

dc bus 중심 제어를 이용한 UPS 기능을 갖는 단상 태양광 발전 시스템

김 응호¹⁾, 권 정민²⁾, 권 봉환³⁾

Single-Phase PCS with UPS Function Based on Dc Bus Oriented Control

Eungho Kim, Jungmin Kwon, Bonghwan Kwon

Key words : Photovoltaic(태양광), UPS (무정전시스템), Converter (컨버터), inverter (인버터)

Abstract : 본 논문에서는 UPS 기능을 갖는 단상 태양광 발전 시스템을 제안하였다. 제안하는 시스템은 태양광 어레이 (photovoltaic array)에서 최대전력을 얻기 위해 MPPT (maximum power point tracking)를 수행하는 컨버터, 계통전원 상태나 태양광 발전량에 상관없이 부하에 정현파 전압을 공급하는 인버터, 태양광 어레이에서 발전된 잉여전력을 계통으로 전달하거나 부하에 필요한 전력을 dc bus로 공급하는 인버터, 정전시 dc bus에 전력을 공급하는 양방향 컨버터 (bidirectional converter)로 구성된다. 제안하는 시스템은 발전된 전력을 계통으로 전달할 뿐만 아니라, UPS (uninterruptible power supply) 기능도 수행하는 시스템으로 계통전압이 불안정하거나 정전시에도 부하에 안정적이고 깨끗한 전압을 항상 공급할 수 있다. 각각의 인버터, 컨버터, 및 양방향 컨버터는 dc bus를 공유하며, dc bus의 전압에 따라 동작상태가 결정이 된다. dc bus중심의 제어는 dc bus전압을 안정적으로 유지시키며, 부하에 걸리는 전압의 변동을 최소화 하고 시스템의 디자인 및 제어를 단순화한다. 모든 알고리즘과 제어기를 하나의 마이크로 컨트롤러로 구현하였고 제안된 시스템의 우수성을 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

태양광 에너지는 깨끗하고 고갈된 염려가 없고 태양 에너지만 존재하면 언제라도 필요한 곳에서 필요한 만큼의 에너지를 수급할 수 있다는 장점이 있어 대체 에너지로서 각광받고 있다. 태양광 발전의 응용 분야는 크게 계통연계형과 독립형으로 나눌 수 있으나 최근 그것들과는 다른 다양한 응용분야가 새로 생기고 연구되고 있다.

본 논문에서는 UPS기능을 갖는 태양광 발전 시스템을 제안한다. 최근 병원, 컴퓨터실, 통신시설 등에서 컴퓨터 및 중요장비에 정전이 없고 깨끗한 (continuous and disturbance free) 전력을 안정적으로 공급시키기 위해 UPS가 사용되며 그 중요성은 날로 높아가고 있다. 제안하는 시스템은 온라인 (on-line) UPS와 계통연계 태양광 발전 시스템을 하나로 구현하였고, 각각 따로 구현하여 사용하는 것에 비해 효율 상승, 백업 (back-up) 시간의 연장 등의 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 필요한 소자 수의 감소로 저가격화의 장점을 가진다.

기존 상용 주파수 변압기를 사용한 발전 시스템은 변압기로 인한 효율 감소, 가격 증가, 부피와 무게 증가 등의 문제를 지니고 있으나 제안하는 시스템은 무

변압기형으로 고효율, 저가격에 구현된다. 제안하는 시스템은 MPPT를 수행하는 컨버터, 계통전원이나 태양광 발전량에 상관없이 dc bus로부터 정현파 전압을 부하에 공급하는 인버터, dc bus에 전력을 공급하거나 태양광 어레이에서 발전된 잉여전력이 있을 때 계통으로 전달하는 인버터, 정전시 dc bus에 전력을 공급하는 양방향 컨버터로 구성된다. 제안하는 시스템의 모든 알고리즘과 제어기를 하나의 마이크로컨트롤러를 통해 구현하여 3kW급 시제품을 제작하고 실험을 통해 제안한 알고리즘과 제어기의 우수성을 확인하였다.

