

전기저장장치의 기생커패시턴스 및 SOC에 따른 절연저항 모델링에 관한 연구

김기영*, 최성식*, 박재범*, 김미성*, 노대석**

*한국화학융합시험연구원, **한국기술교육대학교대학교 전기전자통신공학부
e-mail : g2rkgy@ktr.or.kr

A Modeling of Insulation Resistance according to Battery Stray Capacitance and SOC in ESS

Ki-Young Kim*, Sung-Seek Choi*, Jae-Bum Park*, Mi-Sung Kim*, Dae-Seok Rho**

*Korea Testing and Research Institute

**Dept. of Electric Engineering, Korea Unuiversity Technology and Education

요약

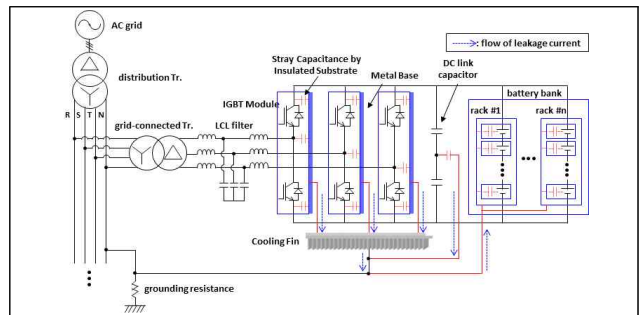
본 논문에서는 ESS를 안정적으로 운용하기 위하여, 대용량 ESS의 계통구성과 배터리 용량에 따라 발생하는 정전용량을 분석하고, 배터리 기생커패시턴스에 의한 절연저항 변동 메커니즘을 제안한다. 또한, ESS가 연계된 직류전로의 배터리 SOC에 따른 전압변동이 절연저항에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 배터리 SOC에 따른 절연저항 변동 메커니즘을 제안한다. 한편, PSCAD/EMTDC를 이용하여, 배전계통부와 ESS부, 절연저항감시장치부, 배터리 기생커패시턴스 및 SOC부 등으로 구성된 ESS 연계 직류계통을 모델링을 제시한다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, ESS의 배터리 기생커패시턴스와 SOC가 증가할수록 누설전류와 CMV는 상승하고, 절연저항은 크게 저하됨을 확인할 수 있었다.

1. 서론

절연저항 변동 메커니즘

최근, 태양광의 경우 정부의 재생에너지 3020정책에 따라 수십에서 수백 메가와트 규모로 도입되고 있으며, 이에 따라 연계되는 전기저장장치(ESS, energy storage system)의 용량도 함께 급증하고 있는 실정이다. 그러나 국내 및 국외에서 운용 중인 다수의 리튬이온 기반 ESS에서 화재사고가 빈번히 발생하여, 이에 대한 대책으로 다양한 보호 기기들이 ESS에 적용되고 있다. 또한, 실 계통에서 운용 중인 다수의 절연저항감시장치(IMD, insulation monitoring device)는 기존의 보호기기와는 달리 명확한 정정기준이 없고, 특히 대용량 ESS에서는 배터리 기생커패시턴스와 SOC에 따라 그 값이 급격히 변동하는 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 ESS를 안정적으로 운용하기 위하여, IMD의 동작특성과 실 계통에서 발생하는 문제점 그리고 운영환경 및 운전조건에 따라 변동되는 ESS절연저항 실 데이터 사례분석을 수행한다. 이를 통해, 대용량 ESS의 계통구성과 배터리 용량에 따라 발생하는 정전용량을 분석하고, 이러한 배터리 기생커패시턴스에 의한 절연저항 변동 메커니즘을 제안한다. 또한, ESS가 연계된 직류전로의 배터리 SOC에 따른 전압변동이 절연저항에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 배터리 SOC에 따른 절연저항 변동 메커니즘과 모델링을 제안한다.

