

# 해상용 브이에 적합한 DC-DC 컨버터 연구

† 오진석\*

\* 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수

## Research of DC-DC Converter for Ocean Buoy

† Jin-Seok Oh\*

\* Professor, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요약** : 본 논문은 벡, 부스터, 벡-부스터 등의 부이용 DC-DC 컨버터 성능에 대하여 기술하였다. PV 시스템과 연계한 컨버터에 관한 특성이 고려된 동작특성 및 충전효율에 대하여 분석하였다. 그것은 MPPT 알고리즘과 더불어 수행되었다. 컨버터를 위한 기본 스위칭 방정식을 기술하고, 스위칭 상태에 따른 방정식을 해석하였다. 이 해석은 부이선택에 초점을 맞추고 있으며, 또한 컨버터 동작 및 제안한 알고리즘의 성능을 관찰하였다. 마지막으로 부이에 적합한 DC-DC 컨버터를 제안하였으며, 벡 컨버터에 대한 특성실험도 수행하였다.

**핵심용어** : DC-DC 컨버터, 벡 컨버터, 부스터 컨버터, 벡-부스터 컨버터, MPPT

**Abstract** : This paper describes the performance of DC-DC converters for buoy such as buck, boost, and buck-boost. The operating characteristic and charging efficiency with battery, which has a considerable properties about converters with PV(photovoltaic) system, is analyzed in this paper. It is performed by using the MPPT(Maximum Power Point Tracker) algorithm. The basic equations of switching operation for converter are described, and the equations are analyzed with according to switch state. Whereas this analysis is directed toward the selection of converter for buoy, it also provides the insight into the behaviour of converter and performance of the proposed algorithm. Finally, the suitable DC-DC converter is proposed for buoy, and the characteristic experiment is performed with the buck converter.

**Key words** : DC-DC converter, Buck converter, Boost converter, Buck-boost converter, MPPT

### 1. 서론

해상에서 사용되는 브이는 다양한 용도로 사용되고 있다. 그 중에서도 선박의 안전항로를 확보하기 위해 사용되는 브이는 e-Navigation 등의 항해지원시스템의 첨단화에 따라 다양한 연동시스템이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 전력 소모량 또한 증가하고 있다. 하지만 기존의 태양광 발전시스템을 이용한 독립형 전력시스템은 기상에 따른 발전량 제한으로 인해 운용상에 문제점이 발생하고 있다. 이 문제점의 해결책으로 새로운 개념의 부이용 발전시스템이 요구되고 있다. 일반적으로 태양전지 어레이(array)는 일사량과 온도에 따라 발전량이 크게 변한다. 태양전지 어레이 출력은 일사량에 따라 V-I(전압-전류) 및 V-P(전압-전력) 특성이 비선형이다. 그리고 온도도 태양전지 어레이 출력에 중요한 변수이다. Fig. 1은 온도와 일사량에 따른 태양전지 어레이의 I-V 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 단락전압에 대한 온도계수는 독립 셀(cell)에 대하여  $-2.3\text{mV}/^\circ\text{C}$  정도이며, 마이너스 값을 갖는다. 반대로 전류 계수는 모듈(module)의 평방 센티미터(centimetre) 당 약  $-6\mu\text{A}/^\circ\text{C}$  정도의 적은 양의 값을 가진다. 태양광 전지 어레이 출력은 일사량에 따라서 출력의 변화에

직접적으로 영향을 주며, 일사량에 비례하여 태양전지 어레이 단락전류도 증가한다. 그러나 전압변화는 매우 적어서 실제 시스템 설계과정에서 무시하는 경우가 많다.

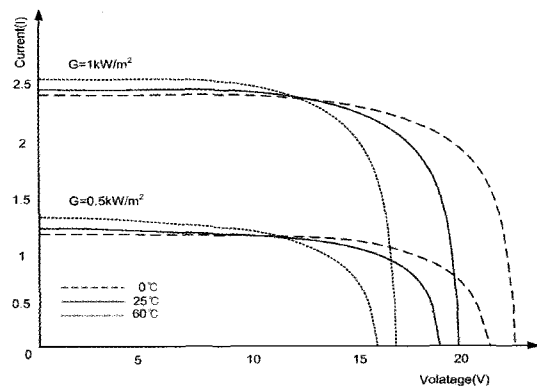


Fig. 1 The temperature and irradiance dependence of the PV array I-V characteristic