2. 시스템 구성 및 제어방법

제안하는 시스템의 전체 시스템 구성도는 그림 1

-
- 1) POSTECH 전자전기공학과
E-mail : znight@postech.ac.kr
Tel : (054)279-2876 Fax : (054)279-5632
 - 2) POSTECH 전자전기공학과
E-mail : jmkwon@postech.ac.kr
Tel : (054)279-2876 Fax : (054)279-5632
 - 3) POSTECH 전자전기공학과
E-mail : bhkwon@postech.ac.kr
Tel : (054)279-2876 Fax : (054)279-5632

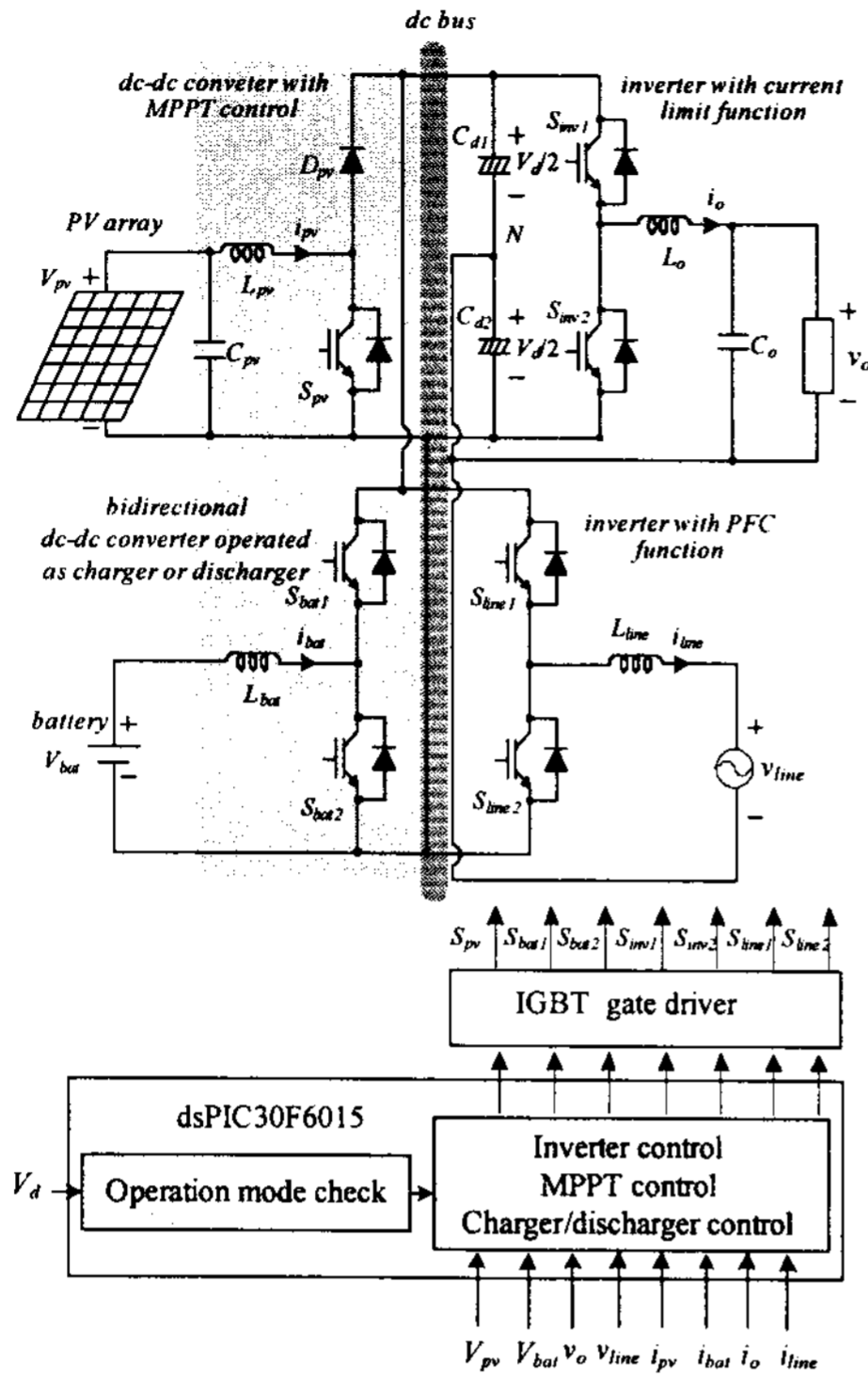


Fig. 1 Proposed PCS system with the UPS function

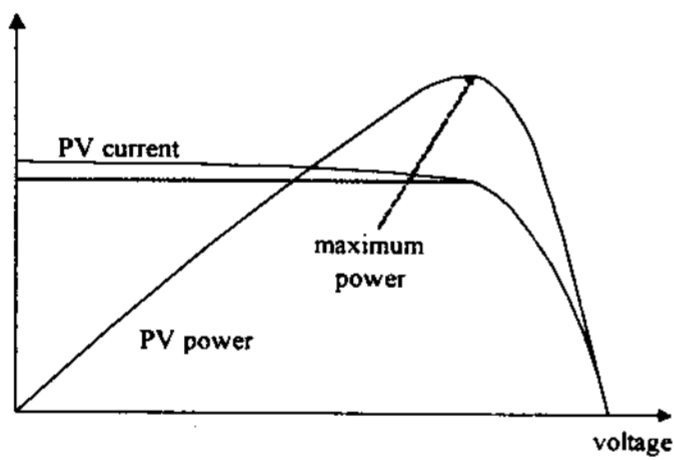


Fig. 2 Characteristic curve of the PV array

과 같다. 시스템의 가격절감을 위하여 인버터는 하프 브릿지 (half-bridge)형으로 구성하여 스위치의 개수를 최소화하였다. 그림 2는 태양광 어레이 (PV array)의 특성곡선으로 전류와 전압의 비선형적인 특성 때문에 MPPT가 반드시 필요하다. MPPT를 수행하는 dc-dc 컨버터는 전형적인 부스트 컨버터 (boost converter)이며 MPPT 알고리즘은 널리 알려진 P&O (perturb and observe) 방식의 알고리즘을 사용한다⁽¹⁻²⁾. 배터리의 충방전을 담당하는 컨버터는 충전시는 벡 컨버터 (buck converter)로 동작하고 방전시는 부스트 컨버터로 동작하며, 충전 또는 방전시 하나의 스위치는 항상 소거상태에 있다. PFC (power factor correction) 기능을 갖는 인버터는 계통으로 발전된 잉여전력을 보내거나 계통으로부터 부하에 필요한 전력을 가져올 수 있으며, 두 스위치는 상보적으로 동작하고 양방향 전력전달 특성을 지닌다. 부하에 정현파를 공급하는 인버터는 계통이나 태양광 발전량 등 주위여건과 상관없이 양질의 전압을 공급해야하므로 dc bus전압변동에 빠르고 유연

하게 대처할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 부하는 선형, 비선형 부하 등이 모두 사용될 수 있으므로 각종 보호 (protection) 기능과 전류제한 기능을 함께 가지고 있어야 한다. 그림 1에서 알 수 있듯이 각각의 컨버터 및 인버터는 dc 링크 (dc-link)라고도 불리는 dc bus의 전압 V_d 만을 회로적으로 공유하게 되며, 각각의 알고리즘 또한 V_d 만을 공유하는 정보로 사용하게 된다.

