

## 충방전 제어를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 설계

김홍성 유권중 송진수 이병구 정영석 강기환 최규하\*  
에너지 기술연구소 \* 건국대학교 전기공학과

### Design of Stand-Alone Photovoltaic System with Charge-Discharge Controller

H.S. Kim G.J. Yu J.S. Song B.K. Lee Y.S. Jeong K.H. Kang, G.H. Choe\*  
Korea Institute of Energy Research \*Dept. of E.E, Kon-Kuk Univ.

**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

독립형 태양광 발전시스템은 낙도등 상용전원의 공급이 안 되는 지역의 에너지원으로서 배터리와 복합적으로 운전하는 방식을 통해 서해도서지역의 4개 정도의 섬에 설치되어 운용되고 있다. 현재 전국 유도도서 518개 중 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 발전시스템을 설계하고 시스템 동작특성을 확인한다.

#### 2. 독립형 태양광 발전시스템 개요

독립형 태양광 발전 시스템은 그림1과 같이 태양전지와 배터리를 병렬로 연결하여 전원을 구성하고 DC/AC 인버터를 이용하여 교류전원을 출력하는 형태로 구성될 수 있

다. 이와같은 구조의 시스템은 단순한 구조로 인한 제어의 간편성 등을 장점으로 들 수 있다. 그러나 그림2에 나타난 태양전지 및 배터리의 합성 I-V 특성곡선과 부하간의 관계에 따른 태양전지의 동작점 전압의 변동으로 인하여 에너지 손실이 발생한다. 이러한 에너지 손실율은 태양전지 최대전력점 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].

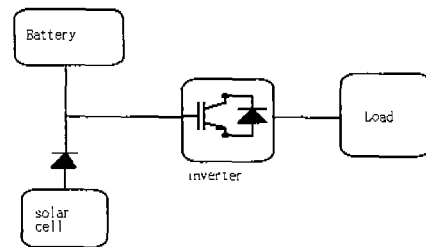


그림1 병렬운전 독립형 태양광 발전시스템 개략도  
Fig. 1 Schematic diagram of parallel operation type stand-alone photovoltaic system

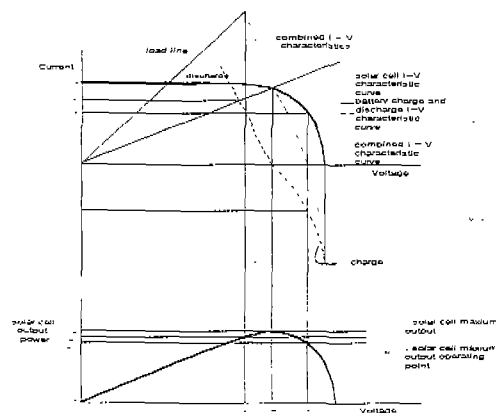


그림 2 태양전지의 동작전압에 대한 축전지의 영향  
Fig. 2 Influence of battery on operating voltage of solar cell

이러한 전압의 부조화로 인한 전력손실을 줄이기 위하여 그림3과 같이 MPPT(maximum power point tracker)를 이

용하는 방식을 생각할 수 있다. 이러한 방식은 태양전지의 최대 전력점 운전은 가능하다 그림4에 나타난 바와같이 부하상태에 따라 배터리 출력전류변동에 의하여 인버터 직류단 전압 변동이 발생하며 배터리 보호를 위하여 별도의 장치를 필요로 한다.

그러므로 이러한 단점을 보완할수 있는 시스템으로 그림5과 같이 충방전제어기를 이용한 시스템을 생각할 수 있다. 충방전 제어기는 양방향 전력제어가 가능하므로 태양전지 출력에 따라 충, 방전 모드로 동작하도록 하므로서 직류전압 제어가 가능하며 이는 전압 부조화와 직류전압변동의 문제점의 해결이 가능함을 의미한다.

