

PSCAD/EMTDC에 의한 UPS의 모델링 및 사고특성에 관한 연구

이승호, 유현상, 노성은, 이중선, 노대석*

한국기술교육대학교

e-mail: seung77ho45@koreatech.ac.kr

A Study on the Modeling and Fault Characteristics of UPS using PSCAD/EMTDC

Seung-Ho Lee, Hyun-Sang You, Seong-Eun Rho, Joong-Seon Lee,

Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 빅데이터, 자율주행차 등의 상용화로 데이터 센터의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 전압 강하, 주파수 변동, 정전 등의 전력 품질 문제를 개선할 수 있는 대용량 UPS의 도입이 증가하고 있는 실정이다. 하지만, 2022년 10월에 발생한 성남 데이터 센터 화재는 포함하여 최근 5년간 국내에서 총 59건의 UPS 화재 사고가 지속적으로 발생하여, UPS의 전기적 위해요인에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 ESS의 화재사고 사례를 바탕으로 UPS의 주요 사고유형을 AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락, LC 필터측 지락, 배터리 모듈 및 랙 단락으로 분류하고, 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 사고 발생장치부, 수용가 부하부 등으로 구성된 10kW급 UPS 시험장치의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 UPS의 사고유형과 모델링을 바탕으로 10kW급 UPS 시험장치의 사고전류 특성을 분석한 결과, 배터리 랙에서 단락이 발생하는 경우 배터리 측에서 공급되는 사고전류가 가장 높게 산정되어, 4가지의 사고유형 가운데 배터리 랙 단락이 UPS의 안전에 가장 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 빅데이터 등의 상용화로 데이터 센터의 수요가 급증하고 있는데, 이에 따라 전압 강하, 주파수 변동, 정전 등의 전력 품질 문제를 개선할 수 있는 대용량 UPS의 도입이 증가하고 있다. 이러한 대용량 UPS는 기존의 납축전지보다 높은 에너지 밀도와 출력을 가진 리튬이온 배터리를 사용하고 있는데, 배터리의 열폭주에 의한 대규모 화재의 가능성이 보고되고 있다[1]. 특히, 2022년 10월에 발생한 성남 데이터 센터의 UPS 화재로 인한 재산피해가 약 400억원으로 추정되어, UPS의 전기적 위해요인 중의 하나인 사고전류에 대한 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로 UPS의 사고유형을 AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락 및 LC 필터측 지락, 배터리 모듈 단락 및 랙단락으로 분류한다. 또한, 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 수배전반부, UPS부, 사고발생 장치부, 수용가 부하부, 등으로 구성된 10kW급 UPS 시험장치의 모델링을 수행한다.

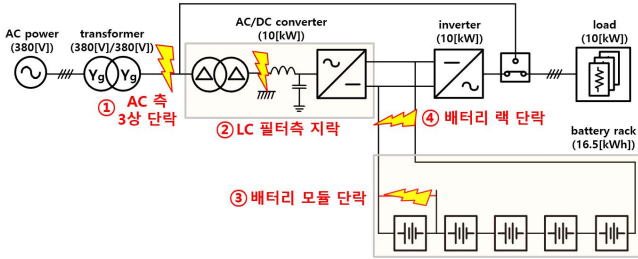
상기에서 제시한 모델링과 다양한 상정사고 조건을 바탕으로 사고전류 특성을 분석한 결과, AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락

시, 배터리 측에서 공급되는 사고전류가 103[A] 정도로 산정되고, AC/DC 컨버터의 LC 필터측 지락사고 시, 지락전류의 경로가 형성되지 않아 사고전류가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 배터리 모듈 및 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, 배터리 측에서 공급되는 사고전류가 각각 정격 방전전류의 314[%], 459[%] 정도로 산정되어, 4가지의 사고유형 중 배터리 랙의 단락사고가 UPS의 안전성에 가장 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

