PSCAD/EMTDC를 이용한 30kW급 UPS의 CMV 및 서지 시험장치 모델링

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

The Modeling of Test Device for CMV and Surge in 30kW UPS Using PSCAD/EMTDC

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

요 약

최근, 대규모 전력 공급과 높은 신뢰성이 요구되는 대용량 DC 데이터 센터를 시작으로, 리튬이온 배터리 기반의 대용량 UPS가 도입되고 있다. 하지만, 리튬이온 배터리는 열폭주로 인해 화재를 진압하기 어렵고, 10[kW]를 초과하는 UPS의 경우 안전성 검증 대상에서 제외되고 있어, 전기적 위해요인으로 부터 UPS를 보호하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 CMV와 서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, UPS부, 수용가 부하부, 뇌격 발생 장치부로 구성된 30kW급 UPS의 CMV 및 서지 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 UPS의 CMV와 서지의 운용특성을 평가한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 DC 선로의 (+)극과 접지 단자 사이에 150% 정도로 발생하고, AC측 차단기가 동작하는 경우 DC 선로의 (+)극과 접지 단자 사이에 3배 이상의 개폐서지가 발생함을 알 수 있다. 또한, UPS가 설치된 배전계통에 뇌격이 발생하면 절연내력의 수십 배를 초과하는 뇌서지가 인가되어, UPS 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

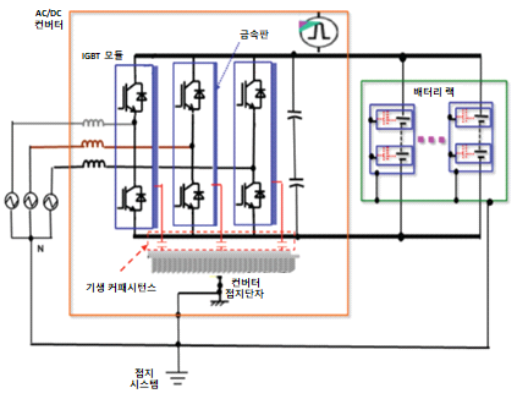
1. 서 론

최근, 신재생에너지의 확대와 송·배전망 투자의 감소 등 전력공급에 대한 안정성이 감소하고 있고, 작년 국내에서 1,000건 이상의 정전이 발생하여, 무정전 전원 공급장치(uninterruptible power supply, UPS)에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히, 대규모 전력 공급과 높은 신뢰성이 요구되는 데이터 센터는 에너지 밀도가 높은 리튬이온 배터리 기반의 대용량 UPS를 도입하고 있다. 하지만, 리튬이온 배터리는 열폭주로 인해 화재를 진압하기 어렵고, 10[kW]를 초과하는 UPS의 경우 안전성 검증 대상에서 제외되고 있어, 전기적 위해요인으로부터 UPS를 보호하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 CMV와 서지의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, UPS부, 수용가 부하부, 뇌격 발생 장치부로 구성된 30kW급 UPS의 CMV 및 서지 시험장치를 모델링한다. 상기에서 제시한 메커니즘 및 모델링을 바탕으로 30kW급 UPS의 CMV와 서지의 운용특성을 평가한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 배터리의 정격전압의 150% 정도 발생하여, 지속적으로 부동충전을 하는 UPS의 절연에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 또한, DC측 차단기가 동작하는 경우 개폐서지가 거의 발생하지 않지만, AC측 차단기에 의한 개폐서지는 배터리의 정격전압의 3배 이상으로 산정되어, UPS 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 한편, UPS가 설치된 배전계통에서 뇌격이 발생하면 절연내력의 수십배를 초과하는 뇌서지가 인가되어, UPS 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

