

양방향 공진형 컨버터의 디지털 제어

박민준, 정민재*, 최병조
경북대학교, 경북그린카부품진흥원*

Digital Control of Bidirectional Resonant Converters

Minjun Park, Minjae Joung*, Byungcho Choi
Kyungpook National University, GBITECH*

ABSTRACT

본 논문은 양방향으로 동작하는 직렬 공진형 DC-DC 컨버터의 디지털 제어기 해석 및 설계에 대해 기술한다. LLC 양방향 공진형 컨버터 전력 변환단 동특성을 기반으로 소신호 해석을 이용한 디지털 제어기를 설계하고, DSP를 이용하여 디지털 제어기를 구현한다. 디지털 제어기는 Emulation 방식을 이용하여 설계한다. 개발된 디지털 제어기를 300W급 공진형 컨버터 실험보드에 적용하여 디지털 제어방식의 전원단의 동특성 및 페루프 성능을 검증한다. 제어기 설계의 이론 검증 및 분석은 PSIM Simulation과 실험 측정으로 비교 검증한다.

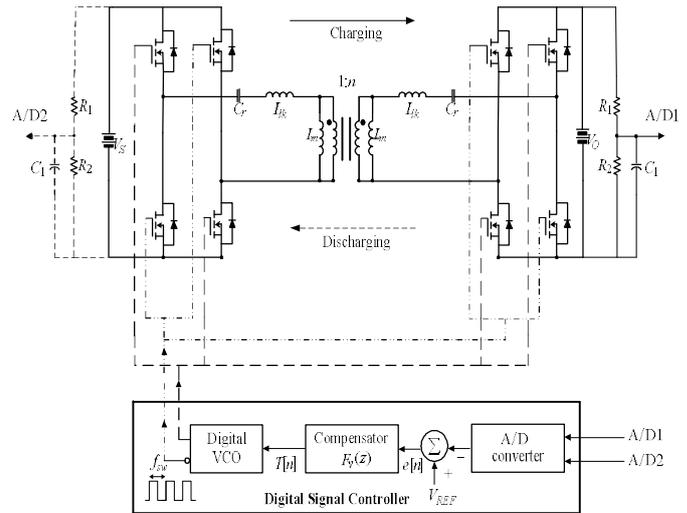
1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 넓은 주파수 대역에서 ZVS 특성을 갖는다. 또한 주파수 가변을 통한 넓은 전압 전달 비를 갖고 있어 다양한 전원 공급 장치로 사용되어 왔다. 최근 배터리 충·방전 시스템, 전기자동차 등 여러 분야에 양방향 LLC 공진 컨버터가 적용되고 있다 여러 분야에서 사용되고 있는 양방향 LLC 공진 DC-DC 컨버터의 제어 기술은 아날로그 제어기 설계의 안정성과 동특성을 향상시키면서 디지털 제어 기법으로 급격히 발전하고 있다. 이는 DC-DC 컨버터의 스위치 전원 공급 장치와 주변기기를 DSP(Digital Signal Processor)로 구현하여 하드웨어를 간략하게 구성하며 높은 전력 밀도를 달성할 수 있어서 기존의 아날로그 제어기를 대체하기 위한 목적으로 다양하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 DSP를 사용하여 Emulation 방식의 디지털 제어기 설계 방법을 소개한다. 특히 양방향 LLC 공진형 DC-DC 컨버터의 전력 변환단 동특성을 고려하여 S-domain에서 제어기 설계하여 Z-domain으로 Bilinear 변환 기법으로 디지털로 변환한다. 변환된 디지털 제어기 설계의 안정성을 확인한다.

2. 디지털 제어

2.1 디지털 제어 공진형 DC-DC 컨버터

그림 1은 디지털 제어기를 적용한 양방향 LLC 공진형 컨버터의 회로 구성을 나타내고 있다. 디지털 제어기로는 DSC기능을 TI(Texas Instrument)사의 프로세서를 사용하여 고속의 A/D 컨버터와 고 분해능의 DPWM(Digital Pulse Width Modulation)을 이용하여 주파수 제어가 가능한 VCO(Voltage Controlled Oscillator)기능을 구현하였다. 디지털 VCO이득 값을 고려하여 제어단을 설계하여야 한다.



