

넓은 입출력 범위에서 동작하는 디지털 제어 공진형 컨버터의 동특성 개선

박민준*, 장진행, 삼쿠마르*, 최병조*
경북대학교*, LG 전자

Improved Dynamics of Digitally-Controlled Resonant Converters with Wide Input and Load Variation

Minjun Park*, Jinhaeng Jang, Pidaparthy Syam Kumar*, Byungcho Choi*
Kyungpook National University*, LG Electronics

ABSTRACT

본 논문은 넓은 범위에서 변화하는 입력 전압과 출력 전류 조건에서 동작하는 디지털 제어 방식 공진형 DC-DC 컨버터의 동특성 개선에 대해 기술한다. LLC 직렬 공진형 컨버터의 아날로그 전력 변환단 동특성을 기반으로 150W 디지털 공진형 컨버터 실험보드에 적용하여 아날로그 제어 방식과 디지털 제어방식의 페루프 성능을 비교한다. 디지털 제어기는 Emulation 방식을 이용하여 설계한다. 제어기 설계의 이론 검증 및 분석은 PSIM Simulation과 실험 측정으로 비교 검증한다.

1. 서론

LLC 공진형 컨버터는 넓은 주파수 대역에서 ZVS 특성을 갖는다. 넓은 범위로 변화하는 입출력을 가지는 LLC 공진 컨버터는 주파수 가변을 통한 넓은 전압 전달 비를 갖고 있어 다양한 전원 공급 장치로 사용되어 왔다. DC-DC 컨버터의 제어 기술은 기존의 아날로그 제어기 설계의 안정성과 동특성을 향상시키면서 디지털 제어 기법으로 급격히 발전하고 있다. 또한, DC-DC 컨버터의 스위치 전원 공급 장치와 주변기기를 DSC(Digital Signal Controller)로 구현하여 하드웨어를 간략하게 구성하며 높은 전력 밀도를 달성 할 수 있어서 기존의 아날로그 제어기를 대체하기 위한 목적으로 다양하게 연구되고 있다. 본 논문에서는 DSC를 이용하여 기존의 아날로그 제어기 설계보다 향상된 공진형 컨버터의 페루프 성능을 가지는 디지털 제어기 설계 방법을 소개한다. 특히 넓은 범위에서 변화하는 직렬 공진형 DC-DC 컨버터의 제어기 설계에 대한 동특성 개선에 대해 기술 하였다.

2. 디지털 제어

2.1 디지털 제어 공진형 DC-DC 컨버터

그림 1은 디지털 제어기를 적용한 LLC 직렬 공진형 컨버터의 회로 구성과 넓은 입출력 범위에서 동작하는 컨버터의 동작 영역을 나타내고 있다. 디지털 제어기로는 DSC기능을 내장한 16-bit 마이크로 컨트롤러를 사용하여 고속의 A/D 컨버터와 고분해능의 LSB(Least Significant Bit)를 가지는 DPWM(Digital Pulse Width Modulation)을 이용하여 주파수 제어가 가능한 VCO(Voltage Controlled Oscillator)기능을 구현하였다.

그림 2는 아날로그 VCO와 디지털 VCO를 비교하여 나타난 그림으로 디지털 VCO 이득이 변화되는 것을 확인 할 수 있다. 아날로그와 디지털의 큰 차이는 선형성의 차이로 디지털에서는 변화하는 이득 값을 고려하여 제어단을 설계하여야 한다.

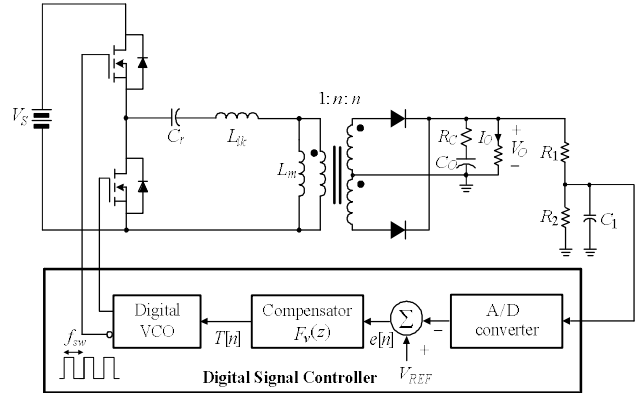


그림1 디지털 제어기를 적용한 LLC 직렬 공진형 컨버터 회로
Fig. 1. Circuit diagram of digitally-controlled LLC series resonant converter.

$V_S=340-390\text{V}$, $V_O=24\text{V}$, $I_O=1-6\text{A}$, $C_O:2000\mu\text{F}$,
 $R_C:15\text{m}\Omega$, $C_r:0.047\mu\text{F}$, $L_k:160\mu\text{H}$, $L_m:1240\mu\text{H}$,
 $n:0.14$, $R_1:1.74\text{k}\Omega$, $R_2:250\Omega$, $C_1:15\text{nF}$.

(동작점 A: 340V/6A, B: 390V/6A, C: 340V/1A, D: 390V/1A)

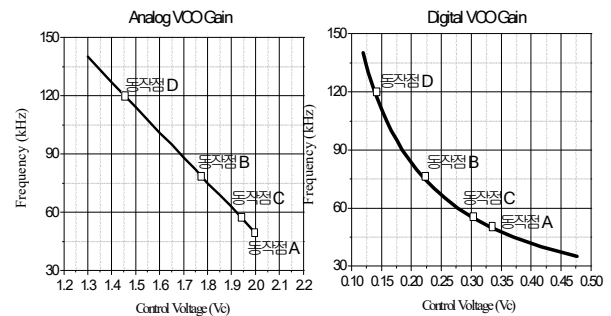


그림2 아날로그 VCO와 디지털 VCO 이득

Fig. 2. Analog and digital control VCO gain.

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

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

$$\omega_{z1} = 5\text{kr/sec}, \quad \omega_{z2} = 7\text{kr/sec}$$

$$\omega_{p1} = 75\text{kr/sec}, \quad \omega_{p2} = 95\text{kr/sec}$$

$$K_m = 15600$$

전력 변환단 전달함수를 이용하여 아날로그 제어 방식의 전달함수를 s-domain 기법으로 변환하여 사용이 가능하다.

여기서 Bilinear Transformation Method를 통하여 z-domain으로 변화시켰으며 병렬구조로 디지털 보상기를 설계하였다.

$$F_V(z) = K_V \frac{0.9715(z+1)(z-0.9512)(z-0.9324)}{(z-1)(z+0.3333)(z-0.2308)}$$

$$F_V(z) = K_V \left(0.9715 + \frac{0.0125}{z-1} - \frac{7.0119}{z-0.3333} + \frac{7.6605}{z-0.2308} \right)$$

2.2 디지털 제어 공진형 DC-DC 컨버터 설계.

그림3은 일반적인 PWM DC-DC 컨버터의 샘플링 방식과 디지털 제어 LLC공진형 컨버터에 제안된 샘플링 방식을 보여준다. 디지털 제어에서의 샘플링 방식은 공진형 컨버터의 페루프 성능에 결정적인 영향을 주는데 하프 브릿지를 이용한 푸시-풀(Push-Pull) 모드로 각 스위치 동작에 샘플링을 실행하여 개선된 페루프 특성을 기대할 수 있다. 이는 일반적인 PWM 컨버터 샘플링 방식에 비해 2배의 샘플링을 갖고 연산시간도 줄일 수 있다.

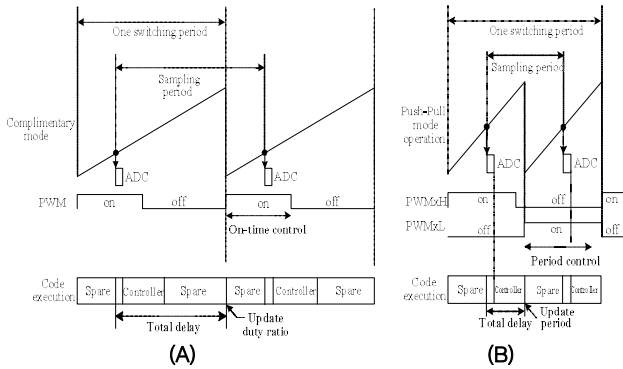


그림3 (A)기존의 PWM 컨버터 (B) Push-Pull 컨버터 샘플링 구성도
Fig. 3. Sampling schemes for digital control loop. (A) Conventional PWM converter, (B) Push-Pull converter.

그림 4는 개선된 A/D 인터럽트 및 연산 지연시간을 나타낸다. 개선된 A/D 인터럽트 및 연산 지연시간은 일정한 시간인 4.2μs의 주기를 갖도록 모델링 되었다. A/D 인터럽트 및 지연시간의 값을 일정하게 유지하여 디지털 제어를 사용 시 발생하는 위상지연을 줄이는 역할을 한다.

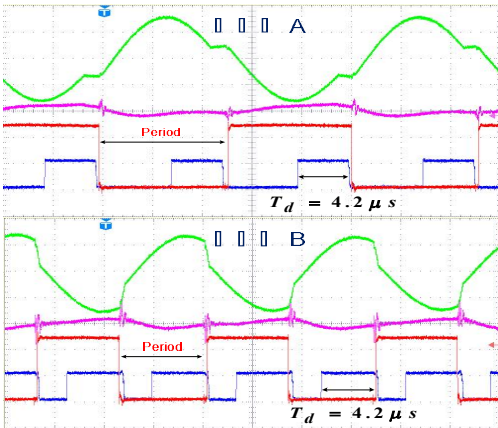


그림4 개선된 A/D 인터럽트 및 연산 지연시간.
Fig. 4. Improved A/D sampling interrupt and computational delay.

2.3 디지털 제어 공진형 DC-DC 컨버터의 동특성.

그림5는 개선된 A/D 동작 위치를 변화하여 공진형 컨버터의 전력 변환단 동특성에 대한 루프 이득 전달함수를 나타낸 그림이다. 개선된 A/D 동작 위치에 따른 연산 지연이 전력 변환단의 동특성 중 위상 지연을 감소시키는 영향을 페루프 성능에서 확인 할 수 있었다.

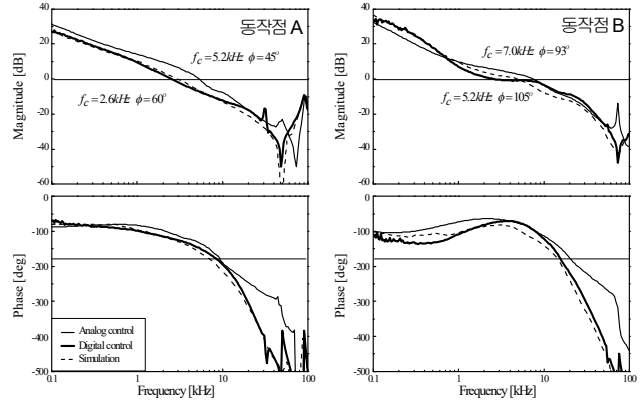


그림5 LLC 공진형 컨버터의 루프 이득
Fig. 5. Loop gain of LLC resonant converter.

그림 6은 공진형 컨버터의 전력 변환단 동특성에 대한 계단 부하 응답특성을 나타낸 그림이다. 아날로그 전력 변환단 동특성을 이용하여 효과적인 디지털 제어단을 설계하였으며, 이는 계단 부하 응답특성에서 아날로그의 계단 부하 응답 특성보다 개선된 성능을 확인 할 수 있다.

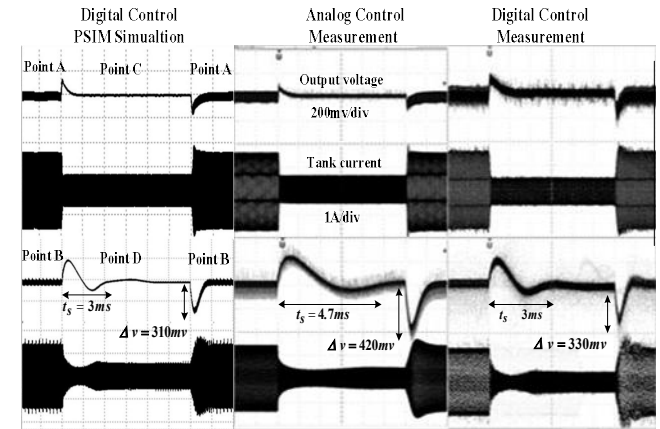


그림6 계단 부하 응답 특성
Fig. 6. Step load response .

3. 결론

본 논문은 아날로그 제어보다 우수한 성능을 달성하기 위하여 디지털 제어기 설계는 아날로그 기법에서의 전력 변환단의 동특성을 고려하여 s-domain에서 제어기 설계 후, Bilinear 변환 기법을 사용하여 z-domain으로 변환하였다. 기존의 디지털 제어기 설계에서 보이는 페루프 성능을 비교 분석하여 DSP 연산지연시간과 A/D 변환기의 분해능을 고려하여 동특성을 개선하였다. 디지털 제어기는 Emulation 방식으로 설계 하였고, 동특성 분석을 보드에 적용하여 빠른 응답특성을 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. 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] 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.