2. UPS의 사고유형 분석

본 논문에서는 UPS와 유사한 구조를 가진 ESS의 화재사고를 분석한 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로 UPS의 사고유형을 제시한다. 즉, UPS의 사고유형은 그림 1과 같이, AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락 및 LC 필터측 지락, 배터리 랙 단락 및 모듈 단락 등의 사고로 구분된다. 여기서, 그림 1의 ①과 같이 AC/DC 컨버터의 AC 측에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, AC 전원과 배터리로부터 사고전류가 공급될 가능성이 있다. 또한, 그림 1의 ②와 같이 AC/DC 컨버터의 LC 필터

측에서 컨버터의 빈번한 스위칭 동작에 의한 열화에 의하여 지락 사고가 발생할 가능성이 있다. 한편, 그림 1의 ③, ④와 같이 배터리 리 모듈 및 랙 단락이 발생하는 경우, 배터리로부터 큰 사고전류가 발생하여 배터리의 화재로 이어질 가능성이 있다.



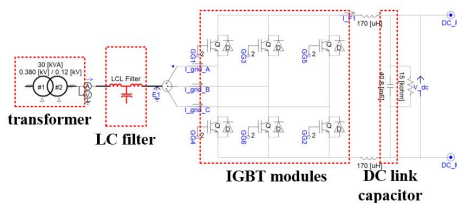
[그림 1] UPS의 사고유형

3. 10kW급 UPS 시험장치의 모델링

3.1 UPS부

3.1.1 AC/DC 컨버터

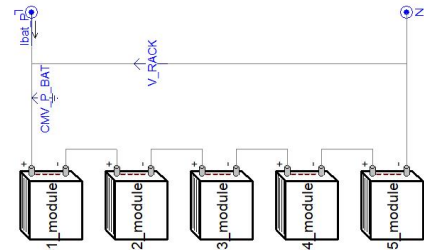
PSCAD/EMTDC를 이용하여 변압기, LC 필터, IGBT 모듈, DC Link 커패시터, 등으로 구성된 AC/DC 컨버터의 모델링을 수행하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 변압기는 Yg-Δ 결선방식으로 3상 380[V]를 230[V]로 변환하고, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감시키기 위해 사용된다. 한편, IGBT 모듈은 3상 AC 230[V]의 전압을 DC 290[V]의 전압으로 변환하며, DC Link 커패시터는 출력단의 직류 전압을 안정적으로 유지한다.



[그림 2] AC/DC 컨버터의 모델링

3.1.2 배터리

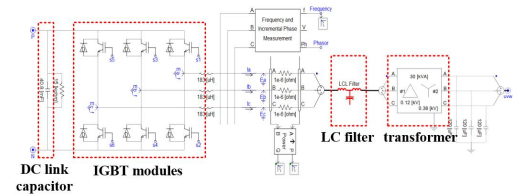
PSCAD/EMTDC에서 제공하는 배터리 라이브러리를 바탕으로 배터리 랙의 모델링을 수행하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 랙은 58[V]의 배터리 모듈을 5S1P로 연결하여, 258[V]의 정격전압과 16.5[kWh]의 정격용량으로 구성한다.



[그림 3] 배터리의 모델링

3.1.3 인버터

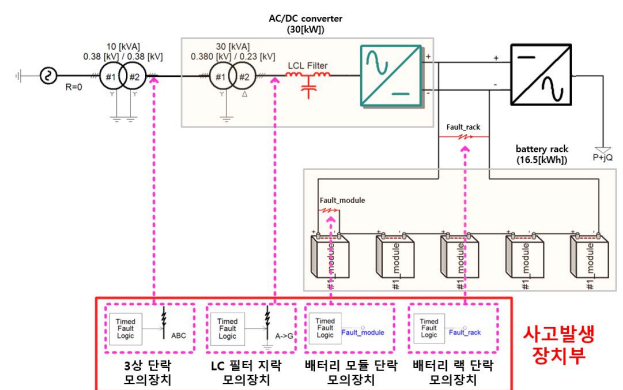
DC Link 커패시터, IGBT 모듈, LC 필터, 변압기, 등으로 구성된 인버터의 모델링을 수행하면, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DC Link 커패시터는 입력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하고, IGBT 모듈은 DC 290[V]의 전압을 3상 AC 230[V]의 전압으로 변환한다. 또한, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감하기 위해 사용하며, 변압기는 Δ-Yg 결선방식으로 127[V]/380[V]의 변압비를 적용한다.



