

전지전력저장시스템의 유효 및 무효전력제어

○ 김대원, ○ 최준호, ○ 정성교, ○ 김재철, ○ 최병수  
 ○ 송실대학교 전기공학과, ○ 경문대학 전기공학과

Real and Reactive Power Control of Battery Energy Storage System

○ Dae-Won Kim, ○ Joon-Ho Choi, ○ Sung-Kyo Jung, ○ Jae-Chul Kim, ○ Byoung-Su Choi  
 ○ Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, ○ Dept. of Electrical Engineering, Kyung

**Abstract** - This paper deals with the real and reactive power control of BESS(Battery Energy Storage System) interconnected to power system. The real and reactive power control of proposed customer side BESS are performed by controlling the amplitude and the phase of inverter output voltage via power flow equation. Also in order to control the amplitude and phase of output voltage of proposed BESS, single-pulse width control method is used. The BESS and controller is implemented and the active and reactive power control is simulated by using the PSCAD/EMTDC simulation program.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 전력의 수요가 증대하고 주간과 야간의 부하격차 및 계절간 휴일간의 전력사용량의 격차가 점차 증가하여 부하율의 하락이 날로 심화되어 가고 있다. 최근에 이러한 이유로 야간의 잉여전력을 활용하고 일 피크부하를 삭감하기 위해 다양한 부하관리 기술들이 빠르게 개발되고 있으며 이 중에서 특히 전지전력저장시스템은 최대부하 삭감과 부하평준화를 주목적으로 하며 2차 전지를 이용한 시스템으로 심야에 전력을 전지에 저장하였다가 주간에 부하에 전력을 공급함으로써 최대부하 삭감효과를 낼 수 있고 무효전력을 공급함으로써 역률을 개선할 수 있는 시스템이다[1]. 그러나 전지전력저장시스템은 아직까지는 초기투자비가 많이 소요되며 따라서 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다[2]. 따라서 BESS의 주목적인 첨두부하 삭감외에 부하의 무효전력 및 고조파 보상, 상불평형 보상등과 같은 BESS의 다기능을 추가하여 BESS의 경제성을 높이는 것이 필요하다.

본 논문에서는 전지전력저장시스템을 배전계통에 연계하여 운전시 BESS의 출력전압의 크기와 위상을 제어하여 부하의 유효전력 및 무효전력을 제어하는 방법을 제시하였다. 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 유효 및 무효전력을 제어하기 위한 제어기 및 1[MVA]급 BESS와 전력계통의 연계모델을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다[3]. 또한 유효 및 무효전력제어를 위해 단펄스폭 제어방법을 사용하였다.

2. 전지전력저장시스템의 모델

전지전력저장시스템은 심야에 잉여전력을 직류로 변환하여 전지에 저장하였다가 주간 피크시나 필요시에 다시 직류를 교류로 변환시켜 전력계통으로 내보내는 시스템으로 전지부, 필터부, 전력변환장치부(컨버터, Zig-Zag변압기), 전력변환장치제어부, 연계리액터부, 연계변압기 등으로 구성하였다.

2.1 전지 모델

본 논문에서는 전력저장에 적합한 연축전지(lead-acid)를 사용하였다. 연축전지는 충전과 방전시 전기적 특성이 변하기 때문에 계통을 연계하여 시뮬레이션 할 경우 적절한 모델링이 요구된다. 전지모델은 전지전력저장시스템의 계통연계 과도특성을 해석하기 위해 구성한 연계모델로서 전지의 충전상태, 전지용량, 충·방전을 및 전압레벨을 고려하여 전지 모델의 파라미터를 결정하였다[4].

2.2 전력변환장치 모델

본 논문에서 모델로 사용한 컨버터는 충전시에는 정류기로 동작하고 방전시에는 인버터로 동작하도록 구성하였다. 단상 스택 6개로 구성된 컨버터는 전력전자 소자인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하였고, IGBT모듈의 밸브는 R-C 스너버(Snubber)회로와 프리휠링(Freewheeling)다이오드를 가진 스위칭 모델로 구성하였다. 이러한 IGBT 모듈로 전압형 단상 전파 브리지 회로를 구성하고 단상 전파 브리지 6개와 인버터 변압기를 결합하여 정현파에 가까운 다단계 교류 파형을 만든다. 단상 전파 브리지 6개의 스택은 각각 변압기의 결선에 의하여 0°, -120°, -240°, -30°, -150°, -270°의 기본적인 위상차를 두고 스위칭 되도록 설계하였다.

