배전시스템에 전지전력저장시스템의 적용에 관한 연구

* *김영성, *문선호, *추동욱, **김응상, *김재철
*: 숭실대학교 전기공학과 **: 전기 연구소

A Study on Application of BESS at Distribution System

* *Young-Sung Kim, *Sun-Ho Moon, Dong-Wook Chu, **Eung-Sang Kim, *Jae-Chul Kim
* : Dept. of Electrical Engineering Soongsil University ** : KERI

Abstract

This paper presents application of battery energy storage system(BESS) for interconnection with power distribution system. We configured interconnection model using PSCAD/EMTDC program. The simulation for voltage regulation on BESS interconnection with power distribution analyzes transient voltage variation, steady state voltage variation, and voltage of reverse power flow at interconnected feeder and nearby feeder.

1. 서 론

산업의 발달은 전력공급의 악화와 부하율의 하락을 가져온다. 이에 대한 대책으로 새로운 에너지 저장기술을 요구하게 되었다[1,2]. 기동정지 및 부하추종이 등의 운전특성이 우수하고, 입지제약조건이 비교적 적고 높은 에너지 밀도를 갖는 전지전력저장시스템(BESS)이 가장 현실화에 가깝게 대두된다[2]. 그러나 BESS를 배전시스템에 연계운전하게 되면 종래와는 달리 부하지역에 전원이 존재하므로 계통보호문제, 전압문제, 고조파문제 등에 의하여 전력품질 및 계통의 신뢰도를 하락시키는 문제가 발생한다. 본 논문은 이러한 문제점 중에서 BESS를 배전시스템에 연계운전할 때 발생하는 전압변동에 대하여 고찰하였다. 기존의 전압변동 해석은 피더에 부하를 균등분포로 구성하여 정적해석을 수행하여 순시전압변동에 대하여 고찰하였다[7]. 그러나 BESS의 충방전 운전특성상 기존의 해석방법으로는 전압변동의 정확한 해석이 불가능하다. 그러므로, 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 BESS와 배전시스템의 연계모델을 구성하여 각종 사례연구를 통하여 연계시 과도전압변동에 대해서 동적해석을 수행하였다. 본 전압변동에 대한 시뮬레이션은 BESS의 충방전운전을 고려하여 배전선로 부하를 급전선(feeder)간 균등분포 및 불균등분포로 상정하여 BESS의 충전과 방전운전을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 시뮬레이션 모델

2.1 전지전력저장시스템의 모델

BESS의 모델은 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 전지부, 전력변환장치부, 변압기부, 전력변환제어부, 필터부, 연계리액터부 등으로 구성하였다. 본 논문에서 구성한 BESS의 모델은 그림 1에 나타난 것과 같다.

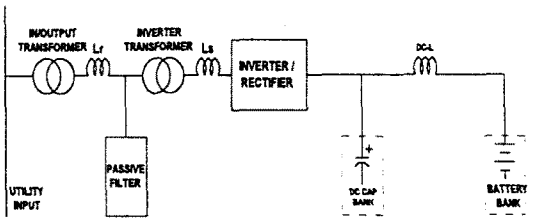

그림 1 BESS 모델

그림 1에서 전지 모델은 에너지 축적소자인 콘덴서와 저항을 이용하여 전지의 충전특성 및 방전특성과 동일한 특성을 갖도록 테브난(Thevenin)의 등가회로로 구성[3]하였고 전력변환장치 모델구성은 단상 전파 브리지 인버터 6개 스택(stack)과 변압기의 지그재그(zig-zag)결선을 이용하여 12펄스 인버터 모델을 구성하였다[4]. 이렇게 구성된 전력변환장치는 12펄스 파형을 생성하므로 전력변환장치의 출력에 의해 발생하는 저차고조파를 효과적으로 제거할 수 있다.

