

LLC 공진형 컨버터의 제어기 설계를 위한 Control Hardware-in-the-Loop Simulation 시스템 구현

곽상규, 박화평, 정지훈
울산과학기술원(유니스트)

Control Hardware-in-the-Loop Simulation for a controller of LLC resonant converter

Sang Kyu Kwak, Hwa Pyeong Park, Jee Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

ABSTRACT

프로토타입 컨버터 구현 시 전압/전류 제어기의 안정성, 제어 알고리즘, 정상적인 게이트 전압 제어가 보장되지 않은 경우 이를 수정하기 위해 사용하는 기존의 Trial and Error 방식은 조정에 많은 시간 및 비용이 소모된다. 본 논문은 이러한 시간적 비용 저감을 위하여 Control Hardware-in-the-Loop Simulation(CHILS)를 이용하여 제어기의 정상 동작 여부와 성능을 실시간으로 검증하는 방법을 제안한다. 이를 위해 LLC 공진형 컨버터를 CHILS로 구현하여, 개발된 DSP 제어기의 성능을 검증하고자 한다. 제안된 실시간 모의시험에서는 LLC 공진형 컨버터를 Matlab/Simulink에서 모델링 하여, 실제 DSP 제어기의 신호를 컨버터 모델에서 입력받아 모의시험장치의 출력 결과를 관찰함으로써 제어기의 동작 특성을 확인하였다.

1. 서론

자동차, 항공, 전력시스템 등의 산업에서 제품이나 시스템 개발 시 테스트에서 발생하는 비용을 줄이기 위해 시뮬레이션 상에서 실제 시스템을 모델링하여, 실시간으로 시스템의 특성을 관찰할 수 있는 Hardward In-the-Loop Simulation(HILS) 방법이 활용되고 있으며, HILS의 활용 시 비용뿐만 아니라, 개발 및 시험 시간을 절약하고 공간의 제약이 있는 제품의 시험을 용이하게 수행할 수 있다.

최근 시뮬레이션 하드웨어와 소프트웨어의 발달로 고주파수(수십 kHz 이상)의 신호가 적용되는 전력전자 분야도 HILS로 구현이 가능하게 되어 모터 제어용 인버터 등 다양한 분야에 HILS가 활용되고 있다. 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터를 제어하기 위한 DSP 보드의 정상 동작을 확인하기 위해 CHILS를 사용한다. 이는 외부의 제어용 DSP와 실시간으로 동작하는 모의시험장치 내부의 컨버터 모델을 연계하여 DSP의 정상 동작 및 제어 성능을 확인할 수 있다. 그러므로 기존 Trial and Error 방법을 통한 실험적 제어기 성능 테스트 방법에 비해 빠르고 경제적으로 제어기 동작 성능을 시험할 수 있다. 제안한 CHILS를 이용한 제어기 성능 검증 방법을 OPAL-RT 사의 시뮬레이터(OP5600)와 RT-LAB 소프트웨어를 이용해 LLC 공진형 컨버터용 DSP 제어기의 성능을 검증하고자 한다.

2. CHILS 시스템 구성 및 컨버터 모델링

2.1 CHILS 시스템

HILS는 기존 시뮬레이션 방법과는 달리 시뮬레이션 계산을 PC에서 하는 것이 아니라 고성능의 실시간 계산 장치에서 이용하여 실시간으로 시스템의 특성을 파악할 수 있도록 해준다. 그림 1은 CHILS 시스템의 구성을 나타낸다.

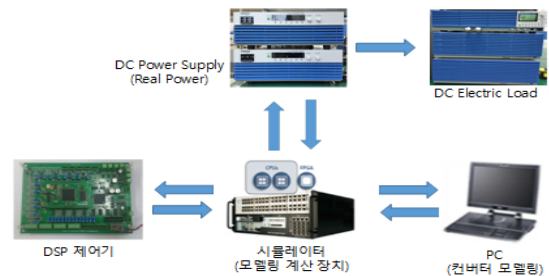


그림 1 CHILS 시스템 구성
Fig. 1 CHILS System Diagram

PC에서는 Matlab/Simulink을 이용하여 시스템을 모델링하고 RT-LAB 소프트웨어를 통하여 모델링이 컴파일 되어 모의 시험장치에 다운로드 된다. 모의시험장치는 PC로부터 받은 모델을 실시간으로 처리해 출력 결과를 PC로 전송한다. 모의시험장치는 DSP 제어기의 신호를 내부의 PWM Port를 통하여 PWM 신호를 전달받아 PC에서 받은 모델과 함께 실시간 모의 시험을 수행한다. 모의시험장치는 실시간 모의시험을 수행하면서 사용자가 지정한 값(Converter Output Voltage)을 DC Power Supply에 신호로 전송하고 DC Power Supply는 그 신호를 받아 실제 전력을 출력하여 전자 부하에 공급한다. DC Power Supply는 출력 전압, 전류 신호를 모의시험장치로 전송하고, 이를 DSP 제어기가 감지하여 원하는 스위칭 주파수를 만든다.

