
태양광발전시스템의 효율적 운용과 관리를 위한 모니터링 및 제어 시스템

빈재구* · 강필순** · 김철우*

Monitoring and Control System for Efficient Operating and Management of Photovoltaic Power Generation System

Jae-Gu Bin* · Feel-soon Kang** · Cheul-U Kim*

이 논문은 2006년 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-331-D00196)

요 약

신재생 에너지 자원의 하나로 각광받고 있는 태양광발전시스템은 분산형 발전시스템으로서 설치 이후의 효율적인 시스템 관리와 운영이 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방법 중 하나는 원격 모니터링 및 제어 시스템을 적용하는 것이다. 본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 효율적인 관리와 운용을 위한 LabVIEW 기반의 모니터링 및 제어시스템을 제안한다. 모니터링부와 태양광 인버터의 DSP (Digital Signal Processor) 제어기간의 인터페이스에 대하여 자세히 설명하고, 계통연계형 태양광발전시스템에 적용하여 제안된 시스템의 타당성을 검증한다.

ABSTRACT

Photovoltaic power generation system is one of new renewable energy sources. Such distributed power generation system has important issues for the system management and operating after its installation. To solve the problem, remote monitoring and control systems can be employed. In this paper, LabVIEW based monitoring and control system is proposed for efficient management and operation of the photovoltaic power generation system. Interface method between monitoring part and DSP controller is given in detail. The proposed system is verified through experiments using a grid-connected photovoltaic power generation system.

키워드

Digital Signal Processor, LabVIEW, Monitoring, Photovoltaic Power Generation

* 부산대학교 전기공학과

접수일자 : 2007. 2. 2

** 교신저자: 한밭대학교 제어계측공학과

I. 서론

현재 대부분의 태양광 발전용 모니터링 시스템은 태양광 발전시스템에 대한 전문적인 지식이 미비한 상태에서 피상적인 모니터링 기능만을 적용함으로써 포괄적이고 효율적인 관리가 이루어지지 않고 있다. 정부의 태양광 주택 10만호 보급사업, 태양광 발전사업 등과 같은 신재생 에너지 활성화 사업의 성공을 뒷받침 하기 위해서는 태양광 발전 설비에 적합한 전문 모니터링 및 제어 시스템을 개발하여 보급하여야 한다.

일반적으로 태양광 발전시스템 자체에 관련된 기술은 태양전지 어레이 설계기술, 태양전지와 인버터와의 인터페이스 제어기술, 감시 및 보호기술 등으로 크게 분류할 수 있다. 특히 감시 및 보호기술은 설치 후 운용 및 관리적 측면에서 볼 때 매우 중요한 요소가 된다.

태양광 인버터의 저변 확대를 위해서는 안정적 저가형의 감시, 관리가 원활한 인버터의 개발이 필수적이다. 그러므로 저가형 마이크로프로세서로 제어되는 태양광 인버터의 개발이 요구되며, 각 인버터의 제어 신호는 전체 시스템을 관리, 제어하는 실시간 모니터링 시스템과 연계되어야 한다. 또한 각각의 태양광 인버터는 최대출력점추종제어 (MPPT: Maximum Power Point Tracking)를 통해 제어되어야 하며, 발전과 관련된 모든 요소들은 태양광 인버터의 제어보드 및 모니터링 시스템의 통합운용 하드웨어 제작시 충분히 고려되어야 한다.

본 논문에서는 분산형 태양광 발전 시스템의 효율적 관리와 운용을 위한 LabVIEW 기반의 실시간 모니터링 및 제어 시스템을 제안한다. 제안된 시스템을 계통연계형 태양광 발전시스템에 적용하고 실험을 통해 제안된 시스템의 타당성을 검증한다.

