

고전압 배터리 시스템 기동시 돌입전류억제를 위한 저항형 및 정전류형 초충회로 성능 비교 분석

박진수, 웬웬안, 최성진
울산대학교 대학원 전기전자컴퓨터공학과

Comparison of Resistive vs Current-regulated Inrush Current Limiters for High Voltage Battery Systems

Jin-Su Park¹, Nguyen-Anh Nguyen² and Sung-Jin Choi^{*}

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

¹jjuu1205@mail.ulsan.ac.kr, ²nnanh1995@gmail.com, ^{*}sjchoi@ulsan.ac.kr,

ABSTRACT

고전압 배터리 시스템은 DC 링크 커패시터를 포함하므로 초기 기동 시 순간적인 돌입전류가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 고전압 배터리 시스템의 초기 기동 시 발생하는 돌입전류를 제한하기 위해 저항형 초충회로와 정전류 기반 돌입전류 제한기의 성능을 비교하였다. 동일한 부하 조건에서, 정전류 기반 돌입전류 제한기는 저항형 대비 돌입전류가 77.73% 감소하였으며, 순시 피크 전력 손실의 경우 77.69% 감소함을 확인하였다. 이를 통해 정전류 기반 돌입전류 제한기가 고전압 배터리 시스템의 돌입전류 제한 및 열적 스트레스 감소 측면에서 효과적인 대안이 될 수 있음을 검증하였다.

1. 서론

최근 배터리 에너지저장장치(Battery Energy Storage System, BESS), 전기자동차 충전 시스템 및 고전압 DC 전력 변환 시스템의 적용이 확대됨에 따라, 시스템 초기 기동 시 발생하는 돌입전류(inrush current)를 안정적으로 제한하는 기술의 중요성이 증가하고 있다.

돌입전류를 제한하기 위한 방법 중 하나인 저항형 초충회로는 구조가 비교적 단순하고 구현이 용이하다는 장점이 있으나, 초충저항에서 발생하는 손실과 발열이 있으며, 충전 시간과 저항 정격 선정 간의 트레이드 오프가 존재한다. 반면, 정전류 기반 돌입전류 제한기는 MOSFET의 드레인 전압 변화율을 제어함으로써 부하 커패시터에 유입되는 전류를 일정하게 유지할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 고전압 배터리 시스템의 돌입전류 제한 관점에서 저항형 초충회로와 정전류형 돌입전류 제한기 방식을 비교·분석한다.

2. 돌입전류 제한기

2.1 저항형 초충회로

초충회로는 저항을 통한 열 소산을 바탕으로 컨버터의 입력 필터 커패시터에 유입될 수 있는 돌입전류를 제한하는 회로이다. 구조는 그림 1-(a)와 같으며, S_{pch} 를 도통하며 충전되는 커패시터의 전압과 시정수는 다음과 같다.

$$v_c(t) = V_S \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

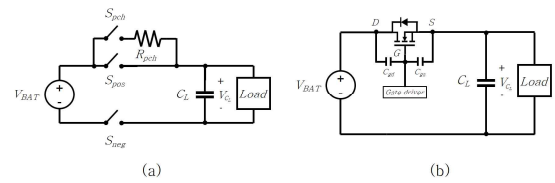


그림 1 정저항, 정전류형 돌입전류 제한기 회로 개념도 (a) 초충회로, (b) 정전류형 돌입전류 제한기

$$\tau = R_{pch} \cdot C_L \quad (2)$$

여기서 $v_c(t)$ 는 부하 커패시터의 전압, V_S 는 입력 전압, τ 는 시정수, R_{pch} 는 초충저항, C_L 은 부하 커패시터이다. 이때 C_L 은 시정수의 5배 이상의 시간이 경과하면, 약 99% 이상 충전된다. 커패시터에 흐르는 돌입전류의 최대값은 아래 식과 같다.

$$I_{C,peak} = \frac{V_S - v_c(0)}{R_{pch}} \quad (3)$$

초충 동작이 완료된 이후 충분한 시간이 경과된 후 양극 스위치(S_{pos})를 도통한 후 초충 스위치(S_{pch})를 차단하여 초충 동작을 완료한다. 초충회로에서 발생하는 순시 피크 전력은 다음과 같다.

$$P_{R_{pch,peak}} = \frac{V_{BAT}^2}{R_{pch}} \quad (4)$$

이러한 원리에 기반한 초충회로는 시스템을 안정적으로 기동할 수 있는 효과적인 방법이다.

