

슈퍼 커패시터 ESS의 밸런싱 성능 향상을 위한 동적 듀티 변조

장태승, 이영우*
한양대학교 ERICA

didhd159@hanyang.ac.kr, *stork@hanyang.ac.kr

Dynamic Duty Modulation for Balancing Performance Enhancement of Supercapacitor ESS

Jang Taeseung, Lee Youngwoo*
Hanyang University ERICA

요약

전기자동차(EV) 시장의 성장과 함께 고출력 에너지 저장 장치인 슈퍼 커패시터의 활용이 주목받고 있다. 그러나 슈퍼 커패시터는 자가 방전 현상으로 인해 셀 간 전압 불균형이 빈번하게 발생하며, 이는 시스템의 수명 단축과 성능 저하를 초래한다. 본 논문에서는 직·병렬 셀 전압 평형 회로의 동작 단계별 수학적 분석을 수행하고, 수렴 성능을 개선하기 위한 동적 듀티 변조(Dynamic Duty Modulation) 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 성능은 PSIM 시뮬레이션을 통해 기존 기법과 비교하여 검증하였다.

I. 서론

전 세계적 탄소중립 정책 이행과 저탄소 기술로의 전환에 따라 전기자동차(EV) 시장은 비약적인 성장을 거듭하고 있다. 이러한 흐름 속에서 슈퍼 커패시터는 빠른 충·방전 속도와 우수한 수명 특성을 바탕으로 기존 배터리를 보완할 수 있는 차세대 지속 가능 에너지 저장 장치로 크게 주목받고 있습니다. 그러나 슈퍼 커패시터는 리튬 이온 배터리에 비해 에너지 밀도가 낮고, 특히 자가 방전 현상이 두드러지게 나타난다는 한계가 존재합니다.

슈퍼 커패시터 모듈 내에서 발생하는 자가 방전 현상은 셀 간의 전압 불균형을 빈번하게 유도하며, 이는 특정 셀의 과충전 및 과방전을 야기하여 시스템 전체의 성능 저하와 수명 단축을 초래할 수 있다. 또한, 전압 불균형이 심화될 경우 안전성 문제까지 발생할 수 있어, 셀 전압 평형화 기술의 확보가 필수적이다[1].

기존에 널리 사용되던 직·병렬 셀 전압 평형 회로 토폴로지는 고정된 PWM(Pulse width modulation) 듀티비를 사용하여 에너지를 교환한다. 하지만 기존 고정 듀티 방식은 대용량 슈퍼 커패시터 모듈에 적용 시 전압 불균형을 완화하는 속도가 현저히 느려 실시간 대응에 한계가 있다[2].

본 논문에서는 직·병렬 평형 회로의 수학적 분석을 바탕으로, 기존 기법의 한계를 극복하고 대용량 모듈에서도 신속하게 전압 평형화를 달성하기 위해 매 샘플링 주기마다 전압 편차에 따라 듀티비를 실시간으로 최적화하는 동적 듀티 변조 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위해 PSIM 프로그램을 활용하여 기존 기법과의 비교를 통해 검증하였다.

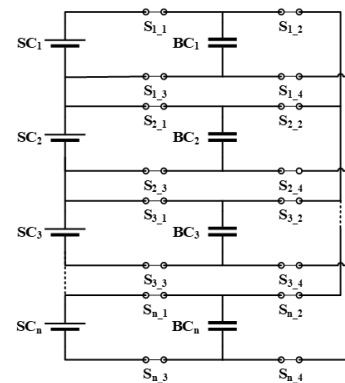


그림 1. 직·병렬 셀 전압 평형 회로 토폴로지

II. 본론

1. 직·병렬 셀 전압 평형 회로 수학적 분석

본 논문에서 분석하는 직·병렬 셀 전압 평형 회로는 슈퍼 커패시터(SC_n)와 밸런싱 커패시터(BC_n) 사이의 에너지 교환을 통해 동작한다(n=1, 2, 3, ...). 회로의 동작은 PWM 신호에 따라 상보적으로 동작하는 두 단계로 나뉜다. 첫 단계는 그림 2(a)와 같이 홀수 스위치가 도통되어 SC_n과 BC_n 간에 전압 차이에 따른 에너지 교환이 이뤄지며, 이때의 전류 I_{BC}는 옴의 법칙에 의해 수식 (1)과 같이 정의된다.

