다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 시스템의 제어기 설계 및 동특성 해석

강영봉, 김동명, 최병조
경북대학교

Control Design and Dynamics Analysis of Multi-Module Multi-Phase Bidirectional Battery Charger/Discharger

Youngbong Kang, Dongmyung Kim, Byungcho Choi
Kyungpook National University

Abstract - 본 논문에서는 다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로의 소신호 특성을 해석하여, 적절한 제어기 및 보상기 회로설계를 제안한다. 제안된 회로를 바탕으로 폐루프 응답 특성을 시뮬레이션과 측정을 하여 분석하고 검증한다. 최종적으로 설계된 제어기를 적용하여 양방향 배터리 충방전 회로를 동작 시켜봄으로써 안정성과 부하변동에 따른 응답 특성을 관측해 본다.

1. 서 론

다모듈 다위상 양방향 충방전 회로는 단일 전원단으로 충방전 기능을 구현할 수 있는 매우 유용한 토폴로지이다. 다모듈 다위상 토폴로지를 적용함으로써 각 모듈에 흐르는 전류의 크기가 줄어들고, 스위치의 전류 스트레스와 인덕터의 크기를 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한 인덕터 전류의 위상을 지연시켜줌으로써 충방전 되는 배터리 전류의 리플을 매우 작게 만들어주어 배터리 수명을 연장시켜준다. 하지만 제어기 회로설계가 제대로 이루어 지지 않으면, 부하 변동에 따라 시스템이 불안정해지고, 응답 특성이 매우 나빠진다. 본 논문에서는 전원단의 소신호 해석을 통하여 동특성을 파악하고, 이를 바탕으로 적절한 제어기 회로 설계를 제시한다. 제시한 제어기 회로를 적용하여 시스템의 입출력 동작조건에 따른 안정성을 확인한다. 또한, 폐루프 응답특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증함으로써, 다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로의 안정성뿐만 아니라 빠른 응답 특성을 확인할 수 있다.

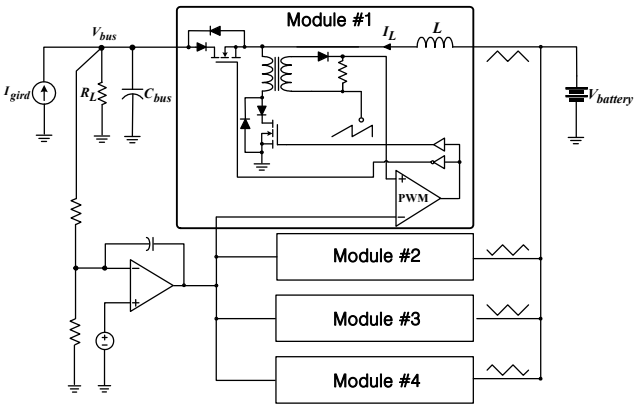
2. 다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로

2.1 회로 구성

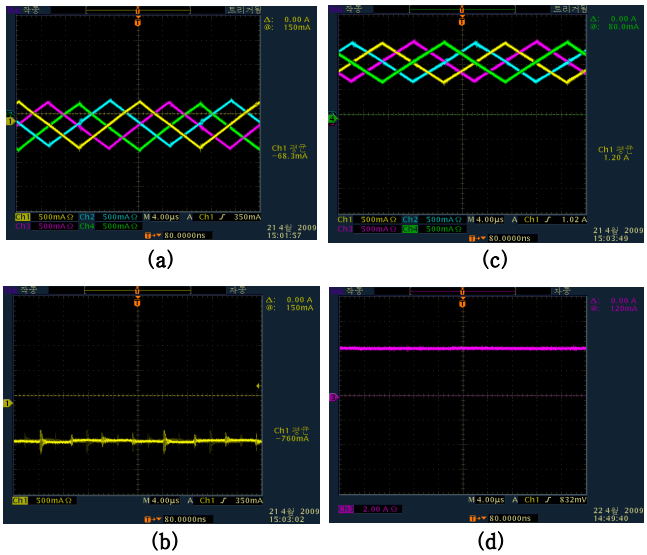
그림 1은 다모듈 다위상 양방향 충방전 회로의 구성을 나타내고 있다. 회로는 크게 전원단 회로와 제어기 회로로 구분할 수 있다. 전원단 회로는 4개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈에는 2개의 MOSFET 스위치와 1개의 인덕터로 구성되어 있다. 제어기 회로는 PWM IC칩이 아닌 Discrete 회로로 제작하였으며, 전류제어방식을 채택하여 시스템을 구동하였다.