2.2 배전시스템 모델

배전시스템 모델은 변전소, 선로(가공선로, 지중케이블), 변압기, 부하 등으로 구성하였다. 변전소 모델의 구성을 보면 용량 45/60[MVA]인 154/22.9[kV]변압기로 구성하였다. 가공선로 모델은 RL 집중선로 모델로 표현하였고 선종은 ACSR 160[㎟]-95[㎟]로 구성하였다. 배전시스템의 전압조정은 종래

의 변압기 2차측전압(송출전압)을 조정하는 ULTC (under load tap changer) 전압조정방식과 배전선로에 콘덴서를 설치하여 전압을 보상하여 주는 방식이 있다. 본 논문에서는 ULTC 전압 조정 방식을 사용하여 송출전압을 결정하는 방법을 사용하였다. 표 1은 국내의 154/ 22.9[kV] 변압기 탭비를 나타낸 것이다. 총 탭수는 17개(승압:8, 강압:8, 중앙탭:1)의 탭이 있다.

표 1 ULTC 전압조정방식 변압기 데이터

탭수	탭 선간 전압[V]	권선비	탭수	탭 선간 전압[V]	권선비
1	20700	7.440	10	23290	6.612
2	20990	7.337	11	23575	6.532
3	21275	7.239	12	23865	6.453
4	21565	7.141	13	24150	6.377
5	21850	7.048	14	24440	6.301
6	22140	6.956	15	24725	6.229
7	22425	6.867	16	25015	6.156
8	22715	6.780	17	25300	6.087
9	23000	6.696			

3. ULTC 방식에서의 송출기준전압과 송출전압

배전용 변전소에서 ULTC 전압조정방식의 탭 변환 변압기의 송출전압을 결정하기 위하여 고압배전선의 부하는 균등분포이고 탭 변환 변압기에서 부하 말단까지 전압강하는 일정하다고 가정하면 송출기준전압 $V_{spo}(t)$는 다음과 같이 설정된다[6,7].

$$V_{spo}(t)=\frac{\sum_{j=1}^{k}(D_{1j}+D_{2j})I_j(t)}{2\sum_{j=1}^{k}I_{j(t)}}-\frac{T_n}{D_H}(N_m D_H-\sum_{i=2}^{N}D_i-D_H)+(i(t)(\hat{t}_i+\hat{u}_i)+v_b)N$$

$I_j(t)$: j번째 피더의 t 시간에서의 전류(중부하시 1.0)
$i(t)$: t시간에서의 저압선 부하전류(중부하시 1.0)
D_{1j} : j번째 피더에서 제1부하점까지 전압강하(통상 0)
D_{2j} : j번째 피더에서 말단까지 전압강하($D_{2j}=D_H I_j$)
D_H : 중부하시 각 배전선 말단까지 전압강하
N_m : 주상변압기의 사용 탭비 종류의 수
D_1 : 중부하시 제1탭에서 변경되는 지점까지 전압강하
N : 주상변압기 권선비
T_n : 고압측으로 환산한 주상변압기 탭의 전압차
$\hat{t}_i$: 주상변압기 최대전압강하시 수용가 평균전압강하
$\hat{u}$: 저압선 최대전압강하시 수용가의 평균전압강하
V_b : 수용가 단자전압의 기준치
k : 탭 변환 변압기에서 인출되는 피더수

윗 식에서 우측 제1항은 고압배전선 평균전압강하, 제2항은 주상변압기 탭사용에 따른 보정항, 제3항은 저압선로 평균전압강하를 고압배전선으로 환산한 값이다. 그림 2는 배전시스템 모델에서 송출기준전압과 송출전압의 관계를 보여주고 있다. 그래프에서 A는 부하감소시 송출전압 변동, B는 부하증가시 송출전압 변동, C는 송출기준전압을 나타낸다. 그림 2에서 나타난 것처럼 송출기준전압과 실제의 송출전압은 부하증가와 부하감소에 따라 히스테리시스적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

