

# PSCAD/EMTDC를 이용한 전지전력저장시스템의 수리모형에 관한 연구

\*김응상, \*김재언, \*노대석, \*\*김재철  
 \*: 전기연구소 \*\* : 송실대학교 전기공학과

## A Study on Mathematical Modelling of Battery Energy Storage Systems using PSCAD/EMTDC

\*Eung-Sang Kim, \*Jae-Eon Kim, \*Dae-Seok Rho, \*\*Jae-Chul Kim  
 \* : KERI \*\* : Dept. of Electrical Engineering Soongsil University

### Abstract

This paper deals with the mathematical modelling of battery energy storage systems interconnected with the distribution system. This battery model takes account of self-discharge, battery storage capacity, internal resistance and overvoltage. The model components are decided by using an approximation technique and experimental results.

This model can be used to evaluate battery performance of battery energy storage systems interconnected with distribution system.

### 1. 서 론

전지전력저장시스템을 배전계통에 연계운전하기 위해서는 우선 전압, 주파수, 역률 및 보호협조 등의 기술적 문제에 대한 검토가 선행되어야 한다. 이러한 기술적 문제에 대한 검토를 위해서는 다양한 시뮬레이션이 요구되는데 시뮬레이션을 위한 정확하고 합리적인 모델링이 수행되어야 한다고 본다. 따라서 본 논문에서는 전지전력저장시스템에서 중요한 2차전지에 대하여 화학적인 반복작용 특성을 전기적 등가회로를 이용하여 수리모형을 구성하였으며 이 등가회로의 파라미터를 결정하는 방법을 제안하였다.

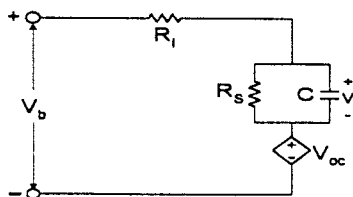


그림 1 전지모델의 등가회로

본 논문에서 제안한 2차전지에 대한 모델은 그림 1과 같이 저항과 캐패시터 및 내부전원으로 구성된 테브난 등가회로로 구성하였다[1].

그림 1에서  $V_b$ 는 충전시 전지에 걸리는 단자전압으로 전지의 응동특성을 나타내며  $V_{oc}$ 는 개방회로에서의 방전종지전압을 나타낸다.  $R_i$ 는 전지의 내부저항,  $R_s$ 는 무부하시 전지에서 자율방전하는 것을 증가적으로 표현한 전지의 자율방전저항을 나타낸다. 또한  $C$ 는 전지에 에너지의 저장 및 방출이 가능한 용량을 나타낸다. 이때 전지는 화학적 반응에 의해 전력을 발생시키는 에너지원이기 때문에 전지의 충전 상태, 저장용량, 충전율, 주위온도 및 수명에 따라 그 파라메타 값이 변하게 된다.

### 2. 연속전지의 모델링

모델링 부분에서는 연속전지 대한 특징, 모델링 시 유의사항 및 모델링을 위한 환경설정으로 나누어 수행하였다.

#### 2.1 연속전지의 특징

본 논문에서는 전지전력저장시스템의 계통연계 운전상 야기될 수 있는 각종 사고에 대한 영향을 검토해야 하기 때문에 내부저항 변화에 따른 단락 전류의 영향이 대단히 중요하다. 이는 충전시 계속적으로 전지전압이 상승 또는 강하하므로 운전상 어느 시점에서 고장이 발생하느냐에 따라 영향이 다르게 미칠 수 있으므로 이러한 조건을 고려하여 모델링하였다.

전지모델의 파라미터 결정과 컴퓨터 구현 및 전지의 기본적 특성을 간단하게 표현할 수 있는 테브난 등가모델을 채택하고 계통연계시 과도특성 해석에 적합하도록 전압레벨에 따른 총 · 방전시 내부저항과 자율방전저항 값을 구할 수 있는 수식을 유도

하였다.

## 2.2 모델링시 유의사항

연속전지의 모델링에 대하여 지금까지 많은 연구가 진행되었다. Z.Salameh 등은 연속전지의 수학적 모델[1-2]을 제시하였으며, J.Appelbaum 등은 실험을 위하여 전지의 전기적 등가회로[3-4]에 대해 다루었다. 이들 모델에서는 그림 1에 나타난 전지모델인 테브난 등가회로를 개선한 것으로서 자율방전 저항과 과전압특성을 선형요소로 고려하였으며 다른 충전상태에서 전지모델의 파라미터에 대한 온도조건도 고려하였다. 이러한 과전압 특성은 전지의 충전상태가 포화상태에 도달하면 계속 충전시켜도 가스만 발생하고 약간의 전류로만 충전되는 성질로서 비선형특성을 가지게 된다. 또한 전지의 전압 레벨에 따라 내부저항도 비선형적으로 가변되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 그러므로 이상에서 제시된 전지모델들은 주로 장시간 충전 운전 패턴에 관련된 모델이므로 정상상태 해석에는 적합하나 본 논문에서와 같은 배전계통 연계시 과도특성을 해석하기에는 적합하지 않다.