2.1 충방전 컨버터 및 인버터 제어

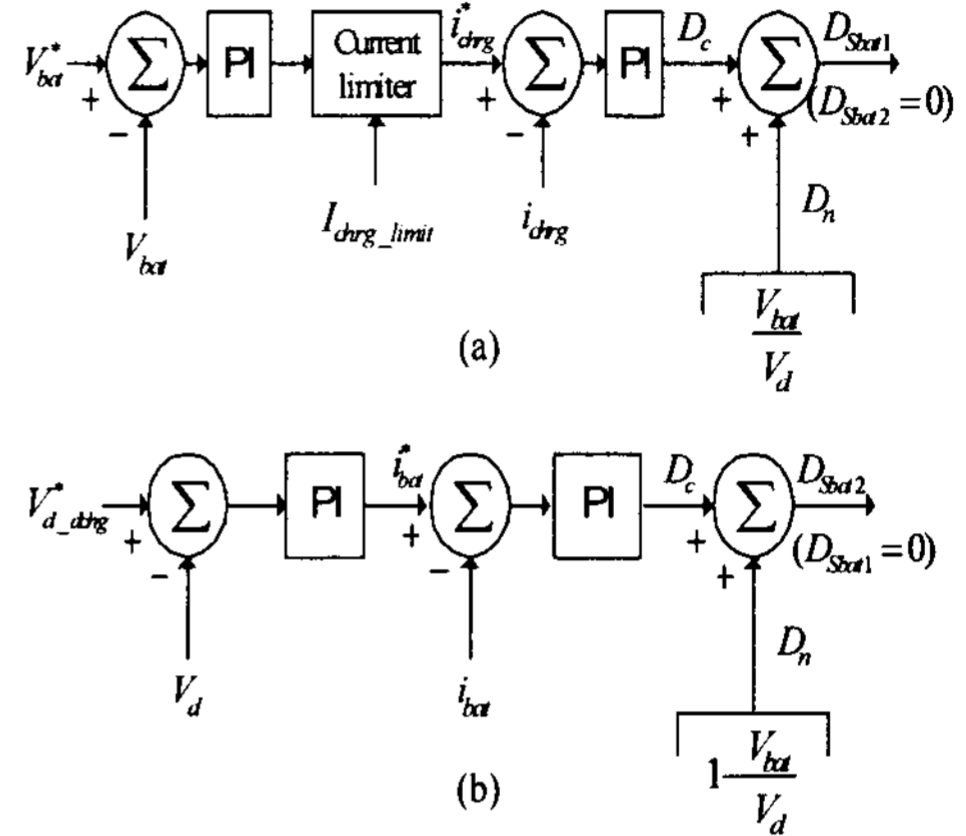


Fig. 3 Control block diagram of the charger/discharger
(a) charging mode
(b) discharging mode

그림 3(a)는 충전시 컨버터의 제어 블록도이다. 스위치 S_{bat1} 인 도통하는 동안 인덕터 L_{bat} 에 걸리는 전압은 $V_{bat} - V_d$ 이고 소거된 동안 걸리는 전압은 V_d 이므로 스위칭주기 T_s 동안 L_{bat} 전류의 변화량 Δi_{bat} 는 다음과 같다.

$$(V_{bat} - V_d)D_{Stat1} + V_{bat}(1 - D_{Stat1}) = L_{bat} \frac{\Delta i_{bat}}{T_s} \quad (1)$$

따라서 충전시 시비율 D_{Stat1} 은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$D_{Stat1} = D_n + D_c = \frac{V_{bat}}{V_d} - \frac{L_{bat} \Delta i_{bat}}{V_d T_s} \quad (2)$$

배터리는 정전류 정전압 충전 방식에 의해 충전이 되며 정전류 충전을 위해 그림 3(a)와 같이 전류제한기 (current limiter)를 가지며 배터리 전압이 부동충전전압 (floating voltage)을 넘기지 않도록 전압제어도 한다. 위 그림에서 충전전류 i_{chg} 는 $-i_{bat}$ 로 크기는 같고 방향만 다른 전류이다.