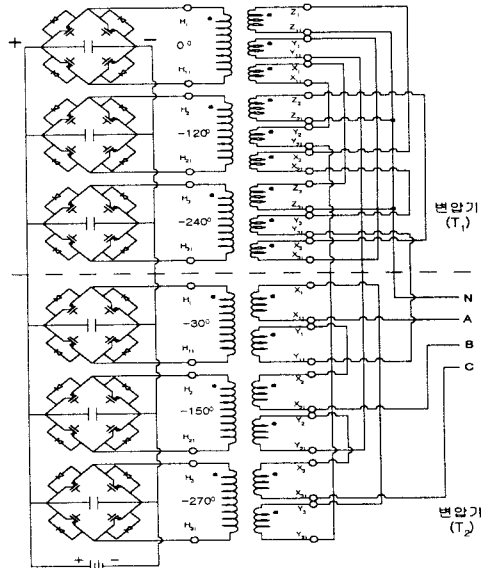


그림 1. PSCAD/EMTDC상에서 전력변환장치의구성도

2.3 필터 모델

직류필터는 전지뱅크와 전력변환장치 사이에 설치하여 방전시 출력전압과 전류의 리플을 감소시키며 충전시 고

조파를 제거한다. 교류필터는 전력변환장치의 출력단에 설치하여 방전시 스위칭 소자인 IGBT의 스위칭에 의해 발생하는 11 및 13 고조파를 제거한다.

### 3. BESS의 유효 및 무효전력 제어

BESS는 배전시스템과 연계하여 운전시 국부적 부하에 대하여 유효전력과 무효전력을 공급하는 보상전원으로 동작한다. 본 논문에서 사용한 BESS의 전력제어는 전력조류 방정식을 바탕으로 무효전력은 인버터 출력전압의 전압 크기를 제어하여, 유효전력은 인버터 출력전압의 위상각을 제어하여 수행하였다. 전력변환장치의 인버터를 제어하는 방식은 단일 펄스폭(Single-pulse Width) 제어 방법을 사용하였다[5].

#### 3.1 BESS 연계모델

BESS를 기존의 배전 계통과 연계운전하기 위해서는 배전 계통과의 동기, 변환장치의 출력전압의 조정, 유효 및 무효전력의 제어와 고조파 저감 등을 고려해야 한다. 그림 2는 BESS의 유효 및 무효전력제어를 위한 전력계통과의 연계 모델을 보여준다.

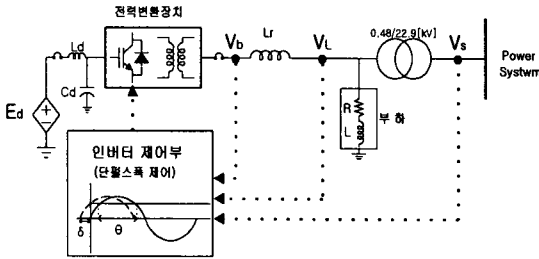


그림 2. BESS의 계통연계 모델

#### 3.2 전력조류 방정식

BESS의 유효 및 무효전력 제어에 대한 이론적 전개를 위해 전력조류 방정식을 사용하였다. 제안된 BESS와 전력계통과의 연계모델의 간략화된 등가회로가 그림 3에 나타나 있다. 그림 2에 대한 등가회로를 그림 3으로 표현할 수 있으며 여기서 유효전력과 무효전력의 제어에 대한 전력방정식을 전개하여 유효 및 무효전력 제어에 영향을 미치는 요인을 시뮬레이션 하였다. 그림 3으로부터 전력방정식을 전개하면 다음과 같다.

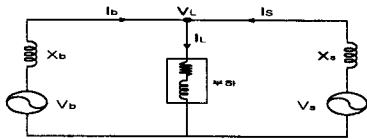


그림 3. 전력계통과 연계된 BESS의 간략화된 등가회로

$$V_s = jX_s I_s + V_L \quad (3-1)$$

$$V_b = jX_b I_b + V_L \quad (3-2)$$

$$I_b = (V_b - V_L) / jX_b$$

$$= \frac{1}{jX_b} [V_b \cos \delta + jV_b \sin \delta - V_L] \quad (3-3)$$

$$= \frac{1}{jX_b} [V_b \cos \delta - V_L + jV_b \sin \delta]$$

$$= \frac{V_b}{X_b} \sin \delta + j \frac{1}{X_b} (V_L - V_b \sin \delta)$$

여기서,  $X_b$ : 연계리액터의 임피던스,  $I_b$ : BESS가 부하에 공급하는 전류,  $\delta$ :  $V_b$ 와  $V_L$ 사이의 위상차,  $V_L$ : 부하전압,  $X_s$ : 계통임피던스

