

PSCAD/EMTDC를 이용한 10kW급 UPS 시험장치의 접촉불량에 의한 아크 특성에 관한 연구

김윤호*, 장형안*, 송두리*, 남양현***, 노대석*

*한국기술교육대학교 전기공학과, **한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

e-mail:kimyunho2357@koreatech.ac.kr

An Arc Characteristics with Loose Connection in 10kW UPS Test Device Based on PSCAD/EMTDC

Yun-Ho Kim*, Hyeong-An Jang*, Doo-Ri Song*,

Yang-Hyeon Nam***, Dae-Seok Rho*

*Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

**Electric Power System Research Lab, Korea Institute of Energy Research

요약

최근, 빅데이터, 자율주행차 등의 상용화로 대용량 데이터 센터의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따른 전력 품질 문제를 개선할 수 있는 UPS의 도입이 증가하고 있다. 하지만, 2022년 10월에 발생한 성남 데이터 센터 화재 등의 UPS 화재 사고가 지속적으로 발생하고 있어, UPS의 전기적 위험요인에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 접촉불량에 의한 아크를 UPS의 주요한 전기적 위험요인으로 분류하고, 이에 대한 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 UPS 시험장치 및 접촉불량에 의한 아크 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 아크 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 10kW급 UPS의 접촉불량에 의한 아크 운용 특성을 분석한 결과, 배터리 단자측 접촉불량에 의한 아크는 높은 아크 에너지에 의해 UPS 설비의 손상을 유발할 수 있고, 수용가 단자측 접촉불량에 의한 아크는 수용가의 전력품질에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

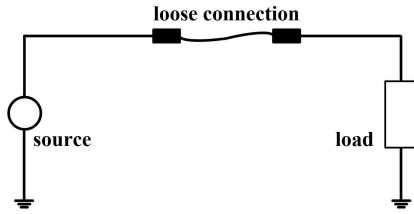
1. 서론

최근, 빅데이터, 자율주행차 등의 상용화로 대용량 데이터 센터의 수요가 급증하고 있으며, 이에 따라 전압 변동, 주파수 변동, 등의 전력 품질 문제를 개선할 수 있는 UPS의 도입이 증가하고 있다. 하지만, 2022년 10월에 발생한 성남 데이터 센터 화재를 포함하여 UPS 화재 사고가 지속적으로 발생하고 있어 UPS의 전기적 위험요인에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 접촉불량에 의한 아크를 UPS의 주요한 전기적 위험요인으로 분류하고, 이에 대한 발생 메커니즘을 제시한다[1, 2]. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW급 UPS 시험장치와 접촉불량에 의한 아크 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 10kW급 UPS의 접촉불량에 의한 아크 운용 특성을 분석한 결과, 배터리 단자측 접촉불량에 의한 아크는 높은 아크 에너지에 의해 UPS 설비의 손상을 유발할 수 있고, 수용가 단자측 접촉불량에 의한 아크는 수용가의 전력품질에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

