

## 독립운전기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템의 설계

김말수, 이상훈, 홍종석, 최재호\*  
포스콘 기술연구소, 충북대 전기공학과\*

### Design of Grid Connected Photovoltaic System with Stand-alone Operation

M.S. Kim, S.H. Lee, J.S. Hong, and J.H. Choi\*  
POSCON R&D Center Dept. of Electrical Eng. Chung-buk Uni.\*

#### ABSTRACT

This paper deal with a necessary factors for design grid connected photovoltaic system with stand-alone operation, and show simulation results of individual functions and multi-operation according to utility condition. Generally, photovoltaic system have only one operation of either stand-alone or line interactive, and have a isolation transformer for electrical isolation from utility. therefore it is bulky, weighty, and a high price system as compared with usefulness. In this paper, A topology and algorithm adequate for lightweight, high efficiency, low price, multi function is selected and inquired into the validity using simulation of variable conditions.

요한 소형경량화, 고효율화, 저가격화, 다기능화에 접근한 태양광 발전시스템을 설계하고자 한다. 변압기를 제거하는 대신에 Boost형 Chopper를 적용하여 인버터가 필요한 DC-link전압을 확보하고, 두 개의 Half-bridge방식의 인버터를 사용하여 필터용 콘덴서를 교류출력과 직류입력간에 설치하여 해결하고자 한다.

계통의 정전시에는 독립형으로 운전되어 자가부하에서 필요한 만큼 태양전지 Array에서부터 인출하여 공급하고, 계통의 복전시에는 계통연계형으로 동작되어 태양전지 Array에서부터 최대전력을 인출하여 자가부하에서 사용하고 남은 전력은 계통으로 유입하도록 한다. DC-link에 배터리를 연결함으로써 침투부하의 경감 및 태양광이 없는 야간에 계통의 정전시에도 자가부하에 전력을 공급하는 독립형으로 운전이 가능하다.

#### 1. 서론

태양광 발전시스템은 태양광을 에너지원으로 하여 직류전력을 발전하는 태양전지 Array와 전력변환장치로 구성되며, 변동하는 일사량으로부터 최대의 전력을 생산하기 위해서는 항상 최대전력점(Maximum Power Point ; MPP)에서 운전되기 위한 제어알고리즘의 성능이 매우 중요하다.<sup>[1~2]</sup>

태양광 발전시스템은 상용계통에 연계되어 운전되는 계통연계형 태양광 발전시스템과 전력계통에 관계없이 부하에 독립적으로 전원을 공급하는 독립형 태양광 발전시스템으로 분류할 수 있다. 계통연계형 태양광 발전시스템은 발전전력이 없는 밤에는 계통에서 전원을 공급받을 수 있기 때문에 부하에는 항상 안정된 전력공급이 가능하다.<sup>[3]</sup> 또한 분산전원으로써 계통에 연계되어 운전되므로 계통의 고장이나 계통의 정전시 상용계통과 부하에 영향을 미치지 않는 보호기능도 중요하다.<sup>[4~5]</sup>

본 논문에서는 태양광 발전시스템의 실제 적용시에 필

#### 2. 시스템 구성

##### 2.1 회로 구성

태양광 발전시스템이 태양전지 Array에서 발생된 DC전력을 AC전력계통으로 주입하기 위해서는 AC전력계통의 전원전압보다 큰 AC전압을 인버터에서 만들어 주어야 하며, 인버터가 충분한 DC-link전압을 확보하거나 변압기로서 승압을 해주어야 한다. 절연변압기를 사용함으로써 태양전지 Array와의 계통간에 절연이 확보되고 계통에 DC전류를 유입하지 않는다는 장점이 있으나, 태양광 발전시스템의 크기나 무게, 그리고 효율과 가격 등 모든 면에서 변압기는 생략하는 것이 유리하다. 변압기 없는 방식에서는 직류와 교류간에 절연되어 있지 않기 때문에 스위칭시에 발생하는 고조파가 누설되어 외부회로에 유입되어 장애를 주는 경우가 있으므로 이것을 방지하기 위하여 평활용 콘덴서를 교류출력과 직류부 입력간에 접속하여 스위칭과 동반하는 직류·교류간의 고조파 전압변동이 발생하

지 않도록 한다. 그림 2.1은 본 논문에서 제안하는 시스템의 회로도이다.

