

# 국내 해상풍력발전단지 낙뢰피해 영향 분석에 관한 연구

## A Study on the Analysis of Lightning Damage Impact in Domestic Offshore Wind Farm

서진규\* · 김규호\*  
(Jin-Gyu Seo · Kyu-Ho Kim)

**Abstract** - The latest offshore wind turbines are easily exposed to lightning strikes because they are designed with longer blades and taller height to satisfy the growing capacity demands. The generation facilities and elements of the offshore wind farm are more vulnerable to lightning damage because of more severe, unpredictable weather conditions. Therefore, this paper presents the analysis of measure for lightning overvoltage mitigation in offshore wind farm planned in South Korea southwest seashore. The sensitivity analysis includes the steady state and transient state characteristics of offshore wind farm and proposes the countermeasure for mitigation of transient overvoltage by considering earth resistivity of the offshore environment.

**Key Words** : Lightning strikes, Offshore wind farm, Steady state, Transient state, Countermeasure, Earth resistivity

### 1. 서론

최근 자원의 고갈, 환경오염 및 지구온난화 문제 등으로 신재생에너지 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중 풍력에너지는 무한한 자원과 저렴한 발전단가 및 기술개발을 통한 대용량화가 가능하다는 점에서 주목을 받고 있다[1]. 그러나 육상풍력발전은 개발할 수 있는 부지가 제한되어 있으며 소음 및 경관문제 등으로 인해 설치에 제약이 따른다. 해상풍력발전의 경우 육상풍력발전에 비해 대용량 터빈 설치가 가능하고 단지규모 확장성이 높으며, 연관 산업에 대한 파급효과가 커서 경제 활성화 수단으로 유력하다. 그러나 해상의 예측 불가능한 기후적인 요인과 점점 대용량화 되는 해상풍력터빈으로 인해 육상풍력발전에 비해 해상풍력발전이 낙뢰에 노출될 가능성이 상당히 높다. 낙뢰는 풍력발전 전자기기 고장, 블레이드 손상을 초래할 수 있으며, 해상풍력발전단지 내·외부전력망에 과전압 및 과전류를 발생시켜 전력품질에 영향을 줄 수 있으므로, 해상풍력발전단지는 낙뢰와 같은 해상 조건에 의한 요소를 고려하여 설계하여야 하며 이를 위한 기반기술 확보가 중요하다. 이러한 이유로 각국에서 풍력발전단지에 낙뢰가 미치는 영향에 대한 연구가 많이 행해지고 있다. 예를 들어 풍력터빈 뇌격 시 주파수의존 접지 모델의 역할을 분

석하고 토양의 이온화 특성에 따른 풍력터빈 낙뢰 과전압 감소를 위한 적절한 접지 모델을 제시하였으며[2], 풍력단지에서 다양한 뇌격지점과 풍력터빈 접지저항에서 낙뢰가 전력시스템에 미치는 영향을 분석하였다[3]. 또한 그리드와 연계된 풍력단지에서 다양한 크기의 뇌격이 발생했을 경우 서지 어레스터의 접지저항 크기를 변화시킴으로써 어레스터 전류 및 에너지 흡수량을 변하게 하여 뇌서지 역류를 저감시킬 수 있는 방법을 제시했으며[4], 변압기를 포함한 이상적인 풍력단지 모델에서 대지 저항 및 대지 인덕턴스를 변화시킬 경우 뇌 과전압 및 뇌서지 역류현상이 풍력발전 단지에 미치는 영향에 대해 분석했다[5]. 그러나 국내의 경우 낙뢰로 인한 풍력발전기의 고장을 분석하고 서지보호기를 신설하거나 교체하는 등에 관한 연구는 시행되고 있으나, 구체적인 연구결과나 그 대책은 보고되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 국내 서남해안에 계획 중인 2.5GW 해상풍력발전단지의 데이터를 바탕으로 내부전력망의 정상상태 전압 및 해상풍력터빈에 낙뢰가 떨어졌을 경우의 과도상태를 분석하고, 해상풍력발전단지의 안정적인 운영을 위해 해상환경을 고려한 뇌 과전압 저감방안을 제시하였다.

