

태양광 하이브리드 시스템을 위한 리튬-이온 배터리 모델링 연구

이현구*, 강병관*, 김승탁*, 배선호*, 김희중**, 박정욱*
연세대학교*, LS 산전**

A Study on Lithium-Ion Battery Modeling for Hybrid Photovoltaic System

Hyun-Koo Lee*, Byung-Kwan Kang*, Seung-Tak Kim*, Sun-Ho Bae*, Hee-Jung Kim**, Jung-Wook Park*
Yonsei University*, LSIS Co. LTD**

Abstract - 태양광 발전 시스템은 화석연료를 대체하는 가장 대표적인 신재생 에너지이다. 하지만 신재생 에너지는 발전량이 일정하지 않고, 예측 불가능하다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 기존 태양광 발전 시스템에 에너지 저장장치를 붙인 하이브리드 태양광 발전 시스템이 각광받고 있다. 본 논문에서는 리튬-이온 배터리를 모델링하고, 시스템 시뮬레이션을 통해 타당성을 검토한다.

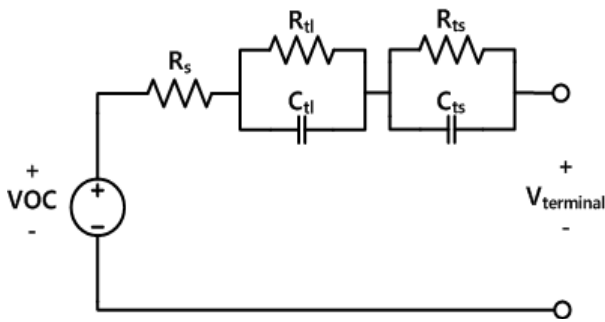
1. 서 론

태양광 발전 시스템은 발전량이 일정하지 않고, 급격한 일사량 변화로 인한 전력 품질 저하라는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 에너지 저장 장치를 연결한 태양광 하이브리드 시스템이 개발되고 있다. 태양광 하이브리드 시스템은 태양광 발전의 불규칙한 발전량과 급격한 발전 변화 보완하여 전력 품질을 향상 시킨다. 리튬-이온 배터리는 에너지 밀도가 크고, 수명이 길기 때문에 하이브리드 자동차와 태양광 하이브리드 시스템에 가장 많이 쓰이는 에너지 저장 장치이다. 배터리는 전기 화학적 특성을 가지기 때문에 다양한 방식으로 모델링이 가능하다.

본 논문에서는 SOC-OCV(State of Charge-Open Circuit Voltage) 커브와 배터리 내부 임피던스 근사화와 SOC 예측을 통한 Electrical Model로 리튬이온 배터리 모델링을 수행 하였다.

2. 배터리 모델

배터리는 전기 화학적 특성을 가지고 있기 때문에 다양한 방식으로 모델이 가능하다. 본 논문에서는 Electrical Model을 사용하여 리튬-이온 배터리를 모델링 하였다. 제안된 모델의 등가회로는 <그림 1> 과 같다 [1],[2].



<그림 1> 배터리 모델

<그림 1>에서 알 수 있듯이 배터리의 개로 전압을 직류 전압원으로 사용하였으며, 배터리의 내부 임피던스는 저항과 캐패시터의 RC 모델을 사용하여 나타내었다. 배터리의 개로전압은 배터리의 SOC와 밀접한 관계를 갖는다. SOC가 0.2이하, 0.8이상의 구간에서는 배터리의 개로전압은 비선형 적인 특성을 갖고, 0.2에서 0.8구간에서는 선형적인 특성을 갖게 된다. 배터리의 내부 임피던스 역시 배터리의 SOC에 따라 약간씩 변화하게 된다. 또한 개로전압과 내부임피던스는 SOC 뿐만 아니라 온도에 따라서도 영향을 받게 된다. 하지만 하이브리드 태양광 인버터 시스템은 대용량 배터리를 사용하는 전기자동차와 같이 발열에 문제가 되는 좁고 밀폐된 공간에 설치하지 않기 때문에 온도에 따른 개로 전압 및 내부 임피던스 변화는 본 논문에서는 생략하기로 한다.

