

PSIM을 이용한 슈퍼커패시터의 전기적 모델링

노세진, 이진목, 이재문, 최재호
충북대학교

Psim based electric modeling of supercapacitors

Sejin Noh, Jinmok Lee, Jaemoon Lee, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

This paper presents a method to identify the equivalent circuit parameters by experiment results of supercapacitor model based on transmission line. In order to validate this method, a model of supercapacitor is verified and implemented by using the PSIM software. Experimental and simulation results are compared to verify the electric modeling of supercapacitors.

1. 서론

슈퍼커패시터는 저장할 수 있는 에너지 밀도는 배터리 보다 작지만 순간적으로 공급할 수 있는 최대 전력 밀도는 배터리 보다 더 높다. 슈퍼커패시터를 배터리와 조합해 사용하면 최대 출력 전력을 슈퍼커패시터가 사용함으로써 배터리에 부하 되는 과도한 부하 방전을 완화시켜 에너지 저장시스템의 출력특성 향상 및 배터리의 수명을 연장할 수 있다. 또한 슈퍼커패시터는 전기를 저장하는 메커니즘이 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 활성탄소로 이루어진 전극과 전해질의 계면에 형성되는 전기이중층(electric double-layer)에 전하를 저장한다. 즉, 물리적인 전하의 축적에 의한 축전현상을 이용하여 반복 사용에 따른 열화현상이 없이 사이클 수명에 제한이 없다.^[1] 본 논문에서는 응용분야가 점차 확대되어가는 슈퍼커패시터의 물리적 특성과 전기적 특성을 바탕으로 전기적 모델링에서 전압 의존 커패시턴스로 구성된 3개의 전송라인에 파라미터를 실험적인 방법으로 추출하는 것을 나타내었다. 전기적 모델링은 PSIM으로 실행한 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 슈퍼커패시터의 물리적 특성 및 모델링

슈퍼커패시터의 전기이중층(electric double-layer)은 2개의 전극에 정전기력으로 축전된 에너지를 저장할 수 있는 전기에너지 저장소자로 널리 알려졌다. 전극은 카본 미립자 필름 형태인 고체이고, 전해질은 다공성 전극필름에 스며드는 액체 형태이다. 외부전압이 전기장을 형성하여 다공성 카본 미립자 전극 필름에 스며든 전해질은 전기이중층으로 형성하여 분극한

다. 그림 1은 슈퍼커패시터의 기본구조를 보여준다. 카본 미립자 전극에 형성된 전기이중층과 같은 축전된 에너지는 RC 전송라인을 형성한다. 각 카본 미립자 전극은 전해질 표면에 비례하여 증가하는 커패시턴스와 저항을 형성하여 사다리 네트워크 구조를 형성한다.^[2]

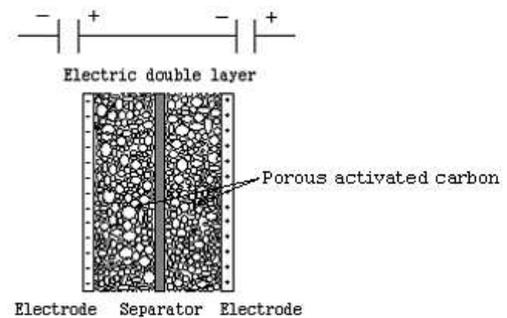


그림 1 슈퍼커패시터의 기본 구조
Fig. 1. Basic structure of supercapacitor.

2.2 슈퍼커패시터의 등가회로

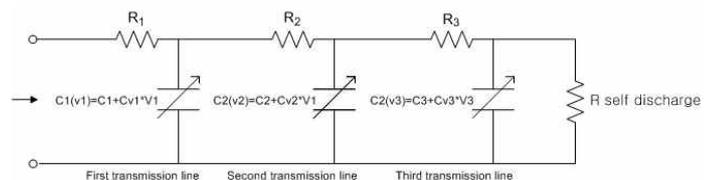


그림 2 슈퍼커패시터의 등가회로 모델
Fig. 2. Equivalent circuit model of supercapacitor.

