

PPC와 통합된 배터리 팩의 효과적인 초충회로 전략

박진수, 정석진, 웬웬안, 최성진
울산대학교 대학원 전기전자컴퓨터공학과

Effective Pre-charge Schemes for PPC-integrated Battery Packs

Jin-Su Park¹, Seok-jin Jeong², Nguyen-Anh Nguyen³ and Sung-Jin Choi*

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

¹jjuu1205@mail.ulsan.ac.kr, ²hotbreak64@mail.ulsan.ac.kr, ³nnanh1995@gmail.com,

*sjchoi@ulsan.ac.kr

ABSTRACT

대형 배터리 에너지저장장치에서 직렬형 부분전력처리 컨버터(PPC)는 전체전력처리가 필요 없는 구조적 특성으로 효율성을 높이고 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 시스템 초기 전원 투입 시 입력 및 출력 커패시터에서 흐를 수 있는 돌입전류로 인해 컨버터가 손상될 수 있으며, 시스템 안정성을 저하시킬 가능성이 있다. 본 논문에서는 직렬 PPC로 흐르는 돌입 전류를 억제하기 위한 효과적인 초충회로 구조를 제시하였다.

1. 서론

PPC는 부분전력처리 개념을 적용하여 전체 컨버터의 용량을 감소 시키고, 전체 시스템의 효율을 개선할 수 있다. 또한 여러 대의 BESS가 셀간 불균형에 의한 불균형 전류가 흐르는 것을 조절할 수 있다는 장점이 있다^[1]. 하지만 부분전력처리를 구현하기 위한 그림 1과 같은 결선 방식에 의해 시스템 초기 구동 시, 배터리와 컨버터의 필터 커패시터 간 전위차에 의해 컨버터 및 배터리에 높은 돌입 전류가 유도 된다. 또한 배터리와 컨버터가 개별로 연결되었을 시 컨버터의 필터 커패시터로 높은 돌입전류가 유도되고, 이는 컨버터와 배터리의 안정성을 저하시킬 뿐 아니라 화재의 원인이 될 수 있다. 상기한 문제점을 해결하기 위해 초충회로는 필수적이다. 초충회로의 배치 가능한 위치는 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 시스템 초기 구동 상황 중 가장 큰 돌입 전류가 흐를 수 있는 경우를 고려해서 PPC를 사용한 BESS 시스템 내 프리차지 회로의 효율적인 배치 방식을 제시한다.

2. 초충회로의 배치 선정

2.1 초충회로의 필요성

초충회로는 전압원과 커패시터가 직접적으로 연결되었을 때 초충저항을 통해 커패시터로 흐르는 돌입 전류를 제한하는 회로이다. 초충저항은 커패시터의 시정수 τ 에 의해 결정되며 다음 식과 같다.

$$V_C = V_S \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (1)$$

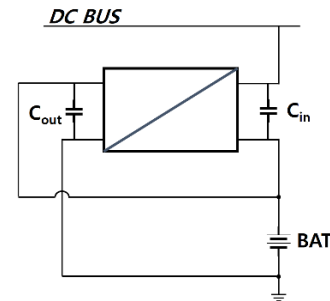


그림 1. PPC가 적용된 BESS 시스템

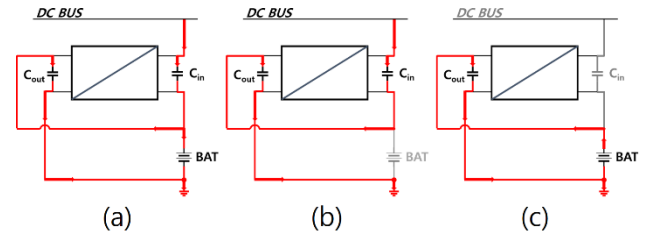


그림 2. 돌입전류 발생 가능 경로

$$\tau = RC \quad (2)$$

여기서 V_C 는 커패시터의 전압, V_S 는 입력 전압, τ 는 시정수이다. 시정수는 R 과 C 의 값으로 결정되며 일반적으로 초충시간은 5τ 로 결정된다. 이 때 커패시터의 전압은 약 99.33% 충전되고, 충전 과정을 통해 커패시터에 흐르는 돌입 전류를 제한할 수 있다. 커패시터에 흐르는 최대 돌입전류는 아래 식과 같다^[2].

