

Hardware-In-the-Loop 시스템을 이용한 MPPT 제어 알고리즘 연구

김병만*, 이동기**, 정영석***, 유권중***, 최주엽*, 최익*
*광운대학교, **(주)다한테크, ***한국에너지기술연구원

A Research of MPPT Control Algorithm using Hardware-In-the-Loop System

Byeong-Man Kim*, Dong-Gi Lee**, Young-Seok Jung***, Gwon-Jong Yu***, Ju-Yeop Choi*, Ick Choy*

Abstract - A very complicated real system can be simulated using hardware-in-the-loop (HIL) system in a virtual environment. Therefore, HIL system can speed up research and development process with a little effort. Also, current DSP for utility interactive photovoltaic generation system adopts floating point process type, which is easy to use for number crunching. However, fixed point process DSP, TMS320F2812, has high control speed and is rather inexpensive. This paper presents more efficient method for MPPT control using TMS320F2812 along with HIL system.

1. 서 론

최근 전기전자분야에서 연구 및 개발과정에 있어 개발 기간 단축이 회사의 경쟁력이라 해도 과언이 아닐 만큼 가장 중요한 사항이 되고 있는 추세이다. 이러한 추세는 보다 빨리 신제품을 출시하여 초기시장 점유를 통해 경쟁력을 확보하기 위한 기업간의 경쟁에 의한 것이라 할 수 있다. 이러한 추세에 대해 우리나라에서는 단지 해당 실무자의 능력 및 성실성만을 의존해 개발기간 단축에 역점을 두고 있는 것이 현실이다. 이에 반해 선진국의 경우 개발 프로세스(process)적인 차원에서 시행착오를 최소화할 수 있는 시스템 연구에 역점을 두고 있다. 이러한 연구는 여러 분야에서 진행되고 있으며 그러한 사례 중 하나인 HIL(Hardware-In-the-Loop)시스템에 대해 본 논문에서 적용하여 보았다. HIL시스템을 적용하는 목적은 개발자가 구현하려는 알고리즘에 대해 실제구현 하는데 소요되는 시간 또는 비용적인 측면에 대해 시행착오를 최소화하기 위한 목적이다. 이러한 HIL시스템을 구성하기 위해서는 실시간에 가까운 고속의 인터페이스 기술이 수반되어야 하므로 처리속도의 눈부신 발전에도 불구하고 처리속도의 한계에 의해 현재 공장 플랜트와 같은 응답특성이 빠르지 않는 제어 대상만이 적용되어지고 있다. 이에 반해 태양광 발전시스템의 경우 특성상 빠른 응답특성을 가지고 있어야 하며 개발자가 MCU환경에서 하드웨어에 대해 직접적으로 코드를 작성해 디버깅을 할 수 있어야 하므로 적합하지 않다고 판단할 수 있다. 그러나 이러한 사항에 대해 미국의 Visual Solution사에서는 전력전자 및 정보통신 분야에 적합하

도록 VisSim/ECD이라는 설계툴을 제공하여 DSP칩과 같은 구체화된 하드웨어적인 환경에서도 HIL시스템을 적용할 수 있도록 지원하고 있다. 그리고 태양광 발전시스템의 PCS(Power-Conditioning-System)에 사용되어지는 MCU의 경우 우수한 성능을 갖춘 MCU가 대량생산 체제에 의해 비교적 저렴한 가격으로 판매되고 있다. 한편 DSP칩 시장의 경우 해당하는 응용분야별로 전용의 DSP모델이 생산되고 있는 실정이다. 이에 대해 태양광 시스템의 PCS의 경우 제어성능적인 측면뿐만 아니라 가격 경쟁력적인 측면에서도 DSP칩을 채택하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그리고 미국 TI사는 전력전자 전용 DSP모델인 TMS320F2812를 전격 출시하고 있다.

