

출력 커패시터 특성에 따른 포워드 DC/DC 컨버터 제어기 설계

유재도*, 류명호**, 백주원**, 김인동*, 노의철*
부경대학교*, 한국전기연구원**

Controller Design of Forward Converter considering Output Filter Capacitor Characteristics

J.D. Yu*, M.H. Ryu**, J.W. Baek**, I.D. Kim*, E.C. Nho*
Pukyong National Univ.*, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)**

ABSTRACT

본 논문에서는 Forward DC/DC 컨버터 설계에 있어서 출력 커패시터에 따른 제어기 설계를 제안한다. 최근 DC/DC 컨버터의 소형화로 스위칭 주파수가 고주파로 됨에 따라 출력 커패시터는 전해 커패시터에서 Tantal 커패시터와 MLCC로 대체되는 추세이다.

이에 본 논문에서는 Tantal 커패시터와 MLCC의 특성을 분석하고 각각의 출력 커패시터 특성에 따른 안정적인 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해서 검증하였다. 본 논문에서는 50W급 Forward DC/DC 컨버터를 제작하여 스텝 응답 테스트를 통해서 제시한 설계 기법이 타당함을 검증하였다.

1. 서 론

최근 DC/DC 컨버터의 소형화로 스위칭 주파수가 고주파로 되고 있으며, 출력 커패시터는 전해 커패시터에서 Tantal 커패시터와 MLCC(multilayer ceramic capacitor)로 대체되는 추세이므로 커패시터의 특성을 정확하게 분석하는 것은 DC/DC 컨버터의 동특성 및 안정도 설계에 도움을 준다.

출력 커패시터의 커패시턴스(capacitance)와 ESR(equivalent serial resistance)은 컨버터 동작의 안정성을 결정하는 피드백 루프에 상당한 영향을 끼친다. 따라서 Tantal 커패시터와 MLCC의 특성 분석에서 커패시턴스와 ESR의 크기를 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 두 커패시터는 온도변화, DC 바이어스 전압(DC bias voltage) 등에 따라 다양한 특성의 변화가 발생하는데 ESR의 경우, 두 커패시터 모두 온도변화와 DC 바이어스 전압에 대해 안정적이다. 그러나 커패시턴스의 경우, Tantal 커패시터는 온도변화와 DC 바이어스 전압에 대해 안정적이지만 MLCC의 커패시턴스는 급격하게 변화하며 크기는 50%까지 감소한다.^{[1],[2]}

MLCC는 Tantal 커패시터에 비해 상대적으로 ESR이 1/10 이상 작은 값을 가지고 최근에 용량이 크게 증가하여 DC/DC 컨버터의 출력 커패시터로써 사용이 가능하다.^[3] DC/DC 컨버터의 출력전압 리플의 경우, Tantal 커패시터를 사용할 때보다 MLCC를 사용할 때 매우 작은 ESR로 인해 출력전압 리플이 크게 줄어들 수 있으나 커패시턴스 감소와 작은 ESR 때문에 제어기 설계가 어렵다. 따라서 제어기를 안정적으로 설계하지 않을 경우 안정성을 확보하기 어려우며, 이로 인하여 출력전압이 불안정해질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 Tantal 커패시터와 MLCC의 커패시턴스와 ESR을 HP4194를 이용하여 측정하고, 각각의 특성에 대해 안정적인 제어기를 설계한 후 제안된 Forward DC/DC 컨버터에 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 제시한 설계 기법이 타당함을 검증하였다.

2. Forward DC/DC 컨버터 및 제어회로

2.1 Forward DC/DC 컨버터

그림 1은 일반적인 Forward DC/DC 컨버터이며 실험적 구현에 사용한 각 소자의 파라미터는 표 1과 같다.