## 2.3 모델링을 위한 환경설정

본 논문에서 적용된 연속전지는 그 특성상 그림 2에 나타난 일간 운전곡선과 같이 100%에서 50%까지 즉 50%의 방전심도로 운전하는 것으로 가정하였다. 완전충전한 경우 충전시 전지전압은 1055[V]이며, 방전시에는 충전된 에너지레벨의 50% 되는 시점 즉 방전시 전지전압이 766[V]까지 운전한다. 이 경우 방전시간은 1시간, 2시간, 3시간, 4시간으로 운전하고, 충전시간은 각각 2시간, 4시간, 6시간, 8시간으로 운전하는 것으로 설정하였다. 이와 같은 운전형태에 따라 에너지레벨의 차이가 생기므로 이들 시점에서의 전압과 시간을 사용하여 그림 1의 회로에서의 파라미터값을 결정할 수 있다.

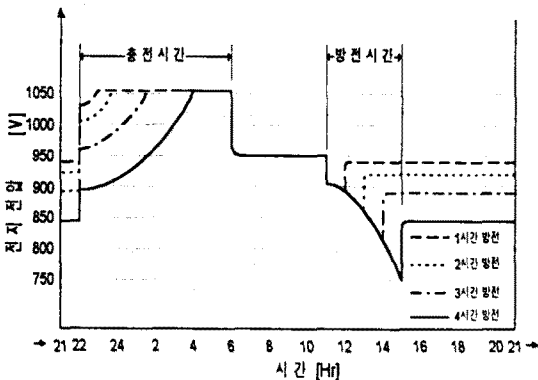


그림 2 전지의 일간 운전곡선

이때 충전상태, 전력저장능력, 충전비율, 주위온도, 그리고 전지수명 등은 전지의 운전패턴에 따라 약간씩 다르게 되므로 본 논문에서는 일반적으로 사용하는 값으로 설정하였다.

또한 충전형태는 정전류·정전압 충전방식을 혼용하여 운전하게 되어 충전을 시작한 순간 전지전압이 갑자기 상승한 후 서서히 증가하다가 회로를 끊게 되면 다시 전압이 떨어지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 충전시 내부저항이 충전 시작점에서는 이온의 움직임이 원활하지 않아 약간 크다가 운전이 계속되면 이온이 활발하게 움직이므로 약간 줄어들고나서 그 상태를 한동안 유지하다가 충전말기가 되면 전지전압이 최대치에 가까워지면서 가스가 발생된다. 이로 인해 이온화 활동이 원활하지 않게 되어 전기전도도가 극도로 떨어지기 때문에 내부저항이 커지게 된다.

그러나 방전시에는 충전시와는 반대로 방전초기에는 내부저항이 약간 크다가 다시 줄어들며 그 상태를 한동안 유지하다가 방전이 오랫동안 지속되면 다시 내부저항이 커지게 된다. 또한 충전과 방전을 하지않는 경우 즉, 정지상태에서도 미소하지만 자율방전을 하게 되는데 이때의 저항은 전지전압이 높으면 자율방전저항이 적게 되고 전지전압이 낮으면 자율방전 저항이 약간 증가한다.

## 3. 파라미터 결정 수법

전지모델에 대한 파라미터의 결정은 서론에서 설명하였던 다양한 조건을 고려하여 다음과 같이 구한다.

### 3.1 내부저항 ( $R_i$ )

전지는 충전시와 방전시에 있어서 사용되는 전지 리액턴트(reactant)의 집중도가 다르기 때문에 내부저항은 충전시와 방전시로 구분하여 적절한 저항값을 설정하여 모델링하였다. 충전시 내부저항값  $R_{ci}$ 와 방전시 내부저항값  $R_{di}$ 는 각각 식(1) 및 식(2)와 같이 선형식으로 등가화 할 수 있다.

$$R_{ci}(E_L) = \frac{V_{c0}(E_L) - V_{idle}(E_L)}{I_s} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$R_{di}(E_L) = \frac{V_{idle}(E_L) - V_{d0}(E_L)}{I_s} \quad [\Omega] \quad (2)$$

여기서,  $I_s$  : 충전전시 직류측 공급전류 [A]  
 $V_{idle}$  : 정지상태에서의 단자전압 [V]  
 $V_{c0}$  : 충전 시작 직후 전지전압 [V]  
 $V_{d0}$  : 방전 시작 직후 전지전압 [V]  
 $E_L$  : 전지전압레벨