2.2 제어기 회로 설계

그림 1의 양방향 배터리 충방전 회로의 출력 전압 V_{bus} 를 항상 일정한 전압으로 유지시키기 위해 전류제어방식으로 제어기 회로를 설계하였다. 전류제어방식을 적용할 경우 스위치에서 감지된 전류신호가 발진하여 시스템이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 외부램프신호를 걸어주어 시스템의 안정도를 높여주었다. 각 모듈에서 감지된 전류신호가 하나의 보상기 회로에서 발생하는 제어 전압과 비교되어 PWM 신호를 만들기 때문에 각 모듈 간 일정한 전류분배가 가능해지는 이점이 있다. 그림 2는 정상 상태 동작에서의 충방전되는 인덕터 전류와 배터리 전류의 파형을 측정한 것이다. 전류제어방식을 적용시켜 줌으로써 각모듈간 흐르는 인덕터 전류의 크기는 일정함을 확인할 수 있으며, 모듈간 인덕터 전류의 리플이 서로 상쇄되어 배터리 전류의 리플이 0에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 제어 대 출력 전달 특성 곡선을 나타낸 그림이다. 시뮬레이션과 측정한 파형이 매우 흡사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전원단의 극점(w_p)이 500 Hz에서 발생하고, 전원단의 출력 커패시터에 의한 영점(w_{esr})이 6.2 kHz에서 발생한다. 또한 S-평면에서 우반면에 위치한 영점(w_{rhp})이 16.8 kHz에서 발생한다. w_{rhp}는 이득은 증가하지만 위상은 감소하는 불안정한 특성을 가지고 있으므로 적절한 보상기 설계가 필요하다. 전류제어방식을 적용함으로써 샘플링 영향에 의해 $f_s/2$ 지점인 25 kHz에 극점(w_n)이 발생한다.



〈그림 1〉 다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로 구성

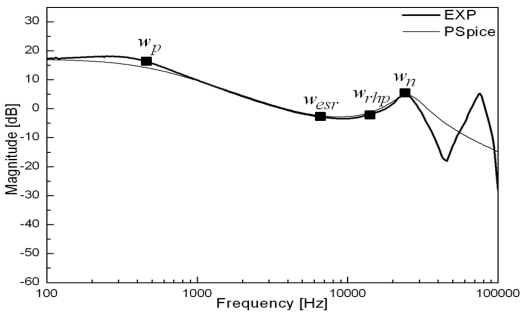


〈그림 2〉 정상상태 동작에서의 인덕터 전류와 배터리 전류 파형
(a): 충전모드 동작시 인덕터 전류 (b): 충전모드 동작시 배터리 전류
(c): 방전모드 동작시 인덕터 전류 (d): 방전모드 동작시 배터리 전류

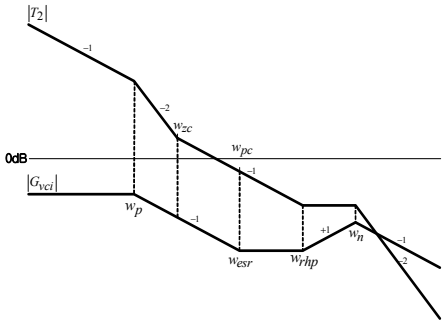
2.3 보상기 설계

제어 대 출력 전달 특성을 보상하기 위해 Two-pole One-zero 보상기 회로를 이용한다.

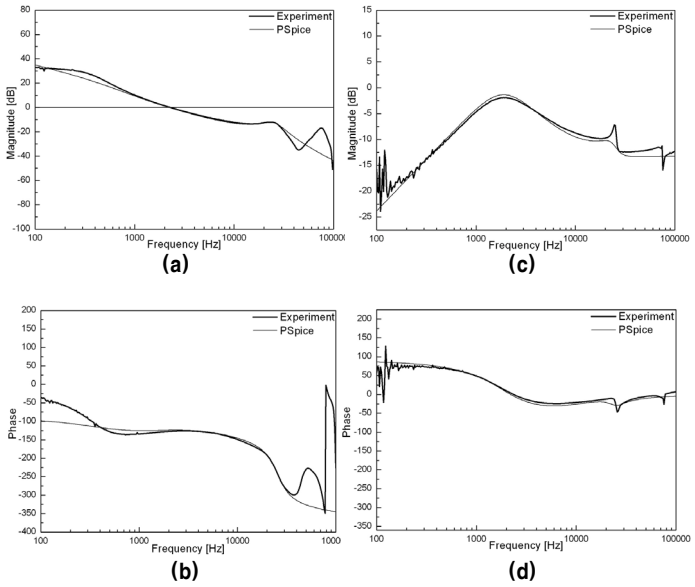
$$F_v(s) = \frac{Kv(1+s/w_{zc})}{s(1+s/w_{pc})}$$