2.2 정전류 기반 돌입전류 제한기.

정전류 기반 돌입전류 제한 방식은 MOSFET의 드레인-소스 전압 변화율을 조절하여 부하 커패시터의 전압 상승률을 제한한다. 초기 기동 시 방전된 커패시터로 유입되는 돌입전류는 부하 커패시터의 전압의 변화율에 의해 결정되며, 다음과 같이 표현된다.

$$I_{inrush} = C_L \cdot \frac{dV_{C_L}}{dt} \quad (5)$$

여기서 V_{C_L} 는 부하 커패시터 전압이다. 한편, MOSFET을 턴 온 하기 위한 I_{GATE} 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$I_{GATE} = C_{gs} \cdot \frac{dV_{gs}}{dt} + C_{gd} \cdot \left(\frac{dV_{gs}}{dt} - \frac{dV_{ds}}{dt} \right) \quad (6)$$

게이트 전류 I_{GATE} 는 MOSFET의 기생 커패시터 C_{gd} , C_{gs} 를 충

표 1 실험 및 시뮬레이션에 사용된 회로 상수

R_{pch}	240Ω	R_L	100kΩ
V_{BAT}	Samsung INR18650-29E {Li-ion, 2900mAh, 360V(100S1P)}	C_L	330μF
MOSFET (Current-regu- rated type)	IXTH30N60L2 ($V_{DS} = 600V$, $I_D = 30A$, $R_{DS(on)} = 240mΩ$)	MOSFET (Resistor-type)	IMW65R007M2H ($V_{DS} = 650V$, $I_D =$ 171A, $R_{DS(on)} = 8.7mΩ$)

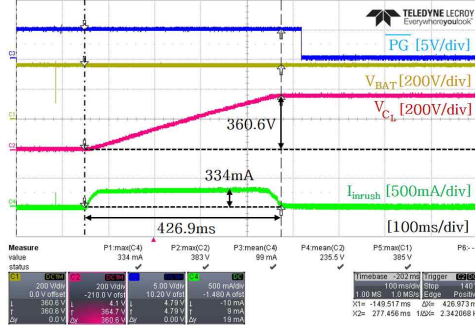


그림 2 LTM9100 모듈의 실험 결과

전하며, MOSFET이 완전히 도통되기 이전 V_{GS} 가 일정하게 유지되는 Miller plateau 구간이 존재한다. 이 구간에서 게이트 전류 I_{GATE} 는 C_{gd} 만을 충전전 하면서 V_{GS} 를 일정하게 유지한다. 즉 이 구간 동안 V_{GS} 의 변동율은 0으로 근사할 수 있으며, 게이트 전류 I_{GATE} 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$I_{GATE} = -C_{gd} \cdot \frac{dV_{ds}}{dt} \quad (7)$$

따라서 V_{DS} 의 변화율은 I_{GATE} 와 기생 커패시터 C_{gd} 에 의해 결정됨을 알 수 있다^[1]. 그림 1-(b)과 같은 회로의 경우 V_{CL} 의 변화율은 V_{DS} 의 변화율과 동일하며,식 (1)과 (7)을 연립하여 V_{CL} 에 유입되는 돌입전류와 충전 시간은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_{inrush} = I_{GATE} \cdot \frac{C_L}{C_{gd}} \quad (8)$$

$$t_{charge} = \frac{C_L \cdot \Delta V_{DS}}{I_{inrush}} \quad (9)$$

이때, t_{charge} 동안 V_{CL} 이 완전히 충전된다면, MOSFET에서 발생하는 순시 피크 전력은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$P_{MOS,peak} = I_{inrush} \cdot V_{BAT} \quad (10)$$

3. 실험 및 시뮬레이션 결과

본 절에서는 저항형과 정전류형 돌입전류 제한기 성능을 동일한 입력 전압 및 부하 조건에서 비교하였다. 정전류형 돌입전류 제한기는 Analog Device사의 LTM9100 평가 모듈을 이용하여 실험 파형을 측정하였으며, 저항형 초충회로는 동일한 부하 커패시터 및 목표 돌입전류 조건을 적용한 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 실험 및 시뮬레이션 회로 상수는 표 1에 제시하였다.