따라서 본 논문에서는 TMS320F2812를 이용하여 보드를 제작하였고 태양광 발전시스템의 PCS에서 반드시 사용되어지는 MPPT제어에 대해 VisSim/ECD라는 설계툴을 이용하여 HIL시스템을 적용함으로써 새로운 개념의 연구개발 프로세스를 제공하려 하였고 하드웨어적인 Prototype을 구현해 보고자 한다.

2. HIL 시스템에 대한 개요

2.1 HIL 시스템의 정의

HIL시스템의 정의는 실제 하드웨어와 PC기반의 가상 모델링과 실시간 인터페이스를 통해 시뮬레이션할 수 있는 시스템을 뜻한다. 여기서 가상 모델이란 개발자가 공장 플랜트와 같은 대규모 설비의 경우 적합한 제어기를 설계해야 하는 경우나 그와 반대로 제작한 제어기의 검증 및 성능 테스트를 하기 위해 아직 만들어지지 않은 설비를 PC기반의 프로그램 환경에서 개발자가 모델링작업을 한다는 것을 뜻한다. 또한 이러한 시스템을 구성하기 위해서는 필수적으로 실제 하드웨어와 가상 모델링 간에 실시간으로 인터페이스가 요구되어진다. 이러한 인터페이스는 기능상 크게 2가지 방식으로 구분할 수 있는데 첫 번째 방식은 실제 하드웨어와 가상 모델링 간에 실시간 제어를 위하여 현재 제품화되어 있는 실시간 인터페이스 보드를 활용해 구성하는 것이 방식이 있고 두 번째 방식으로는 상대적으로 실시간 통신이 필요치 않은 프로세스나 제어기의 동작을 위해 시리얼 통신을 이용하는 방식이다.

아래의 그림1은 PC환경에서 VisSim을 통해 제어기를

모델링하여 실시간 인터페이스 보드를 통해 실제 하드웨어와 HIL시스템을 구성하였을 때를 나타낸다.



그림1 HIL의 블록도 (실시간 인터페이스 보드)
Fig.1 Block of HIL (Real Time Board)

이러한 구성 방식은 개발자가 실제 제어 대상에 대해 제어기를 제작해야 하는 경우 실시간 인터페이스 보드의 입출력을 통한 신호를 바탕으로 시뮬레이션 함으로써 제어 대상에 적합한 알고리즘 및 제어 파라미터를 설정하는데 적합하다.

아래 그림2의 경우는 실시간 인터페이스 보드와 시리얼통신을 함께 구성하였을 때를 나타낸다.



그림2 HIL의 블록도 (실시간 인터페이스 보드 & 시리얼포트)
Fig.2 Block of HIL (Real Time Board & Serial Port)

만약 개발자가 제어장치를 제작 완료하였을 경우 제어 대상이 공장 플랜트 설비와 같이 단기간에 구성하기 어려운 경우 등가적인 특성을 나타내는 모델링을 VisSim에서 구성하여 실제 제어장치에서 On/Off와 같은 버튼 동작에 대해 PC환경에서 모델링의 동작 상태를 확인할 수 있으며 그에 따른 피드백 신호에 대해 실시간 인터페이스 보드를 사용하여 제어장치의 제어특성 등을 파악하는데 적용 가능하다.

2.2 태양광발전 시스템에 적합한 HIL시스템의 구현

지금까지 언급한 HIL시스템의 경우 인터페이스가 실시간으로 통신이 이루어져야 하는 것이 필수적이다. 1장에서 말한 바와 같이 인터페이스의 기술은 최근 눈부시게 발전하고 있음에도 불구하고 한계가 있을 수 밖에 없으므로 빠른 응답특성을 요구하는 전력전자 기반의 시스템에서는 아직 원칙적인 HIL시스템을 적용하기 힘든 실정이다. 하지만 개발자가 임의로 모델링 작업을 할 수 있으므로 등가적인 모델링을 구성함으로써 최근 정보통신 분야에서 쟁점화 되고 있는 임베디드 시스템의 경향에 맞추어 상위 레벨의 시스템을 구현하는데 있어 HIL시스템은 매우 적합하다고 사료된다. 그리고 태양광 발전시스템에 적용하기 위해서는 위의 방식과 달리 MCU 단계의 하드웨어적 차원에서 개발자가 코드를 작성하여 테스트 및 디버깅을 할 수 있는 환경이 필수적이다.