II. 본 론

2.1 계통연계형 태양광인버터

본 절에서는 모니터링 및 제어 대상인 계통연계형 태양광인버터의 구조에 대하여 설명한다. 제어 대상인 태양광인버터와 제어기에 대한 이해는 모니터링 및 제어 시스템 설계에 있어 매우 중요하다. 본 연구에 적용된 태양광인버터와 제어기의 구성은 그림 1과 같다. 태양광인버터는 절연형 구조로서 입력측은 강압형(Buck) 컨버터

와 푸시-풀(Push-pull) 컨버터를 채용하였으며, 변압기 이차측은 풀-브리지(Full-bridge) 컨버터를 적용한 구조이다. 이러한 구조에서의 변압기 설계는 변동하는 입력 전압 최저치에서 정격출력이 되도록 설계되어야 한다. 입력전압의 변동 범위가 넓더라도 스위치에 인가되는 전압은 항상 입력 최소 전압의 두 배가 인가되므로 스위치에 인가되는 전압이 약 2.5배로 경감되는 장점이 있다. 스위치의 정격전압이 낮아지므로 ON 저항이 적은 스위치를 적용할 수 있어 도통손실을 저감시키는 장점도 있다. 기존의 푸시-풀 컨버터의 경우는 높은 입력전압에 비해 낮은 도통비를 가지기 때문에 펄스형태의 출력전류를 형성하지만 그림 1의 구조에서는 입력전압에 관계없이 도통비를 50%로 설정할 수 있기 때문에 연속 출력전류를 발생시킬 수 있다[1].

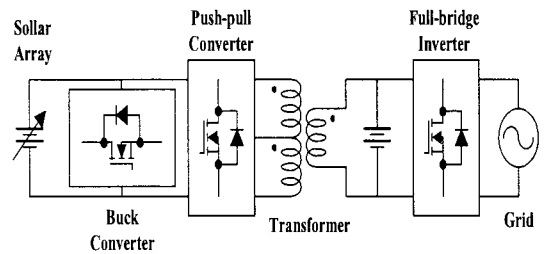


그림 1. 태양광인버터의 구조
Fig. 1 Configuration of Photovoltaic Inverter

그림 2는 DSP 기반의 계통연계형 태양광인버터의 간략한 제어기 블록도를 보여준다. DSP는 TI사의 TMS320F2812를 적용하였다. 최대출력점제어(Maximum Power Point Tracking: MPPT)를 수행하기 위해 태양전지의 전압과 전류를 검출하여 AD 변화기를 거쳐 Calculation 블록의 입력으로 사용한다. ADCIN0은 태양전지의 전압, ADCIN1은 전류를 검출하도록 구성하였다. P&O (Perturbation and Observation) 방식을 MPPT 방식으로 사용하였으며, 벡-컨버터로부터 검출된 DC 링크 전압(ADCIN2)과 비교하여 제어전압(Vcon1)을 형성한다. 이 제어전압은 S/H (Sample and Hold) 블록을 통해 PI 제어기의 입력값으로 주어져 벡-컨버터의 제어신호를 DSP의 PWM11을 통해 발생시킨다. 제어기의 포화방지를 위해서 PI제어기 내부에 Anti-windup 기능을 추가하였으며 Duty limit를 사용하여 벡-컨버터가 안정적으로 동작하도록 설계하였다. 연속의 출력전류를 형성하