[그림 4] 인버터의 모델링

3.2 사고발생 장치부

사고전류의 운용특성을 모의하기 위한 사고발생 장치부는 그림 5와 같이, AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락 및 LC 필터측 지락, 배터리 랙 단락 및 모듈 단락의 사고유형에 따른 사고 발생 모의 장치로 구성된다. 여기서, 각 사고유형은 설계동 사례 및 기술기준에 근거한 단락 및 지락 저항을 상정한다.



[그림 5] 사고발생 장치부의 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

10kW급 UPS 시험장치의 사고특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 수배전반부는 AC 380[V]의 3상 4선식이고, 연계용 변압기의 정격용량은 10[kW]이며, Yg-Yg 결선방식으로 상정한다. 또한, AC/DC 컨버터와 인버터의 정격용량은 10[kW], AC측과 DC측의 전압은 각각 380[V], 290[V]를 적용하고, 배터리 랙은 258[V]의 정격전압과 16.5[kWh]의 정격용량을 상정한다. 한편, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 사고유형에 따른 사고 시나리오는 AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락, LC 필터측 지락, 배터리 모듈 단락, 배터리 랙 단락으로 상정한다. 여기서, 단락 저항은 UPS 제조사가 제시한 값을 바탕으로 0.1[Ω], 지락 저항은 KS C IEC 60364-4-41의 저압 일반설비 기술기준을 바탕으로 10[Ω]을 상정한다.

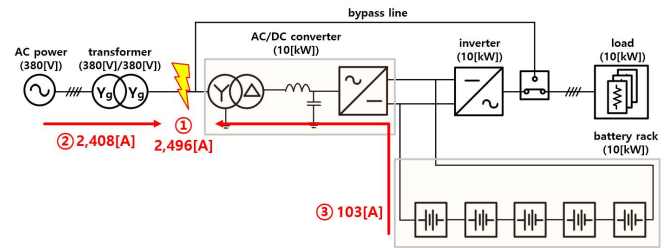
[표 1] 시뮬레이션 조건

구분	내역		
수배전반부	전압[V]	380 (3상 3선식)	
	변압기 정격용량[kW]	10	
	변압기 결선 방식	Yg-Yg	
UPS부	AC/DC 컨버터	변압기 결선 방식	Yg-Δ
		정격용량[kW]	10
		입력전압[V]	380
		출력전압[V]	290
	배터리	구조	5S1P
		정격 전압[V]	258
		정격 용량[kWh]	16.5
		정격 방전전류[A]	64
		SOC[%]	97
	인버터	변압기 결선 방식	Δ-Yg
		정격용량[kW]	10
		입력전압[V]	290
		출력전압[V]	380

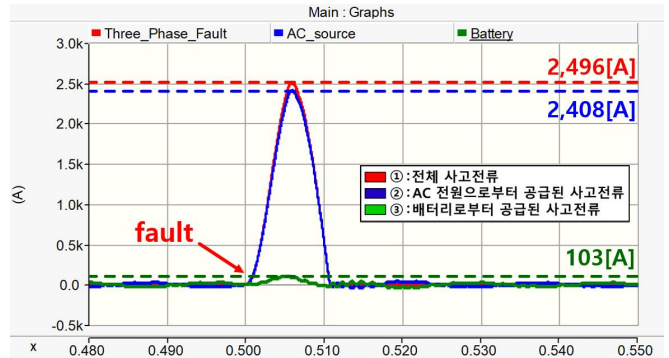
4.2 10kW급 UPS 시험 장치의 사고특성

4.2.1. AC/DC 컨버터의 AC측 3상 단락에 의한 사고전류 특성

AC/DC 컨버터의 AC측에서 3상 단락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6의 (a)는 AC 전원과 배터리로부터 공급되는 사고전류의 흐름도, (b)는 AC/DC 컨버터의 AC측의 사고전류 특성을 나타낸다. 즉, 사고전류는 AC 전원(①)으로부터 2,408[A] 정도 공급되고, 배터리(②)로부터 103[A] 정도 유입되어, 사고지점에 흐르는 전체 사고전류(③)는 2,496[A]로 산정됨을 알 수 있다.



(a) 사고전류 흐름도

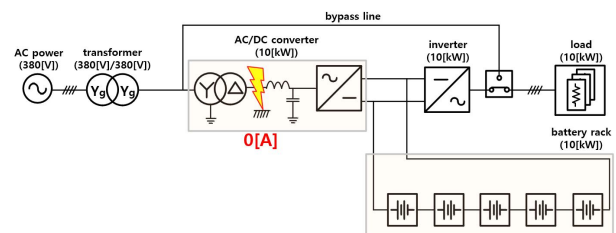


(b) 사고전류 특성

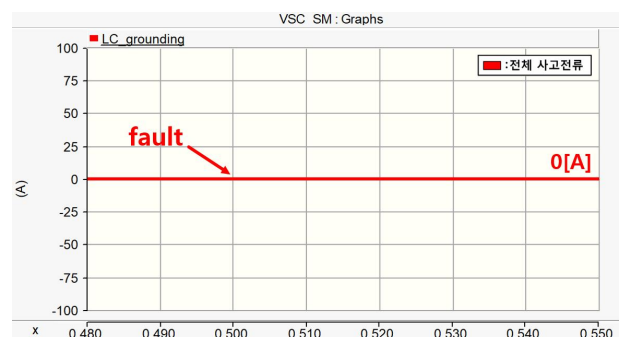
[그림 6] AC/DC 컨버터 AC측 3상 단락 시 사고전류 특성

4.2.2 AC/DC 컨버터의 LC 필터측 지락에 의한 사고전류 특성

AC/DC 컨버터의 LC 필터측에서 지락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, AC/DC 컨버터의 변압기가 Yg-Δ 결선방식을 채용하고 있어, 지락 사고전류의 경로가 형성되지 않아 사고전류가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.



(a) 사고전류 흐름도

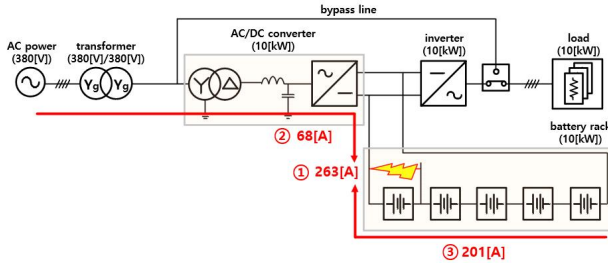


(b) 사고전류 특성

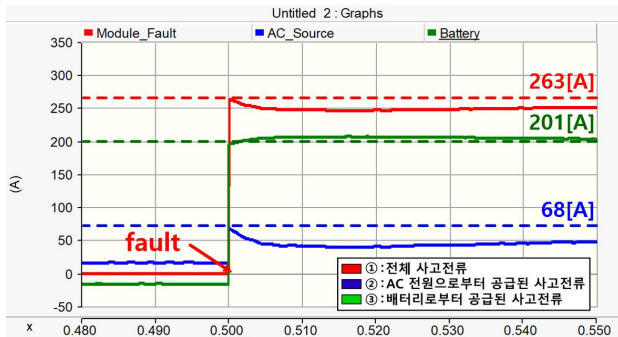
[그림 7] AC/DC 컨버터 LC 필터 지락 시 사고전류 특성

4.2.3 배터리 모듈 단락에 의한 사고전류 특성

배터리 모듈에서 단락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원(①)으로부터 68[A] 정도 공급되고, 배터리(②)로부터 201[A] 정도 유입되어, 사고지점에 흐르는 전체 사고전류(③)는 263[A]로 산정됨을 알 수 있다.



