

해상풍력단지의 내부 계통망 구성을 위한 신뢰도 평가에 관한 연구

(A Study on Reliability Evaluation for Constructing Inner Grid of Offshore Wind Farm)

배인수* · 신제석 · 김진오**

(In-Su Bae · Je-Seok Shin · Jin-O Kim)

Abstract

In recent years, Offshore Wind Farm (OWF) is being actively developed. Typically, OWF has a better wind resource than onshore one, but also have a very high investment cost and maintenance cost. Furthermore, due to a difficulty of geographical access, OWF can be affected by the failure for a longer time. As the result, OWF has a higher loss cost. Therefore, a reliability evaluation should be performed more carefully at OWF planning stage. In this paper, a methodology for the reliability evaluation on inner grid is suggested. Inner grid connects wind turbines via submarine cables and transfers power to offshore substation. According to location of the faulted cable under layouts of inner grid, the transfer ability of inner grid is influenced. In order to indicate the transfer ability of inner grid, several indices are introduced such as PNDR, EEND and EENDC. To demonstrate the methodology described in this paper, diversity case studies were performed.

Key Words : Offshore Wind Farm, Reliability Evaluation, Inner Grid, Power Not Delivered Ratio(PNDR), Expected Energy Not Delivered(EEND), Expected Energy Not Delivered Cost(EENDC)

1. 서 론

신재생 에너지의 이용이 증가하고 있는 가운데, 발전단가가 기존의 화력발전기 수준에 도달함을 의미하

는 Grid Parity를 달성한 풍력발전이 더욱 활발하게 이용되고 있다[1]. 초기의 풍력발전은 소규모 형태의 분산전원으로 이용되어 왔으나, 근래에는 대규모 풍력단지 형태로 이용되고 있다. 최근에는 대규모화에 용이한 이점으로 인하여, 풍력발전의 이용이 육지에서 해상으로 옮겨가고 있는 추세이다.

해상풍력단지는 육지보다 좋은 풍력자원을 얻을 수 있고, 대규모화에 용이한 이점이 있으나 해상이라는 지형적 특징으로 인하여 접근이 용이치 않는 문제점을 가진다. 이로 인하여 매우 높은 초기 건설비용 및 유지보수 비용이 소요되며, 고장이 발생하는 경우 그 영향이 오랜 기간 지속되는 단점이 있다[2-3]. 따라서

* 주저자 : 강원대학교 전기공학과 조교수
** 교신저자 : 한양대학교 전기생체공학부 교수
* Main author : Professor, Department of Electrical Eng. Kangwon National University
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Eng, Hanyang University
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2220-9912
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2013년 9월 25일
1차심사 : 2013년 9월 28일
심사완료 : 2013년 10월 14일

해상풍력단지를 구성함에 있어 경제성뿐만 아니라 고장의 영향을 평가하는 공급신뢰도를 함께 고려하여야 한다. 기존 연구에서는 투자비용 및 전력손실 비용 등의 합을 경제적 고려요소로 고장으로 인한 비가용 에너지에 대한 비용을 신뢰도적 고려요소로 반영하고 있다[3-5]. 이러한 연구들에서는 두 비용요소의 합을 최소화하도록 목적함수를 구성하고 있다.

일반적으로 대규모 해상풍력단지는 그림 1과 같이 풍력터빈, 내부 계통망, 해상변전소, 외부 계통망으로 구분된다[4-5, 7]. 이 중에서 내부 계통망은 해저케이블을 통해 풍력터빈간의 연결 또는 해상변전소로 연계시키는 하위 시스템으로써, 풍력터빈에서 생산된 전력을 변전소로 전달하는 역할을 수행한다[6]. 내부 계통망 내에서 케이블 고장이 발생하는 경우, 이러한 전력전달 능력이 제한된다. 그런데 이와 관련된 기존의 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 다양한 내부 계통망의 구성에 대하여 공급신뢰도를 평가하는 방법을 제안한다[7].

