

EMTP를 이용한 ESS가 연계된 배전계통에서 직격뢰 발생 시 계통 및 ESS 측의 서지 해석

(Analysis of Surge in Distribution System and ESS due to Direct Lightning in Distribution System with ESS using EMTP)

서훈철*

(Hun-Chul Seo)

Abstract

The study concerning about the grid connection of the large-capacity energy storage system(ESS) is increasing. However, the transient study such as lightning or switching surge necessarily occurred at power system with ESS has been hardly performed. Therefore, this paper performs the analysis of lightning surge in distribution system with ESS using electromagnetic transient program(EMTP). The battery model in Matlab/Simulink is modeled by EMTP, which is the specialized software for power system transient study. Also, the bi-directional power electronics for interconnection of the battery and distribution system are modeled by EMTP. When the lightning is occurred at interconnection point of ESS, this paper simulates the existence of ESS and operation conditions of ESS and analyzes the surge in distribution system and ESS according to the various conditions.

Key Words : Battery, Distribution System, Energy Storage System(ESS), Lightning, Overvoltage

1. 서 론

현재의 전력계통은 발전, 송전, 변전 및 배전 시스템으로 구성된다. 대부분의 전력계통은 야외에 노출되어 있기 때문에 특히 낙뢰에 취약하며, 계통 내의 각종 스위칭 동작이 운영상 반드시 발생하게 된다. 즉 전력계통에서는 뇌격에 의하여 발생하는 과전압, 차단기의

개폐동작 등에 의하여 발생하는 과전압 등 다양한 과도현상이 발생하게 된다[1-3]. 낙뢰가 전력계통에 직접 인가된다면 기기의 절연파괴 등 전력설비에 큰 손상을 입히게 된다. 따라서 전력계통을 설계할 경우에는 이러한 과전압에 의한 계통 설비의 손상을 방지하기 위하여 과전압 크기의 계산을 바탕으로 한 절연협조 설계가 반드시 필요하다.

스마트그리드란 기존의 전력망에 IT 및 컴퓨터 기술을 활용하여 공급자와 소비자가 양방향으로 실시간 정보 교환을 통해 에너지 효율을 최적화하는 차세대 전력망을 지칭한다. 스마트그리드로 변화 시 기존 전력계통에는 에너지 저장장치, 분산전원(태양광 발전,

* Main author : Professor, School of IT Engineering,
Yonam Institute of Digital Technology
Tel : 055-751-2059, Fax : 055-751-2053
E-mail : hunchul12@yc.ac.kr
Received : 2014. 10. 13
Accepted : 2014. 12. 2

풍력 발전 등) 뿐만 아니라 전기 자동차 또한 연계되고 있으며, 이들의 보급 및 안정적 운용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 국내 산업계의 경우 에너지 저장장치와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 한국전력공사, 포스코ICT, LG화학, 현대중공업 등의 기업들이 에너지 저장장치 및 이들의 계통 연계 시 영향 해석을 위한 연구를 진행하고 있다. 이러한 대부분의 연구들은 전력품질 및 에너지 저장장치의 운용을 위한 연구이며, 과도현상 관련 연구는 거의 수행되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 ESS가 연계된 배전계통에서 과도현상, 특히 낙뢰 발생 시 계통 및 ESS 측의 서지 해석을 수행하였다. 일반적으로 배전계통에서는 직격뢰 와 유도뢰 해석을 수행하는데 본 논문에서는 직격뢰 해석을 수행하였다. 연구 수행의 첫 단계로 Matlab/Simulink에 주어진 배터리 모델을 과도현상 해석에 최적화된 소프트웨어인 EMTP (Electromagnetic Transients Program)를 이용하여 ESS를 다시 모델링하였다. 배전계통 및 ESS의 계통 연계를 위한 전력변환장치 또한 EMTP를 이용하여 모델링하였다. 모델링 결과를 이용하여 ESS의 계통 연계점에 직격뢰를 발생시켰으며, ESS의 존재 및 ESS의 동작조건에 따른 다양한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과를 기반으로 계통 및 ESS 측의 서지 해석을 수행하였다.