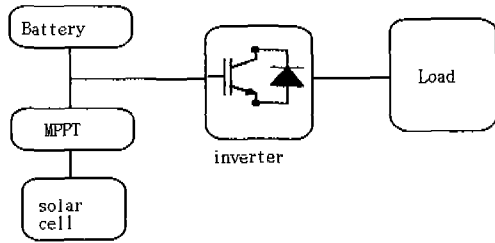


그림 3. MPPT를 이용한 시스템 개략도  
Fig. 3 Schematic diagram of system with MPPT

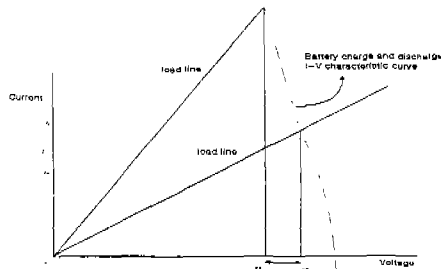


그림 4. 부하에 따른 축전지 전압의 변동  
Fig. 4 Variation of battery voltage according to load

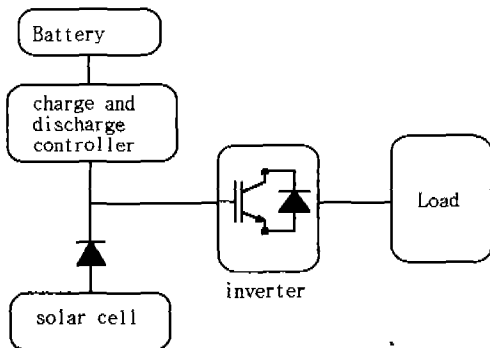


그림 5 충방전제어기를 이용한 독립형 태양광발전시스템 개략도  
Fig. 5 Schematic diagram of stand-alone photovoltaic system using charge and discharge controller

### 3. 시스템 모델

그림6은 충방전제어기를 이용한 독립형 태양광 발전시스템

의 전력회로이다. 충방전기로는 2상한 초퍼를 이용하였다. 그리고 시스템 모델의 인덕터, 커패시터, 스위치 및 변압기는 이상적인 선형소자로 가정하였다.

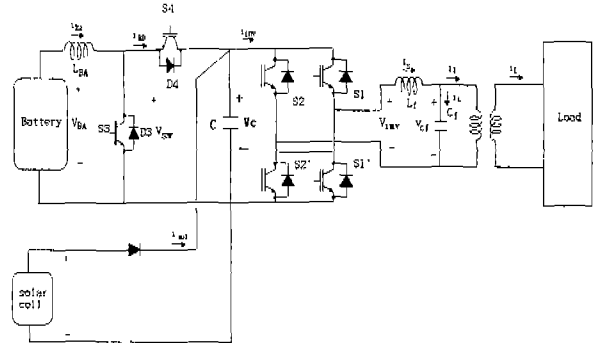


그림 6 충방전제어기를 이용한 독립형 태양광발전시스템  
Fig. 6 stand-alone photovoltaic system using charge and discharge controller

충방전기의 시스템 방정식은 다음과 같고

$$\frac{di_{BA}}{dt} = (V_{BA} - V_{SW})/L_{BA} \quad (1)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = (i_{BD} + i_{sol} - i_{inv})/C \quad (2)$$

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

- 방전기로 동작 (S3, D4 사용)

$$S=1 : S3 \text{ on} \quad S=0 : S3 \text{ off}$$

$$V_{SW} = (1-s)V_C \quad i_{BD} = (1-s)i_{BA}$$

- 충전기로 동작 (S4, D3 사용)

$$S=1 : S4 \text{ on} \quad S=0 : S4 \text{ off}$$

$$V_{SW} = SV_C \quad i_{BD} = Si_{BA}$$

그리고 인버터 표현식은 다음과 같고

$$\frac{di_s}{dt} = (V_{inv} - V_{cf} - i_s R)/L_j \quad (3)$$

$$\frac{dV_{cf}}{dt} = (i_s - i_d)/C_j \quad (4)$$

여기서  $V_{inv} = S_{inv} V_C$

$S_{inv}$  : 인버터 스위칭 함수

DC 링크단에서의 출력전류( $i_{inv}$ )의 표현식은 다음과 같다.

$$i_{imv} = S_{imv} i_s \quad (5)$$

솔라셀 출력전류의 표현식은 다음과 같다.

$$i_{sol} = i_{sc} (1 - \exp(K(\frac{V_c}{V_{oc}} - 1))) \quad (6)$$

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. 시스템 설계

##### (1) 전력회로 파라미터 선정지침

본 절에서는 DC 링크 전압(태양전지 최대전력점 전압), 스위칭 주파수, 부하정격, 태양전지 최대출력이 설정되었을 경우 전력회로의 전력회로의 파라미터를 설계한다. 설계될 요소로는 인버터 L-C필터, DC 링크 커패시터, 및 배터리갯수등이다. DC링크전압은 태양전지의 최대 전력점 점압으로 결정되며 스위칭 주파수는 용량, 손실, 소음등을 고려하여 결정되어야 할 것이다. 표 1은 본 논문에서 연구된 시스템의 기본사양이다.