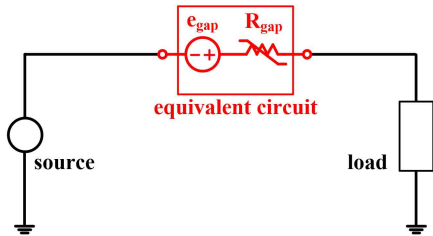
2. 접촉불량에 의한 아크 발생 메커니즘 및 UPS의 아크 유형 분류

2.1 접촉불량에 의한 아크 발생 메커니즘

접촉불량에 의한 아크는 그림 1과 같이 전선 접속부나 단자에서 진동, 열화, 반복적인 접촉 등에 의한 전기적 경로의 불연속에 의해 발생할 수 있다. 이러한 아크는 두 도체 간 단락 경로를 형성하는 병렬 아크와 달리 회로 경로 상에 직렬로 연결되므로, 대부분 직렬 아크의 형태로 나타난다. 여기서, 직렬 아크는 완전히 단선되지 않은 회로에서 발생하므로, 접촉부에 추가적인 임피던스가 형성되고, 소전류가 지속적으로 흐르게 된다. 즉, 접촉불량에 의한 아크는 접촉불량 단자에 형성된 미세한 공극에서 발생하는 방전 현상으로서, 그림 2와 같이 아크 전압원과 아크 공극 저항으로 구성된 등가회로로 나타낼 수 있다[2]. 즉, 아크 전압원은 공극에서 발생하는 순간적인 전압강하를 발생시키고, 아크 공극 저항은 전류 변화에 따라 변하는 임피던스로서 회로의 등가 저항을 증가시켜 전류를 감소시키고, 줄 발열에 의한 접촉부의 온도 상승 및 열적 열화를 유발한다.



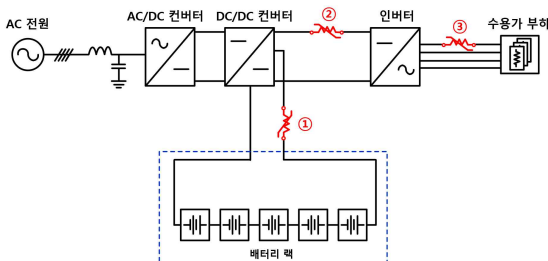
[그림 1] 접촉불량에 의한 아크 발생 메커니즘



[그림 2] 접촉불량에 의한 아크의 등가회로

2.2 UPS의 접촉불량에 의한 아크 분류

UPS의 접촉불량에 의한 아크는 전선 접속부나 단자에서 진동, 열화, 반복적인 접촉 등에 의해 그림 3과 같이 발생할 수 있다. 먼저, 그림 3의 ①은 배터리 단자와 컨버터 단자 사이에서 발생한 접촉불량으로, 아크는 과열 및 절연 열화에 의한 화재를 유발시킬 수 있다. 또한, 그림 3의 ②는 컨버터 단자와 인버터 단자 사이에서 발생한 접촉불량이며, 아크는 전력변환과정에서 비선형적인 전류 변동과 고주파를 발생하여 전력변환기의 제어 성능을 저하시키고, UPS 소자에 열적·전기적 스트레스에 의한 설비의 손상을 유발할 수 있다. 한편, 그림 3의 ③은 인버터 출력측 단자와 부하측 단자 사이에 발생하는 접촉불량으로, 아크는 직접적인 전압 강하 및 전류 왜곡을 유발하여, 수용가의 전력품질에 큰 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 10kW UPS 시험장치를 모델링하고, 배터리 단자와 컨버터 단자 사이(①), 컨버터 단자와 인버터 단자 사이(②), 인버터 출력측 단자와 부하측 단자 사이(③)의 접촉불량을 모의하여 아크 운용특성을 평가한다.



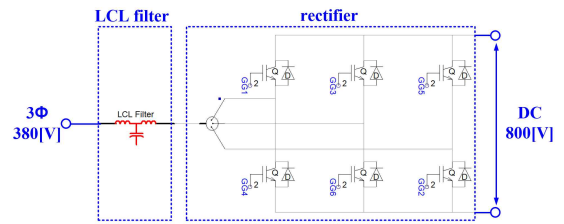
[그림 3] UPS의 접촉불량에 의한 아크 유형

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 10kW UPS 시험장치 및 접촉불량 모델링

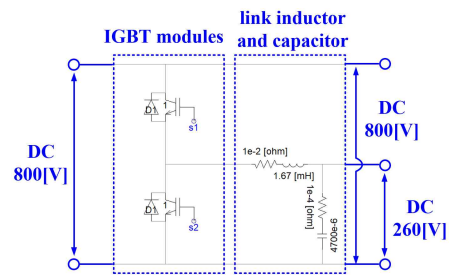
3.1 10kW급 UPS 시험장치 모델링

3.1.1 AC/DC 컨버터

UPS 시험장치의 AC/DC 컨버터는 그림 4와 같이 정류기와 DC/DC 컨버터로 나타낼 수 있다. 먼저, 정류기는 그림 4의 (a)와 같이 LCL 필터와 정류용 IGBT 모듈로 구성되는데, LCL 필터는 전력 변환 과정에서 발생하는 노이즈를 저감시키고, 정류용 IGBT 모듈은 3상 380[V]를 DC 800[V]의 전압으로 변환한다. 또한, DC/DC 컨버터는 그림 4의 (b)와 같이 IGBT 모듈과 링크 인덕터 및 커패시터로 구성되며, 정류기와 배터리 측의 전압을 승압 및 강압할 수 있다.