2.2 Electric Hardware Solver(eHS)

모의시험장치(OP5600)의 계산은 CPU Core Processor를 통해 이루어진다. 하지만 CPU Core의 계산능력(Simulation Sampling Time)은 수십 마이크로초로 한정되어 있어 고주파

신호를 사용하는 전력전자 하드웨어 모의시험에는 제한적이다. 하지만, OP5600 시뮬레이터 내부에는 Field Programmable Gate Array(FPGA) 칩이 내장되어 있어 약 100ns의 Sampling Time으로 모의시험이 가능하여 최대 100kHz 스위칭 주파수를 사용하는 시스템을 모의시험 할 수 있다. OPAL-RT 사에서 제공하는 FPGA를 사용한 전력전자 시스템 모의시험 방법을 Electrical Hardware Solver(eHS)라고 한다.

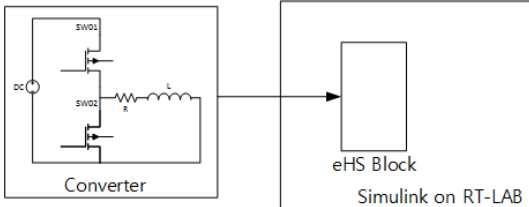


그림 2 eHS를 이용한 모의시험 개념도
Fig. 2 Simulation concept with eHS

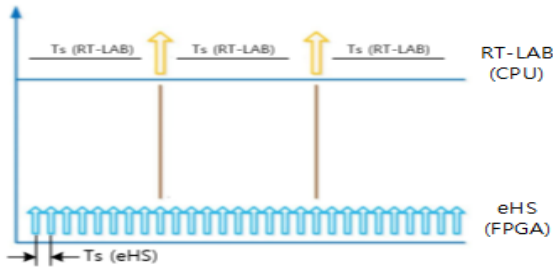


그림 3 CPU와 FPGA의 Simulation sampling time
Fig. 3 Simulation sampling time of CPU and FPGA

그림 2, 3은 eHS의 개념과 모의시험 계산 시간에 대해 나타낸다^[2]. 모의시험 시 eHS는 Converter 모델링만 빠른 시간내에 계산하여 신호를 RT-LAB에 전달하고, RT-LAB에서는 eHS Block을 포함한 모델링 전체를 계산한다.

2.3 LLC 공진형 컨버터 모델

제안된 LLC 공진형 컨버터 모델은 그림 4에 나타내었고, 100kHz PWM 신호를 받아 동작하는 MOSFET 스위치가 사용되었다. 표 1은 사용된 각 소자의 값을 나타내고, 그림 5는 컨버터 출력 전류와 전압의 파형, 표 2는 모의시험 결과를 나타내었다. 표 2의 값은 Matlab/Simulink에서 모의시험을 통해 얻은 결과치이다.

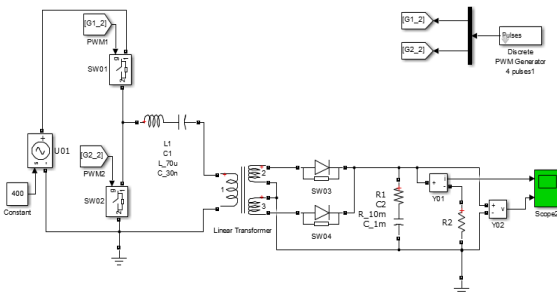


그림 4 LLC 공진형 컨버터 Matlab/Simulink 모델링
Fig. 4 LLC Resonant Converter modelling on Matlab/Simulink

표 1 LLC 공진형 컨버터 소자 값

Table 1 LLC Resonant Converter parameters

Resonant Inductance	70 μ F
Resonant Capacitance	30 nF
Output Capacitor	1 mF
ESR(Equivalent Series Resistance)	10 m Ω
Load	2 Ω

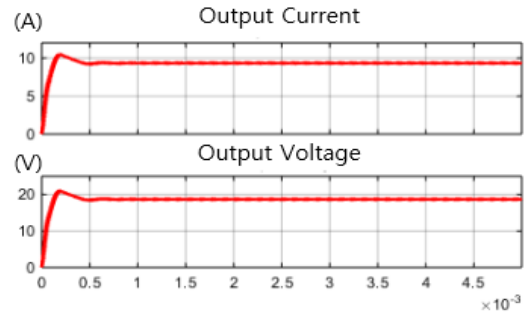


그림 5 출력 전류, 전압 모의시험 결과

Fig. 5 Simulation result of output Current and voltage

표 2 입력 및 출력 결과

Table 2 Input and output result

Simulation Sampling Time	100 ns
스위칭 주파수	100 kHz
입력전압	400 VDC
출력전압	18.7 VDC
출력전류	9.35 ADC

3. 결론

본 논문에서는 컨버터용 제어기 설계 시 테스트를 위한 LLC 공진형 컨버터의 CHILS 구현 방법을 제안하고, CHILS의 각 구성요소와 eHS에 대해 알아보았다. Matlab/Simulink에서 모의시험을 통하여 LLC 공진형 컨버터의 모델의 정상 동작을 검증하였고, 실시간 모의시험장치에서의 구동도 확인할 수 있었다. 학회발표 시에 모델을 CHILS로 구현하여서 실시간으로 모델의 동작 특성을 파악해 DSP 제어보드와의 하드웨어 연계를 통하여 CHILS의 타당성을 검증할 예정이다.

This work was supported by the 2016 Research Fund (1.160004.01) of UNIST(Ulsan National Institute of Science & Technology)

참고 문헌

- [1] Jean Bélanger, "Validation of eHS FPGA reconfigurable low-latency electric and power electronic circuit solver", Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp 5418 - 5423, 10-13 Nov. 2013,
- [2] OPAL-RT eHS User Guide, OPAL-RT Technol., Montreal, QC, Canada