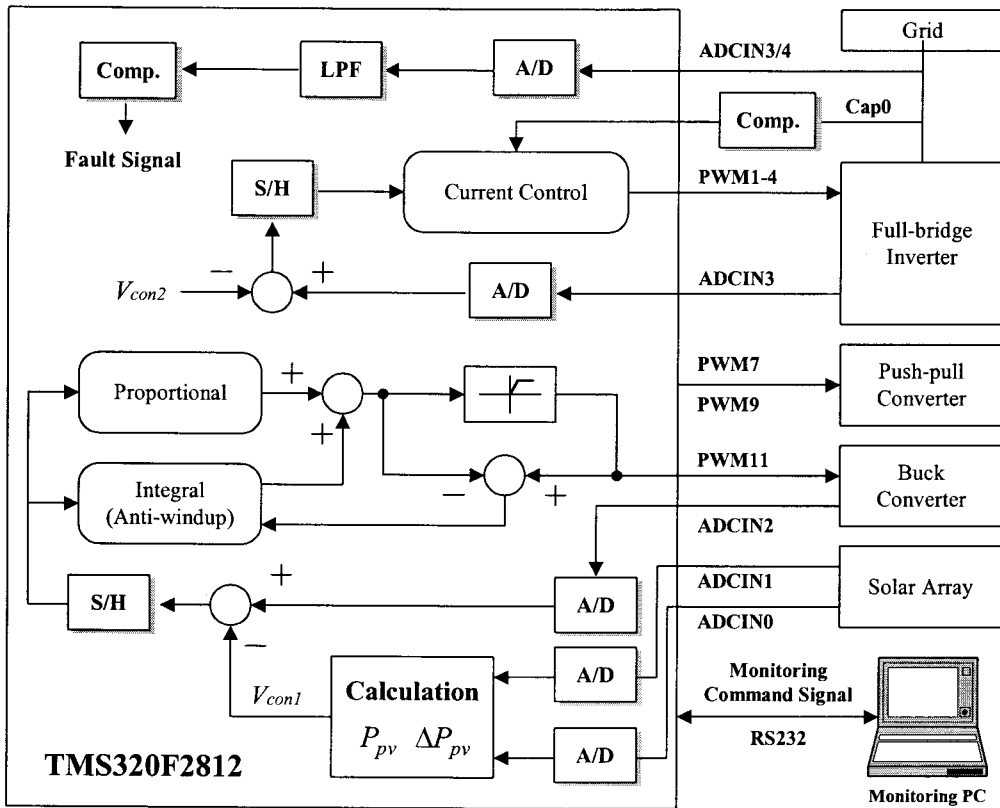


그림 2. 태양광인버터 제어 블록도
Fig. 2 Control Block diagram of Photovoltaic Inverter

기 위해 푸시-풀 컨버터의 제어신호는 PWM7과 PWM9를 이용하여 입력전압과 상관없이 50%의 도통비를 가지도록 구성하였다. 풀-브리지 인버터를 통해 공급되는 전압과 계통전압과의 동위상 조건을 만족시키기 위해서 Capture 기능을 사용하여 계통의 위상을 검출하여 전류제어기의 제어 파라미터로 입력한다. 변압기 2차측 DC 전압을 ADCIN3을 통해 검출하여 command 전압 (V_{con2})과 비교하여 전류제어기 입력으로 사용하였다. 전류 제어기는 PWM1-4를 통해 풀-브리지 인버터 스위치의 제어신호를 출력하게 된다.

2.2 제안하는 모니터링 및 원격제어 시스템

그림 2의 제어 블록도와 같이 태양광인버터는 DSP 제어기 자체만으로도 기본적인 제어가 완벽히 수행된다.

그러나 이러한 분산형 전원시스템을 오프라인으로 관리할 경우, 발전시스템의 이상동작, 인버터 관리 등에 있어 시간적, 경제적으로 비효율적이다. 따라서 제안하는 모니터링 및 원격제어 시스템에서는 RS232 직렬 통신을 통해 DSP 제어기와 Monitoring PC 간의 인터페이스를 형성하였다. 특별한 명령이 모니터링 PC로부터 입력되지 않는 경우에 DSP는 매 5초당 1번씩 태양광 인버터의 주요 파라미터 값을 모니터링 PC로 전송하게 된다. 표 1은 DSP로부터 RS232 통신을 통해 전송되는 10개의 데이터 종류를 정리하여 보여준다. 모니터링 PC부의 프로그램은 LabVIEW를 기반으로 제작되었으며 RS232 직렬 통신은 VISA (Virtual Instrument Software Architecture) 기능을 이용하여 그림 4와 같이 구성하였다.

표 1. DSP로부터 전송되는 기본 데이터
Table 1. Basic data transferred from DSP

순번	변수	데이터 내용
0	VAC	출력전압 (계통)
1	IAC	출력전류 (계통)
2	VDC	입력전압 (태양전지)
3	IDC	입력전류 (태양전지)
4	ACTIV	유효전력
5	REACT	무효전력
6	APPEAR	피상전력
7	FREQ	출력주파수
8	PF	역률
9	State	인버터 상태

VISA 통신부 설정에서 서로 다른 장비 간에 직렬통신을 통해 얼마나 빠른 속도로 데이터가 이동하는가에 대한 측정치를 의미하는 전송속도 (baud rate)는 초당 전송되는 control bit를 포함한 정보를 가진 비트의 최대수와 동일하다. 본 시스템에서 전송속도는 9600, 데이터 비트는 8bit, 패리티 비트는 없으며 Stop bit는 1로 설정하였다. 이러한 통신규정을 이용하여 "m"을 코드화 시킨다면 문자프레임은 그림 3과 같다. 제안된 모니터링 및 제어시스템에서 이 규칙은 송수신 모두에 적용된다.

