

넓은 입출력 범위에서 동작하는 공진형 컨버터의 디지털 제어기 해석 및 설계

장진행*, 삼쿠마르, 김동윤, 최병조

LG전자*, 경북대학교

Analysis and Design of Digital Control for Resonant Converters with Wide Input and Load Variations

Jinhaeng Jang*, Pidaparthi Syam Kumar, Dongyun Kim, Byungcho Choi

LG Electronics*, Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문은 넓은 범위에서 변화하는 입력 전압과 출력 전류 조건에서 동작하는 공진형 직류-직류 컨버터의 디지털 제어기 해석 및 설계에 대해 기술한다. LLC 직렬 공진형 컨버터의 전력 변환단 동 특성을 기반으로 디지털 제어기를 해석 및 설계하고, DSP 기능을 내장한 16 비트 마이크로 컨트롤러를 이용하여 제어기를 구현한다. 개발된 디지털 제어기를 150W 공진형 컨버터 보드에 적용하여 설계 이론을 실험적으로 검증하고, 종래의 아날로그 제어기를 적용한 컨버터와의 장단점과 동 특성을 비교 검증한다.

1. 서론

직류-직류 컨버터의 제어 기술은 아날로그 기법에서 디지털 기법으로 급격히 발전하고 있다. 디지털 제어 기법은 고속 변환 및 연산 처리에 의한 제어기의 구현을 통하여 컨버터 보드를 구성하는 외부 부품 수의 획기적인 감소뿐만 아니라 효율적인 적응 제어 방식을 이용하여 컨버터의 효율과 동 특성을 최적으로 유지 할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 Emulation 방법을 이용하여 디지털 제어기를 설계한다. 넓은 범위의 입출력 동작 조건에 따라 크게 변화하는 공진 회로의 전력 변환단 동 특성을 고려하여 S-domain에서 제어기를 설계한 후[1], Bilinear 변환 기법을 적용하여 Z-domain의 디지털 제어기로 변환한다. 그리고, 연산 처리의 시스템 지연 시간과 A/D 변환기 분해능을 고려하여 디지털 제어 방식 컨버터의 시간 및 주파수 응답 특성을 확인한다.

2. 디지털 제어

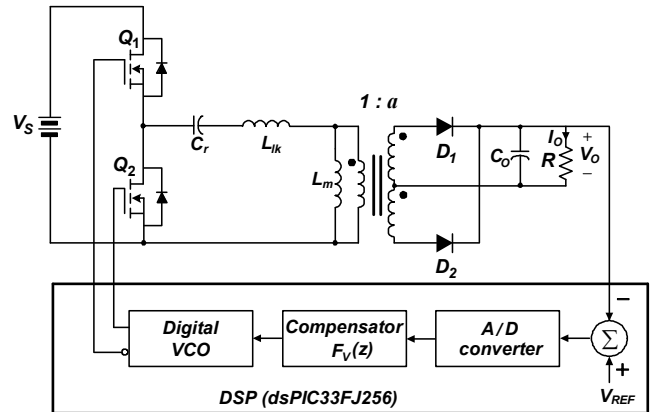
2.1 디지털 제어 공진형 직류-직류 컨버터

그림 1은 디지털 제어기를 적용한 공진형 직류-직류 컨버터의 회로 구성을 나타내고 있다. 디지털 제어기로는 40MIPS의 고속 연산 처리 가능한 DSP 기능을 내장한 16 비트 디지털 신호 마이크로 컨트롤러를 이용하여 구현하였으며, 1.04nsec의 LSB를 가지는 DPWM을 이용하여 주파수 제어에 필요한 VCO 기능을 구현하였다. 넓은 입출력 범위에서 동작하는 컨버터의 동작 영역은 그림 1에 명시된 입력 전압과 부하 전류의 변화에 따라 다음과 같이 4개의 동작점으로 정의하였다.

$$A: V_S = 340V \quad I_O = 6A \quad B: V_S = 390V \quad I_O = 6A$$

$$C: V_S = 340V \quad I_O = 1A \quad D: V_S = 390V \quad I_O = 1A$$

그림 2는 넓은 입력 전압 범위에서 동작하는 공진형 컨버터의 전력 변환단 동 특성에 대한 아날로그 제어 방식과 디지털 제어 방식에 대한 제어 대 출력 전달 함수를 비교하여 나타낸 그림이다.



$$V_S = 340 \sim 390V, \quad V_O = 24V, \quad I_O = 1 \sim 6A, \quad C_r = 47nF, \\ L_{lk} = 160\mu H, \quad L_m = 1.24mH, \quad a = 0.14, \quad C_o = 2000\mu F.$$