2. UPS의 CMV 및 서지 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV 발생 메커니즘

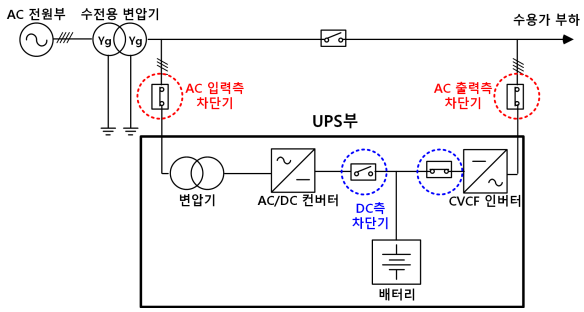
UPS의 컨버터는 AC 전압을 DC로 변환하여 배터리를 충전함과 동시에 인버터에 전력을 공급하기 위하여, 수 kHz의 고주파수 스위칭 동작을 수행하고, 이때 발생하는 온도상승을 억제하기 위하여 방열판(heatsink)을 설치한다. 하지만, 그림 1과 같이 IGBT의 도전부와 방열판(외함) 사이, 배터리의 전극(+,-)과 외함 사이에 에 존재하는 기생 커패시턴스(stray capacitance)에 의하여 공통모드전압(CMV, common mode voltage)이 발생할 수 있다.



[그림 1] IGBT 스위칭에 의한 CMV 발생 메커니즘

2.2 차단기 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

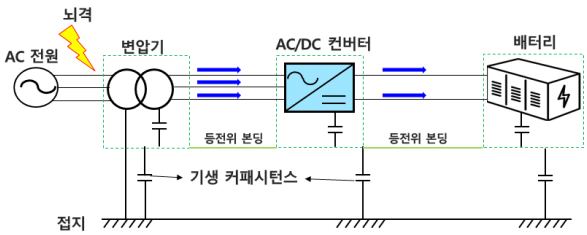
일반적으로, UPS는 그림 2와 같이 변압기, AC/DC 컨버터, 배터리, CVCF 인버터로 구성된다. 여기서, 사고 유형과 위치에 따라 AC 및 DC 차단기가 동작하면, 서로 다른 형태의 개폐서지가 발생하여 UPS에 악영향을 미칠 수 있다. 즉, 시간에 따른 전류의 변화량(di/dt)과 DC 전로 및 전력변환장치의 인덕턴스가 결합하여 개폐서지가 발생하고, 차단기 양 극간에 발생된 커패시턴스의 순간적인 에너지 방전으로 인해 배터리 정격전압의 수배를 초과하는 과도서지가 발생하게 된다.



[그림 2] 차단기 동작에 의한 개폐서지 발생 메커니즘

2.3 뇌격에 의한 서지 발생 메커니즘

그림 3과 같이 UPS가 설치된 배전선로에 뇌격이 발생하면 피뢰기에 의해 대지(접지)로 방전되는데, 공통접지를 통해 유입된 뇌격의 에너지는 UPS의 전력변환장치와 배터리의 기생 커패시턴스와 결합되어 큰 서지를 발생시킬 수 있다. 여기서, 접지로 방전된 뇌격은 국지적으로 대지전위를 상승시키고, 절연내력의 수 십배를 초과하는 서지를 발생시켜, UPS의 안전에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 안전을 위해 UPS를 포함한 전기설비의 도전성 부분에 등전위 본딩을 적용한 경우, 인근의 작업자에게 심각한 신체적인 손상을 발생시킬 수 있다.

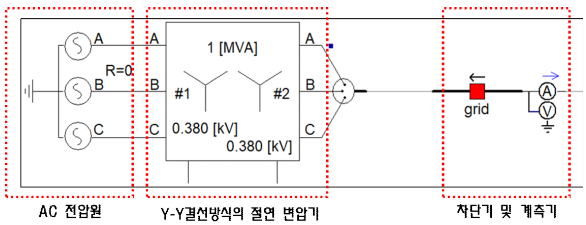


[그림 3] 뇌격에 의한 서지 발생 메커니즘

3. 30kW급 UPS의 CMV 및 서지 시험장치의 모델링

3.1 AC 전원부

AC 전원부는 그림 4와 같이 AC 전원, 연계용 변압기, 차단기, 등으로 구성된다. 여기서, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식이고, 연계용 변압기는 30[kVA]의 정격용량을 가지며, Y-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 차단기는 단락 및 지락이 발생할 경우, 사고지점으로부터 계통을 분리시키는 역할을 수행한다.