(a) 정류기

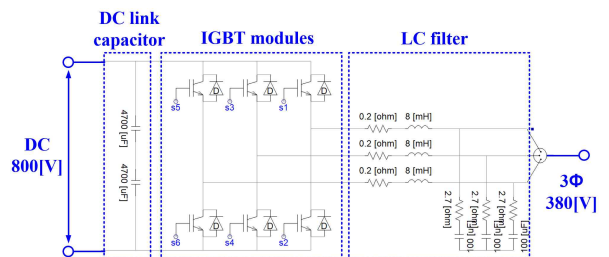


(b) DC/DC 컨버터

[그림 4] AC/DC 컨버터 모델링

3.1.2 DC/AC 인버터

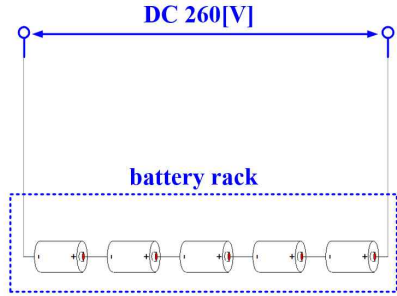
UPS 시험장치의 DC/AC 인버터는 그림 5와 같이 DC 링크 커패시터, IGBT 모듈, LC 필터 등으로 구성된다. 여기서, DC 링크 커패시터는 DC 전압을 안정적으로 유지시키고, IGBT 모듈은 DC 800[V]를 3상 380[V]로 변환하며, LC 필터는 전력 변환 과정에서 발생하는 고주파를 저감한다.



[그림 5] DC/AC 인버터 모델링

3.1.3 배터리

UPS 시험장치의 배터리는 그림 6과 같이 5S1P의 배터리 모듈로 구성되며, 260[V]의 정격전압과 16.5[kWh]의 정격 용량을 가진다.



[그림 6] 배터리 모델링

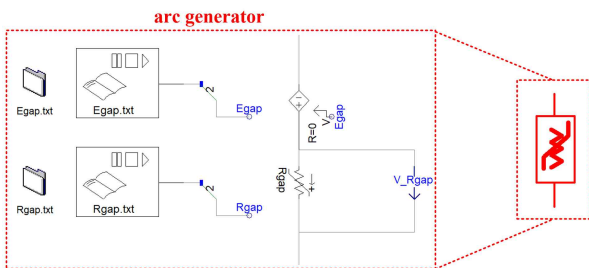
3.2 UPS의 접촉불량 모델링

UPS의 접촉불량은 상기의 2.1절에서 제시한 발생 메커니즘을 바탕으로 아크 전압원과 아크 공극 저항으로 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 아크 전압원은 접촉불량 구간에서 발생하는 비선형적인 전압 변동 특성을 모의하기 위하여 식 (1)과 같이 산정한다. 또한, 아크 공극 저항은 접촉 상태 변화에 따른 비선형적인 특성을 반영하기 위하여 식 (2)와 같이 산정한다. 즉, UPS의 접촉불량에 의한 아크는 식 (1)에 의한 아크 전압원과 식 (2)의 아크 공극 저항을 바탕으로 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{gap}(t) = E_0 \cdot \tanh(\lambda \cdot q(t)) \quad (1)$$

$$R_{gap}(t) = \frac{V_S}{I_S} e^{2\alpha(q(t)-1)} \quad (2)$$

여기서, $e_{gap}(t)$: 아크 전압원, E_0 : 최대 아크 전압, λ : 아크 전압 변동의 기울기 계수, $q(t)$: 아크의 불규칙성에 대한 상태변수, $R_{gap}(t)$: 아크 공극 저항, V_S : 시스템 전압, I_S : 시스템 전류, α : 아크 공극 저항의 비선형 계수