전기 화학적 메커니즘을 기본으로, 슈퍼커패시터는 서로 다른 시정수를 가진 수많은 병렬 RC 전송라인으로 모델링 되어야 한다.^[3] 그림 2는 본 연구에서 검토한 슈퍼커패시터의 등가모델이다.^[4] 3개의 전송라인의 커패시터는 전압 의존성을 반영하기 위해서, 고정 커패시터 C 와 전압상승에 따라서 비선형적으로 증가하는 전압 의존 커패시터 C_v 로 모델링 되었다. 마지막에 병렬 저항은 자기방전 특성을 나타내기 위해서 추가되었다. 제시한 등가모델의 타당성을 분석하기 위하여 본 논문에서는 Psim으로 등가모델을 구성하고 실험결과와 특성을 비교한다.

2.3 등가회로 파라미터 측정

서로 다른 시정수를 가지는 3개의 RC 전송라인과 같은 모델 파라미터는 일정한 전류 충전을 실행함으로써 확인 할 수 있다. 0에서 정격전압까지 슈퍼커패시터를 충전하는 것과 약 5분에 걸쳐 내부 충전 재분배 동안 최종 전압을 관찰함으로써 확인 할 수 있다. 순간적인 충전응답은 첫 번째 전송라인의 전압 의존성 커패시터에 의해서 결정된다. 따라서, 시정수가 가장 작은 첫 번째 전송라인의 커패시터부터 충전이 시작되고 다음에 시정수가 이것 보다 더 큰 두 번째 전송라인에서 내부 충전 재분배가 이루어져 두 번째 전송라인의 커패시터가 충전된다. 첫 번째와 두 번째 전송라인의 커패시터 전압이 평등하게 된 후, 충전은 다시 세 번째 전송라인의 커패시터에서 재분배를 시작한다.

2.3.1 첫 번째 전송라인 파라미터

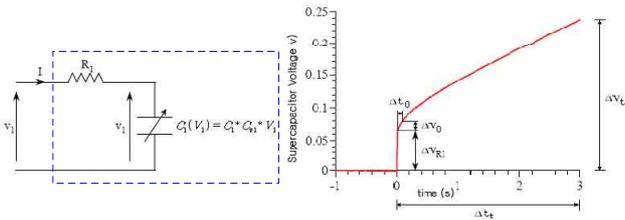


그림 3 첫 번째 파라미터 등가회로
Fig. 3. First parameter equivalent circuit.

첫 번째 전송라인의 파라미터는 완전 방전된 상태에서 일정한 전류로 슈퍼커패시터를 충전시켜서 확인한다. 첫 번째 전송라인의 시정수는 다른 2개의 전송라인 시정수 보다 아주 작기 때문에, 모든 충전은 첫 번째 전송라인에서 저장된다. 그림 3은 R_1 파라미터를 측정하는 방법을 보여주고 있다:

$$R_1 = \frac{\Delta V_{R1}}{I} \quad (1)$$

초기에 전압 의존성 커패시터는 약 0V이기 때문에, 그림 3에서 고정 커패시터 C_1 은 근사적으로 다음과 같다:

$$C_1 = I \frac{\Delta t_0}{\Delta V_0} \quad (2)$$

첫 번째 전송라인에 총 커패시터는 $dQ_t = C_t \cdot dV_t$ 과 그림 2에서 $C_1(V_1) = C_1 + C_{v1} \cdot V_1$ 으로부터 구할 수 있다^[5]:

$$C_t = C_1 + \frac{1}{2} C_{v1} \cdot V_t \quad (3)$$

식 (2)으로부터 고정 커패시터 C_1 이 계산되면 전압 의존성 커패시터 C_{v1} 은 식 (3)으로부터 다음과 같이 구한다:

$$C_{v1} = \frac{2}{V_t} \left(\frac{I \cdot \Delta t_t}{\Delta V_t} - C_1 \right) \quad (4)$$

2.3.2 두 번째 전송라인 파라미터

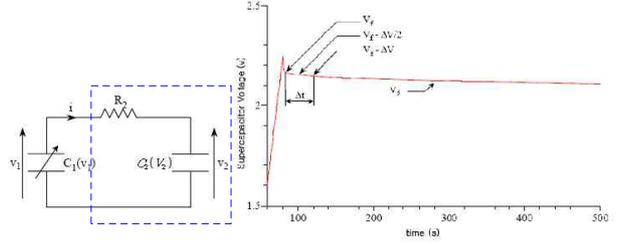


그림 4 두 번째 파라미터 등가회로
Fig. 4. Second parameter equivalent circuit.