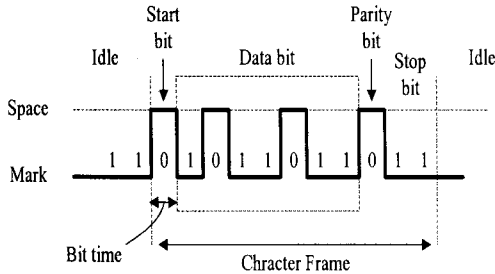


그림 3. 제안된 시스템에서의 통신패킷의 예
Fig. 3 Example of communication packet in the proposed system

표 1에 주어진 데이터들은 16bit의 Integer와 8bit의 Char의 형태이다. 따라서 전송받은 Binary 값을 LSB와 MSB의 순서에 따라 데이터 값의 처리가 선행되어야 한다. 데이터 변조는 그림 5의 Sub-VI를 통해 이루어지며, 이들 데이터는 2D Array로 변형하여 Global 변수인 PSC DATA에서 통합 관리하게 된다.

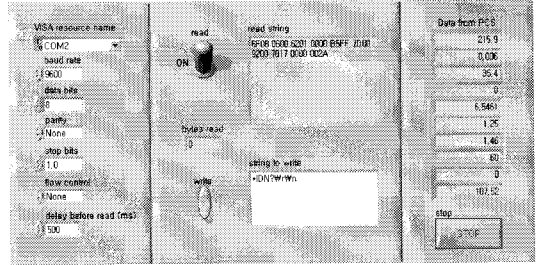


그림 4. RS232 통신용 프런트패널
Fig. 4 Front panel for RS232 Communication

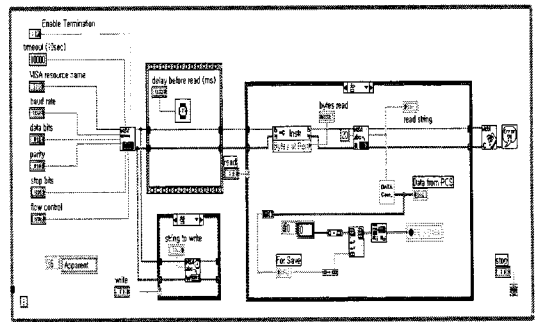


그림 5. RS232 통신용 블록다이어그램
Fig. 5 Block diagram for RS232 Communication

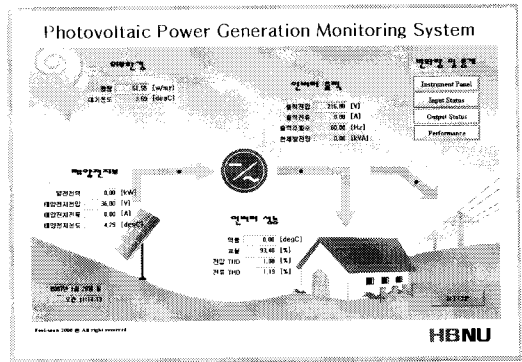


그림 6. 모니터링부의 메인 윈도우
Fig. 6 Main window of monitoring part

그림 6은 모니터링부의 메인 윈도우를 보여준다. 모니터링 되는 내용은 표 2와 같다. 그림 7은 그림 6의 소스코드인 블록다이어그램의 일부를 보여준다. Global 변수인 PSC DATA로부터 해당 위치의 값을 표시하기 위해서 그림 7(a)과 같이 Index 방식을 이용하였으며 각각의 데이터 값을 독립적으로 관리하기 위해서 데이터 별로 While 루프를 구성하였다[5]. 그림 7(b)은 메인 윈도우

에 위치한 버튼이 클릭 될 경우 Sub-VI로 화면을 이동시키기 위한 소스코드를 보여준다. 버튼이 클릭 될 경우에 Event가 발생하여 해당 Sub-VI로 화면이 이동하도록 구성하였다[2]-[4].