2. 뇌서지

본 논문에서는 직격뢰와 유도뢰 중 ESS 연계 계통에서 직격뢰 발생 시 영향 분석을 수행하였다. 전력계통 과도현상에 최적화된 소프트웨어인 EMTP는 뇌 파형의 생성을 위하여 Surge 모델, Cigre 모델, Heidler 모델 등 다양한 모델을 지원하고 있으며, 본 논문에서는 Heidler type을 사용하여 낙뢰 파형을 생성하여 선로에 인가하였다 [4]. 생성된 낙뢰 파형은 최대치가 20kA이고 파두 $2\mu s$, 파미 $70\mu s$ 를 가지는 파형이다. 낙뢰 크기 및 파두/파미를 다양하게 조절할 수 있으며, 본 연구에서 최대치를 20kA로 설정한 이유는 20kA는 국

내에서 몇 년간 실측된 낙뢰 파형의 중간값이기 때문이다[4].

3. 계통연계형 에너지 저장 장치(ESS) 모델링

ESS 연계 계통에서 뇌서지 해석을 위한 첫 단계로서 계통연계형 ESS의 모델링이 필요하다. 계통연계형 ESS는 배터리, 양방향 전력변환장치(인버터/컨버터)로 구성되어 있다. 공학에서 사용되는 소프트웨어 중 Matlab/Simulink에는 배터리 모델이 주어져 있다. 그렇지만 Matlab/Simulink는 뇌서지 같은 전력계통 과도현상 해석을 위하여 최적화된 소프트웨어가 아니다. 따라서 과도현상 해석을 위하여 최적화된 소프트웨어인 EMTP를 이용하기 위하여 Matlab/Simulink의 배터리 모델을 EMTP를 이용하여 다시 모델링하였다.

3.1 Matlab/Simulink의 배터리 모델

Matlab/Simulink에 주어진 배터리 종류에는 납축 전지, 리튬-이온 전지, 니켈-카드뮴 전지가 있다. 본 논문에서는 식 (1), (2)에 나타난 리튬-이온 전지의 충방전 특성을 EMTP를 이용하여 모델링 하였다 [5-6].

방전모델($i^* > 0$):

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B \times it) \quad (1)$$

충전모델($i^* < 0$):

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B \times it) \quad (2)$$

E_0 : Constant Voltage, it : Extracted Capacity

Q : Maximum Battery Capacity

A : Exponential Voltage, B : Exponential Capacity

i^* : Low Frequency Current Dynamics

K : Polarization Constant

3.2 EMTP를 이용한 계통연계형 ESS의 모델링

EMTP를 이용하여 계통연계형 ESS를 모델링하면 그림 1과 같다.

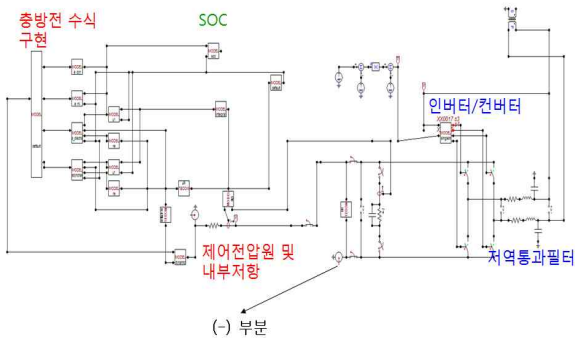


그림 1. EMTP를 이용한 계통연계형 ESS의 모델링
Fig. 1. Modeling of ESS using EMTP

```

EXEC
a:=0.6*sin(2*pi*60*t)
b:=sin(2*pi*2000*t)

if t<1.5 then
if a>b then
o1:=1
o2:=1
o3:=0
o4:=0
elseif a<=b then
o1:=0
o2:=0
o3:=1
o4:=1
endif
endif

if t>1.5 then
if v1>vtri then
o1:=1
o4:=0
else
o1:=0
o4:=1
endif

if -v1>vtri then
o3:=1
o2:=0
else
o3:=0
o2:=1
endif
endif
endif
    
```

1.5초 이전
→ 인버터 동작
→ 배터리: 방전모드 동작

1.5초 이후
→ 컨버터 동작
→ 배터리: 충전모드 동작

그림 2. 양방향 전력변환장치의 EMTP/MODELS 코드 부분

Fig. 2. EMTP/MODELS coding of bi-directional power electronics equipment

상기 등가회로 및 식을 기반으로 배터리를 모델링하였다. 그림 1에 나타난 배터리 부분은 충방전 수식 구

현 부분, SOC 구현 부분, 제어전압원 및 내부저항 부분으로 구성된다. EMTP에서 주어지는 제어전압원의 경우, (+) 혹은 (-) 단자 하나만 이용가능하며, 나머지는 접지하도록 되어 있다. 따라서 2개의 제어전압원을 이용하였다. 그림 1의 우측 부분은 전력변환장치 부분이다. 이 부분은 방전시에는 인버터로 동작하며, 충전시에는 컨버터로 동작하도록 구성되어 있다. 양방향 전력변환장치는 EMTP/MODELS로 제어되며, 코드 일부는 그림 2와 같다.