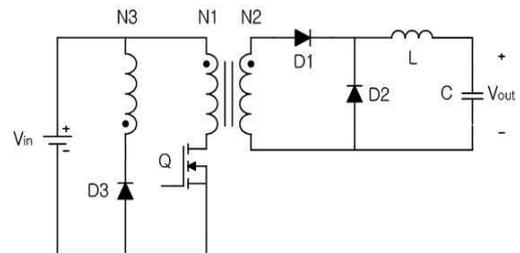


그림 1. Forward DC/DC 컨버터

표 1. Forward DC/DC 컨버터의 파라미터

입력 전압	28 [V]
출력 전압	5.2 [V]
출력 전류	10 [A]
스위칭 주파수(fs)	200 [kHz]
변압비 (N1 : N2 : N3)	1 : 1 : 1
L	6.5 [uH]
C	880 [uF]

2.2 제어회로

제어회로는 그림 2와 같다. 빠른 출력전압 응답특성을 위해 출력전압 제환 방법과 전류 트랜스포머(Current Transformer)로 스위치 전류를 감지하여 피크전류를 제어하는 피크전류 제어 방법을 사용하였다.

전압 보상 회로는 3개의 극점과 2개의 영점을 가지는 구조를 사용하였다. Tantal 커패시터의 경우, 첫 번째 극점은 원점에 위치시키고, 두 번째 극점은 ESR 영점의 효과를 상쇄시키기 위해서 ESR 영점 위치에, 그리고 스위칭 노이즈를 감쇄시키기 위해서 마지막 극점을 fs/2 부근에 위치시켰으며, 첫 번째 영점은 변환기가 조건부 안정화되는 것을 방지하기 위해서 전

원단의 공진 주파수 바로 앞에 위치시키고, 두 번째 영점은 전 원단 공진 주파수의 이중 극점에서 감쇄된 위상을 보상해서 변환기가 충분한 위상 마진으로 우수한 동특성을 가지게 하기 위해서 전원단 공진 주파수 조금 이후에 위치시켰다. MLCC의 경우, Tantal 커패시터의 경우와 동일하게 설계하게 되면 작은 ESR 때문에 두 번째 극점의 위치가 크게 변한다. 이로 인해 노이즈에 민감해지고, 동작이 불안정해진다. 그래서 MLCC의 경우에는 두 번째 극점을 ESR의 영점 위치의 1/10 정도에 위치시켰다.

피크전류 제어 방법을 적용할 경우에는 제어를 위해서 사용되는 전류신호가 부하전류의 직류성분을 포함하고 있기 때문에 전류제한 효과가 이루어진다. 뿐만 아니라, CCM(continuous current mode)에서 안정되게 동작하도록 설계된 변환기가 부하 변동과 같은 여러 가지 원인에 의해서 DCM(discontinuous current mode)이 된 경우에도 그 특성의 변화가 크지 않다는 이점이 있다. 그림 3에 피크전류 제어의 원리를 타나내었다.

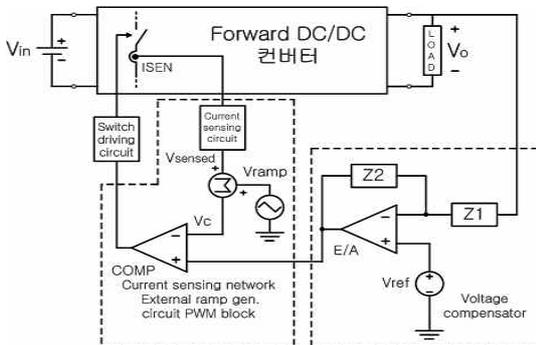


그림 2. Forward DC/DC 컨버터 제어 블록 다이어그램

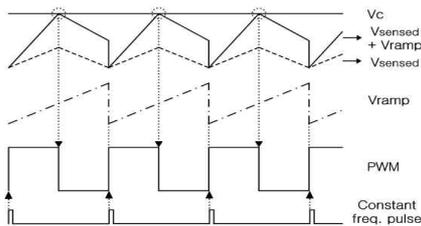


그림 3. 피크전류 제어의 원리

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션

그림 4는 시뮬레이션 회로이고, 표 2는 시뮬레이션에서 적용한 파라미터이다. 시뮬레이션은 PSIM을 사용하였으며, 출력 커패시터에 Tantal 커패시터와 MLCC의 특성을 각각 적용하여 시뮬레이션 하였다. 동일한 전류 제어기를 적용하고 Tantal 커패시터와 MLCC의 특성을 고려한 전압제어기를 설계하여 f_c (crossover frequency)는 16kHz 근방에 위치시키고, PM(phase margin)은 60deg 이상이 되도록 하였으며, DC gain의 크기도 동일하게 하였다. 그림 5는 시뮬레이션을 통해서 얻은 파형이다.