〈그림 3〉 제어 대 출력 전달 특성 곡선



〈그림 4〉 보상기 설계 및 루프 이득



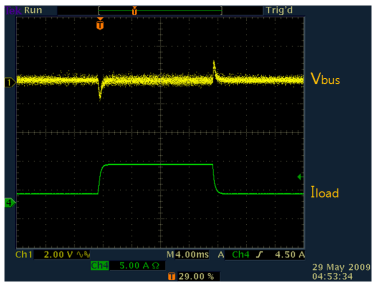
〈그림 5〉 루프 이득 및 출력 임피던스 특성 곡선
(a): 루프 이득 (b): 루프 이득 위상
(c): 출력 임피던스 이득 (d): 출력 임피던스 위상

그림 4는 제어 대 출력 전달 함수($|G_{vci}|$)와 루프 이득($|T_2|$)을 비교하여 보상기를 설계하는 것을 나타낸다. 보상기의 영점(w_{zc})은 $0.8\times w_o$ 가 되는 지점에 위치시키고, 보상기의 극점(w_{pc})은 w_{esr}에 위치시켜준다. w_o는 전원단 회로의 인덕턴스와 커패시턴스에 의해 공진이 발생하는 지점이다. 마지막으로 적분기 이득(K_v)은 5000 $[r/s]$로 선정하였다.

$$w_{zc} = 8.6\times10^3\,[r/s] \qquad w_{pc} = 3.9\times10^4\,[r/s]$$

2.4 루프 이득 및 출력 임피던스

앞에서 설계된 보상기 회로를 바탕으로 루프 이득과 출력 임피던스를 측정하였다. 그림 5는 루프이득과 출력 임피던스 특성 곡선을 시뮬레이션을 비교한 그림이다. 그림 5(a)에서 이득 여유(Gain margin)가 12 dB



〈그림 6〉 계단 부하 응답 특성 파형

〈표 1〉 다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로의 동작 조건

$V_{battery}$	21 - 24 V	V_{bus}	35 V
L	135 uH	C_{bus}	100 uF
R_L	5 - 25 Ω	스위칭 주파수(f_s)	50 kHz
I_{grid}	0 - 5 A		

이고, 그림 5 (b)에서는 위상 여유(Phase margin)가 53°이므로 시스템이 안정적임을 확인할 수 있다. 그리고 그림 5 (c)에서 출력 임피던스의 피크 값은 -2 dB 임을 확인할 수 있다.

2.4 계단 부하 응답 특성

그림 6은 부하 변동 응답 특성을 측정한 파형이다. 부하 전류가 최대 값인 7 A 에서 최소값인 2 A 로 떨어지게 되면 출력 전압의 피크 값이 1 V 정도 증가하는 것을 확인할 수 있으며, V_{bus}의 전압이 일정한 전압으로 돌아오는 시간은 800 μs 로 빠른 응답 속도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

다모듈 다위상 양방향 배터리 충방전 회로에 전류제어방식을 적용하여 각 모듈에 일정한 크기의 인덕터 전류가 흐르고, 배터리 전류의 리플이 줄어드는 것을 확인하였다. 회로의 안정성을 높이기 위해 제어 대 출력 전달 특성을 바탕으로 보상기 회로를 설계하여 충분한 이득 여유와 위상이득을 가지는 것을 실험과 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 또한, 잘 설계된 보상기 회로를 통해 안정성과 빠른 응답 특성을 검증하였다.

감사의 글 : 본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지·자원인력양성사업의 연구 결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] B. Choi, B.H. Cho, R.B. Ridley, and F.C. Lee, "Control Strategy for Multi-Module Parallel Converter System", IEEE, pp225-234, 1990
[2] R.B. Ridley, "A New, Continuous-Time Model for Current-Mode Control" IEEE, VOL.6, NO.2, pp271-280, April 1991
[3] Wei Tang, F.C. Lee, and R.B. Ridley, "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control", IEEE, VOL.8, NO.2, pp112-119, April 1993
[4] D.M. Sable and R.B. Ridley, "A High Frequency, Multi-Module, Spacecraft Boost Regulator", IEEE, pp227-235, 1988
[5] Wei Tang, F.C. Lee, R.B. Ridley, and Issac Cohen "Charge Control: Modeling, Analysis, and Design", IEEE, VOL. 8, NO. 4, pp.396-403, October 1993
[6] R.B. Ridley, "Small-Signal Analysis of Parallel Power Converter", MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, March, 1986
[7] D.M. Sable, "Optimization of Spacecraft Battery Charger/ Discharger System , DP Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, December, 1991
[8] Byungcho Choi "Fundamental of Switch mode DC-to-DC Power Conversions", Young Publishing co., 2008