### 2. 해상풍력발전 시스템

#### 2.1 해상풍력발전단지 구성

해상풍력발전단지는 그림 1과 같이 풍력터빈을 이용해 에너지를 생산하는 내부전력망, 에너지를 집약시켜 육상으로 전송하기 위한 해상변전소, 해상변전소와 육상변전소를 연결하는 외부전력망으로 구성된다. 내부전력망의 경우 실증모델 데이터를 바탕으

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, IT Fusion Research Institute, Korea

E-mail : kyuh@hkn.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, Korea

Received : November 23, 2015; Accepted : January 25, 2016

로 서로 다른 거리에 위치한 9개의 풍력터빈을 방사형으로 구성하였으며, 정격전압 33kV의 해저케이블을 이용하여 연결하였다. 각각의 풍력터빈 발전기는 약 690V 전압레벨의 전력을 생산하며 이는 터빈 하부에 설치되어 있는 변압기에 의해 약 33kV의 전압레벨로 승압 된다. 내부전력망에서 생산된 에너지를 효율적으로 육상으로 전송하기 위해 해상변전소를 설치하는 경우 전력손실을 줄이기 위해 해상변전소와 육상변전소를 연결하는 고압레벨의 송전케이블 설치가 필요하다. 따라서 외부 전력망을 구성하는 11km 거리의 해상변전소와 육상변전소는 154kV HVAC (High Voltage Alternative Current) 해저케이블로 연결하였다. 또한 해상변전소가 해상풍력단지에 가깝게 위치할수록 고압인 외부망 케이블의 길이가 길어지므로 그만큼 손실을 줄일 수 있다.

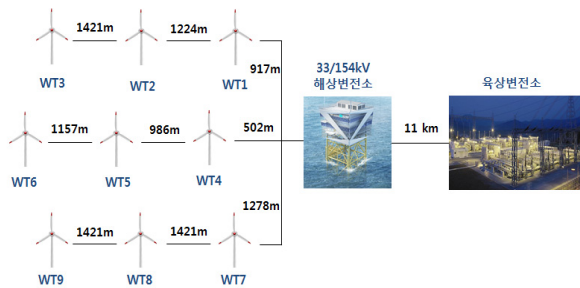


그림 1 해상풍력발전단지 구성  
Fig. 1 Configuration of Offshore Wind Farm

2.2 해상풍력터빈 등가화

풍력터빈의 타워 및 블레이드의 정확한 서지 임피던스 모델링은 과도상태 분석에서 매우 중요하다. 풍력터빈 구조물은 일부 고전압 송전타워 구조와 유사한 물리적 특성을 가지고 있으며, 구조물의 서지 임피던스 표현은 일반화로 조건에서 이루어진다. 즉, 풍력터빈의 구조를 고려하여 회로소자로 표현이 가능하다.

2.2.1 타워

그림 2의 (a), (b)와 같이 일반적인 타워의 형태 구조물을 원통형, 원뿔형 모델로 등가화한 경우 서지 임피던스를 정식화할

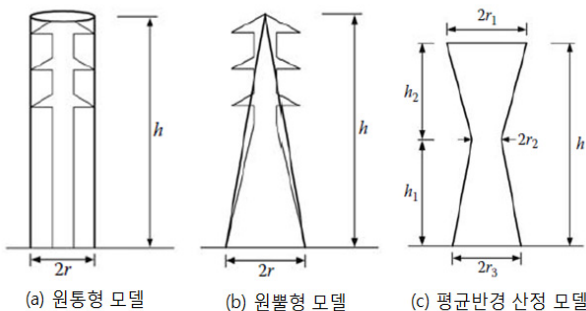


그림 2 구조물 등가화 모델  
Fig. 2 Structure equivalent model

수 있다. 그러나 풍력터빈의 경우 그림 2의 (c)와 같이 구조물이 완벽한 원통이나 원뿔형태의 모양을 갖추고 있지 않기 때문에 타워 및 블레이드의 평균반경을 구해야 한다.

