

# Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터의 전압 제어기 설계를 위한 소신호 모델링을 이용한 안정도 분석

조진호, 최성춘, 김범준, 원충연\*  
성균관대학교

## Stability Analysis using Small-Signal Modeling for Design of Voltage Controller in Battery Simulator based on Z-source Network

Jin-Ho Jo, Seong-Chon Choi, Bum-Jun Kim, Chung-Yuen Won\*  
Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터의 전압 제어기 설계를 위한 소신호 모델링을 수행하고 보드선도를 이용한 안정도 분석을 통한 전압 제어기 설계 방법을 제안하였다. 이를 통하여 인덕턴스와 커패시턴스에 따라 변하게 되는 시스템의 주파수 응답 특성을 고려하여 Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터가 안정적으로 동작하도록 하는 전압 제어기의 제어 이득값을 선정하였다. 제안한 방법은 MATLAB을 이용한 안정도 분석을 통하여 검증되었다.

### 1. 서 론

최근 배터리 관련 연구 분야에서는 온실가스 절감과 같은 사회적인 규제와 환경오염문제로 배터리 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 더불어 에너지저장시스템(ESS), 휴대장치, 전기 자동차와 같이 배터리를 필수적으로 사용하는 분야에서는 리튬-이온 배터리 활용도가 증가하고 있는 추세이다. 하지만 배터리를 이용하는 실험은 충·방전에 걸리는 시간이 많고 또한 과충전/과방전시에 폭발에 대한 위험성도 있다. 이에 따라 배터리를 적용한 시스템을 유연성 있고 안정적으로 실험하기 위해 배터리 시뮬레이터에 대한 필요성이 대두되고 있다.

본 논문에서 다루고 있는 배터리 시뮬레이터는 기존의 시스템과 다르게 Z-소스 네트워크를 이용하여 넓은 출력 전압 변동 범위를 갖는 특징이 있다.<sup>[1]</sup> 또한 배터리 시뮬레이터는 배터리 모델링을 통해 획득된 충·방전 전압 곡선을 지령값으로 하기 때문에 동특성이 높은 전압 제어기가 요구된다. 그러므로 본 논문에서는 Z-소스 네트워크의 임피던스 성분의 영향을 고려하여 시스템 안정성 및 오버슈트 없는 빠른 응답성을 보장하기 위해 소신호 모델링을 통해 전압제어기의 안정도 분석을 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터

그림 1은 Z-소스 네트워크를 이용한 배터리 시뮬레이터 구성도를 나타낸다. 배터리 시뮬레이터는 3상 PWM 정류기, Z-소스 네트워크, 출력필터, 그리고 출력 전압을 제어하기 위한 스위치  $S_7$ 로 구성되어 있다. 배터리 시뮬레이터의 전압 제어기는 측정된 배터리 전류에 따라 동적 배터리 모델을 통해 획득된 충·방전 곡선을 제공한다. 그리고 배터리 시뮬레이터의

출력 전압 또는 배터리 터미널 전압은 벽 동작 또는 부스트 동작을 수행함으로써 실제의 배터리 기능을 수행한다. Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터는 Z-소스 네트워크를 이용하여 3상 PWM 정류기의 한 레그의 스위치를 동시에 턴-온시키는 폐회로 동작이 가능하여 DC-링크 전압이 계통 전압의 피크치에 상관없이 넓은 출력 전압 범위를 가질 수 있다. 뿐만 아니라, 회로적으로 폐회로 구성이 가능하기 때문에 기존의 압-쇼트에 의한 회로 손상의 위험을 배제할 수 있고 테드타임을 필요로 하지 않는 장점이 있다.

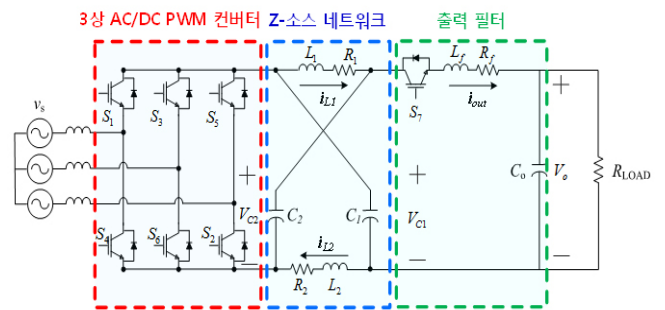


그림 1 Z-소스 네트워크를 이용한 배터리 시뮬레이터 구성도  
Fig. 1 Configuration of battery simulator based on Z-source network

