

해상 풍력발전단지에서 뇌격 시 서지어레스터 열화로 인한 연계 고장 분석

A Study on the Consecutive Failure Due to Deterioration in Surge Arresters of the Offshore Wind Farm

김진혁* · 김규호* · 이재균** · 우정욱**
(Jin-Hyuk Kim · Kyu-Ho Kim · Jea-Kyun Lee · Jung-Wook Woo)

Abstract - One of the ways to improve the stability of power facilities used in power systems is to use power surge arresters and to protect against transient overvoltages and surges in normal operation. Also it is important to reduce the impact of lightning strikes because lightning can create overvoltage in the grid of the wind turbine and affect power quality. So This paper analyzes the effects of overvoltage and adjacent turbines due to single strike and multi strike to ground impedance changes when the surge arrester is deteriorated in a wind power farm.

Key Words : Surge arresters, Lightning strike, Wind turbine, Ground impedance, Deterioration

1. 서론

전 세계 많은 국가에서 재생에너지가 경쟁력 있는 주류 에너지원으로 확고히 자리를 잡았고 재생에너지 발전용량은 기록적으로 늘어나고 있다. 파리협정 체결이후 각국 정부의 재생에너지 지원 정책은 강화될 전망이다. 기후변화 대응을 위한 189개국의 국가별 기여방안을 살펴보면 147개국이 재생에너지를 언급하고 있고 2016년 초를 시점으로 146개국이 재생에너지 지원 정책을 시행하고 있다[1]. 국내에서는 전통 기저발전을 담당해 왔던 원전과 석탄발전의 비중을 줄이는 대신 신재생에너지를 확대하는 방향으로 에너지정책을 추진할 계획이다. 또한 신재생에너지 목표치는 발전 비중을 2030년에 20% 수준까지 끌어 올리는 것이다[2]. 이렇게 산업구조가 다변화해짐에 따라 전력설비의 급증으로 전력계통의 높은 신뢰성과 안정성이 절실히 요구되며, 전력계통설비의 신뢰성을 확보하기 위한 대책이 필요하다. 현재 전력계통에 사용되는 전력설비의 안정성을 향상시키는 방안중 하나로 전력용 피뢰기를 사용하고 있으며, 정상운전상태에서의 과도과전압 및 뇌서지 등에 대한 방호 대책으로 사용되고 있다[3-4]. 하지만 피뢰기는 전력 계통에 이상전압이 발생하면 전력 설비를 절연내력 이하로 보호하지만, 반복적인 보호 동작으로 열화가 발생하고[5-7], 피뢰기의 절연파괴는 지락 과전류 계전기의 오동작을

일으켜 경제적 손실을 초래하거나 변압기를 포함한 중요기기 등의 고장을 야기하여 고장복구에 적지 않은 비용과 시간이 소비될 수 있으며 심할 경우 변압기 고장을 일으킬 수 있다[8-9]. 이에 본 논문에서는 EMTP-ATPDraw를 이용하여 모의풍력발전단지를 모델링하고 시뮬레이션을 통해 풍력발전단지에서 피뢰기가 열화되었을 때 접지 임피던스 변화에 따른 낙뢰 과전압과 인접터빈의 영향을 분석한다.

2. 시뮬레이션 구성

2.1 모의 해상풍력단지 구성

해상풍력 단지는 9개의 풍력터빈으로 구성되어있고 풍력터빈은 690V의 전력을 생산해 33kV로 승압을 시키고 해저케이블을 통해 154kV로 승압시키는 변전소와 연결된다[10].

본 논문에서는 변전소와 가장 가까운 WT4에 낙뢰를 인가하였고, 이 때 인접터빈 WT1의 영향을 비교하였다.

