

한국에너지공학회(1998년도)  
추계 학술발표회 논문집p209-215

## 독립형 PV시스템용 전력변환기 제어 알고리즘

정영석, 강기환, 김홍성, 정명용, 유권종, 송진수  
한국에너지기술연구소

### The Control Algorithm of Power-Conditionner for Stand-Alone PV System

Y.S Jung, G.W Kang, H.S Kim, M.W Jung, G.J Yu, J.S Song  
Korea Institute of Energy Research

Abstract - This paper deals with stand-alone Photovoltaic system(SPVS) with charge and discharge controller. Main power source of SPVS are generally solar cell and battery. Therefore SPVS can be classified into variable types in accordance with connection type between battery and solar cell. Mainly used one of them is direct connection type which has advantages such as simple structure and simple controller. However most big drawback of this system is energy loss by voltage disharmony between solar cell and battery. Therefore SPVS with charge and discharge controller which can operate solar cell at maximum power point is designed and analyzed by simulation in this paper.

#### 1. 서론

최근 지구환경문제를 비롯하여 미래에너지원의 다원화에 대한 관심이 고조되고 있으며, 특히, 자연에너지로서 실용화 및 국산화에 성공한 태양광발전시스템을 상용전원이 공급되지 않고 있는 50호미만의 소도시지역의 전원으로서 활용하고자 하는 움직임이 감지되고 있다.

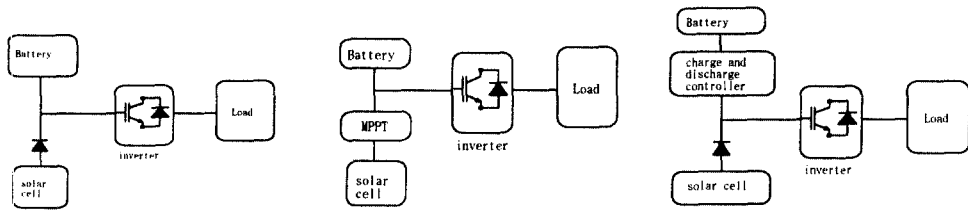
현재 전국 유인도서 518개중 270여개의 도서가 디젤발전기에 의한 제한송전, 또는 전혀 전원을 공급받지 못하고 있으므로 독립형 태양광 발전시스템(Stand-Alone PhotoVoltaic System:SPVS)은 해저케이블을 통한 송전설비의 투자비나 기술적인 문제점등을 감안하면 기존 발전방식과 경쟁 가능한 전원으로 사려된다[1].

이러한 SPVS는 주로 배터리와 태양전지를 병렬연결하여 인버터의 직류전원으로 사용하는 방식을 취하는데 이러한 방식은 배터리와 태양전지간의 전압의 부조화로인해 에너지 손실이 발생하며 이러한 손실은 배터리전압의 공칭전압을 태양전지의 최대전력점을 기준으로 선정하는 방식에 따라 손실이 15-50[%]에 이를 수 있는 것으로 발표된 바 있다. 그리고 배터리보호를 위한 별도의 장치를 필요로 한다[2-3].

그러므로 본 연구에서는 충방전기에 의한 전압의 부조화로 인한 에너지 손실을 줄이고 배터리 보호기능을 수행할 수 있는 충방전기를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 전력변화기의 제어 알고리즘에 대한 검토결과에 대하여 보고한다..

## 2. 독립형 태양광 발전시스템 개요

독립형 태양광 발전 시스템은 그림1의 (a)와 같이 태양전지와 배터리를 병렬로 연결하여 전원을 구성하고 DC/AC 인버터를 이용하여 교류전원을 출력하는 형태로 구성될 수 있다. 이와같은 구조의 시스템은 단순한 구조로 인한 제어의 간편성 등을 장점으로 들 수 있다. 그러나, 태양전지 및 배터리의 합성 I-V 특성곡선과 부하간의 관계에 따른 태양전지의 동작점 전압의 변동으로 인하여 에너지 손실이 발생한다. 이러한 에너지 손실율은 태양전지최대전력점 전압과 배터리 개방전압의 관계에 따라 15[%] - 50[%]에 이르며 최소 손실율은 배터리 개방전압이 태양전지 최대 전력점 전압의 90[%]-95[%]사이로 설정될 때 얻어지는 것으로 알려져 있다[2-3].