풍력터빈의 각 높이별 반경, 타워높이 및 식 (1)을 이용하여 평균반경을 구할 수 있다.

$$r_{av} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{2h} \tag{1}$$

- $r_{av}$  : 타워 평균 반경 [m]
- $h$  : 타워 높이 [m]
- $h_1$  : 하부부터 중간지점까지 높이 [m]
- $h_2$  : 중간지점부터 상부까지 높이 [m]
- $r_1$  : 타워 상부 반지름 [m]
- $r_2$  : 중간지점 반지름 [m]
- $r_3$  : 하부 반지름 [m]

원통형 모델 및 원뿔형 모델의 서지임피던스는 식 (2) 및 (3)을 이용하여 구할 수 있다. 또한 일반적으로  $h \gg r$  이기 때문에 식 (4)와 같이 근사할 수 있다[6].

$$Z = 60 \cdot \left( \ln \left( 2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 \right) \tag{2}$$

$$Z = 60 \cdot \ln \left( \sqrt{2} \sqrt{\left( \frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right) \tag{3}$$

$$Z \cong 60 \cdot \ln \left( \sqrt{2} \frac{h}{r} \right) \tag{4}$$

- $h$  : 타워 높이 [m]
- $r$  : 타워 평균 반경 [m]

풍력터빈 타워의 인덕턴스, 저항 및 커패시턴스는 식 (5), (6) 및 (7)을 통해 산정할 수 있다[7].

$$L_t = \frac{\mu_0 H}{2\pi} \left( \ln \frac{2H}{r_{av}} - 1 - \frac{\mu}{\mu_0} \ln c \right) \tag{5}$$

$$R_t = \rho \frac{H}{S} \tag{6}$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_t}{C}} \tag{7}$$

- $\mu_0$  : 진공에서의 투자율 [H/m]
- $\mu$  : 타워 투자율 [H/m]
- $H$  : 타워 높이 [m]
- $r_{av}$  : 평균 반경 [m]
- $c$  : 내부와 외부 반경 비
- $\rho$  : 저항률 [ $\Omega/m$ ]
- $S$  : 하부 면적 [ $m^2$ ]
- $Z$  : 임피던스 [ $\Omega$ ]

### 2.2.2 블레이드

풍력터빈 블레이드의 경우 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 규정한 5MW급 풍력터빈 데이터를 이용하여 등가화 하였다. 풍력터빈의 타워와 마찬가지로 식 (8)을 이용하여 블레이드를 임피던스화 하여 근사치로 나타낼 수 있다.

$$Z_b = 60 \cdot \ln\left(\frac{2B_r}{r_b}\right) \quad (8)$$

$B_r$  : 블레이드 길이 [m]  
 $r_b$  : 블레이드 평균 반경 [m]

### 2.3 낙뢰 모델링

해상풍력발전단지에 영향을 주는 낙뢰 시험 규격은 그 특성상 실제 상황과 매우 유사한 형태로 재현이 가능한 가상의 서지 파형을 규격화하였다. 그림 3은 해상풍력터빈에 인가하는 낙뢰의 모의 파형이며 식 (9)를 이용하여 구성하였다. 낙뢰는 국내 뇌전류의 평균값인 20kA 크기이며, 최대치의 90%에 도달하는데 약 8μs의 시간이 소요되고 70μs에 최대전류의 약 50%가 된다.

$$Amplitude \times \left(\frac{t}{T_f}\right)^n / \left(1 + \left(\frac{t}{T_f}\right)\right) \times \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (9)$$

$Amplitude$  : 상승 값 ([A] 또는 [V])  
 $T_f$  : 최대 전압 및 전류 도달 시간  
 $\tau$  : 낙뢰 지속 시간  
 $n$  : 기울기 결정 상수

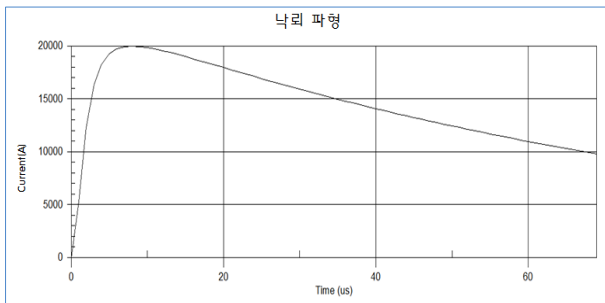


그림 3 낙뢰 파형  
 Fig. 3 Lightning waveform

### 3. 대지저항률을 이용한 뇌 과전압 저감방안

해상풍력발전단지는 접지저항 저감을 위해 공통·통합 접지를 해야 하며, 전류량이 큰 뇌전류의 신속하고 안전한 방전경로를 구성하기 위해 접지저항을 10Ω 이하로 설계해야한다[8]. 해상풍력발전단지의 정확한 접지저항 계산을 위해서는 접지전극이 매설되는 토양의 대지저항률이 반영되어야 하지만, 일반적으로 3전극