일반적으로 태양광전원 연계용 ESS는 AC전원부(연계용 변압기, 보호소자), PCS부(AC 필터, PCS용 변압기, IGBT, 방열판, DC링크 커패시터), 배터리부(배터리, BMS, 보호소자) 등으로 구성된다. 여기서, 절연저항을 저하시키는 기생 커패시턴스는 그림 1과 같이 크게 PCS 측과 배터리 측으로 분류된다. 먼저, PCS의 기생커패시턴스($C_{stray, batt}$)는 IGBT와 방열을 해소하기 위한 방열판 사이에 존재하며, PCS를 구성하는 IGBT의 개수나 회로구성, IGBT의 스위칭 주파수에 따라 변동되는 특징이 있다.

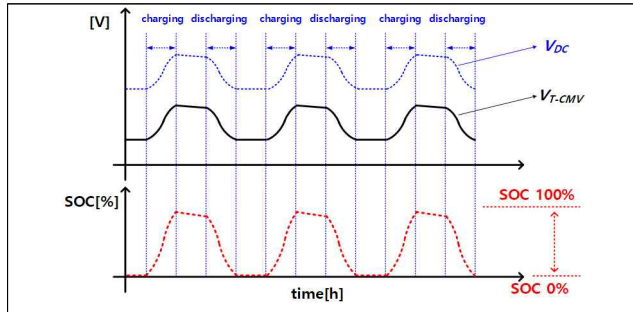


[그림 1] ESS설비의 기생커패시턴스

2. ESS의 기생커패시턴스 및 SOC에 따른

한편, ESS에서 사용되는 PCS는 전력변환을 위한 스위칭소

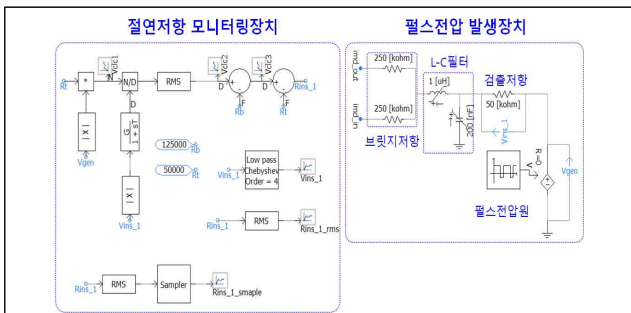
자인 IGBT가 5~10[kHz]의 고주파 스위칭 동작을 하며, 이로 인하여 CMV가 발생한다. 여기서, ESS의 CMV는 IGBT 스위칭 성분과 계통 교류성분 그리고 직류성분의 합성으로 구성된다. 특히, 배터리의 SOC가 높아질 경우, 배터리의 충전모드가 정전류(CC, Constant Current)모드에서 정전압(CV, Constant Voltage)모드로 변경되며, 더 높은 직류전압을 제어하기 위하여, IGBT 스위칭 성분과 직류성분도 함께 증가하게 된다. 이를 바탕으로 배터리 SOC와 합성 CMV의 상관관계를 나타내면 그림 2와 같다.



[그림 2] 배터리 SOC에 따른 합성 CMV의 변동 특성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 ESS의 절연저항 모델링

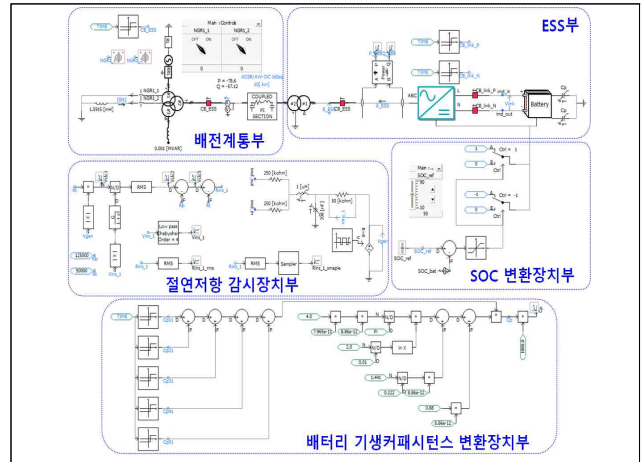
절연저항 감시장치부는 그림 3과 같이 펄스전압 발생장치와 절연저항 모니터링장치로 구성한다. 먼저, 펄스전압 발생장치는 브릿지저항과 L-C필터, 검출저항, 펄스 전압원으로 구성한다. 여기서, 펄스 전압원은 ESS DC 전로의 전압을 고려하여 한 주기의 펄스 전압 크기를 ±50V로 발생시킨다. 또한, 절연저항 모니터링장치는 브릿지저항과 검출저항에 인가되는 펄스전압 값을 이용하여 DC 전로의 절연저항 값을 측정한다.



