

비대칭 하프 브릿지 직류-직류 컨버터에 적용된 전류 제어의 성능평가 비교

임원석, 최병조, 박성우*

경북대학교 전자전기컴퓨터학부, 한국항공우주연구원*

Comparative Performance Evaluation of Current-Mode Controls Adapted to Asymmetrical Half-Bridge Dc-to-Dc Converters

Wonseok Lim, Byungcho Choi, and Sungwoo Park*

Kyungpook National University, Korea Aerospace Research Institute*

ABSTRACT

Three different current-mode control schemes, peak current-mode control, charge control, and average current-mode control, are investigated for applications to asymmetrical half-bridge dc-to-dc converters. The principles, implementation, and performance of the three control schemes are compared in an attempt to identify their respective merits and limitations. Design examples for feedback compensations are given for the three control schemes. A 50 W experimental asymmetrical half-bridge dc-to-dc converter was used to experimentally verify the theoretical results of the paper.

1. 서론

전류 제어는 PWM 스위칭 컨버터의 페루프 성능을 향상시키기 위한 효과적이고 실현 가능한 기법이기 때문에 최대치 전류제어 (Peak current-mode control:PCC)의 개발을 시작으로 여러 가지 형태로 발전되어 왔다. 그 중에서도 전하 제어(Charge control:CC)와 평균 전류 제어 (Average current-mode control:ACC)는 현재 널리 쓰이는 전류 제어 기법이다. 각각의 전류 제어 기법의 특징을 표 1에 정리하였다.

본 논문에서는 PCC, CC 그리고 ACC를 비대칭 하프 브릿지(Asymmetrical half-bridge:ASHB) 컨버터에 적용하고 각각의 전류 제어에 대한 기본 원리, 구현 방법, 및 성능을 비교한다. 각 제어 기법의 장점과 한계에 대하여 기술한다. 페루프 성능을 향상시키기 위한 제어 회로 설계 방법을 제시하고 이에 따라 컨버터를 설계 제작한다. 50 W 급 실험실형 컨버터를 이용하여 이론적인 결과 실험결과를 비교하여 본 논문의 타당성을 검증한다.

2. 전류 제어의 원리와 구현

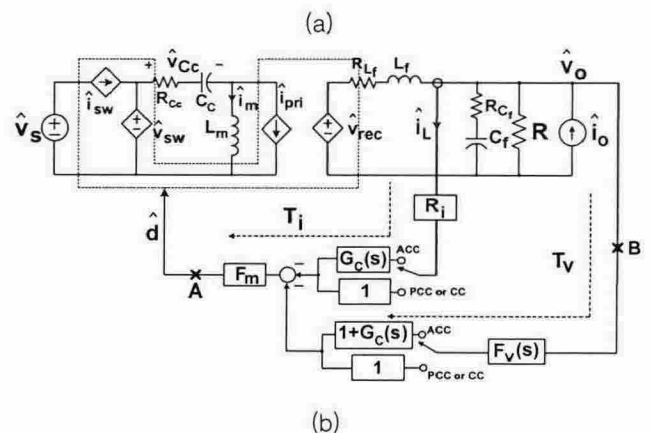
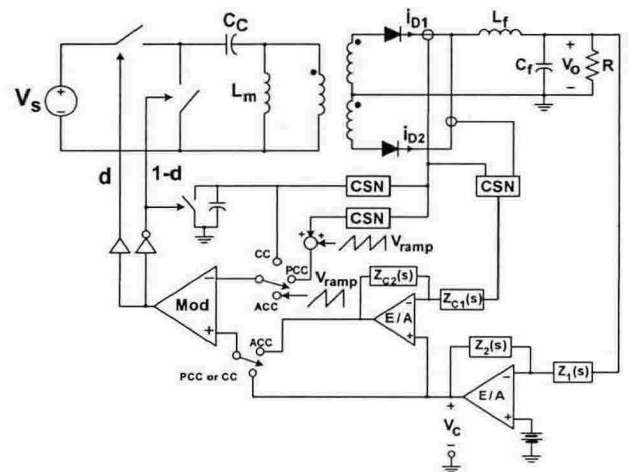