(a) Direct PV System      (b) MPPT PV System      (c) PCS PV System

Fig. 1. Schematic diagram of stand-alone photovoltaic system

이러한 전압의 부조화로 인한 전력손실을 줄이기 위하여 그림1(b)와 같이 MPPT(maximum power point tracker)를 이용하는 방식을 생각할 수 있다. 이러한 방식은 태양전지의 최대 전력점 운전은 가능하나, 부하상태에 따라 배터리 출력전류변동에 의하여 인버터 직류단의 전압 변동이 발생하며 배터리 보호를 위하여 별도의 장치를 필요로 한다.

그러므로 이러한 단점을 보완할수 있는 시스템으로 그림1(c)와 같이 충방전제어기를 이용한 시스템을 생각할 수 있다. 충방전 제어기는 양방향 전력제어가 가능하므로 태양전지 출력에 따라 충, 방전 모드로 동작하도록 하므로서 직류전압 제

어가 가능하며 이는 전압 부조화와 직류전압변동의 문제점의 해결이 가능함을 의미한다.

### 3. 시스템 모델

그림2는 충방전제어기를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 전력회로이다. 충방전기로는 2상한 초퍼를 이용하였다. 그리고 시스템 모델의 인덕터, 커패시터, 스위치 및 변압기는 이상적인 선형소자로 가정하였다.

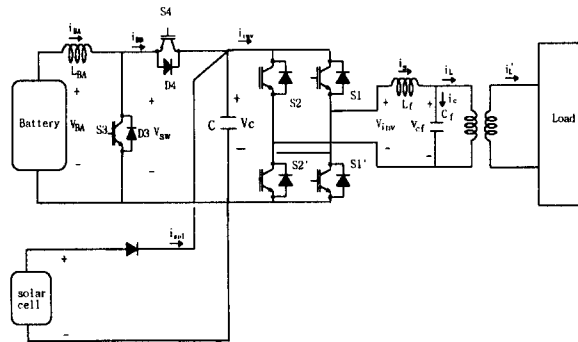


Fig. 6 stand-alone photovoltaic system using charge and discharge controller

충방전기의 시스템 방정식은 다음과 같고

$$\frac{di_{BA}}{dt} = (V_{BA} - V_{SW})/L_{BA} \text{ ----- (1)} \quad \frac{dV_C}{dt} = (i_{BD} + i_{sol} - i_{inv})/C \text{ -----(2)}$$

동작 모드별 스위치 전압( $V_{sw}$ ) 및 충방전기를 통한 DC링크 커패시터 입력전류( $i_{BD}$ )의 표현식은 다음과 같다.

<p>- 방전기로 동작 (S3, D4 사용)</p> <p>S=1 : S3 on    S=0 : S3 off</p> <p><math>V_{SW} = (1-s)V_C</math>    <math>i_{BD} = (1-s)i_{BA}</math></p>	<p>- 충전기로 동작 (S4, D3 사용)</p> <p>S=1 : S4 on    S=0 : S4 off</p> <p><math>V_{SW} = SV_C</math>    <math>i_{BD} = Si_{BA}</math></p>
--	--

그리고 인버터 표현식은 다음과 같고

$$\frac{di_s}{dt} = (V_{inv} - V_{cf} - i_s R)/L_f \text{ -----(3)} \quad \frac{dV_{cf}}{dt} = (i_s - i_l)/C_f \text{ -----(4)}$$

여기서  $V_{inv} = S_{inv} V_C$ 이고,  $S_{inv}$ 는 인버터 스위칭 함수이다.