Tantal 커패시터는 VISHAY의 220uF/16V×4를 사용하였고, MLCC는 MURATA의 100uF/6.3V×20을 사용하였다. 표 2에서 보는 것과 같이 실제 커패시턴스의 측정치는 Tantal 커패시터

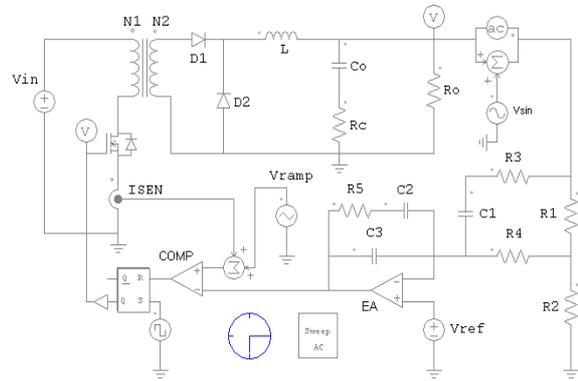
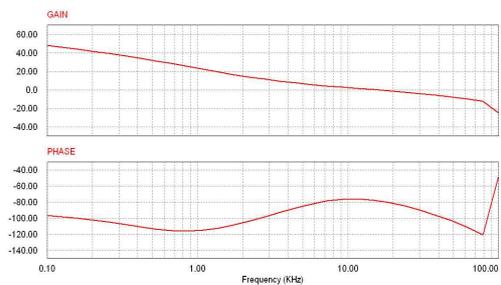


그림 4. 시뮬레이션 PSIM 모델

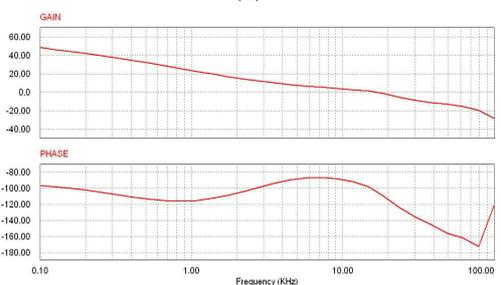
의 경우, 실제 제품 표시값과 동일한 것을 알 수 있으나 MLCC의 경우, 실제 제품 표시값의 45%정도의 값을 나타내고 있다. 따라서 MLCC로 Tantal 커패시터와 동일한 값의 커패시턴스를 얻기 위해서는 많은 MLCC를 사용하여야 하므로 상대적으로 ESR의 값은 더욱 작아지게 된다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터

동일한 파라미터			
Vin	28 [V]	C2	4.7 [nF]
Ro	0.65 [Ω]	C3	39 [pF]
R1	600 [Ω]	L	6.5 [μ H]
R2	2 [k Ω]	Vref	4 [V]
R4	4.3 [k Ω]	Vramp	2.4 [V]
R5	20 [k Ω]	전류이득(ISEN)	0.065
변압비(N1:N2)	1 : 1		
동일하지 않은 파라미터			
	Tantal 커패시터	MLCC	
Co	880 [μ F]	900 [μ F]	
Rc(ESR)	15 [m Ω]	0.5 [m Ω]	
R3	6.8 [k Ω]	1.5 [k Ω]	
C1	1.8 [nF]	3.9 [nF]	



(a)



(b)

그림 5. 루프이득 보드선도 시뮬레이션 파형
(a) Tantal 커패시터 (b) MLCC

3.2 실험 결과

HP4194를 이용하여 측정한 DC/DC 컨버터의 루프이득은 그림 6에 나타내었고 시뮬레이션 파형과 비교/분석하였다. Tantal 커패시터의 경우, 시뮬레이션 파형과 일치함을 볼 수 있으며, MLCC의 경우, PM이 10deg 차이 나는 것을 제외하면 시뮬레이션 파형과 일치함을 볼 수 있다.

