

셀 밸런싱이 포함된 직렬 모듈 DC-DC 컨버터의 제어를 위한 PI 제어 방안에 대한 연구

백인수*, 김종훈*
충남대학교 에너지저장변환연구실*

A Study on PI Control Method for Control of Serial Module DC-DC Converter with Cell Balancing

Insu Baek*, Jonghoon Kim*
Energy Storage Conversion Lab., Cnugnam National University*

ABSTRACT

다양한 사양을 갖는 어플리케이션에 적용하기 위해 직렬-병렬 조합으로 구성된 배터리 팩은 제조공차와 같은 이유로 인해 운용 시간이 증가할수록 내부 셀간의 특성에 불균형이 생긴다. 이러한 불균형은 배터리 시스템 성능에 악영향을 기칠 수 있기 때문에 셀 밸런싱 기술을 적용하여 배터리 팩 내 불균형을 제거한다. 이러한 셀 밸런싱 기술은 적용하는 회로, 제어 방법에 따라 그 성능이 결정된다. 본 논문에서는 셀 밸런싱과 전력 변환 기능을 포함하는 토폴로지인 모듈 dc-dc 컨버터의 제어 방안을 소개한다. 다양한 셀을 제어해야하기 때문에 간단한 구조인 Anti-windup이 포함된 PI제어기를 활용하고, PSIM을 통해 제안하는 제어기의 성능을 검증한다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 긴 수명으로 인해 에너지저장시스템과 전기차 시장 등 다양한 어플리케이션에서 채택하고 있다. 이러한 리튬이온 배터리는 응용 분야의 요구사항에 맞게 2개 이상의 셀을 직·병렬로 구성하여 배터리 모듈 또는 배터리 팩의 형태로 제작해 사용한다. 제작된 배터리 팩을 실제로 운용하게 되면 제조 공차, 환경 조건 등에 의해 배터리 셀 간 내부 특성이 달라져 전압, 용량, 온도 불균형의 문제가 발생하게 된다^[1]. 배터리의 노화가 진행될수록 셀 간 편차는 증가하고, 배터리 팩의 성능은 더욱 감소한다. 따라서 셀 간 편차를 최소화하기 위해 배터리 팩의 배터리 관리 시스템에는 셀 밸런싱 기술이 필수적으로 요구된다. 셀 밸런싱 기술중 여러개의 직렬 모듈로 구성된 dc-dc 컨버터를 활용한 회로는 셀 밸런싱을 수행하면서 전력변환 역할까지 가능하기 때문에 여러 연구가 진행되고 있다. 이러한 형태의 직렬 모듈 dc-dc 컨버터 회로는 직렬 수가 증가함에 따라 제어해야하는 스위치의 개수가 증가하기 때문에 간단한 제어기를 통해 셀 밸런싱을 수행할 필요가 있다.

본 논문은 해당하는 셀 밸런싱 모듈을 효과적으로 제어하기 위해 Anti-windup이 포함된 PI제어기를 통해 셀 밸런싱을 수행하는 제어 방법을 제안한다. 본 논문은 2장에서 PI제어를 위한 기본 이론들을 설명하고, 3장에서 PSIM을 통해 구현된 PI제어기를 통해 셀 밸런싱 회로의 제어기 회로 동작을 시뮬레이션하여 해당 제어기의 제어 성능을 검증한다.

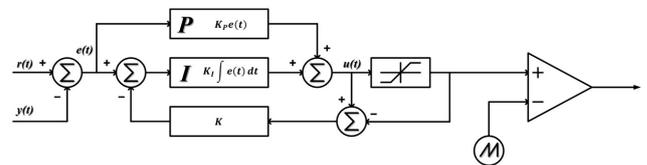


그림 1 Anti-windup이 포함된 PI 제어기
Fig. 1 PI controller with anti-windup

2. PI 제어

dc-dc 컨버터의 스위치는 Power width modulation (PWM) 제어를 통해 출력 전압을 제어한다. PWM 제어는 일정한 주기에서 출력이 요구하는 만큼 스위치의 On/Off 시간 비율을 나타내는 Duty (D)를 제어하는 방식이다. 본 논문에서 활용하는 셀 밸런싱 회로에서는 여러 직렬 조합인 dc-dc 컨버터로 구성되기 때문에 각 컨버터마다 하나의 제어기가 연결되어 전체 전압을 제어해야 한다. 본 논문에서는 여러개의 dc-dc 컨버터가 활용되는 만큼 수많은 스위치를 제어하기 위해 간단한 구조를 갖는 PI 제어기를 활용한다.