그림 1. 전류 제어를 적용한 비대칭 하프 브릿지 컨버터 (a) 회로도 (b) 소신호 모델

표 1. 전류 제어 방식 비교

	Current feedback signal	Noise immunity	Current sensing network
PCC	Peak value of inductor current	Poor	Simple
ACC	Average value of inductor current	Good	Complicated
CC	Charge delivered by inductor current	Excellent	Relatively simple

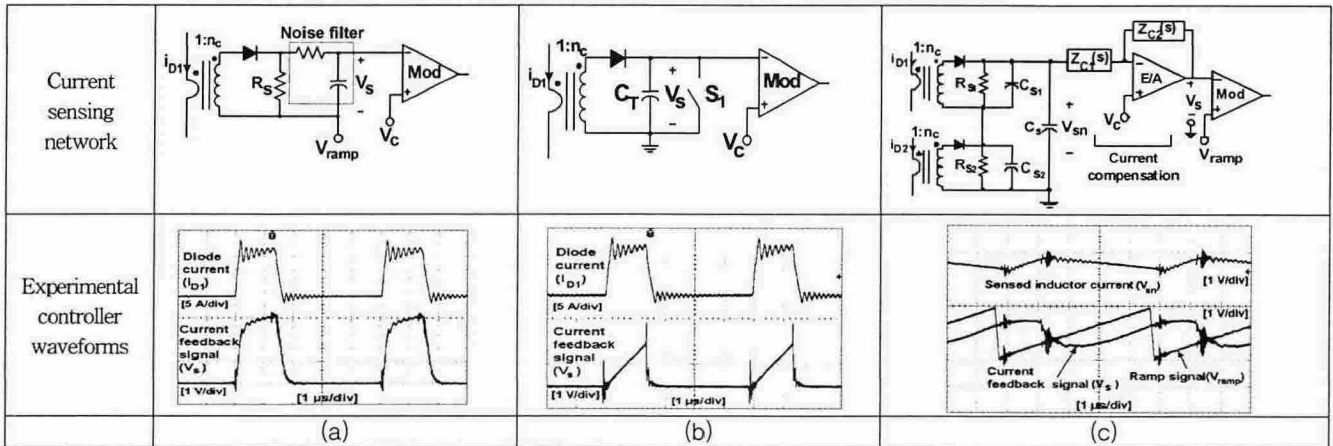


그림 2. 전류 감지 회로와 전류 제어 신호 파형 (a) PCC (b) CC (c) ACC

2.1 전류 제어 비대칭 하프 브릿지 컨버터

그림 1에 세가지 전류 제어 방식을 적용한 ASHB 컨버터의 회로도도 소신호 모델을 나타내었다. 세 가지 전류 제어 방식 모두 전류 감지 회로 (Current sensing network: CSN) 이용하여 2차측 다이오드 전류를 감지하여 이를 제어 신호로 사용한다. 1차측의 스위치 전류를 전류 제어 신호로 이용할 수 있지만 스위치 전류에는 자화전류 성분이 포함되어 있어 전류 제어의 해석이 복잡하고 어렵게 된다. ASHB 컨버터의 전원단에 대한 소신호 모델은 [1]에 잘 나타나있다. 소신호 모델의 이득 블록은 표 2에 정리하였으며, 이에 관한 내용은 다른 문헌에 이미 논의되었다. ASHB 컨버터의 특징 중 하나는 전원단의 클램프 커패시터 C_{cl} 과 자화 인덕턴스 L_m 에 의해 추가적인 공진주파수가 생기고, 이로 인해 제어 회로 설계가 까다롭게 된다[1].