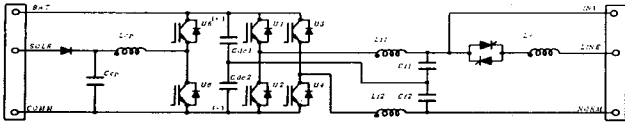
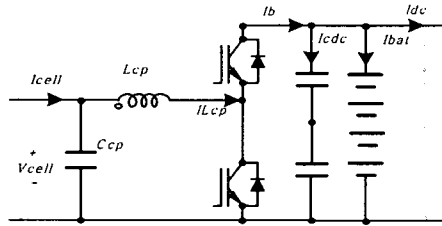


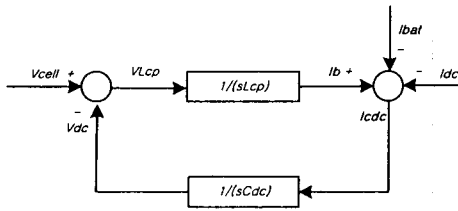
Fig. 2.1 Power Circuit Diagram

## 2.2 시스템 모델링

승압형 Chopper의 회로도와 블록도는 아래의 그림 2.2와 같이 표현되고, 정전압정주파수(Constant Voltage Constant Frequency ; CVCF)형 Inverter는 그림 2.3과 같이 표현된다.



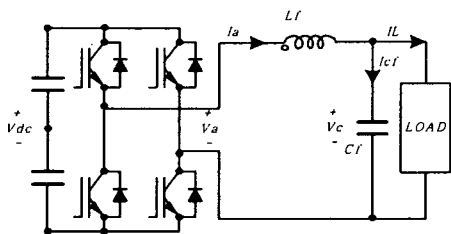
(a)



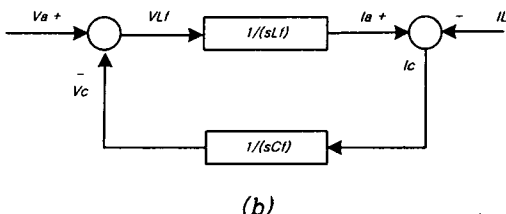
(b)

Fig. 2.2 Boost Chopper Configuration

(a) Power Circuit (b) Block Diagram



(a)



(b)

Fig. 2.3 CVCF Inverter Configuration

(a) Power Circuit (b) Block Diagram

## 3. 제어기 구성

### 3.1 승압형 Chopper

$V_{dc}$ 를 직류전압기준전압  $V_{dc}^*$ 로 설정하고, 변조기가 이상적이고, DC-link전압이 일정하며 승압형 Chopper의 전류제어기가 단위이득을 가진다고 가정하면  $V_{dc}/V_{dc}^*$ 의 전달함수는 식 (3.1)와 같고 제어블럭도는 그림 3.1과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{k_{cp}K_p}{C_{dc}}s + \frac{k_{cp}K_i}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{k_{cp}K_p}{C_{dc}}s + \frac{k_{cp}K_i}{C_{dc}}} \quad (3.1)$$

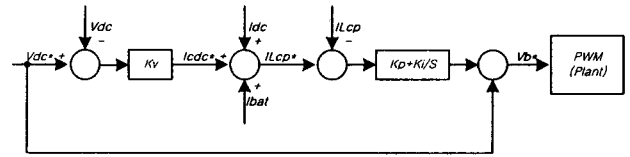


Fig. 3.1 Boost Chopper Control Block

### 3.2 CVCF형 Inverter

식 (2.2)는 CVCF형 Inverter의 전류제어기의 개루우프 전달함수를 보여주며, 이 식으로부터 인덕턴스  $L_f$ 값을 적게 함으로써 시스템의 응답을 보다 빠르게 할 수 있다는 것을 알 수 있다.  $I_a/I_a^*$ 의 전달함수는 식 (3.2)와 같게 되고 제어블럭도는 그림 3.2과 같이 표현된다.