#### 2.2 정상상태 모델링

3상 PWM 컨버터의 출력 전압과 계통 전압의 관계는 변조 지수(MI)의 정의를 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{v}_s = \frac{MI}{2} \hat{v}_{z,in} \quad (1)$$

여기서  $\hat{v}_s$ 는 계통 전압의 첨두치를 의미하고  $\hat{v}_{z,in}$ 은 3상 PWM 컨버터의 출력 전압의 첨두치를 의미한다. 모델링 절차를 단순화하기 위해서 Z-소스 네트워크를 구성하는 인덕터, 커패시터, 기생 저항 성분에 대해서 다음과 같은 가정을 하고 모델링을 진행한다.

$$L_1 = L_2 = L, C_1 = C_2 = C, R_1 = R_2 = R \quad (2)$$

Z-소스 네트워크의 인덕터 전류, 커패시터 전압, 그리고 출력단의 출력 전류, 출력 전압을 상태변수로 상태 공간 평균 모델을 구하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ \dot{v}_c(t) \\ \dot{i}_o(t) \\ \dot{v}_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_{ST}R & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -(1-D_{ST}) & 0 \\ 0 & 2 & -R_f & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{R_{LOAD}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \\ i_o(t) \\ v_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1-D_{ST}) \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{v}_{z,in} \quad (3)$$

상태 공간 평균 모델에서 상태 변수  $x$ 는 직류 성분  $\bar{x}$ 와 소신호 교류 성분  $\tilde{x}$ 로 표현할 수 있다. 이를 이용해서 식 (3)를 이용해서 정상상태 분석을 진행하면 한 주기 내에서 상태 변수  $x$ 의 변화량은 0이기 때문에  $\dot{x}$ 은 0이 되어 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다. 여기서  $D_{ST} = T_{ST}/T$ 이고  $T_{ST}$ 는 shoot-through 시간이다.

$$V_C = (1 - D_{ST}) \hat{v}_{z,in} \quad (4)$$

$$I_L = (1 - D_{ST}) I_o \quad (5)$$

$$V_o = 2V_C - \hat{v}_{z,in} \quad (6)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R_{LOAD}} \quad (7)$$

### 2.3 소신호 모델링

소신호 모델링을 진행하기 위해서 임의의 상태 변수  $x$ 에 대해서 이에 대한 소신호 교류 성분을  $\tilde{x}$ 로 표현하면 식 (3)에서 각 상태 변수는 소신호로 간주할 수 있다. 이러한 소신호들의 관계식을 정리하기 위해서 앞서 정상상태 분석을 통해서 구한 관계식 (4)-(7)을 이용한다.

$$L \frac{d\tilde{i}_L(t)}{dt} = -\tilde{v}_c(t) - \bar{D}_{ST} R \tilde{i}_L(t) - (\hat{v}_{z,in} + R I_L) \tilde{D}_{ST}(t) \quad (8)$$

$$C \frac{d\tilde{v}_c(t)}{dt} = \tilde{i}_L(t) + I_o \tilde{D}_{ST}(t) - (1 - \bar{D}_{ST}) \tilde{i}_o(t) \quad (9)$$

$$L_f \frac{d\tilde{i}_o(t)}{dt} = 2\tilde{v}_c(t) - \tilde{v}_o(t) - R_f \tilde{i}_o(t) \quad (10)$$

$$C_o \frac{d\tilde{v}_o(t)}{dt} = \tilde{i}_o(t) - \frac{\tilde{v}_o(t)}{R_{LOAD}} \quad (11)$$

식 (8)-(11)를 라플라스 변환하고 이를 정리하여 shoot-through 듀티에 대한 출력 전압의 소신호 전달함수를 구하면 식 (12)와 같다.

