MLCC 시험용 고 정밀 DC 전원 장치 개발

김민재*, 최원식*, 최윤걸*, 정일우*, 박기현**, 박현철*
포항공과대학교*, 포항가속기연구소**

Development of High Precision DC Power supply on MLCC Measurement

Min-Jae Kim*, Won-Shik Choi*, Il-Woo Jeong*, Ki-Hyeon Park**, Hyun-Chul Park*
Pohang University of Science and Technology*, Pohang Accerelator Laboratory**

Abstract - 본 논문은 MLCC (Multi-Layer Ceramic Capacitor) 시험용 전원 장치의 설계에 대해 기술 하였다. 개발된 전원 장치의 정격 출력 전압과 전류는 600V / 2A이며 경부하에서 중부하까지 200mV이하의 고 정밀도를 가진다. 전원 장치의 토폴로지는 2-스위치 플라이백 컨버터를 인터리브시켜 고 전력/고 시스템 주파수가 가능하도록 구성했다. 출력 필터와 시스템 제어기를 설계하여 전압 리플과 노이즈를 감쇠시키고 시스템 안정도를 높였다. 특히 16bit AD변환기를 이용하여 제어 변수를 받아, DSP(TI社 TMS320F28335)로 정전압(CC) / 정전류(CV) 모드 제어를 보다 정밀하게 하였다. 최종적으로 시뮬레이션과 실험을 통해 고 정밀 전압의 전원 장치 설계의 타당성을 확인 하였다.

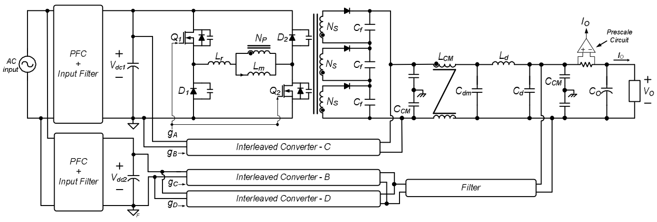
1. 서　론

MLCC (Multi-Layer Ceramic Capacitor) 품질검사를 하면서 불량품을 선별해 내기 위해서는 전압 리플 노이즈가 낮은 전원 장치가 필요하다. 전원회로의 출력 리플과 노이즈를 고려한 필터 설계뿐 아니라 PCB 패턴, 스너버 회로, 그라운드 임피던스 최소화, 트랜스포머 설계 등이 필요하다. 또한 정밀한 지령 전압/전류를 추종을 위해 제어기 설계도 요구된다. 본 논문에서는 고 정밀/저 노이즈 전원 장치를 설계하기 위해 디지털 제어보드와 ADC 보드를 구성하였으며, 실험을 통해 안정도를 확인하였다. 그 결과 생산 현장에서 사용이 가능한 사양의 MLCC 고 정밀/저 노이즈 DC 전원 장치를 개발을 하였다.

2. 본　론

2.1 전원 장치 회로 구성

설계된 고 정밀 전원 장치 회로 구성은 PFC, 2-스위치 플라이백 타입 컨버터, 출력 필터로 그림 1과 같이 구성된다.

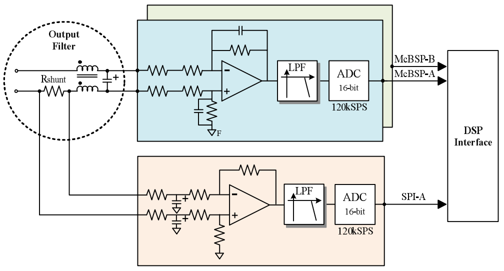


<그림 1> 회로 구성

입력 전력은 단상 220V 전원을 받아서 2개의 PFC 회로를 통해 독립된 링크 전압원으로 공급된다. 각각의 DC 링크 회로는 고 전력 용량을 제공하기 위해 2개의 병렬 연결된 플라이백 회로로 전원을 공급하며, 각각 병렬 연결된 4개의 회로가 하나의 출력 필터를 공유한다. 병렬 연결된 컨버터는 같은 스위칭 주파수로 동작하지만 360/N 인터티브 되어 순차적으로 동작한다. 컨버터의 유효 주파수의 증가는 출력 리플를 감소시켜 필터 설계에 더욱 용이하다.

2.3 디지털 및 아날로그 회로 구성

설계된 전원 장치의 디지털 및 아날로그 회로는 그림 2와 같이 구성된다. 출력 필터를 거친 출력 전압과 전류는 차동 증폭기를 이용하여 공통 노이즈 성분을 제거하고 2차 필터 회로를 거쳐 외부 A/D 변환기를 통해 DSP로 전송한다. 설계된 전압 필터 회로의 차단 대역폭은 10kHz 이고, 전류 필터 회로의 차단 대역폭은 100kHz이다. ADC는 Analog device사의 AD977을 사용하였으며, 16-bit 분해능, 200KHz throughput, 자체 기준전압 및 SPI 인터페이스를 가진다. ADC의 SOC 신호는 DSP에서 120KHz 마다 발생하며, 디지털로 변환된 신호들은 컨버터의 제어 변수로 처리된다.