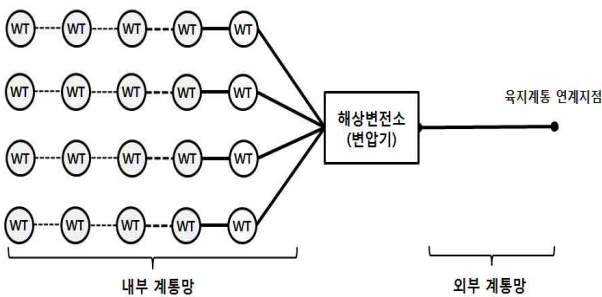


그림 1. 해상풍력단지의 기본 구조
Fig. 1. Typical Structure of Offshore Wind Farm

2. 내부 계통망 구성을 위한 고려요소

일반적으로 해상풍력단지는 높은 이용률을 위하여 풍력터빈의 위치를 우선적으로 선정하고, 풍력터빈의 출력에 영향을 미치지 않으면서, 내/외부 계통망 사이의 위치에 따른 비용을 고려하여 해상변전소의 위치를 선정한다[5, 8]. 그런 후에 내부 계통망을 구성하게 되며, 이 때 다음의 요소들이 고려된다[3, 10].

- 내부 계통망의 기준전압

- 케이블 선종 별 정격용량
- 피더의 개수
- 내부 계통망의 레이아웃

: Radial 구조, Star 구조, Ring 구조 등

일반적으로 기준전압 및 케이블의 정격용량이 높을수록 적은 수의 피더를 가지는 내부 계통망을 구성할 수 있다. 피더의 개수가 감소되면, 내부 계통망 내의 케이블의 전체 길이가 감소되고, 이는 내부 계통망의 건설비용의 감소로 나타날 수 있다. 반면에 해상변전소와 가까운 지점에서 케이블 고장이 발생하는 경우, 보다 많은 수의 풍력터빈들로부터의 전력이 차단됨으로써, 해상변전소로 전달되지 못하는 전력이 크게 증가하게 된다. 또한 내부 계통망의 전력전달 능력은 피더의 개수뿐만 아니라 내부 계통망의 레이아웃에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 내부 계통망 구성을 위한 평가는 피더의 개수 및 레이아웃에 대하여 경제성과 함께 공급신뢰도 평가를 통해서 수행되어야 한다.

3. 내부 계통망 신뢰도 평가방법

내부 계통망 내의 해저케이블은 동작 상태에 따라, 다음의 그림과 같이 2-상태모델로 정의된다[12-13].

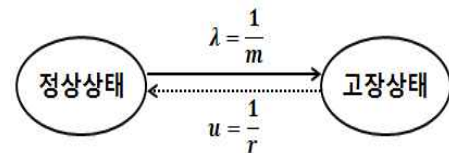


그림 2. 2-상태 모델
Fig. 2. 2-State Model

정상상태와 고장상태간의 이동을 나타내는 고장률(λ) 및 수리율은, 각각 정상상태에서의 평균 동작시간의 역수, 평균 수리시간(r)의 역수로 정의된다. 각 케이블 선로에 대한 가용률(A) 및 비가용률(U)은 다음의 식 (1)에 의해서 계산된다.

$$A_i = \frac{1/\lambda_i}{1/\lambda_i + r}, \quad U_i = 1 - A_i, \quad \lambda_i = \lambda \times L_i \quad (1)$$

여기서 λ 는 케이블의 단위 길이당 고장률, L_l 은 l 번 케이블 구간의 길이를 나타낸다.

3.1 풍력터빈의 기대출력

일반적인 풍력터빈의 출력특성은 다음의 그림 3과 같으며, 본 논문에서는 식 (2)를 통하여 풍력터빈의 출력을 산정하였다[9].