DC 링크단에서의 출력전류( $i_{inv}$ )의 표현식을  $i_{inv} = S_{inv} i_s$ 로 하면, 솔라셀 출력전류의 표현식은 다음과 같이 나타낸다.

$$i_{sol} = i_{sc} \left( 1 - \exp \left( K \left( \frac{V_c}{V_{oc}} - 1 \right) \right) \right) \quad (5)$$

솔라셀 전류의 표현식은 실제 태양전지 V-I곡선의 근사표현식으로서 K는 곡선상수, Voc는 태양전지 개방전압, isc는 단락전류를 나타낸다. (본 연구에서 k : 7.3, Voc : 450, isc=35)

#### 4. 제어 알고리즘

시스템 제어기는 DC/AC 인버터 및 충방전 제어기로 구성된다. 충방전 제어기는 양방향 전류제어를 통하여 교류부하 및 태양전지 사이의 적력불균형을 제어함으로써 직류전압을 제어하며 DC/AC인버터는 필터커패시터 전압의 CVCF (constant frequency and constant voltage)기능을 가진다.

그림13은 충방전제어기의 블록선도를 나타낸다. 직류전압 제어기로는 PI제어기를 이용하였으며 전류제어기로는 예측제어기를 이용하였으며 전류기준신호는 전압제어기 출력 및 태양전지 출력전류의 피드포워드 항의 합으로 구성된다[5].

그림 14는 DC/AC인버터의 제어블록선도이다. 외부제어루프는 필터커패시터의 전압제어루프이고 내부제어루프는 전류제어기로 구성된다. 전류제어기로는 예측제어기를 사용하였으며 전류기준신호는 전압제어기 출력과 부하전류에 대한 피드포워드의 합으로 만들어진다.

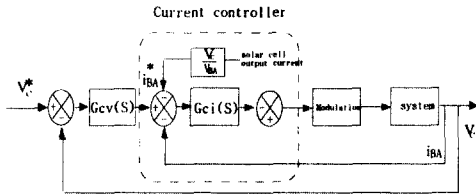


Fig. 13. blockdiagram of charge and discharge controller

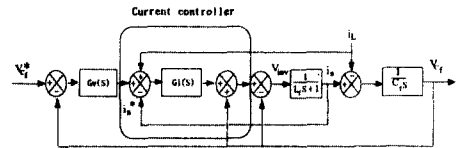


Fig. 14. blockdiagram of inverter controller

Table 1. System parameter

DC 링크 전압	340[V]
부하정격	10[kW]
스위칭 주파수	10[kHz]
태양전지최대출력	10[kW]

Table 2. Simulation condition

Lf	0.4 [mH]
Cf	80 [ $\mu$ F]
Vcf	$\sqrt{2} \cdot 200 \cdot \sin(\omega t)$
DC Voltage	340[V]
C	8500 [ $\mu$ F]
LBA	2.7 [mH]
n(батери 갯수)	90 개
E(батери 공칭전압)	2.1[V]
switching frequency	10[kHz]
sampling frequency	10[kHz]

## 5. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 시스템의 운전특성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시스템 사양 및 파라미터는 Table 1,2에 나타내고 있다.

그림 15는 0.3초에서 0.5초까지 인버터는 무부하로 그리고 태양전지는 최대 출력으로 운전되며, 0.5초부터 1초까지는 인버터는 부하역률 0.8인 정격인 전부하로 운전되는 경우이다. 그리고 1초부터 1.5초까지는 태양전지의 출력이 0으로 운전된다. 그러므로 충방전기는 0.5초까지는 충전기로 운전되며 0.5초에서 1초까지는 태양전지의 출력 및 인버터 유효전력이 거의 일치하므로 배터리 출력전류는 0을 중심으로 충.방전을 반복하는 형태로 운전된다. 그리고 1초부터는 태양전지의 출력이 전무하므로 충방전기는 방전기로 운전된다.