그림 3(b)는 방전시 컨버터의 제어 블록도이다. 충전시 시비율을 얻는 수식인 (1-2)와 유사한 방식으로 유도된다. 주로 계통이 정전이고 태양광 발전량 또한 작을 때 부하에 필요한 전력을 공급하기 위해 동작하며, dc bus전압이 그것의 지령치인 $V_{d, chrg}$ 가 되도록 제어한다.

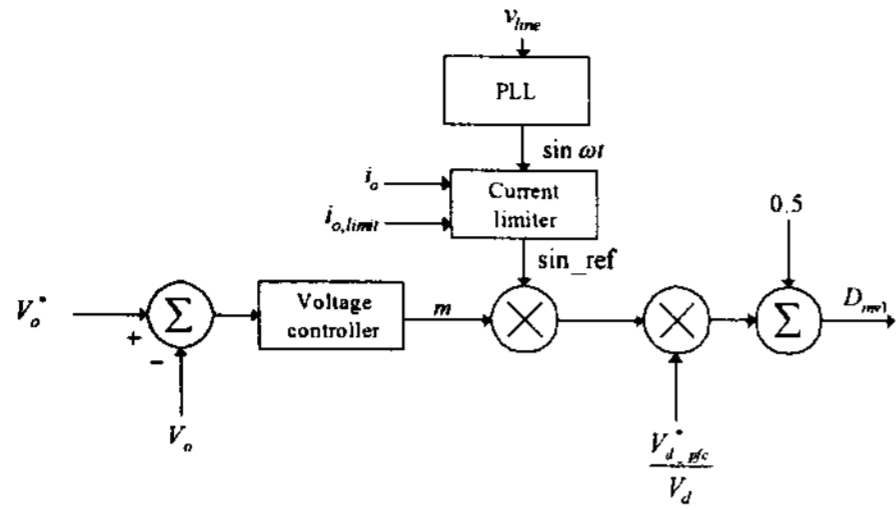


Fig. 4 Control block diagram of the inverter with the current limiter

그림 4는 전류제한 기능을 갖는 인버터의 제어 블록도이다. 인버터가 하프브릿지형으로 구현되어 있으므로 정현파를 내주기 위한 스위치의 시비율은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$D_{Sinv1} = 0.5 + m \times \frac{V_{d,pfc}}{V_d} \sin_{ref} \quad (3)$$

sin_ref는 전류가 전류 제한선인 $i_{o,limit}$ 를 넘지 않을 때는 PLL (phase locked loop)로부터 얻어진 $\sin \omega t$ 이고 전류가 $i_{o,limit}$ 이상일 때는 크기를 감소시켜 전류제한 기능을 할 수 있도록 한다. 양질의 정현파 출력전압을 내어주기 위해 급격한 부하의 변동에 빠르게 대응하는 알고리즘이 필요한데 피드포워드 (feed-forward)항인 $V_{d,pfc}/V_d$ 를 곱함으로써 빠른 제어를 가능하게 하였다. 일반적인 UPS와같이 계통이 정상일 때 PLL에서 얻어진 위상과 출력을 동기화 시켜 바이패스 (bypass) 스위치를 추가할 경우 바이패스 모드로 동작시킬 수도 있다. 하지만 바이패스 스위치가 없는 시스템의 경우도 입력과 출력 위상이 동상이면 dc bus 전압의 리플이 감소되고 제어 특성이 좋다.