<그림 2> 디지털 및 아날로그 회로 구성

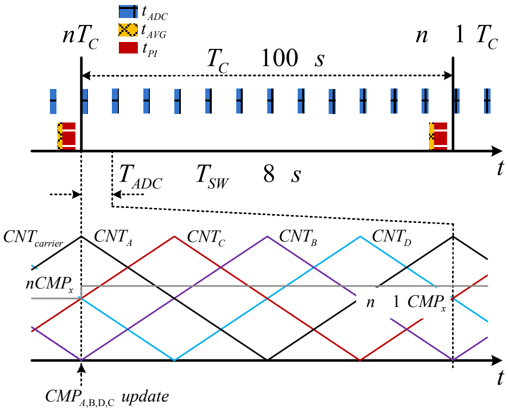
DSP의 통신 채널은 크게 인터페이스용 SCI 통신 1CH, ADC 데이터 전송용 SPI 1CH와 McBSP 2CH를 사용한다. 출력 전류 i_o , 전압 v_o 제어를 위해 스위칭 주기마다 ADC 데이터를 얻으며 PWM을 통해 플라이백 컨버터의 게이팅 신호를 생성한다.

2.4 고 정밀 제어를 위한 샘플링 및 제어

ADC 시 발생 하는 노이즈는 thermal noise, shot noise, flicker noise, white noise 등이 있다. 이러한 노이즈들은 ADC 시 양자화 에러 값을 가지게 한다. 출력 전압/전류의 고 정밀 제어를 위해 보다 정밀한 전류와 전압의 ADC가 요구되었고, 높은 SNR과 분해능을 가지기 위해 오버 샘플링과 평균화방법을 사용했다. 전압 전류 제어기는 10kHz 주기로, AD변환은 120kHz로 수행된다. 아래의 수식은 SNR 수식이다 [1].

$$SNR_{max}[db] \approx 6.02 \cdot N + 1.76 + 10\log_{10}(k)$$
$$Total\ Bit = N + \log_4(k)$$

여기서 k는 오버샘플링 횟수이고, N은 기본 비트 수이다. 아래 그림 3은 개발된 전원회로에 적용된 타이밍도이다.



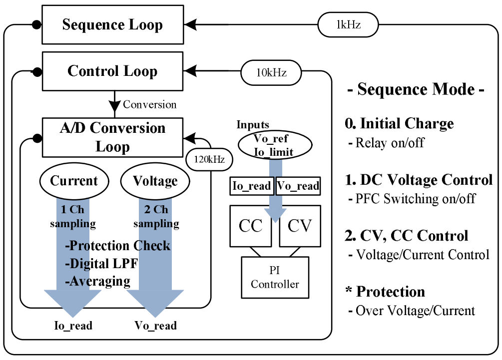
<그림 3> 디지털 및 아날로그 회로 구성

고 정밀 출력 전압 데이타는 2개의 16-bit ADC칩을 제어 주기의 12배 속도로 오버 샘플링하여 제어 변수 값의 분해능을 높였으며, DSP를 사용하여 데이터 처리하였다. 1배속 샘플링보다 SNR은 13.8dB, 디지털 데이터의 분해능 2.3-bit 개선되었고, 출력 전류는 SNR 10.8dB, 디지털 분해능 1.8-bit 개선되었다. 그림 3에서 보듯이, 12번의 샘플링(Tadc=8us)과 평균화 작업(Tc =100us) 후 PI제어기 출력 값은 Tc마다 업데이트 해준다. 그 값은 컨버터 A~D 인터리브된 캐리어 신호에 비

교 값 (nCMT)으로 입력된다. PWM은 HRPWM을 사용하여 약 6bit 높은 DAC 분해능을 가질 수 있다.

2.3 시스템 제어

그림 3 은 전원 장치의 전체 프로그램의 순서도이다.

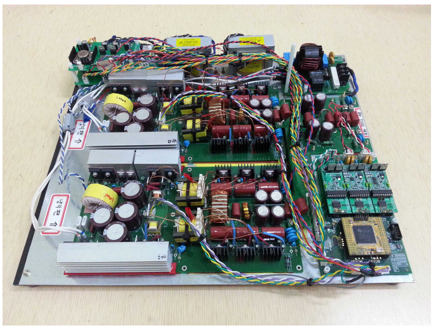


<그림 3> 시스템 순서도

시스템의 안정적인 동작을 위해서 동작 모드에 따른 시퀀스를 설정하고 순차적으로 동작 하도록 하였다. 전원을 켤 경우 dc 링크 전압을 초기 충전 회로를 거쳐 충전하고 PFC 회로를 동작시킨다. 그 후 입력된 전압 지령값, 전류 제한값을 받아 CV/CC 모드 운전을 하도록 한다. 이러한 제어를 위해서 스위칭 주기에 따라서 전압과 전류를 A/D 변환하고 적절한 디지털 필터링과 평균화 과정을 거친다. 전압/전류 제어 주기에 맞추어 A/D 변환한 값을 읽어 온다. 그리고 시스템의 보호를 위해서 매 샘플링 시점에서 과전압/과전류를 판단한다.