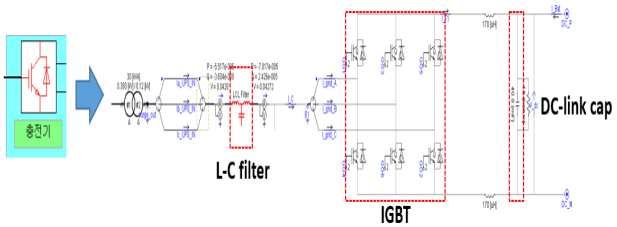


[그림 4] AC 전원부 모델링

3.2 UPS부

3.2.1 AC/DC 컨버터

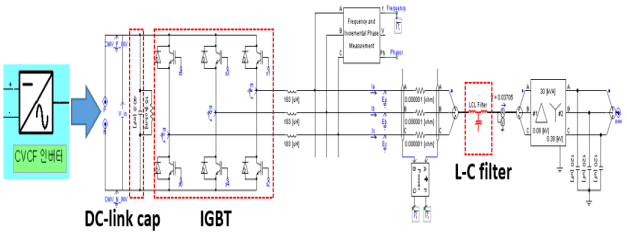
UPS부의 AC/DC 컨버터는 그림 5와 같이 L-C 필터, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터, 등으로 구성된다. 여기서, L-C 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감시키기 위해 사용되고, IGBT 모듈은 3상 AC 380[V]의 전압을 DC 125[V]의 전압으로 변환하며, DC-Link 커패시터는 출력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하는 역할을 수행한다.



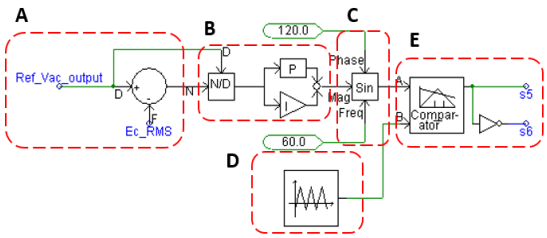
[그림 5] 배터리 충전기 모델링

3.2.2 CVCF 인버터

UPS부의 CVCF 인버터는 그림 6과 같이 DC-Link 커패시터, IGBT 모듈, L-C 필터, 등으로 구성된다. 또한, CVCF 인버터의 한상에 대한 제어 회로는 그림 7과 같이 나타낼 수 있는데, A부분은 목표전압과 현재 출력전압을 비교하여 오차값을 산정하는 것이고, B부분은 오차 값에 대하여 각각 PI제어를 수행하는 것이며, C부분은 목표로 하는 전압의 파형, 주파수 및 위상을 결정하는 역할을 수행하는 것을 나타낸다. 또한, D부분은 삼각파의 반송파를 출력하는 것을 나타내고, E부분은 기준파와 반송파를 비교하여 PWM 신호로 변환한다.



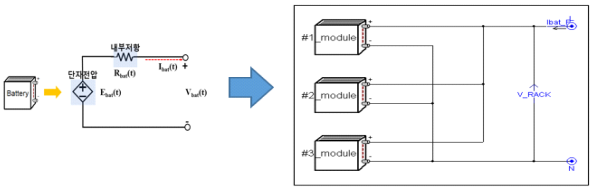
[그림 6] CVCF 인버터 모델링



[그림 7] CVCF 인버터 제어회로 모델링

3.2.3 배터리

배터리는 그림 8과 같이 단자전압, 내부저항 등으로 이루어지는데, 다수의 배터리 모듈을 직병렬로 조합하여 배터리랙의 모델링을 수행한다. 구체적으로, 배터리의 기전력은 SOC의 역함수와 지수함수의 조합으로 나타내며, SOC는 배터리 전체 용량에서 누적된 전류의 비로 충전상태를 의미한다. 또한, 배터리 단자전압은 기전력에서 내부저항에 의한 전압강하를 뺀 값이며, 이를 수식으로 나타내면 식 (1)~식 (3)과 같다.