2.2 낙뢰 조건 선정

낙뢰 모델은 EMTP-ATPdraw에서 제공하는 HEIDLER Surge type을 이용하였다. 낙뢰 모델은 0s부터 파미장이 80 μ s까지 지속되고, 단일 스트라이크의 최대 낙뢰전류는 크기는 20kA이다. 멀티 스트라이크의 경우 두 번째 낙뢰 크기는 첫 번째 낙뢰 크기의 약 2/3에서 1/3이며, 세 번째 낙뢰가 존재할 경우 그 크기는 두 번째 낙뢰보다 더 작다[11]. 본 시뮬레이션에서는 멀티 스트라이크의 최대 낙뢰전류를 20kA이고 4ms에 15kA의 낙뢰 전류

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Hankyong National University, Korea
E-mail: kyuho@hknu.ac.kr

* Dept. of IoT Convergence Industry, Hankyong National University, Korea

** Dept. of Korea Electric Power Corporation, Korea

Received : June 4, 2018; Accepted : August 28, 2018

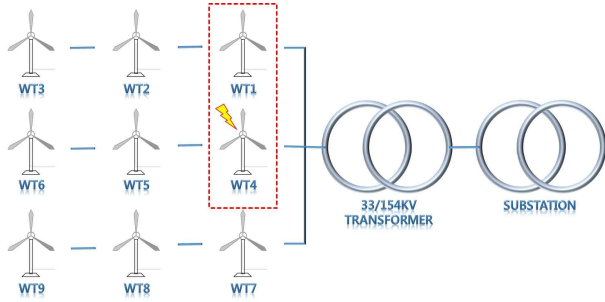


그림 1 모의 해상 풍력단지 구성
 Fig. 1 Configuration of Offshore Wind Farm

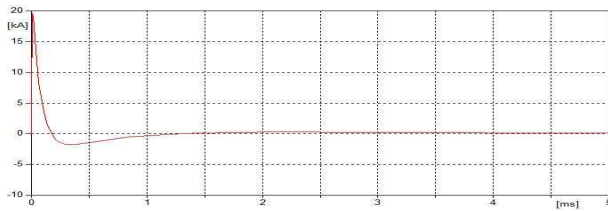


그림 2 단일 스트라이크 낙뢰 파형
 Fig. 2 Single strike lightning

표 1 단일 스트라이크 낙뢰 상수

Table 1 Single strike lightning function

진폭[A]	20000
$T_f[\mu s]$	8
$\tau[\mu s]$	80
n	1
$T_{start}[s]$	0
$T_{stop}[s]$	1000

를 인가하였다. 낙뢰 모델의 수식은 (1)로 나타내었고 수식의 T_f 는 최대값 도달 시간, τ 는 낙뢰 지속시간, n은 상승계수를 나타낸다.

$$f(t) = I_{Amp} * (t/T_f)^n / (1 + (t/T_f)^n) * e^{(-t/\tau)} \quad (1)$$

3. 시뮬레이션 결과

뇌서지의 주파수가 10kHz 이하일 때는 접지 임피던스의 리액턴스 성분은 무시할 수 있을 정도로 접지저항과 같고 그 이상의 주파수에서는 유도성 효과에 의해 접지 임피던스가 증가하였다 [12]. 따라서 대지 기반물질을 해수로 선정하면 대지 저항률을 2 Ω·m이고 뇌서지의 주파수를 100kHz, 1MHz, 10MHz로 가정했을 때 접지 임피던스는 각각 약 4.4Ω, 13Ω, 40Ω이다 [13]. 피뢰기는 낙뢰가 인가된 WT4의 피뢰기가 열화되어 건전상태의 피뢰기보다 정격전압이 낮아져 방전특성이 저하되었고, 이후 연계된 WT1의

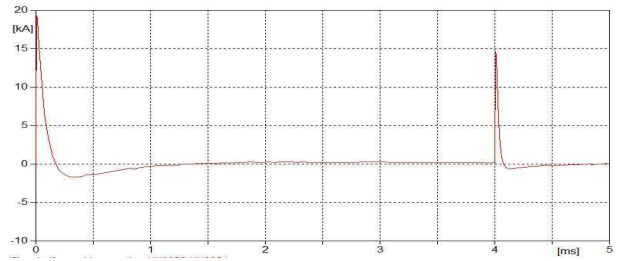


그림 3 멀티 스트라이크 낙뢰 파형
 Fig. 3 Multi strike lightning

표 2 멀티 스트라이크 낙뢰 상수

Table 2 Multi strike lightning function

진폭[A]	15000
$T_f[\mu s]$	8
$\tau[\mu s]$	80
n	1
$T_{start}[s]$	0.004
$T_{stop}[s]$	1000

피뢰기도 열화되었을 때를 각각의 접지임피던스에 대하여 시뮬레이션하였다.

