(UDS)로 나눌 수 있다. 그리고 전역최적화를 위해서는 가장 용이하면서도 간단하게 구현할 수 있는 multistart 기법을 채용했다. multistart 기법은 임의의 시작점에서 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 볼

이는 것이 아니라 차례로 쌍음으로써 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(BBS)이 필요하다. 이 과정에서 얻어진 최적 방향으로의 확장탐색을 통해 더 낮은 해를 찾는 과정(UDS)이 필요하며 BBS와 UDS의 기본적인 탐색 방식을 그림1과 같이 나타낼 수 있다.

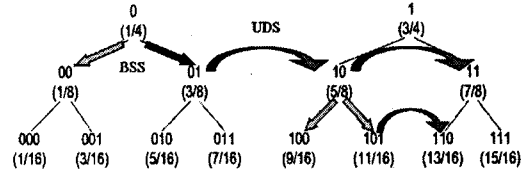


그림 1. BBS와 UDS의 탐색구조 및 특성

2.4.1 BBS

BBS는 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. 여기에서 도출된 최적 탐색 방향은 곧이어 진행되는 UDS의 기본 탐색 방향이 된다. 2개의 변수를 최적화 하는 문제를 예로 들어 상기한 BBS의 각 단계를 설명하도록 한다. 예를 들어 직전 session(BBS와 UDS의 조합)에서 최적값이라고 판별된 행렬이 다음과 같다고 하자.

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

이 행렬 A_1 주변의 이웃점 행렬들은 다음과 같이 0과 1의 조합으로 생성된 2^2 가지의 열을 A_1 행렬의 최우측에 붙인 이진 행렬로 표현될 수 있다.

$$A_1^{(1)} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ A_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A_1^{(2)} = \begin{bmatrix} A_1 & 1 \\ A_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_1^{(3)} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ A_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A_1^{(4)} = \begin{bmatrix} A_1 & 1 \\ A_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

그 다음 단계로는 각 이웃점 행렬들을 복호화 하고 그 값으로부터 비용함수를 계산하는 과정을 수행한다. 복호화를 위해서는 유전 알고리즘에서 많이 사용되는 복호화 함수를 사용하여, 길이가 m인 이진 스트링에 대해 $[r_1, r_u]$ 의 범위를 갖는 경우 다음의 복호화 함수를 사용한다.

$$f([b_{m-1}, b_{m-2}, \dots, b_1, b_0]) = \frac{r_u - r_l}{2^m - 1} \sum_{j=0}^{m-1} b_j 2^j \quad (9)$$

식(9)는 하나의 스트링에 대해 복호화를 행한 것이며 위의 이웃점 행렬들을 복호화 하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\theta^{(1)} = \begin{bmatrix} f([1010]) \\ f([0110]) \end{bmatrix}, \theta^{(2)} = \begin{bmatrix} f([1011]) \\ f([0111]) \end{bmatrix}$$

$$\theta^{(3)} = \begin{bmatrix} f([1011]) \\ f([0110]) \end{bmatrix}, \theta^{(4)} = \begin{bmatrix} f([1011]) \\ f([0111]) \end{bmatrix}$$

BBS의 마지막 단계로서 다음과 같이 네 개의 이웃점 행렬에 대해 주어진 문제의 비용함수를 구한 후 비용함수 값이 최소인 행렬을 구한다.

$$\theta^* = \min J(\theta^{(1)}), J(\theta^{(2)}), J(\theta^{(3)}), J(\theta^{(4)}) \quad (10)$$

식(10)에서 가장 작은 비용함수를 갖는 파라미터 벡터 θ^* 의 최우측 열을 조사하면 A_1 으로부터 최적탐색 방향을 알 수 있으며 이 최적 탐색방향은 UDS에 넘겨진다.

2.4.2 UDS

BBS가 심화 탐색(explotation)특성을 갖는다면, UDS는 광역 탐색(exploration)의 특성을 갖는다. 구배법(gradient method)에서는 지역해에 접근할수록 비용함수의 기울기 값이 감소하며, 이는 step length λ_i 가 일정할 경우 다음 식에서 알 수 있듯이 갱신된 최적점 x_{i+1} 의 변화가 점차 감소함을 의미한다.

$$x_{i+1} = x_i - \lambda_i \nabla J(x_i) \quad (11)$$

BBS만 있을 경우 식(12)에서 $|\lambda_i \nabla J(x_i)|$ 의 값이 지수적으로 감소하게 되어 초기 탐색점이 최적해 근처에 있을 경우에는 조기에 수렴함을 알 수 있다. 하지만 초기 탐색점이 지역해에서 멀리 있을 경우에는 step length를 일정하게 유지한 상태에서 넓게 탐색해야 한다. 또한, UDS는 BSS와 달리 비용함수가 감소할 때까지 반복적으로 수행되므로 직전의 UDS 이웃점 중의 한 점의 비용함수가 감소할 때까지 반복적으로 수행되므로 직전의 UDS 이웃점 중의 한 점의 비용함수를 다시 계산하는(revisit) 문제가 발생한다. 그림2은 2차원 문제에 대해 BSS와 UDS가 실행되는 예를 도시한 것인데, 굵은 선으로 표시된 것은 최적 탐색방향을 나타내며 두 번째 UDS에서 생성된 이웃점 중에 A가 직전 UDS에서 탐색된 점임을 알 수 있다. DEAS에서는 이진비트의 특성을 활용한 masking 기법을 사용함으로써 이러한 재탐색을 용이하게 방지한다.

