

30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류 평가지험장치 구현에 관한 연구

이중선*, 최성문*, 유현상*, 노성은*, 노대석*

*한국기술교육대학교

e-mail: wndjts19@koreatech.ac.kr

A Study on the Evaluation Test Device Implementation of CMV and Leakage Current in 30kW UPS

Joong-Seon Lee*, Sung-Moon Choi*, Hyun-Sang You*, Seong-Eun Rho*,
Dae-Seok Rho*

*Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 빅데이터, 자율자동차, AI 등의 기술 발전에 대응할 수 있는 데이터센터의 설치가 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 정전 시에도 일정 시간동안 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 UPS의 수요가 증가하고 있지만, UPS의 전기적 위해요인을 고려한 시스템 간 안전성 검증 및 운용 절차 등이 미흡하여, 이를 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 IGBT 스위칭에 의한 CMV(common mode voltage)와 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, 수배전반부, 모의 수용가부, UPS부 등으로 구성된 30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류 평가지험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 CMV 및 누설전류에 대한 운용 특성을 분석한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 최대 90.3[V]가 발생하여 배터리 정격전압의 50[%] 정도의 크기로 발생함을 알 수 있다. 또한, IGBT 스위칭 및 절연성능 열화에 의한 누설전류가 최대 7[mA] 정도 발생하여, 화재 및 인체 감전에 악영향을 줄 가능성이 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 일정시간 동안 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 UPS의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 여기서, UPS는 전력 공급이 중단되었을 때, 전력망이 복구될 때까지 일정 시간 동안 전자 장비에 안정적인 전력을 공급하는 장치이다. 하지만, UPS의 전기적 위해요인을 고려한 시스템 간 안전성 검증 및 운용 절차 등이 미흡하여, 이를 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다.

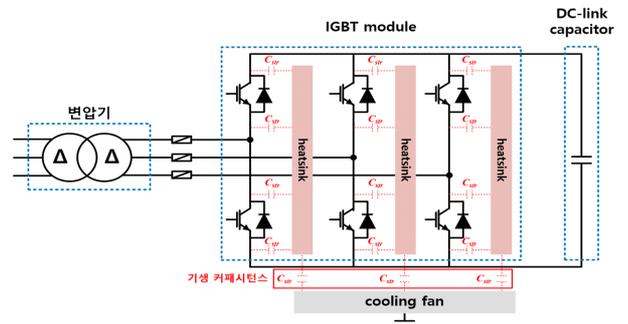
따라서, 본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 IGBT 스위칭에 의한 CMV와 누설전류의 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 수배전반부, 모의 수용가부, UPS부 등으로 구성된 CMV 및 누설전류 평가지험장치를 구현한다. 이를 바탕으로 CMV 및 누설전류의 운용특성을 분석한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 최대 90.3[V]가 발생하여 배터리 정격전압의 50[%] 정도의 크기로 발생함을 알 수 있다. 또한, 누설전류의 운용 특성을 분석한 결과 IGBT 스위

칭 및 절연성능 열화에 의해 누설전류가 최대 7[mA] 정도 발생하여 화재 및 인체 감전에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

2. CMV 및 누설전류 발생 메커니즘

2.1 IGBT 스위칭에 의한 CMV

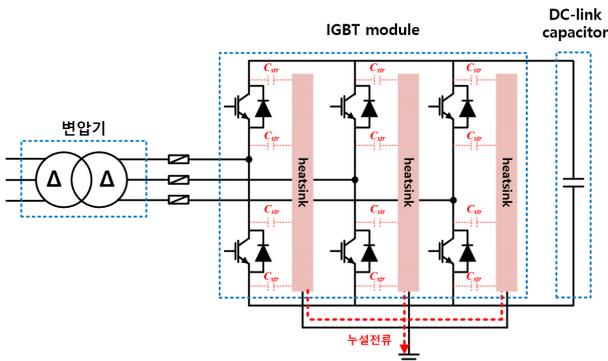
컨버터는 그림 1과 같이 변압기, IGBT, DC-link 커패시터, 방열판 등으로 구성된다. 여기서, 컨버터의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5 ~ 10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행한다. 하지만, 도전부와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여 CMV가 발생할 수 있다[1].