[그림 3] 절연저항 감시장치부 모델링 모델링

절연저항 발생메커니즘을 해석하기 위한 전체 시스템은 그림 4와 같이 배전계통부와 ESS부, 절연저항 감시장치부, 배터리 기생커패시턴스부, 배터리 SOC부로 구성된다. 먼저, 배터

리 용량에 따라 달라지는 기생커패시턴스의 값은 실증사이트의 데이터를 바탕으로 산정하여 배터리 기생커패시턴스부의 모델링에 적용한다. 또한, 배터리 SOC부는 배터리 용량과 DC 전압을 고려하여 충·방전을 수행하도록 설정한다.



[그림 4] 전체 시스템 모델링

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 배터리 기생커패시턴스와 SOC에 따른 절연저항의 변동특성을 분석하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 배터리의 SOC 운용범위는 10[%] ~ 90[%]로 상정하고, IGBT 기생커패시턴스는 3[nF]으로 적용한다. 또한, ESS의 공통접지 저항은 30[Ω], 배터리와 PCS의 외함 저항은 각각 0.15[Ω]과 0.2[Ω]으로 상정한다. 한편, IMD의 펄스 전압의 크기와 주파수는 제조사의 성능을 바탕으로 각각 50[V], 1[Hz]를 적용하고, 절연저항 샘플링 주파수는 1[Hz]로 상정한다. 또한, IMD에서 절연저항을 측정하기 위한 브릿지저항과 테스트 저항은 각각 200[kΩ], 50[kΩ]을 적용한다.

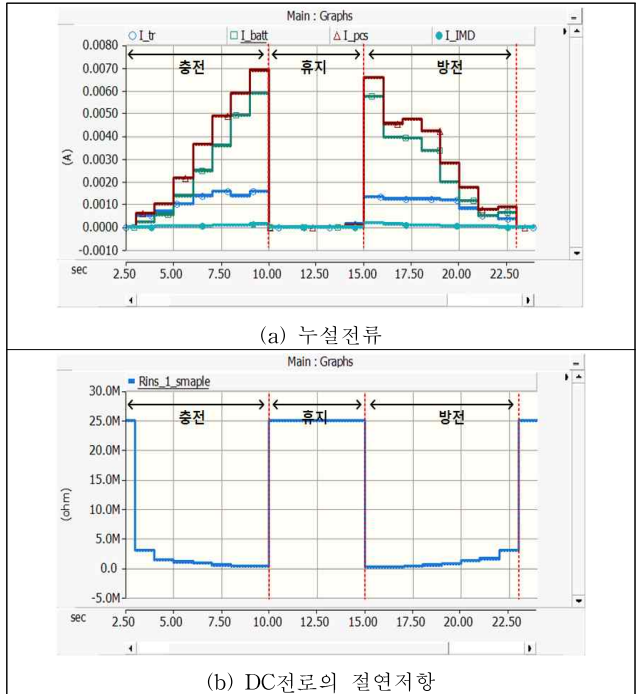
[표 1] 시뮬레이션 조건

항목		내역	
ESS	배터리	SOC 운용범위 외함저항	10[%] ~ 90[%] 0.15[Ω]
	PCS	IGBT 기생커패시턴스 외함저항	3[nF] 0.2[Ω]
접지		접지저항 선로 저항	30[Ω] 0.1[Ω]
절연저항 감시장치		샘플링주파수	1[Hz]
		펄스전압	50[V]
		펄스주파수	1[Hz]
		브릿지 저항 테스트 저항	200[kΩ] 50[kΩ]

