

기생 커패시턴스 및 절연저항에 따른 UPS의 누설전류 운용특성에 관한 연구

유현상^{*,**}, 정재범^{*,**}, 이중선^{*}, 전진택^{*}, 노대석^{*}
^{*}한국기술교육대학교 전기공학과, ^{**}(주)시스피아
 e-mail: hsyu@koreatech.ac.kr

An Operation Characteristics of Leakage Current in UPS According to Stray Capacitance and Insulation Resistance

Hyun-Sang You^{*,**}, Jae-Beom Jung^{*,**}, Joong-Seon Lee^{*}, Jin-Taek Jeon^{*}, Dae-Seok Rho^{*}
^{*}Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education
^{**}Cispia Co. Ltd

요약

최근, 대규모 전력 공급과 높은 신뢰성이 요구되는 DC 데이터 센터를 시작으로, 리튬이온배터리 기반의 대용량 UPS가 도입되고 있다. 하지만, 리튬이온배터리는 열폭주로 인해 화재를 진압하기 어렵고, 10[kW]를 초과하는 UPS의 경우 안전성 검증 대상에서 제외되고 있어, 전기적 위해요인으로부터 UPS를 보호하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 특히, 누설전류는 UPS의 전력변환장치에 의해 지속적으로 발생하여 UPS 설비에 악영향을 줄 수 있고, 통신선 등으로 유입되어 기기의 오동작을 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 IGBT 스위칭과 절연성능 저하에 의한 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 등으로 구성된 10kW급 UPS의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 기생 커패시턴스와 절연저항에 따른 누설전류의 운용특성 평가한 결과, IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 컨버터 측에서 발생하여 배터리, 인버터, 계통 접지 측으로 유입되고, 기생 커패시턴스가 증가함에 따라 같이 상승하여 UPS의 절연에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 결로현상 및 경년열화 등으로 인해 절연저항이 감소하는 경우, 배터리 측의 누설전류가 증가할 수 있지만 그 영향이 기생 커패시턴스에 비해 작음을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 신재생에너지의 확대와 송-배전망 투자의 감소 등 전력 공급에 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 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 등으로 구성된 10kW급 UPS의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 기생 커패시턴스와 절연저항에 따른 누설전류의 운용특성 평가한 결과, IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 컨버터 측에서 발생하

여 배터리, 인버터, 계통 접지 측으로 유입되고, 기생 커패시턴스가 증가함에 따라 같이 상승하여 UPS의 절연에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 결로현상 및 경년열화 등으로 인해 절연저항이 감소하는 경우, 배터리 측의 누설전류가 증가할 수 있지만 그 영향이 기생 커패시턴스에 비해 작음을 알 수 있다.

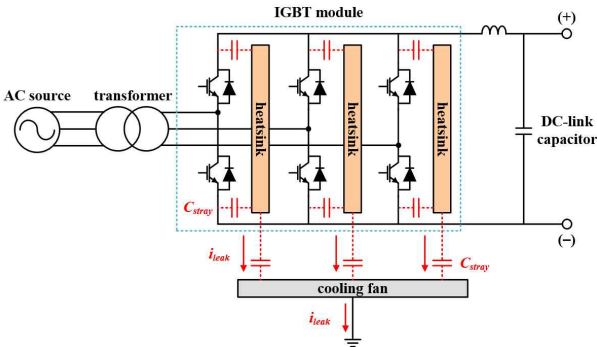
2. UPS의 누설전류 발생 메커니즘

UPS의 AC/DC 컨버터와 인버터는 그림 1과 같이 변압기, IGBT, DC-link 커패시터, 방열판 등으로 구성된다. 여기서, 컨버터의 IGBT는 전력변환을 목적으로 5 ~ 10[kHz]의 고주파수 스위칭 동작을 수행하며, 이때 발생하는 온도 상승을 억제하기 위하여 방열판을 설치한다. 하지만, 도전부와 방열판 사이에 존재하는 기생 커패시턴스(C_{stray})에 의하여 CMV가 발생할 수 있다. 또한, 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스에 의해 식 (1)과 같이, 누설전류가 발생할 수 있다[1]. 여기서, 누설전류는 외함접지를 통해 대지로 방전되지만, UPS를 포함한 전기설비의 외함 및 도전성 부분에 등전위 분당을 적용한 경우, 누설전류가 다른 설비