3.1 단일 스트라이크 시 피뢰기 열화로 인한 낙뢰 과전압

그림 1에서 WT4에 단일 스트라이크가 인가되고 피뢰기가 열화되어 제기능을 못할 때를 시뮬레이션 하였다. 접지임피던스가 4.4Ω 일 때 WT4는 최초 낙뢰로 인해 약 30kV의 과전압이 걸렸지만 이후 제기능을 상실하였고 WT1은 최대 약 26.72kV의 낙뢰 과전압이 걸렸다. 접지임피던스가 13Ω일 때 WT4는 약 47.54kV, WT1에는 약 46.68kV가 걸렸다. 접지 임피던스가 40Ω일 때 WT4에는 약 83.44kV, WT1에는 58.95kV가 걸렸다. 시뮬레이션 결과 WT4의 피뢰기가 열화되어 제기능을 못할 때 WT4의 내부 망 전압은 최초 과전압 이후 지락고장이 발생되었고, WT1까지 과전압의 영향을 미쳤다.

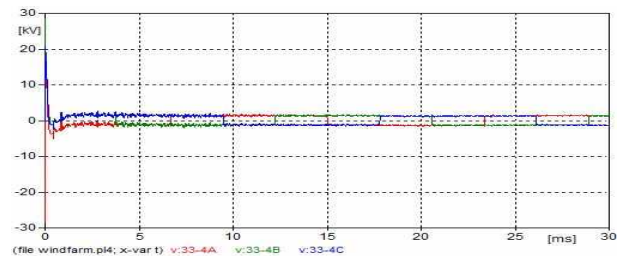


그림 4 피뢰기 접지임피던스가 4.4Ω일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 4 When the ground impedance at 4.4Ω, the lightning overvoltage during arrester deterioration of WT4

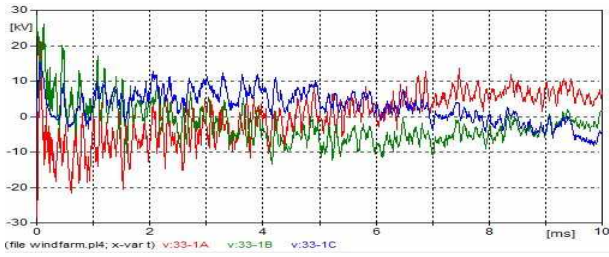


그림 5 피뢰기 접지임피던스가 4.4옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 5 When the ground impedance is 4.4Ω and the arrester deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

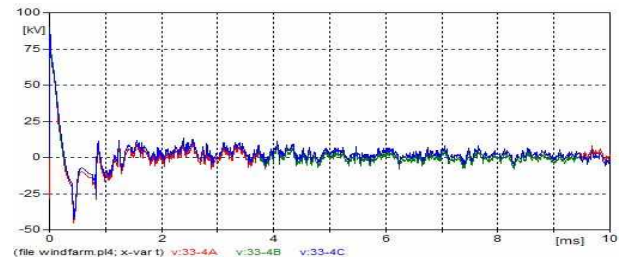


그림 8 피뢰기 접지임피던스가 40옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 8 When the ground impedance at 40Ω, the lightning overvoltage during arrester deterioration of WT4

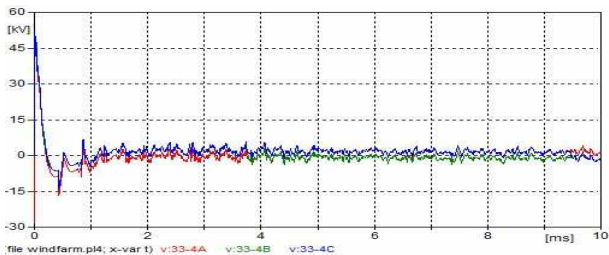


그림 6 피뢰기 접지임피던스가 13옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 6 When the ground impedance at 13Ω, the lightning overvoltage during arrester deterioration of WT4