그림 3과 4는 방전/충전 모드 시 전류의 흐름을 나타내고 있다. 방전모드시 배터리로부터 인버터를 거쳐 계통으로 전력이 공급된다. 충전모드시에는 스위치를 개폐하여 저항을 우선 연결하여 충전모드로 전환한 후 계통으로부터 전력을 공급 받는다. 저항을 연결한 이유는 EMTP 모델링 시 저항이 연결되어야만 전류가 계통으로부터 배터리 측으로 흘러 들어오기 때문이다.

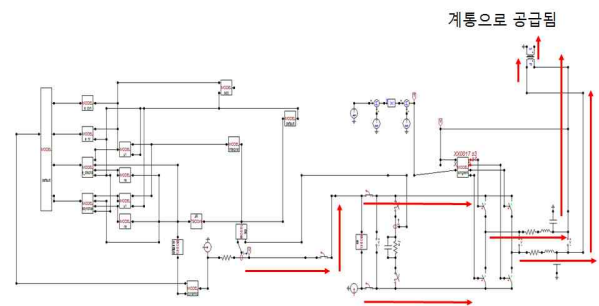


그림 3. 방전동작 시 전류의 흐름
Fig. 3. Current flow in discharging mode

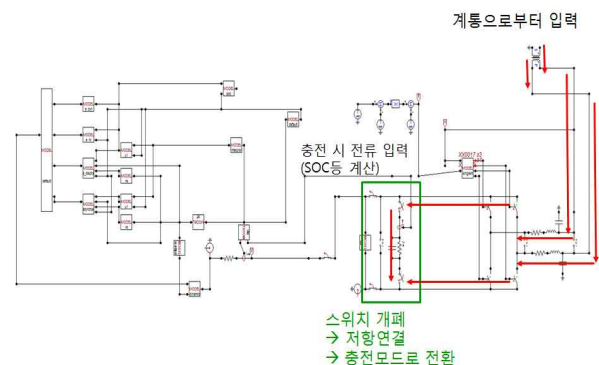


그림 4. 충전동작 시 전류의 흐름
Fig. 4. Current flow in charging mode

3.3 모델링 결과의 검증

상기에서 모델링한 계통연계형 ESS의 검증을 위하여 실 배전계통에 연계한 후 시뮬레이션을 수행하였다. Matlab/Simulink에 주어진 배터리의 경우, 초기 SOC가 100%가 되도록 설정되어 있으므로 우선 배터리는 방전동작을 수행하며, 방전이 끝난 후 1.5초부터 충전동작을 하도록 설정하였다. 다음 그림 5는 배터리의 SOC 변화를 나타내고 있다. 파형을 살펴보면 배터리의 SOC가 0초부터 감소하고 있으므로 방전 동작을 수행하며 방전은 1.42초에 완료된다. 그 이후 1.5초부터 충전동작을 수행하여 SOC가 점점 증가함을 알 수 있다. 그 외 배터리 출력파형, 인버터/컨버터 각 동작 시 출력 등을 일반적으로 알려진 파형과 비교하여 확인한 결과 정상적으로 동작하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 모델링이 정확히 수행되었다고 할 수 있다.

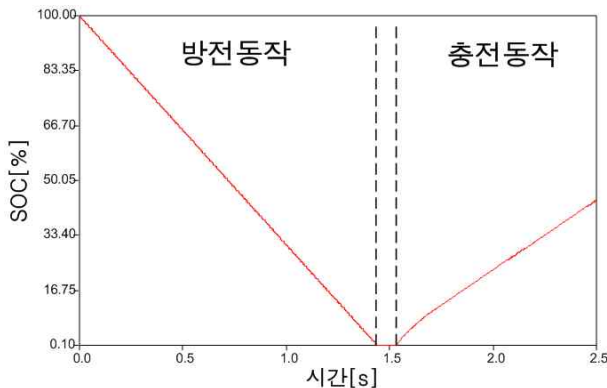


그림 5. SOC 파형
Fig. 5. SOC waveform

4. 시뮬레이션 및 결과 검토

4.1 ESS가 연계된 배전계통 모델

ESS가 연계된 계통에서 뇌서지 해석을 위한 배전계통 모델로서 참고문헌 [7]에 제시된 한전의 실 배전계통 모델을 이용하였다. 배전선로에서 뇌서지는 주로 가공지선에 침입하므로 가공지선 구현을 위하여 EMTP의 LCC 소자를 이용하여 선로를 모델링하였다. 상기에서 모델링된 ESS는 계통의 중간지점에 연결하

였으며, 용량은 70kW이다.