$$I_{BC,i}(k) = \frac{V_{SC,i}(k) - V_{BC,i}(k)}{R_s}$$
$$I_{BC,j}(k) = \frac{V_{SC,j}(k) - V_{BC,j}(k)}{R_s} \quad (1)$$

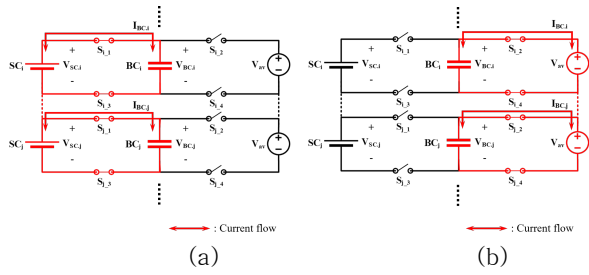


그림 2. 직·병렬 셀 평활 회로 동작 원리

$I_{BC,m}(k)$ 는 k 번째 샘플링 시점에서 m 번째 ($m=1, 2, 3, \dots, n$) 밸런싱 커패시터로 유입되는 전류를 의미한다. 이 전류의 크기는 슈퍼 커패시터의 전압인 $V_{SC,m}(k)$ 와 해당 밸런싱 커패시터의 전압인 $V_{BC,m}(k)$ 사이의 전위차에 의해 결정되며, 식의 분모에 표기된 R_s 는 에너지가 전달되는 경로상에 존재하는 스위치가 도통 상태일 때 갖는 온저항을 나타낸다. 두 번째 단계에서 그림 2(b)와 같이 짝수 스위치가 도통되어 각 BC 간의 전압 차이에 따라 에너지 평활화가 진행되며, 슈퍼 커패시터의 전압은 수식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{SC,i}(k+1) = V_{SC,i}(k) - \frac{T_s}{C_{SC}R_s}(V_{SC,i}(k) - V_{BC,i}(k))$$

$$V_{SC,j}(k+1) = V_{SC,j}(k) - \frac{T_s}{C_{SC}R_s}(V_{SC,j}(k) - V_{BC,j}(k)) \quad (2)$$

이 때, 평활화 완료 기준이 되는 평균 전압 V_{av} 는 수식 (2)와 같이 종속 전압 원으로 정의할 수 있다.

$$V_{av}(k) = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n [V_{BC,h}(k) - I_{BC,h}(k)R_s] \quad (3)$$

최종적으로, 동작 1 단계와 동작 2 단계의 셀 전압 평활화 완료에 필요한 시간을 계산하기 위해 수식 (4)를 정의한다.

$$\Delta V_{SC,i}(k) = V_{SC,i}(k) - V_{av}(k)$$

$$\Delta V_{SC,j}(k) = V_{SC,j}(k) - V_{av}(k) \quad (4)$$

수식 (1)-(3)을 수식 (4)에 대입하면 수식 (5)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\Delta V_{SC,i}(k) = \Delta V_{SC,i}(0)(1 - D[1 - e^{-a}])^k$$

$$\Delta V_{SC,j}(k) = \Delta V_{SC,j}(0)(1 - D[1 - e^{-a}])^k \quad (5)$$

이 때, D 는 듀티비이며, a 는 BC 의 시정수이다. 수식 (5)를 통해 셀 전압 평활화가 완료되는 샘플 k_{conv} 값을 구하면 수식 (6)과 같다.

$$k_{conv} = \frac{\ln(|\Delta V_{SC,i}(0)|/\epsilon)}{-\ln(1 - D(1 - e^{-a}))} = \frac{\ln(|\Delta V_{SC,j}(0)|/\epsilon)}{-\ln(1 - D(1 - e^{-a}))} \quad (6)$$

여기서 ϵ 은 셀 전압 수렴 판단을 위한 셀 전압 평활 완료 기준 오차이다.

