

해상풍력발전단지의 전력망과 해상변전소 위치에 대한 최적 설계

Optimal Design of Power Grid and Location of Offshore Substation for Offshore Wind Power Plant

문 원 식* · 원 종 남** · 허 재 선* · 조 아 라* · 김 재 철*
(Won-Sik Moon · Jong-Nam Won · Jae-Sun Huh · Ara Jo · Jae-Chul Kim)

Abstract - This paper presents the methodology for optimal design of power grid for offshore wind power plant (OWPP) and optimum location of offshore substation. The proposed optimization process is based on a genetic algorithm, where the objective cost model is composed of investment, power loss, repair, and reliability cost using the net present value during the whole OWPP life cycle. A probability wind power output is modeled to reflect the characteristics of a wind power plant that produces electricity through wind and to calculate the reliability cost called expected energy not supplied. The main objective is to find the minimum cost for grid connection topology by submarine cables which cannot cross each other. Cable crossing was set as a constraint in the optimization algorithm of grid topology of the wind power plant. On the basis of this method, a case study is conducted to validate the model by simulating a 100-MW OWF.

Key Words : GA optimization, Probabilistic wind power model, Offshore substation, Offshore wind power grid, Submarine cable crossing

1. 서 론

해상풍력발전단지는 해상에 발전설비를 건설하는 것으로서 육상에 비해 입지 조건이 유리하고 바람 자원이 풍부하여 전력생산을 더 많이 할 수 있는 장점이 있으나 기후와 해상의 다양한 요소로 인해 개발 비용이 높다는 문제가 있다[1]. 따라서 모든 건설비용을 최소화할 수 있는 해상풍력발전단지의 설계 방안이 반드시 필요하다.

해상풍력발전단지는 바람을 통해 얻은 에너지를 풍력터빈에서 전력을 생산하여 육상으로 전력을 전송하는 시스템이다. 해상풍력터빈은 후류효과를 고려하여 바람으로부터 최대의 에너지를 얻을 수 있는 곳에 위치하게 되며, 이때 풍속과 후류효과에 대한 정확한 모델링이 필수적이다[2-4]. 풍력터빈의 위치가 결정되면 각 풍력터빈과 해상변전소, 그리고 육상 연계점(PCC)까지를 연계하는 전력망 설계가 요구된다. 해상풍력발전단지의 전력망은 각 풍력터빈뿐만 아니라 해상변전소까지를 연결하는 내부 전력망과, 해상변전소부터 육상 연계점을 연결하는 외부 전력망으로 구성된다[5]. 특히 내부 전력망은 풍력터빈을 연결하는 해저케이블의 연결 구조에 따라 케이블의 길이에 영향을 미치며, 케이블 고장

에 따른 신뢰도 비용에 영향을 미치는 특성을 지닌다[6]. 또한 해상변전소의 설치 위치는 내부 전력망 구성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 전력망 최적화와 동시에 해상변전소의 최적화 과정이 반드시 필요하다.

해상풍력발전단지의 전력망 최적화 설계에는 다양한 최적화 방법이 적용하여 진행되었다[7-14]. 가장 널리 사용된 최적화 방법은 Genetic Algorithm(GA)이며, 그 외 Evolutive Algorithm [9], Stochastic Optimization[10], Particle Swarm Optimization [13], Mixed Integer Programming[14] 등이 있다. 전력망 구성의 최적화를 위한 초기연구는 해저케이블 비용을 중심으로 구성된 목적함수의 최소화 값을 얻는 것을 목표로 하였다. 연구가 진행되면서 목적함수에 전력손실비용과 신뢰도비용[15], 풍속[16], [17], 후류효과[4] 등 실제 현실을 반영한 요소를 추가하게 되었으며, 해상변전소의 위치에 관한 연구도 진행되었다[18]. 그러나 기존 연구에서는 전력망 구성 시 해상변전소의 위치를 함께 고려하지 못하였으며, 내부 전력망을 구성하는 해저케이블이 서로 교차하는 결과가 발생하는 한계가 있었다.

본 논문에서는 전력망 구성에 관한 초기투자비용, 전력손실 및 보수비용, 그리고 공급지장에너지에 관한 신뢰도비용으로 구성된 목적함수를 제시하였으며, 해상풍력발전단지가 설치되는 지역의 풍속 특성을 반영하고자 확률론적 풍력출력을 모델링하여 이를 목적함수에 반영하였다. 전력망 구성방안을 위해서 omTSP 방법을 적용하여 해상변전소의 위치를 반영할 수 있도록 하였으며 내부망 케이블이 교차하지 않도록 제약조건을 제시하였다. 제시된 전력망 구성 방안에 대한 최적화를 위해서 GA를 이용하였다. 이를 바탕으로 100MW 모의 해상풍력발전단지에 대한 사례연구를

* Corresponding Author : School of Electrical Engineering,
Soongsil University, Korea

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Soongsil University Korea

** KEPCO Research Institute, Korea

Received : June 9, 2015; Accepted : June 25, 2015

진행하였다.

2. 해상풍력발전단지 전력망 모델

2.1 해상풍력발전단지의 전력망 구성

해상풍력발전단지의 전력망은 그림 1과 같이 풍력터빈과 내부 전력망, 해상변전소, 그리고 외부 전력망으로 구분할 수 있다[5].