본 연구는 해상에서 선박의 안전항로를 확보하기 위해 운용되는 부이용 전력시스템의 최대 출력효율을 얻기 위하여 필요

† 교신저자 : 오진석(중신회원), ojs@hhu.ac.kr 051)410-4283

한 컨버터에 대하여 기술하고자 한다. 해상에 설치되는 부이는 끊임없이 좌우 및 상하 운동을 하는 물체로써 일사량을 일정한 각도에서 받는 육상의 태양광 발전시스템과 차이가 많다. 이러한 발전환경 문제에 능동성을 갖는 태양광 발전시스템이 되도록 최대전력추적기 MPPT(Maximum Power Point Tracker)의 알고리즘을 부이의 운동특성을 고려하여 설계한다. 그리고 부이에 사용되는 축전지의 충방전 요구특성을 반영한 충방전 알고리즘을 구축하고, 이러한 알고리즘을 활용할 수 있는 부이용 DC-DC 컨버터를 설계하고 실험을 통하여 성능을 확인하고자 한다. (John, 1997; Hussein et al.,1995)

## 2. 등부표용 전력체계

해상에 설치된 대부분의 등부표는 태양광 발전시스템 기반으로 전력체계가 구성되어 있다. 이러한 전력체계는 기상 따라 발전성능이 수동적으로 제한을 받는 문제점을 안고 있다. 또한 등부표는 해면에 떠있는 해양교통안전시설물로서 상하, 회전, 좌우 운동을 지속적으로 함으로써 육상의 태양광 발전시스템이 가지고 있는 일정한 입사각을 유지할 수 없는 특성을 가지고 있다. Fig. 2는 태양광 발전시스템인 태양전지 어레이를 부착한 부이 전력체계를 도시한 그림이다.

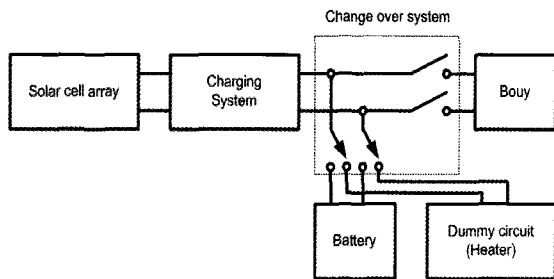


Fig. 2 Power circuit for buoy with PV array

태양전지 어레이가 받는 레이디에이션(radiation)은 입사각에 지배를 받는다. 그러므로 등부표에 태양전지 어레이를 설치할 때 입사각을 결정하는 기하학적인 검토는 부이의 구조적인 특성과 연계하여 고려되어야 한다. 레이디에이션은 다양한 형태와 다양한 목적으로 이용된다. 가장 많이 활용되는 것은 수평면에서 BSR(Beam Solar Radiation)과 DSR(Diffuse Solar Radiation)이다. 육상의 경우 BSR의 입사각은 일정한 각도를 유지할 수 있지만 해상에서 운용되는 등부표의 경우에는 실시간으로 변한다. 그러므로 등부표용 전력체계는 육상에서 적용하는 일반적인 최대전력점 추적 알고리즘(P&O, IncCond 등)을 바로 적용하는 것은 무리가 있다.

그러므로 MPPT는 등부표의 운동특성, 충전알고리즘, 축전지의 요구 특성을 고려한 전력체계와 연동할 수 있도록 설계해야 한다. 또한 Fig. 2에 도시한 것과 같이 축전지의 충전 상태에 따라 절환시스템을 효과적으로 제어 관리해야 한다. 태양전지 어레이의 전류, 전력 관계식은 식(1) 및 식(2)로 표현할 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qV_p}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$P = V_p I_{ph} - V_p I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{qV_p}{AKT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

식(1) 및 식(2)에서  $I_{ph}$ 는 셀 광전류,  $V_p$ 는 PV 출력전압,  $I_{sat}$ 는 포화전류,  $q$ 는 충전 전하량,  $K$ 는 볼츠만 상수(Boltzman's constant),  $T$ 는 셀 온도,  $A$ 는 PN 접합 재료 상수이다.