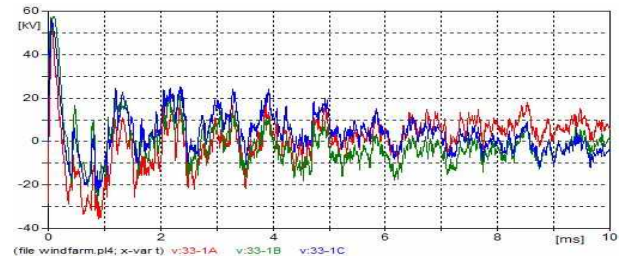


그림 9 피뢰기 접지임피던스가 40옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 9 When the ground impedance is 40Ω and the arrester deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

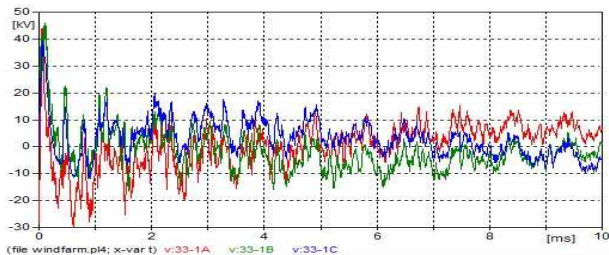


그림 7 피뢰기 접지임피던스가 13옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 7 When the ground impedance is 13Ω and the arrester deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

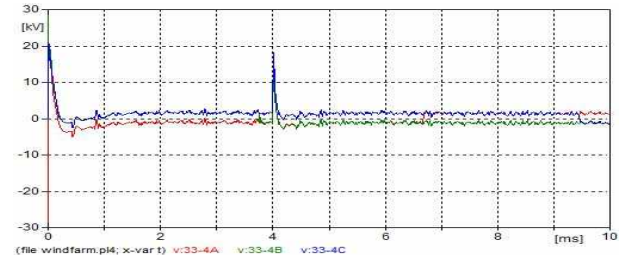


그림 10 피뢰기 접지임피던스가 4.4옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 10 When the ground impedance at 4.4Ω, the lightning overvoltage during arrester deterioration of WT4

3.2 멀티 스트라이크 시 피뢰기 열화로 인한 낙뢰 과전압

WT4에 그림 1의 단일 스트라이크가 인가되고 피뢰기가 열화되어 제기능을 못할 때를 시뮬레이션 하였다. 접지임피던스가 4.4 Ω 일 때 WT4는 최초 낙뢰로 인해 약 30kV의 과전압이 걸린 이후, 멀티 스트라이크로 인해 4ms 때 약 19kV의 과전압이 걸린 이후 제기능을 상실하여 지락고장이 발생되었고, 이 때 WT1은 약 46.68kV 이후 약 4ms 때 15.54kV가 걸렸다. 접지임피던스가 13Ω일 때 WT4는 약 47.54kV 이후 4ms 때 약 43.46kV, WT1은

46.68k 이후 4ms 때 약 30.13kV, 접지임피던스가 40Ω일 때 WT 4는 약 83.44kV, 4ms 때 약 74.92kV, 이 때 WT1은 약 58.95k V 4ms 때 약 49.02kV가 걸렸다, WT4의 피뢰기가 열화되어 제 기능을 못할 때 WT4의 내부방 전압은 최초 낙뢰로 인한 과전압 이후 두 번째 낙뢰로 인해 과전압 발생시켜 WT1에 영향을 미쳤고 또한 단일 스트라이크보다 전압 변동이 크게 나타났다.