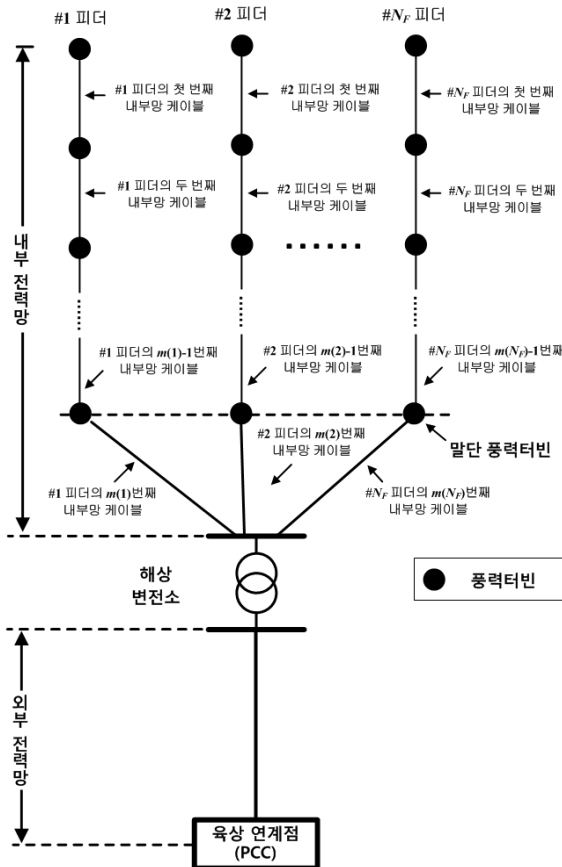


그림 1 해상풍력발전단지의 내·외부 전력망 구성

Fig. 1 Configuration of internal and external grid in the offshore wind power plant

내부 전력망은 풍력터빈 간의 연결뿐만 아니라 풍력터빈과 해상변전소를 연결하는 해저케이블(내부망 케이블)로 구성된다. 내부망 케이블은 풍력터빈으로부터 공급받은 전력을 해상변전소까지 전달하기 때문에 편의상 피더로 불리며, 풍력터빈을 연결하는 피더의 형태에 따라 방사상 구조, 루프 구조 등으로 구분된다. 해상변전소는 풍력터빈에서 생산된 전력을 모으고, 전력 손실을 줄이고자 적절한 고압 송전 전압으로 높여 효율적인 전력 전송을 가능하게 하는 역할을 한다. 외부 전력망은 해상변전소와 육상연계점(Point of Common Coupling, PCC)을 연결하는 외부망 케이블로 구성된다.

해상풍력발전단지의 전력망과 해상변전소 위치에 대한 최적 설계

내·외부망 케이블의 구조 및 길이는 해상변전소의 위치에 크게 영향을 받는다. 이는 전체 전력망을 구성하는 비용에 직접적인 영향을 미치기 때문에 해상변전소의 위치에 따른 내·외부 전력망의 전체 비용을 최소화할 수 있는 전력망 최적 설계가 반드시 필요하다.

2.2 해상풍력발전단지의 출력 모델

해상풍력발전단지의 전력망 설계는 발생 가능한 투자 및 손실 비용을 최소화해야 한다. 또한 해상 구조물의 특징을 고려한다면, 전력망 고장 발생 시 고장 복구 시간이 육상보다 길어질 것이고, 그로인해 발전된 전력을 송전하지 못하는 손실에 대한 정확한 계산이 필요하다. 따라서 전력손실비용과 고장 시 공급지장 에너지 비용의 정확한 계산을 위해 풍력발전단지의 확률론적 출력 모델이 필요하다[15]. 풍력단지 지역의 풍속에 관한 확률분포와 풍속에 대한 풍력터빈의 출력특성을 통해 발전 출력에 대한 풍력발전단지 출력에 대한 확률밀도 함수를 도출한다. 발전단지의 출력에 대한 확률밀도함수는 발전단지의 평균 전력생산과 케이블의 고장에 따른 신뢰도 비용 산출에 응용된다[19].

[20]에서 제시된 수식을 이용하여 풍속과 설치된 풍력터빈의 출력특성을 통한 풍력터빈의 평균 출력을 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{avg} = \int_0^{P_{wr}} x \cdot f_p(x) dx \quad (1)$$

- 여기서, P_{avg} : 풍력터빈의 평균 출력 [MW]
- P_{WT} : 풍력터빈의 정격용량 [MW]
- x : 풍력터빈의 출력 [MW]
- $f_p(x)$: 풍력터빈 출력 x 의 확률

3. 전력망 모델의 목적함수

해상변전소 위치를 고려한 해상풍력발전단지의 최적 전력망 설계를 위한 목적함수는 초기투자비용, 전력손실 및 보수비용, 그리고 신뢰도 비용으로 구성되며 이 비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

3.1 초기투자비용

초기투자비용이란 해상풍력발전단지의 내·외부 전력망을 구성하는 해저케이블의 케이블비용과 설치비용으로 구성되며 전체 케이블 선로의 길이에 비례한다.