표 2. 전류 제어 설계 결과

CSN parameters		
PCC	CC	ACC
$n_c = 80,$ $R_s = 33\Omega$	$n_c = 80,$ $C_T = 0.1\mu F$	$n_{c1} = n_{c2} = 80,$ $R_{S1} = R_{S2} = 33\Omega$
Small-signal gain block		
PCC	CC	ACC
$R_i = \frac{R_s}{n_c} = 0.41$ $F_m = \frac{2}{(s_n + s_f - 2s_e)}$ $= 0.27$	$R_i = \frac{DT_s}{n_c C_T} = 0.13$ $F_m = \frac{n_c C_T}{I_p T_s} = 0.18$	$R_i = \frac{R_s}{n_c} = 0.41$ $F_m = \frac{1}{s_r T_s} = 0.56$
s_n : on-time inductor current slope s_f : off-time inductor current slope s_e : external ramp slope	I_p : peak value of inductor current	
Feedback compensation parameters		
PCC	CC	ACC
$K_c = 6.26 \times 10^4$ $\omega_z = 30.1kr/s$ $\omega_p = 429kr/s$	$K_c = 2.1 \times 10^4$ $\omega_z = 30.1kr/s$ $\omega_p = 429kr/s$	$K_c = 5.3 \times 10^4$ $\omega_z = 30.1kr/s$ $\omega_p = 429kr/s$ $K_C = 5 \times 10^4$ $\omega_{zc} = 30.1kr/s$ $\omega_{pc} = 628kr/s$

그림 2는 전류 감지 회로와 전류 제어 신호의 실험파형이다. 세 가지 제어방식 모두 전류 트랜스포머를 이용하여 다이오드 전류를 감지하였다. ASHB 컨버터의 2차측 다이오드 전류가 노이즈에 의해 오실레이션하는 신호가 섞여있음을 알 수 있다. 따라서 PCC의 경우 노이즈 필터를 사용하여 그림 2(a)에 나타난 바와 같이 노이즈 레벨을 낮추어야 전류 제어 신호로 사용할 수 있다. 그러나 CC의 경우 C_T 와 보조 스위치(S_1)을 이용하여 다이오드 전류를 C_T 에 충전하여 이를 전류 제어 신호로 사용하기 때문에 제어 신호의 노이즈 특성이 매우 우수하다. ACC의 경우에는 2개의 다이오드 전류를 이용하여 인덕터 전류를 만들고 이를 저주파 필터의 역할을 하는 전류 보상 회로($G_c(s)$)를 통해 제어 신호로 사용한다. 따라서 ACC 경우 역시 전류 제어 신호가 노이즈특성이 우수하다고 할 수 있다.

2.2 전류 제어의 원리

그림 1(b)의 소신호 모델로부터 전류 제어를 해석하기 위한 루프 이득을 정의할 수 있다. 먼저 인덕터 전류에 의한 전류 루프 이득 (T_i)과 출력 전압에 의한 전압 루프 이득(T_v)를 정의할 수 있다. 이로부터 "A"에서 측정된 루프 이득을 overall 루프 이득($T_1 = T_i + T_v$)이라고 하고, "B"에서 측정된 루프 이득을 outer 루프 이득($T_2 = T_i / (1 + T_v)$)이라고 정의한다.

최대치 전류제어 (Peak current-mode control)

그림 3(a)에 앞에서 정의한 PCC의 루프 이득을 도시 하였다. CSN 이득(R_i)을 전류 루프 이득(T_i)의 0-dB crossover 주파수가 스위칭 주파수의 1/5~1/3이 되도록 충분히 높게 설계한다. 아래와 같은 2극1영점 전압 보상기를 사용하여 전압 루프이득(T_v)을 그림 3(a)와 같이 설계할 수 있다.