4.2 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 표 1과 같은 시뮬레이션 조건을 선정하였다. ESS의 연계 유무 및 ESS 연계 시 충/방전 동작에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 낙뢰 발생 위치는 ESS의 계통연계점이며, 가공지선에 침입하는 것으로 설정하였다. 낙뢰 발생 시간은 Case 1의 경우 0.5초, Case 2와 3은 SOC 값이 주어진 값이 사례연구의 시점이 되는 순간이다.

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation conditions

Case	조건
Case 1	ESS 연계 무
Case 2	ESS 연계(방전동작) SOC : 20%, 40%, 60%, 80%
Case 3	ESS 연계(충전동작) SOC : 20%, 40%, 60%, 80%

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

4.3.1 계통의 서지 분석

3가지 case 중 Case 1의 시뮬레이션 결과, 계통 연계점에서의 전압 파형은 그림 6과 같다.

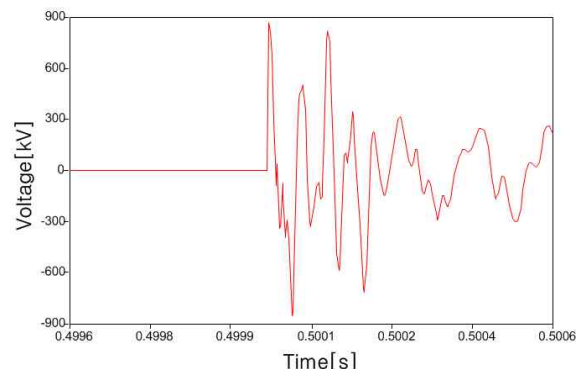


그림 6. Case 1의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result of Case 1

매우 높은 주파수를 갖는 전형적인 진행과 형태의 파형이 나타남을 알 수 있다. Case 2 및 3의 파형 역시 동일한 형태가 나타났다.

그림 7은 상기 각 case에 대하여 최대 과전압 크기를 비교한 것이다. 그림에 나타난 값은 3상의 최대 과전압의 평균값이다. 우선 ESS가 연계되지 않은 경우에는 가장 작은 과전압이 발생한 것을 알 수 있다. ESS가 연계된 경우에는 충/방전 동작에 상관없이 매우 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

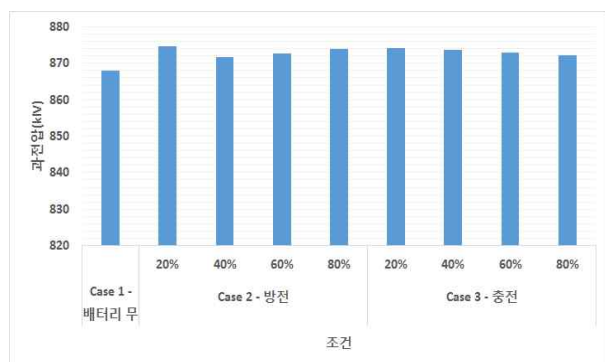


그림 7. 각 case에서 최대 과전압 크기
Fig. 7. Maximum value of overvoltage at each case

가공지선 침입 시 상도체에 나타나는 과전압은 가공지선과 상도체 사이의 상호 임피던스에 의하여 결정된다. 이 상호 임피던스의 주 성분은 커패시턴스이다. ESS가 연계되면 ESS에 의하여 공급되는 전류로 인하여 커패시터에 축적되는 전하량이 많아져 커패시턴스 또한 커지게 되고, 따라서 상호 임피던스는 작아진다. 상호 임피던스가 작아지면 상도체로 유기되는 전류가 증가하여 상도체에서 발생하는 과전압 또한 커지게 때문에 ESS가 연계되지 않은 경우보다 더 큰 과전압이 발생하게 되는 것이다.