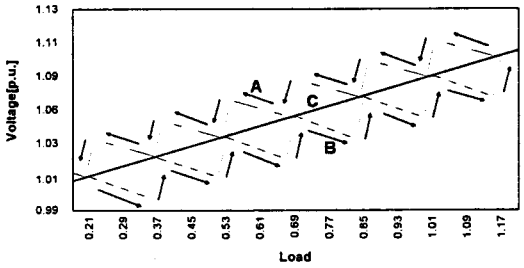

그림 2 송출기준전압과 송출전압의 변동

4. 사례연구 및 결과분석

4.1 배전시스템과 BESS의 연계모델

배전시스템과 BESS의 연계운용시 전압변동에 대해 고찰하기 위한 연계모델은 그림 3과 같다.

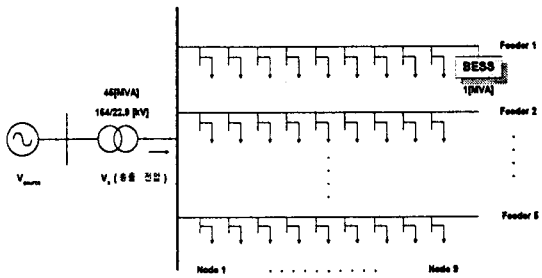

그림 3 배전시스템과 BESS의 연계 시뮬레이션 모델

그림 3에서 구성한 환경데이터는 다음과 같다.

(1) ULTC 전압조정 변압기에서 인출되는 피더의 수는 5개이며 각 피더의 부하점 노드수는 9개이고 노드간 거리는 1[km]로 가정한다.
(2) 부하역률은 0.9로 가정한다.
(3) 저압배전선 평균전압강하는 8[V]이고, 저압배전선 말단까지 평균전압강하는 28[V]이다.
(4) 저압수용가 허용 단자전압은 정격전압(V_b)의 ±6[%]로 설정하였다.

4.2 시뮬레이션 사례연구

연계시 전압변동에 대한 시뮬레이션은 BESS의 충방전운전을 고려하여 수행하였다. 본 시뮬레이션의 사례연구는 표 2와 같다.

표 2 전압변동 사례연구

운전상태	사례연구	피더 1 용 량	피더 2 용 량	피더 3~5 용 량
충전시	사례연구1	2.25[MVA]	2.25[MVA]	2.25[MVA]
	사례연구2	5[MVA]	10[MVA]	10[MVA]
방전시	사례연구3	9[MVA]	9[MVA]	9[MVA]
	사례연구4	10[MVA]	3[MVA]	3[MVA]
	사례연구5	11[MVA]	8.5[MVA]	8.5[MVA]
	사례연구6	10[MVA]	10[MVA]	8[MVA]

□ : BESS가 연계된 피더

4.2.1 충전운전시 전압변동

사례연구 1,2는 BESS가 충전운전을 할 때 연계피더와 인근피더의 전압변동에 대해 고찰하였다. 그림 4는 사례연구2를 나타낸 것인데 노드 9번에 연계되어 충전운전을 수행하는 것을 나타낸 것이다.

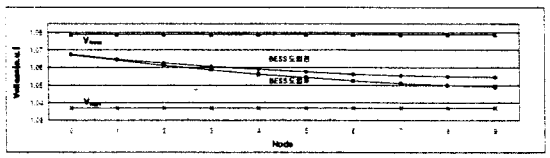

그림 4 BESS 충전운전시 연계피더 전압변동

BESS 충전운전시 사례연구1과 2를 비교해서 살펴보면 BESS의 충전운전은 BESS가 연계된 피더가 경부하일 경우에 운전을 하기 때문에 배전시스템과 연계되어 충전운전을 수행할 경우 커다란 문제가 발생되지 않는다. 다만 인근피더가 중부하를 연계되었을 경우에 인근피더의 전압은 기준 전압 최소 한계치를 벗어날 염려가 있다. 그림 5와 그림 6은 각각 BESS를 4번 노드와 9번노드에 연계하여 충전운전하는 경우에 대해서 전압변동을 나타낸 것이다. 그림에서 Vs는 송출전압을 나타낸 것이다.

