

누설 및 순환전류에 대한 ESS의 안전성 평가 방안에 관한 연구

김지명*, 한병길*, 이근형**, 이수용*, 노대석*

*한국기술교육대학교

**한국화학융합시험연구원

e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on Safety Evaluation Method for Leakage and Unbalanced Load Current in ESS

Ji-Myung Kim*, Byeong-Gill Han*, Keun Hyung Lee**, Soo-Yong Lee*, Dae-Seok Rho*

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

**Korea Testing & Research Institute

요약

최근, 에너지저장장치(ESS, energy storage system)에서 빈번하게 발생하고 있는 화재사고로 인하여, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중에서 누설전류는 ESS 배터리 안전성에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 계통 공장 및 부하불평형에 의한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘을 제시하고, 위험우선순위(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여, 다양한 누설 및 순환전류의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 불평형 부하부 등으로 구성된 누설 및 순환전류 안전성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 계통 공장 및 부하불평형에 의한 순환전류는 위험우선순위에서 가장 높게 평가되어, ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 크기 때문에, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.

1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생 에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능이 있는 에너지저장장치(ESS, energy storage system)의 설치가 급격하게 증가하고 있다[1]. 그러나 2017년 8월 고창 전력시험센터에서 발생한 화재로 시작으로 현재까지 지속적으로 ESS 화재사고가 발생하고 있어, ESS 산업 시장에 큰 피해를 주고 있다. 이에 따라, ESS의 안전기준을 고려한 위험요소 평가에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데, 이 중 누설전류는 ESS 화재사고의 주요 원인 중 하나로 평가되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 IGBT의 기생 커패시턴스, 배터리 기생 커패시턴스, 선로의 절연성능, 계통 공장 및 부하불평형에 의한 누설 및 순환전류 발생 메커니즘을 제시한다. 이를 바탕으로, 심각도, 발생도, 검출도로 구성된 위험순위결정(RPN, risk priority number) 평가방안을 모델링하여, 누설전류를 고려한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 여기서, 심각도는 고장 발생시 고객에 미치는 심각성, 발생도는 시스템 고장에 대한 발생 가능성, 검출도는 잠재적 고장에 대한 발견 가능성을 나타낸다. 한편, 실 계통에서 운용되고 있는

ESS 사이트를 대상으로 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 배전계통부, PCS부, 배터리부, 불평형부하부, 등으로 구성된 누설 및 순환전류의 안전성 평가 모델링을 수행한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 계통 공장 및 부하불평형에 의한 순환전류는 2개의 “medium”영역과 6개의 “high”영역으로 평가되어 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 가장 높으며, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다.

2. 누설 및 순환전류 발생 메커니즘

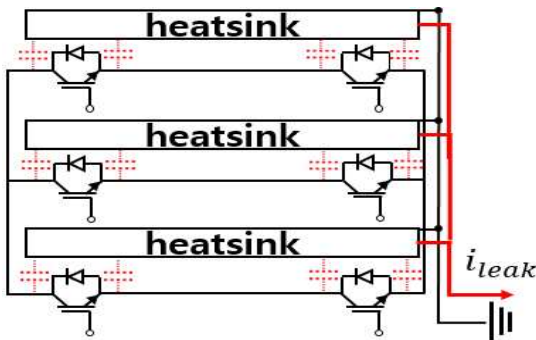
2.1 PCS측 누설전류 발생 메커니즘

일반적으로, 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 목적으로 설치되는 ESS의 구성은 AC전원부(연계용 변압기, 보호 장치), PCS부(필터, PCS변압기, IGBT, DC 커패시터), 배터리부(배터리, 보호 장치) 등으로 구성된다. 여기서, PCS측의 IGBT는 전력 변환을 목적으로 2~4[kHz]의 고주파로 스위칭하며, 이로 인한 온도상승을 억제하기 위해 방열판(heatsink)에 설치된다. 하지만, 그림 1과 같이 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의하여 IGBT의

고주파 스위칭으로 의도치 않은 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 방열판과 IGBT 사이에 존재하는 기생 커패시턴스에 의한 누설전류(i_{leak})는 식 (1)과 같이, 시간에 따른 IGBT 스위칭의 전압 변화량(dv/dt)과 기생 커패시턴스(C_{stray})에 의해 산정된다. 따라서, 배터리측의 DC전압의 크기와 방열판의 구조에 따라 누설전류의 발생에 큰 영향을 미친다.

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

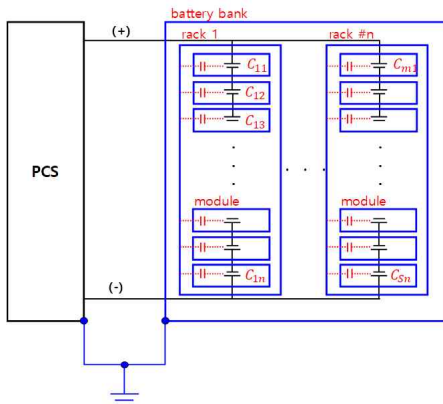
여기서, i_{leak} : 누설전류, C_{stray} : 기생 커패시턴스, v : PCS 전압, t : 시간



[그림 1] IGBT의 기생 커패시턴스에 의한 누설전류 발생 메커니즘

2.2 배터리측 누설전류 발생 메커니즘

배터리측 기생커패시턴스($C_{stray, IGBT}$)는 배터리와 외함 사이에 존재하며, 배터리의 용량 및 구성에 따라 변동되는 특성이 있다. 즉, 한정된 컨테이너 공간에 대용량의 배터리를 설치하기 위하여 배터리 모듈을 직·병렬로 조합하는 방식을 채택하는 경우, 배터리 기생커패시턴스가 수백 nF에서 수 uF까지 발생할 수 있다. 또한, 대용량 ESS의 배터리 용량에 따른 기생커패시턴스를 등가화하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 즉, ESS 배터리부의 전체 기생커패시턴스 값은 각 모듈 기생커패시턴스($C_{11} \sim C_{mn}$) 값들의 대수적인 합으로 표현할 수 있다.



[그림 2] ESS의 배터리 측 기생커패시턴스 등가회로도

2.3 절연성능에 따른 누설전류 발생 메커니즘

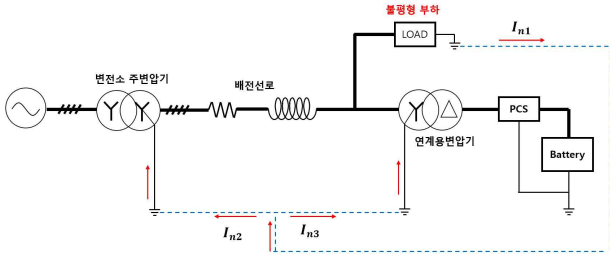
절연성능 저하에 따른 누설전류는 선로와 부하설비의 절연성능 저하로 발생할 수 있다. 먼저, 선로의 절연성능은 가설 시 전선피복의 손상이나 전선 접속부 및 전기기기 연결부의 노출에 의한 절연악화로 누설전류가 발생할 수 있다. 또한, 전로로 사용되는 전선은 장기간 사용 시, 사용 환경에 따라 열열화, 열변형, 오일이나 약품에 의한 열화, 내후성 열화, 저온 환경에서 균열이 발생하여 절연성능이 저하될 수 있다. 한편, 수용가 측 전기설비의 고장 및 취급 부주의로 인해 누설전류가 발생할 경우, 인체의 보호를 위하여 누전차단기가 동작하여야 하지만, 전기설비기술기준에 따라 30mA 이하의 정격감도전류에서는 동작하지 않으므로 항상 누설전류가 존재할 수 있다. 이때 발생하는 누설전류의 크기는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = \frac{V_0}{R_G} [A] \quad (2)$$

여기서, I_L : 누설전류, R_G : 누설된 전선의 저항, V_0 : 누설된 전선의 대지전압

2.4 계통조건에 의한 순환전류 발생 메커니즘

우리나라는 22.9kV 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 단상부하에 의해 부하불평형이 발생하여 중성선에 불평형 전류가 흐르게 된다. 또한, 부하의 크기가 크지 않은 시골지역의 경우, 계통의 공장이 40km를 넘어가는 경우도 있으며, 계통의 공장이 길어질수록 불평형 부하에 의해 흐르는 중성선 순환전류는 더욱 커질 가능성이 있다. 한편, 특고압을 수전 받는 수용가용 주변압기는 대부분 Δ -Yg 또는 Δ - Δ 결선방식이 채용되고 있지만, 태양광 전원이 연계된 변압기의 경우, 분산전원 연계 기준에 따라 Yg-방식 또는 Yg-Yg 결선방식을 사용하고 있으며, 설치비용의 문제점으로 변압기의 철심도 5각 철심이 아닌 3각 철심이 대부분 적용되고 있다. 따라서, 변압기 결선방식과 철심구조에 의하여, 계통 공장과 부하불평형에 의해 발생하는 중성선 전류(I_{n1})는 그림 3과 같이, 대부분 MTR(I_{n2})로 순환하게 되지만 일부 전류는 누설전류의 형태로 ESS의 연계용변압기(I_{n3})에 유입될 가능성이 있다.