$$\frac{\tilde{v}_o(s)}{\tilde{D}_{ST}(s)} = \frac{2(1 - \bar{D}_{ST})(L I_o s + R \bar{D}_{ST} I_o - \hat{v}_{z,in} - R I_L)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (12)$$

$$a_4 = C_o C L_f L$$

$$a_3 = C_o (C L R_f + C L_f R \bar{D}_{ST}) + \frac{C L_f L}{R_{LOAD}}$$

$$a_2 = C_o (L_f + C R_f R \bar{D}_{ST} + 2L(1 - \bar{D}_{ST})^2) + L C (1 - \bar{D}_{ST}) + \frac{C L R_f + C L_f R \bar{D}_{ST}}{R_{LOAD}}$$

$$a_1 = C_o (R_f + 2R \bar{D}_{ST}(1 - \bar{D}_{ST})^2) + C R \bar{D}_{ST}(1 - \bar{D}_{ST}) + \frac{L_f + C R_f R \bar{D}_{ST} + 2L(1 - \bar{D}_{ST})^2}{R_{LOAD}}$$

$$a_0 = 1 - \bar{D}_{ST} + \frac{R_f + 2R \bar{D}_{ST}(1 - \bar{D}_{ST})^2}{R_{LOAD}}$$

### 2.4 안정도 분석

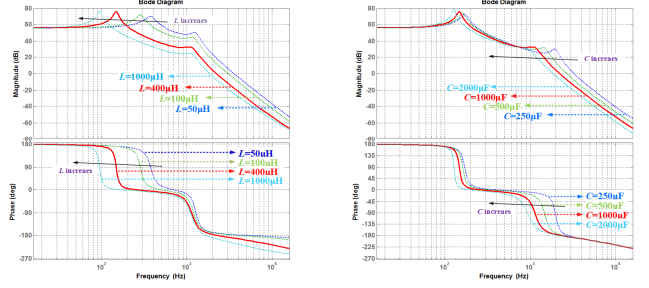


그림 2 소신호 전달함수  $\tilde{v}_o(t)/\tilde{D}_{ST}(t)$ 의 주파수 응답 특성  
Fig. 2 Frequency response of small-signal transfer function  $\tilde{v}_o(t)/\tilde{D}_{ST}(t)$

그림 2는  $L$ 과  $C$ 의 변화에 따라 상태 공간 평균 모델을 이용한 소신호 분석을 통해 구한 shoot-through 듀티 비에 대한 출력 전압의 소신호 전달함수의 크기 응답과 주파수 응답을 나타낸다. 이를 통하여 상대적으로 높은 크기 여유와 위상 여유를 갖는 수동 소자를 선정한다.

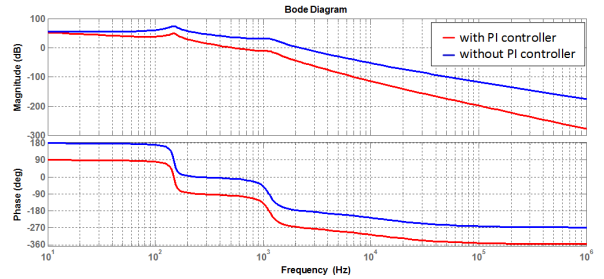


그림 3 소신호 전달함수  $\tilde{v}_o(t)/\tilde{D}_{ST}(t)$ 의 개루프 응답 특성 비교  
Fig. 3 Comparison of frequency response of the open-loop transfer function  $\tilde{v}_o(t)/\tilde{D}_{ST}(t)$

그림 3은 전압 제어기의 유무에 따른 소신호 전달함수의 개루프 응답 특성을 비교한 것 나타낸다. 제어기가 없을 경우 시스템은 낮은 위상여유로 불안정하다는 것을 확인할 수 있다. 이에 보상이 필요한 지점을 선정 한 뒤에 영점을 위치하도록 제어기의 이득을 선정하여 응답특성을 확인하면  $k_p = 0.004$ 이고  $k_i = 50$ 이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 Z-소스 네트워크 기반의 배터리 시뮬레이터의 전압 제어기 설계를 위한 안정도 분석을 수행하였다. 수학적 모델링을 통하여 시스템 모델링을 진행하였고 이에 대한 소신호 전달함수를 구하여 제어기의 이득값과 인덕턴스 및 커패시턴스의 변화에 따라 시스템 응답특성을 비교하고 이를 통하여 전압 제어기의 이득값을 선정하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2014RIA2A2A05006744)

#### 참고 문헌

- [1] M. Shen, A. Joseph, J. Wang, F. Z. Peng and D. J. Adams, "Comparison of Traditional Inverters and Z-Source Inverter for Fuel Cell Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1453-1463, Jul. 2007.