$$\frac{i_a}{i_a^*} = \frac{K_p s + K_i}{L_f s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.2)$$

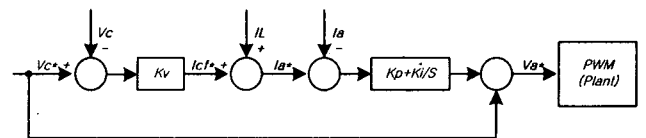


Fig. 3.2 CVCF Inverter Control Block

## 4. 필요기능

### 4.1 MPPT제어

태양전지의 특성상 최대전력점(MPP)에서 동작시 태양전지의 전압은 일사량과 표면온도에 따라서 시시각각으로 변한다. 또한 외부환경이 변화하지 않아도 부하의 변동에 의해서도 동작점이 변동하기

때문에 최대출력이 얻어지는 동작점과 같지 않게 되어 효율이 저하된다. 따라서, 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서는 태양전지에서 최대전력을 끌어내는 제어가 필요하다. 아래 그림 4.1에서는 간단하면서 최대전력추종제어(Maximum Power Point Tracking ; MPPT)특성이 좋은 P&O 제어 알고리즘의 Flow-chart를 보인다.

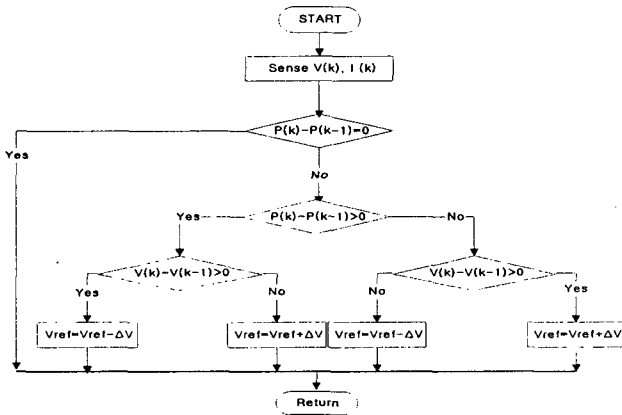


Fig. 4.1 Flow-chart of P&O Control Algorithm

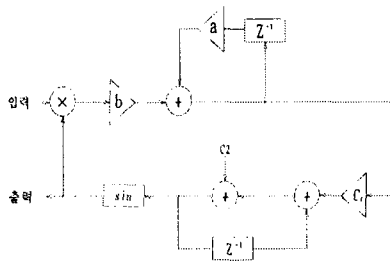


Fig. 4.2 Digital PLL Circuit

#### 4.2 전원동기화

계통연계를 위한 Inverter는 계통전원측과의 고속의 위상동기가 필요하다. 일반적으로 이러한 문제는 위상동기회로로 (Phased-Locked Loop ; PLL)기술을 사용함으로써 극복될 수 있으며, 그림 4.1은 완전 소프트웨어 방식 디지털 PLL의 회로구성도이며, 승산형 위상비교기, 디지털 1차 IIR 필터, 디지털 Vco로 구성되어 있다. 디지털 PLL의 전달함수는 식 (4.1)과 같이 표현된다.

$$\frac{V_{io}(z)}{V_{rc}(z)} = \frac{c_1 b z^2}{z^2 + (-1-a)z + a} \quad (4.1)$$

#### 4.3 단독운전검출

주파수 Bias방식, 유효 및 무효전력 변동방식, 부하변동 방식 등의 능동적 대책과 전압 및 주파수 이상 검출방식, 위상이상 검출방식, 주파수급변 검

출방식, 고조파 감시방식 등의 수동적 대책이 있으나 모두 여러 가지 문제점이 있어 단일로 확실하게 검출 가능한 방식은 아직 보고되지 않고 있으며, 이러한 상황에서는 능동적 대책과 수동적 대책을 조합하여 단독운전의 신뢰성을 향상시키는 것이 유효하다. 여기서는 수동적 대책으로써 위상이상 검출방식과 능동적 대책으로써 무효전력 변동방식의 조합방식을 사용하여 단독운전을 검출 하고자 한다. 디지털 PLL의 Vco과형은 위상이상을 검출 할 수 있는 신호로 사용된다.