그림3 HIL의 블록도 (JTAG Hotlink)
Fig.3 Block of HIL (JTAG Hotlink)

이에 대해 VisSim/ECD에서는 그림3과 같이 응용된 HIL시스템을 구성할 수 있도록 기능을 지원한다. 그리고 일반적으로 제품개발에 관련한 연구 및 개발 관련 업무의 진행 순서에 있어 다스간에 차이는 있겠으나 일반적으로 개발 초기 하드웨어의 측면에서는 회로도를 작성하고 그에 따른 PCB작업을 수행한 후 부품을 실장하고 소프트웨어 작업을 수행한다. 그리고 발생하는 문제점에 대해 회로도를 변경하고 다시 PCB 수정작업과 함께 부품을 실장해야 한다. 이러한 과정을 업무의 사항에 따라 수차례 반복하는 것이 일반적이다. 이러한 과정에서 발생하는 시간적 소요 및 비용적인 측면은 개발기간 단축의 관점에 있어 문제점이 될 수 있다. 이에 대해 HIL시스템을 구현하면 최소한의 DSP보드만을 이용하므로 초기개발 시에 발생하는 시행착오를 최소화 하는데 효과적이다.

3. MPPT제어 실험을 위한 시스템 구성

위에서 말한 바와 같이 태양광 발전시스템에서 PCS는 태양광 어레이에서 최대의 전력을 얻기 위한 MPPT제어 알고리즘이 필수적으로 사용되어진다. 아래 그림4는 PCS의 MPPT제어에 대해 TMS320F2812를 이용하여 실험하기 위한 시스템의 구성도를 나타내준다.

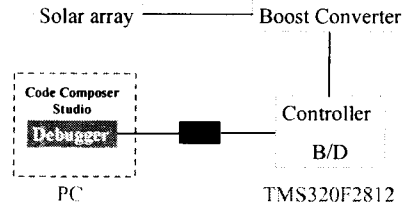


그림4 태양광 발전 시스템의 구성도
Fig.4 Block Diagram of the Solar System

그림4의 Solar array의 경우 3.2kW급 태양전지 어레이를 설치하였다는 것을 가정하였다. 실제 실험을 위해서는 태양광 어레이를 설치하여야 하나 태양전지 시뮬레이터를 이용하여 실험할 수 있다. 그리고 MPPT제어를 하는데 있어 Boost Converter만을 이용하거나 인버터를 이용하는 두가지 방식으로 구현할 수 있는데 본 논문에서는 Boost Converter만을 이용하여 MPPT제어를 구현하였다. 그리고 TMS320F2812를 이용하여 Controller B/D를 제작하는 경우 TI사에서 제공하는 JTAG 에뮬레이터가 있어야 하며 PC환경에서는 개발자의 코드를 컴파일 및 디버깅하는데 사용되는 Code Composer Studio가 설치되어야 한다.

그러나 위의 모든 사항에 대해 구성을 하여 실험을 하기 위해서는 개발초기에 시간적인 측면이나 비용적인 측면에서 부담이 아닐 수 없다. 이에 대해 본 논문에서는 Controller Board에 대해 TMS320F2812 DSP칩의 기본적인 운영을 위한 최소한의 보드만을 제작하였으며 Solar array는 태양전지 시뮬레이터를 구입하여야 하나 초기개발에 있어 비용증가를 감안하여 VisSim/ECD프로그램

환경에서 모델링하였으며 또한 시행착오를 최소화하기 위해 Boost Converter도 모델링하였다. 그리고 PC 기반에서는 Code Composer Studio를 사용하여 코드를 직접 작성하지 않고 VisSim/ECD의 자동C-Code생성 기능을 활용하였고 툴 자체에 내장된 도스버전 컴파일러를 사용하여 시뮬레이션 및 디버깅을 할 수 있도록 구성하였다.