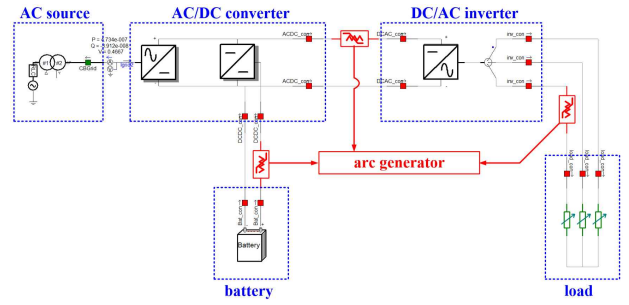


[그림 7] 접촉불량에 의한 아크 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 바탕으로 접촉불량에 의한 아크를 고려한 10kW급 UPS 시험장치의 전체 시스템은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 접촉불량에 의한 아크는 배터리 단자와 컨버터 단자 사이, 컨버터 단자와 인버터 단자 사이, 인버터 출력측 단자

와 부하측 단자 사이에 모의한다.



[그림 8] 전체 시스템

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

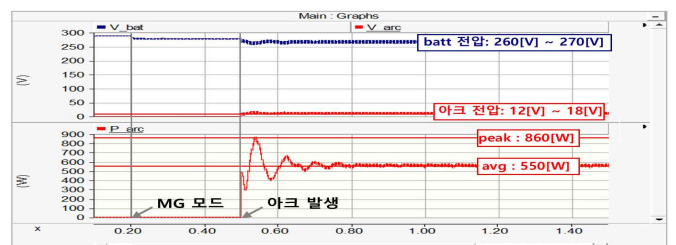
10kW급 UPS 시험장치의 접촉불량에 의한 아크 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, AC 전원은 3상 4선식의 AC 380[V]를 상정하고, 수용가 부하의 용량은 10[kW]로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

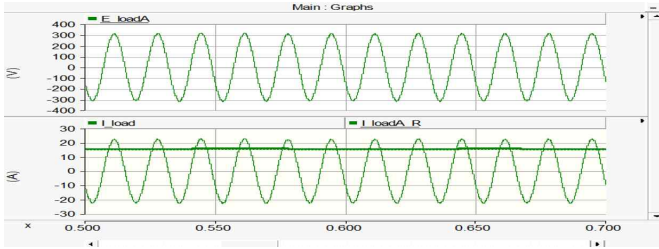
항목	내역		
AC 전원	정격 전압[V]	3Φ 380	
UPS 시험장치	AC/DC 컨버터	정격 용량[kW]	10
		출력 전압[V]	800
	DC/AC 인버터	정격 용량[kW]	10
		입력 전압[V]	800
배터리	정격 전압[V]	260	
	정격 방전 전류[A]	64 (1C-rate)	
수용가 부하	정격 용량[kW]	10	

4.2 배터리 단자의 접촉불량에 의한 아크 특성

배터리 단자의 접촉불량에 의한 아크 특성은 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 그림 9의 (a)는 아크 전압 및 아크 에너지로서, 아크 전압은 12[V]~18[V]로 나타나고, 아크 에너지는 약 550[W]로 발생한다. 또한, 그림 9의 (b)는 수용가 부하의 전압 및 전류 특성으로, 배터리 단자의 접촉불량 시, 수용가 전력품질에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

