

디지털 제어를 이용한 LLC 공진형 컨버터의 설계 및 구현

현병철, 이재호, 조보형
서울대학교 전력전자 시스템 연구실

Design and Implementation of the LLC resonant converter using digital controller

Byeong Cheol Hyeon, Jae Ho Lee, Bo H. Cho
Power Electronics system laborator
y in Seoul Nation al University

ABSTRACT

본 논문에서는 LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터의 디지털 제어기 설계 및 실제적인 구현에 대해 기술한다. 분석된 LLC 컨버터의 소신호 특성을 기반으로 discrete domain에서 디지털 제어를 설계 하였다. 설계된 디지털 제어기는 SMPS용으로 특성화된 Microchips사의 마이크로컨트롤러(MCU)인 dsPIC33f를 이용하여 구현되었으며, 아날로그 제어기와의 성능 비교는 실험을 통하여 검증 한다.

1. 서 론

디지털 제어는 아날로그 제어 회로에 비해 회로 구성이 단순하며, 사용자가 여러 가지 기능을 코드를 통해 구현 할 수 있기 때문에 그 활용도가 높지만, 상대적으로 높은 비용과 연산 속도로 인한 성능 감소로 인해 선형 아날로그 제어칩만으로 운용이 어려운 비선형 제어나, 복잡한 시스템에 한정되어 이용되었다. 그러나 최근의 집적회로 기술의 발전으로 디지털 칩의 가격이 하락하고, 연산 성능이 점차 향상되면서, 비용이 시스템 설계에 큰 영향을 미치는 SMPS 시장에서 그 수요가 증가하고 있다.

디지털 제어는 선형 제어 알고리즘의 구현뿐만 아니라, 시스템 모니터링과 이에 적합한 동작 지령 등을 프로그래밍을 통해 구현할 수 있으며, 시스템의 외부 정보를 이용하거나 비선형 제어 알고리즘 등을 연동하여 기존 아날로그 제어칩을 사용할 때 보다 더 정밀한 전압 제어도 가능하다. 특히 SMPS에 특화된 MCU의 가격이 점차 낮아지고, 성능이 향상됨에 따라 산업용/가정용 전자기기에 활용될 것으로 예상된다[1].

본 연구에서는 높은 입력 전압 응용에 유리하며, 전 부하 영역에 대하여 MOSFET의 영전압 스위칭 턴온이 가능하여, 무게 및 전력 밀도, 전력 변환 효율면에서 성능이 뛰어나 오프라인 컨버터 응용에 많이 이용되는 LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터를 디지털 제어기로 구현한다.

디지털 제어칩으로는 Microchip사의 dsPIC33FJ16GSX02를 이용하고 480W의 하드웨어 실험을 통해 아날로그 제어기와 성능 비교를 한다

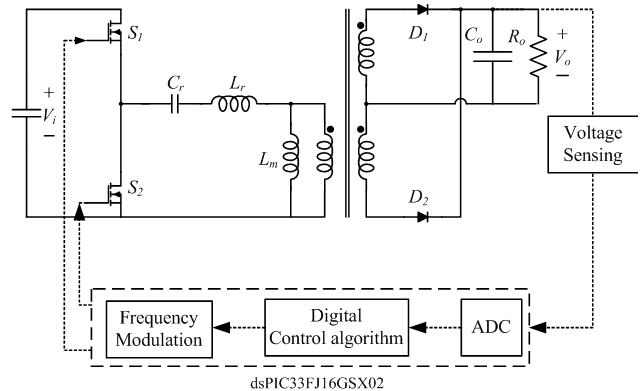


그림 1. LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터
Fig 1. LLC-Half bridge resonant converter

2.LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터

2.1 전력단 설계

SMPS 시스템 전체 구성도는 그림1과 같이 크게 분리형 보빈을 사용하여 누설 인덕턴스를 공진 인덕터로 사용한 LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터와 출력 전압의 AD변환 및 FM(Frequency Modulation)을 조정하는 MCU 그리고 제어기를 절연시켜 주는 변압기를 이용한 게이트 구동회로로 구성된다.