본 논문에서 적용하고자 하는 MPPT 알고리즘은 식(2)에 표시한 전압에 대한 출력전력의 미분 관계를 정리한 식(3)을 활용하여 구성한다. 또한 해상에 운용되는 부이의 운동특성 및 충전알고리즘을 반영하여, 부이용 전력시스템에 적합한 컨버터 스위칭 알고리즘을 설계한다.

$$\frac{dP}{dV_p} = I - \frac{qV_{sat}}{AKT} \exp\left(\frac{qV_p}{AKT}\right) \quad (3)$$

태양광 전지판의 출력은 일사량, 태양광 전지판의 표면온도, 설치 및 운영 조건에 따라 차이가 있다. 해양교통안전시설물인 등부표의 독립형 태양광 전력계통은 운영조건을 반영하여 설계 한다. 일반적으로 축전지와 태양전지 어레이의 최적 출력점이 완벽하게 일치 하지 않는다. 태양광 발전시스템의 제어기는 태양전지 어레이의 최대 전력점을 추적할 수 있는 DC-DC 컨버터 기반으로 설계되어야 한다.

본 논문에서는 태양광 전지판의 최대출력지점을 추적하여 충전지를 충전하는 알고리즘으로 활용하여 충전시스템을 구현하였다. 부이시스템과 같은 적은 용량의 전력체계는 축전지와 태양전지 어레이가 역류방지 다이오드로 연결된다. 이러한 구조는 축전지 충전요구에 적합한 태양광 발전체계의 올바른 선택에 따른다. 태양광 발전시스템의 일반적인 운전특성은 충전을 허용하는 최소 충전 전압과 역류방지방용 다이오드 전압강화를 고려한 최대 충전 전압 사이에서 동작한다. 만약에 태양전지 어레이 동작전압이 Fig. 3에 도시한 것과 같이 운전범위 전압의 상단 끝인 "a" 점에 있다면 미소한 충전지 전압 증가에도 태양전지 어레이의 충전전류는 급격히 감소함으로써 축전지의 과충전을 방지한다.

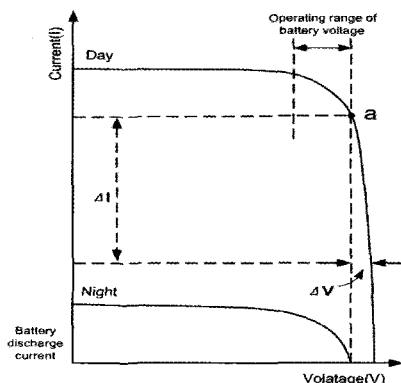


Fig. 3 Operation characteristic of PV system with battery

실제 부이용 전력시스템에서 대기온도는 시스템 성능에 많은 영향을 미친다. 그러므로 부이용 전력설계에서 축전지 온도를 일정하게 유지할 수 있는 냉각 메커니즘과 온도를 고려한 충전알고리즘을 설계하는 것이 바람직하다.

MPPT 알고리즘은 MPP(Maximum Power Point)에서 출력 전력을 전압에 대하여 미분했을 때 영(zero)과 일치하도록 동작한다. MPPT 알고리즘, 충전알고리즘, 등부표의 운동특성을 고려한 등부표 전력체계 제어 알고리즘의 플로 차트는 Fig. 4와 같다.

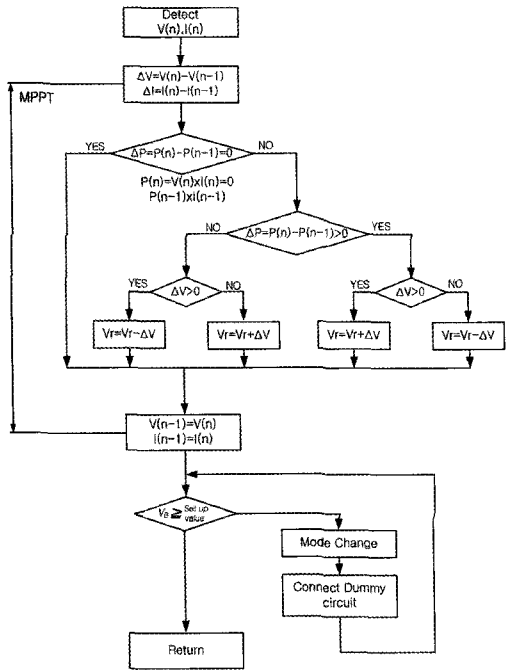


Fig. 4 Algorithm of power system for buoy

### 3. DC-DC 컨버터

해상에서 운용되는 부이의 다양한 환경 및 시스템적인 특성을 반영한 우수한 전력체계를 확보하기 위해서는 Fig. 4에 언급한 알고리즘을 최적으로 수행할 수 있는 DC-DC 컨버터가 있어야 한다. 일반적으로 태양광 발전시스템에 적용하기 위하여 벡(buck) 컨버터, 부스터(boost) 컨버터, 벡-부스터 컨버터가 많이 연구되고 있다.