3.3 WT1, WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

WT4에 낙뢰가 인가되고, 그 때 WT4와 인접한 WT1의 피뢰기

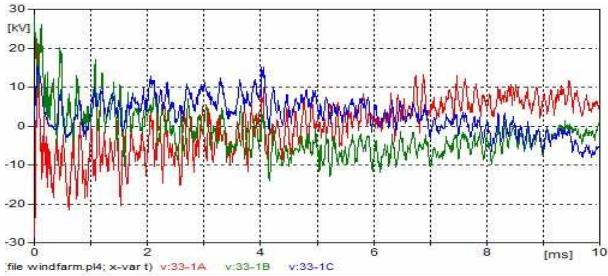


그림 11 피뢰기 접지임피던스가 4.4옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 11 When the ground impedance is 4.4Ω and the arrest or deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

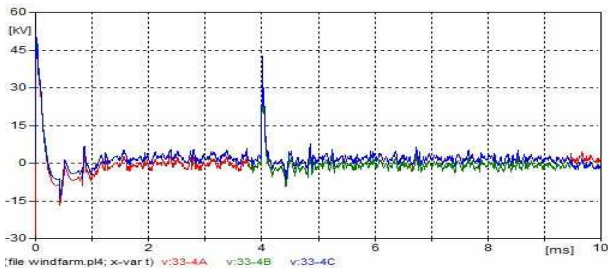


그림 12 피뢰기 접지임피던스가 13옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 12 When the ground impedance at 13Ω, the lightning overvoltage during arrestor deterioration of WT4

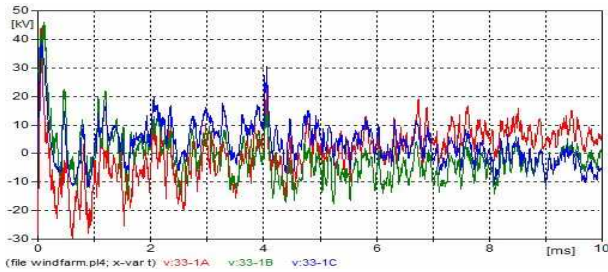


그림 13 피뢰기 접지임피던스가 13옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 13 When the ground impedance is 13Ω and the arrestor deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

가 모두 열화되어 제기능을 못할 때 낙뢰 과전압을 비교하였다. 접지임피던스는 40Ω으로 통일 하였고 WT4에 단일 스트라이크와 멀티 스트라이크를 인가하였을 때 낙뢰 과전압을 비교하였다. WT4는 최초 낙뢰 과전압 이후, 멀티 스트라이크로 인해 4ms 때 한번 더 낙뢰 과전압이 걸렸지만 WT1은 피뢰기 열화로 인해 제기능을 상실하여 내부망 전압이 0V에 가까웠다.

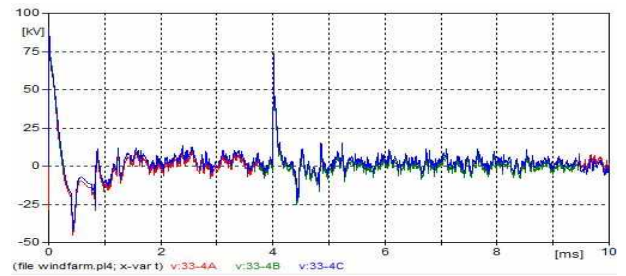


그림 14 피뢰기 접지임피던스가 40옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 낙뢰 과전압

Fig. 14 When the ground impedance at 40Ω, the lightning overvoltage during arrestor deterioration of WT4

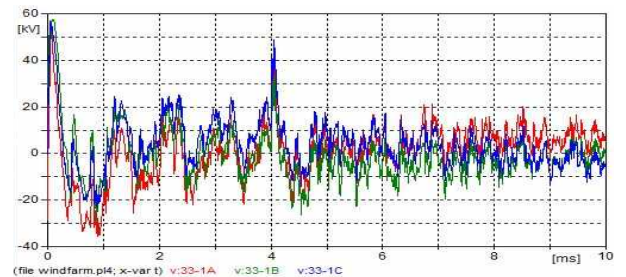


그림 15 피뢰기 접지임피던스가 40옴일 때 WT4의 피뢰기 열화 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 15 When the ground impedance is 40Ω and the arrestor deterioration during in WT4, the lightning overvoltage of WT1