3.1 Solar array에 대한 모델링

Solar array는 모듈에 대해 직병렬로 연결하여 빛이 조사되면, 태양전지를 구성하는 반도체 내의 전자들을 자유롭게 만들어 N-type 실리콘에는 음전하를, P-type 실리콘에는 양전하를 모이게 하여 전류가 생성한다. 이렇게 생성된 전류는 일사량과 온도에 의하여 비선형 특성을 보이게 된다. 본 논문에서는 일사량에 따른 Boost Converter의 MPPT 성능을 알아보기 위해 array의 온도를 25℃로 설정하였다.

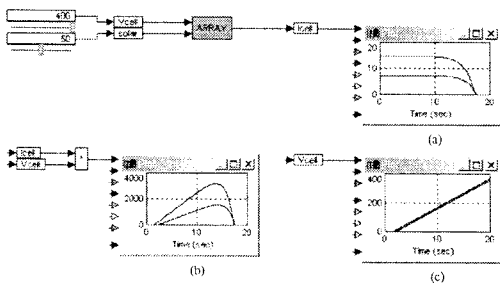


그림5 Solar array의 모델링
Fig.5 Modeling of the Solar array

그림5(a)는 100%일사량과 50%일사량에 따른 어레이의 I-V 특성곡선을 나타내며 그림5(b)는 I-V 특성곡선을 바탕으로 한 전력곡선을 나타내 주고 있다. 그리고 그림 5(c)는 시간에 대한 셀전압의 크기에 대한 그래프를 나타내 준다.

3.2 Boost Converter에 대한 모델링

Boost Converter 모델링의 스위칭 주파수는 8kHz로 선정하였으며 듀티 사이클에 대해 스위치가 켜져 있는 시간과 꺼져 있는 시간에 대한 모델링을 분류하여 TMS320F2812 제어보드에서 발생하는 PWM신호에 대해 동작할 수 있도록 구성하였다. 그리고 Solar array에서 공급되는 전력에 대해 Boost Converter의 입출력 관계식에 의해 출력되는 DC에 해당하는 전압성분과 L-C 필터에 의해 발생하는 리플전압 성분의 합으로 전압이 출력하도록 모델링하였다.

4. TMS320F2812에 대한 고찰

TMS320F2812 DSP는 저전압(1.8[V] core, 3.3[V] I/O) DSP이며 비교적 큰 용량의 Flash 메모리와 SARAM 그리고 Boot ROM등을 내장하고 있어 마이크로 컨트롤러 개념을 가진 DSP칩이라고 말할 수 있다. 그리고 PWM

신호를 출력할 수 있는 이벤트 매니저(EVA, EVB)와 12비트의 고속 AD 컨버터와 그 외에 다양한 Peripheral을 지원하고 있어 태양광 발전시스템의 PCS와 같은 전력전자관련 업무에 매우 적합하다. 그리고 TI사에서는 제품의 매출효과를 극대화하기 위해 협력회사(3rd Party)와의 공조체제로 Application Note를 무료로 제공하고 있으며 생산하는 DSP칩에 대한 evaluation보드를 제공하고 있다. 이에 대해 본 논문에서는 보다 효율적인 업무를 위해 아래 그림 6과 같이 보드를 제작하였다.

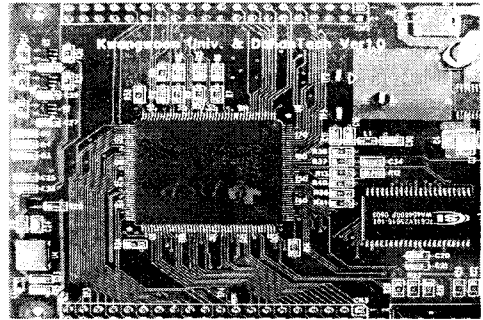


그림6 TMS320F2812 테스트 보드
Fig.6 TMS320F2812 Test Board

그리고 Boost Converter를 이용한 MPPT제어 알고리즘을 실험하기 위해서 TMS320F2812(176-PIN PGF)에서 사용한 핀은 다음과 같다.

