

PSCAD/EMTDC에 의한 UPS의 서지 모델링에 관한 연구

이중선, 최성문, 노성은, 이승호, 노대석*
한국기술교육대학교
e-mail:wndjts19@koreatech.ac.kr

A Study on the Modeling of Surge in UPS Using PSCAD/EMTDC

Joong-Seon Lee, Sung-Moon Choi, Seong-Eun Rho,
Seung-Ho Lee, Dae-Seok Rho*
Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 빅데이터, 자율자동차, AI 등의 기술 발전에 대응할 수 있는 대규모 데이터센터의 설치가 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 정전 시에도 일정 시간 동안 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 UPS의 수요가 증가하고 있지만, UPS의 전기적 위해요인을 고려한 안전성 검증 및 운용 절차 등이 미흡하여, 이를 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 개폐서지, 뇌서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 뇌격 발생장치부 등으로 구성된 10kW급 UPS의 서지 시험장치를 모델링한다. 이를 바탕으로 개폐서지, 뇌서지의 운용특성을 평가한 결과, AC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 거의 발생하지 않지만, DC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 비교적 크게 발생하며, UPS 2차측 부하 용량이 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 또한, UPS가 설치된 배전계통에 뇌격이 발생하는 경우, 절연내력에 수십 배를 초과하는 뇌서지가 인가되어 UPS의 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 빅데이터, 자율주행차, AI 등의 기술 발전으로 데이터센터의 설치가 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 이러한 데이터센터는 24시간 내내 서버와 네트워크 장비가 작동해야 하므로, 전력 공급이 불안정하거나 정전이 발생하는 경우, 심각한 문제가 발생하게 된다. 이로 인해, 정전 시에도 일정 시간 동안 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 여기서, UPS는 전력 공급이 중단되었을 때, 전력망이 복구될 때까지 일정 시간 동안 민감한 부하에 고품질의 전력을 안정적으로 공급하는 장치이다. 하지만, UPS의 전기적 위해요인을 고려한 안전성 검증 및 운용 절차 등이 미흡하여, 이를 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다.

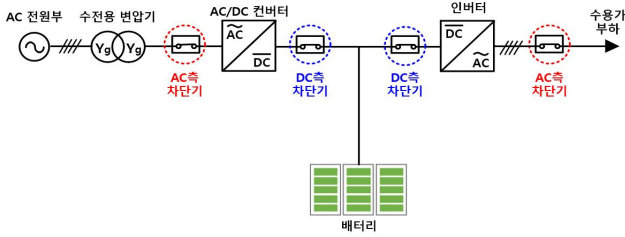
따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 개폐서지, 뇌서지의 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 뇌격 발생장치부 등으로 구성된 10kW급 UPS의 서지 시험장치를 모델링한다. 상기에서 제시한 메커니즘과 모델링을 바탕으로 10kW급 UPS의 개폐서지 및 뇌서지의 운용특성

을 평가한 결과, AC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 거의 발생하지 않지만, DC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 비교적 크게 발생하며, UPS 2차측 부하용량이 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 한편, UPS가 설치된 배전계통에 뇌격이 발생하는 경우, 절연내력의 수 십배를 초과하는 뇌서지가 인가되어 UPS의 설비에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