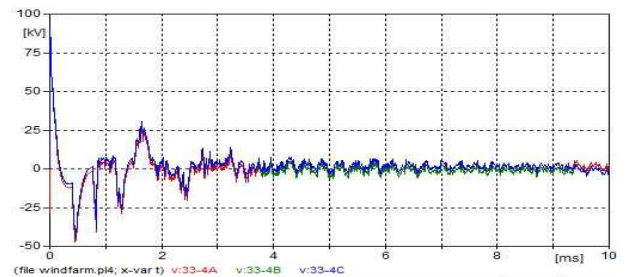


그림 16 WT1, WT4의 피뢰기 열화 시 WT4에 단일 스트라이크 뇌격 시 WT4의 낙뢰 과전압

Fig. 16 When the lightning arrester of WT1 and WT4 deteriorates, the lightning strike overvoltage of WT4

4. 결 론

본 논문에서 해상 풍력발전단지에서 피뢰기가 열화되었을 때 접지 임피던스 변화에 따른 단일 스트라이크 낙뢰와 멀티 스트라이크 낙뢰로 인한 과전압과 인접 터빈의 영향을 분석하였다.

시뮬레이션 결과 WT4의 피뢰기가 열화되었고 단일 스트라이크 낙뢰 시 피뢰기의 접지 임피던스가 40Ω일 때 WT4에 걸린

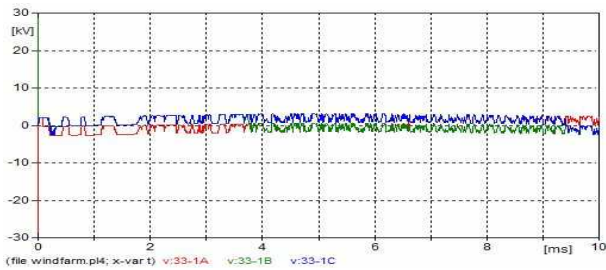


그림 17 WT1, WT4의 피뢰기 열화 시 WT4에 단일 스트라이크 뇌격 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 17 When the lightning arrester of WT1 and WT4 deteriorates, the lightning strike overvoltage of WT1

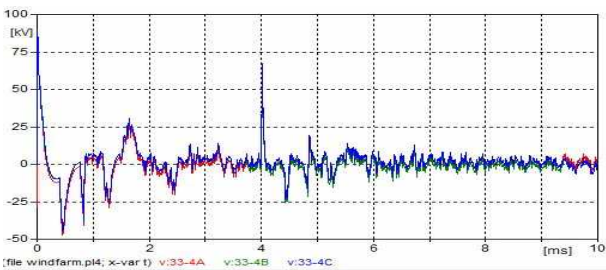


그림 18 WT1, WT4의 피뢰기 열화 시 WT4에 멀티 스트라이크 뇌격 시 WT4의 낙뢰 과전압

Fig. 18 When the lightning arrester of WT1 and WT4 deteriorates, the multi-strike lightning overvoltage of WT4

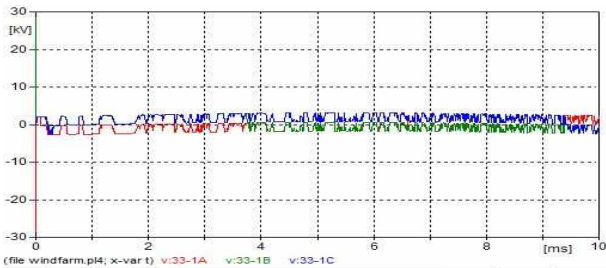


그림 19 WT1, WT4의 피뢰기 열화 시 WT4에 멀티 스트라이크 뇌격 시 WT1의 낙뢰 과전압

Fig. 19 When the lightning arrester of WT1 and WT4 deteriorates, the multi-strike lightning overvoltage of WT1

낙뢰 과전압의 크기는 약 83.44kV, 4.4Ω 일 때 약 30kV가 걸렸고, 인접 터빈 WT1 에서는 접지 임피던스가 40Ω일 때 약 58.95kV, 4.4Ω일 때 약 26.72kV가 걸렸다. 피뢰기의 접지임피던스가 작을수록 낮은 낙뢰 과전압이 걸렸고, WT4피뢰기의 열화로 인한 낙뢰 과전압은 인접 터빈 WT1 까지 영향을 미쳤다. 멀티 스트라이크 낙뢰 시 마찬가지로 WT4의 피뢰기 열화로 인한 낙뢰 과전압은 인접터빈 WT1에 영향을 미쳤고, 4ms 이후의 멀티

스트라이크로 인해 단일 스트라이크보다 더 큰 전압 변동이 발생했다. WT4와 WT1의 피뢰기가 모두 열화되었을 때는 피뢰기의 제기능을 상실하여 지락고장이 발생하였다. 따라서 낙뢰 과전압을 줄이기 위해서는 피뢰기의 접지임피던스를 낮추고 피뢰기의 열화상태를 사전에 감지하여 기능을 상실하지 않도록 해야 한다.