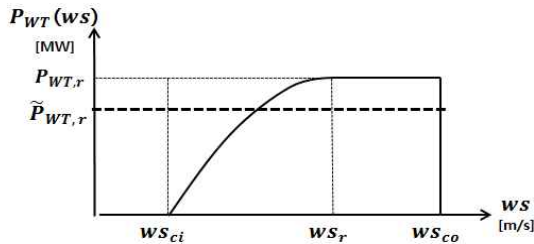


그림 3. 일반적인 풍력터빈의 출력특성 곡선
Fig. 3. Typical Output Characteristic Curve of WT

$$P_{WT}(ws) = \begin{cases} 0 & : 0 \leq ws < ws_{ci}, \\ a + b \times ws + c \times ws^2 & : ws_{ci} \leq ws < ws_r, \\ P_{WT,r} & : ws_r \leq ws < ws_{co} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 ws_{ci}, ws_{co}, ws_r 은 각각 Cut-In, Cut-Out, 정격 풍속을, a, b, c 는 풍력터빈의 출력특성 계수를, $P_{WT,r}$ 은 풍력터빈의 정격출력을 의미한다.

풍력터빈의 기대 출력($E_{P_{WT}}$) 및 전체 풍력단지 연간 기대 전력생산량($E_{E_{OWF}}$)은 다음의 식 (3)과 (4)를 통해서 각각 산정된다.

$$E_{P_{WT}} = \sum_{\forall ws} P_{WT}(ws) \times Pr(ws) \quad (3)$$

$$E_{E_{OWF}} = E_{P_{WT}} \times N_{WT} \times 8760 \quad (4)$$

여기서 $Pr(ws)$ 는 풍속 ws 의 확률을, N_{WT} 는 풍력단지 내 풍력터빈의 전체 개수를 의미한다.

3.2 내부 계통망 신뢰도 평가지수

본 논문에서는 내부 계통망의 전력전달 능력을 나타

내기 위하여 다음의 지수들을 정의하였다.

전달지장 전력비율(PNDR)은 정상상태 시의 풍력단지의 출력에 대한, 케이블 고장상태(l_f)에 따라 전달하지 못하는 전력(PND)의 비를 의미한다. 이는 다음의 식 (5)로 표현된다[7].

$$PNDR(l_f) = \frac{PND(l_f)}{E_{P_{WT}} \times N_{WT}} \quad (5)$$

전달지장 에너지(EEND) 그리고 이에 대한 손실비용인 전달지장 비용(EENDC)은 각각 식 (6), (7)로 나타내었다.

$$EEND = E_{E_{OWF}} \times \sum_{\forall l_f} (PNDR(l_f) \times Pr(l_f)) \quad (6)$$

$$EENDC = EEND \times cec \quad (7)$$

여기서 $Pr(l_f)$ 는 케이블 고장상태(l_f)의 확률을, cec 는 풍력발전의 전력 판매단가를 나타낸다.

3.3 내부 계통망의 PNDR 산정

본 절에서는 내부 계통망의 레이아웃에 따라 케이블 구간을 정의하고, PNDR을 산정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 본 논문에서는 내부 계통망 내의 모든 풍력터빈을 동일하게 구성하였으며, 케이블에 대하여 단일고장만을 고려하였다. 따라서 고장상태(l_f)는 고장이 발생한 케이블 구간번호를 나타낸다.

3.3.1 Radial 및 Star 구조의 레이아웃

Radial 및 Star 구조로 구성된 내부 계통망의 각 케이블 구간은 다음의 그림 4와 같이 모델링된다.