2. UPS의 CMV 및 서지 발생 메커니즘

2.1 보호기기 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

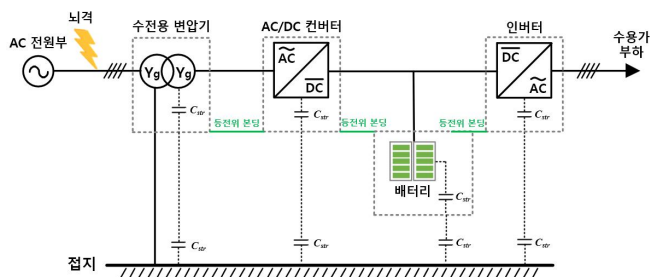
일반적으로, UPS는 그림 1과 같이 변압기, AC/DC 컨버터, 배터리, 인버터 등으로 구성된다. 여기서, 사고 유형과 위치에 따라 AC 및 DC측 보호기기가 동작하면, 서로 다른 형태의 개폐서지가 발생하여 UPS에 악영향을 미칠 수 있다[1]. 즉, 시간에 따른 전류의 변화량($\frac{di}{dt}$)과 DC 전로 및 전력변환장치의 인덕턴스가 결합하여 개폐서지가 발생하고, 보호기기 양 극간에 발생된 커패시턴스의 순간적인 에너지 방전으로 인해 배터리 정격전압의 수배를 초과하는 과도 서지가 발생하게 된다.



[그림 1] 보호기기 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

2.2 뇌격에 의한 서지 발생 메커니즘

그림 2와 같이 UPS가 설치된 배전선로에 뇌격이 발생하면 피뢰기에 의해 대지(접지)로 방전되는데, 공통접지를 통해 유입된 뇌격의 에너지는 UPS의 전력변환장치와 배터리의 기생커패시턴스와 결합되어 큰 서지를 발생시킬 수 있다[2]. 여기서, 접지로 방전된 뇌격은 국지적으로 대지전위를 상승시키고, 절연내력의 수십배를 초과하는 서지를 발생시켜, UPS의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 안전을 위해 UPS를 포함한 전기설비의 도전성 부분에 등전위 분당을 적용한 경우, 인근의 작업자에게 심각한 신체적인 손상을 발생시킬 수 있다.

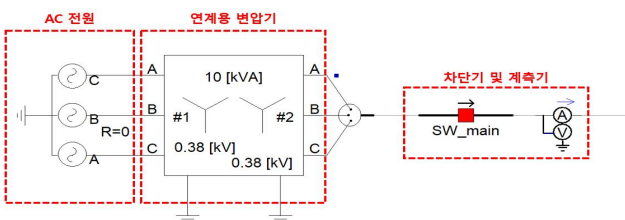


[그림 2] 뇌격에 의한 서지 발생 메커니즘

3. 10kW급 UPS 시험장치의 모델링

3.1 수배전반부

수배전반부는 그림 3과 같이 AC 전원과 연계용 변압기, 차단기 및 계측기 등으로 구성된다. 여기서, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식으로 구성되며, 연계용 변압기는 10[kVA]의 정격용량을 가지며, Yg-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 보호기기는 사고가 발생하는 경우, 사고지점으로부터 계통을 분리시킨다.