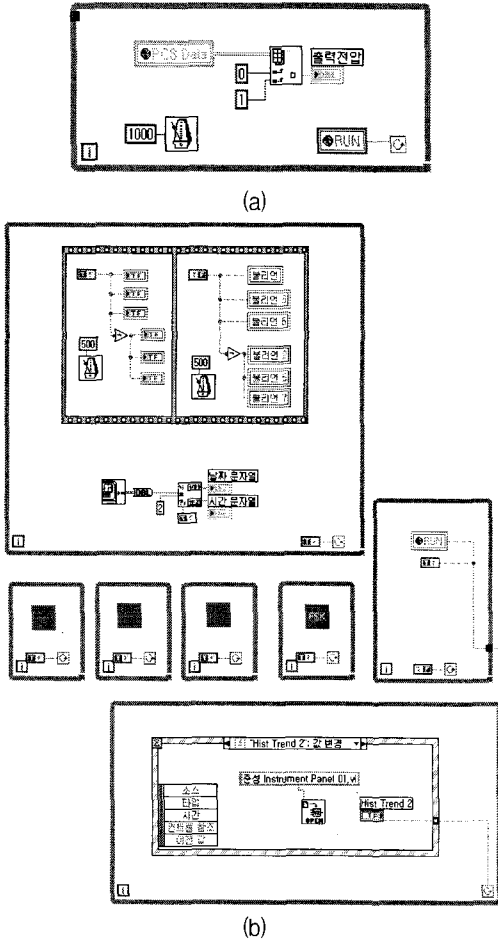


그림 7. 메인 윈도우의 블록다이어그램
Fig. 7 Block diagram of the main window

그림 8-10은 그림 6의 메인 윈도우의 버튼이 클릭 될 경우 표시되는 서브 화면을 보여준다. 각 서브 화면은 그래프를 통해 해당 데이터의 시간적인 변화량을 알 수 있도록 구성하였으며 표 2에 주어진 경계값을 벗어나는 경우 지시계 테두리의 LED를 점등하여 사용자가 쉽게 인지하도록 구성하였다. 경계값은 블록다이어그램의 소스코드를 변경하여 쉽게 변경할 수 있도록 구성하였다.

표 2. 메인 윈도우의 표시값 및 경계치
Table 2. Display and limit values in the main window

구분	표시값	경계치	단위
외부환경	광량	50 이하	W/m ²
	대기온도	-	C°
태양전지부	발전전력	1 이하	kW
	태양전지전압	24 이하	V
	태양전지전류	1 이하	A
	태양전지온도	-	C°
인버터출력	출력전압	±5 이상	V
	출력전류	3 이하	A
	출력주파수	±2 이상	Hz
	현재발전량	1 이하	kWh
인버터성능	역률	0.6 이하	-
	효율	85 이하	%
	전압 THD	5 이상	%
	전류 THD	5 이상	%

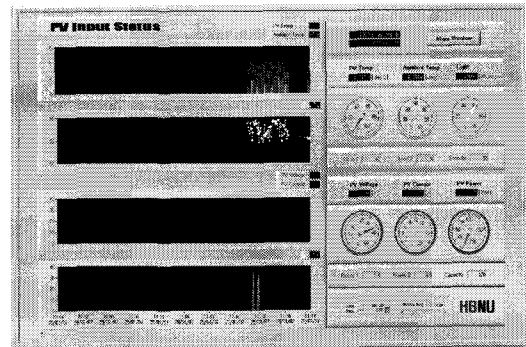


그림 8. 태양전지 입력부 상태 표시 화면
Fig. 8 Display of PV input status

그림 11은 서브 화면의 그래프를 표시하기 위한 블록다이어그램의 일부를 나타낸다. Global 변수인 PSC DATA로부터 Index 기능을 이용하여 해당 데이터를 불러오고 XY chart를 이용하여 그래프를 도시하였다. 시스템의 성능 저하를 최소화하기 위해서 Buffer를 통해 누적 데이터를 관리하도록 설계하였으며 모든 데이터는 현재 시간을 기준으로 관리된다.