2. 제안하는 동적 듀티 변조 기법

동적 듀티 변조 기법의 변조된 듀티비 $D_A(k)$ 와 $D_B(k)$ 는 수식 (7)와 같이 정의된다.

$$D_A(k) = D + a(k), \quad D_B(k) = D - b(k) \quad (7)$$

이 때, 매 샘플링마다 듀티 변조를 위한 함수 $a(k)$, $b(k)$ 는 $V_{SC,i}$, $V_{SC,j}$ 와 V_{av} 에 대하여 정의된다. 그리고 수식 (5)에 수식 (7)을 대입하고 $\psi = 1 - e^{-a}$ 로 치환하여 제안된 기법을 적용한 최종 수렴 시간 k_{prop} 값을 도출하면 수식 (8)이 유도된다.

$$k_{prop,i} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta V_{SC,i}(0)}{\epsilon}\right)}{\ln(1 - D \cdot \psi - \psi)}, \quad k_{prop,j} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta V_{SC,j}(0)}{\epsilon}\right)}{\ln(1 - D \cdot \psi + \psi)} \quad (8)$$

3. 시뮬레이션 결과

PSIM 소프트웨어를 이용하여 셀 밸런싱 속도 향상을 위한 동적 듀티 변조 알고리즘을 검증하였으며, 총 시뮬레이션 시간은 60 초로 설정하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값은 표 1 에 제시되었으며, 기존 기법과의 비교하여 시뮬레이션 수행하였다.

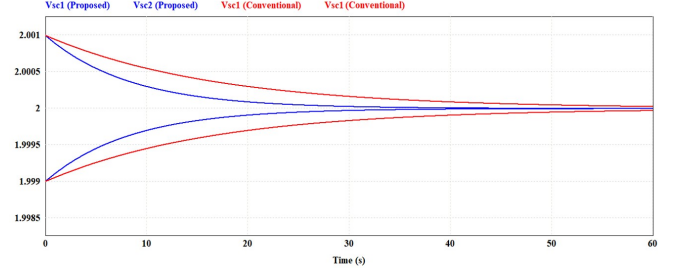


그림 3. 시뮬레이션 결과

Parameter	Value
$V_{SC,1}(0)$	2.001 [V]
$V_{SC,2}(0)$	1.999 [V]
C_{BC}	1 [mF]
F_s	10 [kHz]
R_s	0.01 [mΩ]
D	50 [%]

표 1. PSIM 시뮬레이션 파라미터 값

그림 3 의 시뮬레이션 결과, 제안된 기법(파란색 선)이 기존 기법(빨간색 선) 대비 평활 전압으로 더 빠르게 수렴함을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 직·병렬 셀 전압 평활 회로의 수렴 성능을 개선하기 위한 동적 듀티 변조 기법을 제안하였다. 직·병렬 셀 전압 평활 회로의 수학적 분석을 통해 수렴 성능을 분석하였으며, 시뮬레이션을 통해 기존 기법 대비 빠른 수렴 속도를 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(No.RS-2025-02214408, 산업혁신인재성장지원사업)과 2025 년도 한국 정부 [산업통상자원부](직류그리드에너지혁신연구센터)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(20224000000160, DC 그리드 에너지 혁신연구센터)을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] M. M. U. Rehman, F. Zhang, M. Evzelman, R. Zane, and D. Maksimovic, "Control of a series-input, parallel-output cell balancing system for electric vehicle battery packs," in *Proc. IEEE 16th Workshop Control Modeling Power Electron. (COMPEL)*, 2015, pp. 1-7.
- [2] Q. Ouyang, W. Han, C. Zou, G. Xu, and Z. Wang, "Cell balancing control for lithium-ion battery packs: A hierarchical optimal approach," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 16, no. 8, pp. 5065-5075, Aug. 2019.