2.5 실험 결과

개발된 전원회로를 저항에 연결하여 경부하에서 중부하 1200W까지 실험 하였다. 에뮬레이터를 통해 PC와 DSP간 통신하였고, PC를 통해 전압 지령값을 입력하여 상태를 모니터링 하였다. 컨버터간 스위칭 주파수는 120kHz이며, 4개의 컨버터가 인터리브되어 480kHz의 유효 스위칭 주파수를 가진다. 실험에 사용한 컨버터의 파라미터를 표 1에 정리 하였다. 그림 4는 개발된 전원 장치의 전체 사진이다.

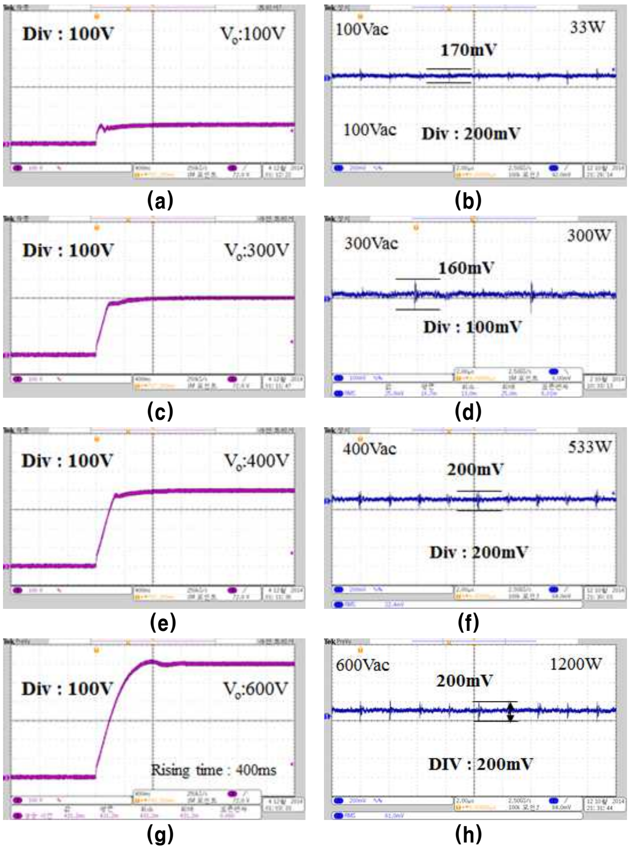


<그림 4> 개발된 전원 장치

그림 5는 디지털 제어보드와 ADC (feedback controller) 보드이다. ADC칩은 16bit ADD977칩을 사용하여 전류 1 CH, 전압 2 CH을 검출한다. 주 DSP는 TMS320F28335 모듈을 사용하였다 [2].

<그림 5> 개발된 제어보드 회로

그림 6에서 지령 전압을100V/600V로 주었을 경우, 입력에 따른 출력 전압의 rising time과 지령전압을 추종 하였다. 출력전압 600V 기준으로 rising time은 400ms이다. 오실로스코프(DPO3024)를 통해 출력 전압의 AC 성분만 측정한 결과(300MHz Bandwidth), 개발한 전원 장치의 출력 리플노이즈 실험 결과 파형은 200mV 이하임을 확인하였다.



<그림 6> 개발된 전원회로 출력 전압 파형
(a) 100V 출력 전압 (b) 100V 출력 리플
(c) 300V 출력 전압 (d) 300V 출력 리플
(e) 400V 출력 전압 (f) 400V 출력 리플
(g) 600V 출력 전압 (h) 600V 출력 리플

<표 1> 시스템 설계 소자 Parameters

Parameters	Value
Lr	4.12 [uH]
Lm	256 [uH]
Np	20 [T]
Ns	16 [T]
Cf	10 [uF]
Ld	6 [uF]
Cd	120 [uH]
Co	120 [uF]
Ccm	9.4 [nF]
Cdm	0.1 [uF]

3. 결 론

본 논문에서는 저 전력 플라이백 모듈을 4병렬로 인터리브 시켜 1200W급 고 정밀/저 노이즈 전원 장치 설계에 대해 기술 하였다. 컨버터의 높은 유효 스위칭 주파수는 비교적 작은 크기의 필터를 구성 할 수 있었고, 16bit 이상의 샘플링을 통해 보다 정밀한 전류/전압 제어가 가능함을 보였다. 최종적으로, 개발된 전원 장치로 정밀한 전압을 추종함을 보였고, 출력 전압 600V/ 전류 2A에서 200mV이하의 낮은 노이즈 전압도 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Texas Instruments Europe, “Oversampling Techniques using the TMS320C24x”, SPRA461, June 1998
[2] TI Corp. (1995). Texas Instrument – TMS320F28335 Datasheet[online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf.