

계통 공장 및 부하불평형을 고려한 ESS의 누설전류 특성에 관한 연구

김지명, 최성문, 이명근, 한병길, 노대석
한국기술교육대학교
e-mail:kjmcjd@koreatech.ac.kr

A Study on the Leakage Current Characteristics of ESS Considering Line Length and Unbalanced Load

Ji-Myung Kim, Sung-Moon Choi, Myung-geun Lee, Byeong-Gill Han, Dea-Seok Rho
Korea University of Technology and Education

요약

ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 정부에서는 사고원인에 대한 조사를 2차에 걸쳐 시행하여 화재사고에 대한 원인을 제시하였고, 그 중에서 전기적인 위해요인으로 누설전류도 주요 원인 중 하나로 고려되고 있다. 여기서, 계통 공장 및 불평형부하에 의한 누설전류는 불평형 부하로 인해 발생한 순환 전류가 Yg- Δ 결선방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS로 유입된다. 따라서, 본 논문에서는 계통 공장 및 불평형부하에 의한 ESS측의 누설전류 발생 메커니즘을 제안하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 배전 계통부, 불평형 부하부, ESS부로 이루어진 전체 시스템을 모델링하고, 누설전류의 특성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 다양한 시나리오별 시뮬레이션을 수행한 결과, 전체 순환전류는 계통 공장과 부하불평형이 가혹한 조건을 가질수록 증가하는 것을 알 수 있었고 이에 따라 전체 순환전류 대비 배터리로 유입되는 누설전류의 비율도 증가하는 것을 알 수 있었다.

1. 서론

최근, 환경오염 문제와 기후변화에 대응하기 위하여, 재생 에너지원의 출력 안정화, 수요관리 및 주파수 조정 등 다양한 기능을 가지고 있는 ESS의 설치가 급격하게 증가하고 있다. 그러나 리튬이온전지를 이용한 ESS의 화재사고가 빈번하게 발생하여 많은 재산피해가 보고되고 있고, 외국에서는 재산 피해와 인명피해도 보고되고 있다. 이에 따라, 정부에서는 ESS의 정확한 화재원인을 파악하고 안전성을 확보하기 위하여, 사고원인에 대한 조사를 2차에 걸쳐 시행하여 화재사고에 대한 원인을 제시하였고, 그 중에서 전기적인 위해요인으로 누설전류도 주요 원인 중 하나로 고려되고 있다[1,2]. ESS으로 유입되는 누설전류 중 계통 공장 및 부하불평형 전류에 의한 누설전류는 계통 공장과 불평형 부하로 인해 발생한 불평형 전류가 Yg- Δ 결선방식의 3각 철심이 적용된 태양광전원 연계형 변압기의 중성선을 통해 ESS측으로 유입된다.

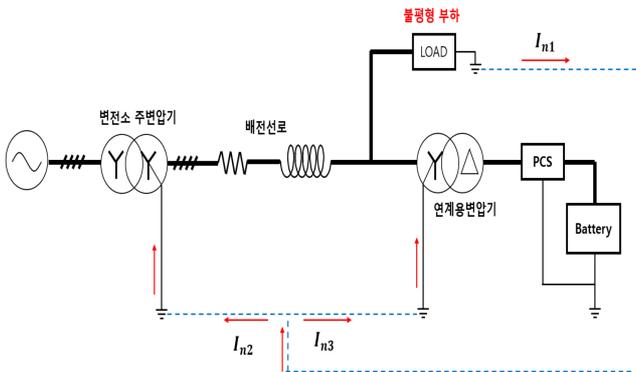
따라서, 본 논문에서는 계통불평형에 의한 ESS측의 누설 전류 발생 메커니즘을 제안하고 이를 바탕으로, 전력계통 상

용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 누설전류의 발생 메커니즘을 모델링하고, 계통불평형 전류에 의한 누설 전류의 특성을 평가한다. 상기의 모델링을 바탕으로 시나리오별 시뮬레이션을 수행한 결과, 전체 순환전류는 계통 공장과 부하불평형이 가혹한 조건을 가질수록 증가하는 것을 알 수 있었고 전체 순환전류 대비 배터리로 유입되는 누설전류의 비율도 점점 증가하는 것을 알 수 있었다.