그렇지만 그림 7에서 ESS 연계 유무에 따른 과전압 크기의 차이를 보면 5kV 미만으로 매우 작다. 또한 나타난 과전압 값들은 애자의 CFO인 180kV 이상의 값이다. 또한 참고문헌 [4]에 따르면 배전계통에서 직격뢰의 경우 대부분 임계섬락전압인 180kV 이상의 값이 나타난다. 따라서 ESS의 연계는 배전계통의 섬락률에는 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 사료된다.

4.3.2 ESS측의 서지 분석

본 절에서는 ESS가 연계된 경우에 낙뢰 발생 시 ESS에 미치는 영향을 분석하도록 한다. 우선, Case 2 및 Case 3에서 배터리 SOC를 보면 두 경우의 파형은 그림 5와 동일한 것으로 나타났다. 즉 계통에서 발생한 낙뢰는 배터리의 SOC에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

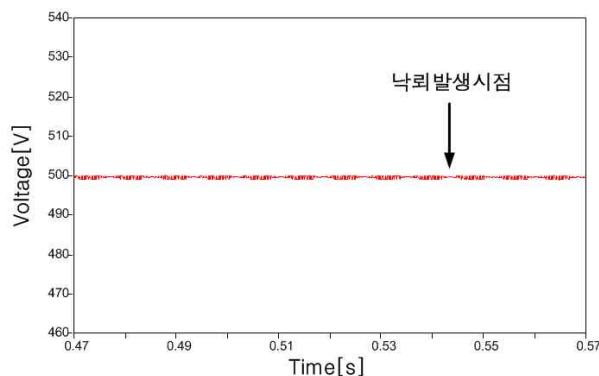


그림 8. Case 2에서 배터리 출력 전압
Fig. 8. Battery output voltage in Case 2

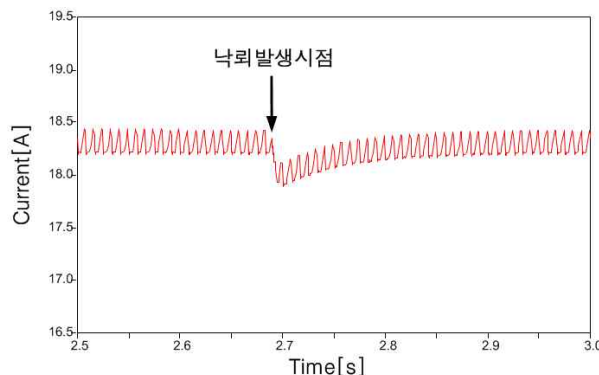


그림 9. Case 3에서 배터리 입력 전류
Fig. 9. Battery input current in Case 3

그림 8은 Case 2, 즉 방전동작 중 SOC가 60%인 경우의 낙뢰 발생 시 배터리의 출력전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 8을 보면 낙뢰 발생 시점에 출력전압에는 변함이 없는 것으로 나타났다. 그림 9는 Case 3, 즉 충전동작 중 SOC가 60%인 경우의 배터리에 입력되는 전류 파형을 나타낸 것이다. 낙뢰 발생 시점에 계통으로부터 배터리에 입력되는 전류가 다소 상승하나 이 값은 0.5A 정도로 매우 작은 값이며, 또한 배터리

입력 전류는 시간이 지날수록 낙뢰 발생 이전의 값으로 점점 감쇄하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과가 발생한 원인으로 ESS 연계 시 양방향 전력변환장치 측에 위치한 저역통과필터 때문으로 해석할 수 있다. 저역통과필터가 존재하기 때문에 충/방전동안 매우 큰 고주파를 지닌 낙뢰 전류가 계통으로부터 ESS 측으로 유입되는 것이 방지되기 때문이다. 따라서 그림 5, 8~9와 같이 SOC 및 배터리 전압, 전류에 크게 영향을 미치지 않은 것이다.