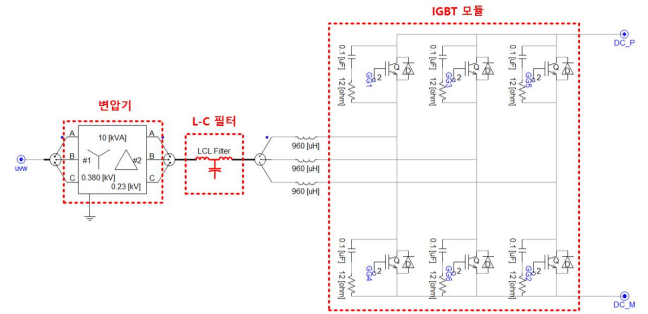


[그림 3] 수배전반부의 구성

3.2 UPS부

3.2.1 AC/DC 컨버터

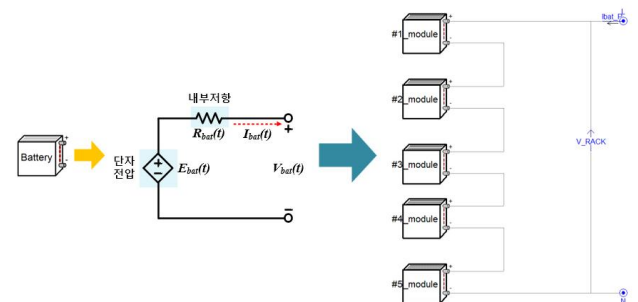
AC/DC 컨버터는 그림 4와 같이 변압기, L-C 필터, IGBT 모듈 등으로 구성된다. 여기서, 변압기는 10[kVA]의 정격용량을 가지며, Y-Δ 결선 방식으로 380[V]/230[V]의 변압비를 적용한다. 또한, L-C필터는 전력변환 과정에서 발생하는 노이즈를 저감시키기 위해 사용되고, IGBT 모듈은 AC 230[V]의 전압을 DC 290[V]로 변환한다.



[그림 4] AC/DC 컨버터의 구성

3.2.2 배터리

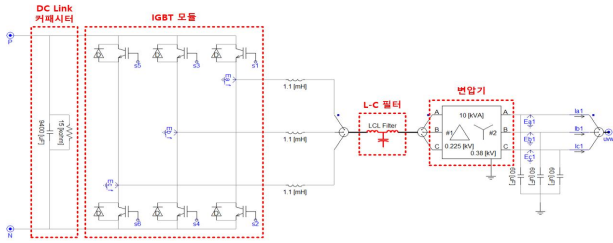
배터리는 그림 5와 같이 단자전압, 내부저항 등으로 이루어지는데, 다수의 배터리 모듈을 5S1P로 조합하여 배터리 랙의 모델링을 수행한다. 또한, 배터리 모듈의 정격용량은 3.3[kWh], 정격전압은 51.5[V], 운용 전압 범위는 42 ~ 58[V]이다.



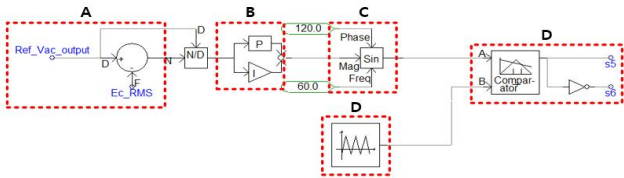
[그림 5] 배터리의 구성

3.2.3 인버터

인버터는 그림 6과 같이, DC Link 커패시터, IGBT 모듈, L-C 필터, 변압기 등으로 구성된다. 또한, 인버터의 한 상에 대한 제어 회로는 그림 7과 같이 나타낼 수 있는데, A 부분은 목표전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차 값을 산정하는 것이고, B 부분은 오차 값에 대하여 각각 PI 제어를 수행하는 것이며, C 부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 역할을 수행하는 것을 나타낸다. 또한, D 부분은 삼각파와 반송파를 출력하는 것을 나타내고, E 부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환한다.



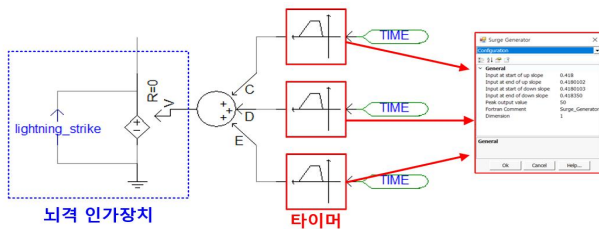
[그림 6] 인버터의 구성



[그림 7] 인버터의 제어회로 모델링

3.3 뇌격 발생장치부

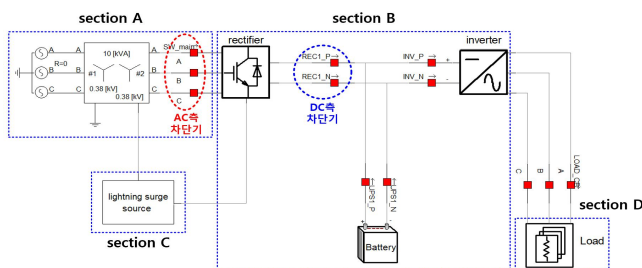
뇌격 발생장치부의 모델링은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 이용하여 그림 8과 같이 독립전원과 타이머로 구성할 수 있다. 여기서, 뇌격은 KS C IEC 62305에서 제시한 표준 파형과 크기를 바탕으로, 최대 50[kV]로 상정하며, 지정된 시간 동안 UPS가 설치된 배전계통에 인가한다.