서로 다른 시정수 때문에, 시정수가 가장 작은 첫 번째 전송라인의 커패시터가 충전되고, 그 후, 두 번째 전송라인까지 내부 충전 재분배가 일어난다. $C_2(V_2)$ 에 내부 충전 재분배가 일어나는 동안 $C_3(V_3)$ 에 충전 재분배가 일어나지 않기 위해서, 세 번째 전송라인의 시정수는 $C_2(V_2)$ 충전 재분배 시간 보다 더 길어야 한다. Δt 시간동안 $C_2(V_2)$ 는 완전히 방전되었다고 가정하면, $C_2(V_2)$ 에 충전하는 전류는 일정하다:

$$I = (V_f - \Delta V/2) / R_2 \quad (5)$$

또한 첫 번째 전송라인에 방전 전류도 일정하다.

$$I = C_1(v_1) \cdot \Delta V / \Delta t \quad (6)$$

식 (5)과 식(6)로부터 R_2 를 구할 수 있다.

$$R_2 = \frac{(V_f - \Delta V/2) \cdot \Delta t}{C_1(v_1) \cdot \Delta V} \quad (7)$$

첫 번째에서 두 번째 전송라인까지 내부 충전 재분배는 $V_{c1}(v_1) = V_{c2}(v_2)$ 에서 끝난다. 두 번째 전송라인 커패시터는 충전 평균 ($Q_t = C_1(V_3) \cdot V_3 + C_2(V_3) \cdot V_3$)으로 계산한다:

$$Q_t = V_3(C_1 + C_{v1} \cdot V_3/2) + V_3(C_2 + C_{v2} \cdot V_3/2) \quad (8)$$

이때 초기에 전압 의존성 커패시터는 $V_{C_{v2}}$ 는 거의 0이기 때문에 식 (8)으로부터 고정 커패시터는 근사적으로 다음과 같다:

$$C_2 = \frac{I \cdot \Delta t_t}{V_3} - (C_1 + C_{v1} \cdot V_3/2) \quad (9)$$

식 (9)으로부터 고정 커패시터 C_2 을 계산함으로써 식 (8)으로부터 전압 의존성 커패시터를 구할 수 있다:

$$C_{v2} = \frac{2}{V_3} \left(\frac{I \cdot \Delta t_t}{V_3} - (C_1 + C_{v1} \cdot V_3/2 + C_2) \right) \quad (10)$$

2.3.3 세 번째 전송라인 파라미터

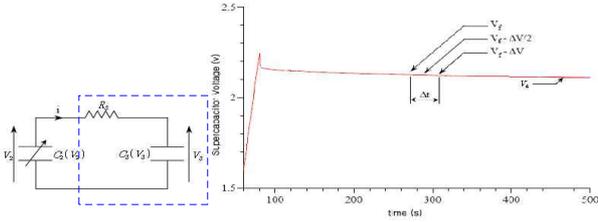


그림 5 세 번째 파라미터 증가회로
Fig. 5. Third parameter equivalent circuit.

첫 번째와 두 번째 커패시터는 V_3 에 충전하게 되고, Δt_t 후에, 첫 번째와 두 번째에서 세 번째 전송라인까지 내부충전 재분배가 일어난다. Δt 동안 $C_3(V_3)$ 는 완전히 방전되었다고 가정하면, $C_3(V_3)$ 에 충전하는 전류는 일정하다

$$I = (V_f - \Delta V/2) / R_3 \quad (11)$$

또한 R_1 은 R_2 때문에 초기 순간에 이동 전류는 두 번째 전송라인으로부터 주로 공급 된다

$$I = C_2(v_2) \cdot \Delta V / \Delta t \quad (12)$$

식 (11)과 식 (12)으로부터 R_3 를 구할 수 있다.

$$R_3 = \frac{(V_f - \Delta V/2) \cdot \Delta t}{C_2(v_2) \cdot \Delta V} \quad (13)$$

그림 5는 세 번째 파라미터 추출 증가회로를 보여주고 있다. 세 번째 전송라인에서 내부 충전 재분배는 끝나고 3개의 등가 커패시터는 같은 전압 V_4 를 가진다. 세 번째 전송라인 커패시터는 충전 평균 ($Q_t = C_1(V_4) \cdot V_4 + C_2(V_4) \cdot V_4 + C_3(V_4) \cdot V_4$)으로 계산한다

$$Q_t = V_4(C_1 + C_{v1} \cdot V_4/2) + V_4(C_2 + C_{v2} \cdot V_4/2) + V_4(C_3 + C_{v3} \cdot V_4/2) \quad (14)$$

이때 최기에 전압 의존성 커패시터는 $V_{C_{v3}}$ 는 거의 0이기 때문에 식 (14)으로부터 고정 커패시터는 근사적으로 다음과 같다

$$C_3 = \frac{I \cdot \Delta t_t}{V_4} - (C_1 + C_{v1} \cdot V_4/2) - (C_2 + C_{v2} \cdot V_4/2) \quad (15)$$

식 (15)으로부터 고정 커패시터 C_3 을 계산함으로써 식 (14)으로부터 전압 의존성 커패시터는 계산 할 수 있다

$$C_{v3} = \frac{I \cdot \Delta t_t}{V_4^2} - \frac{2}{V_4}(C_1 + C_{v1} \cdot V_4/2) - \frac{2}{V_4}(C_2 + C_{v2} \cdot V_4/2) + C_3 \quad (16)$$

2.4 시뮬레이션 및 실험

슈퍼커패시터의 충전과 방전에 대한 응답은 실험적으로 측정된 파라미터로 등가회로를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 같은 시간에 실험결과를 비교하였다. 다음 그림 6은 시뮬레이션과 NessCap 400F로 실험한 결과를 비교한 것을 보여준다. 시뮬레이션과 실험결과 모두 아주 일치하는 것을 증명한다. 슈퍼커패시터가 방전하는 동안에 시뮬레이션과 실험결과 차이는 점점 증가하다가 다시 감소한다. 이 차이의 원인은 등가회로에서 무시한 1시간 또는 하루 동안 아주 긴 시정수를 가지는 RC 전송라인에 저장된 에너지 때문이다. 하지만 시뮬레이션과 실험결과 사이의 차이가 아주 작기 때문에 그 값은 무시 할 수 있다.

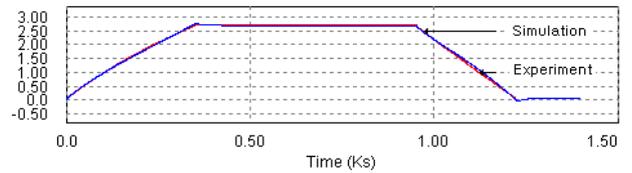


그림 6 PSIM 이용한 시뮬레이션과 실험결과 비교
Fig. 6. Comparison with simulation and experiment results using PSIM.

3. 결론

슈퍼커패시터의 물리적 특성과 전기적인 특성을 바탕으로 전기적 모델링은 3개의 전송라인으로 구성되었다. 전기적 모델링은 3개의 전송라인 모두 다 정격전압에서 내부 충전 재분배를 반영하였다. 3개의 전송라인에 전압 의존성 커패시터를 반영한 전기적 모델은 실험적으로 측정된 파라미터로 실험한 시뮬레이션과 실험결과는 아주 일치하는 것을 증명하였다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

- [1] 진창수, 문성인, "Supercapacitor의 특성 및 응용," 대한전자공학회지, 제27권 제8호, pp. 73-81, 2000.
- [2] I. V. Barsukov, C. S. Johnson, *New Carbon Based Materials for Electrochemical Energy Storage Systems*, pp. 51-62, 2003.
- [3] F. Belhachemi, S. Rael, and B. Davat, "A physical based model power electric double-layer supercapacitors," *IEEE-IAS'97*, pp. 1097-1100, 1997.
- [4] J. R. Miller, "Ultracapacitor model parameters moment matching technique," ultracapacitor model parameters white paper of maxwell Technologies, 2007.
- [5] L. Zubieta, R. Bonert, "Characterization of double-layer capacitors (DLCs) for power electronics applications", *IEEE-IAS'98*, pp. 1149-1154, 1998.