### 5. 시뮬레이션

#### 5.1 시뮬레이션 조건

제안된 태양광발전시스템의 타당성 검증을 위하여 표 5.1과 같은 조건으로 시뮬레이션 하였다. 디지털 PLL을 통하여 계통전압의 위상을 감지하고, 단독운전은 디지털 PLL의 Vco과형의 변화량과 무효전력의 변화량으로 검출하여 전력계통으로부터 시스템을 차단하였다. 전체적인 시뮬레이션 환경은 다음과 같다. 0~250ms 기간에는 계통전원이 정상인 조건으로 시스템은 MPPT제어를 통하여 자가부하와 전력계통에 전력을 공급하면서 단독운전을 감지한다.

Table 5.1 Simulation Condition

Item	Specifications
Solar Array Capacity	2KW
Short Current of Solar Cell	3.35A
Open Voltage of Solar Cell	434V
No. of Serial Connection	20
No. of Parallel Connection	2
Range of Solar Fluctuation	40%~100%
Source Voltage	220V
Ccp	1000uF
Cdc1,2	2000uF
Cf1,2	200uF
RLcp	2mH (0.01Ω)
RLf1,2	200uH (0.01Ω)
RLs	10mH (0.01Ω)
RLload	100Ω(10mH)

250ms~450ms 기간에는 계통전원이 차단되는 기간이며 시스템은 MPPT가 불필요하며 자가부하에 필요한 만큼만 전력을 인출하여 공급한다. 만약에 자가부하에 공급할 만큼의 일사량이 충분하지 못하다면 Shut-down되지만, 이러한 문제는 DC-link에 축전지를 설치하여 간단히 해결 될 수 있다.

450ms 에서 계통전원은 복전되고 시스템은 다시 정상상태로 복귀하며, 500ms 에서 시뮬레이션을 종료한다.

## 5.2 시뮬레이션 결과

그림 5.1은 Solar Power(Sin파형)와 계통연계동작에 의한 MPPT Power(추종파형)를 보여주고 있다. 계통이 정상일 때에는 일사량의 변화를 잘 추종하고 있으나 계통에 이상이 발생하여 독립운전 중일 때에는 태양전지 Array로부터 자가부하에서 필요한 전력만을 인출하므로 MPPT제어를 하지 않음을 보이고 있다. 그림 5.2는 MPPT제어가 잘 되고 있으므로 태양전지 Array의 기준치( $V_{cell}^*$ )를 실제값( $V_{cell}$ )이 거의 일치함을 보여주고 있다. 그림 5.3은 계통전압( $V_s$ )과 일사량 변동에 따른 MPPT제어로 인하여 크기가 변동하는 계통전류( $I_s$ )를 보여주고 있으며, 그림 5.4는  $V_s \cdot I_s$ 로 표현되는 계통으로 역조류하는 전력(변동파형)과  $V_s \cdot I_L$ 로 표현되는 자가부하전력(일정파형)을 그리고 있다. 자가부하전력은 인버터가 CVCF제어를 하므로 계통의 상태에 관계없이 일정함을 유지한다. 그림 5.5는  $V_s \cdot I_{pv}$ 로 표현되는 CVCF형 인버터의 출력전력을 보여준다.

250ms에서 단독운전을 감지하고 시스템은 태양전지 Array에서부터 자가부하에 필요한 만큼의 전력만을 변환하게 되므로 상단파형에서 MPPT 효율이 저하하는 것을 볼 수 있으며, 하단파형에서는 전력계통과 차단되어 계통전류는 없고, 부하전류만 일정하게 유출되는 것을 볼 수 있다. 450ms에 복전하였을 때에는 제어가 원상 복귀하는데 2주기 정도 필요함을 알 수 있으며, 제어 응답성을 고려한 제어가 이득값을 조정하여 단축이 가능하다.