[그림 3] 불평형 부하에 의한 누설전류 발생 메커니즘

3. 누설 및 순환전류를 고려한 ESS의 안전성 등급 평가 방안

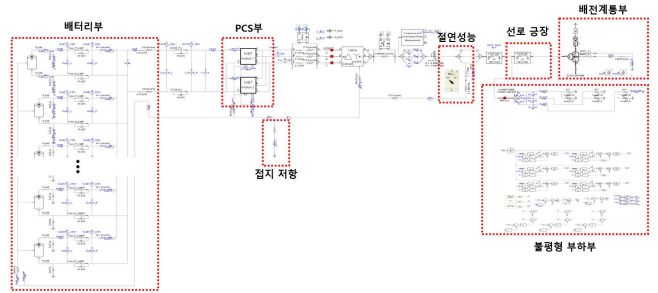
본 논문에서는 그림 4와 같이 실제 상황에 적합한 위험등급으로 분류한다. 여기서, 누설전류 및 순환전류의 심각도(S)는 2장에서 제시한 메커니즘에 의해 발생되어 배터리를 유입되는 누설전류의 크기에 따라 평가된다. 여기서, 심각도는 발생도(O)와 검출도(D)에 비해 누설전류 크기의 편차가 높게 나타날 가능성이 있으므로 위험등급을 “very low”, “low”, “medium”, “high”, “very high”의 5가지로 분류하여 높은 가중치를 적용한다. 즉, 누설전류의 크기가 한국전기설비규정(1mA)을 만족시키면 “very low”로 평가하고, 1mA보다 크고 10mA보다 작으면 “low”로, 10mA보다 크고 50mA보다 작으면 “medium”으로, 50mA보다 크고 100mA보다 작으면 “high”로, 100mA보다 크면 “very high”로 평가한다. 또한, 누설전류의 발생도(O)는 누설전류의 발생빈도를 바탕으로 평가되며, 충·방전 시 발생하는 IGBT 스위칭에 대한 발생도는 “low”, 절연성능 저하에 대한 발생도는 “very low”로, 계통조건에 대한 발생도는 “medium”으로 상정한다. 한편, 검출도(D)는 발생된 누설전류를 검출 가능성을 바탕으로 평가되며, IGBT 스위칭에 의한 누설전류는 ESS에 함께 설치되는 IMD를 통하여 절연저항을 모니터링 할 수 있으므로 “low”로, 절연성능 저하에 의한 누설전류는 상시 모니터링하지 않으므로 “medium”으로, 계통조건에 의한 순환전류는 상시 모니터링하므로 “very low”로 평가한다.

RPN(S*O*D)	RPN rating				
severity(S)	very low	low	medium	high	very high
occurrence(O)	very low	low	medium		
detection(D)	very low	low	medium		

[그림 4] Modified RPN chart

4. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 모델링

PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전계통부, 불평형 부하부, PCS부, 배터리부, 접지저항, 선로 공장, 선로의 절연성능 등으로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, 계통 조건에 의한 누설전류는 불평형 부하부, 선로 공장을 이용하며, 기생 성분 및 절연 성능에 의한 누설전류는 PCS의 기생 커패시턴스와 선로의 절연성능을 이용하여 모의한다.



[그림 5] 전체 시스템 모델링

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

누설전류에 대한 안전성 등급을 평가하기 위해 PCS, 배터리 등의 시뮬레이션 조건을 상정하면 표 1과 같다. 여기서, 배터리부는 0.7kV, 1kAh의 배터리 랙을 15개 병렬로 연결하여 1.05MWh의 용량을 가지며, 각 배터리 랙의 내부 인덕턴스 및 내부 저항은 제조사의 값을 바탕으로 각각 6uH, 152.6mΩ으로 상정한다. 또한, 배터리 및 DC 전로의 기생 커패시턴스는 10, 15, 20nF이고, IGBT의 기생 커패시턴스는 0.5, 1, 1.5nF이며, 절연 성능은 1, 20MΩ으로 상정한다. 한편, 선로 공장은 5, 10, 15km이고 불평형 부하의 용량은 10MVA, 불평형율은 5, 15, 30%으로 상정한다. 마지막으로, 접지 저항은 1, 30Ω이며, 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 8Ω, 3.52Ω으로 상정한다.