0.5초에서 부하변동에 따른 과도상태에서 직류전압( $V_c$ )는 약 328[V]까지 감소하였다가 0.16[sec]후에 정상상태로 돌아감을 알 수 있다. 그리고 1초에서 태양전지의 출력이 감소하였을 경우에는 거의 전압변동이 없이 맥동전압의 크기만 약간 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 태양전지출력의 변동시에는 부하변동시와는 달리 전압변동이 거의 없는 이유는 태양전지 출력에 대하여 제어기상에서 피드포워드 제어를 하고 있기 때문에 부하변동시에 비하여 우수한 과도특성을 보인다. 인버터 부하전류에 대하여도 이러한 피드포워드항의 추가를 통하여 과도특성을 개선할 수 있으나, 유효전력을 검출이 필요하며, 단상시스템에서 순시적인 유효전력의 검출을 위해서는 지연요소를 필요로 하므로 솔라셀 출력변동시의 경우에 비하여 동특성 개선 효과가 반감되는 결과를 가져온다.

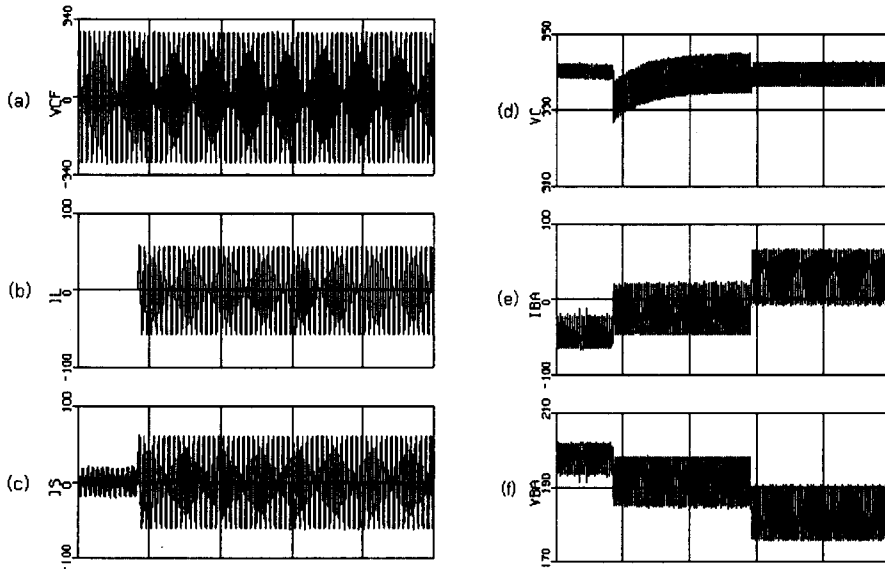


Fig. 15 Waveforms of system each part

- (a) filter capacitor voltage (b) AC load current (c) inverter output current
- (d) DC voltage (e) battery current (f) battery voltage

배터리 전류는 상당히 큰 전류리플을 포함함을 볼 수 있는데 이는 변환된 직류전압과 직류전압 기준신호의 차에 포함된 리플성분에 의한 전류기준신호자체의 리플성분 및 스위칭리플로 인하여 매우 크게 나타난다. 그리고 배터리 전압은 충전시에는 증가하고 방전시에는 감소하는 특성을 보이는데 이는 내부저항에 의하여 이런효과가 나타난다.

그림 16은 그림 15와 동일한 조건으로 0.45초에서 0.55초까지의 과도상태에서 필터커패시터전압의 과도특성을 보여주기 위해 시간 간격을 조정한 파형이다. 시스템의 최종목적은 안정된 교류전원의 공급이므로 과도상태에서의 교류전압제어 특성은 매우 중요하다. 그림을 통하여 무부하에서 전부하로 변동시 전압의 변동이 거의 전무 함을 볼 수 있다.