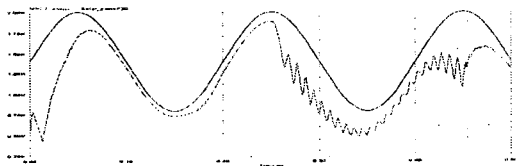


Fig. 5.1 Solar Power & MPPT Power

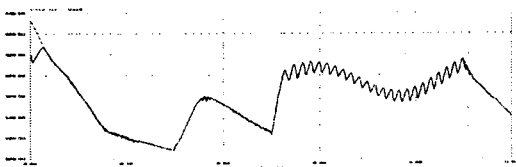


Fig. 5.2  $V_{cell}^*$  &  $V_{cell}$

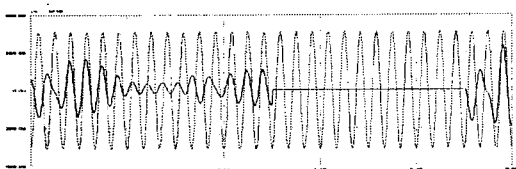


Fig. 5.3  $V_s$  &  $I_s$

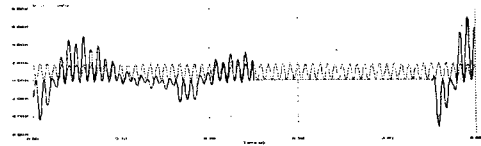


Fig. 5.4  $V_s \cdot I_s$  &  $V_s \cdot I_L$

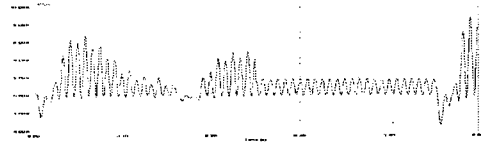


Fig. 5.5  $V_s$  &  $I_{pv}$

## 6. 결론

본 논문에서는 소형경량화, 고효율화, 저가격화, 다기능화에 적합한 독립운전기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전시스템을 설계하였다. 기존의 단일 목적의 태양광 발전시스템에서 탈피하여, 다양한 목적에서 운전이 가능하도록 설계된 Topology와 알고리즘을 구현하였다. 여러 측면에서 불리한 변압기는 생략하였고, 태양전지 Array는 Boost Chopper가 제어하도록 하였고, Inverter는 자립운전이 가능하도록 LC Filter를 갖는 구조의 Topology를 선정하였다.

연구의 결과가 실제로 적용되기 위해서는 계통전압위상의 급변시 과도한 돌입전류가 발생하고 있는 문제와 분산전원으로써 계통보호 기능에 대한 연구를 좀더 진행하여야 한다. 또한 Inverter 제어 및 MPPT제어에 대하여 현재는 PI제어 및 P&O제어를 수행하였으며, 현재의 상태에서도 우수한 결과를 나타내고 있으나, 고효율 및 저 일사량 급변에 대하여 빠른 응답을 얻기 위해서는 새로운 개념의 디지털 제어가 필요하다. 그리고 적용경제성을 확보하기 위한 Topology 및 제어계의 단순화연구도 아울러 함께 추진되어야 할 과제이다.

## 참고 문헌

- [1] N. Kasa, T. Iida, H. Iwamoto, "Maximum Power Point tracking with Capacitor Identifier for Photovoltaic Power System", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 147, No. 6, November 2000.
- [2] L. Zhang, A. Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time maximum Power Point Tracking for Grid-connected Photovoltaic Systems", *Power Electronics and Variable Speed Drives*, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475 IEE 2000.
- [3] W.-J. Ho, J.-B. Lio, W.-S. Feng, "Economic UPS structure with phase-controlled battery charger and input-power-factor improvement", *IEE Proc.-Elec. Power Appl.* Vol. 144, No. 4, July 1997.
- [4] Shyh-Jier Huang, Fu-Sheng Pai, "An Active Islanding-Detection Method for Power Conditioning Subsystem of Utility Interactive Photovoltaic System", *IEEE* 2000.
- [5] G. A. Smith, P. A. Onions, D. G. Infield, "Predicting Islanding Operation of Grid Connected PV Inverters", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 147, No. 1, January 2000.