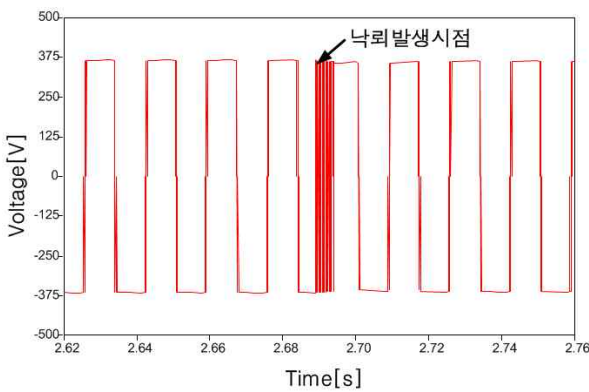


그림 10. 배터리 측 전압파형
Fig. 10. Voltage waveform at Battery side

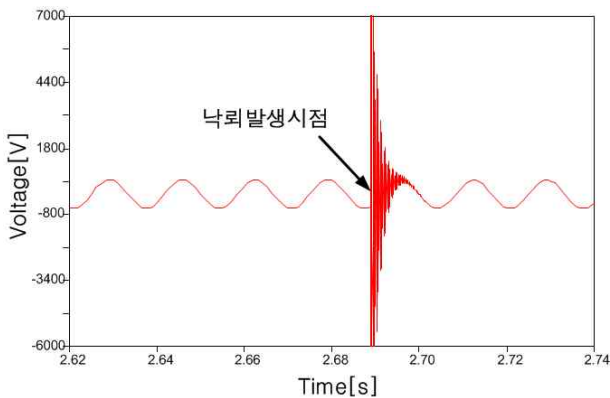


그림 11. 계통 측 전압 파형
Fig. 11. Voltage waveform at grid side

그림 10과 11은 각각 Case 3에서 배터리 기준으로 인버터 통과 후 저역통과필터 이전(배터리 측) 및 이후(승압용 변압기 이전 계통 측)의 전압 파형을 나타낸 것이다. 그림 11에서 계통 측 낙뢰로 인하여 크기가 크고 고주파수를 갖는 낙뢰파형의 형태를 확인할

수 있으나, 그림 10에서는 나타나지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 저역통과필터로 인하여 계통의 과도현상 발생에도 불구하고 배터리 측에는 영향을 받지 않는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 ESS가 연계된 배전계통에서 뇌서지 해석을 수행하였다. Matlab/Simulink에 주어진 배터리의 특성에 따라 EMTP를 이용하여 배터리를 모델링한 후 양방향 전력변환장치에 연결하여 계통연계형 ESS를 모델링하였다. 배전계통의 가공지선에 낙뢰 침입 시 ESS 연계 유무 및 충방전 동작에 따라 계통 및 ESS 측의 서지 해석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) ESS가 연계된 경우의 과전압이 연계되지 않은 경우보다 크다. 그렇지만, 그 크기 차이는 5kV 미만이다.
- (2) ESS가 연계된 경우 충방전 동작에 상관없이 과전압의 크기는 유사하다.
- (3) ESS가 연계된 경우 저역통과필터의 존재로 인하여 계통 측에 낙뢰가 발생하더라도 ESS의 배터리 측에는 아무런 영향을 끼치지 않는다.

향후 직격뢰 발생 시 ESS 용량 및 연계위치 등에 따른 변화, 유도뢰 발생 시 영향 등에 관하여 연구를 계속적으로 진행할 예정이다.

References

- [1] Math H. J. Bollen, Emmanouil Styvaktakis, Irene Y. H. Gu, "Categorization and Analysis of Power System Transients", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, pp. 2298-2306, 2005.
- [2] Mario Paolone, Carlo Alberto Nucci, Emanuel Petrache, and Farhad Rachidi, "Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 423-431, JANUARY 2004.
- [3] Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, and Mario Paolone, "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison

- with the IEEE Std. 1410 Method”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 684-692, JANUARY 2007.
- [4] Hun-Chul Seo, “A Study on the Analysis of Lightning Performance according to Configuration of Lightning Protection System in Distribution Line”, Ph. D. thesis, Sungkyunkwan University, 2013.
- [5] Olivier Tremblay, Member IEEE, Louis-A. Dessaint, Senior Member IEEE, and Abdel-Ilah Dekkiche, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007.
- [6] Matlab and Simulink, The Mathworks, Inc. <http://www.mathworks.com>.
- [7] Keon-Woo Park, Hun-Chul Seo, Chul-Hwan Kim, Chang-Soo Jung, Yeon-Pyo Yoo, Yong-Hoon Lim, “Analysis of the Neutral Current for Two-Step-Type Poles in Distribution Lines”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, pp. 1483-1489, July 2009.

◇ 저자소개 ◇



서훈철 (徐熏徹)

2004년 성균관대 정보통신공학부 졸업.
2006년 동 대학원 정보통신공학부 졸업 (석사). 2013년 동 대학 정보통신대학 졸업 (박사). 2013년 9월 ~ 2014년 1월 영남대학교 박사후연구원. 2014년 3월 ~ 현재 연암공업대학 조교수.