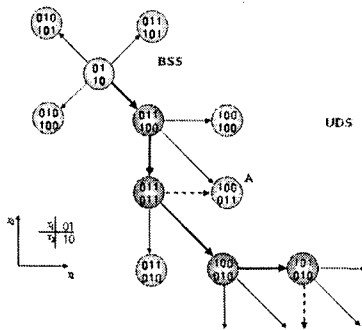


그림 2. 2차원에서의 DEAS 지역최적화 예시

BSS의 예제에서 A⁽²⁾에 대해 $[0 \ 1]^T$ 의 탐색방향으로 UDS를 수행하면 세 개의 확장벡터 $[0 \ 1]^T$, $[1 \ 0]^T$, $[1 \ 1]^T$ 가 생성되고, 각 벡터에 대해 다음 세 개의 이웃점 행렬이 생성된다.

$$B^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, B^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

그 후에는 BSS와 동일한 방법으로 각 행렬들을 복호화 하고 비용함수를 계산하는 과정, 그리고 그중에서 최소의 비용함수를 갖는 행렬을 선택한다.

2.5 풍력발전기 최적설계

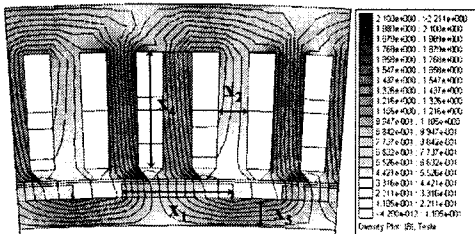


그림 3. 표면부착형 영구자석 동기기 설계변수

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

본 논문에서는 표 1에 그 사양이 나타나있는 500kW 급 풍력발전 시스템에 사용될 SPMSG의 최적설계를 수행하였다. SPMSG 발전기의 사양은 정격출력 500 [kW]이고, 100 극이며, 300 슬롯으로 구성되고, 정격토크는 148 [kNm]이다. SPMSG의 설계변수는 그림3과 같다.

2.6 풍력발전기 최적설계결과

풍력발전기의 정확한 특성해석과 최적설계를 수행하기 위하여 유한요소법과 DEAS를 결합하고 이를 통해 연간 최대 에너지 생산량을 목표로 하는 SPMSG의 최적설계 결과를 표2에 나타내었으며 비교검토용으로 병렬 유전알고리즘을 이용한 최적설계를 수행하였다.

표 2. 최적화 모델 결과 비교

최적화 알고리즘	설계 변수				AEP [MWh]	해석 시간 [min]
	자극 각도 (X_1)	치 폭 (X_2)	회전자 요크 (X_3)	슬롯 높이 (X_4)		
GA	1.892	8.8	19.6	59.6	1234.5	820.62
DEAS	1.886	9.06	17.144	65.79	1234.0	275.474

최적설계 수행결과 DEAS(275.474min)를 이용한 풍력발전기 최적설계 수행시간이 병렬 유전알고리즘(820.62min)을 이용한 결과보다 33%이상 해석 시간이 감소하였다. 따라서 풍력발전기 최적설계시 가장 큰 문제점인 해석시간을 감소시킴으로써 기존 유전알고리즘보다 해의 수렴 속도 및 정확성에서 우수함을 알 수 있다. 특히 풍력발전기의 궁극적인 목적이 연간 에너지의 총생산량 최대화이므로 본 논문에서 제안된 설계 알고리즘 및 최적설계 결과는 큰 의미를 가진다고 생각된다.

3. 결론

본 논문에서는 유한요소법과 DEAS를 결합하여 영구자석형 풍력발전기의 최적설계를 구현하였으며, 유한요소 해석이 사용되는 최적설계의 문제점인 최적화 수행시간을 단축하기 위해 결정론적 알고리즘인 DEAS를 최적설계와 결합하였다. 또한, 목적함수로 정격 풍속에서만만의 특성을 사용하지 않고 연평균풍속과 풍속 확률분포를 바탕으로 연간 에너지 총생산량을 사용하였다. 이러한 방법을 통해 기존 병렬 유전알고리즘 적용모델 대비 33%의 해석 수행시간을 감소시켰다.

[참 고 문 헌]

- [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] M. A. Khan, P. Pillay and M. Malengret, "Impact of direct-drive WEC Systems on the design of a small PM wind generator", Proc of IEEE Power Tech Conference, Vol. 2, p. 23-26, June 2003.
- [4] W. Wu, V. S. Ramsden and T. Crawford, "A Low-speed, High-torque, Direct-drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines", Conference Record of Industry Applications, Vol. 1, pp. 147-154, Oct., 2000.
- [5] Anders Grauers, "Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines," Ph.D Thesis Chalmers University, October 1996.
- [6] J.-W. Kim and S. W. Kim, "Parameter identification of induction motors using dynamic encoding algorithm for search (DEAS)," *IEEE Trans.EnergyConversion*, vol.20, no.1, p.16-24, March 2005.