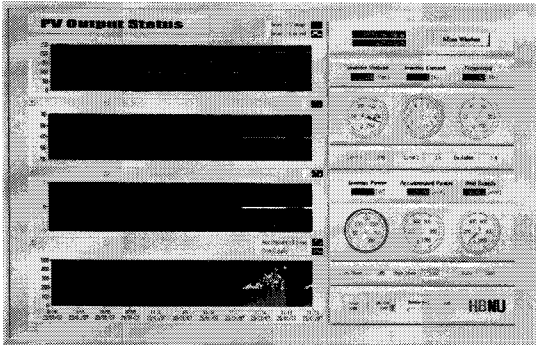


그림 9. 태양전지 출력부 상태 표시 화면
Fig. 9 Display of PV output status

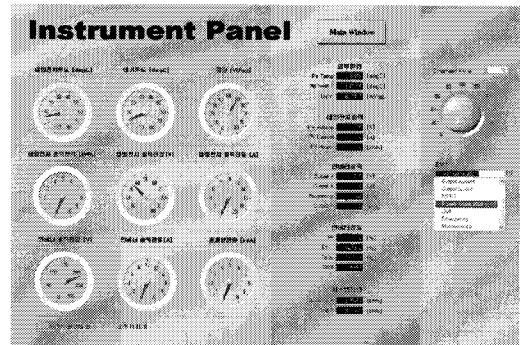


그림 12. 제어판 표시 화면
Fig. 12 Display of instrument panel

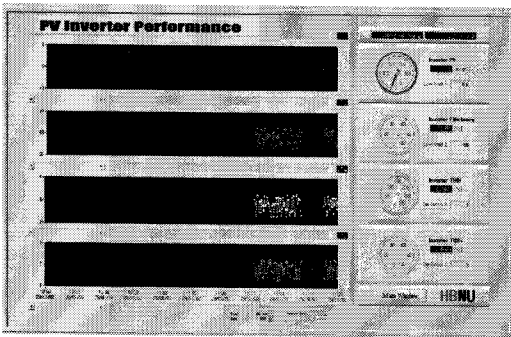


그림 10. 태양광 인버터 성능 상태 표시 화면
Fig. 10 Display of PV inverter performance

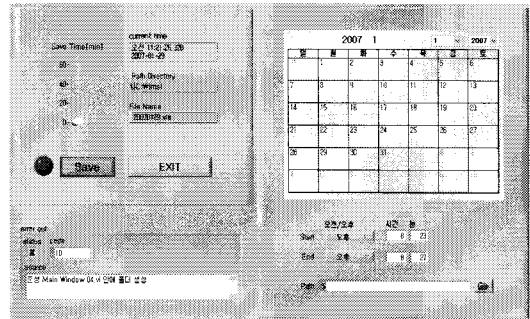


그림 13. 데이터 저장부 화면
Fig. 13 Display for data storage

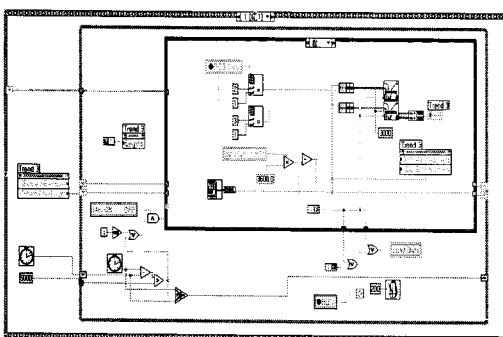


그림 11. 태양광 인버터 성능 상태 표시 화면
Fig. 11 Display of PV inverter performance

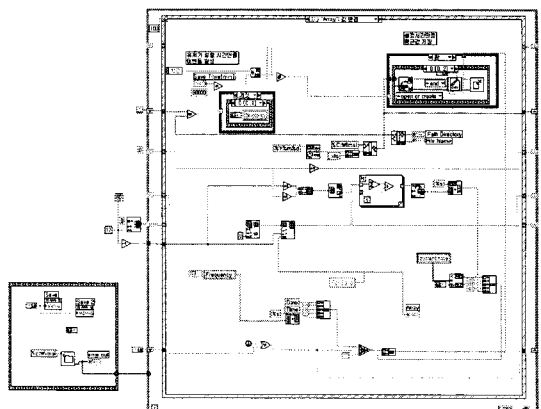


그림 14. 데이터 저장부 블록다이아그램
Fig. 14 Block diagram for data storage

그림 12는 DSP로부터 입력되는 데이터의 표시와 모니터링 PC로부터 DSP로 지령치를 설정할 수 있는 제어 패널을 보여준다. 그림 2의 제어 블록도에 표시된 모든 파라메타에 대한 지령치를 콤보 박스와 노브 스위치를 이용하여 설정할 수 있다. 지령치는 DSP로부터 데이터를 전송 받을 때와 반대로 Binary로 변형되고 LSB-MSB 순으로 변환되어 VISA write를 통해 DSP로 전송된다.