$$I_C = \frac{V_C - V_S}{R} \quad (3)$$

2.2 제안하는 초충회로의 배치

PPC가 적용된 BESS 시스템의 회로에서 입력 및 출력 필터 커패시터에 흐르는 돌입전류는 그림 2와 같이 발생한다. 그림 2(a)와 같이 시스템 초기 구동시 DC 계통과 접지 사이의 전위차가 가장 클 때 입력 커패시터 C_{in} 과 출력 커패시터 C_{out} , 배터리 측으로 돌입 전류가 유도될 수 있으며, 배터리가 연결되

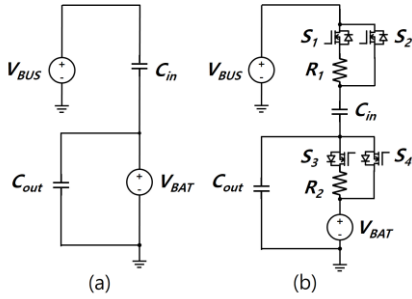


그림 3. 동작모드 해석을 위한 등가회로 (a) 초충회로 적용전, (b) 초충회로 적용 후

어 있지 않아도 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 C_{in} , C_{out} 으로 돌입 전류가 유도 된다. 또한 그림 2(c)에서 볼 수 있듯이 배터리의 전압이 최대로 충전되어 있을 때 C_{out} 으로 가장 큰 돌입전류가 흐른다. 이에 본 논문은 DC 계통과 배터리의 전압이 가장 큰 경우에서 해석하며, 회로는 그림 3(a)로 등가화할 수 있다. 초충회로는 경제성을 고려하여 최소한의 스위치 갯수를 사용해야 하며, DC 계통이 초충회로를 통해 PPC의 필터 커패시터 C_{in} 과 C_{out} 을 초충하는 동안 돌입전류가 배터리 측으로 흐르지 않아야 하며, 반대로 배터리 측이 PPC의 필터 커패시터를 충전하는 동안에는 돌입 전류가 DC 계통 측으로 흐르지 않아야 한다. 또한 안전성의 문제로 초충 회로가 동작하지 않을 때는 DC 계통측과 배터리 측은 절연되어 있어야 한다. 위의 기준을 고려하여 그림 3(b)와 같이 초충 회로가 적용된 등가회로를 적용하였다.

2.3 초충회로 해석

[상황1]: DC 계통과 PPC의 입력, 출력 커패시터를 초충이후 배터리측의 초충회로를 구동하는 동작이다.

모드 1 [$t < t_0$]: S_1 , S_2 , S_3 , S_4 off

모든 스위치가 꺼져있으므로 C_{in} , C_{out} 에 인가되는 전압은 없다.

모드 2 [$t_0 \sim t_1$]: S_1 on / S_2 , S_3 , S_4 off

$t=t_0$ 에서 S_1 이 켜지며 DC 계통과 R_1 , C_{in} , C_{out} 이 직렬로 연결된 구조이다. 배터리의 전압이 C_{out} 보다 높으므로 배터리 측으로 전류가 흐르지 않는다. 총 커패시터에 흐르는 전류와 시정수는 다음과 같다.

$$I_{C_{total}} = V_{BUS} e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_1}} \quad (4)$$

$$\tau_1 = R_1(C_{in} || C_{out}) \quad (5)$$

모드 3 [$t_1 \sim t_2$]: S_1 , S_2 on / S_3 , S_4 off

$t=t_1$ 에서 S_2 가 켜지며 $V_{C_{in}}$, $V_{C_{out}}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{C_{in}} = V_{BUS} \left(\frac{C_{out}}{C_{in} + C_{out}} \right) \quad (6)$$

$$V_{C_{out}} = V_{BUS} \left(\frac{C_{in}}{C_{in} + C_{out}} \right) \quad (7)$$

표 1. 시뮬레이션에 사용된 회로 상수

$V_{BUS}(V)$	400	$V_{BAT}(V)$	350
$\tau_{1,2,3,4}(s)$	0.1	$C_{in}(F)$	0.0001
$C_{out}(F)$	0.000033	$R_1(\text{상황1})(\Omega)$	4030.3
$R_2(\text{상황1})(\Omega)$	752.88	$R_1(\text{상황2})(\Omega)$	1000
$R_2(\text{상황2})(\Omega)$	3030.3	$R_{on}(\Omega)$	0.1

모드 4 [$t_2 \sim t_3$]: S_2 on / S_1 , S_3 , S_4 off

$t=t_2$ 에서 S_1 은 꺼지고, S_2 가 켜진 상태로 유지되며, C_{out} 과 배터리간의 전위차에 의해 회로에 전류가 흐르지 않는다.

