

## 해상풍력발전단지의 전력망 구성의 최적화에 관한 연구

문원식\*, 조아라\*, 김재철\*, 배인수\*\*, 윤기갑\*\*\*, 박상호\*\*\*, 최영도\*\*\*  
 송실대\*, 강원대\*\*, 한전 전력연구원\*\*\*

### Optimization of Grid Network for Offshore Wind Power Plant

Won-Sik Moon\*, Ara Jo\*, Jae-Chul Kim\*, In-Soo Bae\*\*, Gi-Gab Yoon\*\*\*, Sang-Ho Park\*\*\*, Young-Do Choy\*\*\*  
 Soongsil Univ.\*, Kangwon National Univ.\*\*, KEPCO Research Institute\*\*\*

**Abstract** - The costs of installation, loss, and energy not supplied energy for submarine cable of offshore wind power plant (OWPP) are very high because the level of technology is still in the early stage as well as because of the marine environments. Therefore, reducing the total costs of a grid network for OWPPs is very important for financial feasibility. In particular, it is needed to minimize the project cost for optimizing the grid design and offshore substation location of a OWPP. The suggested method can reduce the total system cost and make it lower compared with existing methods.

#### 1. 서 론

많은 비용이 소요되는 해상풍력발전단지는 모든 투자비용이 최소화 되도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 설치 위치에 따른 투자비용 변화가 적은 해상풍력터빈과 달리 해상변전소의 위치는 내부 전력망의 구성과 육상 연계점을 연결하는 외부망 케이블의 길이에 함께 영향을 미치게 된다. 따라서 내·외부 전력망을 구성하는 전체 비용이 최소화될 수 있도록 해상변전소의 적절한 위치 선정이 반드시 필요하다[1].

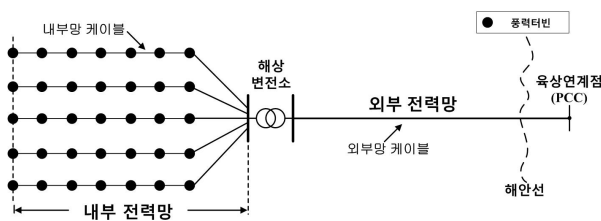
해상변전소와 육상 연계점을 연결하는 외부 전력망은 해저면의 특별한 이유가 없다면 직선에 가깝게 최단거리로 연결된다[2]. 그러나 내부 전력망을 구성하는 해저 케이블의 선로 공장은 해상변전소의 위치와 내부 전력망의 배치도에 따라 달라진다. 따라서 최적의 해상변전소 위치는 내부 전력망의 구성을 고려하여 모든 전력망 구성비용이 최소화되는 지점으로 선정하도록 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해상풍력발전단지의 구성 및 모델

###### 2.1.1 해상풍력발전단지의 전력망 구성

해상풍력발전단지의 전력망은 일반적으로 <그림 1>과 같이 풍력터빈과 내부 전력망, 해상변전소, 그리고 외부 전력망으로 구분된다[1]-[3].



<그림 1> 해상풍력발전단지의 전력망 구성도

내부 전력망은 풍력터빈과 해상변전소를 연결하는 전력망을 의미하며, 각 풍력터빈과 해상변전소를 연결하는 해저 케이블을 내부망 케이블( $l_{in}$ )로 정의한다.

해상변전소는 생산된 전력의 효율적인 전송을 위해 MV 레벨의 내부 전력망 전압을 HV 레벨의 외부 전력망 전압으로 승압하는 역할을 한다. 해상변전소의 위치에 따라 내부망 케이블 및 외부망 케이블( $l_{ex}$ ) 길이가 변동하며, 이는 전체 프로젝트 비용에도 직접적인 영향을 미치므로 최소 비용을 위한 해상변전소의 적절한 위치 선정이 중요하다.

외부 전력망은 해상변전소와 육상연계점을 연결하는 HV 레벨의 해저 케이블을 통해 전력을 육상으로 전송하는 역할을 한다.

내부 전력망은 풍력터빈과 각 풍력터빈을 연결하는 내부망 케이블로 구성되며, 내부망 케이블로 연결된 풍력터빈은 피더를 구성한다. 특히 해상변전소와 직접 연결된 풍력터빈을 말단 풍력터빈이라 한다. 또한 말

단 풍력터빈과 해상변전소를 연결하는 내부망 케이블을 말단 케이블이라 부른다. 내부 전력망에서 말단 풍력터빈과 말단 케이블을 별도로 지칭한 이유는 내부 전력망 구조를 결정하는 알고리즘과 해상변전소 위치를 결정하는 알고리즘을 구분하여 설명하기 위함이다.

##### 2.1.2 해상풍력발전단지의 출력 모델

풍력단지 지역의 풍속에 관한 확률분포 함수와 풍속에 대한 풍력터빈의 출력특성을 통해 발전 출력에 대한 전체 풍력발전단지의 확률밀도 함수를 도출한다. 발전단지의 출력에 대한 확률밀도함수는 발전단지의 평균 전력생산과 케이블의 고장에 따른 신뢰도 비용 산출에 응용된다.