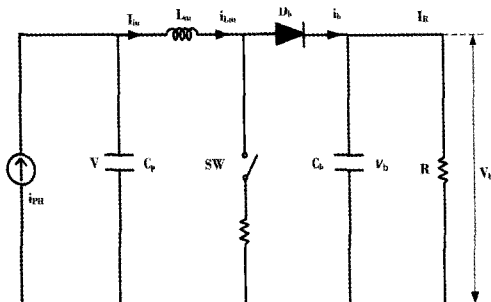


Fig. 5 diagram of the boost converter

부스터 컨버터는 태양전지 어레이 전압이 축전지 전압보다 낮은 경우에 충전이 가능한 구조로 되어 있고, 벡 컨버터는 태양전지 어레이 전압이 축전지 전압보다 높은 경우에만 충전이 가능한 구조로 되어 있다. Fig. 5는 부스터 컨버터의 블록선도를 도시한 것이다.(Muhamad, 1988)

Fig. 5의 부스터 컨버터는 스위치 SW가 온(on) 되면 입력 전압에 의해 에너지가 코일에 축적되고, 다이오드 D는 차단된 상태를 유지한다. 이때 출력 측은 콘덴서 C<sub>b</sub>에 축적된 전하가 부하저항에 공급된다. 그리고 SW가 오프(off) 되면 코일에 축적된 에너지가 다이오드 D를 통해서 부하 측으로 전달된다. 듀티비 ( $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$ )를 이용한 부스터 컨버터의 입출력 전압 관계식은 식(4)와 같다.

$$\frac{V_b}{V} = \frac{1}{1-\alpha} = \frac{T}{T_{off}} \quad (4)$$

부스터 컨버터 스위치 SW의 온 및 오프 상태에 관한 관계식은 다음과 같이 정리할 수 있다. 스위치 SW가 온 상태인 경우 회로방정식은 식(5) 및 (6)과 같다.

$$\frac{dv_b}{dt} = -\frac{1}{RC_b} v_b \quad (5)$$

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = V - R_L i_{L_m} \quad (6)$$

스위치 SW가 오프 상태인 경우 회로방정식은 식(7) 및 (8)과 같다.

$$\frac{dv_b}{dt} = -\frac{1}{C_b} \cdot \frac{v_b}{R} + \frac{1}{C_b} i_{L_m} \quad (7)$$

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = V - V_b - R_L i_{L_m} \quad (8)$$

그리고 다른 형태의 컨버터인 벡 컨버터의 블록선도를 Fig. 6에 도시하였다.

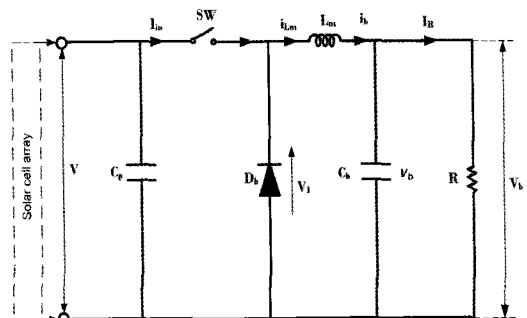


Fig. 6 Block diagram of the buck converter

벽 컨버터는 스위치 SW가 도통되면 입력전압에 의해 코일에 에너지가 축적된다. 이때 다이오드 D는 차단상태가 된다. 스위치 SW가 오프 상태에서는 코일에 축적된 에너지가 다이오드 D와 도통회로를 구성하면서 출력 측에 에너지를 전달한다. 벽 컨버터의 입출력 전압 관계식은 식(9)와 같다.