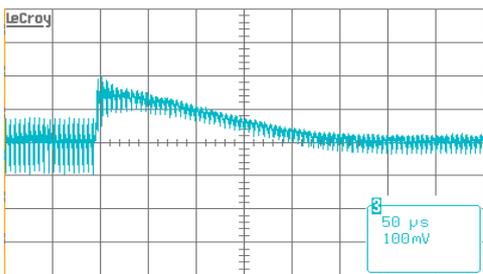


(a)

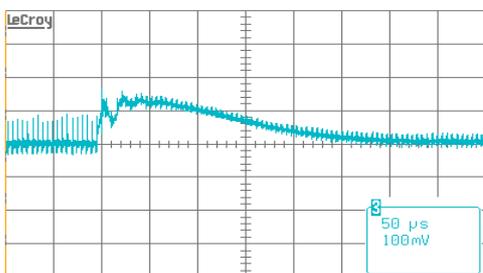


(b)

그림 6. 루프이득 보드선도 실험 파형
(a) Tantal 커패시터 (b) MLCC



(a)

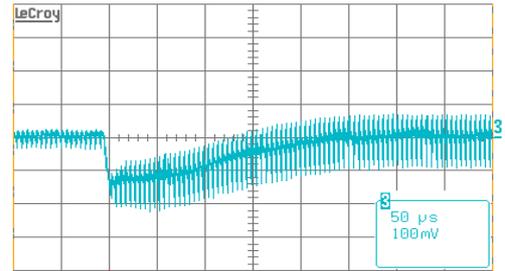


(b)

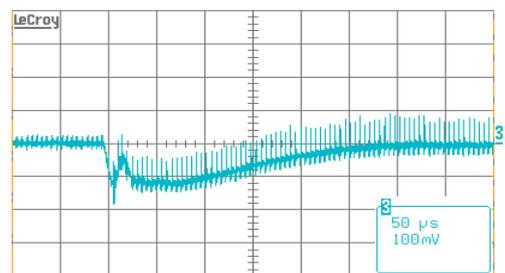
그림 7. 스텝응답 파형 (부하전류10A→2A)
(a) Tantal 커패시터 (b) MLCC

제시한 설계 기법이 타당함을 검증하기 위해서 출력전압의 스텝응답(step response)을 측정하고 비교/분석하였다. 그림 7은 부하전류가 10A에서 2A로 감소할 때 출력전압의 스텝응답 파형이고, 그림 8은 부하전류가 2A에서 10A로 증가할 때 출력

전압의 스텝응답 파형이다. 그림 7과 그림 8에서 보듯이 Tantal 커패시터와 MLCC은 250us의 동일한 세틀링 타임(settling time)을 가지고, 출력전압의 오버슈트(overshoot)와 드롭(drop)은 200mV 내외로 유사한 스텝응답 특성을 가진다.



(a)



(b)

그림 8. 스텝응답 파형 (부하전류2A→10A)
(a) Tantal 커패시터 (b) MLCC

4. 결론

본 논문에서는 출력 커패시터의 특성에 따른 Forward DC/DC 컨버터 제어기 설계를 제안하였다. 각각의 출력 커패시터의 특성에 따라 설계된 안정적인 제어기를 Forward DC/DC 컨버터에 적용하여 시뮬레이션하고 스텝 응답 실험을 통해서 제시한 설계 기법이 타당함을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] R.Faltus, Z.Flegr, R.Sponar, M.jane, T.Zednicek, "DC/DC converter output capacitor benchmark", AVX Technical Information.
- [2] John prymak, Mike randall, Peter Blais, Bill Long, "Why that 47 uF capacitor drops to 37 uF,30 uF, or lower", KEMET Electronics Corp. Technical Papers, 2008, March.
- [3] "Comparison of Ceramic and Tantalum Capacitors", KEMET Electronics Corp. Technical Papers, 2008, November.
- [4] Chongming Qiao, Jason Zhang, Parviz Parto, David Jauregui, "output capacitor comparison for low voltage high current application", IEEE PESC 35th Annual, Vol.1, pp.622- 628, 2004, April.
- [5] 임원석, 최병조, "전류 제어 비대칭 하프 브릿지 직류-직류 컨버터의 동특성 해석 및 제어회로 설계", 전력전자학회 학회학술대회, pp.337-340, 2003.