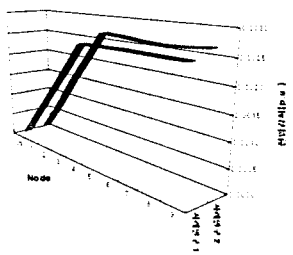

그림 5 노드 4번에 연계시 전압변동(충전시)

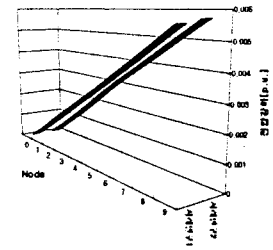

그림 6 노드 9번에 연계시 전압변동(충전시)

4.2.2 방전운전시 전압변동

BESS의 방전운전에 대한 전압변동을 고찰은 표 2에서 설정한 사례연구 3 ~ 6을 통하여 고찰하였다. 본 사례연구는 연계피더가 중부하일 경우에 대해서만 사례연구를 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7은 사례연구3에서 4번 노드에 BESS를 연계하여 방전운전을 수행할 경우를 나타내고 있다. BESS를 배전시스템에 연계하였을 경우 전압상승이 4번 노드 부근에서 크게 일어난 것을 알 수 있다.

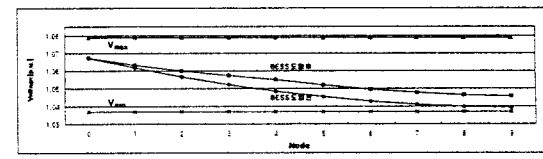

그림 7 BESS 방전운전시 연계피더(균등 중부하)

그림 8은 BESS를 9번 노드에 연계하였을 경우 9번 노드의 순시 전압변동에 대해 나타내고 있다. 본 파형은 PSCAD/EMTDC를 사용한 전압변동을 나타내고 있고 BESS가 투입된 시간은 0.15[sec]이다. BESS가 투입된 순간에 전압의 파형의 흔들림과 전압상승이 생긴다.

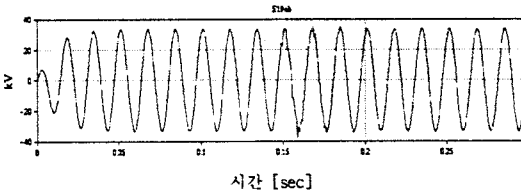

그림 8 BESS가 연계된 피더 전압변동(9번노드)

사례연구5는 BESS가 연계된 피더의 용량을 11[MVA]로 설정하여 ULTC전압조정방식의 전압조정에서 실패한 경우로 상정하였다. 그림 9을 보면 BESS가 연계되기 전에는 배전시스템 전압이 7번 노드점 이후에 기준 전압 최소 한계치를 벗어난 경우를 볼 수 있다. 이때에 BESS가 9번 노드에서 방전운전을 수행할 경우 기준 전압 최소 한계치 위

로 상승하면서 전압보상이 성공적으로 이루어진다. 이러한 전압보상으로 인하여 ULTC 변압기의 전압변동 불감대에 영역에 포함된다.

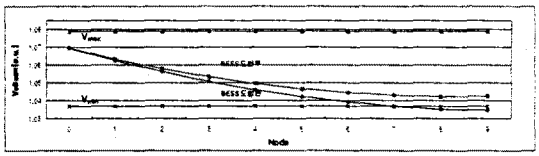

그림 9 BESS 방전운전시 연계피더(불균등 중부하)

사례연구 6은 BESS의 연계 피더와 인근피더(Feeder 2)를 중부하로 상정하여 BESS가 방전운전을 하였을 경우 인근피더에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 본 사례연구에서 배전시스템의 전압조정은 성공적으로 수행하였으나 연계피더와 인근피더의 말단에서는 기준 전압 최소 한계치 부근으로 상정된다. 이때에 BESS가 9번 노드에서 연계되어 방전운전을 수행할 경우 연계피더는 기준 전압 최소 한계치에서 여유있게 전압보상이 되고 인근피더의 경우는 노드말단 부근에서 기준 전압 최소 한계치를 약간 벗어난다. 이상으로 BESS의 방전운전에 대한 몇가지 사례연구를 통해서 알아본 결과 전압변동은 다음과 같다. 그림 10은 BESS를 4번 노드에 연계하여 방전운전을 수행하는 경우에 대해서 전압변동을 나타낸 것이고 그림 11은 BESS를 9번 노드에 연계하여 운전하는 경우에 대해서 전압변동을 나타낸 것이다.