측으로 유입되어 작업자의 안전에 영향을 줄 수 있다.

$$i_{leak} = C_{stray} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

여기서, i_{leak} : 누설전류, C_{stray} : 기생 커패시턴스

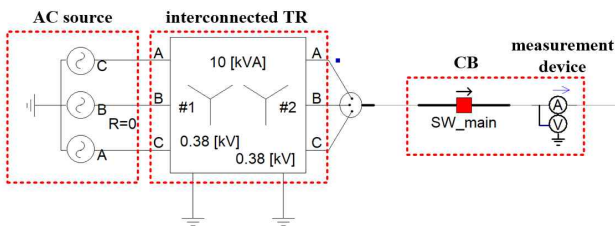


[그림 1] IGBT 스위칭에 의한 누설전류 발생 메커니즘

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 10kW급 UPS의 모델링

3.1 수배전반부

수배전반부는 그림 3과 같이 AC 전원과 연계용 변압기, 차단기 및 계측기 등으로 구성된다. AC 전원은 AC 380[V]의 3상 4선식으로 구성되며, 연계용 변압기는 10[kVA]의 정격용량을 가지며, Yg-Yg 결선방식으로 380[V]/380[V]의 변압비를 적용한다. 또한, 보호기기는 사고가 발생하는 경우, 사고지점으로부터 계통을 분리시킨다.



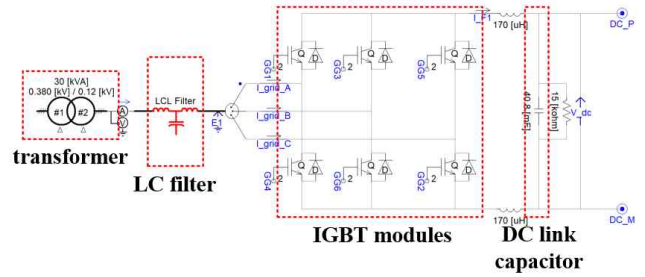
[그림 2] 수배전반부의 모델링

3.2 UPS부

3.2.1 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

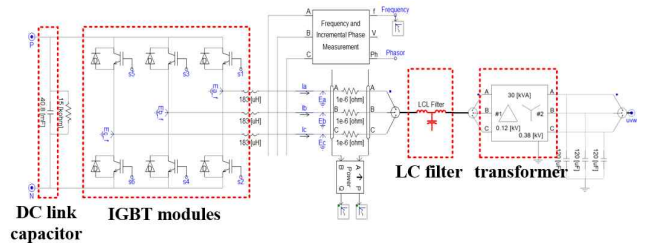
290[V]의 전압으로 변환하며, DC Link 커패시터는 출력단의 직류 전압을 안정적으로 유지한다.



[그림 3] AC/DC 컨버터의 모델링

3.2.2 인버터

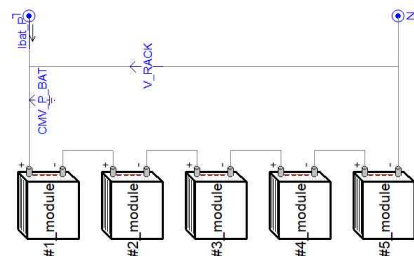
DC Link 커패시터, IGBT 모듈, LC 필터, 변압기, 등으로 구성된 인버터의 모델링을 수행하면, 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, DC Link 커패시터는 입력단의 직류 전압을 안정적으로 유지하고, IGBT 모듈은 DC 290[V]의 전압을 3상 AC 127[V]의 전압으로 변환한다. 또한, LC 필터는 전력변환 과정에서 발생하는 고주파 및 노이즈를 저감하기 위해 사용하며, 변압기는 Δ-Yg 결선방식으로 127[V]/380[V]의 변압비를 적용한다.



