

스위치 캐패시터형 배터리 셀 밸런싱 회로의 초기 SOC 배치에 따른 성능 영향성 비교 연구

최지영, 서주형, 팜 티 응옥 타오, 최성진
울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

Performance Comparison of Switched-Capacitor Battery Cell Balancing Circuits According to Initial SOC Arrangement

Ji-Young Choi, Ju-Hyeong Seo, Ngoc-Thao Pham and Sung-Jin Choi

Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Ulsan, 44610, South Korea

ABSTRACT

직렬 연결된 리튬이온 배터리의 능동 셀 밸런싱 방법으로는 스위치 캐패시터형 방식이 가장 상용화 가능성이 높다고 알려져 있으며 기본, 이층, 체인, 스타 토폴로지 등이 소개되어 있다. 그러나 직렬 셀의 다양한 초기 SOC(State of Charge)배치에 대한 성능 비교 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문은 초기 SOC배치 그룹을 증가 및 감소, 임의 배치, 대칭 그룹으로 분류하고 각각에 대한 4가지 토폴로지의 밸런싱 시간을 시뮬레이션으로 분석하였다. 5개 셀의 직렬구조를 시뮬레이션한 결과, 대칭 그룹을 제외한 대부분 그룹에서 밸런싱 시간이 가장 짧은 토폴로지는 체인 구조인 결과가 나왔으며 이를 통해 스위칭 횟수 감소로 인한 에너지 손실과 셀의 노화 속도 감소 효과를 기대할 수 있겠다.

1. 서론

시스템의 동작 전압을 만족하기 위해 직렬 연결된 배터리 용량은 편차가 존재하는데 배터리를 사용함에 따라 셀 간 용량 차이는 증가하고 노화 속도가 달라지므로 셀 밸런싱은 필수적이다^[1]. 또한, 셀 간 불균형은 과충전 및 과방전의 위험을 증가시키며 결과적으로 배터리 셀이 변형되거나 화재 발생 위험이 있으므로^[2] 최근 수동형 셀 밸런싱 보다 효율이 좋은 능동 셀 밸런싱 연구가 탄력을 받고 있다. 그 중 스위치 캐패시터 방식은 가장 상용화 가능성이 높다고 알려져 있으며 4가지 토폴로지인 기본, 이층, 체인, 스타 구조는 모두 제어가 간단하며 균등화하는 과정에서 에너지를 재활용하는 장점이 있다^[2]. 따라서 본 논문에서는 4가지 토폴로지를 다양한 초기 SOC(State of Charge) 직렬 배치 그룹에 각각 시뮬레이션을 진행하여 어떤 토폴로지를 선택하는 것이 밸런싱 성능을 향상시키는지 알고자 한다.

2. 성능 비교군 선정 방법

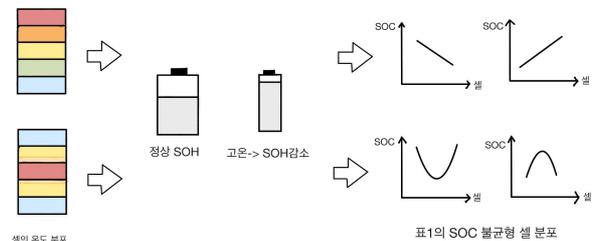


그림 1 온도에 따른 SOH 변화 및 그룹화 과정
Fig. 1 Temperature-dependent SOH(State Of Health) variation and grouping process

초기 SOC 배치는 배터리 셀의 온도에 따른 SOH(State Of Health) 변화로 인한 SOC 변화를 주요 원인으로 가정할 수 있다. 배터리의 고온과 불균형한 온도 분포는 리튬이온 배터리의 주된 이슈이며 온도는 배터리 에너지 용량을 결정하는 중요한 역할을 하기 때문이다^[3]. 본 논문에서 먼저 초기 SOC 감소 및 증가하는 직렬구조를 그룹화한다. 이는 냉각판으로부터 가장 멀리 떨어진 상단의 셀에서 가장 높은 온도가 발생하며^[4], 상대적으로 더 빠르게 노화가 진행됨을 반영한 것이다. 또한, 용량이 작은 셀은 충전 속도가 가장 빠르며 다른 셀에 비해 최고 및 최저 전압을 가진다^[1]. 이렇게 용량이 작아진 셀은 충전할 때는 SOC가 더 높아지고, 방전할 때는 SOC가 더 낮아지는 결과를 이용한다. 다음으로 중앙 셀 기준으로 대칭 분포 형태를 그룹화하였다. 이는 배터리 팩의 온도측정에서 모듈의 중앙 위치 셀들이 온도가 가장 높고 가장자리 셀의 온도가 가장 낮은 결과가 나온 경우를 반영한 것이다^[3]. 이유는 팩의 외부 표면에 위치한 셀들은 대류 열 전달이 더 잘 발생하여 쿨링이 잘 되지만 중앙 셀은 상대적으로 쿨링이 잘 되지 않기 때문이다^[3]. 해당 실험을 반영하여 중앙 셀이 상대적으로 고온에 장기간 노출된 경우로 가정하여 그룹화한다. 마지막으로 초기 SOC 값을 임의 배치하여 그룹화하였다.