케이블 비용은 내·외부 전력망을 구성하는 케이블의 정격용량에 따라 단가가 결정되며, 수식 (2)와 같다[21].

$$C_{AC} = A_p + B_p \exp\left(\frac{C_p S_n}{10^8}\right) [\text{억원}/\text{km}] \quad (2)$$

- 여기서, S_n : 케이블 정격용량 [VA]
- A_p : 0.411×10^6

$$B_p : 0.596 \times 106$$

$$C_p : 4.1$$

해저 케이블의 설치비용은 케이블 시공비용을 의미하며, 선박 임대료 등이 포함될 수 있고 계절과 설치 환경, 시공 기간에 따라 다를 수 있다. 설치되는 케이블의 km 길이에 비례하며 수식 (3)에 나타내었다[22].

$$C_{install} = 3[\text{억원}/\text{km}] \quad (3)$$

케이블의 초기투자비용은 해상풍력발전단지의 전력망을 구성하는 케이블의 길이에 따른 케이블 비용과 설치비용으로 구성되며, 이를 수식 (4)에 나타내었다.

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^{N_F} \sum_{j=1}^{m(i)} [(C_{AC}^{(i)}(j) + C_{install}) \times l_{in}^{(i)}(j)] + \sum_{i=1}^{N_{ex}} [(C_{AC}^{ex}(i) + C_{install}) \times l_{ex}(i)] \quad (4)$$

여기서, N_F : 내부망 케이블(피더) 회선 수

N_{ex} : 외부망 케이블 회선 수

$m(i)$: i 번째 피더를 구성하는 풍력터빈의 개수

$C_{AC}^{(i)}(j)$: i 번째 피더 j 번째 구간의 내부망 케이블 선종에 따른 케이블비용

$l_{in}^{(i)}(j)$: i 번째 피더의 j 번째 내부망 케이블 길이

$C_{AC}^{ex}(i)$: i 번째 외부망 케이블의 선종에 따른 케이블비용

$l_{ex}(i)$: i 번째 외부망 케이블 길이

3.2 전력손실 및 보수비용

해저 케이블의 전력손실비용은 풍력터빈에서 생산된 전력이 내·외부망 케이블을 통과하면서 발생하는 손실에 의한 비용을 의미한다. 연간 발생하는 비용이며, 이를 수식 (5)에 나타내었다 [18].

$$C_{loss} = C_E \times 8760 \times \left[\sum_{i=1}^{N_F} \sum_{j=1}^{m(i)} 3 \left(\frac{P_{avg,in}^{(i)}(j)}{\sqrt{3} V_M \times pf} \right)^2 \times R_{in}^{(i)}(j) \times l_{in}^{(i)}(j) + \sum_{i=1}^{N_{ex}} 3 \left(\frac{P_{avg,ex}^{(i)}}{\sqrt{3} V_H \times pf} \right)^2 \times R_{ex}^{(i)} \times l_{ex}^{(i)} \right] \quad (5)$$

여기서, C_E : 전력관매 단가

$P_{avg,in}^{(i)}(j)$: i 번째 피더 j 번째 구간의 내부망 케이블이 부담하는 평균 출력

$P_{avg,ex}^{(i)}$: i 번째 외부망 케이블이 부담하는 평균 출력

V_M : 내부 전력망 전압

V_H : 외부 전력망 전압

pf : 역률

$R_{in}^{(i)}(j)$: i 번째 피더 j 번째 구간의 내부망 케이블 저항 [Ω/km]

$R_{ex}^{(i)}$: i 번째 외부망 케이블 저항 [Ω/km]

보수비용은 내·외부망 케이블의 고장에 따른 보수비용을 연간비용으로 산출한 것이다. 이는 케이블의 고장률과 고장에 요구되는 수리비용을 이용하여 식 (6)과 같이 나타내었다[18].

$$C_{repair} = C_r \times 8760 \times \left[\sum_{i=1}^{N_F} \sum_{j=1}^{m(i)} \lambda_{MV} \times l_{in}^{(i)}(j) + \sum_{i=1}^{N_{ex}} \lambda_{HV} \times l_{ex}^{(i)} \right] \quad (6)$$

여기서, C_r : 케이블 1회 고장시 예상 수리비용 [억원/회]

λ_{MV} : 내부망 케이블의 단위 길이당 연간 고장률 [회/년 · km]

λ_{HV} : 외부망 케이블의 단위 길이당 연간 고장률 [회/년 · km]

3.3 신뢰도비용

신뢰도 비용이란 내·외부망 케이블의 고장으로 수리 또는 케이블 교체 기간 동안 전송하지 못한 공급지장 에너지 비용을 의미한다. 고장이 발생하면 케이블 용량에 해당하는 송전 가용량을 잃어버리게 되어 풍력터빈에서 전기를 생산하더라도 육상으로 전송하지 못하게 되어 손실비용이 발생한다. 이를 수식 (7)에 표현하였다[20].

$$C_{EENS} = C_E \times 8760 \times \left[\sum_{i=1}^{N_F} \sum_{j=1}^{m(i)} q_{in}^{(i)}(j) P_{avg,in}^{(i)}(j) + \sum_{i=1}^{N_{ex}} q_{ex}^{(i)} P_{avg,ex}^{(i)} \right] \quad (7)$$

여기서, $q_{in}^{(i)}(j)$: i 번째 피더 j 번째 구간의 내부망 케이블의 비가용 상태 확률

$q_{ex}^{(i)}$: i 번째 피더의 외부망 케이블의 비가용 상태 확률

케이블이 정상적인 상태(가용)와 고장 상태(비가용)로 구분할 수 있으며, 각 상태에 대한 확률은 수식 (8)과 같이 계산된다 [20].

$$p = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad p + q = 1 \quad (8)$$

여기서, p : 케이블이 가용한 상태의 확률

q : 케이블이 비가용한 상태의 확률

λ : 케이블의 고장률 [회/년]