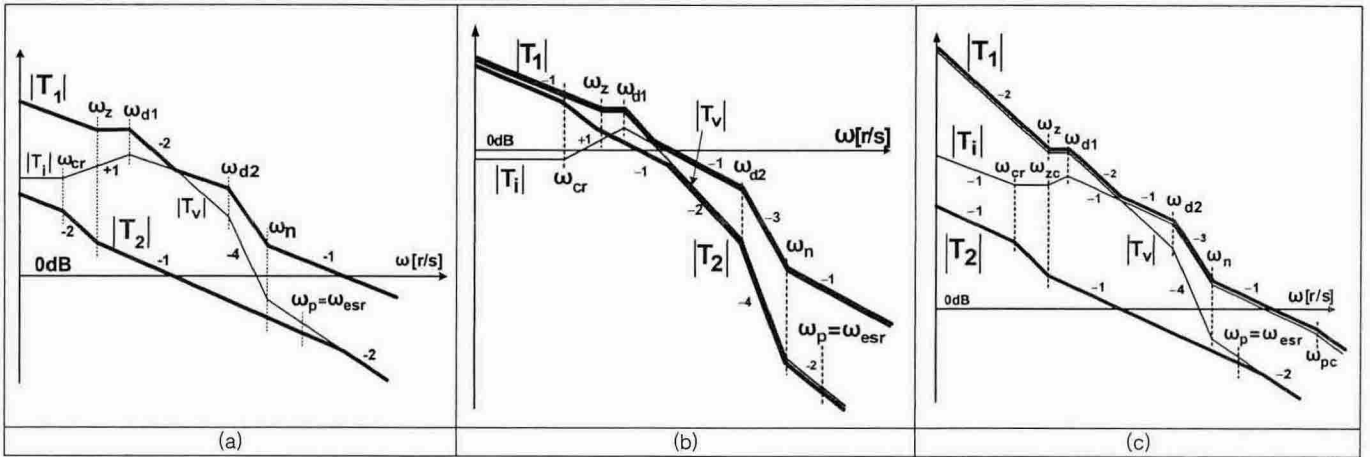


그림 3. 전류 제어의 루프 이득 (a) PCC (b) CC (c) ACC

$$F_V(s) = \frac{K_v(1+s/\omega_z)}{s(1+s/\omega_p)} \quad (1)$$

- ω_z 는 필터 인덕터(L_f)와 필터 커패시터(C_f)에 의한 공진 주파수(ω_{d1})를 넘지 않는 범위에서 최대한 높게 위치 시킨다.
- ω_p 는 C_f 와 R_f 에 의한 esr영점을 상쇄시키기 위해 ω_{esr} 에 위치시킨다.
- 이득 K_v 는 컨버터의 페루프 성능과 안정도를 고려하여 선정한다.

위의 전압 보상기 설계 방법은 CC나 ACC에서도 동일하게 적용된다.

T_i 를 저주파 영역에서는 T_v 보다 작게, 고주파 영역에서는 T_v 보다 크게 설계함으로써, PCC의 T_i 는 안정된 위상 여유와 높은 루프 이득을 얻을 수 있다. T_2 는 T_i 를 크게 설계함으로써 T_2 의 분모와 분자에 공통으로 C_c 와 L_m 에 의한 공진(ω_{d2})에 대한 영향을 서로 상쇄시킬 수 있기 때문에 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 ω_{d2} 의 영향이 나타나지 않는다. 이러한 PCC의 특징으로 ω_{d2} 로부터 영향을 받지 않고 독립적으로 제어 회로를 설계할 수 있다.

전하 제어(Charge control)

전하 제어의 루프 이득을 그림 3(b)에 나타내었다. CC의 T_i 는 PCC의 경우와 같은 모양이지만 T_i 의 직류 이득($T_i(0)$)이 제어 특성상 고정되어 있고 작기 때문에 CC의 경우 전류 제어의 한계점이 나타난다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 PCC의 경우와는 다르게 C_c 와 L_m 에 의한 공진을 상쇄시키지 못하여 ω_{d2} 의 영향이 그대로 T_2 에 나타나게 된다. 따라서 제어 회로를 설계할 때 이득을 크게 하지 못하고 이로 인해 전하 제어 컨버터의 페루프 성능이 저하되게 된다. 이에 관한 실험 결과는 다음절에서 논한다.