3. 비교 연구

3.1 시뮬레이션 구성

초기 SOC 감소 및 증가 그룹, 중앙 셀의 초기 SOC 기준 대칭 분포 형태 그룹, 임의 배치 그룹에 대해 PLECS를 통해 시뮬레이션을 진행한다. 5개 셀을 직렬 연결한 그룹에 스위치 캐패시터형 능동 셀 밸런싱 토폴로지인 기본, 이층, 체인, 스타 구조를 각각 진행하였다. 온도에 영향을 받는 특정 셀에 집중

하기 위해, 특정 셀의 초기 SOC값만 변화시켰다. 배터리는 SDI사의 리튬이온 배터리인 INR18650 [3.65V/2.85Ah]를 이용하며, 시뮬레이션에서는 배터리 용량 0.00285Ah, 스위칭 주파수 10kHz, 커패시턴스는 1000uF으로 설정하였다. 밸런싱 완료의 기준은 SOC 차이가 1% 이내에 존재하는 경우이다.

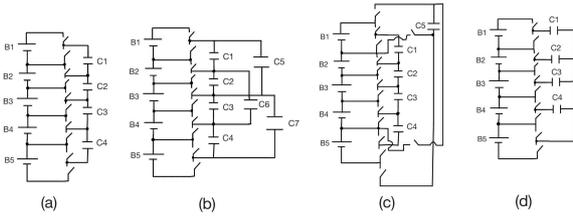


그림 2 스위치 커패시터형 능동 셀 밸런싱 토폴로지 (a)기본, (b)이층, (c)체인, (d)스타

Fig. 2 Switched-Capacitor Battery Cell Balancing Circuit Topologies (a)classical, (b)double-tiered, (c)chain, (d)star

3.2 시뮬레이션 결과

표1을 통해, 증가 및 감소 그룹에서 SOC 구성이 같은 경우, 스타 구조를 제외한 3가지 토폴로지는 감소 배치가 증가 배치보다 밸런싱 시간이 짧은 결과가 나왔다. 이는 감소 배치는 상단 셀에서 하단 셀로 에너지가 이동하나 증가 배치는 하단 셀에서 상단 셀로 에너지가 역방향으로 이동하는 것이 밸런싱 시간 증가에 영향을 준 것으로 추정된다. 또한, 밸런싱 시간이 가장 빠른 것은 체인 구조, 가장 느린 것은 기본 구조이며 이는 임의 배치 그룹에서도 같은 결과가 나옴을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 체인 구조의 경우, 스위치 개수를 증가시켜 양 끝의 위치한 셀 간 직접 교환 경로가 추가되었으므로 밸런싱 속도가 빨라진 것이며, 기본 구조는 인접 셀 사이에만 에너지 교환이 발생하므로 밸런싱 속도가 느려진 것으로 유추된다^[2].

하지만, 대칭 그룹에서 가장 빠른 밸런싱 시간을 가지는 것은 이층 구조이며 많은 시간이 소요되는 것은 스타 구조이다. 이는 이층 구조는 중앙 셀을 기준으로 직접 연결되어 있어 밸런싱 시간이 상대적으로 빠르며 스타 구조는 공통 노드 거쳐야 하므로 상대적으로 느리게 나타난 것으로 판단된다. 대칭 그룹에서 체인 구조가 가장 빠른 밸런싱 효과를 보지 못한 이유는 대칭 그룹의 양 끝 셀의 SOC가 동일하므로 양 끝의 셀 간 직접 교환 경로를 추가한 것이 큰 의미가 사라졌기 때문이라고 유추할 수 있다. 그림 3를 통해, 대부분 그룹에서 체인 구조를 사용하는 것이 빠른 밸런싱 효과를 보임을 알 수 있었다.