전지전력저장시스템에서 부하에 공급되는 피상전력은

$$S = P + jQ = V_L I_b^* \quad (3-4)$$

$$= \frac{V_b V_L}{X_b} \sin \delta + j \frac{V_b V_L \cos \delta - V_L^2}{X_c}$$

전지전력저장시스템의 출력전압  $V_b$ 를 고려하면

$$V_b(t) = K_T \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4E_d}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \sin n\omega t \quad (3-5)$$

$$= \frac{2K_T \sqrt{2}}{\pi} E_d \sin \frac{\gamma}{2}$$

여기서,  $K_T$ : 변압기 특수권선에 의한 고조파 계수

$$P = \frac{V_b V_L}{X_b} \sin \delta \quad (3-6)$$

$$= \frac{2K_T \sqrt{2}}{\pi X_b} V_L E_d \sin \frac{\gamma}{2} \sin \delta$$

$$Q = \frac{1}{X_b} [V_b V_L \cos \delta - V_L^2] \quad (3-7)$$

$$= \frac{1}{X_c} \left[ \frac{2K_T \sqrt{2}}{\pi} V_L E_d \sin \frac{\gamma}{2} \cos \delta - V_L^2 \right]$$

식(3-6)과 (3-7)에서 BESS의 인버터에서 유효전력은  $V_b$ 와  $V_L$ 사이의 위상차  $\delta$ 에 의해서 제어할 수 있고, 무효전력은 펄스폭 제어각  $\gamma$ 를 조절하여 제어할 수 있다.

### 4. 제어기 구성

BESS는 출력전압의 크기와 위상각을 제어하여 유효 및 무효전력을 제어할 수 있는 전력용 인버터이다. 전력변환장치의 제어회로는 일정 유효 및 무효전력으로 충·방전해야 할 경우 인버터 스위칭소자의 게이트 신호를 일정하게 유지해야 한다. 그림 4와 같은 폐루프 제어기는 스위칭 소자의 입력을 제어할 수 있도록 구성하였다.

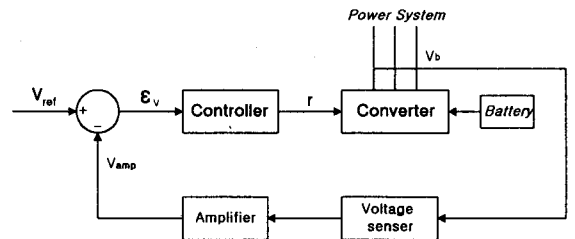


그림 4. 유효 및 무효전력 폐환제어 블록도

### 5. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

#### 5.1 전압제어

그림 5는 그림4의 제어기의 유효성을 설명하기 위한 전압제어입력 변화에 따른 제어기의 동작을 보여준다.

BESS가 정상상태에 도달한 후 0.45초에서 제어기 입력을 500[V]로 주었을 때 제어기가 정상적으로 동작함을 보여준다.

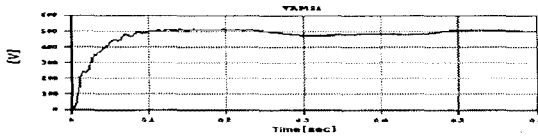


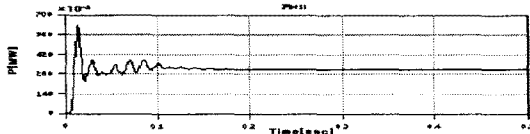
그림 5. 전압제어 시뮬레이션

## 5.2 전력제어

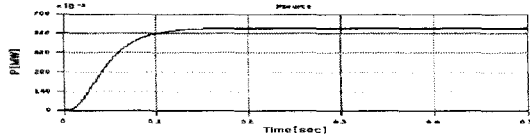
전지전력저장시스템의 운전모드는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 단독운전 모드이고 두 번째는 전력계통과 병렬운전 모드이다. 본 논문에서는 BESS의 병렬운전 모드에서 BESS가 전력계통과 부하를 분담하는 경우를 시뮬레이션 하였다.