향후 연구로는 피뢰기가 열화되어 기능을 상실하였을 때 피뢰기의 재투입 시간에 따른 계통 회복 등의 후속 조치를 연구할 예정이다.

References

- [1] “Renewables Global Status Report”, *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2016.
- [2] Y.S. Park, “New Government Energy Policy “Conversion s”...Need Speed Control”, *Electric Power*, Vol. 11, No. 8, pp. 50~53, 2017.
- [3] P. Chowdhuri, “Electromagnetic Transients in Power Systems, Research Studies”, pp. 266-296, 1987.
- [4] Nobuo Hasimoto, “Lightning and surge - Prevention of damage to structure and damage”, *DENKISHOIN*, pp. 79-144, 1995.
- [5] G.S. Kil, J.S. Han, M.S. Han “A study on the deterioration progress of railway arresters”, *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(4), pp. 93-97. 2004.
- [6] G.S. Kil, J.Y. Song, I.K. Kim, S.B. Moon, “Diagnostic techniques of lightning arresters for DC electric traction vehicles”, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(4), pp. 357-361. 2006.
- [7] Credson de Salles, Manuel L.B. Martinez, Alvaro Antonio Alencar de Queiroz “Ageing of metal oxide varistors due to surges, International Symposium on Lightning Protection”, *Fortaleza, Brazil*, pp. 171-176. 2011.
- [8] Minsoo Hwang and Taehyun Jeon, “Algorithm for Preventing Malfunction and Reclosing in Grid-Connected PV Systems”, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 26, No. 7, pp. 70~76, 2012.
- [9] Che-Wung Ha and Jong-Beom Lee, “Simulation and Characteristic Analysis Using ATP Draw for Power System Equipments”, *Conference of The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 1227~1229, 1999.
- [10] Jin-Hyuk Kim, Jung-Wook Woo and Kyu-Ho Kim, “Analysis of Transient State of HVDC Reactance Characteristics, Resistivity and Ground Impedance of Offshore Wind Farm in Lightning Strike”, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 32, No. 2, pp. 123~128, 2018.
- [11] Malcolm, N., Aggarwal, RK, “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.

- [12] J. H. Choi, B. H. Lee, “Frequency-dependent grounding impedance of the counterpoise based on the dispersed currents”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 589-595, 2012.
- [13] “Analysis of lightning surge impacts and measures for stable operation of offshore wind farm”, *KEPCO*, 2017.

저 자 소 개



김진혁 (Jin-Hyuk Kim)

1991년 1월 6일생. 2017년 한경대 전기공학과 졸업. 2017~현재 동 대학원 IoT융합산업학과 석사과정



김규호 (Kyu-Ho Kim)

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년 신안산대학 전기과 부교수, 2011년 9월~2012년 8월 Baylor University Visiting Scholar, 2008년 9월~현재 국립한경대학교 전기공학과 교수



이재균 (Jea-Kyun Lee)

1964년 8월 17일생. 1998년 남서울대 전자계산학과 졸업, 2001년 중앙대 산업대학원 정보경영학과 졸업(석사), 2013년 한경대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2017~현재 한경대 대학원 전기전자제어학과 박사과정, 현재 한국전력 경기본부 안성지사 차장, 전력공급 부장 직무대행, 중장기 투자계획 및 전력공급 총괄, 배전설비 운영 및 고장 총괄



우정욱 (Jung-Wook Woo)

1968년 9월 19일생. 1992년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 책임연구원, 절연설계, 내뢰설계, 낙뢰관측, 신변전기기 개발 및 고장해석 등