법과 4전극법을 이용한 육상의 대지저항률 측정방법은 해상에서는 불가능하다. 그러나 Monopile 또는 Jacket 타입의 하부구조를 가진 해상 풍력터빈의 경우, 하부구조물의 일부는 해수에 잠기게 되고 터빈의 하중을 지지하기 위한 Pile을 해저지반 깊은 곳에 설치하게 되므로, 접지 개념에 따라 해수와 해저지반에 위치한 하부구조물이 접지의 역할을 하게 된다. 따라서 하부구조물을 접지메쉬와 접지봉으로 모의하여 해상 풍력터빈의 접지저항을 구할 수 있다[9]. 또한 접지저항에 가장 큰 영향을 미치는 대지저항률은 토양의 종류, 수분함유량에 영향을 받기 때문에, 적절한 대지저항률 조건의 해저지반을 선정하면 해상풍력발전단지의 통합 접지저항을 낮추어 뇌격으로 인한 과도전압을 저감시킬 수 있다.

### 3.1 대지저항률

표 1은 토양 종류에 따른 대지저항률을 나타낸다. 해저지반의 특성상 모래와 점토가 혼합된 토양으로 이루어졌을 확률이 높기 때문에 모래와 점토 혼합 토양의 수분함유량에 따른 대지저항률을 선정하여 표 2에 나타냈다.

표 1 토양 종류에 따른 대지저항률

Table 1 Earth Resistivity according to Type of Soil

Type of Soil or Water	Typical Resistivity [Ωm]	Usual limit [Ωm]
Sea water	2	0.1 to 10
Clay	40	8 to 70
Ground well & spring water	50	10 to 150
Clay & sand mixtures	100	4 to 300
Shale, slates, sandstone	120	10 to 100
peat, loam & mud	150	5 to 250
sand	2000	200 to 3000

표 2 수분함유량에 따른 대지저항률

Table 2 Earth Resistivity according to Content of water

Moisture %	Clay mixed with sand
0	10,000,000
2.5	1,500
5	430
10	185
15	105
20	63
30	42

### 3.2 대지저항률을 이용한 접지저항 선정

선정한 대지저항률과 식 (10)을 이용하여 해상 풍력터빈의 접

지저항을 구할 수 있다.

$$Tagg \rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad (10)$$

- $\rho$  : 대지저항률
- $l$  : 전극 길이 [m]
- $r$  : 전극 반경 [m]

일반적으로 국내의 서남해안과 같은 얇은 바다에서는 Monopile 타입의 하부구조물이 가장 많이 사용되며[10], 그림 4는 Monopile 타입 하부구조물의 구조를, 표 3은 각 부분의 파라미터를 나타낸다.

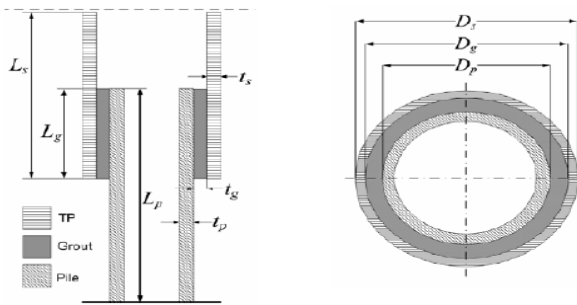


그림 4 Monopile 타입 하부구조물 구조  
Fig. 4 Constitution of Monopile Type Substructure

표 3 Monopile 타입 하부구조물 파라미터  
Table 3 Parameter of Monopile Type Substructure

Reference	Description	Distance
$L_s$	Transition Piece Length	16 m
$L_g$	Grout Length	10 m
$L_p$	Pile Length	56 m
$t_s$	Average Transition Piece Thickness	50 mm
$t_g$	Grout Thickness	125 mm
$t_p$	Pile Thickness	50 mm
$D_s$	Transition Piece Doameter	6 m
$D_g$	Grout Diameter	5,9 m
$D_p$	Pile Diameter	5,65 m