[그림 1] IGBT 스위칭에 의한 CMV

2.2 IGBT 스위칭에 의한 누설전류 발생 메커니즘

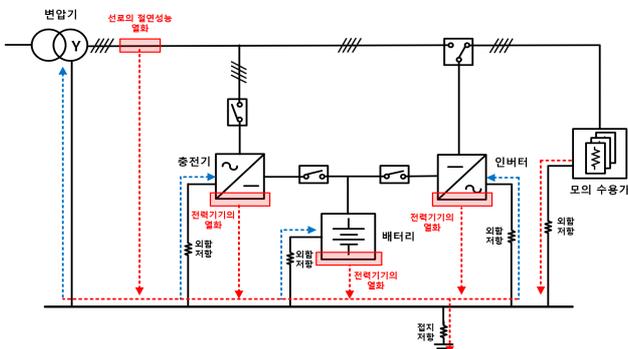
IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 AC/DC 컨버터, DC/AC 컨버터와 같은 전력변환기에서 발생되는데, 이러한 기기는 일반적으로 변압기, IGBT 모듈, DC 링크 커패시터 등으로 구성된다. 여기서, IGBT 모듈은 수~수십 kHz의 고주파로 스위칭하므로, 온도상승을 억제하기 위해 방열판과 함께 사용된다. 이때, 그림 2와 같이 방열판과 IGBT 모듈 사이에 구조적으로 기생 커패시턴스(C_{str})가 형성된다. 즉, 컨버터의 스위칭 주파수와 방열판의 구조가 누설전류의 발생에 큰 영향을 미칠 수 있다[2].



[그림 2] IGBT 스위칭에 의한 누설전류

2.3 절연성능 열화에 의한 누설전류 발생 메커니즘

절연성능 열화에 의한 누설전류는 Fig. 3과 같이 선로와 전기설비의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 선로의 경우, 절연성능은 가설 시 전선 피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의하여 악화될 수 있다. 또한, 전선은 장기간 사용 시, 사용 환경에 따라 열열화, 열변형, 오일이나 약품에 의한 열화, 내후성 열화, 저온 환경에서 균열이 발생하여, 절연성능이 저하될 수 있다. 한편, 전기설비의 고장 및 취급 부주의로 인해 누설전류가 발생할 경우, 인체의 보호를 위하여 누전차단기가 동작하여야 하지만, 전기설비기술기준에 따라 30mA 이하의 정격감도전류에서는 동작하지 않으므로 항상 누설전류가 존재할 수 있다[2].

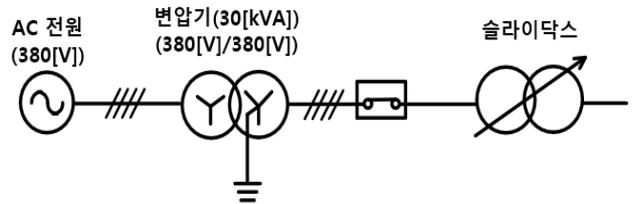


[그림 3] 절연성능 열화에 의한 누설전류 메커니즘

3. 30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류 평가시험장치 구현

3.1 수배전반부

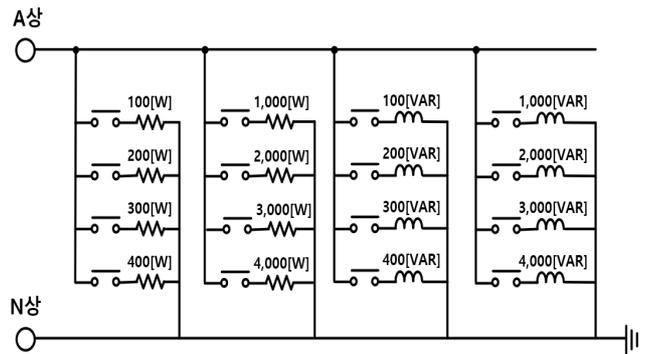
수배전반부는 그림 4와 같이 AC 전원과 배전용 변압기, 슬라이더스, 차단기 등으로 구성된다. AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식으로 구성되며, 배전용 변압기는 30[kVA]의 정격용량을 가지며, Yg-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다.