$$V_b \frac{T_{on}}{T} \int_0^T v_b(t) dt = \alpha V \tag{9}$$

벽 컨버터 스위치 SW가 온 상태일 때 회로 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = V - v_b - R_L i_{L_m} \tag{10}$$

$$\frac{dv_b}{dt} = -\frac{1}{RC_b} v_b + \frac{1}{C_b} i_{L_m} \tag{11}$$

그리고 오프 상태에서 회로 방정식은 식(12) 및 식(13)으로 표현할 수 있다.

$$L \frac{di_{L_m}}{dt} = -R_L i_{L_m} - v_b \tag{12}$$

$$\frac{dv_b}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_{L_m} - \frac{1}{RC} v_b \tag{13}$$

태양광 발전시스템에 적용할 컨버터의 입력 측은 전류원 형태이며, 출력측은 충분한 충전용량을 가진 축전지로 구성된다. 즉 일반적인 컨버터는 전압원 입력에 부하저항의 출력으로 구성되지만, 태양광 발전시스템은 전류원 입력에 충분한 충전용량을 가진 축전지 전압원 출력을 가지고 있다.

태양전지 어레이와 연동되는 벽 컨버터 및 부스트 컨버터의 동작특성 영역은 부스터 컨버터의 경우 식(5)부터 식(8)까지 온 구간에서는 입력전압 V는 영보다 높아야 하고, 식(8)에서

오프 경우에 코일에 충전된 전류가 부하 측에 공급되어야 한다. 이러한 관계를 정리하면 입력전압은 영보다 높고, 출력전압보다는 낮은 범위에서도 동작이 가능한 관계가 성립된다. 또한 벽 컨버터 스위치 SW가 온 상태인 경우 코일의 전류가 영에서 증가하는 변화를 한다. 그러므로 전류 변화는 영보다 크다. 식(10)을 통하여 입력전압이 출력전압보다 높다는 것을 알 수 있다. 또한 오프 상태인 경우 식(12)를 통하여 출력전압이 영보다 높다는 것을 알 수 있다. 이상의 컨버터 관련 내용에 태양전지 어레이 출력 특성 곡선을 연계하여 해석하면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 축전지 전압을 기점으로 하여 부스트 컨버터의 영역과 벽 컨버터의 영역이 나누어져 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 태양전지 어레이와 컨버터의 상호특성을 나타낸 것이다(Ling et al., 2001).

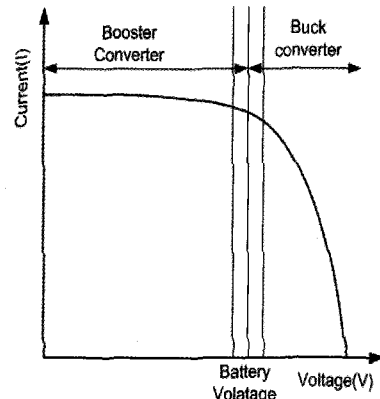


Fig. 7 Characteristic of converters with solar cell array

Fig. 7에서 두 종류의 컨버터 동작경계는 부스트 컨버터의 듀티비가 0이거나 벽 컨버터의 듀티비가 1일 경우이다. 즉 이 경계가 되는 지점은 태양 전지와 축전지를 직결연결 했을 때의 전압이다. 부스트 컨버터를 사용하면 태양 전지의 출력 전압은 낮아지고 축전지로 충전되는 전압은 높아진다. 하지만 태양전지 어레이의 특성 곡선에서 출력 전력이 낮아지는 경우, 부스트 컨버터의 특성상 전압은 증가하지만 출력 전류는 감소하게 된다. 그러므로 부스트 컨버터로 축전지에 충전할