[그림 4] 인버터의 모델링

3.2.3 배터리

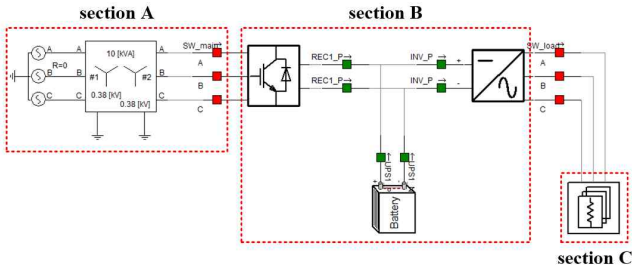
PSCAD/EMTDC에서 제공하는 배터리 라이브러리를 바탕으로 배터리 랙의 모델링을 수행하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리 랙은 58[V]의 배터리 모듈을 5S1P로 연결하여, 258[V]의 정격전압과 16.5[kWh]의 정격용량으로 구성한다.



[그림 5] 배터리의 모델링

3.3 전체 시스템 모델링

상기의 내용을 바탕으로, 10kW급 UPS의 전체 시스템을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서 section A는 수배전반부, section B는 UPS부, section C는 수용가 부하부를 나타낸다.



[그림 6] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

10kW급 UPS의 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, 누설전류 발생 시나리오는 기생 커패시턴스와 절연저항을 고려하여 표 2와 같이 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
	배터리	출력전압 [V]	290
		구조	5S1P
		정격 전압 [V]	258
	인버터	정격 용량 [kWh]	16.5
		SOC [%]	97
		변압기 결선 방식	Δ-Yg
	정격용량 [kW]	10	
	입력전압 [V]	290	
	출력전압 [V]	380	

[표 2] 누설전류 발생 시나리오

시나리오	기생 커패시턴스 [nF]	절연저항 [MΩ]	
Case I	0.1	10	
Case II	1		
Case III	10	0.1	
Case IV	1		0.01
Case V			0.001
Case VI		0.001	

4.2 누설전류의 운용특성

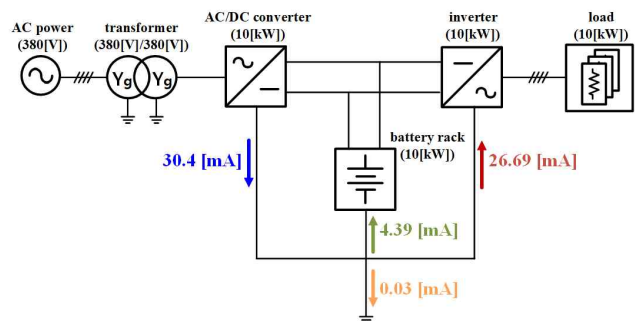
4.2.1 기생 커패시턴스에 의한 누설전류 운용특성

상기에서 제시한 누설전류 발생 시나리오를 바탕으로, 기생 커패시턴스에 따른 누설전류의 운용특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, UPS의 기생 커패시턴스의 크기를 0.1[nF], 1[nF]로 상정한 Case I과 Case II를 비교하면, 컨버터, 인버터, 배터리 측의 누설전류가 각각 10.06배, 10배, 9.2배 정도 상승하고, 계통 접지 측의 누설전류는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 즉, 상기의 식 (1)과 같이 기생 커패시턴스가 10배 증가함에 따라 누설전류도 같이 10배 정도 증가함을 확인할 수 있다.

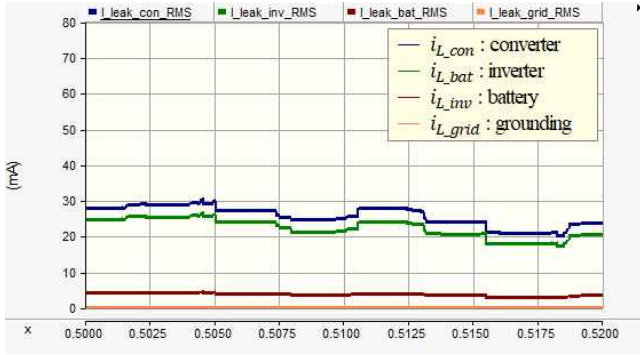
한편, 기생 커패시턴스의 크기가 가장 큰 Case III의 누설전류의 운용특성을 나타내면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7 (a)는 누설전류의 흐름도를 나타내고, 그림 7 (b)는 각 장치의 누설전류 크기를 나타낸다. 즉, 컨버터에서 30.4[mA]의 누설전류가 발생하여, 인버터, 배터리, 계통 접지 측으로 각각 26.69[mA], 4.39[mA], 0.03[mA] 만큼 유입됨을 알 수 있다. 따라서, UPS의 기생 커패시턴스가 크게 설계되는 경우, 누설전류가 증가하여 인체 및 설비에 악영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