[그림 4] 수배전반부의 구성

3.2 모의 수용가부

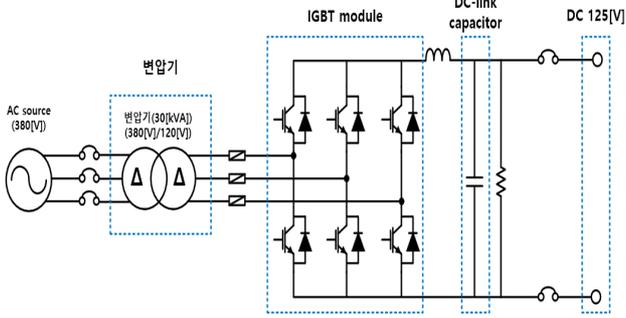
모의 수용가부는 그림 5와 같이 저항(R)과 리액터(L) 부하로 구성되며, a상, b상, c상의 부하 크기는 동일하다. 여기서 a상의 저항 부하는 MC 동작을 통해 상당 100[W] ~ 11,000[W]로 가변할 수 있도록 구성하며, 리액터 부하는 MC 동작을 통해 상당 100[Var] ~ 11,000[Var]로 가변할 수 있도록 한다.



[그림 5] 모의 수용가부의 a상 구성

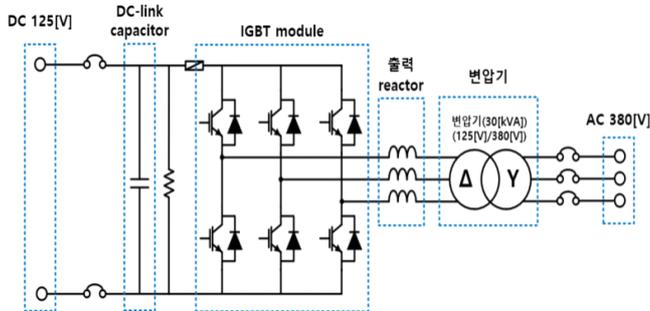
3.3 UPS부

UPS부는 충전기, CVCF 인버터, 배터리 등으로 구성되며, 충전기는 그림 6과 같이 AC 380[V]를 입력받아 DC 125[V]의 전압을 출력하며, 정격용량은 30[kW]이다. 여기서, 충전기의 주회로는 변압기, IGBT 모듈, DC-Link 커패시터 등으로 구성되며, 변압기는 Δ-Δ 결선방식으로 380[V]/120[V]의 변압비를 가진다. 또한, IGBT 모듈은 full-bridge 형태이며, 3상 AC 120[V]의 전압을 DC 125[V]로 변환하고, DC-Link 커패시터는 출력단의 DC 전압을 안정적으로 유지한다.



[그림 6] 충전기의 구성

CVCF 인버터는 그림 7과 같이, DC 125[V]를 입력받아 AC 380[V]의 전압을 출력하며, 정격용량은 30[kW]이다. 여기서 CVCF 인버터의 주회로는 DC link 커패시터, IGBT 모듈, 출력 Reactor, 변압기 등으로 구성된다. 또한, 변압기는 Δ -Y 결선방식으로 125[V]/380[V]의 변압비를 가지며, 출력 reactor는 고주파 노이즈 성분을 감소시킨다. 한편, CVCF 인버터의 제어는 PLL 제어를 바탕으로 계통의 위상을 추종하여 전력을 공급한다. 한편, 배터리의 사양은 표 1과 같이 정격용량은 21.34[kWh], 사용전압 범위는 96[V]~128[V], 정격전압은 115[V], 배터리의 구성은 4S3P로 구성된다.