평균 전류 제어(Average current-mode control)

그림 3(c)에 ACC의 루프 이득을 나타내었다. ACC는 전류 루프에 전류 보상 회로가 있기 때문에 PCC의 경우보다 더욱 향상된 T_i 를 자유롭게 설계할 수 있고, 이로 인해 다른 루프 이득도 또한 향상될 수 있다. 전류 보상기 $G_c(s)$ 는 전압 보상기와 비슷하게 다음과 같이 설계한다.

$$G_c(s) = \frac{K_C(1+s/\omega_{zc})}{s(1+s/\omega_{pc})} \quad (2)$$

- ω_{zc} 는 ω_{d1} 을 넘지 않도록 위치 시킨다.
- ω_{pc} 는 스위칭 노이즈를 줄이기 위해서 스위칭 주파수에 위치시킨다.
- 이득 K_C 는 T_i 가 안정된 위상여유를 가지면서 crossover 주파수가 스위칭 주파수의 1/5~1/3에 위치하도록 조정한다.

ACC는 전류 보상기의 적분기 이득(K_C)과 보상 영점(ω_{zc})을 조정함으로써 T_i 를 높은 저주파 이득과 동시에 높은 crossover 주파수를 나타낼 수 있다. 이러한 향상된 루프 이득 특성은 세 가지 제어 기법중 ACC가 가장 우수한 페루프 성능을 나타낼 것으로 예측할 수 있다.

2.3 전류 제어의 성능

그림 4와 5에 세 가지 전류 제어 기법을 적용한 ASHB 컨버터의 페루프 성능을 도시하였다. 본 논문에서 이론적 해석의 정확성을 검증하기 위해 시뮬레이션(굵은실선)과 실험(가는실선)을 비교하였다.

그림 4(a)에 세 가지 전류 제어를 적용한 ASHB 컨버터의 outer 루프 이득(T_2)를 도시하였다. 제어 회로의 파라미터는 세 가지 제어 기법을 적용한 T_2 가 모두 같은 위상 여유를 얻을 수 있도록 설계하였고, 표 2에 정리되어 있다. 앞 절에서 예상한 바와 같이 ACC가 가장 높은 피드백 이득과 높은 crossover 주파수를 보이면서 가장 우수한 루프 이득 특성을 나타내었고, 반면에 CC는 가장 열등한 루프 이득 특성을 보였다.

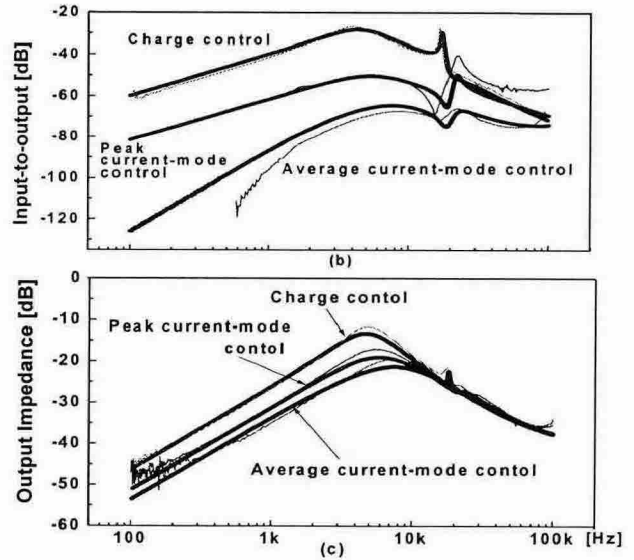
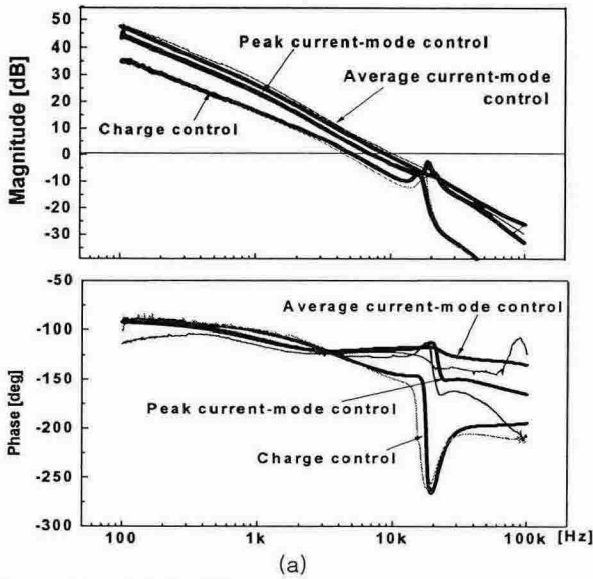