[표 1] 시뮬레이션 조건

	item	contents
battery rack	voltage[kV]	0.7
	capacity[kAh]	1
	internal inductance[uH]	6
	internal resistance[mΩ]	152.6
stray capacitance	battery & DC line[nF]	10, 20
	IGBT[nF]	1, 1.5
secondary line	insulation resistance[MΩ]	1, 20
	line length[km]	5, 15
grid section	customer load[MVA]	10
	unbalanced rate[%]	5, 15
	grounding resistance[Ω]	1, 30
ESS section	resistance of battery case[Ω]	8
	resistance of PCS case[Ω]	3.52

5.2 누설 및 순환전류에 의한 위험우선순위 특성

따라서, 상기의 3장에서 제안한 위험우선순위 평가방식을 바탕으로 누설전류에 의한 ESS의 안전성을 평가하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다. 먼저, IGBT의 기생커패시턴스에 의한 누설전류의 경우, RPN 값은 4 ~ 12로 산정되며, 위험 영역은 3개의 “low”와, 1개의 “medium”으로 평가된다. 또한, 배터리 기생 커패시턴스에 의한 누설전류의 경우, RPN 값은 4 ~ 8로 산정되며, 위험 영역은 4개의 “low”로 평가된다. 한편, 절연내력 저하에 의한 누설전류의 경우, RPN 값은 3으로 산정되며, 위험 영역은 4개의 “low”로 평가된다. 마지막으로 선로 공장 및 부하불평형에 의한 누설전류의 경우, RPN 값은 15 ~ 21로 산정되며, 위험 영역은 2개의 “medium”과 6개의 “high”로 평가된다. 즉, 누설전류에 대한 ESS의 안전성은 상기에서 평가된 RPN과 risk area를 바탕으로 계통 공장 및 부하불평형이 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 가장 높으며, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다. 또한, IGBT의 기생 커패시턴스에 의해 발생된 누설전류는 배터리측 기생 커패시턴스와 절연 성능저하에 의해 발생된 누설전류보다 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, IGBT와 방열판의 설계를 자세하게 검토할 필요가 있다.

[표 2] 누설 및 순환전류에 대한 안전성 등급 평가

items	Case	S	O	D	RPN	risk area
IGBT의 기생커패시턴스	1	1	2	2	4	low
	2	2	2	2	8	low
	3	2	2	2	8	low
	4	3	2	2	12	medium
배터리 기생커패시턴스	1	1	2	2	4	low
	2	1	2	2	4	low
	3	1	2	2	4	low
	4	2	2	2	8	low
절연내력 저하	1	1	1	3	3	low
	2	1	1	3	3	low
	3	1	1	3	3	low
	4	1	1	3	3	low
선로 공장 및 부하 불평형	5	5	3	1	15	medium
	6	7	3	1	21	high
	7	7	3	1	21	high
	8	7	3	1	21	high
	5	5	3	1	15	medium
	6	7	3	1	21	high
	7	7	3	1	21	high
	8	7	3	1	21	high

6. 결 론

본 논문에서는 ESS 화재 원인 중 하나로 평가되고 있는 누설전류의 발생 메커니즘을 제시하고, RPN 평가 방안을 모델링하여 다양한 누설 및 순환전류의 발생원인에 의한 ESS의 안전성 평가를 수행한다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 누설전류의 안전성 평가 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 누설전류에 의한 ESS의 안전성을 평가한다. 상기에서 제안한 평가방안을 바탕으로 누설 및 순환전류에 대한 ESS의 안전성은 상기에서 평가된 RPN과 risk area를 바탕으로 계통 공장 및 부하불평형이 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 가장 높으며, 계통 조건에 대한 면밀한 설계 검토 및 모니터링이 요구됨을 알 수 있다. 또한, IGBT의 기생 커패시턴스에 의해 발생된 누설전류는 배터리측 기생 커패시턴스와 절연 성능저하에 의해 발생된 누설전류보다 ESS의 안전성에 악영향을 줄 가능성이 높으므로, IGBT와 방열판의 설계를 자세하게 검토할 필요가 있다.

참고문헌

[1] Hu-Dong Lee, Ki-Young Kim, Mi-Sung Kim, Dae-Seok Rho, “A Study on Economic Evaluation Modeling of MVDC Distribution System for Hosting Capacity of PV System,” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 22, no. 3, pp. 1-12, 2021.