[그림 7] CVCF 인버터의 구성

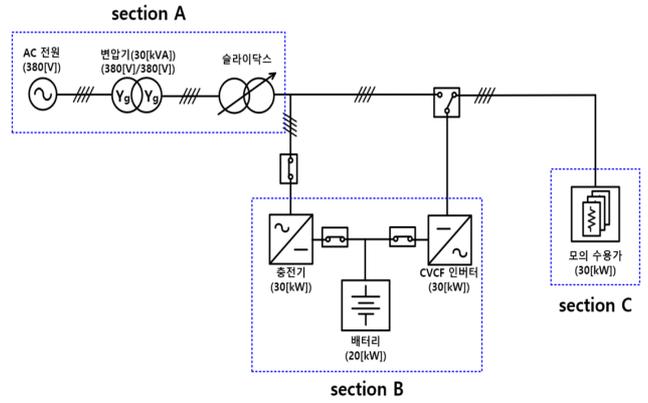
[표 1] 배터리 사양

항목	내역
정격전압[V]	115.2
정격용량[kWh]	21.34
운용전압[V]	96 ~ 128
구성	4S3P
충전전류[A]	43.2
방전전류[A]	92.4

3.4 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로, 30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류 평가시험장치의 전체 시스템을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서 section A는 수배전반부, section B는 UPS부, section

C는 모의 수용가부를 나타낸다.



[그림 8] 전체 시스템

4. 시험 결과 및 분석

4.1 시험 조건

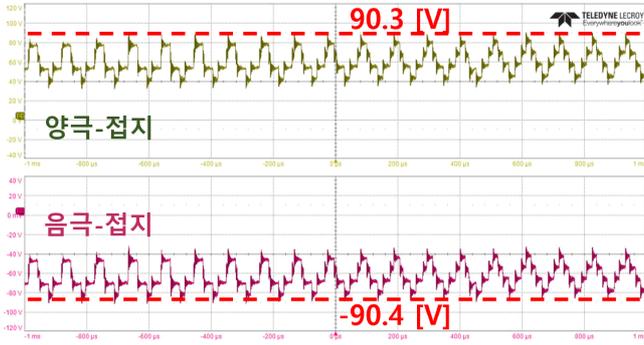
본 논문에서 구현한 시험장치를 바탕으로, 30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류의 운용특성을 평가하기 위한 상정 시나리오는 표 2와 같다. 먼저, CMV에 대한 시나리오는 UPS의 운용모드와 접지 유무를 고려하여 Case 1, Case 2로 상정하고, 측정 위치는 배터리의 (+),(-)단자와 접지 양단을 측정한다. 또한, 누설전류의 상정 시나리오는 UPS의 운용모드와 접지 방식을 고려하여 Case 3, Case 4로 상정한다. 여기서, 공통접지의 경우에는 충전기, CVCF 인버터, 배터리의 외함을 공통으로 접지하며, 개별접지의 경우에는 각각 독립적으로 접지한다.

[표 2] CMV 및 누설전류 상정 시나리오

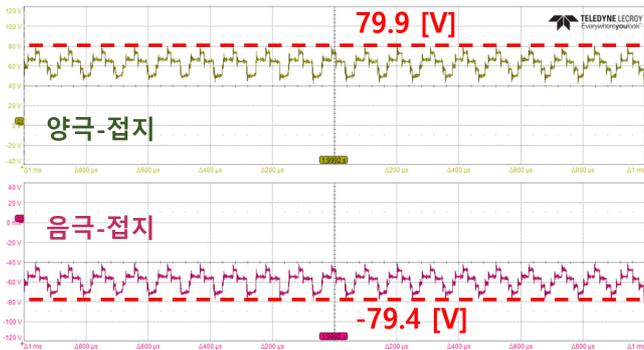
	Case	접지 방식	부하 용량
CMV	1	접지	1
	2	비접지	1
누설전류	3	공통접지	1
	4	개별접지	1

4.2 30kW급 UPS의 CMV 운용특성

상기에서 제시한 CMV 상정 시나리오를 바탕으로, 30kW급 UPS의 CMV 운용특성을 나타내면 그림 9와 같다. 여기서, 그림 9(a)는 Case 1에 대한 CMV의 운용특성을 나타내며, 배터리의 (+)단자와 접지 사이에서 최대 90.3[V]의 CMV가 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 9(b)는 Case 2에 대한 CMV의 운용특성을 나타내며, 배터리의 (+)단자와 접지 사이에서 최대 79.9[V]의 CMV가 발생함을 알 수 있다. 따라서, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 배터리 정격전압의 50[%] 정도의 크기로 발생함을 알 수 있다.