[그림 8] 뇌격 발생장치부 모델링

3.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 10kW급 UPS의 서지 운용특성을 평가하기 위한 전체 시스템을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서 section A는 수배전반부, section B는 UPS부, section C는 뇌격 발생장치부, section D는 모의 부하부를 나타낸다.



[그림 9] 전체 시스템

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 구현한 시험장치를 바탕으로, 10kW급 UPS의 서지 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 배터리의 정격용량은 16.5[kWh], 운용 전압범위는 210~290[V]으로 상정하고, AC/DC 컨버터의 정격용량은 10[kW], AC 380[V]를 DC 290[V]로 변환하며, 인버터의 정격용량은 10[kW]이다. 또한, 개폐서지의 상정 시나리오는 표 2와 같이 AC 및 DC측 보호기기의 동작과 3[kW], 5[kW], 10[kW]의 부하용량을 고려하여 총 6가지로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	내 역
배터리	정격용량[kWh]
	16.5
	운용 전압범위[V]
AC/DC 컨버터	정격전압[V]
	258
	정격용량[kW]
인버터	AC 입력전압[V]
	380 (3상 3선식)
	DC 출력전압[V]
인버터	정격용량[kW]
	10
인버터	AC 출력전압[V]
	380

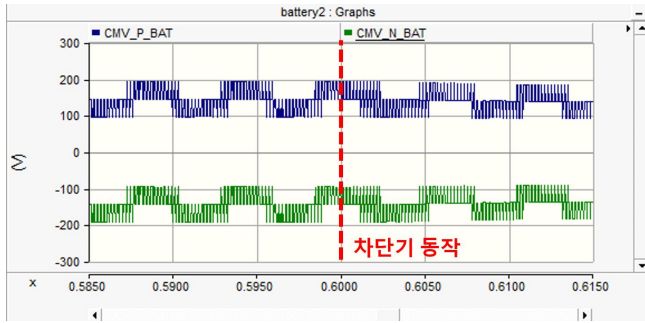
[표 2] 개폐서지 상정 시나리오

시나리오	부하 용량[kW]	보호기기 동작 위치
Case I	3	AC측 보호기기 동작
Case II	5	
Case III	10	
Case IV	3	DC측 보호기기 동작
Case V	5	
Case VI	10	

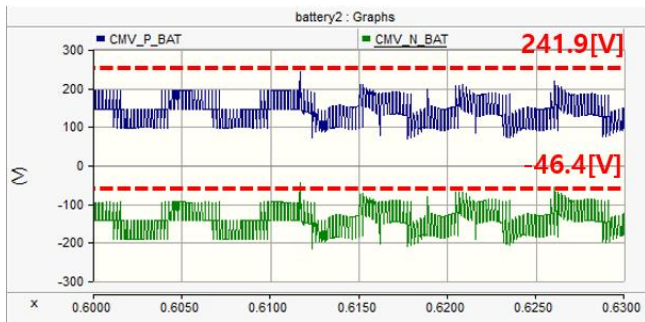
4.2 개폐서지의 운용특성

상기에서 제시한 표 2를 바탕으로, 10kW급 UPS의 개폐서지 운용특성을 나타내면 그림 10, 그림 11과 같다. 여기서, 그림 10은 Case I의 개폐서지의 운용특성을 나타내는데, 배터리의 (+)단자와 (-) 단자 모두 개폐서지가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 한편, 그림 11(a)는 부하용량이 가장 작은 시나리오인 Case IV에 대한 서지의 운용특성을 나타내며, (+) 단자측의 전압이 241.9[V]이고, 정격전압의 167[%] 정도로 산정된다. 또한, 그림 11(b)는 부하용량이 가장 큰 시나리오인 Case VI에 대한 서지의 운용특성을 나타내는데, (+) 단자측의 전압이 279.4[V]이고, 정격전압의 193[%] 정도로 산정된다. 따라서, 상기에서 제시한 상정 시나리오를 바탕으로 개폐서지의 운용특성을 종합적으로 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 개폐서지는 AC측 보호기기 차단 동작보다 DC측 보호기기 차단 동작에서 비교적 크게 발생되고,