모드 5 [$t_3 \sim t_4$]: S_2 , S_3 on / S_1 , S_4 off

$t=t_3$ 에서 S_3 이 켜지며 두 번째 초충이 시작된다. 입력, 출력 커패시터의 충전된 값을 바탕으로 회로를 해석할 수 있다. 시정수와 입력, 출력 커패시터에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I_{C_{in}} = \frac{C_{in}}{C_{in} + C_{out}} \frac{V_{C_{out0}} - V_{BAT}}{R_2} e^{\frac{-(t-t_3)}{\tau_2}} \quad (8)$$

$$I_{C_{out}} = \left(\frac{C_{in}}{C_{in} + C_{out}} - 1 \right) \frac{V_{C_{out0}} - V_{BAT}}{R_2} e^{\frac{-(t-t_3)}{\tau_2}} \quad (9)$$

$$\tau_2 = R_2(C_{in} + C_{out}) \quad (10)$$

모드 6 [$t_4 \sim t_5$]: S_2 , S_3 , S_4 on, S_1 off

$t=t_4$ 에서 S_4 가 켜지며 입력, 출력 커패시터의 전압은 다음과 같다.

$$V_{C_{in}} = V_{BUS} - V_{BAT} \quad (11)$$

$$V_{C_{out}} = V_{BAT} \quad (12)$$

모드 7 [$t_5 < t$]: S_2 , S_4 on, S_1 , S_3 off

$t=t_5$ 에서 S_3 가 꺼지며 커패시터의 전압은 모드 6과 동일한 상태로 유지된다.

[상황2]: 배터리와 PPC를 먼저 초충한 이후 DC 계통측 초충회로를 구동하는 경우이다. 스위치의 동작 순서는 다음과 같다.

모드 1 [$t < t_0$]: S_1 , S_2 , S_3 , S_4 off

$t=t_0$ 에서 모든 스위치가 꺼져있으므로 커패시터에 충전되는 전압은 없다.

모드 2 [$t_0 \sim t_1$]: S_3 on, S_1 , S_2 , S_4 off

$t=t_1$ 에서 S_3 가 켜지며 초충회로가 동작한다. DC 계통과 배터리간의 전위차에 의해 C_{in} 에는 전류가 흐르지 않는다. R_2 와 C_{out} 이 직렬로 연결된 구조로 볼 수 있으며 시정수와 C_{out} 에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I_{C_{out}} = V_{BAT} e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau_3}} \quad (13)$$

$$\tau_3 = R_2 C_{out} \quad (14)$$

모드 3 [$t_1 \sim t_2$]: S_3 , S_4 on, S_1 , S_2 off

$t=t_1$ 에서 S_4 가 동작하며 출력 커패시터에 충전되는 전압은 다음과 같다.

$$V_{C_{out0}} = V_{BAT} \quad (15)$$

모드 4 [$t_2 \sim t_3$]: S_4 on, S_1, S_2, S_3 off

$t=t_2$ 에서 S_3 는 꺼지고 S_4 는 켜져있으며, DC 계통 측 초충회로의 역방향 다이오드로인해 회로에 전류가 흐르지 않는다.

모드 5 [$t_3 \sim t_4$]: S_1, S_4 on, S_2, S_3 off

$t=t_3$ 에서 S_1 이 켜지며 두 번째 초충이 시작된다. 출력 커패시터의 충전된 값을 바탕으로 회로를 해석할 수 있다. 시정수와 C_{in} 에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$I_{C_{in}} = \frac{V_{BUS} - V_{C_{out0}}}{R_1} e^{-\frac{(t-t_3)}{\tau_4}} \quad (16)$$

$$I_{C_{OUT}} = 0 \quad (17)$$

$$\tau_4 = R_1 C_{in} \quad (18)$$

모드 6 [$t_4 \sim t_5$]: S_1, S_2, S_4 on, S_3 off

$t=t_4$ 에서 S_2 가 켜지고 입력, 출력 커패시터의 전압은 다음과 같다.

$$V_{C_{in}} = V_{BUS} - V_{BAT} \quad (19)$$

$$V_{C_{out}} = V_{BAT} \quad (20)$$

모드 7 [$t_5 < t$]: S_2, S_4 on, S_1, S_3 off

$t=t_5$ 에서 S_1 이 꺼지며 이때 커패시터의 전압은 ($t_4 < t < t_5$)와 동일하게 유지된다.