$V_s=90-110V$, $V_o=90-110V$, $I_o=3-4A$, $C_r:200nF$,
 $L_{lk}:30\mu H$, $L_m:130\mu H$, $n:1$.

그림1 양방향 LLC 직렬 공진형 컨버터 회로

Fig. 1. Circuit diagram of Bidirectional LLC series resonant converter.

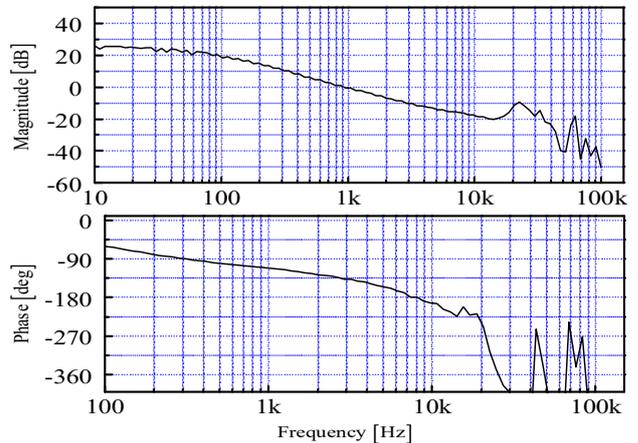


그림2 제어 대 출력 전달 함수

Fig. 2. Control-to-output transfer function.

그림 2은 양방향 LLC 공진형 컨버터의 제어 대 출력 전달함수의 양상이다. 전력변환단 소신호 특성을 보상하기 위한 보상의 극점 및 영점의 위치는 다음과 같다.

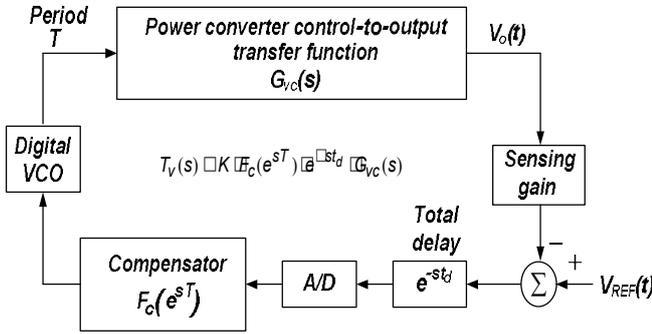


그림3 디지털 제어 블록 다이어그램

Fig. 3. Functional block diagram.

저주파 영역에서 위상을 감소시키는 극점을 보상하기 위한 두개의 영점을 배치하고, ESR 영점을 보상하기 위한 극점이 추가되며 두번째 극점이 고주파에 위치하는 3극점 2영점 구조의 보상기를 채택한다.

2.2 디지털 제어기 설계.

전력 변환단 전달함수를 이용하여 아날로그 제어 방식의 전달함수를 s-domain 기법으로 변환하여 사용이 가능하다. 여기서 Bilinear Transformation Method를 통하여 z-domain으로 변환시켰으며 병렬구조로 디지털 보상기를 설계하였다.

식 1은 양방향 LLC 공진형 컨버터의 제어 대 출력 전달함수의 소신호 특성의 식이다. 식 1을 이용하여 식 2는 저주파 영역에서 위상을 감소시키는 극점을 보상하기 위한 두개의 영점을 배치하고, ESR 영점을 보상하기 위한 극점이 추가되며 두번째 극점이 고주파에 위치하는 3극점 2영점 구조의 보상기 전달함수이다.

$$G_{vf}(s) \cong K_{vc} \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{esr}}\right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{pl}}\right) \left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \frac{s^2}{\omega_o^2}\right)} \quad \dots (1)$$

$$F_v(s) = \frac{K_m (1 + s/\omega_{z1})(1 + s/\omega_{z2})}{s(1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2})} \quad \dots (2)$$

$$(\omega_{z1} = 800\text{Hz}, \omega_{z2} = 1.1\text{kHz}, \omega_{p1} = 15.9\text{kHz}, \omega_{p2} = 19.9\text{kHz})$$

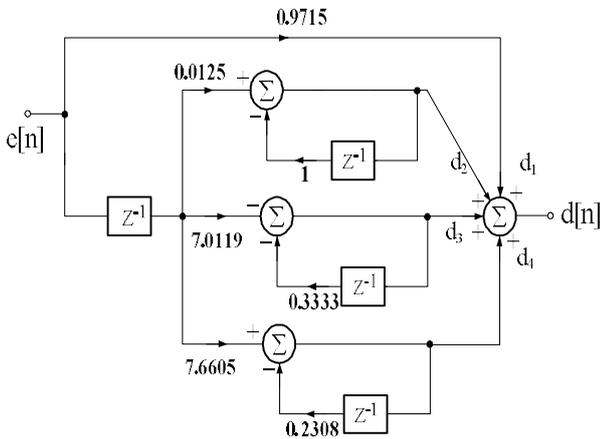


그림4 Z-domain 제어기 구성도

Fig. 4. Z-domain compensator design

$$F_v(z) = K_v \left(0.9715 + \frac{0.0125}{z-1} - \frac{7.0119}{z-0.3333} + \frac{7.6605}{z-0.2308} \right) \quad \dots (3)$$

디지털 피드백 보상기는 아날로그와 유사한 성능을 달성하기 위해 Emulation 방법을 통하여 z-domain으로 변화시키는데, 이는 연속 시간 영역의 설계와 동일하게 변화시켜주는 방법이다.

3. 디지털 제어기의 동특성

그림 5은 공진형 컨버터의 전력 변환단 동특성에 대한 루프 이득 파형을 나타낸 그림이다. 전력 변환단 동특성을 이용하여 효과적인 디지털 제어단을 설계하였으며, 루프 이득 파형으로부터 디지털 제어기의 0dB 주파수에서 충분한 위상 여유를 가지며, 안정한 동작을 하는 것을 알 수 있다.

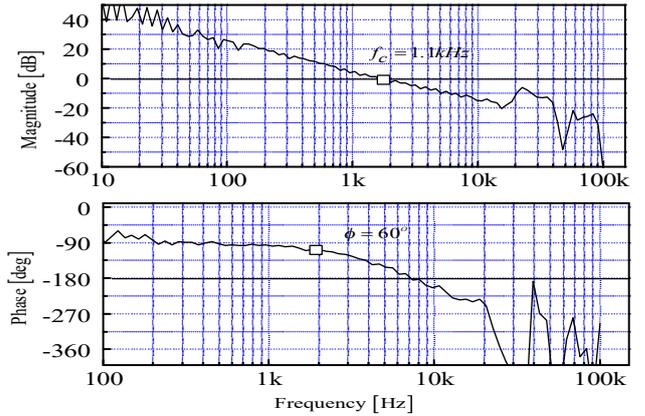


그림5 루프 이득

Fig. 5. Loop gain

3. 결론

본 논문은 양방향 LLC 공진형 컨버터의 우수한 성능을 달성하기 위하여 디지털 제어기 설계하였다. 전력 변환단의 동특성을 고려하여 s-domain에서 제어기 설계 후, Bilinear 변환 기법을 사용하여 z-domain으로 변환하였다. 디지털 제어기 설계에서 보이는 페르프 성능을 비교 분석하여 DSP 연산지연시간과 A/D 변환기의 분해능을 고려하여 동특성을 개선하였으며 A/D 인터럽트 및 지연시간의 값을 일정하게 유지하여 디지털 제어를 사용 시 발생하는 위상지연을 줄이는 역할로 설계하였다. 디지털 제어기는 Emulation 방식으로 설계하였고, 동특성 분석을 보드에 적용하여 충분한 위상 여유를 확인하였다. 또한 안정한 양방향 동작을 하는 것을 확인 하였고 PSIM Simulation으로 비교 검증하였다.

“본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0401-13-1005)”

참고 문헌

- [1] J. Jang, M. J. Jang, B. Choi, S. Hong, S. Lee, “Dynamic analysis and control design of optocoupler isolated LLC series resonant converters with wide input and load variations” Proc. IET Power Electronics, June 2012.
- [2] Jee-Hoon Jung, Ho-Sung Kim, Myung-Hyo Ryu, and Ju-Won Baek, “Design Methodology of Bidirectional CLLC Resonant Converter for High-Frequency Isolation of DC Distribution Systems” Proc. IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, no. 4, April 2013.