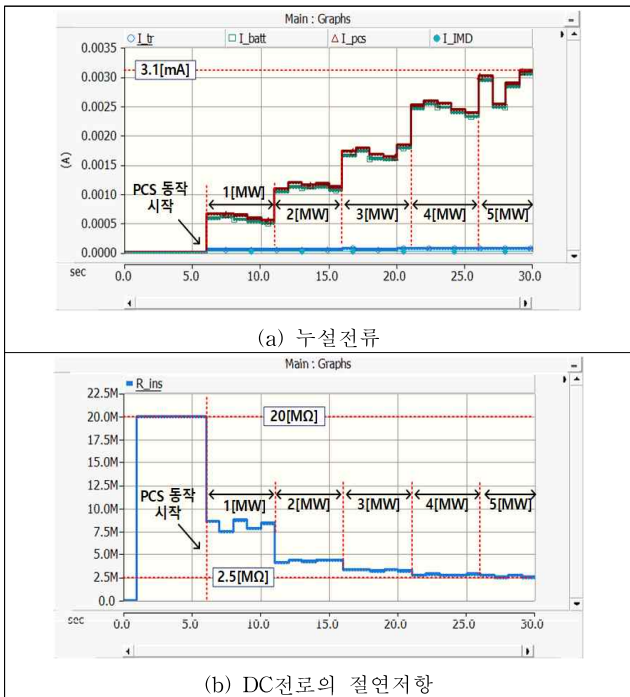
4.2 기생커패시턴스에 따른 절연저항 특성분석

값이 더욱 저하됨을 알 수 있다.

상기에서 제시한 모델링을 바탕으로, 배터리 및 PCS 기생 커패시턴스에 의한 절연저항 변동특성은 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5 (a)는 배터리 용량에 따른 기생커패시턴스의 값에 따라 배터리측과 PCS측, 연계용변압기측의 누설전류 특성을 나타낸 것이다. 또한, 그림 5 (b)는 기생커패시턴스에 따른 절연저항 변동특성을 나타낸 것으로 배터리 기생커패시턴스를 10[nF]에서 50[nF]까지 10[nF]씩 증가시키면, 배터리측과 PCS측의 누설전류는 최대 3.2[mA]까지 증가하고, DC전로의 절연저항 값은 약 20[MΩ]에서 2.5[MΩ]까지 감소됨을 알 수 있다.



[그림 6] 배터리 SOC에 의한 누설전류 및 절연저항 특성



[그림 5] 기생커패시턴스에 의한 누설전류 및 절연저항 특성

5. 결 론

본 논문에서는 실 계통에서 운용중인 ESS의 절연저항 변동 특성을 분석하기 위하여, 배터리 기생커패시턴스와 SOC에 따른 절연저항 변동메커니즘과 모델링을 제시하였다. 이를 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과 ESS가 연계된 직류전로의 절연저항이 주로 배터리 기생커패시턴스와 SOC에 따라 크게 변동됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20206910100090, No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김기영, 이후동, 태동현, 노대석, “직류비접지계통에서의 절연저항측정장치(IMD)를 이용한 사고검출 알고리즘”, 산학기술학회논문지, 제 21권 9호, pp. 528-535, 9월, 2020년.

4.3 SOC에 따른 절연저항 특성분석

상기에서 제안한 모델링을 바탕으로, 5[MW]용량의 1,500[V]급 배터리 SOC에 의한 절연저항 변동특성은 그림 6과 같다. 여기서, 그림 6 (a)는 배터리의 SOC에 따라 발생하는 누설전류 특성을 나타낸 것이고, 그림 6 (b)는 절연저항 변동특성을 나타낸 것이다. 즉, SOC값을 약 10%(1,100V)에서 배터리 충전을 개시한 이후에 약 90%(1,500V)까지 꾸준히 증가시키면, 연계용 변압기측과 배터리측, PCS측의 누설전류는 각각 최대 1.6[mA], 5.9[mA], 6.9[mA]까지 증가함을 알 수 있다. 또한, DC전로의 절연저항 값은 25[MΩ]에서 202[kΩ]까지 감소되어, 배터리의 랙 전압이 1,000[V]인 경우와 비교하여 그