PI 제어기는 각 컨버터의 출력 전압을 제어하기 위해 Proportioner (P), Integrator (I)로 구성된다. PI제어기는 간단한 구성으로 원하는 출력 전압까지 빠르게 도달할 수 있도록 제어를 수행하는 제어기이다. PI 제어기는 셀 밸런싱을 위한 dc-dc 컨버터 모듈의 출력 전압을 입력으로 받아 목표값인 Reference (Ref) 전압과의 오차를 연산한다. 이 오차는 각각 P, I 블록에 입력되어 제어 신호를 출력하게 되고, 출력된 신호는 톱니파 형태의 반송파에 의해 PWM 제어 신호를 dc-dc 컨버터 내부 스위치에 전달하여 컨버터를 제어한다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_1^t e(\tau) d\tau \tag{1}$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \tag{2}$$

식 (1)에서 u(t)는 시스템을 제어하기 위한 시스템의 입력을 의미한다. 시스템 입력은 dc-dc 컨버터의 출력 전압과 Ref 전압의 오차를 통해 제어를 수행하는데, 이는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. r(t)는 전압 제어를 위한 Ref 전압을

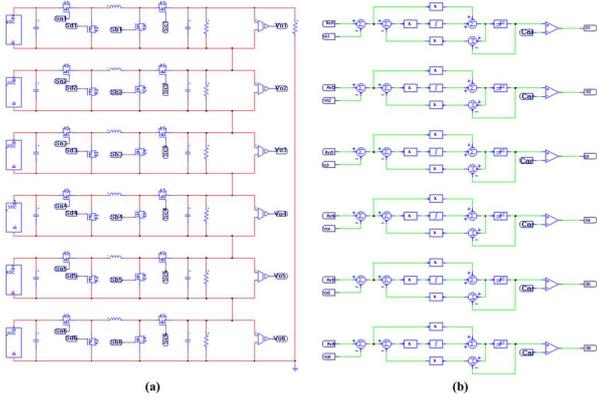


그림 2 PSIM으로 구현된 다중 직렬 벡 부스트 컨버터 구성
(a) 컨버터 회로, (b) 제어기 회로
Fig. 2 Multi-series dc-dc converter configuration implemented with PSIM
(a) converter circuit, (b) controller circuit

의미하며, $y(t)$ 는 여기서의 시스템 즉, 하나의 dc-dc 컨버터 출력 전압을 의미한다. PI 제어기는 Ref 전압을 기준으로 $e(t)$ 를 계산하고, 이에 따라 PI제어를 수행하기 때문에 Ref 전압을 변화시켜 dc-dc 컨버터의 출력 전압을 원하는 값으로 출력할 수 있다.

PI 제어기는 오차를 기반으로 출력 전압을 제어하게 되는데, I 제어기의 경우 오차를 과하게 적산하여 Saturation이 발생하고, 이에 경우 시스템의 성능을 제한할 뿐만 아니라 시스템 자체가 불안정해져 고장 상황이 발생할 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위해 제안하는 회로의 제어기는 그림 1과 같이 기존 PI 제어기에 Anti-windup이 추가된 형태로 구성된다.