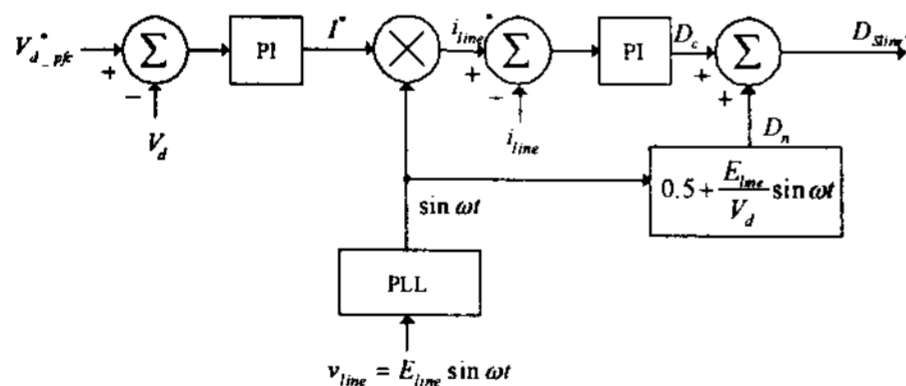


Fig. 5 Control block diagram of the inverter with PFC function

그림 5는 PFC 기능을 가지는 인버터의 제어 블록도이다. 전류와 전압 모두 PI 제어기를 이용하여 제어하며 마이크로컨트롤러로도 쉽게 구현가능이 가능하도록 단순화된 알고리즘을 사용한다. 이 인버터는 전류의 지령치가 음인지 양인지에 따라 계통으로 발전된 전력을 보낼 수도 있고, 계통으로부터 부하에 필요한 전력을 받을 수도 있다.

2.2 dc bus 중심 제어

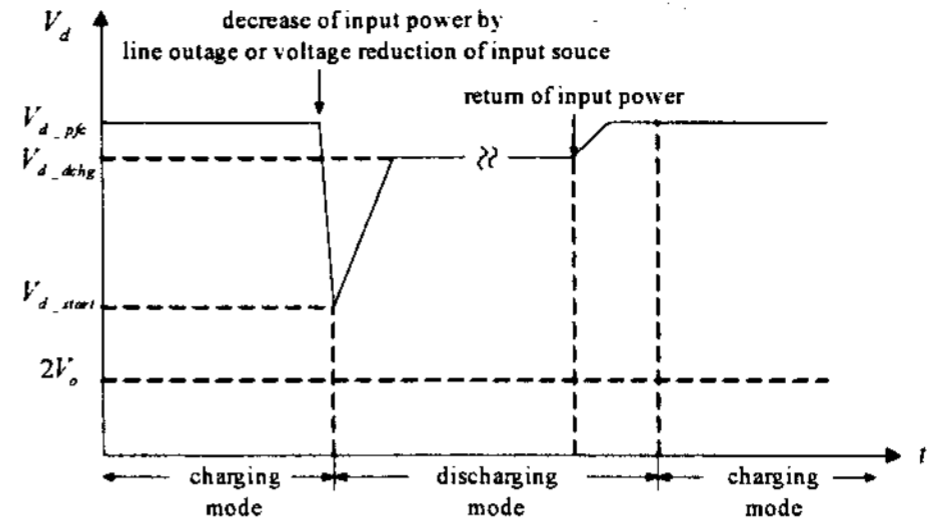


Fig. 6 Operation mode change strategy of the charger/discharger

출력의 정현파를 만드는 인버터가 하프-브릿지형이므로 정현파 출력을 내어주기 위해서 dc bus 전압은 항상 출력 전압의 최대치의 두 배보다 높게 유지되어야 한다. 갑작스런 정전시, PFC 기능을 가지는 인버터는 정지하며, dc bus 전압의 하강을 막기위해서 충방전 컨버터는 방전을 최대한 빨리 시작하여 dc bus로 전력을 공급해 주어야 한다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이 제안하는 시스템은 이를 위해 dc bus의 전압을 항상 감시하여 dc bus의 전압이 방전개시전압 $V_{d,start}$ 에 도달하는 순간 충전모드에서 방전모드로 전환함으로써 dc bus 전압이 $2V_o$ 이상을 항상 유지할 수 있도록 한다. 방전모드에서 충전모드로의 전환은 빠를 필요가 없으므로 방전모드에서 컨버터 전압 지령치 $V_{d,dchg}$ 보다 높은 전압상태를 일정시간 유지할 경우 충전모드로 바꾸어 동작시키면 된다.