여기에서 케이블 구간번호(l), l 번 케이블 구간에 연결된 풍력터빈의 누적 개수($n_{wt}(l)$), 피더 번호(fd), 고리번호(R , Ring 구조가 아닌 경우에 0으로 정의됨.)등이 정의된다. 예를 들어 그림 4에서 (3,4,1,0)의 케이블 구간에 고장이 발생하는 경우, 4기의 풍력터빈이 내부 계통망으로부터 분리된다. 분리된 풍력터빈들의 출력만큼 PND가 발생하게 되고, 이 경우의

해상풍력단지의 내부 계통망 구성을 위한 신뢰도 평가에 관한 연구

PNDR은 4/9가 된다. 다음의 식 (8)과 식 (9)는 케이블 고장상태(l_f)별 PNDR 및 그 확률을 산정하기 위한 수식이다.

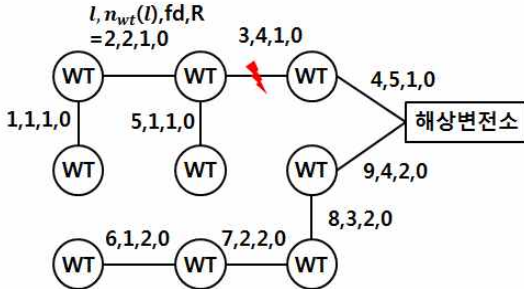


그림 4. 내부 계통망(IG) 내 케이블 구간 정의
Fig. 4. Identification of Cable Sections in IG

$$PNDR(l_f) = \frac{n_{wt}(l_f)}{N_{WT}} \quad (8)$$

$$\Pr(l_f) = U_{l_f} \times \prod_{\substack{\forall l \\ l \neq l_f}} A_l, \quad \Pr(l_0) = 1 - \sum_{f=1}^{N_{WT}} \Pr(l_f) \quad (9)$$

여기서 l_0 은 케이블 고장이 발생하지 않은 상태를 의미한다.

3.2.2 Ring 구조

Ring 구조는 다음의 가정 하에 정의된다.

- 기본적인 Radial 구조에서 두 개 이상의 피더의 말단을 예비 케이블로 연결하여 구성되며, 피더 내의 모든 구간은 동일한 선종의 케이블로 구성된다.
- 정상상태에서 예비 케이블은 Open 상태를 유지하다가, Ring구조를 이루는 피더 내에서 케이블 고장이 발생하면 Close 상태가 된다. 본 논문에서는 예비 케이블에 대한 고장은 고려하지 않는다.

위의 그림 5는 Ring 구조로 구성된 내부 계통망을 나타내며, 점선으로 표시된 구간은 예비 케이블을 의미한다. 여기에서 (2,2,1,1)의 케이블 구간에 고장이 발생하면, 다음 2가지 경우가 발생할 수 있다[11].

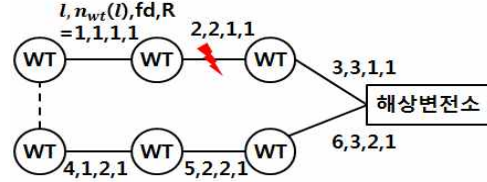


그림 5. Ring 구조의 내부 계통망
Fig. 5. Inner Grid of Ring Layout

• 경우1

: 피더의 정격용량이 고장으로 인해 제외되는 2기 ($n_{wt}(l_f = 2) = 2$)의 풍력터빈의 출력을 충분히 수용할 수 있다면, 해당하는 Ring에서 PND는 발생하지 않는다. 케이블 고장이 발생한 임의의 Ring(R_f)에 대하여, 경우 1을 나타내는 일반식은 다음의 식 (10)으로 표현된다.

$$P_{WT,r} \times \left\{ \sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} (n_{wt}(fd)) + n_{wt}(l_f) \right\} \leq \sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} Cap_{fd} \quad (10)$$

여기서 fd_f 는 케이블 고장을 포함한 피더를, Cap_{fd} 는 피더의 정격용량을 의미한다.