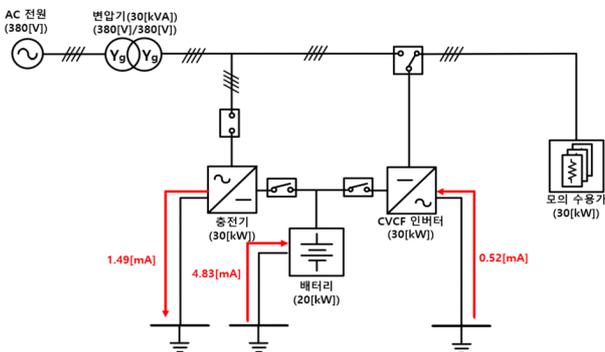
(a) Case 1에 대한 CMV 운용특성



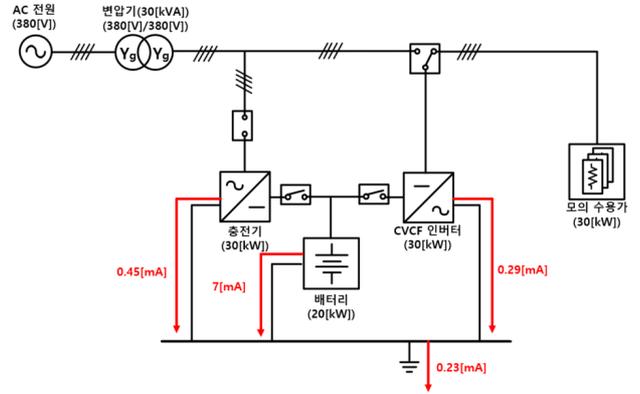
(b) Case 2에 대한 CMV 운용특성
[그림 9] 30kW급 UPS의 CMV 운용특성

4.3 30kW급 UPS의 누설전류 운용특성

상기에서 제시한 시나리오를 바탕으로 30kW급 UPS의 누설전류의 운용특성은 그림 10과 같다. 여기서, 그림 10(a)는 Case 3에 대한 누설전류 흐름도를 나타내며, 충전기, CVCF, 배터리를 각각 독립적으로 접지했을 경우, 충전기에서 1.49[mA]의 누설전류가 발생하며, CVCF와 배터리측으로 각각 0.52[mA], 4.83[mA]의 누설전류가 유입된다. 한편 그림 10(b)는 Case 4에 대한 누설전류 흐름도를 나타내며, 충전기에서 0.45[mA], CVCF 인버터에서 0.29[mA], 배터리에서 7[mA]의 누설전류가 발생하며, 접지측으로 0.23[mA]의 누설전류가 유입됨을 알 수 있다. 따라서, 선로 및 전기설비의 절연성능이 저하될 경우, 누설전류가 최대 7[mA] 정도 발생하여 화재 및 인체 감전에 악영향을 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.



(a) Case 3에 대한 누설전류 흐름도



(b) Case 4에 대한 누설전류 흐름도
[그림 10] 30kW급 UPS의 누설전류 운용특성

5. 결 론

본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 IGBT 스위칭에 의한 CMV 및 누설전류의 발생 메커니즘을 제시한다. 또한, 30kW급 UPS의 CMV 및 누설전류용 평가시험장치를 구현하여 접지방식에 CMV 및 누설전류의 운용특성을 평가한다. 이를 바탕으로 시험을 수행한 결과, IGBT 스위칭에 의한 CMV는 접지한 경우 90.3[V]가 발생하여 배터리 정격전압의 50[%] 정도의 크기로 발생함을 알 수 있다. 또한, 선로 및 전기설비의 절연 성능이 저하될 경우, 누설전류가 최대 7[mA] 정도 발생하여 화재 및 인체 감전에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] 이민행, 김경화, 김운호, 김지명, 노대석, “400V급 LVDC 배전계통에 있어서 서지 평가 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 25, No. 9, pp. 491-503, 2024
- [2] 김지명, 태동현, 이일무, 임건표, 노대석, “PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 누설전류 모델링에 관한 연구”, 한국산학기술학회논문지, vol. 22, No. 2, pp. 810-818, 2021