[표 3] 기생 커패시턴스에 따른 누설전류의 운용특성

시나리오	누설전류 [mA]			
	컨버터	인버터	배터리	계통 접지
Case I	0.31	0.28	0.05	0.03
Case II	3.12	2.80	0.46	0.03
Case III	30.40	26.69	4.39	0.03



(a) 누설전류의 흐름도



(b) 각 장치의 누설전류 크기

[그림 7] IGBT 스위칭에 의한 누설전류의 운용특성(Case III)



(b) 각 장치의 누설전류 크기

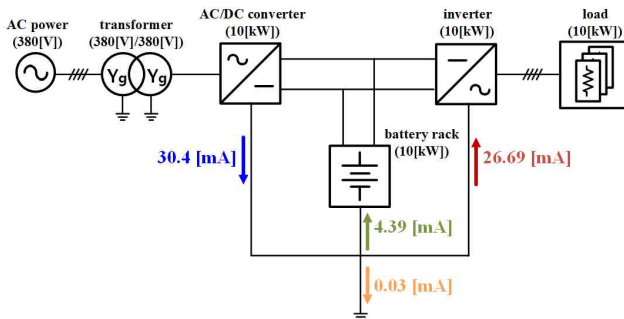
[그림 8] IGBT 스위칭에 의한 누설전류의 운용특성(Case III)

4.2.2 절연저항에 의한 누설전류 운용특성

상기에서 제시한 누설전류 발생 시나리오를 바탕으로, 절연저항에 따른 누설전류의 운용특성을 나타내면 표 4와 같다. 여기서, UPS의 절연저항의 크기를 100[kΩ], 10[kΩ]로 상정한 Case IV와 Case V를 비교하면, 배터리와 계통 접지 측의 누설전류가 각각 2.18배, 1.25배 정도 상승하고, 컨버터와 인버터 측의 누설전류는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 한편, 기생 커패시턴스의 크기가 가장 큰 Case VI의 누설전류의 운용특성을 나타내면 그림 8과 같다. 여기서, 그림 8 (a)는 누설전류의 흐름도를 나타내고, 그림 8 (b)는 각 장치의 누설전류 크기를 나타낸다. 즉, 컨버터에서 3.61[mA]의 누설전류가 발생하여, 인버터, 배터리, 계통 접지 측으로 각각 2.43[mA], 1.7[mA], 0.06[mA] 만큼 유입됨을 알 수 있다. 따라서, 결로현상 및 경년열화 등으로 인해 절연저항이 감소하는 경우, 배터리 측의 누설전류가 증가할 수 있지만, 그 영향이 기생 커패시턴스에 비해 작음을 알 수 있다.

[표 4] 절연저항에 따른 누설전류의 운용특성

시나리오	누설전류 [mA]			
	컨버터	인버터	배터리	계통 접지
Case IV	3.13	2.78	0.5	0.04
Case V	3.29	2.67	1.09	0.05
Case VI	3.61	2.43	1.7	0.06



(a) 누설전류의 흐름도

5. 결 론

본 논문에서는 UPS의 전기적 위해요인으로 평가되고 있는 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반부, UPS부, 등으로 구성된 10kW급 UPS의 모델링을 수행한다. 상기에서 제시한 발생 메커니즘과 모델링을 바탕으로 기생 커패시턴스와 절연저항에 따른 누설전류의 운용특성 평가한 결과, IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 컨버터 측에서 발생하여 배터리, 인버터, 계통 접지 측으로 유입되고, 기생 커패시턴스가 증가함에 따라 같이 상승하여 UPS의 절연에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한, 결로현상 및 경년열화 등으로 인해 절연저항이 감소하는 경우, 배터리 측의 누설전류가 증가할 수 있지만 그 영향이 기생 커패시턴스에 비해 작음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 정부(소방청, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2025-25395160, 리튬배터리 제조사업장의 전주기 화재 안전 관리시스템 기술 개발)

참고문헌

- [1] 김지명 외 4인, “누설 및 순환전류에 따른 ESS의 안전성 평가 방안에 관한 연구”, 2023년도 한국과학기술학회논문지, Vol. 24, No. 9, pp. 40–51, 2023