• 경우2

: 경우 1과 반대의 경우 (고장 발생 후) 2번 피더를 통해 흐르는 풍력터빈들은, 최대 출력의 합이 피더의 용량을 넘지 않도록 그 출력을 제한하여야 한다. 이때, 풍력터빈의 제한된 출력은 그림 3에서 점선으로 나타내었으며, 제한된 정격출력($\tilde{P}_{WT,r}$)을 초과하는 만큼의 PND가 발생한다. 경우 2에 대한 일반식은 다음의 식 (11)로 나타내었다.

$$P_{WT,r} \times \left\{ \sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} (n_{wt}(fd)) + n_{wt}(l_f) \right\} > \sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} Cap_{fd} \quad (11)$$

또한 풍력터빈의 제한된 정격출력은 다음과 같다.

$$\tilde{P}_{WT,r}(l_f) = \frac{\sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} Cap_{fd}}{\sum_{\substack{\forall fd \in R_f \\ fd \neq fd_f}} (n_{wt}(fd)) + n_{wt}(l_f)} \quad \text{if) 경우2} \quad (12)$$

Ring구조의 내부 계통망의 PNDR은 다음의 식 (13)에 의해서 산정된다.

$$PNDR(l_f) = \begin{cases} \text{if 경우1,} & 0 \\ \text{if 경우2,} & \frac{\{E_{P_{WT}} - \widehat{E}_{P_{WT}}(l_f)\} \times \left\{ \sum_{\substack{\forall fd \in R_{l_f} \\ fd \neq fl_f}} (n_{wt}(fd)) + n_{wt}(l_f) \right\}}{E_{P_{WT}} \times N_{WT}} \end{cases} \quad (13)$$

여기서 $\widehat{E}_{P_{WT}}(l_f)$ 는 l_f 에 따라, 제한된 출력특성이 반영된 풍력터빈의 기대출력을 의미한다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 5 MW용량의 풍력터빈 20기로 구성된 100 MW 규모의 해상풍력단지에 대하여 사례연구를 수행하였다. 서남해안에서 취득한 풍속데이터를 근거로, 풍력터빈의 기대출력 및 연간 기대 전력생산량을 각각 1.50 MW, 262,263.9 MWh로 산정하였다.

사례연구를 위해 고려한 내부 계통망의 구성안들은 다음과 같다.

- Case1, Case2, Case3 : 각각 5, 4, 3개 피더로 구성된 전형적인 Radial 구조
 - Case2-2 : 4개 피더 & Ring 구조
 - Case3-2 : 3개 피더 & Radial + Star 혼합구조
- 다음의 그림은 Case2의 내부 계통망을 나타낸 것이다. Case2-2는 Case2에서 각 피더의 끝단을 예비 케이블로 연결함으로써 두 개의 Ring으로 구성된다.

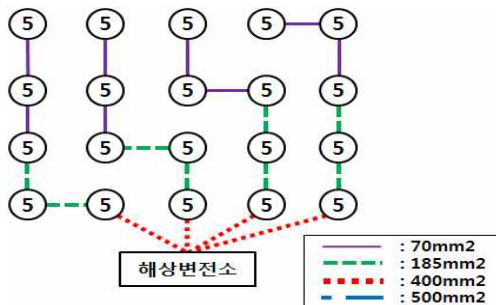


그림 6. Case2 : 4 피더 내부 계통망
Fig. 6. Case2 : Inner Grid of 4-Feeders

Case3 및 Case3-2의 그림은 다음과 같다.

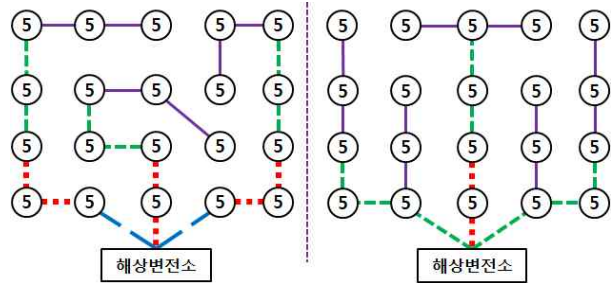


그림 7. Case3 & 3-2 : 3피더 내부 계통망
Fig. 7. Case3 & 3-2 : IGs of 3-Feeders

다음의 표 1에는 내부 계통망을 구성하기 위해 사용된 케이블에 대한 데이터들을 나타내었다.

