

양방향 배터리 충/방전 컨버터의 디지털 제어기 설계 및 구현

이영진, 한동화, 최중묵, 조영훈, 최규하
 건국대학교

Digital Controller Design and Implementation of a Bidirectional Battery Charging/Discharging Converter

Young Jin Lee, Dong Hwa Han, Jung muk Choi, Young hoon Cho, Gyu Ha Choe
 Konkuk University

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 충/방전을 위한 3상 인터리브드 양방향 DC DC 컨버터의 디지털 전류제어기를 설계 및 구현한다. 기존의 아날로그 제어기와 달리 디지털 PWM 지연과 제어기 연산시간 지연에 대한 현상을 고려한 디지털 전류제어기를 설계하고 배터리 충방전 시스템에 적용하여 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 정전방지 대책으로 침두부하시에 피크전력을 저감하고 정전시에는 UPS기능을 하는 ESS(Energy Storage System)의 필요성이 증대되고 있다. 그림 1과 같이 구성된 ESS에서 배터리와 연계되는 충/방전 시스템으로 충/방전 전류의 리플을 줄이기 위해 3상 인터리브드 DC DC 컨버터가 많이 이용되고 있다. 시스템의 동작은 배터리를 방전할 경우에는 부스트 컨버터로 동작을 하며 충전할 경우에는 벅 컨버터로 동작을 한다. 이러한 동작은 시스템의 전류제어를 통해 이루어지기 때문에 동특성과 안정성을 고려한 정확한 전류 제어기 설계가 필요하다.

현재 충/방전시스템의 제어기로 구현이 용이한 PI 제어기가 많이 사용되고 있다. 하지만 제어기의 이득 설정시 튜닝과정의 번거로움이 발생한다. 또한 디지털 컨트롤러를 사용할 경우 기존의 아날로그 제어기 설계와 달리 디지털 PWM 지연과 제어기 연산시간 지연에 대한 현상을 고려해야만 정확한 제어기 설계가 이루어진다.^[1]

본 연구에서는 양방향 3상 인터리브드 DC DC 컨버터의 디지털 모델링을 통한 Type 3 전류 제어기를 설계하고 이를 마이크로 컨트롤러를 이용하여 검증한다.

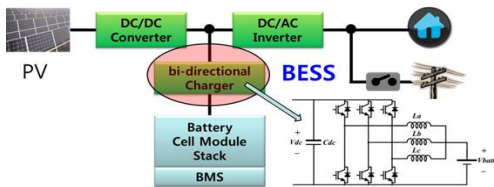


Fig.1 Battery charging/discharging converter

2. 양방향 DC-DC 컨버터의 모델링

그림 2는 본 논문에서 다루는 양방향 3상 인터리브드 DC DC 컨버터의 모델링을 위한 등가 회로도를 나타낸다. 3상 인터리

브드 컨버터의 경우 3개의 인덕터가 동일하게 설계되었을 경우 각상의 전류가 동일하게 흐르게 된다. 그러므로 등가 회로를 그림 2와 같이 한 개의 상으로 구할 수 있으며 이때의 인덕턴스는 식(1)과 같이 주어진다.^[1]

$$L_{eq} = \frac{1}{n} L_p \quad (1)$$

시스템의 제어기 설계는 벅 컨버터 동작을 기준으로 설계를 하며, 전류제어를 위해 Duty에 대한 인덕터 전류(i_L)의 전달함수 $G_{id}(s)$ 를 동작점에서의 perturbation을 통해 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$G_{id}(s) = \frac{\tilde{i}_L}{\tilde{d}} = \frac{V_{dc} C_{batt} s}{L_{eq} C_{batt} s^2 + R_b C_{batt} s + 1} \quad (2)$$

식(2)에서 구한 전달함수는 아날로그 전달함수를 나타내므로 디지털 등가화 과정이 필요하다. 디지털 PWM 지연을 포함한 전달함수를 구하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$G_{im}(s) = e^{s*0.5*T_s} \times G_{id}(s) \quad (3)$$