그림 1 디지털 제어기를 적용한 공진형 직류-직류 컨버터
Fig. 1 Digitally-controlled resonant dc-to-dc converter

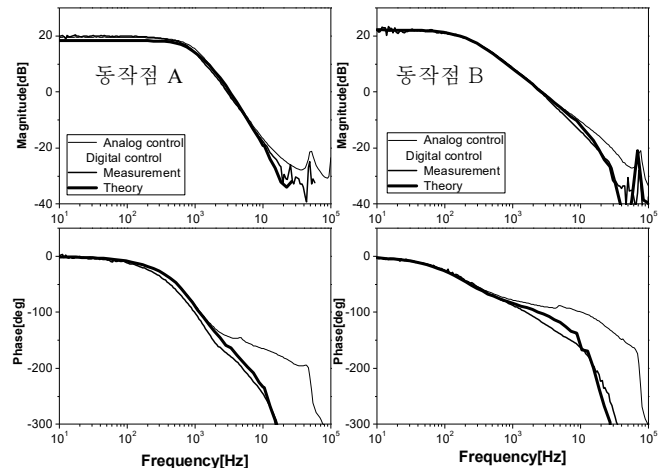


그림 2 공진형 컨버터의 전원단 제어 대 출력 전달 함수
Fig. 2 Control-to-output transfer function

디지털 제어 방식의 전력 변환단 전달 함수는 식 (1)과 같이 아날로그 제어 방식과 동일한 대략적인 구조로 나타낼 수 있으나, 디지털 제어 방식의 경우 그림 2의 위상 곡선과 같이, A/D 샘플링 주기 및 DPWM VCO 연산 및 처리에 소요되는 시간에 해당하는 양만큼 위상에서의 추가적인 지연을 나타내고 있다 [2].

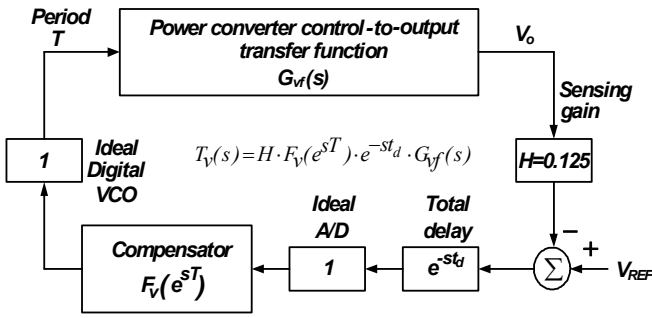


그림 3 디지털 제어 방식 블록 다이어그램
Fig. 3 Functional block diagram

$$G_{Vf}(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{f}_s(s)} = \frac{K_{vc} \left(1 + \frac{s}{\omega_{esr}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{pl}}\right)} \quad (1)$$

식 (1)의 공진형 컨버터 전력 변환단 전달 함수의 이중극점에 의한 위상 저하 특성을 보상하기 위해 식(2)와 같은 3-극점 2-영점 S-domain 전달 함수의 보상기가 채택된다 [1].

$$F_V(s) = \frac{1250(1+s/2\cdot\pi\cdot 800)(1+s/2\cdot\pi\cdot 1100)}{s(1+s/2\cdot\pi\cdot 15.9\cdot 10^3)(1+s/2\cdot\pi\cdot 19.9\cdot 10^3)} \quad (2)$$

2.2 디지털 제어기 설계

S-domain에서 설계된 제어기를 bilinear 변환 기법을 이용하여 최소 동작 주파수와 동일한 샘플링 주파수를 적용하므로써 Z-domain에서의 3-극점 3-영점 디지털 전달 보상으로 변환한다.

$$F_V(z) = 1.1150 - \frac{7.888}{z} + \frac{0.025}{z-1} + \frac{7.992}{z+0.111} \quad (3)$$

그림 4는 구현된 디지털 제어기의 실험 동작 파형이다. 출력 전압 레환 신호의 노이즈 구간을 지난 후 PWM 신호의 상승 구간에서 출력 전압 레환 신호를 10 비트 A/D 변환기로 센싱한 후 A/D 인터럽트 함수로부터 디지털 전압 보상기 및 VCO 연산을 실행하고 연산 결과를 다음 PWM 신호에 업데이트 한다. A/D 변환 및 연산 시간은 e^{-st_d} 로서 모델링에 포함하여 해석된다.