본 시스템에서는 DSP에서 Fault 신호가 발생될 경우, 태양전지의 발전전력이 경계치 이하인 경우 자동으로 계통으로 유입되는 전력이 차단되도록 구성하였으며, 이외의 경계치에 해당하는 값에서는 LED 알람을 통해 사용자에게 경고하는 방식을 적용하였다.

그림 13과 14는 데이터 저장 및 관리를 위한 프론트패널과 블록다이어그램을 보여준다. 모든 데이터는 모니터링 PC가 구동되는 시점부터 사용자가 지정한 위치에 시간에 따라 엑셀 파일로 저장되며 저장 간격은 사용자가 설정할 수 있도록 구성하였으며, 필요할 경우 특정 구간을 지정하여 저장된 데이터를 불러올 수 있도록 구성하였다.

III. 제안된 시스템의 실험

제안된 모니터링 및 제어시스템이 RS232 직렬통신을 통해 정확히 제어되는지를 계통연계형 태양광 인버터를 이용한 실험 결과를 통해 증명한다. 그림 15는 별도의 지령치가 없는 경우 표 1에 있는 데이터 패킷을 5초당 1번 수신하는 파형과 수신되는 패킷을 확대한 파형을 보여준다. 수신된 패킷은 Binary 데이터이며 LSB-MSB의 순으로 조합되어 모니터링 PC에 표시된다.

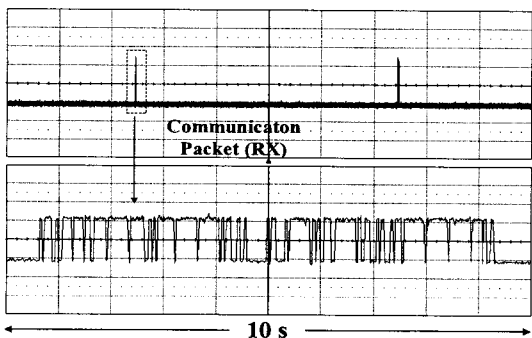


그림 15. DSP로부터 수신되는 데이터
Fig. 15 Received data from DSP

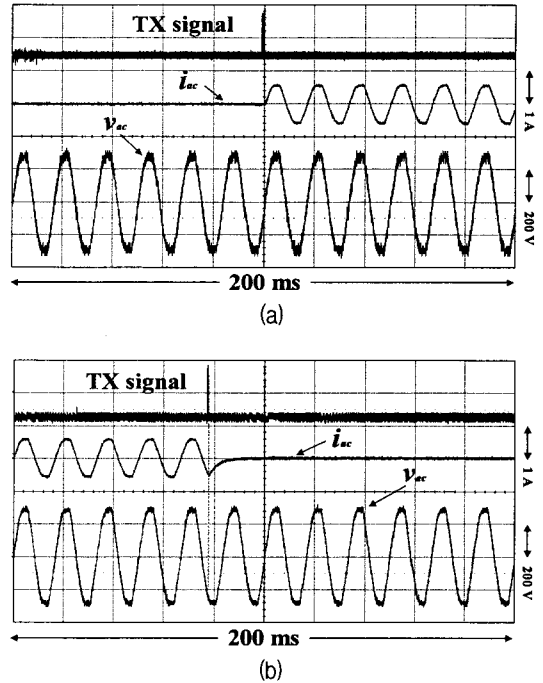


그림 16. 지령치 발생에 따른 시스템 응답, (a) 계통투입시, (b) 계통차단시

Fig. 16 System response according to commands, (a) grid connection, (b) grid disconnection