식 (1)과 식(2)의 결과는 전지전압레벨에 따라

그림 2에 나타난 운전형태에서 구할 수 있다. 이때 윗식에서와 같이 충전전시 내부저항값은 서로 구분되며 충전전시 각각 어느 일정한 측정시점을 기준으로 계산된 내부저항값은 연속적인 전압레벨에 따른 내부저항값을 계산하기 위해 사용된다. 식(1)과 식(2)를 사용하여 구한 내부저항값은 식(3)과 식(4)와 같은 형태의 근사화 기법을 이용하여 전지의 전압레벨에 따른 연속적인 충전전시의 내부저항값을 계산하였다.

$$\hat{R}_c(E_L) = a_c \cdot \exp\{b_c(x - x_0)\} + C_c \quad (3)$$

$$\hat{R}_d(E_L) = a_d \cdot \exp\{-b_d(x - x_0)\} + C_d \quad (4)$$

여기서, 근사화 기법을 이용하여 구한 충전전의 계수값  $a_c$ ,  $b_c$ ,  $C_c$ 는 각각  $6.7032 \times 10^{-5}$ , 0.06389, 0.03916이고, 방전시의 계수값  $a_d$ ,  $b_d$ ,  $C_d$ 는 각각  $2.834 \times 10^{-2}$ ,  $7.0055 \times 10^{-2}$ , 0.03912 이다. 이렇게 하여 구한 충전전의 내부저항 값은 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며 충전초기에는 내부저항이 약간 크지만 점점 이온의 움직임이 활발해지면 서서히 감소하다가 전지의 일정전압레벨이 되면 전압은 상승하지 않고 가스만 방출되는 등 내부저항이 갑자기 상승하게 된다.

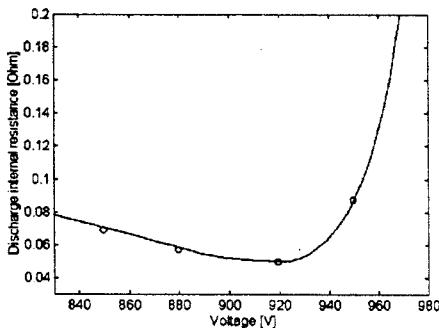


그림 3 연속전지의 충전시 내부저항

### 3.2 자율방전저항( $R_s$ )

자율방전저항은 전지의 전압레벨이 높을 때에는 물의 전해현상 때문에 발생하며 전압레벨이 낮을 때에는 전지의 단자사이에서의 누설전류 때문에 발생한다. 이러한 자율방전저항은 충전전시 전류와 전압의 정상상태 수식을 적용하여 구할 수 있다. 자율방전시에는 그림 1의 등가회로에서 입력측이 개방된 상태로 볼 수 있으며 이를 등가적으로 표현하면 그림 4와 같다.

전지 전압레벨에 따른 자율방전저항값은 그림 1에서의 전압방정식 식 (5)와 그림 4에 대한 전압방정식 식 (6)을 사용하여 자율방전저항  $R_s$ 와 캐패시

터용량  $C$ 를 결정할 수 있다.

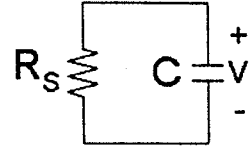


그림 4 자율방전저항에 대한 등가회로

$$v_{cd}(t) = \frac{R_s}{R_i + R_s} (V_b - V_\infty) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5)$$

$$\text{단, } \tau = \frac{R_i R_s}{R_i + R_s} C$$

$$v_\infty(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \text{단, } \tau = R_s C \quad (6)$$

### 3.3 캐패시터 용량 (C)

캐패시터 용량  $C$ 도 마찬가지로 그림 1에서의 전압방정식 식 (5)와 그림 5에 대한 전압방정식 식 (6)을 사용하여 결정할 수 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서 제안한 전지모델은 전지전력저장시스템의 계통연계 과도특성 해석시 중요한 영향을 주는 요인이 되며 전지의 충전상태, 전지용량, 충전방전을 및 전압레벨을 고려하여 전지모델에서의 파라미터를 결정하였다. 결국 전지의 전압레벨에 따른 내부저항, 자율방전저항 및 캐패시터 용량이 변한다는 것을 계통연계 시뮬레이션을 수행하여 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Z.Salameh, et.al, "A Mathematical Model for Lead Acid Batteries", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1991.
- [2] G.U.Hiraro, et.al, "A mathematical model of Lead-Acid cell, discharge, rest and charge", Electrochem Soc : Electrochemical science and technology, pp.2953-2960, December 1987.
- [3] J. Appelbaum, et.al, "An Electrical Model of the Lead-Acid Battery", IEEE, p. 304-307, 1982.
- [4] A.Margaret, et.al, "Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via Mathematical Modeling Techniques", IEEE/PES, winter. meeting, 1992.