μ : 케이블의 수리율 [회/년]

3.4 목적함수

전체 비용을 계산하는 목적함수는 초기투자비용과 연간 발생하는 전력손실 및 보수비용과 신뢰도 비용으로 구성된다. 특히

전력손실 및 보수비용과 신뢰도 비용은 해상풍력발전단지의 수명과 할인율을 적용하여 초기투자비용이 발생하는 현재 시점으로 환산하며, 전체 비용이 최소화되도록 이를 식 (9)에서 제시하였다. 단, 내부 전력망 구성에 있어서 내부망 케이블의 선종에 대한 제약과 외부망 케이블의 용량 제약, 그리고 해상변전소와 풍력터빈 간의 최소 이격에 대한 제약 조건을 각각 식 (10), (11), (12)에 나타내었다.

$$Cost_{obj} = \min \left[C_{inv} + \frac{(1+R)^L - 1}{R(1+R)^L} \times (C_{loss} + C_{repair} + C_{EENS}) \right] \quad (9)$$

Subject to :

$$S_{cable}^{(i)}(j) \geq \sum_{j=1}^{m(i)} S_{W/T}^{(i)}(j) \times pf \quad (10)$$

$$S_{TR} \leq \sum_{i=1}^{N_s} S_{cable}^{ex}(i) \quad (11)$$

$$l_{in}^{(i)}(m(i)) \geq L_{SS} \quad (12)$$

여기서, L : 해상풍력발전단지 수명 [년]

R : 할인율 [%]

$S_{cable}^{(i)}(j)$: i 번째 피더 j 번째 구간의 내부망 케이블 용량 [MVA]

$S_{W/T}^{(i)}(j)$: i 번째 피더의 j 번째 풍력터빈 용량 [MW]

pf : 역률

S_{TR} : 해상변전소 전체 용량 [MVA]

$S_{cable}^{ex}(i)$: i 번째 외부망 케이블 용량 [MVA]

$l_{in}^{(i)}(m(i))$: i 번째 피더의 $m(i)$ 번째 내부망 케이블 길이

L_{SS} : 해상변전소와 풍력터빈 간의 이격거리

4. 변전소 위치를 고려한 전력망 최적화 방안

기존 연구에서는 내부 전력망 최적화시 해상변전소의 위치를 고정시키거나 전력망 구성 뒤 해상변전소의 위치를 선정하는 방법을 채택해왔다[7-14, 18]. 그러나 이러한 방법은 단순히 풍력터빈들을 연결하는 케이블에 대한 비용을 최소화할 수 있지만 해상변전소의 위치에 따라 변동하는 케이블들까지 포함한다면 총 비용은 오히려 크게 나올 수 있다. 또한 향후 해상풍력발전단지의 규모가 커질수록 이러한 영향은 보다 더 커질 것이다. 본 절에서는 해상변전소의 위치를 고려한 해상풍력발전단지의 전력망 최적화 방안에 대해 서술하였다.

4.1 omTSP를 적용한 전력망 구성 방안

내부 전력망의 목적은 풍력발전터빈에서 생산된 전력을 해상변전소까지 안정적으로 전송하는 것이다. 내부망 케이블을 이용하여 모든 풍력터빈을 연결하고 최종적으로 해상변전소와 연결한다. 이는 판매원이 모든 도시를 최단거리로 이동하고 다시 돌아

오는 순회 판매원 문제(Travel Salesman Problem)와 매우 유사하기 때문에 순회 판매원 문제를 적용하였다[11, 23]. 그러나 순회 판매원 문제는 출발지점이 정해져있고, 출발했던 원래 지점으로 돌아온다는 점에서 내부 전력망 구성과 차이가 있다. 내부 전력망 구성은 오직 풍력터빈의 위치만 알고 있으며, 해상변전소의 위치는 앞서 제시한 목적함수비용을 최소화하도록 정해져야 하는 것이기 때문이다. 즉, 다수의 순회 판매원이 존재하고 방문 지점을 모두 거쳤다면 출발지점으로 돌아오지 않고 이동을 멈추는 개방된 다수 순회 판매원 문제(open-multiple Travel Salesman Problem, omTSP)를 적용하고자 한다.

이를 위해 풍력터빈과 내부망 케이블의 관계를 그래프 이론에 적용하여 표현하고자 한다. 교점을 V , 교점 사이를 연결하는 호를 E 로 설정하면, 그래프 $G=(V, E)$ 로 표현할 수 있다. 그래프 이론을 기반으로 풍력터빈을 교점 V 로, 풍력터빈을 연결하는 내부 전력망 케이블을 E 로 설정하여 N_F 개로 이뤄진 내부 전력망의 각 피더 구성을 $X_{F(i)}$ 로 정의하였으며, 이를 식 (13)과 (14)로 표현하였다.

$$X_{F(i)} = X_F(V_i, E_i) \quad (13)$$

$$X_F = X_{F(1)}, X_{F(2)}, \dots, X_{F(N_F)} \quad (14)$$

omTSP는 피더 개수만큼의 방문자가 이동하여 겹치지 않고 모든 풍력터빈을 오직 한 번씩만 방문하고 마치는 것으로서 이를 수식 (15)와 (16)에 나타내었다.