2.2 소신호 전달함수 특성

설계된 전력단에 대하여 디지털 제어를 구성하기 위해서는 구동 주파수에서 출력 전압 까지 소신호 전달함수가 필요하다. 주파수 제어방식의 공진형 컨버터의 소신호 전달함수는 구동 주파수와 컨버터의 공진 주파수가 비슷하므로 평균화 기법을 이용하여 소신호 특성을 구하기 어렵다. 그러므로 LLC 공진형 컨버터의 경우 EDF(Extended Describing Function)를 구성하고, 이를 컴퓨터 연산을 통해 응답을 구하거나, 시뮬레이션 툴을 이용하여 소신호 전달함수 특성을 구한다[2]. 회로 모델과 시뮬레이션 툴을 이용한 소신호 전달 함수 특성을 그림2에 나타내고 이를 근사화한 전달함수를 식(1)에 나타내었다.

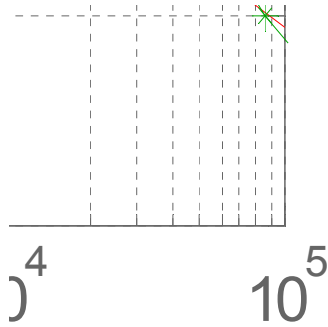


그림 2. LLC 컨버터의 소신호 특성 (주파수-출력전압)
 Fig 2. Small-signal characteristic of LLC converter (frequency to output voltage)

$$G_{vf} = \frac{k(1+s/\omega_{z1})}{(1+s/\omega_{p1})(1+s/\omega_{p2})} \quad (1)$$

where

$$k = 12.59, \quad \omega_{z1} = 2\pi \cdot 5kHz$$

$$\omega_{p1} = 2\pi \cdot 220kHz, \quad \omega_{p2} = 2\pi \cdot 10kHz$$

3. 디지털 제어기 설계

디지털 제어기 전달함수를 구하기 앞서 아날로그 보상 회로를 설계한다. 이를 z-domain으로 등가 변환하면 디지털 보상의 전달함수를 구할 수 있다. 이 때 제어기의 대역폭이 opto-coupler로 인해 약 100KHz로 제한되며, 이를 고려하여 제어기를 설계 한다.

신호검출 및 연산에 의한 지연은 최대 한 주기 지연으로 두어 모델링 한다. 이상의 전달함수 블록을 이용하면 시스템 루프 이득(T)이 식(2)와 같이 표현된다.

$$G_C(s) = \frac{w_i(1+s/\omega_{zc1})(1+s/\omega_{zc2})}{s(1+s/\omega_{pc1})(1+s/\omega_{pc2})} \quad (2)$$

where $w_i = 20000$

$$\omega_{zc1} = 2\pi \cdot 1KHz, \quad \omega_{zc2} = 2\pi \cdot 3KHz$$

$$\omega_{pc1} = 2\pi \cdot 1.5KHz, \quad \omega_{pc2} = 2\pi \cdot 50KHz$$

디지털 제어기는 식(2)의 아날로그 제어기를 MATLAB을 이용하여 디지털 제어기로 등가 변환 한다. 등가 변환할 때 샘플링 주파수는 최소 동작 주파수를 적용하여 변환 한다. 디지털 제어기 시스템 블록은 그림3과 같이 구성되며, 시스템 특성을 나타내는 루프이득(T)는 식(3)에 나타내었다.

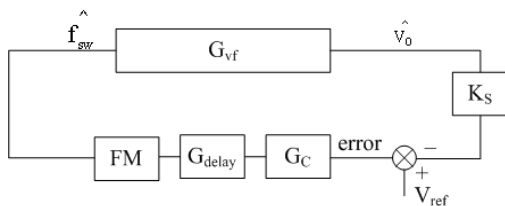


그림 3. 디지털 제어기 블록도

Fig 3. Block diagram of the digital controller



그림 4. 디지털과 아날로그 제어기의 루프 이득(T)
 Fig 4. Loop gain of the analog and digital controller

$$T = G_{vf}K_sG_cG_{delay}FM \quad (3)$$

아날로그와 디지털 제어기를 구성한 각각의 루프 이득은 그림 4에 나타내었으며, 크로스오버 주파수 근방에서 두 전달함수의 gain과 phase가 유사함을 확인하였다.