위의 데이터를 바탕으로 해수의 대지저항률을 2Ωm, 수분 30%를 포함하는 해저지반의 모래와 점토로 이루어진 혼합토양의 대지저항률을 42Ωm, Monopile 타입 하부구조물의 해수 설치길이를 약 30m, 해저지반 설치길이를 약 25m, 접지전극 반경을 3m로 선정하여, Monopile 하부구조물로 구성된 풍력터빈의 접지저항을 계산하면 약 1~2Ω의 매우 낮은 풍력터빈 접지저항 값을 구할 수 있으며, 통합 접지저항도 낮아지게 된다. 이처럼 해상 풍력발전단지의 환경을 고려하여 접지저항을 기준보다 낮게 할

수 있으나 다음과 같은 요소들에 의해 접지저항이 상승 될 수 있다.

- 대단위 해상풍력발전단지의 모든 해저지반이 같은 토양으로 구성되어 있지 않으며, 해수의 깊이에 따라 다른 타입의 하부구조물을 설치한다.
- 계절과 기후의 변화 등 다양한 요인으로 설계시의 풍력터빈 접지저항을 공통접지저항으로 유지하기는 매우 힘들다. 계절적으로 7~8월에는 장마가 시작되어 대지에 가장 많은 수분이 저장되고, 대지의 온도도 높게 올라가게 되므로 접지저항치가 낮으나, 반대로 겨울에는 대지가 결빙되어 대지 온도가 가장 낮은 상태가 되므로 접지저항은 크게 증가한다.

따라서 본 연구에서는 환경적인영향으로 인한 접지저항 상승을 고려해 해상풍력단지 내부전력망 통합 접지저항을 5~8Ω으로 산정하였다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과는 해상풍력발전단지의 정상상태 전압 및 내부전력망 9개의 풍력터빈 중 해상변전소에서 가장 가까운 거리에 위치한 그림 1의 WT4에 뇌격전류를 인가하였을 때 뇌격으로 인한 과도상태를 분석한다. 또한 해저지반의 대지저항률을 고려하여 새롭게 산정한 접지저항에서 뇌 과전압의 변화를 분석하였다.

##### 4.1 정상상태

그림 5는 9개의 풍력터빈으로 구성된 모의 해상풍력발전단지의 정상상태 내부 및 외부전력망의 전압을 나타낸다. 내부전력망은 33kV, 외부전력망은 154kV의 전압이 걸린다.

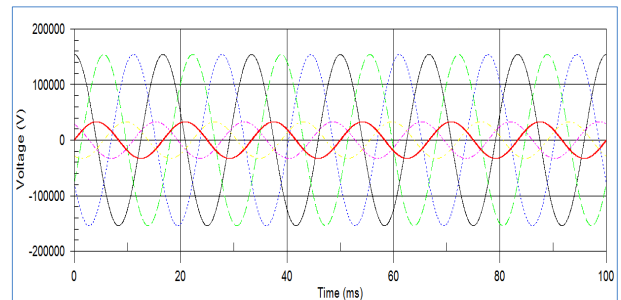


그림 5 해상풍력발전단지 정상상태 전압  
Fig. 5 Steady State Voltage of Offshore Wind Farm

##### 4.2 뇌격으로 인한 과도상태

그림 6은 뇌격시 WT4의 내부변압기 2차측의 전압을 나타내며 최대 약 100kV의 과전압이 뇌격지점과 가까운 내부전력망에 영

향을 준다. 그림 7은 뇌격터빈과 1.4km 떨어진 WT1에 걸리는 과전압을 나타내며 뇌 과전압의 최대치는 약 63.8kV이다.