표 1. 시스템 기본사양

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

##### ① 교류필터 선정

L-C로 구성되는 교류필터는 인버터출력전압의 정현파화를 위해 사용되는데 만약 부하가 고정된다면 정확한 주파수 특성을 이용하여 필터 파라메타 선정이 가능하나 부하변동 및 모델과 실제시스템 간의 차이등은 항상 존재하고 이로인해 차단주파수가 변화하므로 본 연구에서 교류필터 파라메타는 차단주파수에 비해 일반성을 부여할 수 있는 필터의 자연주파수 표현식을 이용하여 스위칭 주파수의 1/10정도로 선정하였다.

$$f_{n} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (7)$$

##### ② DC링크 커패시터의 선정

DC 링크 커패시터의 선정은 전압맥동의 주원인 단상전원에서 발생하는 120[Hz] 전력성분에 의하여 발생하는 맥동전압을 고려하여 선정되어야 한다. 직류전압의 맥동전압이 태양광 시스템에 미치는 영향으로는 그림 7과 같이 태양전지의 동작점 전압을 변화에 따른 출력 변동으로 인한 출력의 감소를 들 수 있다. 그림8은 다음과 같이 정의된 맥동율에 따른 태양전지 최대출력에 대한 태양전지 출력의 평균치의 비를 나타낸다.

$$\text{맥동율}[\%] = \frac{\text{peak value of ripple voltage}}{\text{DC Voltage}} \times 100$$

그림8을 통하여 맥동율이 15[%]정도일 때 출력비가 95[%] 정도로 에너지 손실이 5[%]에 달함을 볼 수 있다. 그리고 제어적인 측면에서 제어이득 및 제어입력의 한계성을 고려하면 커패시터는 과도응답에 큰 영향을 미치므로 정상상태에서의 맥동전압에 의한 에너지손실을 및 과도상태의 시스템 제어특성을 고려하여 설계되어야 한다.

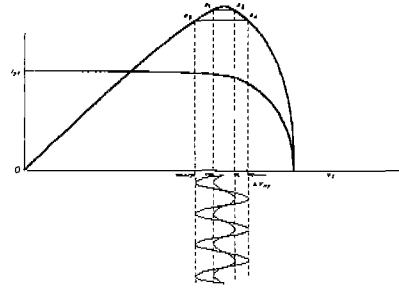


그림 7. 직류전압에 포함된 리플전압에 따른 태양전지 출력특성

Fig. 7 Solarcell output characteristics according to ripple voltage contained in DC voltage

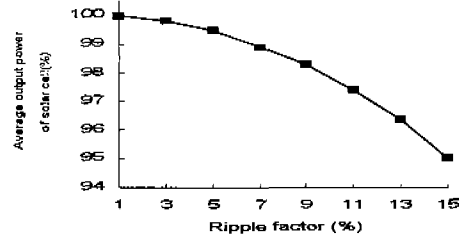


그림 8. 맥동율과 태양전지 출력과의 관계

Fig. 8 Relation between ripple factor and solar cell output

##### ③ 배터리전압 선정

배터리는 태양전지와 부하간의 전력관계에 따라 부하 또는 전원으로 작용하며 충전기와 방전기로 운전시 모두 운전 조건을 만족시킬 수 있도록 전압이 선정되어야 한다. 배터리는 그림9와 같이 내부저항(Rin)과 공칭전압(E)로 모델링되며 그림10은 배터리 I-V특성곡선 및 내부저항의 변동 특성을 나타내는 것으로 비선형 특성을 보이는 전원임을 알 수 있다[2-3].

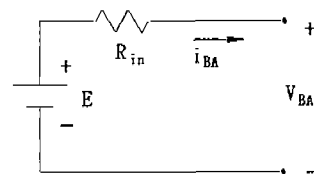


그림 9. 배터리 모델  
Fig. 9 Battery model

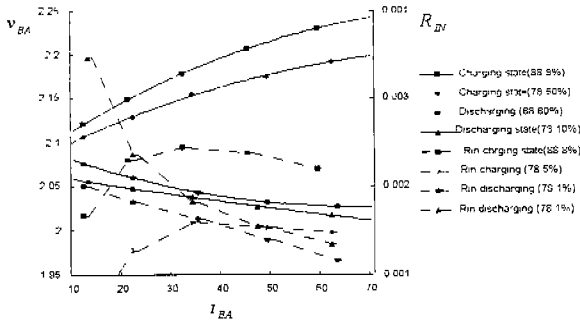


그림 10. 배터리 I-V 특성곡선 및 내부저항 변동특성  
Fig. 10 Battery I-V characteristic curve and inner resistance variation characteristics

그림11은 유효전력의 측면에서 인버터 및 태양전지를 저장으로 취급할 경우의 시스템 근사모델이다.