표 1. 케이블의 기본 데이터
Table 1. Data for Inner Grid Cable

규격 mm ²	70	185	400	500
기준전압 kV	33			
정격용량 MW	13.1	21.7	31.5	35.6
건설비용 억원/km	12.01	13.96	15.75	17.30
고장률 f/yr	0.012			
수리시간 yr	0.1671			
가용률	0.998			
비가용률	0.002			

다음의 표 2는 Case2와 Case2-2에서 모든 l_f 에 대하여 PNDR을 산정한 결과를 나타낸 것이다.

표 2의 결과에서 Ring 구조의 Case2-2 경우, 모든 l_f 에 대해서 PNDR이 크게 낮아진 것을 볼 수 있다. 이는 케이블 고장으로 인해 차단되는 풍력터빈들의 전력의 전체 또는 일부가 예비 케이블을 통해 우회하여 전달됨으로써, 케이블 고장의 영향을 감소시켰기 때문이다.

다음의 표 3은 모든 Case들에 대한 종합적인 결과를 나타낸 것이다. 전체비용은 총 건설비용과 20년 동안의 기대수명에 대하여 EENDC를 현재가치화한 비용을 합하여 산정하였다. 여기서 할인율은 7%로 적용하였다.

표 2. PNDR 산정결과 : Case2, Case2-2
Table 2. PNDR Results of Case2, Case2-2

l_f	Case2	Case2-2		$Pr(l_f)$
	$PNDR(l_f)$	$PNDR(l_f)$	$\tilde{P}_{WT,r}(l_f)$	
0	0.00	0.0000	5	0.961500
1	0.05	0.0000	5	0.001925
2	0.10	0.0015	4.5	0.001925
3	0.15	0.0051	3.94	0.001925
4	0.20	0.0098	3.5	0.001925
5	0.25	0.0178	3.15	0.001925
6	0.05	0.0000	5	0.001925
7	0.10	0.0015	4.5	0.001925
8	0.15	0.0051	3.94	0.001925
9	0.20	0.0098	3.5	0.001925
10	0.25	0.0178	3.15	0.001925
11	0.05	0.0000	5	0.001925
12	0.10	0.0015	4.5	0.001925
13	0.15	0.0051	3.94	0.001925
14	0.20	0.0098	3.5	0.001925
15	0.25	0.0178	3.15	0.001925
16	0.05	0.0000	5	0.001925
17	0.10	0.0015	4.5	0.001925
18	0.15	0.0051	3.94	0.001925
19	0.20	0.0098	3.5	0.001925
20	0.25	0.0178	3.15	0.001925

표 3. 모든 Case에 대한 종합적인 결과
Table 3. Comprehensive Results for all Cases

Case	1	2	2-2	3	3-2
건설비용 억원	307.6	304.7	379.0	305.4	286.1
EPNDR %	0.48	0.58	0.03	0.74	0.58
EEND MWh	1,262.4	1,514.9	69.0	1,944.1	1,514.8
EENDC 억원	3.1	3.7	0.17	4.8	3.7
전체비용 억원	340.5	344.2	380.8	356.1	325.6

Case1, 2, 3의 결과를 비교하면 신뢰도 측면에서는 피더의 수가 감소함에 따라 EENDC가 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 경제성 측면에서는 전체 케이블 길이가 감소함에 따라 건설비용이 감소하는 경우 (Case2)와 피더 당 용량의 증가로 인하여 높은 용량의 케이블을 사용함에 따라 건설비용이 증가하는 경우 (Case3)가 나타났다.