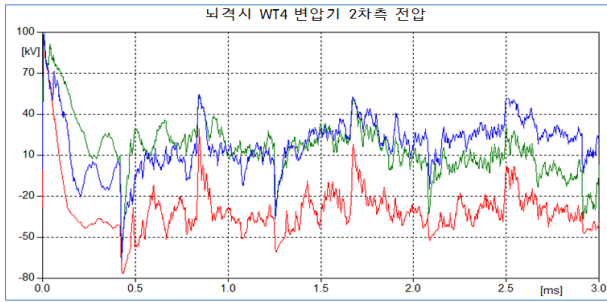


그림 6 WT4 변압기 2차측 전압  
Fig. 6 Transformer Secondary-Side Voltage of WT4

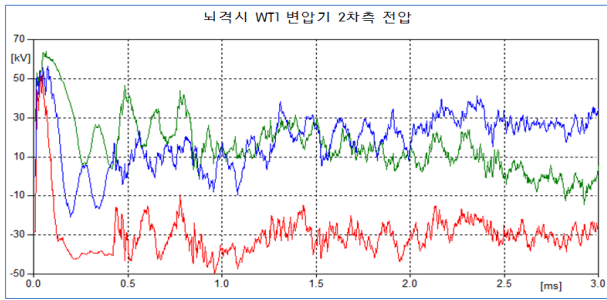


그림 7 WT1 변압기 2차측 전압  
Fig. 7 Transformer Secondary-Side Voltage of WT1

### 4.3 접지저항 감소 시 낙뢰 영향

본 연구에서는 3장의 해상 풍력터빈 접지저항 산정방법을 이용하여 Monopile 타입 해상 풍력터빈의 접지저항을 해상환경의 토양 종류, 수분함유량에 따른 대지저항률을 이용하여 계산하였으며, 환경적인영향으로 인한 접지저항 상승을 고려해 해상풍력 단지 내부전력망 통합 접지저항을 5~8Ω으로 산정하였다. 그 결과 통합 접지저항 8Ω 및 5Ω에서 뇌 과전압 파형이 그림 8 및 그림 9와 같이 나타났으며, 낙뢰보호를 위한 공통접지 기술규정

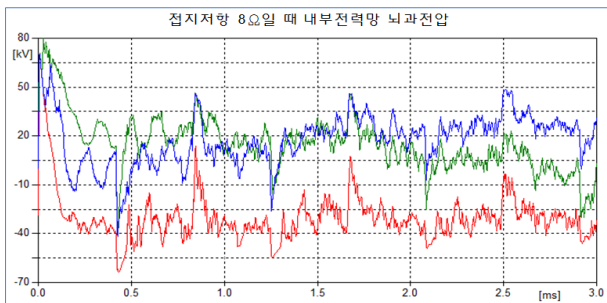


그림 8 접지저항 8Ω일 때 내부전력망 과전압  
Fig. 8 Inter Array Cable Overvoltage - 8Ω of Grounding Resistance

의 접지저항 10Ω과 비교하였을 때 그림 10과 같이 나타났다. 접지저항 10Ω일 때 뇌 과전압 약 100kV가 접지저항 8Ω에서 약 80kV, 접지저항 5Ω에서 55kV로 감소하였다.

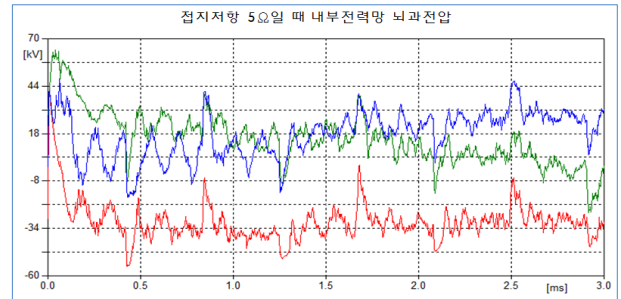


그림 9 접지저항 5Ω일 때 내부전력망 과전압  
Fig. 9 Inter Array Cable Overvoltage - 5Ω of Grounding Resistance

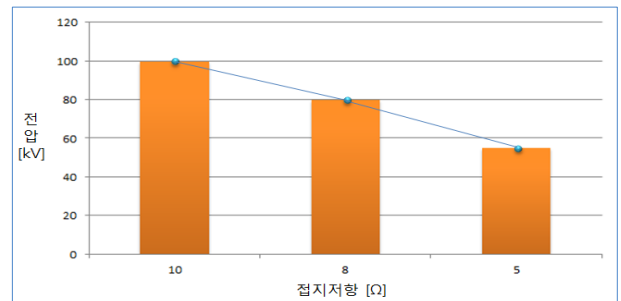


그림 10 접지저항 저감에 따른 과전압 변화  
Fig. 10 Change of Overvoltage Caused by Grounding Resistance Reduction