초기 soc 직렬 배치에 따른 밸런싱 시간 비교

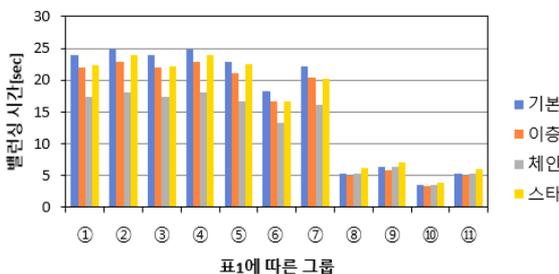


그림 3 초기 SOC 직렬 배치에 따른 밸런싱 시간 비교
Fig.3 Comparison of Balancing Time According to Initial SOC Series Configuration

표1. 그룹별 밸런싱 시간(단위:초)
Table 1. Balancing time of groups (unit:sec)

구조 초기 SOC 배치 (%)	기본(s)	이층(s)	체인(s)	스타(s)
증가 및 감소 그룹				
① 90-85-80-75-70	23.880	21.932	17.395	22.405
② 90-85-80-75-55	24.914	22.868	18.098	23.994
③ 70-75-80-85-90	23.891	21.943	17.402	22.253
④ 55-75-80-85-90	24.920	22.874	18.102	23.932
임의 배치 그룹				
⑤ 70-80-75-85-90	22.928	21.062	16.644	22.527
⑥ 80-90-75-85-70	18.231	16.737	13.205	16.622
⑦ 75-70-85-80-90	22.237	20.422	16.209	20.206
대칭 그룹				
⑧ 85-80-75-80-85	5.206	4.832	5.197	6.206
⑨ 85-80-60-80-85	6.282	5.793	6.276	7.084
⑩ 65-70-75-70-65	3.542	3.249	3.543	3.927
⑪ 65-70-90-70-65	5.287	4.860	5.286	6.030

4. 결론

본 논문에서는 직렬 셀의 냉각 상태에 따른 SOH 및 SOC 변화 범위를 이용하여 초기 SOC가 다른 직렬 배치를 증가 및 감소, 중앙 셀 기준 대칭, 임의 배치로 그룹화 하고, 각 그룹에 스위치 커패시터형 능동 셀 밸런싱의 4가지 토폴로지인 기본, 이층, 체인, 스타 구조에 대해 밸런싱 시간을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 대칭 그룹을 제외한 대부분 그룹에서 체인 구조를 사용하는 것이 가장 빠른 밸런싱 결과를 보였으며, 대칭 그룹을 포함한 전반적인 그룹에서 체인 구조가 빠른 밸런싱을 하는 경향성을 확인하였다. 현실에서 초기 SOC 상태를 모르는 경우를 고려한다면, 온도 변화에 의한 SOC 배치가 달라지더라도 대부분 그룹에서 밸런싱 속도가 빠른 결과가 나온 체인 토폴로지를 사용하는 것이 적합하다고 판단된다. 이렇게 빠른 밸런싱을 통해 스위칭 횟수 감소로 인한 에너지 손실과 셀의 노화 속도 감소를 기대할 수 있을 것으로 본다.

참고 문헌

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 개인기초연구사업(RS-2023-00240194)의 지원을 받아 수행된 연구임

[1] S.-S. Yun and S.-C. Kee, "Effect of capacity variation in series-connected batteries on aging," Batteries, vol. 9, no. 1, pp. 1 - 12, 2023.

[2] P.-H. La and S.-J. Choi, "Direct Cell-to-Cell Equalizer for Series Battery String Using Switch-Matrix Single-Capacitor Equalizer and Optimal Pairing Algorithm," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 7, pp. 8625-8628, 2022.

[3] A. P. Carlucci, H. Darvish, and D. Laforgia, "Detailed thermal characterization on a 48V lithium-ion battery pack during charge-discharge cycles," SAE Technical Paper series, vol. 1, pp. 1-8, 2023.

[4] A. Saxon, C. Yang, S. Santhanagopalan, M. Keyser, and A. Colclasure, "Li-ion battery thermal characterization for thermal management design," Batteries, vol. 10, no.4, pp. 8-9, 2024.