- Solar array의 출력단 전압 및 전류 값을 입력받기 위한 2개의 ADC채널 (ADCINA0(174), ADCINA1(173))
- Boost Converter의 출력단 전압 및 전류를 입력받기 위한 2개의 ADC채널(ADCINA2(172), ADCINA3(171))
- Boost Converter의 PWM신호출력 핀 (T1PWM_T1CMP (102))

5. MPPT제어에 대한 고찰

5.1 주요 사항

MPPT제어 시뮬레이션을 위해 구성된 VisSim/ECD의 블록(Compound Block)은 그림 7과 같다.

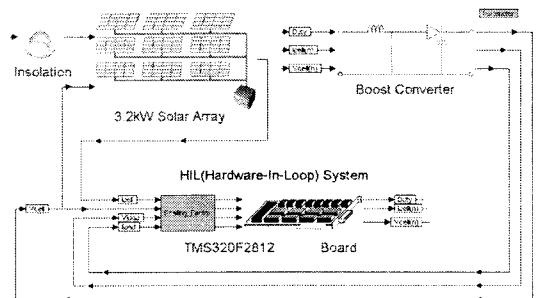


그림7 MPPT제어에 대한 HIL시스템
Fig.7 HIL System for MPPT Control

그림7은 크게 일사량을 실시간으로 조정할 수 있는 Insolation블록과 3.2kW Solar Array블록 그리고 Boost Converter 블록으로 구성되어 있으며 각 블록들은 해당하는 모델링이 내장되어져 있다. 그리고 Solar Array와 Boost Converter의 전압 및 전류를 센싱하기 위해 TMS320F2812보드의 외부 L/O 전압레벨(3.3V)에 맞도록 스케일링한 Scaling_Factor블록이 있으며 TMS320F2812 Board블록은 센싱한 신호에 대한 필터 및 평균치(8Hz)를 구하는 블록과 PWM 신호를 생성해주는 블록 그리고 MPPT제어 알고리즘이 내장되어 있는 블록으로 구성하였다. 이에 본 논문에서는 그림7의 TMS320F2812 Board블록에 대해 VisSim/ECD의 자동코드 생성기능을 이용하여 C-codc를 생성하고 컴파일 및 디버깅하였다.

5.2 MPPT 제어 알고리즘에 대한 고찰

태양광 발전시스템에서 보다 우수한 성능의 MPPT제어를 위해 많은 알고리즘이 연구되고 있다. 이러한 알고리즘 중 본 논문에서는 P&O기법을 이용하였다. P&O기법은 태양전지 전압 값을 주기적으로 증가, 감소시킴으로써 최대전력을 추종하는 방식이다. 비교적 다른 기법과 달리 추정 파라미터가 적고 간단한 피드백 구조를 갖는 장점이 있는 반면 일사량이 급격하게 변하는 것과 같은 외란에 대해 매우 약점이 있다. 이러한 P&O기법에 대해 5.1절에서 말한 바와 같이 그림7의 TMS320F2812 Board블록 내부에 구성하였다.^[1]

5.3 초기 설치동작에 대한 고찰

3.2kW급 Solar array에 대해 Boost Converter를 연결하지 않은 상태에서 나타나는 전압은 셀의 최대오픈전압을 나타낸다. 만약 Boost Converter를 Solar array에 연결하게 되면 부하에 해당하는 저항값에 의해 전류가 흐르게 되고 I-V특성곡선에 의한 전압 값이 Solar array에 인가되어진다. 본 논문에서는 0.5초 이후에 MPPT제어 알고리즘이 동작할 수 있도록 구성하였다.