$$X_{F(i)} \cap X_{F(j)} = \emptyset \quad i, j = 1, 2, \dots, N_F \quad (15)$$

$$X_{F(i)} \cup X_{F(j)} = V \quad i, j = 1, 2, \dots, N_F \quad (16)$$

4.2 내부 전력망 구성 시 제약조건

풍력터빈 사이를 연결하는 내부 전력망을 구성함에 있어서 서로 다른 내부망 케이블 간에 교차가 발생하지 않도록 한다. 이는 케이블에서 고장이 발생하였을 때 유지보수를 어렵게 하는 요인이 되는 것으로서 초기 케이블 설치 시 반드시 지켜야하는 제약 조건 중 하나이다. 케이블 교차 조건을 나타내기 위해 풍력터빈의 좌표와 내부망 케이블을 집합을 이용하여 나타내었으며 이를 그림 2에 표현하였다. 식 (17)와 같이 i 번째 피더를 구성하는 1 개의 풍력터빈 집합을 W_i 라고 하고 i 번째 피더의 k 번째 풍력터빈의 좌표를 식 (18)과 같이 나타내었다.

$$W_i = \{w_i(1), w_i(2), \dots, w_i(k), \dots, w_i(l)\} \quad (17)$$

$$W_i(k) = \{w_i(k_x), w_i(k_y)\} \quad (18)$$

식 (17)의 $w_i(k_x)$ 과 $w_i(k_y)$ 은 각각 i 번째 피더의 k 번째 풍력터빈 x 축 좌표와 y 축 좌표를 의미한다.

또한 i 번째 피더의 풍력터빈 사이를 연결하는 내부망 케이블의 집합은 E_i 로 표현하였으며 식 (19)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i = \{e_i(1), e_i(2), \dots, e_i(k), \dots, e_i(l-1)\} \quad (19)$$

여기서 $e_i(l)$ 는 해상변전소와 각 피더의 말단 풍력터빈을 연결하는 해저 케이블을 의미하는 것으로서 특별히 i 번째 피더의 말단 케이블이라 정의한다.

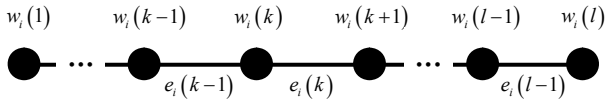


그림 2 i 번째 피더의 풍력터빈 및 내부망 케이블 구성도
 Fig. 2 Configuration of wind turbines and internal submarine cable in i^{th} feeder

내부 전력망을 구성하는 서로 다른 내부망 케이블의 교차 조건을 표현하기 위해서는 풍력터빈을 연결하는 내부망 케이블을 직선의 방정식으로 표현하여 교차 여부를 판단하여야 한다. i, j 번째 피더의 k, h 번째 마디를 형성하는 두 내부망 케이블 $e_i(k)$ 과 $e_j(h)$ 은 각각 식 (20)과 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$e_i(k) \rightarrow y = a_i x + b_i, w_i(x_k) \leq x \leq w_i(x_{k+1}) \quad (20)$$

$$e_j(h) \rightarrow y = a_j x + b_j, w_j(x_h) \leq x \leq w_j(x_{h+1}) \quad (21)$$

따라서 $e_i(k)$ 과 $e_j(h)$ 로 표현된 임의의 내부망 케이블 교차 조건은 식 (22)와 같이 표현할 수 있으며, 이를 그림 3에 나타내었다[24].

$$\max\{w_i(x_k), w_j(x_h)\} \leq \frac{b_j - b_i}{a_i - a_j} \leq \min\{w_i(x_{k+1}), w_j(x_{h+1})\} \quad (22)$$

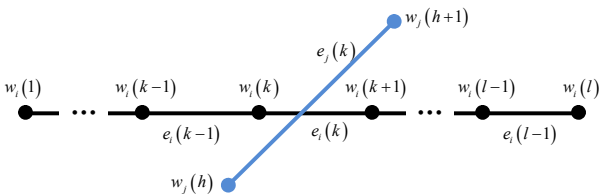


그림 3 교차된 내부망 케이블
 Fig. 3 Internal submarine cable segment intersection

4.3 GA을 이용한 전력망 최적화 방안

해상풍력발전단지의 전력망 최적화 문제는 각 구성요소 간의 케이블 연결 토폴로지를 결정하는 것이다. 그렇기 때문에 Non-linearity, Non-convexity 등의 여러 제약이 존재하며 문제가 매우 복잡하고 해의 공간이 매우 넓다. 이러한 최적화 문제를 해결하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 적용하였다[25].

스트링 형태로 표현되는 GA을 해상풍력발전단지를 위한 전력망 구성에 적용하기 위한 염색체 부호화가 필요하다. 그림 4는 유전자로 구성된 염색체를 표현한 것이다.

전력망 최적화 문제에서 염색체는 많은 해 중 단 하나의 해에

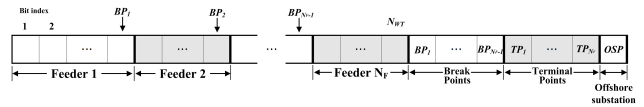


그림 4 유전자로 표현된 염색체 구성도
 Fig. 4 Internal submarine cable segment intersection

대한 정보를 의미하며 유전정보에 따라 풍력터빈 연결형태, 피더 구분점 및 터미널 포인트, 그리고 해상변전소 위치 정보까지 네 가지로 구분된다.