2. 계통 공장 및 부하불평형에 의한 누설전류 발생 메커니즘

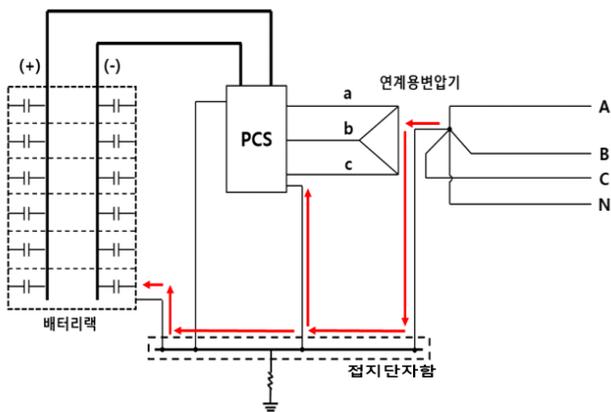
우리나라는 22.9[kV] 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있는데, 이러한 방식은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 단상부하에 의해 부하불평형이 발생하여 중성선에 불평형 전류가 흐르게 된다. 또한, 부하의 크기가 크지 않은 시골지역의 경우, 계통의 공장이 40[km]를 넘어가는 경우도 있으며, 계통의 공장이 길어질수록 불평형 부하에 의해 흐르는 중성선 순환전류는 더욱 커질 가능성이 있다. 한편, 특고압을 수전 받는 수용가용 주변압기는 대

부분 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 1과 같이, 대부분 M.TR(I_{n2})로 순환하게 되지만 일부 전류는 누설전류의 형태로 ESS의 연계용 변압기(I_{n3})에 유입될 가능성이 있다.



[그림 1] 불평형 부하에 의한 누설전류 발생 메커니즘

한편, ESS는 배터리 랙 및 PCS의 외함과 연계용 변압기의 중성선을 공통으로 접지하여 운용되기 때문에, 계통에서 발생한 불평형 전류(누설전류)가 공통접지를 통하여 ESS의 접지선으로 유입되는 흐름을 나타내면 그림 2와 같다. 이때, 전기설비기준에 제시된 기준에 따라 설치된 접지저항의 크기에 따라, 불평형 전류는 대지로 모두 흘러 들어가지 않고 PCS와 배터리의 외함으로 유입될 가능성이 있다. 즉, 외함의 저항 및 접지저항의 크기에 따라, 외함으로 흘러 들어가는 누설전류의 크기가 좌우됨을 알 수 있다.