그림 16(a)과 (b)는 태양전지로부터 생성된 전력을 계통에 투입하는 경우와 태양광인버터를 계통으로부터 차단시키는 경우의 파형을 보여준다. 이들 실험파형은 표 2에 주어진 경계치에 의한 지령치의 발생이 아니라 실험을 위해 임의로 계통투입과 차단 지령을 모니터링 PC에서 발생시켰을 경우이다. 그림 16(a)은 계통에 전력을 공급하기 위한 지령치를 발생시켰을 때의 계통전압과 투입되는 전류 파형을 보여준다. 그림 2의 제어블록도에서 보여주듯이 DSP의 Capture 기능을 통해 계통전압의 위상을 검출하기 때문에 투입되는 전류가 계통전압과 동위상을 이루는 것을 확인할 수 있다. 그림 16(b)은 이상신호(Fault signal) 또는 사용자가 임의로 계통과의 차단 지령치를 인가할 경우의 계통전압과 전류 파형을 보여준다. 계통에 투입되는 전력을 차단시킬 때는 차단지령과 동시에 전류의 공급이 중단된다. 계통으로 투입되는 전류가 큰 경우에는 인덕턴스 성분에 의한 서지가 발생하기 때문에 폴-브리지 인버터의 동작을 먼저 중지시켜 투입되는 전력이 차단되도록 구성하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 분산형 태양광발전시스템의 설치 이후의 효율적인 시스템 관리와 운영을 위해서 LabVIEW 기반의 원격 모니터링 및 제어 시스템을 제안하였다. 모니터링 PC와 태양광 인버터의 DSP 제어기의 상호보완적인 설계를 통해 원격제어 및 모니터링이 가능한 효율적인 인터페이스를 구성하였다. 지령치에 따라 계통연계형 태양광인버터가 정확히 제어됨을 실험을 통해 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-331-D00196)

참고문헌

- [1] 손경중, 송성근, 최준호, 문채주, 김광현, 임영철, “영전압 영전류 스위칭을 이용한 연료전지용 전력변환 시스템”, 전력전자학회 논문지, 제11권, 제4호, pp. 385-394, 2006년 8월.
- [2] 차영범, 구분민, 송도호, 최중경, “가스터빈엔진 최적 제어시스템 구현을 위한 엔진 시뮬레이터 개발”, 한국해양정보통신학회 논문지, 제 11권, 제1호, pp. 75-82, 2007년 1월.
- [3] 강필순, 차동진, 정재화, 서석빈, 안달홍, “Lab VIEW 기반의 가스터빈 데이터 취득 시스템”, 한국해양정보통신학회논문지, 제10권, 제6호, pp. 1083-1097, 2006년 6월.
- [4] 강필순, 차동진, 정재화, 서석빈, 안달홍, “LabVIEW 기반의 가스터빈 데이터 취득 및 모니터링 시스템 개발”, 한국해양정보통신학회 춘계종합학술대회 논문집, 2006년 5월 26일, pp. 270-273.
- [5] LabVIEW ver 8.0 User Manual, National Instruments, April 2005.

저자소개



빈 재 구(Jae-Gu Bin)

1996년 부산대학교 전기공학
(공학사)

1998년 부산대학교 전기공학
(공학석사)

1998년~현재 부산대학교 전기공학과 박사과정

2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원

※관심분야: 전력전자, 모니터링 시스템



강 필 순(Feel-soon Kang)

1998년 경상대학교 전기공학
(공학사)

2000년 부산대학교 전기공학
(공학석사)

2003년 부산대학교 전기공학(공학박사)

2003년~2004년 오사카대학 전기공학 박사후과정

2004년~현재 한밭대학교 제어계측공학과 조교수

※관심분야: 전력전자, 모니터링 시스템



김 철 우(Cheul-U Kim)

1969년 부산대학교 전기공학
(공학사)

1974년 일본 전자통신대학
(공학석사)

1986년 중앙대학교 전기공학(공학박사)

1975년~현재 부산대학교 전기공학과 교수

※관심분야: 전력전자