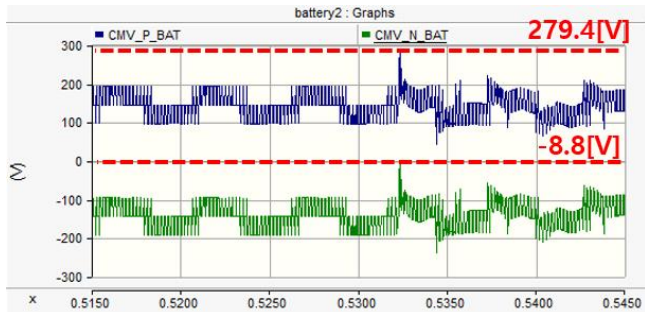
UPS 2차측 부하용량이 증가함에 따라 상승됨을 알 수 있다.



[그림 10] AC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지



(a) Case IV에 대한 서지 운용특성



(b) Case VI에 대한 서지 운용특성

[그림 11] DC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지

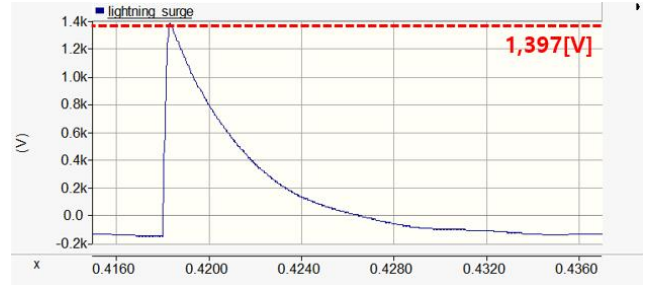
[표 3] 개폐서지 운용특성

시나리오	개폐서지	
	(+) terminal[V]	(-) terminal[V]
Case I	0	0
Case II	0	0
Case III	0	0
Case IV	241.9	-46.4
Case V	256.1	-32.6
Case VI	279.4	-8.8

4.3 뇌서지의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 10kW급 UPS의 뇌서지 운용특성을 나타내면 그림 12와 같다. 여기서, 뇌격 발생장치부를 이용하여 주변압기 2차측에 인가한 약 50[kV]

의 뇌격을 인가한 경우, 배터리의 (+)단자와 접지 사이의 서지 전압은 최대 1,397[V] 정도까지 상승함을 알 수 있다. 따라서, 뇌격 발생시 UPS의 절연내력 수십 배를 초과하는 뇌서지가 인가되어, UPS 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.



[그림 12] 뇌격에 의한 서지 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 개폐서지, 뇌서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 UPS의 서지 시험장치를 모델링한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 서지의 운용특성을 평가한 결과, AC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 거의 발생하지 않지만, DC측 보호기기 동작에 의한 개폐서지는 비교적 크게 발생하며, UPS 2차측 부하용량이 증가함에 따라 상승함을 알 수 있다. 또한, UPS가 설치된 배전계통에 뇌격이 발생하는 경우, 절연내력에 수십 배를 초과하는 뇌서지가 인가되어 UPS의 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2024-00409639, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

참고문헌

- [1] 이민행, 김경화, 김윤호, 김지명, 노대석, “400V급 LVDC 배전계통에 있어서 서지 평가 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 25, No. 9, pp. 491–503, 2024
- [2] 박충근, 한병길, 김경화, 김지명, “배전계통에서 접지망 형태에 따른 과도접지 임피던스 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 23, No. 6, pp. 1–9, 2022