실험에 사용된 전압원은 실제 배터리 셀 Samsung INR18650-29E를 100S1P로 구성하였으며, 부하는 330μF 커패시터와 100kΩ 저항을 병렬로 사용하였다. MOSFET의 경우

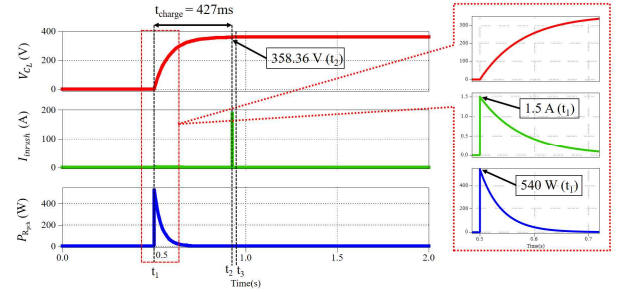


그림 3 초충회로의 시뮬레이션 결과

IXYS사의 IXTH30N60L2가 사용되었다. 정전류형 돌입전류 제한기의 목표 돌입전류는 300mA로 설정되었으며 실험을 진행하였다^[2]. 실험 결과, 최대 돌입전류는 그림 2와 같이 334mA로 측정되었으며, 부하 커패시터의 충전 시간은 426.9ms로 나타났다.

동일한 목표 충전 시간 조건에서, 초충 시간은 시정수 τ 의 5 배 이상으로 고려하기 위해 식 (3)에 따라 초충저항을 240Ω으로 선정하였다. 시뮬레이션에 사용된 초충 스위치 S_{pch} 의 $R_{ds(on)}$ 은 infineon사의 IMW65R007M2H의 데이터시트를 참고하였으며, $R_{ds(on)}$ 은 8.7mΩ으로 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 돌입전류는 1.5A로 정전류형이 저항형 대비 약 77.73% 감소함을 보였다. 추가적으로, 돌입전류 억제 과정에서 총 에너지 손실은 두 방식 모두 부하 커패시터의 충전 에너지에 의해 결정되므로, 본 논문에서는 각 소자에 가해지는 열적 스트레스를 평가하기 위해 식 (4)와 (10)을 바탕으로 순시 피크 전력 손실을 비교하였다. 저항형은 540W, 정전류형은 120.4W로 정저항형 대비 77.69% 감소함을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 고전압 배터리 시스템에 적용 가능한 돌입전류 제한 방식으로 저항형 돌입전류 제한기와 정전류형 돌입전류 제한기의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과, 동일한 부하 조건에서 동일한 충전 시간 동안 정전류형을 적용한 경우 저항형 대비 돌입전류가 77.73% 감소하였으며, 돌입전류 제한 과정 중 순시 피크 전력 손실은 77.69% 감소함을 확인하였다. 이를 통해 정전류 기반 능동형 초충 구조가 고전압 배터리 시스템의 초기 기동 시 동일한 충전 시간동안 돌입전류 제한 및 순시 피크 전력 손실 측면에서 효과적인 대안이 될 수 있음을 검증하였다.

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

참 고 문 헌

- [1] Onsemi, "EliteSiC JFET Based High Voltage Hot-Swap Application," Application Note AND90399/D, Rev. 0, Dec. 2025.
- [2] Analog Devices, "LTM9100: Anyside High Voltage Isolated Switch Controller with I²C Command and Telemetry," Datasheet, Rev. A, 2019.