그림 4. 전류 제어의 페루프 성능

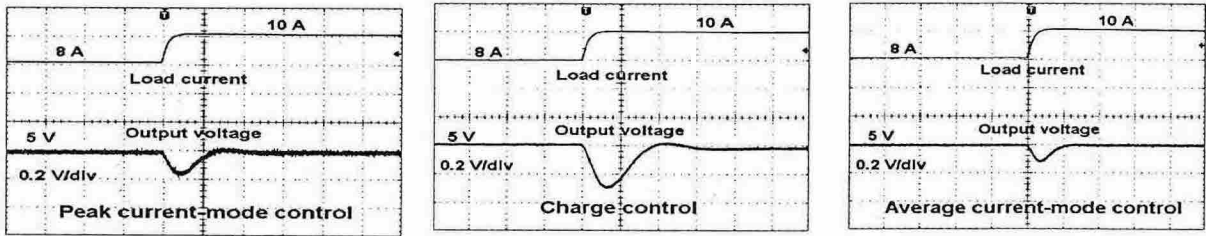


그림 5. 계단 부하 응답

입력 대 출력 전달함수는 입력 노이즈 성분에 대한 출력의 전달비로써 작을수록 우수하다. 그림 4(b)에 도시하였다. 향상된 루프 이득의 이점을 그대로 반영하여 ACC가 가장 많은 감쇠를 보였고, 그 다음으로 PCC, 그리고 CC는 가장 작은 감쇠를 보여 나쁜 전달함수 특성을 보였다.

그림 4(c)에 출력 임피던스를 나타내었다. 입력 대 출력 전달함수와 비슷하게 ACC가 가장 작은 peak 값과 높은 corner 주파수로 가장 좋은 특성을 보였고, CC가 가장 나쁜 특성을 나타내었다.

그림 5에 부하 전류가 계단형으로 변할 때 실험 실험 컨버터의 출력전압을 나타내었다. ACC가 가장 작은 undershoot와 빠른 settling time을 보여 가장 우수한 계단 부하 응답 특성을 나타내었다.

3. 결론

본 논문에서는 PCC, CC, 그리고 ACC를 ASHB 컨버터에 적용하고 각 전류 제어의 원리 구현 및 성능을 비교 분석하였다. 각각의 전류 제어 방식은 루프 이득을 바탕으로 해석하였고 실제적인 CSN 회로에 대하여도 논하였다.

세 가지 전류 제어 방식을 ASHB 컨버터에 적용한 결과 ACC가 가장 우수한 페루프 특성을 보였고 전류 제어 루프의 노이즈 특성도 우수하였다. 그러나 ACC는 추가적인 전류 보상회로와 전류 감지회로가 필요하였다. PCC는 전류 제어 신호는 노이즈에 민감하지만 우수한 페루프 특성을 보였고, 반면에 CC는 전류 루프 회로에서 노이즈 특성은 매우 우수하였지만 작은 전류 루프 이득으로 인해 제한된 페루프 성능을 나타내었다.

본 연구는 산업자원부 지역협력연구센터 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] S. Bang, W. Lim, B. Choi, T. Ahn, and S. Park, "Dynamic analysis and control design of asymmetrical half-bridge dc-to-dc converters", in Proc. ICECE, Portsmouth, VA, Aug. 2003.
- [2] L. H. Dixon, "Average current-mode control of switching power supplies," in Unitorde Power Supply Design Seminar Handbook, pp. C1(1-14), 1990.
- [3] W. Tang, F. C. Lee, R. B. Ridley, and I. Cohen, "Charge control: modeling, analysis, and design", IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, no. 4, pp.396-403, Oct. 1993.
- [4] 임원석, 최병조, "전류 제어 비대칭 하프 브릿지 직류-직류 컨버터의 동특성 해석 및 제어회로 설계" 전력전자 하계학술대회, 2003