3. PSIM 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 PSIM 환경에서 각각 제어기와 dc-dc 컨버터를 구성하여 시뮬레이션을 수행한다. 해당 dc-dc 컨버터는 비반전 벡 부스트 컨버터를 활용한다. 그림 2는 PSIM에서 구현된 dc-dc 컨버터 모듈의 시뮬레이션 회로이다. 그림 2 (a)는 셀 밸런싱 수행을 하는 dc-dc 컨버터 모듈의 회로이고, 그림 2 (b)는 dc-dc 컨버터 모듈의 출력 전압을 제어하기 위한 PI 제어기이다. 제안된 회로의 출력 전압 파형은 그림 3과 같다. 설계된 회로는 Buck-boost mode와 boost mode 두 가지 동작에 대해 안정화되어야 하며, 내부 PI제어기와 컨버터의 인덕터 값을 통해 안정화된 dc-dc 컨버터 모듈을 구현하였다.

그림 3은 dc-dc 컨버터 모듈이 Buck-boost mode에서 boost mode로 전환되는 과정을 나타낸 파형으로, 0.2sec가 되는 지점에서 밸런싱 동작 전환을 수행한다. 초기 Buck-boost mode의 D 로 제어되던 파형은 boost mode의 게인 값을 나타내다가 다시 Ref 전압으로 보정되는 것을 확인할 수 있다. 표 1은 시뮬레이션 결과를 나타내며, 실제 정상 상태 오차의 경우 Buck-boost mode에서 최대 3.543%, Boost mode 에서는 2.684%의 오차율을 나타냈다. 두 가지 동작 모드에 대해 dc-dc 컨버터 모듈이 안정화된 동작을 보이는 것을 확인하였다.

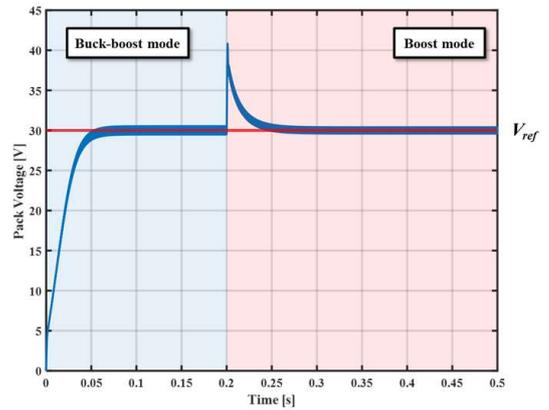


그림 3 PSIM으로 구현된 직렬 모듈 dc-dc 컨버터의 출력 전압 파형
Fig. 3 Output voltage plot of serial module dc-dc converter implemented with PSIM

표 1 제안하는 dc-dc 컨버터에 대한 PSIM 시뮬레이션 결과
Table 1 PSIM simulation results for the proposed dc-dc converter

항목	Buck-boost mode	Boost mode
V _{pack} max [V]	30.538	30.402
V _{pack} min [V]	29.475	29.598
ΔV_{pack} [V]	1.063	0.804
Error [%]	3.543	2.680

4. 결론

본 논문에서는 셀 밸런싱과 전력변환을 역할을 수행하는 직렬 연결 모듈의 dc-dc 컨버터를 제어하기 위한 PI 제어기 설계하였다. 해당 제어기는 모듈 내에 각각 컨버터를 제어하기 위해 1:1로 회로를 구성해야한다. 때문에 간단한 제어 구조를 갖는 PI 제어기를 구현하였고, I 제어의 오류 적산을 대비하기 위해 anti-windup 구조를 추가로 구성하여 해당하는 dc-dc 컨버터 토폴로지에 적용하였다. 해당 방안은 PSIM을 통해 구현되어, dc-dc 컨버터의 역할을 수행할 수 있는지 성능을 검증하였다. 해당하는 dc-dc 컨버터는 다양한 모드로 사용할 수 있는데, 본 논문에서는 벡 부스트 모드에서 부스트 모드로 전환하는 로직을 통해 설계된 PI 제어기의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] B. Wang, "Implementation of an estimator-based adaptive sliding mode control strategy for a boost converter based battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles.", Energy Conversion and management, Vol. 151, pp. 562-572, 2017, November