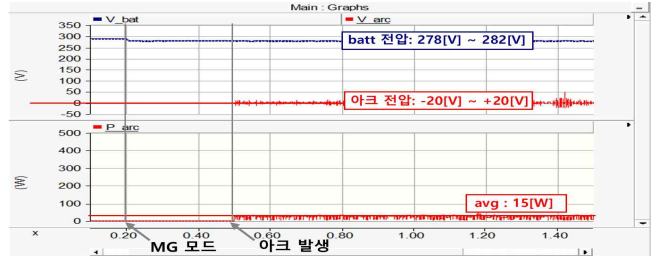


(a) 아크 전압 및 아크 에너지

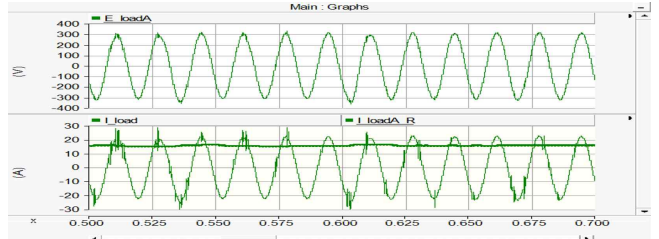


(b) 수용가 전압 및 전류 특성

[그림 9] 배터리 단자의 접촉불량에 의한 아크 운용특성

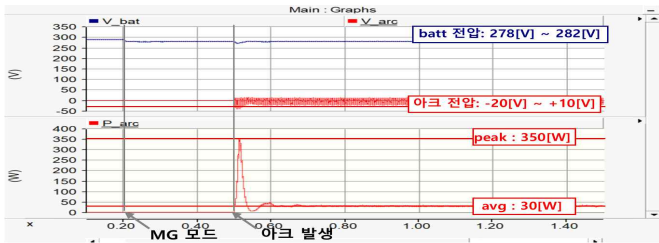


(a) 아크 전압 및 아크 에너지

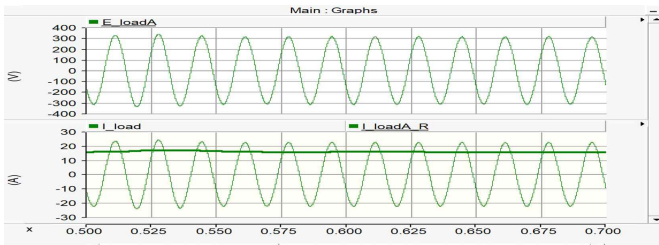


(b) 수용가 전압 및 전류 특성

[그림 11] 수용가 부하의 접촉불량에 의한 아크 운용특성



(a) 아크 전압 및 아크 에너지



(b) 수용가 전압 및 전류 특성

[그림 10] 인버터 단자의 접촉불량에 의한 아크 운용특성

4.4 수용가 부하의 접촉불량에 의한 아크 특성

수용가 부하의 접촉불량에 의한 아크 특성은 그림 11과 같이 나타낼 수 있다. 먼저, 그림 11의 (a)는 아크 전압 및 아크 에너지로서, 아크 전압은 $-20[V] \sim +20[V]$ 로 나타나고, 아크 에너지는 약 $15[W]$ 로 발생한다. 또한, 그림 11의 (b)는 수용가 부하의 전압 및 전류 특성으로, 수용가 단자의 접촉불량 시, 수용가 전력품질이 저하됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 접촉불량에 의한 아크 발생 메커니즘을 제시하고, UPS의 접촉불량에 의한 아크 유형을 분류한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 접촉불량에 의한 아크를 고려한 10kW UPS 시험장치의 모델링을 수행한다. 접촉불량에 의한 아크 운용특성을 분석한 결과, 배터리 단자 접촉불량이 발생할 경우, 아크 에너지가 크게 발생하여 UPS 설비에 악영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00421994)

참고문헌

- [1] Oh, Y. S., Han, J., Gwon, G. H., Kim, D. U., Kim, C. H., "Development of Fault Detector for Series Arc Fault in Low Voltage DC Distribution System using Wavelet Singular Value Decomposition and State Diagram", Journal of Electrical Engineering & Technology, pp.766-776, 2015.
- [2] Jiang, R., Wang, Y., Gao, X., Bao, G., Hong, Q., Booth, C. D., "AC Series Arc Fault Detection Based on RLC Arc Model and Convolutional Neural Network", IEEE Sensors Journal, pp.14618-14627, 2023.