샘플링 효과 및 연산시간지연을 고려한 디지털 등가화 식을 구하면 식(4) 그리고 (5)와 같이 z 도메인에서 디지털 전달함수를 구할 수 있다.

$$G_{idz}(z) = z^{-1} \times Z[G_{im}(s)] \quad (4)$$

$$G_{idz}(z) = \frac{53.96z - 53.96}{z^3 + 1.999z^2 + 0.9987z} \quad (5)$$

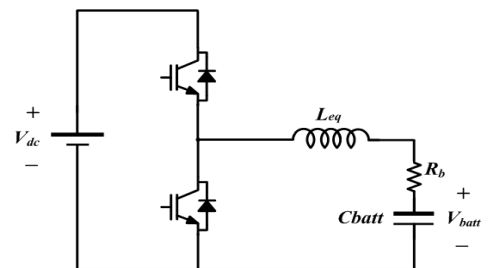


Fig. 2 Equivalent circuit of the 3 phase interleaved converter

3. 디지털 전류제어기 설계

식(5)에서 구한 디지털 등가 전달함수의 개루프 이득을 Bode 선도로 나타내면 그림3의 $G_{id}(z)$ 그래프와 같다. 시스템의 개루프 이득은 1[kHz]에서 38.8[dB]의 이득과 143.8°의 위상을 갖는다. 디지털 전류제어기의 대역폭은 일반적으로 스위칭 주파수의 1/10~1/15를 사용하며, 위상여유는 최소 45° 이상이 되게 설계를 해야 하므로, 본 연구에서는 1[kHz] ($f_{sw}=10$ [kHz])의 대역폭과 70°의 위상여유를 갖는 제어기를 설계한다. 제어기 설계는 기존의 K factor 디자인의 Type 3 제어기를 이용하며,^[2] 디지털 변환과 주파수 프리위핑을 고려하여 다음 식(6)과 같은 전류제어식을 구성할 수 있으며, 이를 바탕으로 디지털 전류제어기를 식(7)과 같이 구성할 수 있다.

$$G_c(z) = \omega_{c_{pw}} \frac{G_b T_s(z+1)}{K 2(z-1)} \left(\frac{1 + \frac{2(z-1)}{\sqrt{K} \omega_{c_{pw}} T_s(z+1)}}{1 + \frac{2(z-1)}{\sqrt{K} \omega_{c_{pw}} T_s(z+1)}} \right)^2 \quad (6)$$

여기서, $\omega_{c_{pw}}$ 는 주파수 프리위핑을 고려한 차단주파수, G_b 는 필요한 이득, K 는 K factor를 나타낸다.^[2]

$$G_c(z) = \frac{0.013z^3 - 0.009z^2 - 0.012z + 0.009}{z^3 + 0.74z^2 + 0.24z - 0.017} \quad (7)$$

식(7)에서 구한 디지털 전류제어기의 보드선도는 그림 3의 $G_c(z)$ 와 같으며, 디지털 전류제어기를 포함하는 최종 시스템의 Duty에 대한 인덕터 전류의 루프이득이 1[kHz]의 대역폭과 70°의 위상여유를 갖는 것을 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

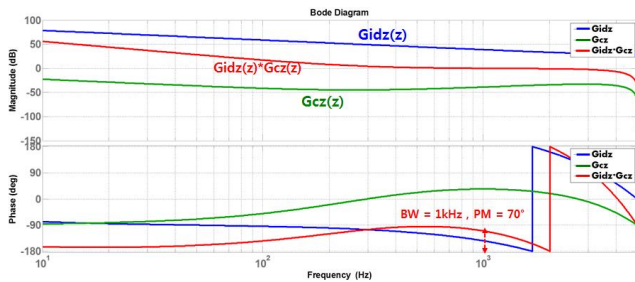


Fig. 3 Loop gain of the system with digital current compensator

Table 1 Specification of the system

Battery voltage (V_{batt})	168[V]
DC link voltage (V_{dc})	360[V]
DC link capacitance (C_{dc})	3300[μF]
Inductance (L_{eq})	0.66[mH]
Battery capacitance (C_{batt})	1500[F]
Battery ESR (R_b)	0.004[Ω]
Switching frequency (f_{sw})	10[kHz]