Case2-2의 경우 Ring 구조를 통한 신뢰도의 개선정도가 건설비용의 증가분을 상쇄시키지 못함에 따라 전체 비용이 가장 높은 구성안으로 나타났다. 반면에 Case3-2의 경우는 작은 용량의 케이블 사용 및 케이블 고장 발생 시 전달지장 전력의 감소로 인하여 전체 비용이 가장 낮은 구성안으로 나타났으며, 이에 본 모의 풍력단지에 가장 적합한 내부 계통망 구성안으로 선정될 수 있었다.

5. 결 론

수십, 수백기의 풍력터빈으로 이루어진 대규모 풍력 단지의 내부 계통망은 다양하게 구성될 수 있다. 본 논문에서는 내부 계통망의 다양한 구성에 대하여 공급신뢰도를 산정하는 방법을 제안하였다. 내부 계통망의 공급신뢰도는 케이블 고장으로 인하여, 변전소로 전달되지 못하는 전력 및 그에 대한 비용으로 평가하였으며, 이를 위해, 신뢰도 평가지수들을 정의하였다.

MATLAB을 이용하여 수행된 사례연구를 통하여 내부 계통망의 구성은, 다양한 구성안에 대한 경제적인 평가요소 및 신뢰도 평가결과를 반영하여 선정될 수 있음을 보였다. 차후 해상변전소와 외부 계통망을 포함한 풍력단지 전체를 대상으로, 다중고장을 고려한 신뢰도 평가방법을 위한 연구를 수행할 것이며, 이는 해상풍력단지 전체를 구성하기는 데에 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 2011T100200064)

References

- [1] Seong-Ju Moon, Sung-Kuk Yang, "A Study on Economic Analysis of Wind Power Project", KIEA, Vol. 24, No. 6, December. 2011.
- [2] Leon Freris, David Infield, "Renewable Energy in Power System, 1st ed", New York: Wiley, 2008.
- [3] Predrag Djapic, Goran Strbac, "Cost Benefit Methodology for optimal Design of offshore Transmission system", Centre for Sustainable Electricity and Distributed Generation, 2008.
- [4] M. Banzo and A. Ramos, "Stochastic Optimization Model for Electric Power System Planning of Offshore Wind Farms", IEEE Trans. Power System, Vol. 26, No. 3, pp. 1338-1348, Aug. 2011.
- [5] P.D. Hopewell, F. Castro-Sayas, and D.I. Bailey, "Optimising the Design of Offshore Wind Farm Collection Networks", Universities Power Engineering Conference (UPEC), Vol. 1, pp. 84-88, Sep. 2006.
- [6] Lundberg, S, "Evaluation of wind farm layouts", EPE journal, vol. 16, No. 1, 2006.
- [7] Je-Seok Shin, Jin-O Kim, "Reliability Evaluation considering Wind Farm Configuration", KIEE Summer Conference, Jeong-seon, July. 2012, page(s): 146-147.
- [8] Jong-Nam Won, Jae-Chul 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, April, 2013.
- [9] T. Ackermann. "Wind Power in Power Systems" 1st ed. New York: Wiley, 2005.
- [10] Thomas Haugsten Hansen, "Offshore Wind Farm Layouts", Institut for elkraft teknikk, July 2009.
- [11] Xu Liu, Syed Islam, "Reliability Issues of Offshore Wind Farm Topology", PMAPS, pp.1-5, May 2008.
- [12] Roy Billinton, Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems 2nd ed", New York: Plenum Press,c, 1996.
- [13] Roy Billinton, Ronald N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems 2nd ed", New York: Plenum Press,c, 1996.

◆ 저자소개 ◆



배인수 (裴引洙)

2007년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 강원대 전기공학과 조교수.

Tel : (033)570-6347

E-mail : isbae@kangwon.ac.kr



신제석 (申濟石)

2010년 한양대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

Tel : (02)2220-0347

E-mail : kjboy@hanyang.ac.kr



김진오 (金鎭吾)

1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.

Tel : (02)2290-0347

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr