

PSCAD/EMTDC를 이용한 무변압기형 10kW급 UPS의 모델링 및 사고전류 특성에 관한 연구

이승호*, 이중선*, 호삼 살라*, 이수용*, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과

e-mail:seung77ho45@koreatech.ac.kr

Modeling and Fault Current Characteristics of 10kW Transformer-less UPS based on PSCAD/EMTDC

Seung-Ho Lee*, Joong-Seon Lee*, Hossam S. Mohamed*,

Soo-Yong Lee*, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, 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 UPS(uninterruptible power supply system)의 도입이 증가하고 있는 실정이다. 여기서, UPS는 구성 방식에 따라 변압기형과 무변압기형으로 구분되는데, 무변압기형 UPS의 경우 전력 변환 과정에서의 손실이 적어 대규모 데이터 센터에 도입되고 있다. 하지만, 2022년 10월 성남 데이터 센터 화재를 포함하여 최근 5년간 국내에서 총 59건의 UPS 화재 사고가 지속적으로 보고되고 있어, UPS의 전기적 위험요인에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 UPS의 주요 사고유형을 정류기 1차측 단락 및 지락, DC 전로 지락, 배터리 모듈 및 랙 단락으로 분류하고, 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 무변압기형 UPS의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 사고유형과 모델링을 바탕으로 사고전류 특성을 분석한 결과, 배터리 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, 배터리 모듈로부터 공급되는 사고전류는 정격 방전전류의 427[%]로 산정되어, UPS에 가장 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

1. 서 론

최근, 빅데이터, 자율주행차 등의 상용화로 데이터 센터의 수요가 급증하고 있는데, 이에 따라 전압 강하, 주파수 변동, 정전 등의 전력 품질 문제를 개선할 수 있는 대용량 무변압기형 UPS의 도입이 증가하고 있다. 이러한 UPS는 높은 에너지 밀도와 출력을 가진 리튬이온 배터리를 사용하고 있는데, 배터리의 열폭주에 의한 대규모 화재의 가능성이 보고되고 있다. 하지만 UPS에 대한 기존의 인증 기준은 한정적인 용량과 성능을 위주로 나타내어 UPS의 안전성을 확보하기 어려운 실정이다. 특히, 2022년 10월에 발생한 성남 데이터 센터의 UPS 화재로 인한 재산피해가 약 400억원으로 추정되어, UPS의 전기적 위험요인 중의 하나인 사고전류에 대한 연구가 요구되고 있다.

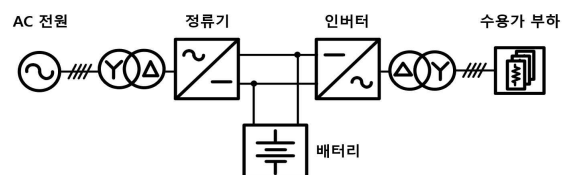
따라서, 본 논문에서는 UPS의 사고유형을 정류기 3상 단락 및 지락, DC 전로 (+)측 및 (-)측 지락, 배터리 랙 단락 및 모듈 단락으로 분류하고, 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 무변압기형 UPS의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링과 상정사고 조건을 바탕으로 사고전류 특성을 분석한 결과, 배터리 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, 배터리 모

듈로부터 공급되는 사고전류는 배터리 정격 방전전류의 427[%]인 726[A]로 산정되어, UPS에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

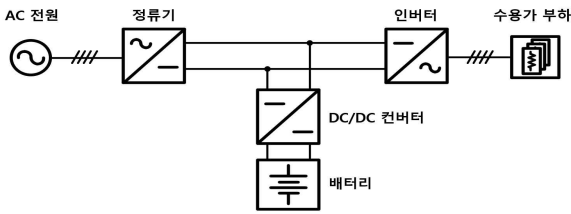
2. UPS의 구성 및 사고유형 분석

2.1 UPS의 구성

UPS는 그림 1과 같이, 구성 방식에 따라 변압기형과 무변압기형으로 구분할 수 있다. 여기서, 그림 1의 (a)와 같이 변압기형 UPS는 입·출력 전압을 승·강압하기 위하여 대용량 변압기를 포함하는 반면, 그림 1의 (b)와 같이 무변압기형 UPS는 IGBT 기반의 DC/DC 컨버터를 사용하여 승·강압을 수행한다. 따라서, 무변압기형 UPS는 효율이 높고, 부피와 무게를 경감할 수 있어 데이터 센터에 많이 사용되는 추세이다.



(a) 변압기형 UPS

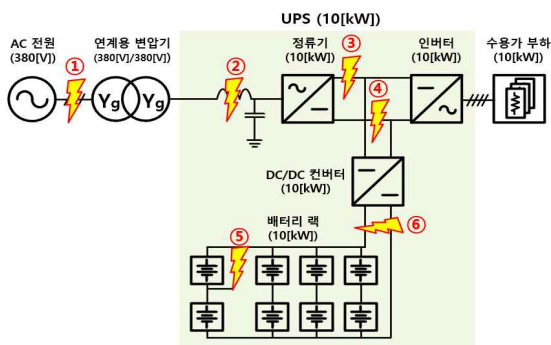


(b) 무변압기형 UPS

[그림 1] UPS의 구성도

2.2 UPS의 사고유형

본 논문에서는 UPS와 유사한 구조를 가진 ESS의 화재사고를 분석한 “1차 ESS 화재사고 원인조사 결과보고서”를 바탕으로 UPS의 사고유형을 제시한다. 즉, UPS의 사고유형은 그림 2와 같이, 정류기 AC측 3상 단락 및 지락, DC 전로 (+)측 및 (-)측 지락, 배터리 랙 및 모듈 단락 등으로 구분된다. 여기서, 그림 2의 ①과 같이 정류기 AC 측에서 3상 단락사고가 발생하는 경우, AC 전원과 배터리로부터 사고전류가 공급될 가능성이 있고, 그림 2의 ②와 같이 빈번한 스위칭 동작에 의한 열화로 인하여 지락사고가 발생할 가능성이 있다. 또한, 그림 2의 ③, ④와 같이 정류기 2차측의 DC 링크 커패시터가 중성선에 연결되어 있는 구조에 의하여, (+)측 및 (-)측에 지락사고가 발생할 수 있다. 한편, 그림 2의 ⑤, ⑥과 같이 배터리 모듈 및 랙 단락이 발생하는 경우, 배터리로부터 큰 사고전류가 발생하여 배터리의 화재로 이어질 가능성이 있다.



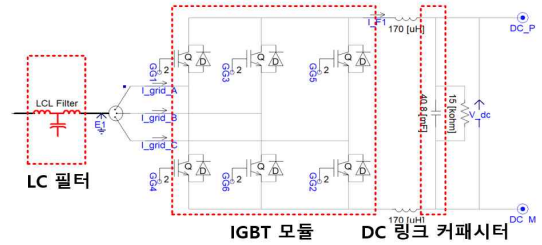
[그림 2] UPS의 사고유형

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 10kW급 무변압기형 UPS의 모델링

3.1 UPS의 정류기부

UPS의 정류기부는 그림 3과 같이 LC 필터, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터, 등으로 구성된다. 여기서, LC 필터는 전력 변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감시키고, IGBT 모듈은 3상 AC 380[V]의 전압을 DC 800[V]의 전압으로 변환하며,

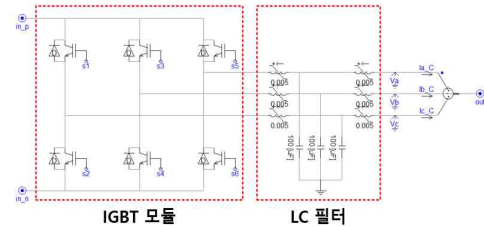
DC 링크 커패시터는 출력단의 직류 전압을 안정적으로 유지한다.



[그림 3] 정류기의 모델링

3.2 UPS의 인버터부

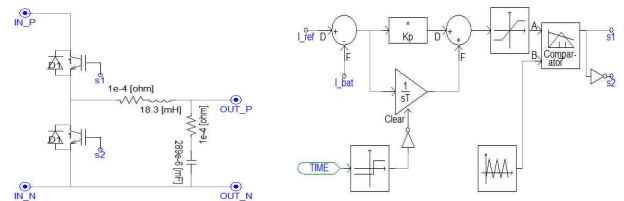
UPS의 인버터부는 그림 4와 같이 DC 링크 커패시터, IGBT 모듈, 등으로 구성된다. 여기서, IGBT 모듈은 DC 800[V]의 전압을 3상 AC 360[V]의 전압으로 변환하고, LC 필터는 전력 변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감한다.



[그림 4] 인버터의 모델링

3.3 UPS의 DC/DC 컨버터부

UPS의 DC/DC 컨버터부는 그림 5와 같이 컨버터와 제어회로로 구성된다. 여기서 컨버터는 그림 5의 (a)와 같이, 2개의 IGBT를 통해 정류기와 배터리 측의 전압을 승·강압하여 충방전 동작을 수행한다. 또한, PI 제어를 통한 컨버터의 제어회로는 그림 5의 (b)와 같이 나타낼 수 있다.



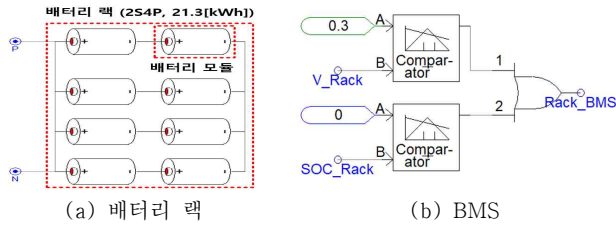
(a) 컨버터

(b) 제어회로

[그림 5] DC/DC 컨버터의 모델링

3.4 UPS의 배터리부

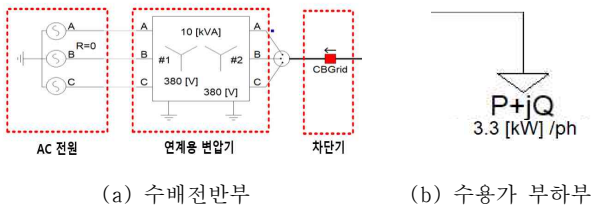
PSCAD/EMTDC에서 제공하는 배터리 라이브러리를 바탕으로, 배터리의 모델링을 수행하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 그림 6의 (a)는 배터리 랙, (b)는 BMS의 모델링을 나타낸다.



[그림 6] 배터리의 모델링

3.5 수배전반부 및 수용가 부하부

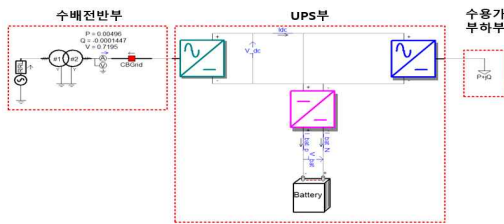
AC 전원, 연계용 변압기로 구성된 수배전반부와 10[kW]의 용량을 가진 수용가 부하부를 모델링하면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 (a)와 같이, AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식이고, 연계용 변압기는 10[kW]의 정격용량을 가지며, Yg-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 수용가 부하부는 그림 7의 (b)와 같이 10[kW]로 구성한다.



[그림 7] 수배전반부 및 수용가 부하부의 모델링

3.6 전체 시스템

상기의 수배전반부, UPS부, 수용가 부하부를 바탕으로 10kW급 무변압기형 UPS의 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다.



[그림 8] 전체 시스템

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

10kW급 무변압기형 UPS의 사고전류 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 여기서, 정류기, 인버터, DC/DC 컨버터의 정격용량은 10[kW]이고, AC, DC측의 전압은 각각 380[V], 800[V]를 적용한다. 또한, 배터리 랙은 360[V]의 정격전압과 21.3[kWh]의 정격용량으로 상정한다. 한편, 상기의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 사고유형에 따른 상정 사고 시나리오를 나타내면 표 2와 같다. 여기서, Case I ~ Case VI는 각각 정류기의 3상 단락 및 지락, DC 전로 지락, 배터리 단락에 대한

사고 시나리오를 나타낸 것이다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

항 목	내 역		
수배전 반부	정격 전압[V]		3Φ 380
	정격 용량[kW]		10
	연계용 변압기 결선 방식		Yg-Yg
UPS부	정류기	입력 전압[V]	380
		출력 전압[V]	800
	인버터	입력 전압[V]	800
		출력 전압[V]	380
	DC/DC 컨버터	입력 전압[V]	800
		출력 전압[V]	360
	배터리	정격 전압[V]	360
		정격 용량[kWh]	21.3
		정격 방전전류[A]	170 (1C-rate)

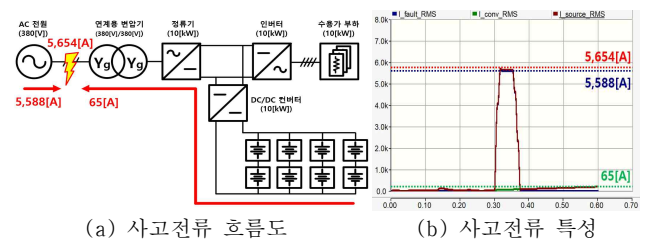
[표 2] 상정 사고 시나리오

	사고 유형		단락 저항[mΩ]	지락 저항[Ω]
Case I	정류기	3상 단락	10	—
Case II	1차측	지락	—	10
Case III	DC	(+)측 지락	—	10
Case IV	전로측	(-)측 지락	—	10
Case V	배터리	모듈 단락	10	—
Case VI	측	랙 단락	10	—

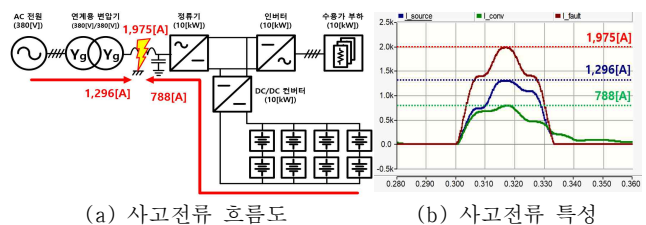
4.2 10kW급 무변압기형 UPS의 사고전류 특성

4.2.1 정류기 3상 단락 및 지락에 의한 사고전류 특성

정류기 1차측에서 3상 단락사고가 발생한 경우(Case I)의 사고전류 특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9의 (a)는 사고전류의 흐름도, (b)는 정류기 1차측의 사고전류 특성을 나타낸다. 즉, 사고전류는 AC 전원과 배터리로부터 각각 5,588[A], 65[A] 정도 공급됨을 알 수 있다. 또한, 정류기 1차측에서 지락사고가 발생한 경우(Case II)의 사고전류 특성은 그림 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원과 배터리로부터 각각 1,296[A], 788[A] 정도 공급됨을 알 수 있다.



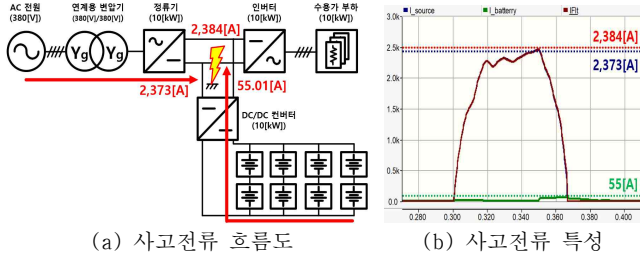
[그림 9] 정류기 1차측 3상 단락시 사고전류 특성



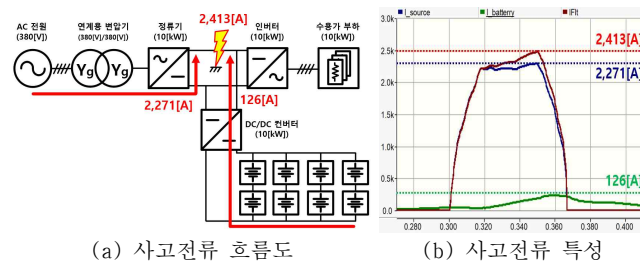
[그림 10] 정류기 1차측 지락시 사고전류 특성

4.2.2 DC 전로측 지락에 의한 사고전류 특성

DC 전로의 (+)측에서 지락사고가 발생한 경우(Case III)의 사고전류 특성은 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원과 배터리로부터 각각 2,374[A], 55[A]정도 공급됨을 알 수 있다. 또한, DC 전로의 (-)측에서 지락사고가 발생한 경우(Case IV)의 사고전류 특성은 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원과 배터리로부터 각각 2,271[A], 126[A]정도 공급됨을 알 수 있다.



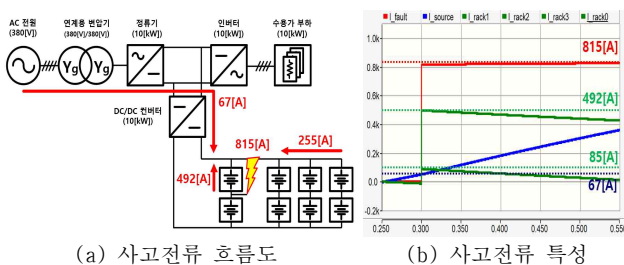
[그림 11] DC 전로 (+)측 지락시 사고전류 특성



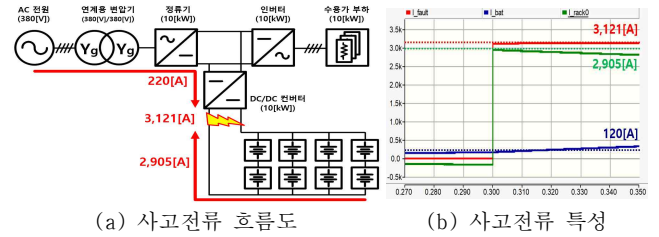
[그림 12] DC 전로 (-)측 지락시 사고전류 특성

4.2.3 배터리 모듈 및 랙 단락에 의한 사고전류 특성

배터리 모듈에서 단락사고가 발생한 경우(Case IV)의 사고전류 특성은 그림 13과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원과 단락이 발생하지 않은 배터리로부터 각각 67[A], 225[A]정도 공급되고, 단락된 배터리로부터 492[A]의 사고전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, 배터리 랙에서 단락사고가 발생한 경우(Case VI)의 사고전류 특성은 그림 14와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 사고전류는 AC 전원과 배터리로부터 각각 220[A], 2,905[A]정도 공급됨을 알 수 있다.



[그림 13] 배터리측 모듈 단락시 사고전류 특성



[그림 14] 배터리측 랙 단락시 사고전류 특성

4.2.4 종합분석

PSCAD/EMTDC에 의한 10kW급 UPS 시험장치의 사고유형별 사고전류 특성을 종합적으로 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 정류기 1차측 3상 단락의 경우, 가장 큰 사고전류가 발생하지만, 배터리로부터 공급되는 사고전류는 정격 방전전류의 38[%] 정도로 UPS에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 배터리 랙에서 단락사고가 발생하는 경우 단일 배터리 모듈로부터 공급되는 사고전류는 정격 방전전류의 427[%]인 726[A]로 산정되어, 배터리에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 사고유형별 사고전류 특성

사고유형		전체 사고전류 [A]	AC 전원 [A]	배터리 랙[A]	배터리 모듈[A]
정류기 1차측	3상 단락	5,654	5,584	65	23
	지락	1,975	1,296	788	263
DC 전로	(+)측 지락	2,384	2,373	55	19
	(-)측 지락	2,413	2,271	126	43
배터리	모듈 단락	815	67	747	492
	랙 단락	3,121	220	2,905	734

5. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 무변압 기형 UPS의 모델링을 수행하고, 사고전류 특성을 제시한다. 상기에서 제시한 모델링을 바탕으로 사고전류의 특성을 평가한 결과, 정류기 1차측 3상 단락의 경우 가장 큰 사고전류가 발생하지만, 배터리로부터 공급되는 사고전류는 정격 방전전류의 38[%] 정도로 UPS에 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 또한, 배터리 랙에서 단락사고가 발생하는 경우, 단일 배터리 모듈로부터 공급되는 사고전류는 정격 방전전류의 427[%]인 726[A]로 산정되어, 배터리에 심각한 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

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