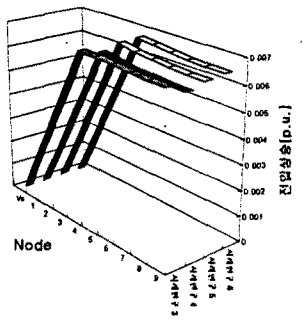

그림 10 BESS 방전운전시 전압변동(4번 노드 연계)

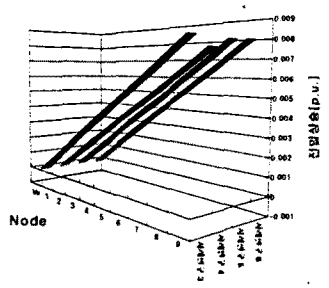

그림11 BESS 방전운전시 전압변동(9번 노드 연계)

5. 결 론

본 논문에서는 BESS가 배전시스템에 연계되어 운용될 때 나타나는 제반 문제점을 사전에 검토·분석하기 위하여 PSCAD/EMTDC를 이용하여 국내외에 보고된 자료를 통하여 BESS와 배전시스템의 연계모델을 구성하였고 BESS연계시 순시 및 상시전압변동에 대해서 고찰하였다. 본 시뮬레이션을 수행한 전압변동에 대한 결과는 다음과 같다.

(1) BESS의 연계위치에 따라 전압변동의 크기가 다르다. 즉, 충전시 피더의 말단에 연계되어 운전하는 경우는 피더 중간에 연계되어 운전하는 경우보다 전압강하가 약 2배 정도 크다.
(2) 배전시스템의 한 인근피더가 과부하 상태에서 충전운전 및 방전운전을 수행한다면 인근피더의 경우 전압강하가 발생하므로 기준 전압 최소 한계치를 벗어나는 경우가 발생할 수 있다.
(3) 배전시스템이 최소 전압 한계치를 벗어난 경우 BESS를 연계한다면 전압보상 효과가 좋다. 사례연구를 수행한 결과 BESS를 피더 중간에 연계하는 경우 보다 말단에 연계하는 경우가 전압보상 효과가 말단에서 더 크다.

[참 고 문 헌]

[1] 김호용 외, 대체 에너지 전원(연료전지)의 계통 연계 운전 실용화 기술개발, 한국전력공사 기술연구원, 1994. 5.

[2] 김영성 외, "멀티레벨인버터로 구성된 전지전력저장시스템의 고조파 분석에 관한연구", 대한전기학회 춘계학술발표 논문, 1997. 5.

[3] Z.M. Salameh et.al, "A Mathematical Model for Load-Acid Batteries", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No.1, pp.93-98, March 1992.

[4] Ned Mohan et.al, Power Electronics Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, Inc, pp.669-746, 1995.

[5] M.S. Chen et.al, "Determining Load Characteristics for Transient Performance", EPRI Report EL-847 Vol. 1-3, May 1979.

[6] Turan Ganen, Electric Power Distribution System Engneetis, McGraw-Hill series in electrical engineering, McGraw-Hill, New York, 1986.

[7] J.Kim et.al, "Impacts of Dispersed Storage and Generation on the Sending-end Voltage in A Distribution Substation and A Method of Determining their Introduction Limits", Proc. of ICEE, Taejon, Korea, July 1995.

[8] PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software, PSCAD/EMTDC Manual, Manitoba HVDC Research Center, 1994.