고전압 배터리 시스템 기동시 돌입전류 억제를 위한 저항형 및 정전류형 초충회로 성능 비교 분석

박진수*, 원원안, 최성진*****

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

*jjuu1205@mail.ulsan.ac.kr, **nnanh1995@mail.ulsan.ac.kr, ***sjchoi@ulsan.ac.kr

1. 요약

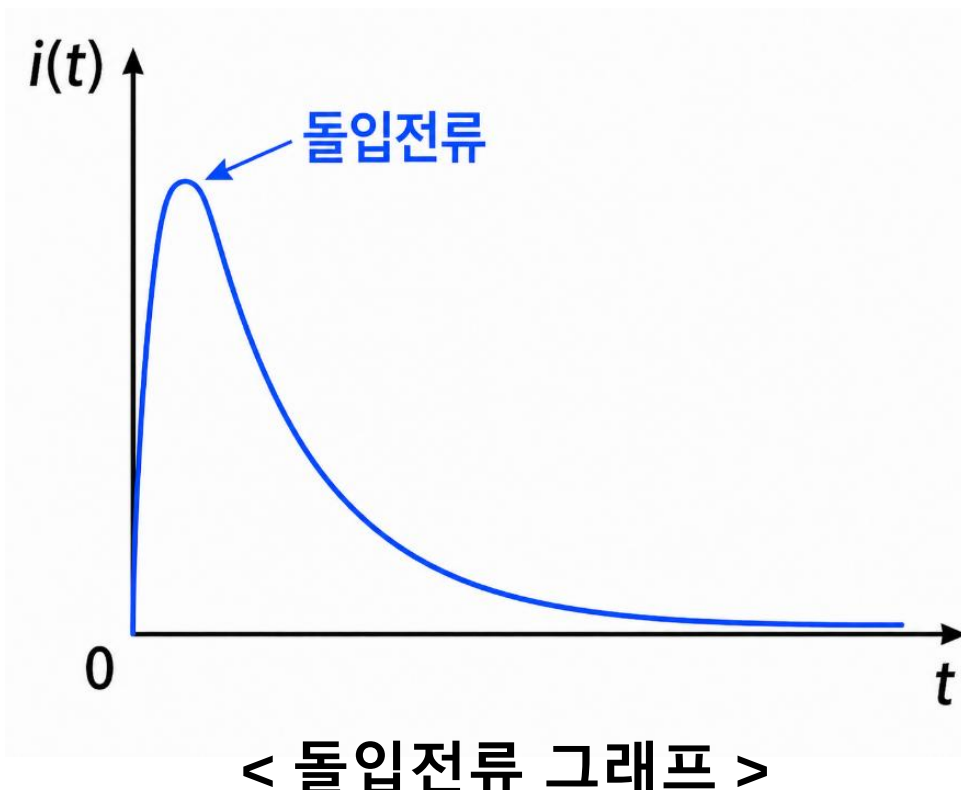
- ❖ 최근 **배터리 에너지저장장치**(Battery Energy Storage System, **BESS**), 전기자동차 충전 시스템 및 고전압 DC 전력변환 시스템의 적용이 확대됨에 따라, 시스템 초기 기동 시 발생하는 입력 캐패시터의 충전을 위한 **돌입전류**를 안정적으로 제한하는 기술의 중요성이 증가하고 있음.