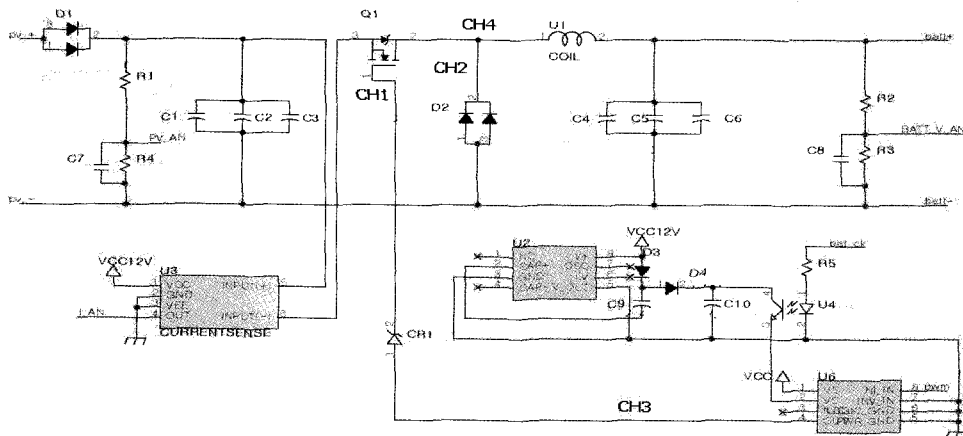


Fig. 8 Circuit diagram for executing the experiment

경우 충전량이 축전지와 태양전지 어레이를 직결했을 때보다 낮게 나올 수 있다.

벽 컨버터를 이용하여 충전할 경우, 태양전지 어레이의 출력이 태양 전지판과 축전지를 직결하였을 때보다 높으며, 태양전지어레이의 최대 출력 지점을 포함하는 영역에서 출력을 효과적으로 제어 할 수 있다.

#### 4. 실험 및 고찰

등부표에 활용하기 위한 컨버터는 축전지에 충전효율이 높은 것이어야 한다. 일반적으로 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 부스터 컨버터와 벽 컨버터는 효과적인 제어 영역이 나누어져 있음을 알 수 있다. 그 경계는 부스터 컨버터의 듀티비가 "0"이고, 벽컨버터의 듀티비가 "1"인 지점이다. 그 경계 지점은 태양전지 어레이, 컨버터, 축전지가 직결일 경우와 같은 동작특성을 갖는다. 실제로는 축전지 충전상태가 영향을 받으므로 약간의 오차가 존재한다. 이 경계영역에서 부스터 컨버터의 경우 태양전지 어레이의 발전전류는 많지만, 전압이 낮기 때문에 충전이 되지 못했고, 벽 컨버터의 경우 발전전류량은 부스터 컨버터 보다 적지만 전압이 축전지 전압보다 높기 때문에 충전을 원활히 할 수 있다. 본 연구에서 실험용 회로는 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 N-Type MOSFET를 사용할 경우 source 측 전위가 gate 전위보다 10V 정도 높아야 스위칭이 가능하다. 그러므로 축전지 전위를 상용해야 함으로 승압을 위해 펄스 트랜스를 사용해야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 P-Type MOSFET를 사용하여 스위치 회로를 구성하면 Floating 문제 및 승압 문제를 해결할 수 있다. Fig. 8의 회로를 이용하여 등부표용 전력시스템에 적용하기 위한 벽 컨버터의 동작특성을 실험하고, 더불어 제안한 알고리즘의 성능을 확인하고자 한다. Fig. 9는 축전지 전압인 12V를 ICL7660 (CMOS voltage converter)을 이용하여 24V로 승압한 후 스위칭 소자인 UC3705에 공급하여 스위칭 한 결과이다. 실험은 태양전지 어레이 전압이 28V, 출력전류 0.74A인 경우이고, 실험 파형은 축전지 전압을 검출하여 제어 알고리즘에 피드백하는 PC817 검출회로가 없는 실험결과이다.

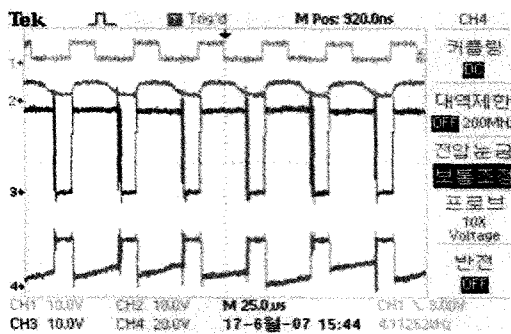


Fig. 9 Waveforms for buck converter without feedback loop

Fig. 10은 Fig. 9 실험과정과 동일한 스위칭 동작 특성으로 실험한 것이다. 실험은 태양전지 어레이 전압이 22V, 출력전류 0.71A인 경우이고, 실험 파형은 축전지 전압을 검출하여 제어 알고리즘에 피드백하는 PC817 검출회로가 있는 실험결과이다.