(a) 사고전류 흐름도

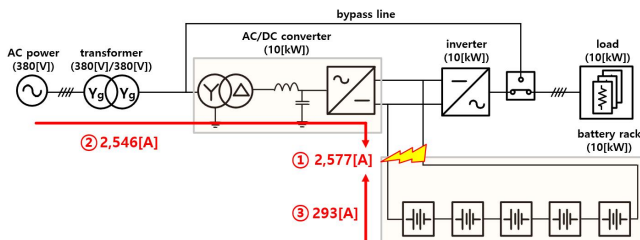


(b) 사고전류 특성

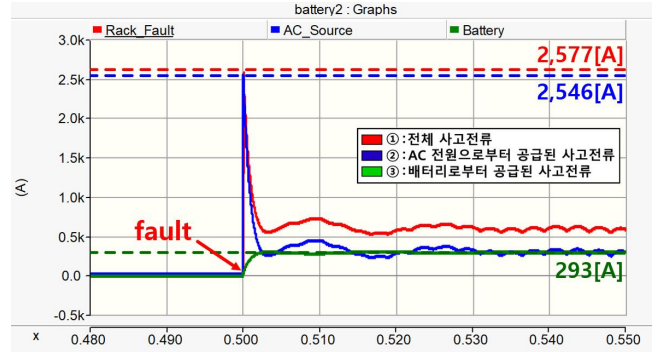
[그림 8] 배터리 모듈 단락 시 사고전류 특성

4.2.4 배터리 랙 단락에 의한 사고전류 특성

배터리 랙에서 단락사고가 발생한 경우의 사고전류 특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원(①)으로부터 2,546[A] 정도 공급되고, 배터리(②)로부터 293[A] 정도 유입되어 사고지점에 흐르는 전체 사고전류(③)는 2,577[A]로 산정됨을 알 수 있다. 따라서, 배터리 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, AC 전원에서 공급되는 높은 사고전류에 의해 AC/DC 컨버터가 손상될 가능성이 있고 배터리로부터 높은 사고전류가 발생하여, 배터리에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



(a) 사고전류 흐름도



(b) 사고전류 특성

[그림 9] 배터리 랙 단락 시 사고전류 특성

[표 2] 사고유형별 사고전류 특성

Case	AC 전원으로부터 공급되는 사고전류[A]	배터리로부터 공급되는 사고전류[A]	전체 사고전류[A]
Case I	2,408	103	2,496
Case II	0	0	0
Case III	68	201	263
Case IV	2,546	293	2,577

5. 결 론

AC/DC 컨버터의 AC측에서 3상 단락사고가 발생하는 경우 큰 사고전류가 흐르지만, 배터리 측에서 공급되는 사고전류는 103[A] 정도로 산정되어, 배터리의 안전성에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, AC/DC 컨버터의 LC 필터측에서 지락사고가 발생하는 경우, 변압기가 Δ - Δ 결선방식을 채용하고 있어, 지락 사고전류의 경로가 형성되지 않아 사고전류가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 한편, 배터리 모듈 및 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, 배터리 측에서 공급되는 사고전류는 각각 정격 방전 전류의 314[%], 459[%] 정도로 산정되어, 배터리에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 배터리 랙 단락이 4가지의 사고유형 중에서, UPS의 안전성에 가장 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 김윤호 외 4인, “ESS의 사고유형별 안전성 평가에 관한 연구”, 2023년도 전기학회논문지, 제 72권 8호, pp.887-896, 8월, 2023년