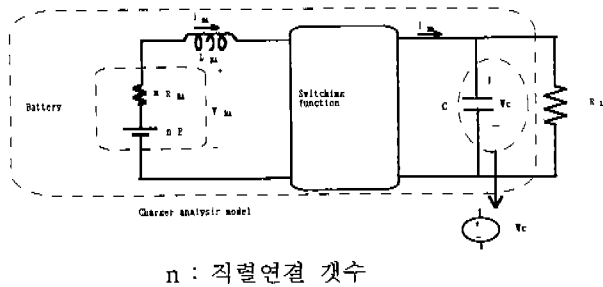


그림 11. 시스템 근사 모델  
Fig. 11 Approximated system model

방전기로 동작할 경우의 연속전류 조건에서 상태평균화법 [4]에 의한 정상상태 시스템 전달함수는 식(8)과 같으며 부하가 클수록 증폭율이 감소함을 알 수 있다.

배터리로부터 최대의 방전이 이루어질 경우는 태양전지 출력이 전무한 경우이므로 이경우에 대하여 배터리 전압을 선정하면 된다. 그러므로 부하저항(RL)을 식(9)와 같이 구하여 대입하면 듀티비와 배터리 갯수에 따른 출력전압을 구할 수 있다.

$$V_c = \frac{nER_L(1-D)}{nR_{BA} + R_L(1-D)^2} \quad (8)$$

여기서 D : 듀티비, n : 배터리 직렬연결 갯수

$$R_L = \frac{\text{정상동작전압}^2}{\text{정격전력}} \quad (9)$$

그리고 충전기로 동작할 경우 그림10의 점선부분의 직류 전압(Vc)를 일정전압원으로 표현하면 DC 링크부에서 충전기로의 입력전류의 표현식은 다음과 같으며

$$I_{BD} = \frac{DnE - D^2 V_c}{nR_{BA}} \quad (10)$$

직류전압(Vc)의 정상 동작직전압이 340[V]일 때 듀티비에 따른 I<sub>BD</sub>를 구하여 다음의 관계를 만족하도록 배터리 전압이 설계되어야 한다.

$$P_{BD} (= \text{정상동작전압} \times I_{BD}) \geq \text{태양전지최대출력} \quad (11)$$

그림 11은 공칭전압은 2.1[V], 배터리 내부저항은 모드별로 가장 큰값, 그리고 태양전지 최대출력은 10[kW]일 경우 배터리 갯수에 따른 충전전모드에서 동작조건을 만족시킬 수 있는 최소 듀티비를 나타낸다. 최소 듀티비가 작게 배터리 갯수를 선정할 수 록 제어기가 포화되는 단점을 억제하므로 과도특성면에서 유리하다. 그러나 충전전모드에서 각각 상반된 듀티비의 변화 특성을 가지므로 두 모드에서 비슷한 최소 듀티비를 가지도록 선정함이 적절하다. 그림을 통해 80-90개의 배터리를 직렬연결하면 양 동작모드에서 듀티비 0.5정도에서 동작조건을 만족시킬을 알 수 있다.

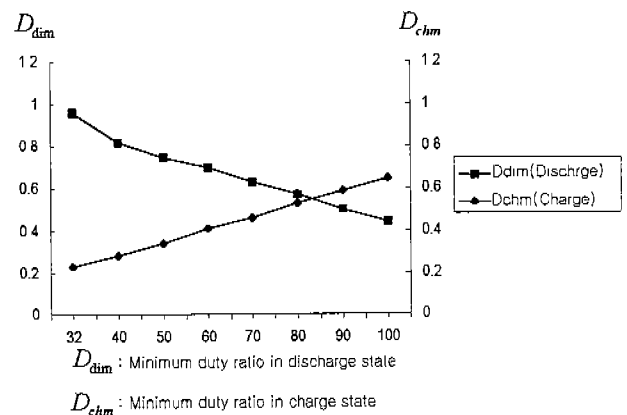


그림 12. 배터리 갯수에 따른 듀티비 변동  
Fig. 12 Variation of duty ratio according to battery number

## (2) 제어기 설계

시스템 제어기는 DC/AC 인버터 및 충전전 제어기로 구성된다. 충전전 제어기는 양방향 전류제어를 통하여 교류 부하 및 태양전지 사이의 전력불균형을 제어함으로써 직류 전압을 제어하며 DC/AC인버터는 필터커패시터 전압의 CVCF(constant frequency and constant voltage)기능을 가진다.