4. 디지털 제어기 구현

앞 장에서 설계된 디지털 제어기는 dsPIC33FJ16GSX02을 이용하여 구현된다. 제어를 위한 출력 전압 검출은 MCU내부의 10bit A/D 컨버터를 이용하며, 이를 내부 연산 함수를 이용하여 계산한 후 PWM 출력 기능을 이용하여 게이트 신호를 생성한다. 출력 전압 샘플링은 노이즈에 의한 영향을 줄이기 위해 그림5와 같이 스위칭 주기 시작후 1us 후에 한다. A/D변환 후 DSP core를 이용해 고속 연산을 하고 다음 이전 주기가 끝날 때 새로운 주기를 업데이트 한다. 전압 샘플링부터 주기 업데이트 까지 약 스위칭 한 주기가 지연 되므로 그림3의 제어 블록에는 최소 주파수 한 주기 지연(e^{-sT_s})을 G_{delay} 로 모델링 한다.

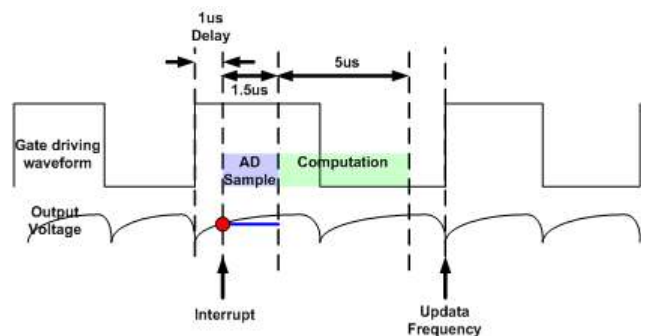


그림 5 MCU 내부의 동작 과정

Fig 5. The operation process in MCU

5. 실험 및 결과

디지털 제어기로 구현된 LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터의 동작을 검증하기 위해 480W 하드웨어를 구성하여 실험하였다. 제작된 회로의 설계 사양은 아래와 같다.

표 1. LLC 하프 브릿지 회로 파라미터

입력 전압(V_g)	400V	출력 커패시터(C_o)	13.5mF
출력 전압(V_o)	24V±2.4V	출력 전류(I_o)	20A
권선 비	19:2	공진 인덕턴스(L_r)	45uH
자화 인덕턴스(L_m)	180uH	공진 커패시터(C_r)	33nF

설계된 디지털 제어기는 아날로그 전달함수를 기반으로 구성되었다. 제어 루프의 크로스 오버 주파수(70Hz)가 스위칭 주파수(85KHz)에 비해 매우 작으므로 부하 변동에 대해 아날로그와 디지털의 성능이 유사하다. 하드웨어 실험 결과 0.3A~20A 또는 20A→0.3A로 부하 변동 하였을 때, 유사한 전압 제어 성능을 보임을 그림6~그림9를 통해 확인 할 수 있다.

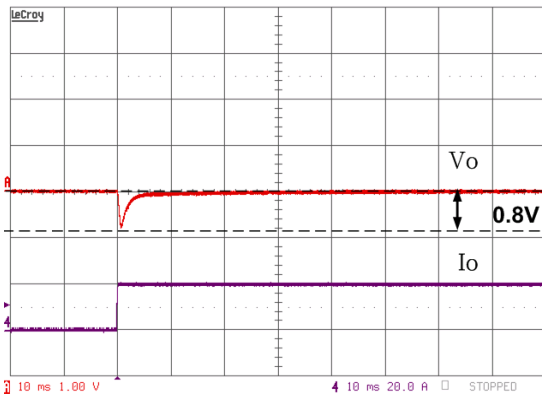


그림 6. 아날로그 제어기 적용 시 부하 스텝 업 응답
Fig 6. Load step up response with analog controller