해상풍력발전단지는 일정한 출력을 내지 않고 풍속에 따라 출력의 크기가 변동하게 된다. 즉, 해상풍력발전단지의 출력은 풍속에 의해 결정되며 결국 풍속의 분포에 따라 단지 전체 출력의 분포 또한 달라진다. 출력의 확률분포를 계산하기 위해서 풍속의 확률분포와 풍력터빈의 출력특성을 이용한다.

일반적으로 풍속에 대한 확률분포는 Weibull 분포 함수를 이용해 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다[4].

$$Prob(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad \text{for } v \geq 0, A \geq 0, k \geq 0 \quad (1)$$

다음으로 풍력터빈은 풍속의 범위에 따라 다른 출력특성을 갖게 되며 식 (2)와 같다[4].

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & : v < V_c \\ \frac{1}{2} \rho A_s C_p \rho_m \eta_g v^3 & : V_c \leq v < V_r \\ \frac{1}{2} \rho A_s C_p \rho_m \eta_g V_r^3 & : V_r \leq v < V_f \\ 0 & : v > V_f \end{cases} \quad (2)$$

이 때, 모든 풍력터빈에 대해 동일한 풍속이 적용된다고 가정하면 해상풍력발전단지의 전체 출력은 풍력터빈 1기의 출력에 풍력터빈의 대수를 곱하여 계산할 수 있다.

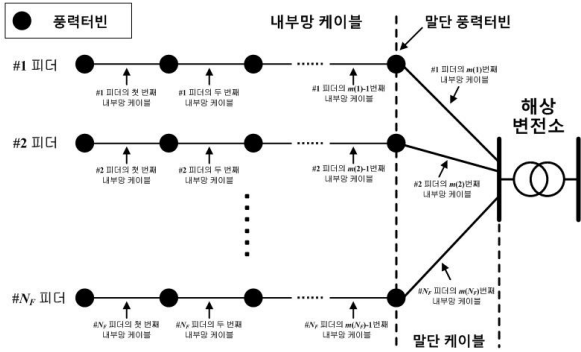
이산적으로 나타나는 확률은 각각 해상풍력발전단지의 출력이 0과 정격출력의 확률을 의미한다. cut-in 풍속 미만 혹은 cut-out 풍속 이상에서는 출력이 0이 되며 정격풍속과 cut-out 풍속 사이의 범위에서는 일정한 정격출력을 발생시키기 때문에 두 가지 경우에 대한 확률이 높음을 알 수 있다. 두 확률 사이에 존재하는 연속적인 확률은 cut-in 풍속과 정격풍속 사이에서 발생하는 해상풍력발전단지의 출력을 나타낸다. 이 범위에서는 풍력터빈의 출력특성에 따라 출력이 변화하게 된다. 이를 기반으로 풍력발전단지의 평균 출력은 식 (3)과 같이 구할 수 있다[4].

$$P_{avg} = \int_0^{P_{WT}} x \cdot f_p(x) dx \quad (3)$$

여기서,  $P_{avg}$  : 풍력발전단지 평균 출력 [MW]  
 $P_{WT}$  : 풍력발전단지 정격용량 [MW]  
 $x$  : 풍력터빈의 출력 [MW]  
 $f_p(x)$  : 출력  $x$ 의 확률([도 4]에서의 세로축)

##### 2.2 전력망 모델 목적함수

해상풍력발전단지의 전력망 구조를 고려한 최적의 해상변전소 위치를 얻기 위한 목적함수는 해저 케이블 설치비용, 전력손실비용, 그리고 공급지장비용으로 총 3가지 항목으로 구성되며, 식 (4)에 표현하였다. 식 (4)의 비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다.



<그림 2> 해상풍력발전단지 내부 전력망 상세 구성도

$$Cost_{obj} = \min \left[ C_{inv} + \frac{(1+R)^L - 1}{R(1+R)^L} \times (C_{loss} + C_{EENS}) \right] \quad (4)$$

여기서,  $L$  : 해상풍력발전단지 수명 [년]  
 $R$  : 할인율 [%]

### 2.2.1 해저 케이블 설치비용

해상풍력발전단지의 내·외부 전력망을 구성하는 해저케이블의 비용과 설치비용으로 구성되며 전체 케이블 선로의 길이에 비례한다. 이를 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{m(i)} [(C_{AC}^{(i)}(j) + C_{install}) \times l_{in}^{(i)}(j)] + \sum_{i=1}^{N_{ex}} [(C_{AC}^{ex(i)} + C_{install}) \times l_{ex}^{(i)}(i)] \quad (5)$$

여기서,  $N_f$  : 내부 전력망을 구성하는 내부망 케이블(피더) 회선 수  
 $N_{ex}$  : 외부 전력망을 구성하는 외부망 케이블 회선 수  
 $m(i)$  :  $i$ 번째 피더를 구성하는 풍력터빈의 개수  
 $C_{AC}^{(i)}(j)$  :  $i$ 번째 피더의  $j$ 번째 내부망 케이블의 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