그림13은 충전전제어기의 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.

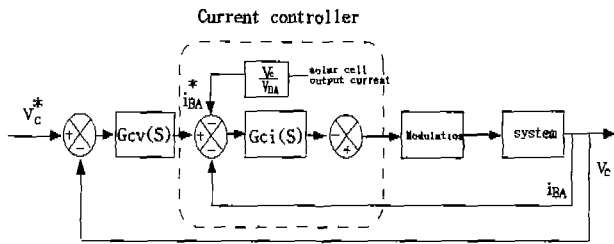


그림 13. 충전방전 제어기 블록선도  
Fig. 13 blockdiagram of charge and discharge controller

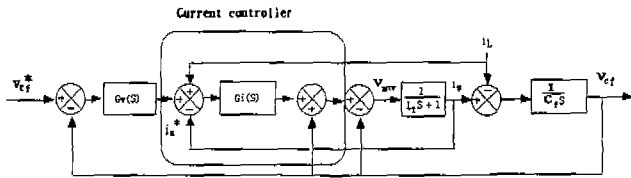


그림 14. 인버터 제어기 블록선도  
Fig. 14 blockdiagram of inverter controller

### 5. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 시스템의 운전특성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시스템 파라미터는 다음과 같다.

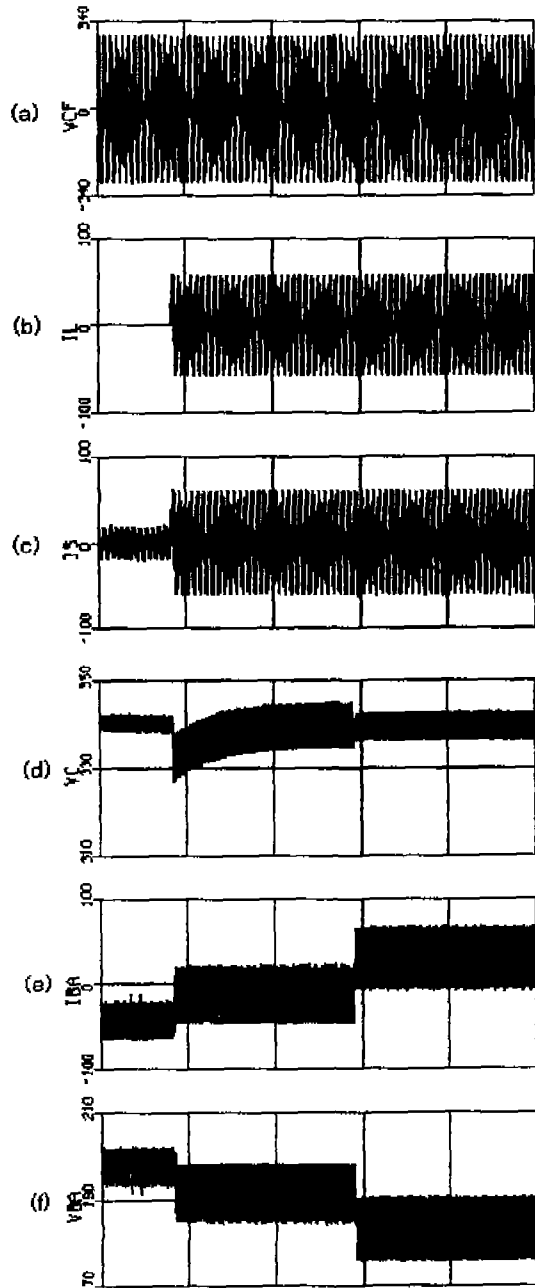
표2 시뮬레이션 조건  
Table 2 Simulation condition