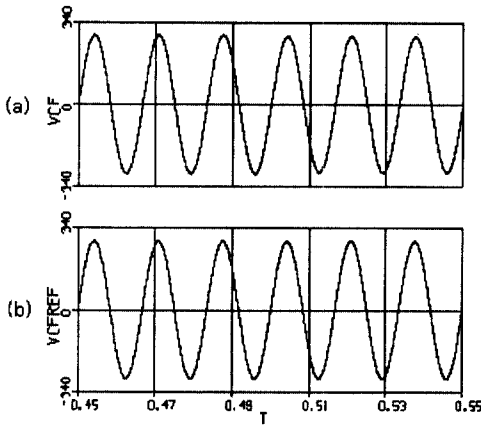


Fig. 16. Filter capacitor current during transient state  
(a) capacitor voltage  
(b) capacitor voltage reference

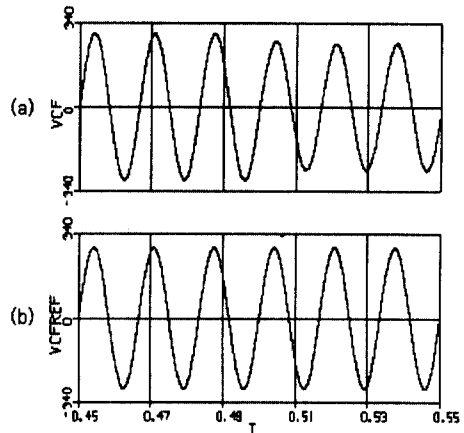


Fig. 17 Filter capacitor current during transient state  
(a) capacitor voltage  
(b) capacitor voltage reference

그림17은 인버터 제어기의 피드포워드 효과를 보여주기 위하여 제어기상에서 부하전류의 피드포워드를 제거하고 그림 15와 동일한 조건에서의 시뮬레이션 결과이다. 그림 17을 통하여 피드포워드 제거시 부하변동 후 정상상태오차가 발생함을 볼 수 있다. 이는 제어기 입력신호 및 외란이 가지는 주파수특성으로 인해 정상상태 오차에 대해 적분제어기가 무한이득을 가지지 못하기 때문이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 소도사용으로 가광을 받고 있는 충방전기를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 전력변환기의 제어계 설계에 관하여 이론적인 고찰과 시뮬레이션을 통하여 제어 알고리즘의 이론적 타당성을 입증하였다.

또한, 직류전압, 스위칭 주파수, 부하정격등이 설정되었을 경우 자연주파수, 리플에 따른 태양전지 출력 특성, 동작조건에 따라 시스템의 파라미터를 선정하고 제어기는 2중 루프 및 피드포워드제어를 이용하여 설계하였고 시뮬레이션을 통하여 운전특성을 해석하였다. 향후 필터의 자연주파수에 따른 효과나 충방전기 인덕터에 대한 설계지침의 강화가 요구되며 가격과 성능측면에서의 최적화 작업이 요망된다.

#### 참고문헌

- [1] 한국전력공사 기술연구원, “낙도 전원용 태양광 발전시스템의 표준화연구 (Ⅲ)” 연구보고서, KRC-90G-T12.
- [2] 小林廣武, “太陽光 發電における 蓄電池電壓の 設定法”, 電力中央研究所報告, 研究報告, T91071.
- [3] 小林廣武, 瀧川 清, 武田行弘, “太陽光 發電システムにおける 蓄電池運用法の 検討 -大規模蓄電池システムの 運轉特性 シミュレーション-”, 電力中央研究所報告, 研究報告, T91071.
- [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, “POWER ELECTRONICS: converters, applications and design”, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [5] Navid R. Zargari and Géza Joós, “Performance investigation of a current -controlled voltage-regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames”, IEEE Trans. Ind. Electron., VOL. 42, NO. 4, pp. 396-401, AUGUST 1995.