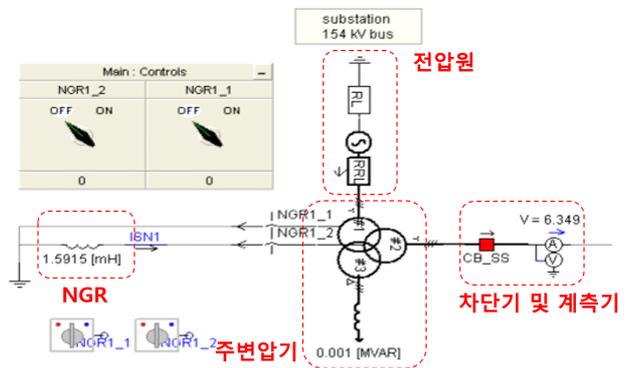


[그림 2] 중성선을 통해 유입되는 누설전류의 흐름

3. PSCAD/EMTDC에 의한 ESS의 누설전류 발생 모델링

3.1 배전용 변전소

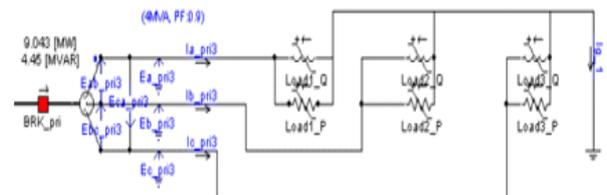
배전용 변전소는 그림 3과 같이 고압계통과 정류용 변압기로 구성된다. 구체적으로, 배전용 변전소는 154/22.9[kV]의 1차측과 2차측 전압, 45/60[MVA]용량의 주변압기, 모선임피던스로 구성된다. 또한, 배전용 변전소의 주변압기는 Y-Yg-D 결선으로 구성된다. 또한, 3차 권선은 제3고조파를 제거를 위하여 델타 결선방식을 채용한다. 또한, 주변압기 2차측은 배전계통의 지락전류를 제한하기 위한 0.6[Ω]의 NGR(neutral ground resistor)을 설치한다.



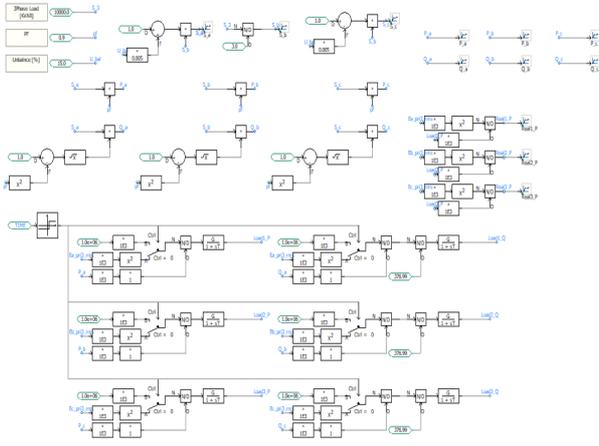
[그림 3] 배전용 변전소 모델링

3.2 부하불평형

고압계통에서 3상 부하와 불평형 조건을 모의하기 위하여 수용가부하를 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링하면 그림 4과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 그림 4(a)는 불평형부하부의 모델링을 나타내고, 그림 4(b)는 정전력 제어기를 나타내며, 정전력부하의 제어를 위하여, 부하의 순시값과 목표값을 하는 부하의 편차에 대해, PI제어를 통해 목표값을 추종할 수 있다.



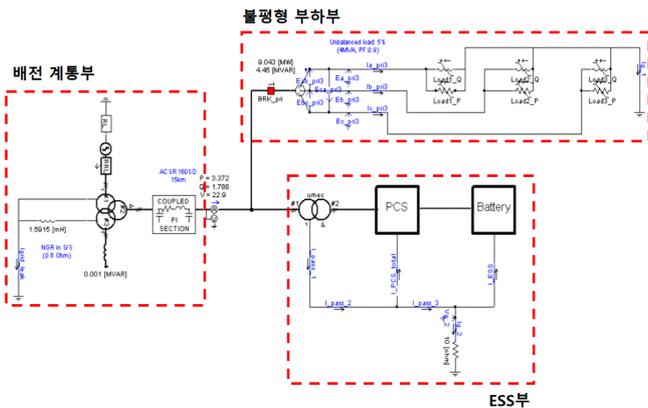
(a) 불평형 부하부



(b) 정전력 제어부
[그림 4] 불평형 부하 모델링

3.3 전체 시스템

배전용 변전소와 고압계통으로 구성된 배전 계통부와 불평형 부하부, ESS부로 구성된 전체 시스템을 모델링하면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배전 계통부는 Yg-Yg- Δ 결선방식의 3권선 주변압기와 배전계통(ACSR 160[mm²])로 구성하며, 배전계통을 변경하여 계통 공장에 따른 누설전류 특성을 분석한다. 한편, 불평형 부하부는 3상 정전력 부하와 불평형 부하 제어장치로 구성된다. 또한, ESS부는 Yg- Δ 결선방식의 연계용 변압기의 증성선과 ESS와 배터리의 외함 접지선으로 구성된다.



[그림 5] 전체시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

계통 공장 및 불평형 부하에 의해 발생하는 누설전류의 특성을 분석하기 위하여, 표 1과 같이 시뮬레이션 조건을 상정한다. 여기서, 배전계통은 고압 계통 공장을 5~25[km], 수용가 부하를 4[MVA], 역률을 0.9로 상정하고, NGR은 0[Ω]과 0.6[Ω]이며 계통불평형은 5~30[%]의 부하 불평형율을 고

려한다. 공통접지 저항은 1종 접지 기준의 1[Ω]으로 상정하며, 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 8[Ω], 3.52[Ω]을 상정한다. 한편, 이를 상세한 케이스로 상정하면 표 3과 같다.

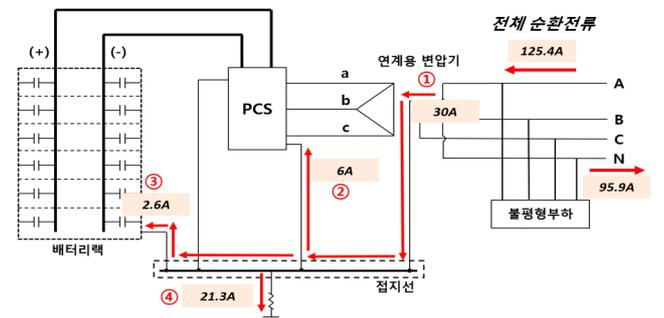
[표 2] 시뮬레이션 조건

	item	contents
계통부	계통 공장[km]	5, 10, 25
	부하[MVA]	4
	불평형부하율[%]	5, 15, 30
	NGR[Ω]	0, 0.6
ESS부	접지 저항[Ω]	1, 30
	배터리외함 저항[Ω]	8
	PCS 외함 저항[Ω]	3.52

[표 3] 누설전류 상정 조건

	계통공장[km]	부하불평형률[%]
Case 1	5	5
Case 2	5	15
Case 3	5	30
Case 4	10	5
Case 5	10	15
Case 6	10	30
Case 7	25	5
Case 8	25	15
Case 9	25	30

4.2 계통공장 및 부하불평형에 의한 누설전류 특성
4.1의 시뮬레이션 조건을 바탕으로 NGR이 설치될 때 누설전류가 제일 많이 발생하는 Case 9인 경우, 누설전류 특성을 나타내면 그림 6과 같다. 여기서, 전체 순환전류는 125.4[A]이고 계통으로 95.9[A], 연계용변압기로 30[A]가 유입(①)되는 것을 알 수 있다. 또한, 연계용변압기(①)로 유입된 30[A] 중 PCS 외함(②)과 ESS의 외함(③)으로는 각각 6[A], 2.6[A]의 누설전류가 유입되며 이를 제외한 21.3[A]의 전류는 접지(④)를 통하여 대지로 흘러간다.



[그림 6] Case 9인 경우 누설전류 특성

한편, 동일한 방식으로 상정사고 조건별로 PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 결과를 비교·분석하여 나타내면 표 4,

5. 결 론

표 5와 같다. 여기서, 표 4는 NGR을 설치할 경우 Case별 누설전류의 특성이며, 표 4에서 전체 순환전류의 크기는 11.7[A]에서 125.4[A]로, 배터리로 유입되는 누설전류의 크기는 0.05[A]에서 2.6[A]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, 전체 순환전류 대비 배터리로 유입되는 누설전류는 Case 1 ~ Case 3은 0.77[%], Case 4 ~ Case 6은 1.5[%], Case 7 ~ Case 9는 2.1[%]로 계통 공장이 늘어남에 따라 배터리로 유입되는 누설전류의 크기가 증가하여 계통 공장이 전체 순환전류 뿐만 아니라 배터리로 유입되는 누설전류에도 영향을 끼침을 알 수 있다. 한편, 표 5는 NGR을 미설치할 경우의 누설전류 특성을 나타내며, NGR을 설치할 경우보다 전체 순환전류의 크기가 소폭 감소함을 알 수 있다. 또한, 전체 순환전류 대비 배터리로 유입되는 누설전류는 Case 1 ~ Case 3은 0.46[%], Case 4 ~ Case 6은 1.2[%], Case 7 ~ Case 9는 1.9[%]로 계통 공장이 늘어남에 따라 배터리로 유입되는 누설전류의 크기가 증가하지만 NGR을 설치할 경우보다 증가하는 비율이 작은 것을 알 수 있다.