제안된 모델은 배터리의 충·방전 전류를 이용해 배터리의 SOC를 예측하고, 계산된 SOC를 바탕으로 모델의 개로 전압과 내부 임피던스를 결정한다.

2.1 SOC(State of Charge)

배터리의 용량은 1시간동안 배터리를 완전 방전 할 수 있는 전류량 [Ah]으로 표시되며 SOC는 배터리의 용량 대비 현재 충전잔량[%]으로 표현되게 된다. 대표적인 SOC 측정 방법으로는 Discharge Test, Ampere-hour Counting, Measurement of Electrolytes Physical Properties, Open Circuit Voltage, Kalman Filter를 이용한 측정 방법 등이 있다.

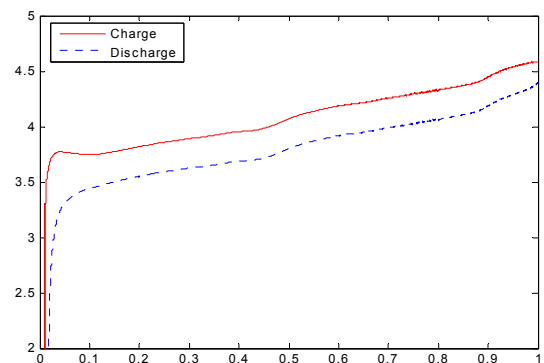
본 논문에서는 Ampere-hour Counting 기법을 이용하여 SOC를 예측한다. SOC와 전류의 관계는 식(1)과 같다[3].

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{capacity[Ah] \times 3600} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1)$$

2.2 SOC-OCV Curve

배터리의 개로전압은 SOC에 따라 변화하게 된다. 배터리의 개로 전압은 SOC가 약 0.2~0.8까지만을 사용한다. 이는 배터리의 과충전, 과방전을 막기 위한 것으로 배터리가 과충전, 과방전 될 경우에 배터리의 수명은 감소하게 될 뿐만 아니라 배터리의 안정성에도 문제가 생기게 된다.

배터리의 SOC에 따른 개로전압을 구하는 방법으로 본 논문에서는 Dualfoil 프로그램을 이용하였다[2]. Dualfoil은 배터리의 구성 요소들의 구체적인 파라미터를 이용하여 화학적 성질을 나타내는 7개의 커플링된 비선형 미분 방정식을 바탕으로 배터리의 특성을 계산해 내는 포트란 프로그램이다. Dualfoil은 배터리의 전기 화학적 특성을 계산해 내기 때문에 정확도가 높다는 장점이 있으나 계산량이 많고 연산속도가 느리다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 Dualfoil을 이용하여 SOC-OCV 결과를 도출해 내고 이를 20차 다항식으로 근사화 시켜 Dualfoil의 정확도는 유지하면서 연산량 및 연산 속도를 낮추었다. <그림 2>는 Dualfoil을 이용한 SOC-OCV 결과 및 20차 다항식으로 근사화한 결과 그래프를 나타낸다. <그림 2>에서 확인할 수 있듯이, SOC-OCV 곡선은 일반적으로 사용하는 SOC 구간인 0~0.2 구간, 0.2~0.8구간, 0.8~1구간으로 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 SOC-OCV 곡선을 위의 세 구간으로 나누어 세 구간에서 각각 20차 다항식으로 근사화 하였다.