4. 실험결과

표 1은 양방향 배터리 충방전 시스템의 전기적 사양을 나타내며, TI사의 TMS320F28335를 이용하여 앞서 설계한 디지털 전류 제어기를 구현하였다. 그림 4와 5는 충전전류의 지령치가 5[A]에서 25[A], 25[A]에서 5[A]로 변환 경우 충/방전전류의 동특성을 나타낸다. 그림 4는 시스템이 충전동작을 할 때 제어기의 BW(Band Width)에 따른 동특성을 나타낸다. 시스템은 BW가 1000[Hz]의 경우 700[Hz]보다 응답속도가 빠르며, 두 경우 모두 안정되게 동작함을 확인할 수 있다. 또한 그림 5는 방전동작을 나타내며, 제어기의 BW에 따라 동특성은 다르나 두 경우 모두 안정되게 동작을 하는 것을 확인할 수 있다.

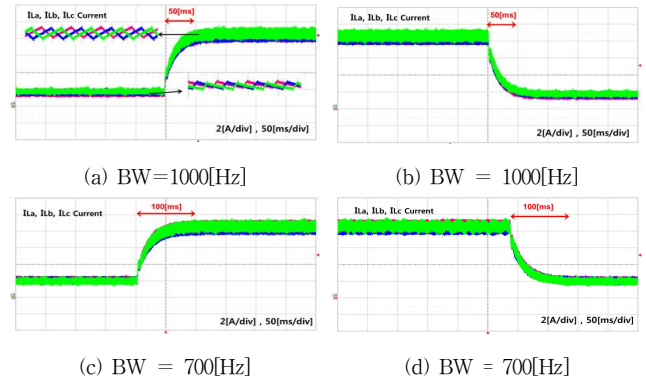


Fig. 4 Comparison of the transient response in charging mode

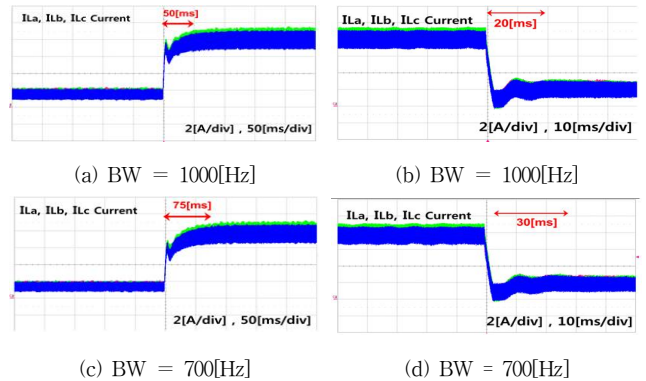


Fig. 5 Comparison of the transient response in discharging mode

5 결론

본 논문에서는 3상 양방향 DC DC컨버터의 디지털 모델링을 통해 디지털 PWM 지연과 제어기 연산시간 지연을 고려한 디지털 전류제어기를 설계하였으며, 구성된 제어기의 다량성을 배터리의 양방향 충방전 전류 제어를 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Y. Cho, and *et al*, "A Digital Single loop Control of Multi phase dc dc Converter for Fuel Cell Powered Truck Auxiliary Power Unit," in *proc. 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE)*, pp. 2261-2266, Jeju, Korea, May 30 - June 3, 2011.
- [2] H. D. Venable, *Optimum Feedback Amplifier Design For Control Systems*, Available : <http://www.venable.biz>.