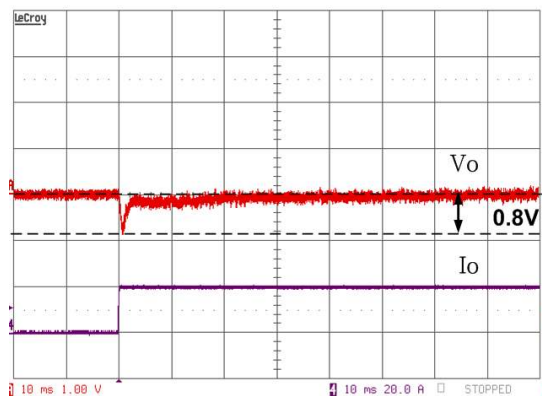


그림 7. 디지털 제어기 적용 시 부하 스텝 업 응답
Fig 7. Load step up response with digital controller

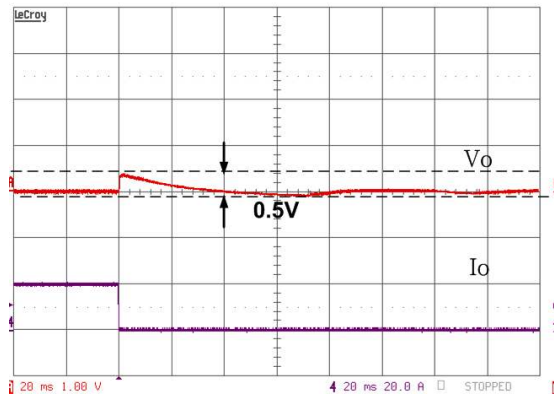


그림 8. 아날로그 제어기 적용 시 부하 스텝 다운 응답
Fig 8. Load step down response with analog controller

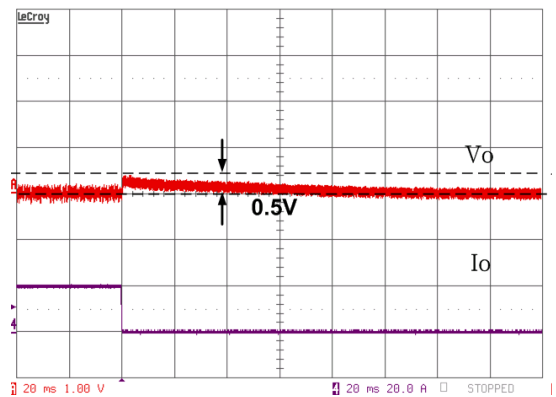


그림 9. 디지털 제어기 적용 시 부하 스텝 다운 응답
Fig 9. Load step down response with digital controller

6. 결론

본 논문에서는 오프라인 응용에서 많이 이용되는 LLC 하프 브릿지 공진형 컨버터의 디지털 제어기의 설계 및 구현에 대해 기술 하였다. 아날로그 소신호 모델과 제어기를 구성하고 이를 z-domain으로 등가 변환하여 디지털 제어기 전달함수를 구하였다. 설계된 회로는 Microchip사의 16bit MCU인 dsPIC33FJ16GSX02를 통해 구현되었으며, 480W 하드웨어를 통하여 아날로그와의 성능 비교 및 동작 검증을 수행하였다.

이 논문은 (주)삼성전자 프린터 사업부의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참고 문헌

- [1] Jeong-Gyu Lim, Soo-Hyun Lim, Hwi-Beom Shin, Se-kyo Chung, Hyun-Woo Lee, "Digital control of phase shifted Full-bridge DC/DC converter" KIPE, pp.137-139 2006
- [2] Bo-Yang Ph.D dissertation, "Topology investigation of front end DC/DC converter for distributed power system", 2003