<그림 2> SOC-OCV 커브

2.3 내부 임피던스

배터리의 내부 임피던스는 배터리의 SOC에 따라 변화하게 된다. 또한 SOC뿐만 아니라 온도 및 배터리 수명에도 영향을 받게 된다. 따라서 Electrical model을 사용하여 배터리 모델링을 할 경우에 고정된 임피던스 모델을 사용하는 것은 배터리의 특성을 제대로 반영하지 못하게

된다. 따라서 본 논문에서는 배터리의 SOC변화에 따른 내부임피던스 변화를 반영하고자 배터리의 내부 임피던스를 SOC에 따른 지수함수를 이용하여 근사화 하였다[1].

$$R_{series}(SOC) = 0.1562e^{-24.37SOC} + 0.07446 \quad (2)$$

$$R_{transient_s}(SOC) = 0.2308e^{-29.14SOC} + 0.04669 \quad (3)$$

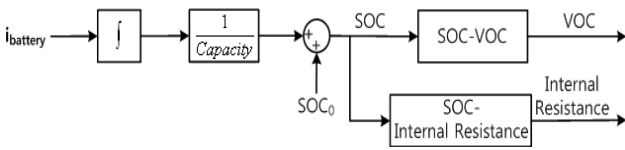
$$C_{transient_s}(SOC) = -752.9e^{-13.51SOC} + 703.6 \quad (4)$$

$$R_{transient_l}(SOC) = 6.603e^{-155.2SOC} + 0.04984 \quad (5)$$

$$C_{transient_l}(SOC) = -6056e^{-27.12SOC} + 4475 \quad (6)$$

2.4 배터리 모델

제안된 배터리 모델은 <그림 3>의 블록 다이어그램과 같이 동작하게 된다. 배터리의 충·방전 전류를 측정하여 Ampere-hour Counting 기법을 이용하여 배터리의 SOC를 계산한다. 계산된 SOC를 바탕으로 SOC-OCV 근사식을 이용하여 현재 배터리의 개로전압을 예측하여 DC 전압원으로 전달하고, 내부 임피던스 근사식을 이용하여 배터리의 내부 임피던스를 예측하여 모델의 RC 모델 값을 결정하게 된다.

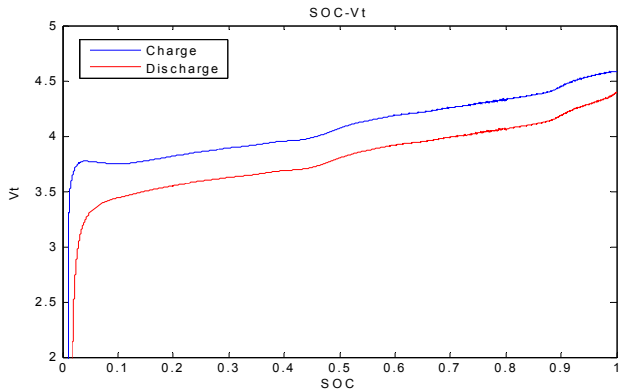


<그림 3> 배터리 모델 블록 다이어그램

3. Simulation

3.1 SOC-Terminal Voltage

제안된 배터리 모델을 검증하기 위해서 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 3.7V/850mAh 배터리를 설계하였다. 시뮬레이션은 충·방전 전류 850mA(1C)로 정전류 충전 하였으며 시뮬레이션 결과는 <그림 4>와 같다.

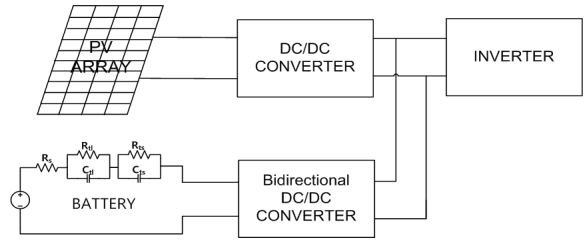


<그림 4> SOC-Vterminal 시뮬레이션 결과

<그림 4>에서 볼 수 있듯이 배터리의 충·방전 그래프가 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 배터리의 개로전압은 SOC에 따라 일정 하지만 내부 임피던스로 인해 단자 전압은 차이가 나기 때문이다.

3.2 하이브리드 태양광 시스템

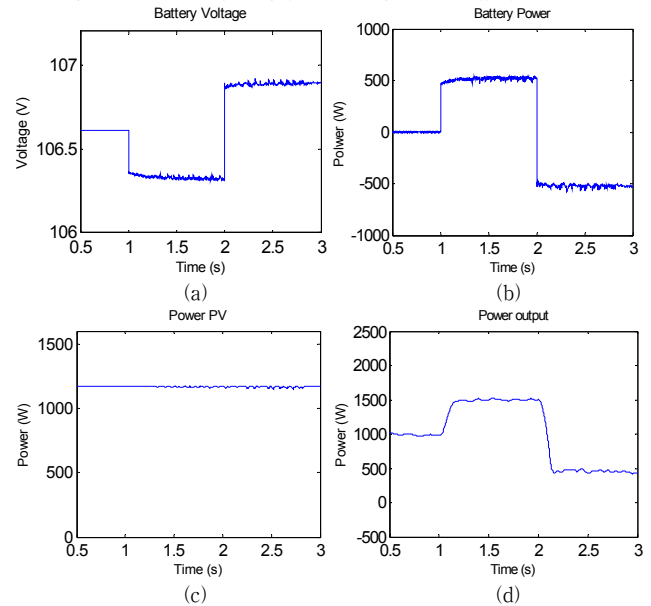
태양광 발전 시스템은 예측 불가능한 태양에너지를 사용하기 때문에 출력 전력이 불안정적이다. 또한 일사량이 존재 할 때만 발전이 가능하기 때문에 전력 품질이 낮으며 지속적인 발전이 불가능 하다. 하이브리드 태양광 시스템은 이러한 단점을 보완하고자 <그림 5>와 같이 배터리와 같은 에너지 저장장치를 기존 태양광 발전 시스템에 병렬로 연결하게 된다. 하이브리드 태양광 시스템에 병렬로 연결된 배터리는 태양광 시스템의 발전 전력이 소모 전력보다 클 경우에는 배터리에 남은 전력을 저장하고, 발전 전력이 소모 전력보다 작을 경우에는 저장된 배터리의 전력을 사용하게 된다. 또한 일사량이 급격히 변할 경우에 배터리의 전력을 사용하여 태양광 발전량을 보조하여 전력품질의 저하를 보상은 역할을 하게 된다.



<그림 5> 태양광 하이브리드 시스템

<그림 6>은 태양광 하이브리드 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과이다. 태양광 시스템은 1.18kW, 배터리는 100V/30Ah 리튬이온 배터리를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 시스템 동작 1초 후에 배터리가 500W만큼 방전하고, 2초 후에 500W 만큼 배터리가 충전하도록 수행 하였다.

결과에서 볼 수 있듯이 500W만큼 배터리가 방전, 충전할 때, 태양광 발전량은 1.1kW로 고정되어 있기 때문에 출력 전력이 처음 1.1kW에서 1.6kW와 600W로 변동이 일어나는 것을 확인할 수 있다.



<그림 6> 시뮬레이션 결과: (a) 배터리 전압 (b) 배터리 전력 (c) 태양광 전력 (d) 출력 전력

4. 결 론

본 논문에서는 태양광 하이브리드 시스템을 위한 리튬 이온 배터리 모델을 수행하기 위해 RC 임피던스 모델을 사용한 Electrical Model을 사용하였으며 SOC-OCV커브와 배터리 내부 임피던스를 근사화 하였고 Ampere-hour Counting 방법을 이용해 배터리의 SOC를 예측 하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 태양광 하이브리드 시스템에 제안된 배터리 모델의 동작을 검증 하였다.

[감사의 글]

본 연구는 LS산전-연세대 산학협동과제인 “3kW 무변압기 태양광인버터 고효율화 및 Hybrid Power Control System 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Min Chen, Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance”, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, pp. 504-511. Jun. 2006
- [2] R Rao, S Vrudhula, DN Rakhmatov, “Battery modeling for energy aware system design”, Computer, vol. 36, pp. 77-87, Dec. 2003
- [3] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen, “Methods for state of charge determination and their applications”, Journal of Power Sources, vol. 96, pp. 113-120, Jun. 2001