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

그림 15는 0.3초에서 0.5초까지 인버터는 무부하로 그리고 태양전지는 최대 출력으로 운전되며, 0.5초부터 1초까지는 인버터는 부하역률 0.8인 정적인 전부하로 운전되는 경우이다. 그리고 1초부터 1.5초까지는 태양전지의 출력이 0으로 운전된다. 그러므로 충전방전기는 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 전부하하므로 충전방전기는 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 백동전압의 크기만 약간 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 태양전지 출력의 변동시에는 부하변동시와는 달리 전압변동이 거의 없는 이유는 태양전지 출력에 대하여 제어기상에서 피드포워드로

고려하여 주었기 때문에 부하변동시에 비하여 우수한 과도특성을 보인다. 인버터 부하전류에 대하여도 이러한 피드포워드항의 추가를 통하여 과도특성을 개선할 수 있으나 교류부하에 대한 피드포워드의 추가를 위한 문제점은 다음과 같다. 교류측의 전력은 무효전력 및 유효전력으로 구성되며 과도상태에서 직류전압의 변동은 유효전력의 변동에 기인한다. 그러므로 유효전력을 검출이 필요하며 이러한 검출은 순시적으로 이루어져야 한다. 그러나 단상시스템에서 순시적인 유효전력의 검출을 위해서는 지연요소(필터, 한주기 또는 반주기 적분)를 필요로 하므로 솔라셀 출력변동시의 경우에 비하여 동특성 개선 효과가 거의 없다.



- continued -

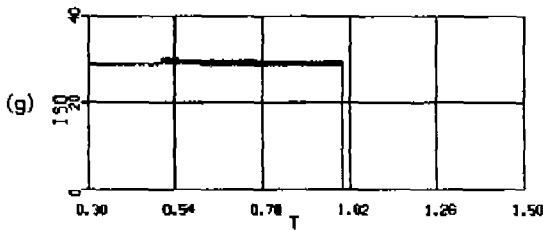


그림 15. 시스템 각부 파형

- (a)필터 커패시터 전압 (b)교류부하전류  
(c)인버터출력전류 (d)직류전압 (e) 배터리 전류  
(f) 배터리 전압 (g)태양전지 출력전류

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  
(g) solarcell output current

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 최종 목적은 안정된 교류전원의 공급이므로 과도상태에서의 교류전압제어특성은 매우 중요하다. 그림을 통하여 무부하에서 전부하로 변동시 전압의 변동이 거의 전무함을 볼 수 있다.

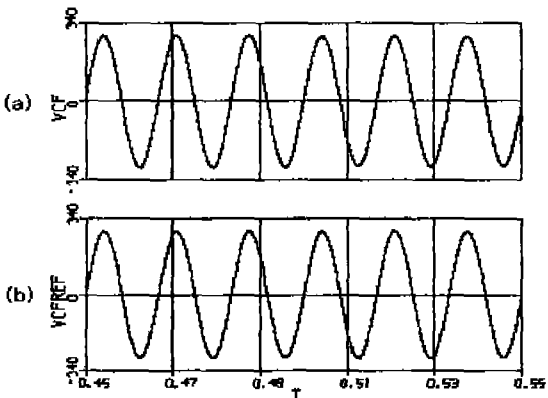


그림 16. 과도상태에서 필터 커패시터 전압

- (a) 커패시터 전압 (b) 커패시터 전압 기준신호

Fig. 16 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.

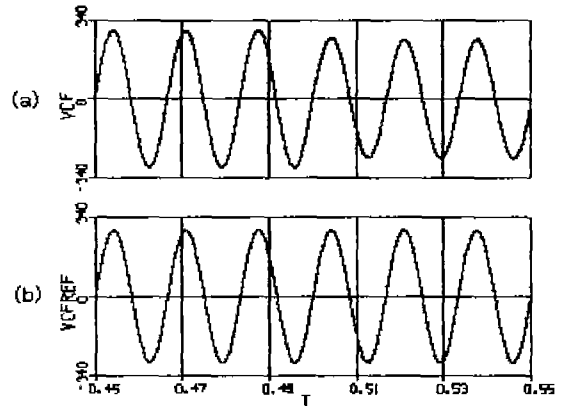


그림 17. 피드포워드 제어가 없는 경우 과도상태에서 필터 커패시터 전압

- (a) 커패시터 전압 (b) 커패시터 전압 기준신호

Fig. 17 Filter capacitor current during transient state

- (a) capacitor voltage (b) capacitor voltage reference

## 6. 결론

본 연구에서는 충방전기를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 전력회로 및 제어기 설계에 관한 내용을 다루었다. 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 표준화 연구(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.