## 5. 결 론

본 논문에서는 서남해안에 계획중인 2.5GW 해상풍력발전단지의 데이터를 바탕으로 내부전력망의 정상상태 전압 및 해상 풍력터빈에 낙뢰가 떨어졌을 경우의 과도상태를 분석하고, 뇌 과전압을 저감시키기 위한 방안을 제시하였다. 일반적인 국내의 낙뢰의 경우 해상풍력 발전단지 뇌격지점 내부전력망에 약 100kV의 과전압을 발생시켰다. 그러나 대지저항률에 큰 영향을 미치는 토양의 종류, 수분함유량을 고려해 해상풍력발전단지의 접지저항을 산정하여 감소시킨 결과, 통합접지저항이 8Ω일 때 약 20%, 5Ω일 때 약 40%의 뇌 과전압이 감소되었다. 따라서 수온 및 해저지반 토양의 종류와 같은 해상환경을 고려하면 해상풍력발전단지의 통합접지저항을 낮출 수 있으며, 낙뢰에 의한 피해를 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

향 후 연구에서는 Monopile 타입보다 깊은 수심에서 이용되는 Jacket 및 Multipile 타입의 하부구조물을 갖는 해상 풍력터빈의 접지저항을 고려하여, 다양한 종류의 풍력터빈의 뇌격시 과도과전압에 대해 분석할 필요성이 있다고 사료된다.

**감사의 글**

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임.  
(과제번호 : R15XA03-39)

**References**

- [1] R. van de Sandt, J. Lowen, J. Paetzold, I. Erlich, "Neutral earthing in off-shore wind farm grids", PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, pp. 1-8, 2009.
- [2] D. Romero, J. Montanya, A. Candela, "Behavior of the wind turbines under lightning strikes including nonlinear grounding system", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), 2004.
- [3] Y. Yasuda, T. Hara, T. Funabashi, "Analysis of Lightning Surge Propagation in Wind Farm", Electrical Engineering in Japan, Vol. 162, No. 2, pp. 30-38, 2008.
- [4] A. B. Ebrahim, E. M. R. Mohammad, H. A. R. Mansour, "Analysis and Suppression of Back-Flow Lightning Surge in Onshore Wind Farms, Journal of Lightning Research", Journal of lightning research, Vol. 3, pp. 1-9, 2011.
- [5] Y. Yasuda, T. Funabashi, "Transient analysis on wind farm suffered from lightning", UPEC 39th International. IEEE, Vol. 1, pp. 202-206, 2004.
- [6] N. Malcolm, RK. Aggarwal, "The impact of multiple lightning strokes on the energy absorbed by MOV surge arresters in wind farms during direct lightning strikes", The International Journal of Renewable Energy, Vol. 83, pp. 1305-1314, 2015.
- [7] T. Zhang, Y. Zhang, X. Tan, "Study on overvoltage of signal line in wind turbine by lightning strike", International Conference on Lightning Protection (ICLP), pp. 1516-1519, 2014.
- [8] C. Damir, P. Dragan, D. Vicko, G. Ranko, "Transient analysis of grounding systems for wind turbines", The International Journal of Renewable Energy, Vol. 43, pp. 284-291, 2012.
- [9] K. Yamamoto, S. Sumi, "EMTP models of a Wind Turbine Grounding System", International Conference on Lightning Protection(ICLP), pp. 845-849, 2014.
- [10] W. Shi, J. H. Han, C. W. Kim, D. Y. Lee, H. K. Shin, H. C. Park, "Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea", The International Journal of Renewable Energy, Vol. 74, pp. 406-413, 2015.

**저 자 소 개**



**서진규 (Jin-Gyu Seo)**

1989년생. 2014년 한경대 전기공학과 졸업.  
2014년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**김규호 (Kyu-Ho Kim)**

1966년생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업.  
1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학).  
1996년 안산공과대학 전기과 부교수, 2011년 9월~2012년 8월 Baylor University Visiting Scholar, 2008년 9월~현재 국립한경대학교 전기공학과 부교수