[표 4] NGR 설치 시, Case별 누설전류 특성

items	순환전류 크기[A]		누설전류 크기[A]			
	전체	순환	계통유입 (①)	PCS 유입(②)	배터리 유입(③)	접지(④)
Case 1	11.7	11.1	0.61	0.12	0.05	0.43
Case 2	35	32	3.1	0.36	0.27	2.22
Case 3	70.9	64.7	6.3	1.27	0.55	4.46
Case 4	14.3	11.9	2.44	0.49	0.21	1.73
Case 5	43.1	35.8	7.35	1.49	0.65	5.21
Case 6	86.8	72.2	14.8	3	1.31	10.5
Case 7	20.1	15.4	4.83	0.97	0.42	3.42
Case 8	61.1	46.8	14.6	2.9	1.3	10.4
Case 9	125.4	95.9	30	6	2.6	21.3

[표 5] NGR 미설치 시, Case별 누설전류 특성

items	순환전류 크기[A]		누설전류 크기[A]			
	전체	순환	계통유입 (①)	PCS 유입(②)	배터리 유입(③)	접지(④)
Case 1	11.7	11.1	0.61	0.12	0.05	0.43
Case 2	35	32	1.8	0.36	0.16	1.29
Case 3	70.7	67.2	3.6	0.74	0.32	2.59
Case 4	14.2	12.2	2	0.46	0.17	1.42
Case 5	42.8	37	6	1.22	0.53	4.28
Case 6	86.1	74.4	12.1	2.4	1	8.6
Case 7	19.9	15.7	4.28	0.86	0.37	3
Case 8	60.2	47.7	12.9	2.6	1.15	9.2
Case 9	123	97.4	26.48	5.36	2.34	18.7

본 논문에서는 전기위해요인 중 하나인 누설전류를 대상으로 실제 사이트의 계측값을 바탕으로 계통 공장 및 부하불평형에 의한 누설전류의 메커니즘을 제시하며 PSCAD/EMTDC에 의한 누설전류 특성을 분석하였다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실제 계통에서 일어날 수 있는 전기위해요인 중 하나인 누설전류의 계통 공장과 부하불평형에 의한 누설전류 발생 메커니즘을 제시하였다.

(2) NGR이 설치된 경우, 계통 공장이 늘어남에 따라 배터리로 유입되는 누설전류의 크기가 증가하여 계통 공장이 전체 순환전류 뿐만 아니라 배터리로 유입되는 누설전류에도 영향을 끼침을 알 수 있다.

(3) NGR이 미설치된 경우, 계통 공장이 늘어남에 따라 배터리로 유입되는 누설전류의 크기가 증가하지만 NGR을 설치할 경우보다 증가하는 비율이 작은 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20213030160080)로서, 관계 부처에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. B. Bang, "A Study on the Fire Risk of ESS through Fire Status and Field Investigation", FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, vol. 32, no. 6, pp.91-99, 2018.12.
- [2] H. J. Jang, T. S. Song, J. Y. Kim, S. J. Kim, T. H. Jang "Study on Analysis of Fire Factor and Development Direction of Standard/safety Requirement to Keep Safety for Energy Storage System (ESS)", Journal of Standards, Certification and Safety, vol. 3, no. 9, pp.25-49, 2019.9.