- ❖ 돌입전류 제한기로는 **저항형 초충회로**가 많이 사용되고 있는데, 초충 저항에서 발생하는 **손실**과 **발열**이 있음.

- ❖ 초충 저항을 증가시키면 **충전시간**이 증가하고, 반대로 초충 저항을 감소시키면 **돌입전류**의 크기가 증가하는 **트레이드 오프**가 존재함
- ❖ 본 논문은 고전압 배터리 시스템의 **돌입전류 제한기**의 성능을 비교하며, 실험 및 시뮬레이션을 통해 **100K Ω || 330uF** 부하조건에서 **429ms** 동안 **저항형**과 **정적류형**의 **돌입전류 제한기**의 성능을 분석하였음.

2. 돌입전류 제한기 비교 분석

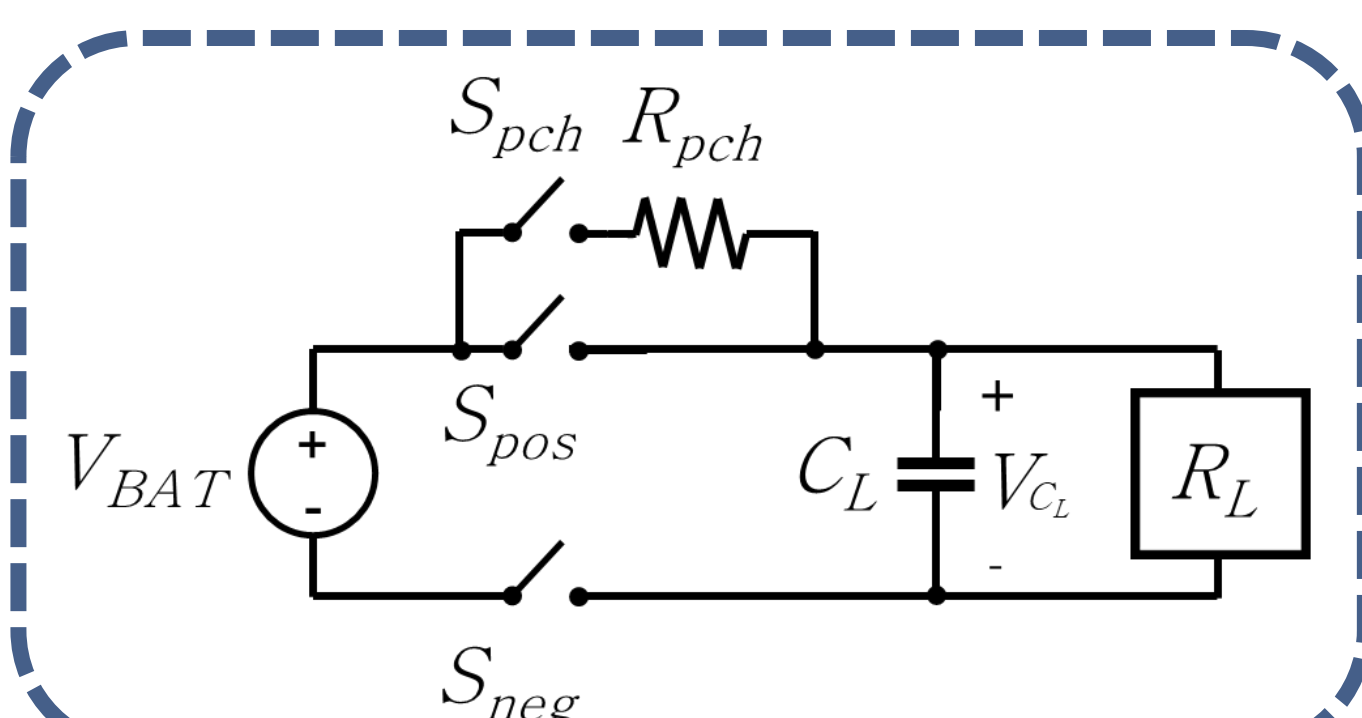
◆ 돌입전류란?