[그림 8] 배터리 모델링

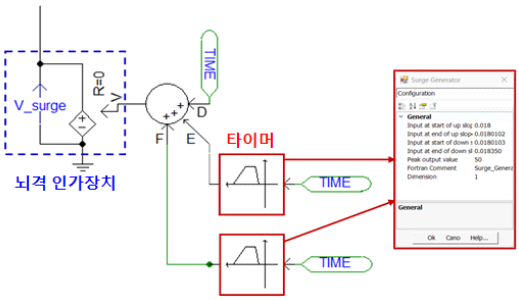
$$E_{bat}(t) = E_0 - K\frac{1}{SOC} + Aexp(-BQ(1-SOC)) \quad (1)$$

$$SOC = \frac{Q - \int_{t_0}^{t_1} I_{bat}(t)\,dt}{Q} \times 100 \quad (2)$$

$$V_{bat}(t) = E_{bat}(t) - I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (3)$$

3.3 뇌격 발생장치부

뇌격 발생 장치부의 모델링은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 이용하여 그림 9와 같이 독립전원과 타이머로 구성할 수 있다. 여기서, 뇌격은 최대 50[kV]로 상정하며, 지정된 시간동안 UPS가 설치된 배전계통에 투입된다.



[그림 9] 뇌격 발생장치부 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

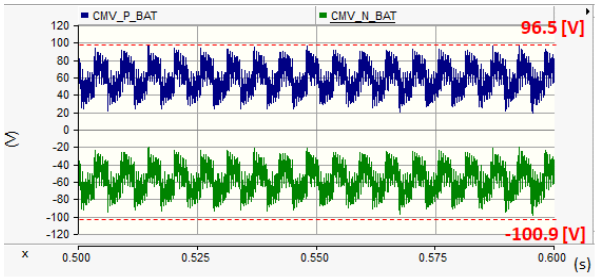
상기에서 제시한 30kW UPS 시험장치의 모델링을 바탕으로, CMV, 개폐서지, 뇌서지의 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 배터리의 정격용량은 20[kWh], 운용 전압범위는 SOC 80% 기준 96~128[V]으로 상정하고, AC/DC 컨버터의 정격용량은 30[kW]이고 AC 380[V]의 입력을 128[V]의 DC로 변환한다. 또한, CVCF 인버터는 정격용량이 30[kW]이고, 96~135[V]의 DC 전압을 3상 4선식의 AC 380[V]로 변환하여 부하에 공급하는 것으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내용
배터리	정격용량[kWh]	20
	운용 전압범위[V]	96 ~ 128 (SOC 80% 기준)
	충전전압[V]	128
AC/DC 컨버터	정격용량[kW]	30
	AC 입력전압[V]	380 (3상 3선식)
	DC 출력전압[V]	128
CVCF 인버터	정격용량[kW]	30
	입력 전압범위[V]	96 ~ 135
	AC 출력전압[V]	380 (3상 4선식)

4.2 CMV 운용특성

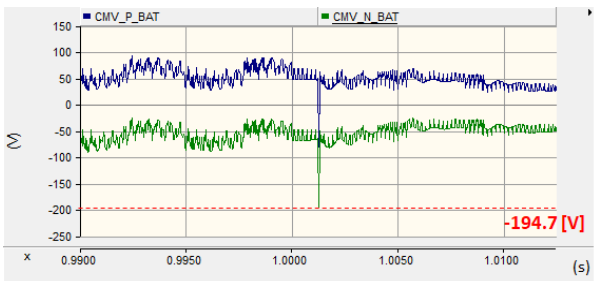
상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 IGBT 스위칭에 의한 UPS의 CMV 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 배터리의 (+)단자와 접지 사이의 CMV는 96.5[V] 정도로 산정되고, (-)단자와 접지 사이에서는 -100.9[V] 정도의 CMV가 발생함을 알 수 있다. 즉, 배터리의 충전전압이 128[V]이고, (+)와 (-)단자에 각각 ±64[V]의 DC 전압이 인가되므로, 배터리의 정격전압에 비해 각각 150.7%, 157.6% 정도의 CMV가 발생함을 알 수 있다. 따라서, IGBT에 의한 CMV가 배터리의 정격전압을 초과하여, 지속적으로 부동충전을 하는 UPS의 절연에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.