### 2.2.2 손실비용

해저 케이블의 전력손실비용은 풍력터빈에서 생산된 전력이 내·외부망 케이블을 통과하면서 발생하는 손실에 의한 비용을 의미한다. 연간 발생하는 비용이며, 이를 수식 (6)에 나타내었다[2].

$$C_{loss} = C_E \times 8760 \times \left[ \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{m(i)} 3 \left( \frac{P_{avg,in}^{(i)}(j)}{\sqrt{3} V_M \times pf} \right)^2 \times R_{in}^{(i)}(j) \times l_{in}^{(i)}(j) + \sum_{i=1}^{N_{ex}} 3 \left( \frac{P_{avg,ex}^{(i)}}{\sqrt{3} V_H \times pf} \right)^2 \times R_{ex}^{(i)} \times l_{ex}^{(i)} \right] \quad (6)$$

여기서,  $C_E$  : 전력판매 단가  
 $P_{avg,in}^{(i)}(j)$  :  $i$ 번째 피더의  $j$ 번째 내부망 케이블이 부담하는 평균 출력 [MW]  
 $P_{avg,ex}^{(i)}$  :  $i$ 번째 외부망 케이블이 부담하는 평균 출력 [MW]  
 $V_M$  : 내부 전력망 전압 [kV]  
 $V_H$  : 외부 전력망 전압 [kV]  
 $pf$  : 역률  
 $R_{in}^{(i)}(j)$  :  $i$ 번째 피더의  $j$ 번째 내부망 케이블의 저항 [ $\Omega$ /km]  
 $R_{ex}^{(i)}$  :  $i$ 번째 외부망 케이블의 저항 [ $\Omega$ /km]

### 2.2.3 공급지장비용

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.

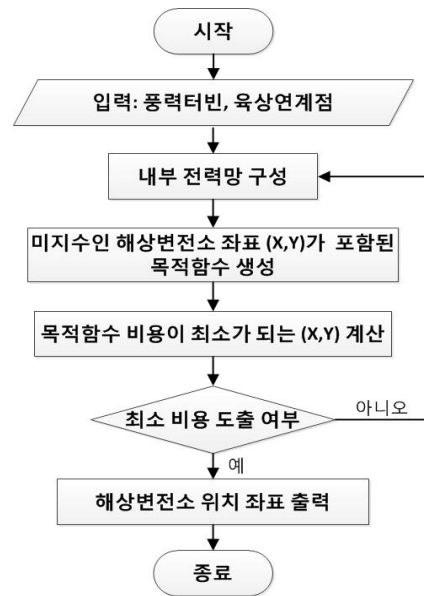
$$C_{EENS} = C_E \times 8760 \times \left[ \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{m(i)} q_n^{(i)}(j) P_{avg,in}^{(i)}(j) + \sum_{i=1}^{N_{ex}} q_{ex}^{(i)} P_{avg,ex}^{(i)} \right] \quad (7)$$

여기서,  $q_n^{(i)}(j)$  :  $i$ 번째 피더의  $j$ 번째 내부망 케이블 비가용 상태의 확률  
 $q_{ex}^{(i)}$  :  $i$ 번째 피더의 외부망 케이블 비가용 상태의 확률

## 2.3 해상풍력발전단지의 전력망 최적 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 돌아오는 순회 판매원 문제(Travel Salesman Problem)와 매우 유사하기 때문에 순회 판매원 문제를 적용하였다. 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 적용한다.

풍력터빈과 내부망 케이블 구성이 완료가 되었으면 목적함수를 만족하는 해상변전소의 최적 위치를 산출한다. 내부 전력망 구성과정을 포함한 해상변전소 위치 선정 과정은 다음의 <그림 3>과 같다.



<그림 3> 해상풍력발전단지 전력망과 해상변전소 최적 구성

## 3. 결 론

해상풍력발전단지의 전력망 설계 시 경제성과 해상변전소의 위치를 고려한다. 해상풍력발전단지 건설은 육상의 풍력발전단지에 비해 매우 높은 투자비를 갖는 특성이 있다. 따라서 경제성을 높일 수 있도록 투자 관련 비용을 최소화하여 설계하는 것이 매우 중요하다. 내부 전력망 구성은 내부망 케이블의 길이에 크게 영향을 미치지 때문에 해상변전소의 최적 위치는 외부망 케이블의 길이 및 내부 전력망 구성을 함께 고려하여 선정한다.

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

### [참 고 문 헌]

- [1] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 2nd Edition, A John Wiley & Sons, Ltd., 2012
- [2] 원종남, 문원식, 허재선, 김재철, “해저케이블 비용 모델을 이용한 HVAC 해상변전소 적정 위치 선정에 관한 연구”, 전기학회논문지, 62권, 4호, pp. 451-456, 2013
- [3] 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 Systems Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 164-172, Mar. 2012
- [4] W.-S. Moon, J.-C. Kim, and J.-N. Won, “Transformer capacity evaluation of offshore wind farm substation applied to Korean site,” 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1-5, Apr. 2014