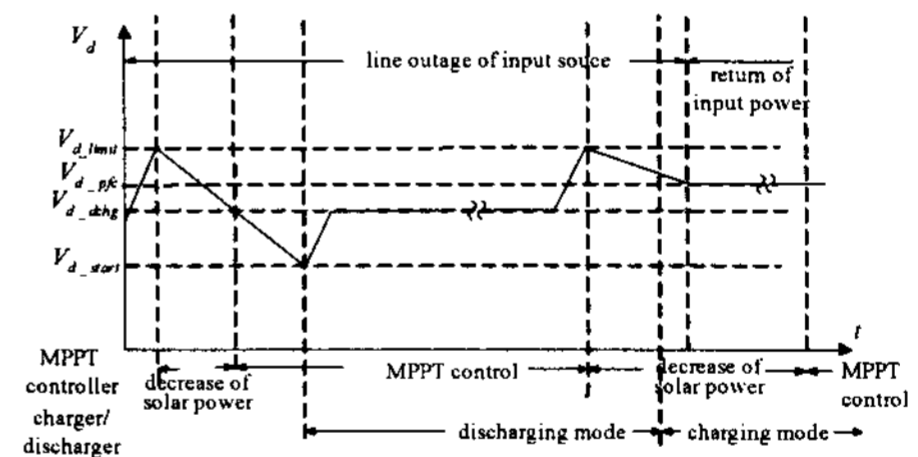


Fig. 7 Operation mode change strategy of the MPPT controller

태양광에서 발전된 전력은 계통이 정상일 때, 일부는 부하로 가고, 일부는 충전 전력이 될 수 있으며, 그리고 남은 잉여전력은 계통으로 보내게 된다. 계통 전압이 비정상이어서 계통과 연결된 인버터가 동작하지 않을 때는 잉여전력을 계통으로 보낼 수 없으므로, 컨버터 구동을 위한 모드전환전략이 필요하다. 제안하는 시스템은 그림 7과 같은 모드전환기법을 사용한다. 태양광에서 발전된 전력이 부하가 필요로 하는 전력보다 작을 때, dc bus의 전압이 $2V_o$ 보다 낮아지지 않도록 dc bus의 전압이 방전개시전압 $V_{d,start}$ 에 다다르면, 충방전 컨버터는 방전모드에서 동작한다. 또 다른 경우에 있어서 태양광 발전 전력이 부하가 필요로 하는 전력과 충전전력의 합보다 클 때는 dc bus 전압의 상승을 막기 위해, dc bus의 전압이 상한전압 $V_{d,limu}$ 에 도달하면 컨버터는 발전전력이 작아지는 방향으로 시비율을 바꾼다.

3. 실험결과

Table 1 Parameters of the proposed system.

Parameters	Values
rated power of the load	3kVA
processor	dsPIC30F6015
PWM frequency	15kHz
V_{line}, V_o	220V, 60Hz
V_{pv}	180V ~ 400V
rating of v_{bat}	384V
V_d limit	720V
V_d pfc	700V
V_d dchg	693V
V_d start	650V
L_{pv}, L_{bat}	2mH
C_{d1}, C_{d2}	4700uF
L_o, L_{line}	1mH