3. 시뮬레이션 검증

앞서 제시한 초충회로는 동작하지 않을 때 C_{in}, C_{out} , 측으로 전류가 흐르지 않고, 또한 각 모드 동작 시 C_{in}, C_{out} 으로 흐르는 돌입 전류가 제한되어야 하므로 시뮬레이션을 통해 검증한다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 상수 값들이다. 상황 1, 2 동작 시 시정수를 동일하게 설정하고 각 모드에서의 시정수의 10배 동안 초충하였다. PLECS 시뮬레이션 동작에서 커패시터의 정상적인 동작을 위해 MOSFET 스위치 내부 저항 $R_{on}=0.1\Omega$ 으로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 먼저 초충회로가 동작하지 않을 때 C_{in}, C_{out} , 측으로 전류가 흐르지 않음을 그림 4, 5를 통해 차례로 검증하였다. 상황 1,2 동작 시 입력, 출력 커패시터로 흐를 수 있는 돌입 전류가 제한되며 최대 돌입전류는 약 0.11A 이내로 제한되는 것을 볼 수 있다. 초충동작 중이나 초충동작이 끝났을 때 DC 계통측이나 배터리 측으로 전류가 흐르지 않게 설계 하였으므로 ($t_0 \sim t_1$) 구간 동안 상황 1에서 배터리 전류, 상황 2에서 C_{in} 전류가 흐르지 않는 것을 검증하였다. 두 번째 초충 동작을 시작할 때 MOSFET의 내부 저항으로 인해 짧은 시간동안 커패시터의 전압이 급격하게 상승하면서 그림 5와 같이

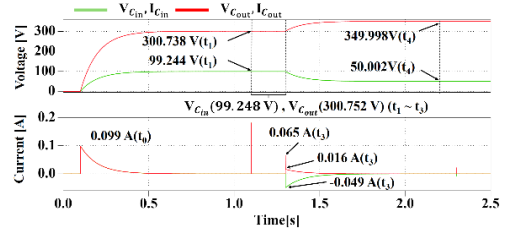


그림 4. 상황 1 C_{in}, C_{out} 전압, 전류 파형

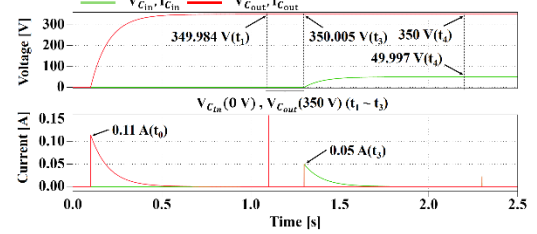


그림 5. 상황 2 C_{in}, C_{out} 전압, 전류 파형

순간적인 전류가 발생한다. 또한 초충이 끝나고 S_2 또는 S_4 가 닫힐 때 커패시터 전압이 100% 충전 되는 것이 아니므로 서지 전류가 발생한다. 하지만 이는 향후 게이트 전압 변조 연구를 바탕으로 해결될 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 PPC가 적용된 시스템에서 발생할 수 있는 돌입 전류를 효과적으로 제한할 수 있는 설계를 제안하였다. 시스템이 동작하지 않을 때 입력측과 출력측 커패시터에 돌입전류가 흐르지 않도록 설계했으며, 초충 동작 구동중 DC 계통 측과 PPC의 필터 커패시터를 먼저 초충하고, 배터리 측 초충이 이루어질 때 배터리 측으로 흐르는 전류를 제한하였으며, 배터리와 PPC의 필터 커패시터를 먼저 초충하고, DC 계통 측 초충이 이루어질 때 C_{in} 으로 흐르는 전류를 제한하였다. 동일한 시정수로 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 향후 게이트 전압 변조에 대한 연구를 진행할 예정이다.

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-02263945, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] 정석진, 웬웬안, 최성진. "배터리 팩 병렬운전을 위한 2.5 kW 급 차동 컨버터 토폴로지 선정 및 최적 설계." *전력전자학회 학술대회 논문집* (2024): 298-300.
- [2] B. Munari and A. Schneer, "How to design a precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications," Tech. White Paper, Sensata Technol., Attleboro, MA, USA, Aug. 2020.