첫 번째 입력되는 유전정보는 풍력터빈 연결 형태이며 이는 각 풍력터빈의 케이블 연결 순서를 의미한다. 이에 대한 유전정보는 풍력터빈의 번호로 입력되고 그 유전자의 수는 풍력터빈의 수와 동일하다. 만약 풍력터빈의 수가 N_{WT} 이면 그림 4와 같이 이와 동일하게 N_{WT} 개의 유전자가 풍력터빈 번호로 입력된 내부 전력망을 구성한다. 두 번째 유전정보는 피더의 구분점(Break Points)을 의미한다. 만약 N_F 개의 피더를 갖는 내부 전력망을 구성하고자 하면 총 $(N_F - 1)$ 개의 피더 구분점이 필요하게 되며 이를 입력하기 위해 그림 4와 같이 $(N_F - 1)$ 개의 유전자($BP_1 \sim BP_{N_F - 1}$)가 생성된다. 여기에는 풍력터빈의 번호가 아닌 1부터 N_{WT} 까지의 유전자 번호 중 하나가 입력된다. 세 번째 유전정보는 터미널 포인트(Terminal Points)로서 각 피더별로 해상변전소와 연결되는 말단 풍력터빈을 의미한다. 피더 수만큼의 N_F 개

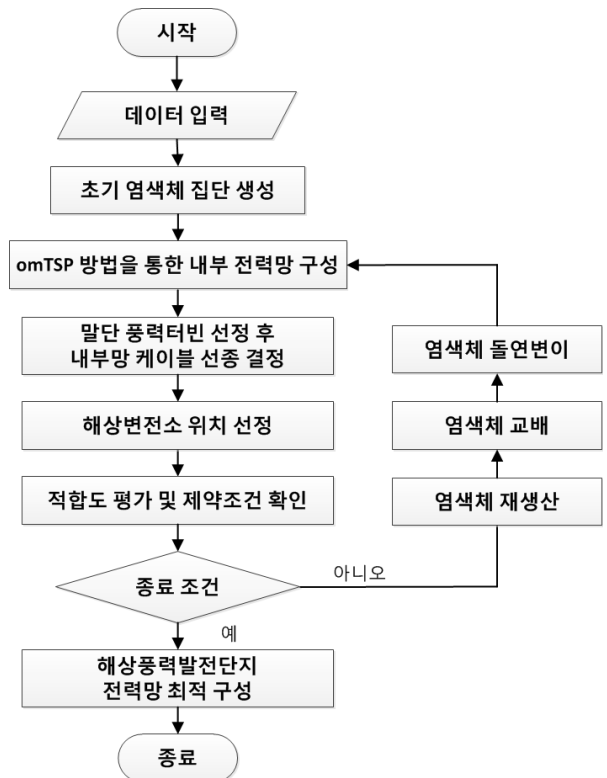


그림 5 GA을 이용한 전력망 최적화를 위한 순서도
 Fig. 5 Internal submarine cable segment intersection

유전자가 입력되며, 이 유전자는 풍력터빈 번호를 갖는다. 그리고 마지막 유전자에는 해상변전소의 위치 정보를 갖는 유전정보가 입력된다. 각 피더의 말단 풍력터빈과 육상 연계점의 위치 정보를 바탕으로 말단 풍력터빈과 해상변전소를 연결하는 내부망의 말단 케이블과 외부망 케이블의 비용이 최소가 되는 지점을 해상변전소의 위치 정보로 입력한다[18].

풍력터빈과 해상변전소의 위치에 관한 유전정보를 갖는 염색체를 바탕으로 GA를 이용하여 전력망 최적화 과정을 거친다. 이 과정을 그림 5와 같이 제시하였다. GA에서는 적합도 평가를 통해 집단 내에서 우수한 염색체(부모)를 선택하고, 그 중 두 개 개체의 유전 정보를 교환하여 새로운 자손 염색체를 형성한다. 본 논문에서는 풍력터빈을 나타내는 유전정보가 염색체 교배 과정에서 중복되지 않도록 이점 교배법을 적용하였다[25].

5. 사례 연구

앞서 제시한 해상풍력발전단지의 전력망과 해상변전소 위치의 최적화 방안을 모의 해상풍력발전단지에 적용하여 결과를 제시하였다.

5.1 사례 연구를 위한 해상풍력발전단지 모델

모의 해상풍력발전단지의 전력망과 해상변전소 위치의 최적화를 위한 파라미터를 표 1에 제시하였으며, 풍력터빈과 육상 연계점의 좌표는 [18]의 데이터를 참고하였다. 또한 내·외부망 케이블에 관한 파라미터는 표 2에 나타내었다.

표 1 모의 해상풍력발전단지 파라미터

Table 1 Parameters of the offshore wind power plant for case study

구분	데이터
풍력터빈 용량	5 [MW]
풍력터빈 수	20 기
Weibull shape parameter	1.87
Weibull scale parameter	7.82
내부 전력망 피더 수(N_F)	4
외부망 송전 케이블 회선수(N_{ex})	1
내부망 전압레벨(V_M)	33 [kV]
외부망 전압레벨(V_H)	154 [kV]
해상변전소와 풍력터빈 이격거리(L_{SS})	0.5 [km]
전력판매단가(C_E)	246 [원/kWh]
해상풍력발전단지 수명(L)	20 [년]
할인율(R)	7 [%]
역률(pf)	0.95

표 2 내·외부망 케이블 관련 파라미터

Table 2 Parameters of the internal and external submarine cables

구분	데이터				
전압 [kV]	33				154
단면적 [mm ²]	95	150	240	400	500
용량 [MVA]	17.15	21.43	27.44	33.72	174.71
AC 저항	0.247	0.159	0.098	0.0631	0.0508
고장률(λ_{in})	0.00743				0.00895
수리율(μ_{in})	45.625				17.38
수리비용(C_r)	28.07				

5.2 모의 해상풍력발전단지의 최적화 결과

제시된 모의 해상풍력발전단지에 대한 최적화를 위해 GA를 적용하였으며, 집단의 크기는 400, 종료조건은 반복 세대수 500으로 설정하였다. 모의 해상풍력발전단지의 시뮬레이션 수행 결과에 따른 전력망 구성은 그림 6과 같다. 전력망 구성과 유전자 정보를 갖는 염색체를 함께 표현하여 유전자 배열에 따른 내부 전력망 구성을 나타내었다.