제안하는 UPS 기능을 가지는 단상 PCS의 모든 알고리즘과 제어기를 소프트웨어로 작성하였고 Microchip사의 dsPIC30F6015 마이크로컨트롤러를 이용하여 구현하였다. dsPIC30F6015는 단일 칩에 ADC, PWM 신호 발생기 등을 포함한다. 따라서 ADC, PWM 신호 발생기, address decoder 등의 추가 부가 회로가 필요한 DSP에 비해 단일 마이크로컨트롤러의 사용은 제어 회로의 부피와 가격을 줄이는 장점을 지닌다. 마이크로컨트롤러의 입력이 되는 전압과 전류는 마이크로컨트롤러의 10-bit ADC를 통해 측정하였고 매 100ms마다 MPPT 제어를 수행하였으며 매 100us마다 충전전 컨버터 제어, 정현파를 내주는 컨버터 제어, 그리고 계통 전류 단위 역률 제어와 PWM 신호 시비율의 갱신이 동기 되도록 하였다. 표 1은 실험에 사용된 하드웨어의 주요 소자 및 파라미터이다. 컨버터 및 인버터의 스위칭 주파수는 15kHz이고 태양전지 어레이의 전압범위는 180V~400V이다.

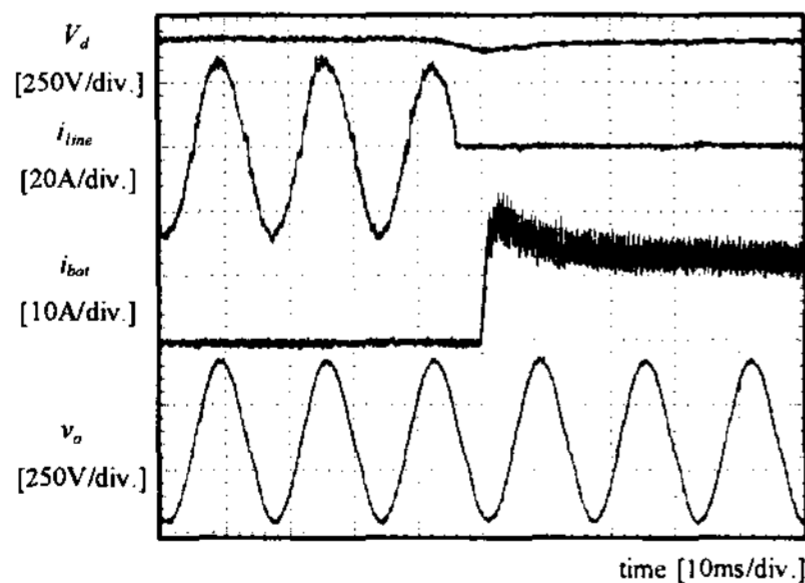


Fig. 8 Major waveform at failure of input source

그림 8은 정전시 dc bus전압의 변동을 보여준다. dc bus 전압이 $V_{d,start}$ 에 이르는 순간 충전전 컨버터는 방전모드로 들어가 dc bus에 에너지를 공급하므로 dc bus전압은 $2V_o$ 이상의 전압으로 유지가 되고 출력 정현파 v_o 또한 양질의 상태를 유지함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 온라인 UPS기능을 가지는 단상 PCS를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 계통이 정상일 때 발전된 전력을 계통으로 보내고, 정전시는 UPS로 동작한다. UPS와 PCS를 따로 구현하는 것에 비해 스위치의 수가 감소하여 저가격에 구현이 가능하다. 제안하는 dc bus 중심의 제어방식은 구현이 간단하며 고성능의 dc bus 전압 유지 제어가 가능하다. 제안하는 인버터 제어 알고리즘은 정현파 전압을 정전시 갑작스런 dc bus 전압변동에도 양질의 출력 특성을 가지도록 한다. 각각의 컨버터 및 인버터의 알고리즘은 구현이 간단하여 단일 마이크로컨트롤러를 사용할 수 있다.

References

- [1] Weidong Xiao, Dunford, W.G., 2004, "A modified Adaptive Hill Climbing MPPT Method for Photovoltaic Power Systems," IEEE PESC 04, Vol. 3, pp. 1957-1963, 2004.
- [2] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. Voulgaris, N.C., 2001, "Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System," IEEE Power Electronics, Vol. 19, pp. 46-54, 2001.