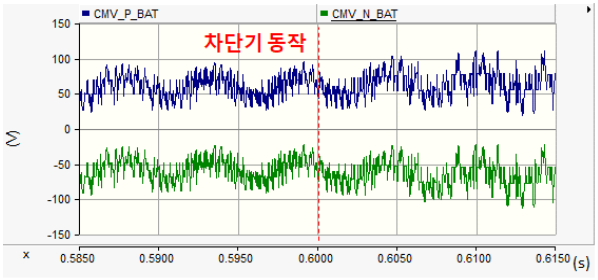
[그림 9] IGBT 스위칭에 의한 CMV의 운용특성

4.3 개폐서지의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 차단기 동작에 따른 UPS의 개폐서지 운용특성을 나타내면 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)는 AC측 차단기 동작에 의한 개폐서지를 나타내는데, (-)단자 측의 개폐서지가 -194.7[V]이고 정격전압의 304.2% 정도로 산정된다. 따라서, AC측 차단기 동작시 UPS의 절연내력(정격전압의 3배 이하)을 초과하는 개폐서지가 발생하여, UPS 설비에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 10(b)는 DC측 차단기 동작에 의한 개폐서지를 나타내는데, (+)단자와 (-)단자 모두 개폐서지가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.



(a) AC측 차단기 동작 시

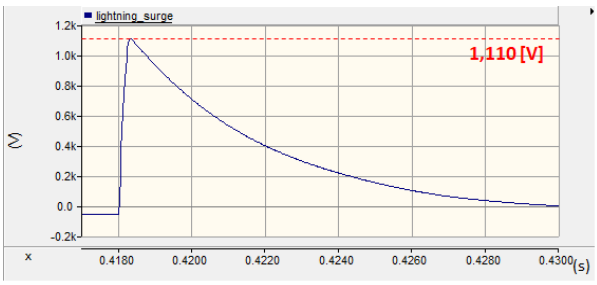


(b) DC측 차단기 동작 시

[그림 10] 차단기 위치에 따른 개폐서지의 운용특성

4.4 뇌서지의 운용특성

상기에서 제시한 표 1의 시뮬레이션 조건에 따라 저항의 크기에 따른 NGR의 운용특성을 나타내면 그림 11 같다. 여기서, 뇌격 발생장치부를 이용하여 주변압기 2차측에 인가한 약 50[kV]의 뇌격을 인가한 경우, 배터리의 (+)단자와 접지 사이의 서지 전압은 최대 1,110[V] 정도까지 상승함을 알 수 있다. 따라서, 뇌격 발생시 UPS의 절연내력의 수십배를 초과하는 뇌서지가 인가되어, UPS 설비에 심각한 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.



[그림 11] 뇌격에 따른 서지의 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 CMV, 개폐서지, 뇌서지의발생 메커니즘을 제시하고,전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 AC 전원부, UPS부, 수용가 부하부, 뇌격 발생장치부로 구성된 30kW급 UPS 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 CMV, 개폐서지, 뇌서지의 운용특성을 평가한 결과, 배터리의 정격전압 이상의 CMV가 발생하고, AC측 차단기 동작시 절연내력을 초과하는 개폐서지가 발생함을 알 수 있다. 또한, UPS가 설치된 배전계통에 뇌격이 발생하는 경우, 절연내력에 수십배를 초과하는 뇌서지가 인가되됨을 알 수 있다.

참고문헌

[1] 김지연 외5인, "LiB 기반 무정전전원장치의 안전기술 개발", 2023년도 대한전기학회 전기설비부분회 추계학술대회 논문집, pp. 126 - 127, 2023.10