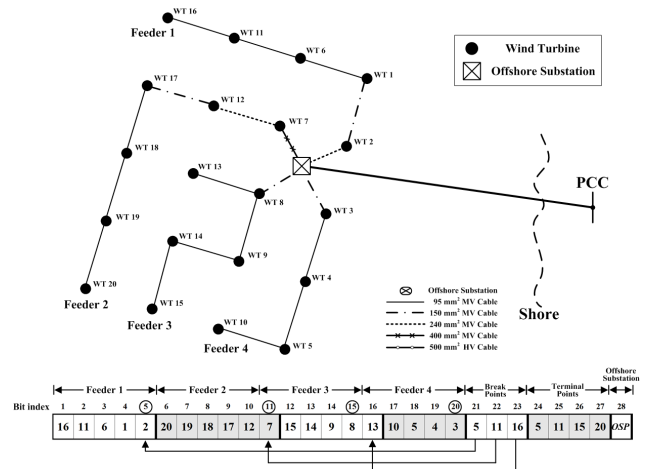


그림 6 GA를 이용한 전력망 최적화 결과

Fig. 6 Result of power grid optimization using GA

그림 6에 나타난 염색체의 유전정보 (16-11-6-1-2), (20-19-18-17-12-7), (15-14-9-8-13), (10-5-4-3)은 각각 1~4번 피더를 구성하는 풍력터빈의 번호를 의미한다. 그리고 Break Points 유전정보는 각 피더를 구분하기 위한 숫자이며, 풍력터빈의 번호가 아닌 Bit Index로 표현하였다. 또한 해상변전소와 직접 연결되는 말단 풍력터빈을 지칭하는 Terminal Points 유전정보 역시 Bit Index로 표현하였다. 마지막으로 해상변전소의 최적 위치 좌표 (3.40, 2.24)는 28번째 유전자 OSP에

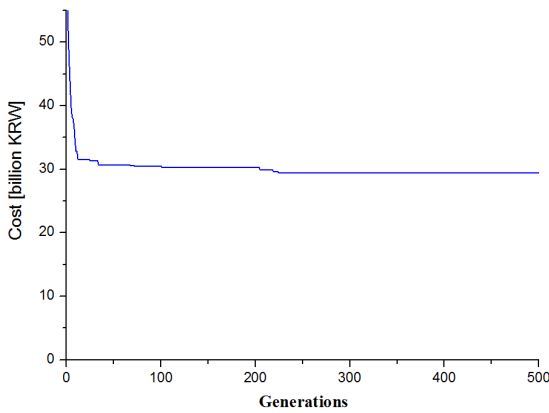


그림 7 세대수에 따른 목적함수 비용 변화 과정
Fig. 7 Variation of objective cost function according to generations

저장되었다. GA의 세대수 반복에 따른 전체 목적함수 비용 변화를 그림 7과 같이 나타냈으며, 최종 비용은 297.53억 원으로 수렴하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 GA을 이용하여 해상풍력발전단지의 전력망과 해상변전소의 위치에 대한 최적화 방안에 대해 제시하였다. 경제성 및 신뢰성을 고려하여 전력망 구성에 관한 초기투자비용과 전력손실 및 보수비용, 그리고 신뢰도 비용을 현재가치로 환산하여 목적함수 모델링을 수행하였다. 전력망 구성 방안으로는 해상변전소의 위치를 고려하기 위한 omTSP 방법을 적용하였고, 해저케이블의 현실적인 제약을 위해 내부망 케이블의 교차금지에 관한 제약조건을 함께 제시하였다.

제안한 방법의 사례 연구를 위해 5MW 풍력터빈 20기로 구성된 100MW 해상풍력발전단지를 모의 구성하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 이 연구결과는 전력망 구성 최적설계에 있어서 해상변전소의 설치 위치뿐만 아니라 실제 해저케이블의 교차 금지조건을 함께 고려했다는 점에서 큰 의미가 있다. 향후 다양한 내부 전력망 구성방안과 현실적인 제약을 고려한 연구가 계속적으로 수행될 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호: R14XA02-9)

References

[1] J. Feltes, R. Hendriks, S. Stapleton, R. Voelzke, B. Lam, and N. Pfuntner, "Twixt Land and Sea : Cost-Effective

Grid Integration of Offshore Wind Plants," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 10, No. 2, pp. 53-61, Mar. 2012.

[2] J. S. Gonzalez, A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, J. R. Santos, and M. B. Payan, "Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm," Renewable Energy, Vol. 35, No. 8, pp. 1671-1681, Aug. 2010.

[3] J. S. Gonzalez, M. B. Payan, J. M. R. Santos, and F. Gonzalez-Longatt, "A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, No. 2, pp. 133-144, Feb. 2014.