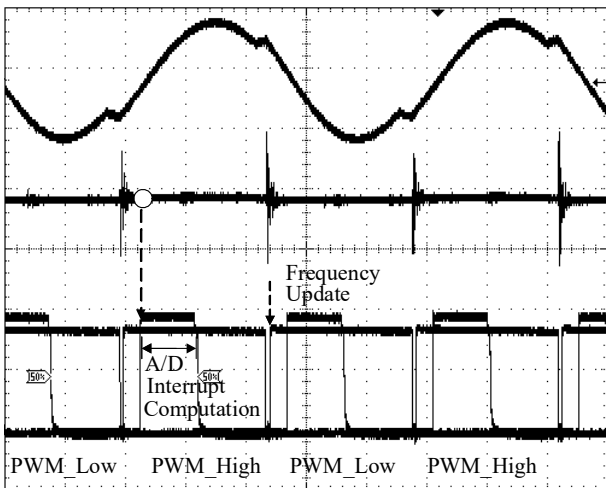


그림 4 A/D 인터럽트 및 연산 지연 시간
Fig. 4 A/D sampling interrupt and computational delay

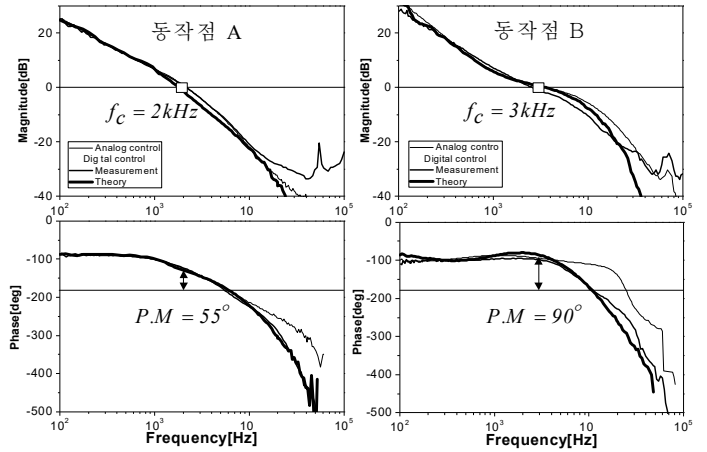
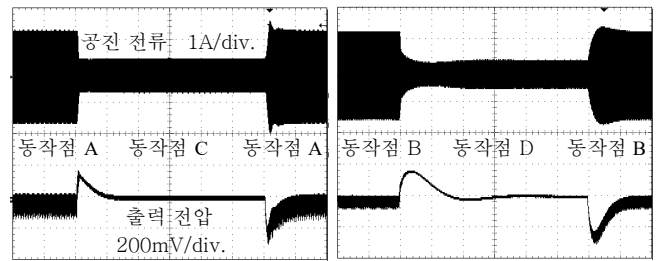
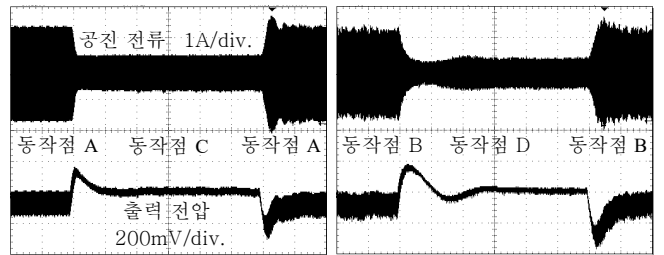


그림 5 루프 이득
Fig. 5 Loop gain



(가) 아날로그 제어 방식



(나) 디지털 제어 방식

그림 6 계단 부하 응답 특성
Fig. 6 Step load response

3. 디지털 제어기의 동 특성

그림 5의 루프 이득 파형으로부터 디지털 제어기의 경우 아날로그 제어기와 동일한 0dB 주파수에서 충분한 위상 여유를 가지며, 안정한 동작을 하는 것을 알 수 있다. 그림 6의 계단 부하 응답 측정 파형 또한 아날로그 제어기와 동일한 응답 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 결론

Emulation 설계 기법을 이용하여 디지털 제어기를 설계 하였고 연산에 의한 위상 지연의 효과와 A/D 변환기 및 PWM의 분해능을 고려하여 공진형 컨버터의 안정한 동작 과 빠른 응답 특성을 확인하였다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2012-H0401-12-1006)

참고 문헌

- [1] Jinhaeng Jang, Minjae Joung, Byungcho Choi, and Heung-guen Kim, "Dynamic analysis and control design of optocoupler-isolated LLC resonant converters with wide input and load variations," Proc. ECCE 2009, Sep. 2009, San Jose, CA.
- [2] Dragan Maksimovic and Regan Zane, "Small-signal Discrete-time Modeling of Digitally controlled DC-DC Converter", IEEE COMPEL Workshop, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA July 16-19 2006.