6. HIL 시스템의 구현

그림8은 시뮬레이션결과를 나타낸다.

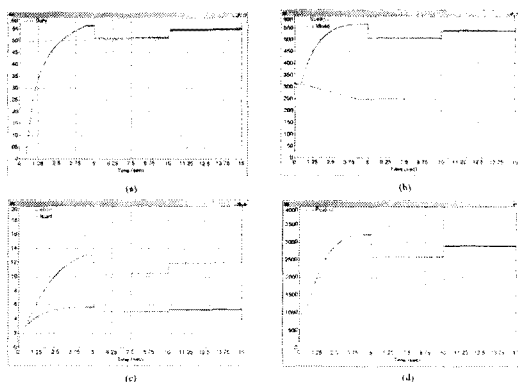


그림 8 시뮬레이션 결과 파형
Fig 8. A result of Simulation

5.3절에서 말한 바와 같이 MPPT제어를 하기 이전의 시간(0.5초)에서 Solar array의 출력전압은 약 320V이며 전류 값은 약 3A이다. 본 논문에서는 초기에 100% 일사량에 대해 MPPT제어가 동작하도록 구성하였으며 5초에서 일사량을 80%로 그리고 8초에서 90%로 급변하도록 설정하여 시뮬레이션하였다.

그림8(a)는 Boost Converter의 듀티 사이클(0<D<1)의 변화를 나타내었고 그림8(b)는 Boost Converter의 입출력 전압의 크기를 나타내 주는 그래프이다. 입력전압의 경우 약 250V정도에서 최대전력을 출력하고 이에 따른 출력 전압 값의 변화를 알 수 있다. 그림8(c)는 Boost Converter의 입출력 전류 값을 나타내며 그림8(d)는 출력 전력값을 나타내 준다.

7. 결론

본 논문에서는 외국에서 효율적인 개발 프로세스 방식으로 꾸준히 연구되고 있는 HIL시스템에 대해 VisSim/ECD를 이용하여 태양광 발전 시스템의 MPPT 제어에 적용하여 Prototype을 구성하여 보았다. 그리고 기존의 연구개발 프로세스에서 발생하는 시간 및 비용적인 시행착오에 대해 HIL시스템을 적용함으로써 최소화할 수 있으므로 시간 및 비용적 측면에서 효율적이 연구 개발 과정을 제시하였다. 또한 이러한 HIL시스템의 구현은 마치 실험하는 것과 같은 시뮬레이션을 구현할 수 있으므로 가혹한 환경에서의 테스트 또는 실제 구현하기 어려운 상황에 대한 반복 테스트를 하는 경우에도 적용 가능하다.

8. 향후 과제

현재 생산되고 있는 PCS의 MPPT제어방식은 Boost Converter에서 일정한 전압을 유지하고 이후에 연결되는 단상 인버터를 이용하여 MPPT제어를 하는 방식이 대부분이다. 이에 대해 인버터에 대한 모델링을 포함한 HIL시스템을 구성하여 시뮬레이션 및 검증한 후 Solar array에 대한 모델링에 대해 태양전지 시뮬레이터인 APL(Active Power Load)로 대체하고 Boost Converter 및 인버터에 대한 하드웨어를 제작한 후 최종적으로 필요에 따라 C-Codc에 대한 최적화 작업을 해야 한다고 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, Data Manual, TI, 2003.
- [2] 김병만, 이동기, 정영석, 유권중, 최주엽, 최익, "TMS320F2812 DSP를 이용한 MPPT 제어 알고리즘 연구" 2005년도 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.57-60.
- [3] 유권중, 김기현, 정영석, 김영석, "MPPT제어 알고리즘 고찰 및 효율시험 평가법" 전력전자학회논문지, Vol. 6 No. 2, pp.164-172. 2001. 4
- [4] 이우택, "실시간 Hardware In the Loop 시뮬레이션 기술 동향" 전력전자학회지, Vol.10 No.4 pp.45-47. 2005. 8