[4] Y. Wu, C. Lee, C. Chen, K. Hsu, and H. Tseng, "Optimization of the wind turbine layout and transmission system planning for a large-scale offshore wind farm by AI technology," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 50, No. 3, pp. 2071-2080, May/June 2014.

[5] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 2nd Edition, A John Wiley & Sons, Ltd., 2012.

[6] J. Yang, J. O'Reilly, and J. E. Fletcher, "redundancy analysis of offshore wind farm collection and transmission systems," in Proc. Internatioal Conference Sustainable Power Generation Supply, pp. 1-7, Arp. 2009.

[7] P. D. Hopewell, F. Castro-Sayas, and D. I. Bailey, "Optimizing the design of offshore wind farm collection networks," in Proc. of the 41st Int. Univ. Power Eng. conf., pp. 84-88, Sep. 2006.

[8] M. Zhao, Z. Chen, and F. Blaabjerg, "Optimisation of electrical system for offshore wind farms via genetic algorithm," IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 2, pp. 205-216, Jun. 2009.

[9] J. S. Conzalez, A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, M. B. Payan, and J. R. Santos, "Overall design optimization of wind farms," Renewable Energy, Vol. 36, No. 7, pp. 1973-1982, 2011.

[10] M. Banzo and A. Ramos, "Stochastic Optimization Model for Electric Power System Planning of Offshore Wind Farms," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 26, No. 3, pp. 1338-1348, Aug. 2011.

[11] F. M. Gonzalez-Longatt, P. Wall, P. Regulski, and V. Terzija, "Optimal electric network design for a large offshore wind farm based on a modified genetic algorithm approach," IEEE System Journal, Vol. 6, No. 1, Mar. 2012.

[12] S. Dutta and T. J. Overbye, "Optimal wind farm collector system topology design considering total trenching length." IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 339-348, July 2012.

[13] A. Tesauro, P.-E. Rechore, and G. C. Larsen, "State of

the art of wind farm optimization", in Proc. European Wind Energy Conference & Exhibition, Copenhagen, Denmark, 2012.

- [14] S. Lumbreras and A. Ramos, "Optimal design of the electrical layout of an offshore wind farm applying decomposition strategies," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp. 1434-1441, May 2013.
- [15] Y. Zang, A. A. Chowdhury, and D. O. Koval, "Probabilistic wind energy modeling in electric generation system reliability assessment," IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 47, No. 3, pp. 1507-1514, May/June 2011.
- [16] S. H. Jangamshetti, and V. G. Rau, "Site matching of wind turbine generators : a case study," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1537-1543, Dec. 1999.
- [17] M. Zhao, Z. Chen, and F. Blaabjerg, "Generation ratio availability assessment of electrical systems for offshore wind farms," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 3, pp. 755-763, Sept. 2007.
- [18] J. Won, W. Moon, J. Huh, and J. Kim, "A study on Siting of HVAC Offshore Substation for Wind Power Plant using Submarine Cable Cost Model," KIEE, Vol. 62, No. 4, pp. 451-456, 2013.
- [19] M. Lee, G. Kim, S. Jeong, D. Ko, and K. S. Kang, "Assessment of offshore wind energy at Younggwang in Korea," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 21, pp. 131-141, May 2013.
- [20] W. Moon, A. Jo, and J. Kim, "Economic evaluation of power grid interconnection between offshore wind power plants," KIEE, Vol. 63P, No. 4, pp. 339-344, 2014.
- [21] M. Nandigam and S. K. Dhali, "Optimal design of an offshore wind farm layout," in Proc. Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives Automation (SPEEDAM), pp. 1470-1474, 2008.
- [22] S. Lundberg, "Performance comparison of wind park configurations," Dept. Elect. Power Eng., Chalmers Univ. Technol., 2003, Tech. Rep. 30R.
- [23] L. Tang, J. Liu, A. Rong, and Z. Yang, "A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex," European Journal of Operational Research, Vol. 124, No. 2, pp. 267-282, July, 2000.
- [24] J. Pach and J. Solymosi, "Crossing patterns of segments," Journal of Combinatorial Theory, Series A 96, pp. 316-325, 2001.
- [25] W. Moon, J. Kim, A. Jo, and J. Won, "Gridn optimization for offshore wind farm layout and substation location," 2014 IEEE Conference and Expo ITEC Asia-Pacific, pp. 1-6, 2014.

저 자 소 개



문 원 식(Won-Sik Moon)

1982년 2월 15일생. 2009년 송실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사 수료.

Tel : 02-824-2416

Fax : 02-817-0780

E-mail : chriswsmoon@ssu.ac.kr



원 종 남(Jong-Nam Won)

1987년 2월 3일생. 2012년 2월 송실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원 MicroGrid 연구사업단

Tel : 042-865-5978

Fax : 042-865-5829

E-mail : jnwon@ssu.ac.kr



허 재 선(Jae-Sun Huh)

1985년 1월 23일생. 2009년 송실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사 수료.

Tel : 02-817-7966

Fax : 02-817-0780

E-mail : jasonh@ssu.ac.kr



조 아 라(Ara Jo)

1987년 5월 9일생. 2014년 송실대학교 공과대학 전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 02-824-2416

Fax : 02-817-0780

E-mail : arajo@ssu.ac.kr



김 재 철(Jae-Chul Kim)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 부총장, 전기공학부 교수

Tel : 02-817-0647

Fax : 02-817-0780