### 5.2.1 유효전력 제어

그림 6과 7은 용량이 1[MVA]이고 역률이 0.9인 부하, 즉 유효전력이 0.9[MW]인 부하가 BESS와 전원측으로 부터 전력을 공급받는 경우 BESS의 유효전력 제어 입력에 따라 BESS와 전원이 각각 부하의 유효전력을 분담하는 것을 보여준다.

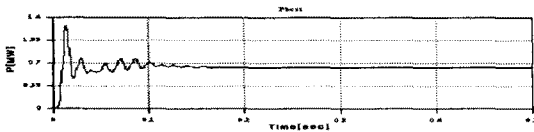


(a) BESS가 공급하는 유효전력

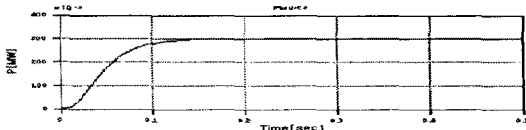


(b) 전원이 공급하는 유효전력

그림 6. BESS가 0.3[MW]의 유효전력을 공급하는 경우



(a) BESS가 공급하는 유효전력



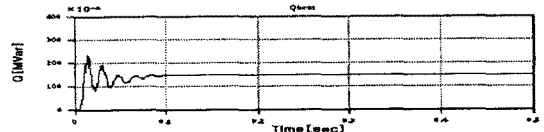
(b) 전원이 공급하는 유효전력

그림 7. BESS가 0.6[MW]의 유효전력을 공급하는 경우

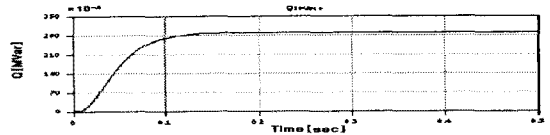
### 5.2.2 무효전력제어

그림 8과 9는 용량이 1[MVA]이고 역률이 0.9인 부하, 즉 무효전력이 0.45[MVar]인 부하가 BESS와 전원측에서 무효전력을 공급받는 경우 BESS의 무효전력 제어입력에 따라 BESS와 전원이 각각 부하의 무효전력을

분담하는 것을 보여준다.

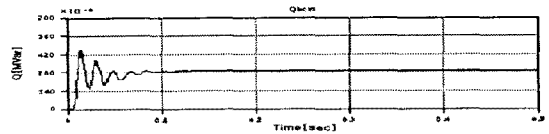


(a) BESS가 공급하는 무효전력

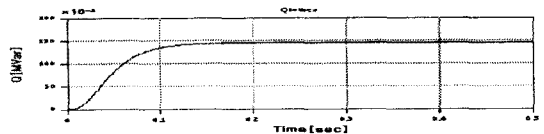


(b) 전원이 공급하는 무효전력

그림 8. BESS가 0.15[MVar]의 무효전력을 공급하는 경우



(a) BESS가 공급하는 무효전력



(b) 전원이 공급하는 무효전력

그림 9. BESS가 0.3[MVar]의 무효전력을 공급하는 경우

## 6. 결 론

BESS는 유효전력을 제어하여 최대부하 삭감을 통한 부하 평준화를 가져올 수 있고, 무효전력을 제어하여 시스템의 역률을 개선할 수 있는 시스템이다. 본 논문은 BESS의 유효 및 무효전력 제어를 위한 제어기를 구성하고 단펄스폭(Single-Pulse Width Modulation)제어를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유효전력은 BESS의 출력전압의 위상각, 즉 제어기의 위상을 앞서거나 뒤지게 하여, 무효전력은 BESS의 출력전압의 크기, 즉 펄스폭을 가변하여 제어할 수 있음을 보였다. 향후 유효 및 무효전력 제어뿐만 아니라 다른 다기능이 추가된다면 BESS가 더 큰 경제성을 갖게 되어 실용화가 가능하리라 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C.E. Lin, et.al, "A Real and Reactive Power Control Approach for Battery Energy Storage System", *IEEE Transactions on Power System*, Vol.7, No.3, pp.1132-1140, Aug. 1992
- [2] 김재철 외, "전지전력저장시스템의 경제성 평가", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 C권, pp.1091-1093, 1995.7.
- [3] Manitoba HVDC Research Center, "PSCAD/EMTDC power system simulation software manual", 1994
- [4] Ziyad M. Salameh, Margaret A. Casacca, and William A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No.1, pp.93-98, March 1992
- [5] Daniel W. Hart, "Introduction to Power Electronics", Prentice Hall, 1997