- ❖ 시스템의 전원을 처음 투입할 때 순간적으로 흐르는 **매우 큰 전류**.
- ❖ 시스템의 최대 정격 전류 이상으로 흐른다면 시스템의 소자 등이 **파괴**될 수 있음.



❖ 저항형 돌입전류 제한기

- ❖ **저항**을 통한 열 소산을 바탕으로 시스템에 유입될 수 있는 **돌입전류**를 제한하는 회로임.
- ❖ 이때 부하 측 입력 캐패시터의 **전압, 피크 전류, 순시 피크 전력**은 아래 식으로 정리할 수 있음.

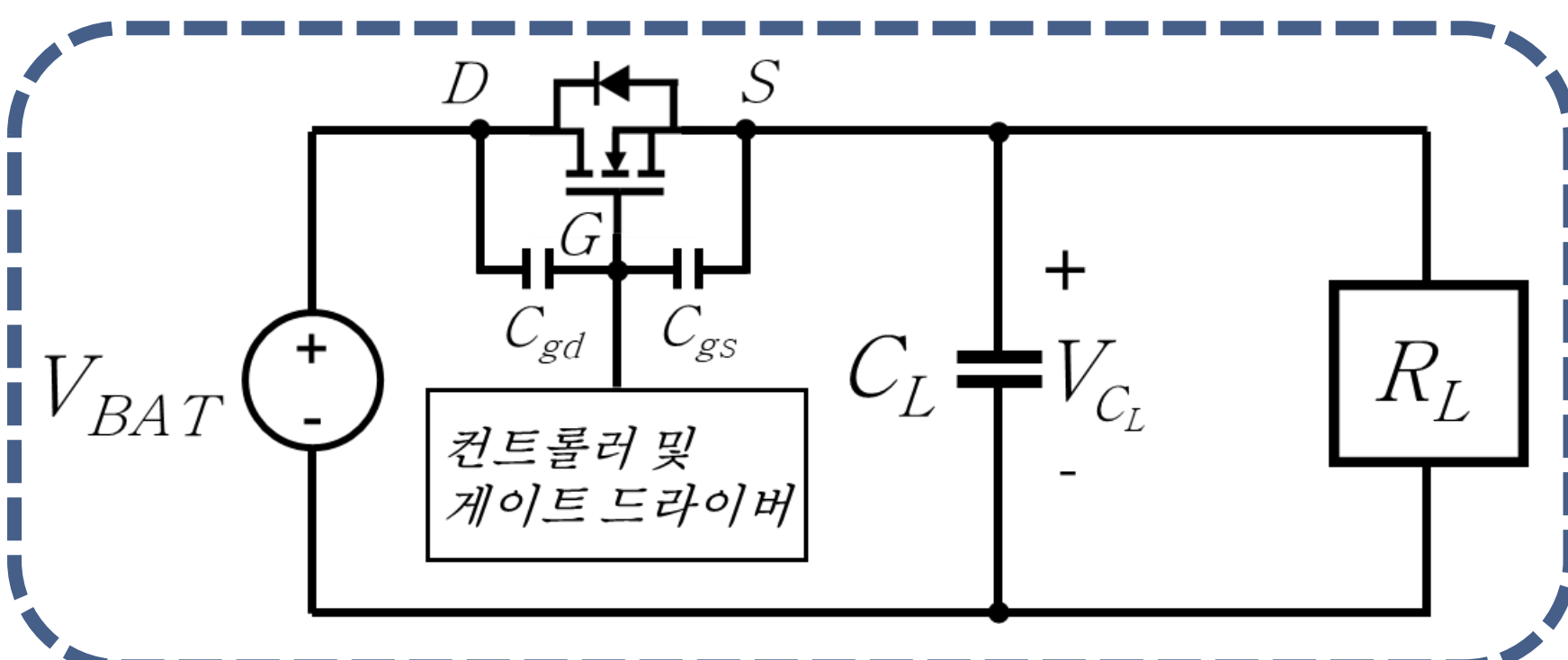


< 저항형 돌입전류 제한기의 개념도 >

$$v_c(t) = V_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad I_{c,peak} = \frac{V_S - v_c(0)}{R_{nch}}, \quad P_{R_{pch,peak}} = \frac{V_{BAT}^2}{R_{nch}}.$$

◆ 정전류형 돌입전류 제한기

- ❖ MOSFET의 드레인-소스 전압 변화율을 조절하여 부하 캐패시터의 전압 상승률을 제한하는 방식임.



< 정전류형형 돌입전류 제한기의 개념도 >

- ❖ **돌입전류**는 부하 캐패시터의 전압 변화율에 의해 결정되며 다음과 같음.

$$I_{inrush} = C_L \frac{dV_{C_L}}{dt}$$

- ❖ 한편, MOSFET을 턴 온하기 위한 게이트 전류 I_{GATE} 는 다음과 같이 표현할 수 있음.

$$I_{GATE} = C_{gs} \frac{dV_{gs}}{dt} + C_{gd} \left(\frac{dV_{gs}}{dt} - \frac{dV_{ds}}{dt} \right)$$

- ❖ MOSFET은 완전히 턴 온되기 이전 입력 기생 캐패시터 C_{gd} 와 C_{gs} 를 충전함.

- $\mathbf{V}_{gs}$ 가 임계전압 $\mathbf{V}_{th}$ 를 넘어난 이후 **MOFSET**이 완전히 턴 온되기 이전 $\mathbf{V}_{gs}$ 가 일정하게 유지되는 **Miller plateau** 구간이 존재하며, 이 구간에서 $\mathbf{I}_{GATE}$ 는 $\mathbf{C}_{gd}$ 만을 충·방전하면서 $\mathbf{V}_{gs}$ 를 일정하게 유지함. 즉 이 구간동안 $\mathbf{V}_{gs}$ 의 변동율은 **0**으로 근사할 수 있으며, $\mathbf{I}_{GATE}$ 는 다음과 같이 표현가능함

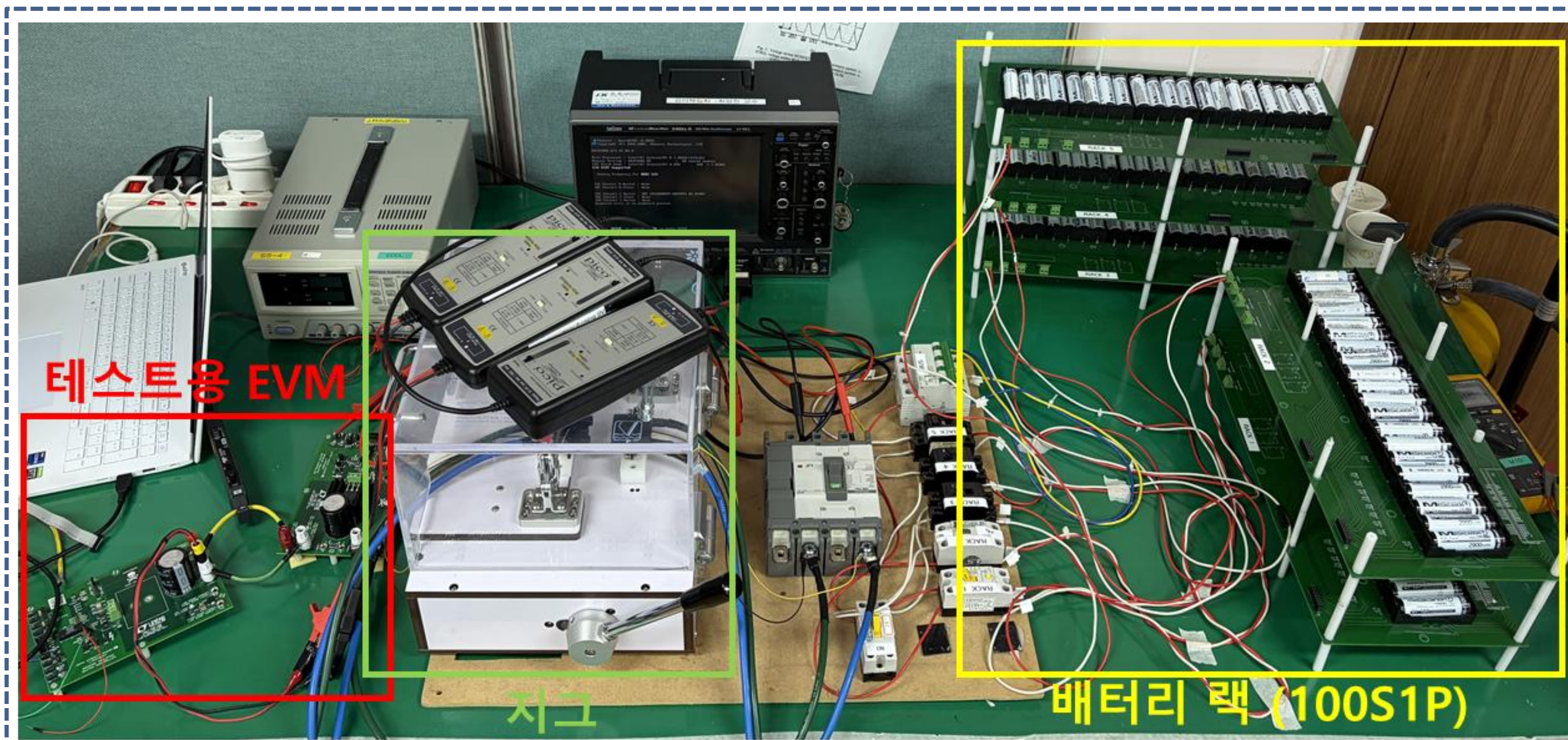
$$I_{GATE} = -C_{gd} \frac{dV_{ds}}{dt}$$

- ❖ 따라서 V_{ds} 의 변화율은 I_{GATE} 와 입력 기생 캐패시터 C_{gd} 에 의해 결정됨을 알 수 있음.

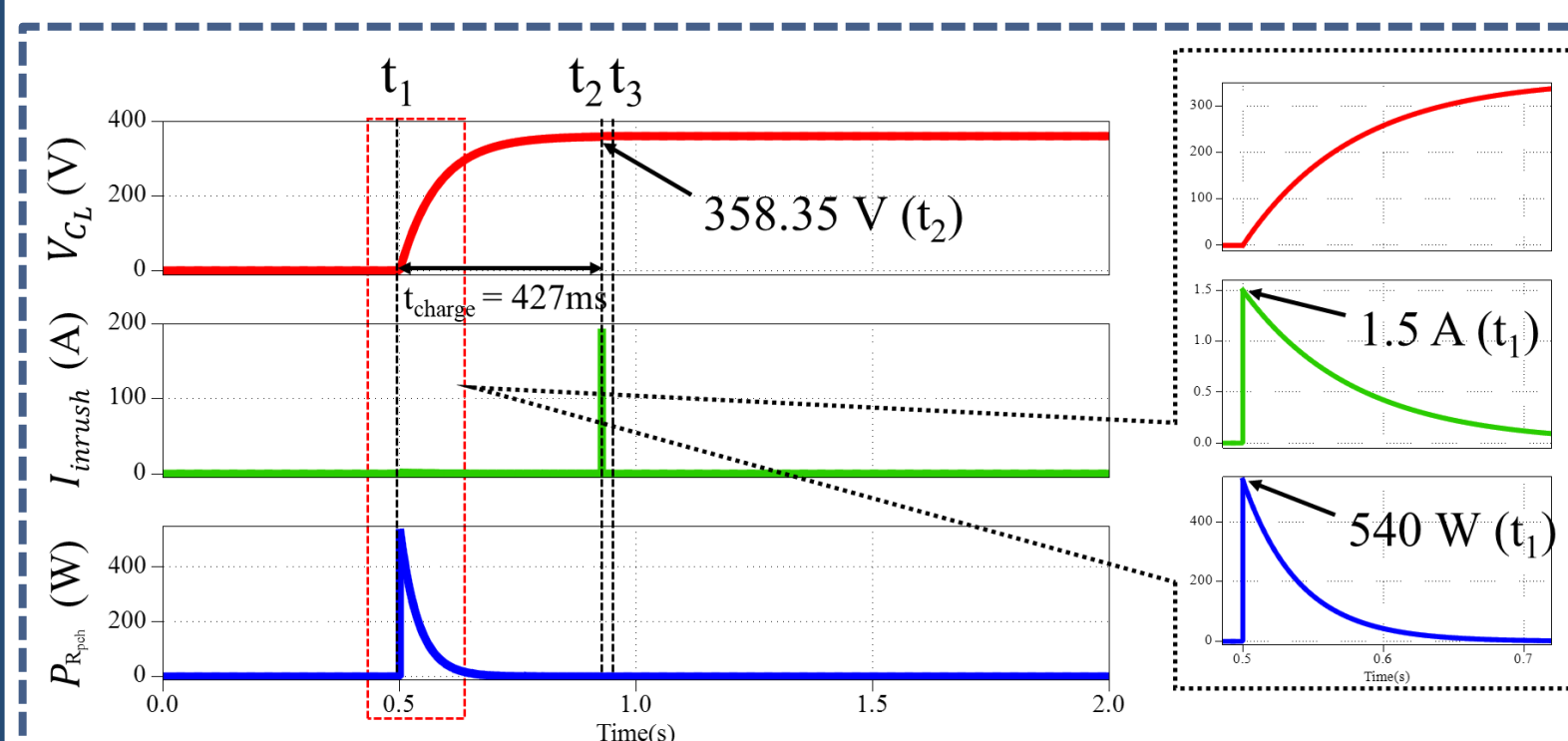
- ❖ 최종적으로 **돌입전류**와 **충전시간**, 그리고 t_{charge} 동안 부하 캐패시터가 완전히 충전될 때, MOSFET에서 발생하는 **순시 피크 전력**은 다음과 같음.

$$I_{inrush} = I_{GATE} \frac{C_L}{C_{gd}}, t_{charge} = \frac{C_L \Delta V_{ds}}{I_{inrush}}, \quad P_{MOS,peak} = I_{inrush} V_{BAT}$$

3. 시뮬레이션 및 실험 검증



< 실험 구성 >



<저항형 돌입전류 제한기 시뮬레이션 결과>

❖ 시뮬레이션 및 실험 결과

- ❖ 정전류형 돌입전류 제한기의 경우 Analog Device사의LTM9100 컨트롤러를 사용하였음.

- ❖ 시뮬레이션 및 실험 결과 100KΩ || 330μF
부하 조건에서 429ms 동안 초충을
진행하였을 때 **정전류형이 저항형 대비**
돌입전류가 약 77.73% 감소함을 확인할 수
있었음.

- ❖ 추가로, **돌입전류** 억제 과정에서 총 에너지 손실은 두 방식 모두 부하 커패시터의 충전 에너지에 의해 결점됨.

- ❖ 따라서 각 소자에 가해지는 열적 스트레스를 평가를 위한 순시 피크 전력 손실은 저항형이 540W, 정전류형이 120.4W로 정저항형 대비 77.69% 감소함을 확인하였음.

4. 결론

- ❖ 본 논문에서는 고전압 배터리 시스템에 적용 가능한 **돌입전류** 제한 방식으로 **저항형 돌입전류 제한기**와 **정전류형 돌입전류 제한기**의 성능을 비교하였음.
- ❖ 동일한 부하 및 충전 시간 조건에서 정전류형 돌입전류 제한기는 저항형 대비 최대 **돌입전류가 77.73%** 감소하였으며, 돌입전류 제한 과정 중 **순시 피크 전력 손실은 77.69%** 감소함을 확인함.
- ❖ 이를 통해 **정전류 기반 능동형 돌입전류 제한기** 구조가 고전압 배터리 시스템의 초기 기동 시 **돌입전류** 제한 및 **순시 피크 전력 손실 측면**에서 효과적인 대안이 될 수 있음을 검증함.