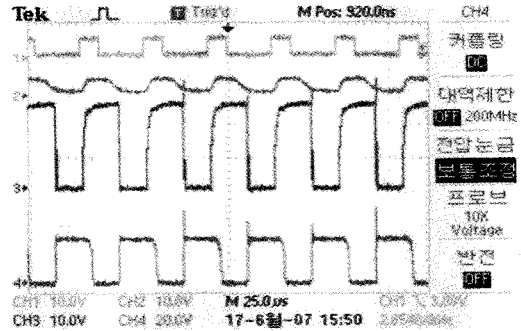


Fig. 10 Waveforms for buck converter with feedback loop

Fig. 11도 동일한 실험환경에서 수행하였다. 실험결과 태양전지 어레이 전압은 27V, 출력전류 0.68A인 경우이고, 실험 파형은 축전지 전압을 검출하여 제어 알고리즘에 피드백하는 PC817 검출회로가 없는 실험결과이다.

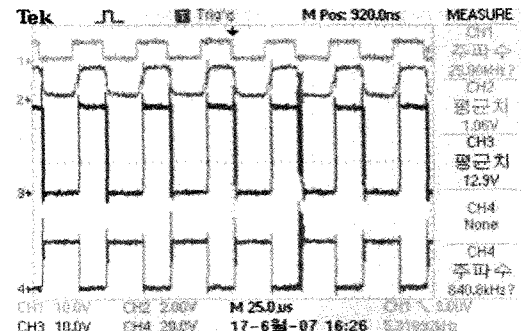


Fig. 11 Waveforms for buck converter without feedback loop

Fig. 12는 태양전지 어레이 전압이 Fig. 11의 실험환경과 동일한 전압인 27V, 출력전류 0.72A인 경우이고, 실험 파형은 축전지 전압을 검출하여 제어 알고리즘에 피드백하는 PIC817 검출회로가 있는 실험결과이다.

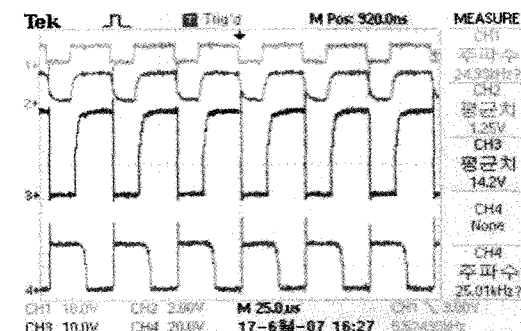


Fig. 12 Waveforms for buck converter with feedback loop

실험결과 feedback-loop를 사용하지 않을 경우 컨버터의 듀티비를 더욱 증가시킬 수 있지만 Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 노이즈가 많이 발생하고, 특히 낮은 듀티비에서는 스위칭이 불완전하게 나타났다. 이러한 문제점은 알고리즘 보완과 회로개선을 통하여 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

부이용 DC-DC 컨버터의 특성을 회로해석을 통하여 확인하고, 축전지의 충전상태 및 부이의 운동특성에 따른 영향에 대하여 고찰하였다. 그 결과 부이용 전력체계에는 벽 컨버터가 동작 특성이 우수한 것으로 나타났다. 태양전지 어레이를 축전지에 직접 연결하여 충전하는 경우 축전지 전압을 기점으로 벽 컨버터와 부스트 컨버터 사용영역이 구분됨을 알 수 있었다. 벽-부스트 컨버터를 사용할 경우 벽 컨버터와 부스트 컨버터를 사용하는 영역을 모두 포함하는 영역에서 스위칭이 가능하다. 그렇지만 태양전지 어레이에 직접 연결하여 축전지를 충전하는 경우 부스트 컨버터보다 벽 컨버터를 사용하는 것이 효율이 높다. 왜냐하면, 대부분의 경우 MPP(Maximum Power Point)가 벽 컨버터 동작 영역에 있다. 그리고 feedback-loop를 사용하면 스위칭 듀티비는 약간 줄어들지만 MPP를 포함하는 스위칭을 함으로써 안정적인 출력을 얻을 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부 해양과학기술연구개발사업 지원으로 수행 됨

## 참 고 문 헌

- [1] Bose, B. K. (1985), "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Trans. Ind. Application, Vol IA-21, No.5, pp1184-1191.
- [3] Hussein, K. H, Muta, I, Hoshino, T., Osakada, M.(1995),"Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", IEEE proc.-gener. transm. distrib., Vol. 142, No. 1, pp. 59-64.
- [4] Ling, T. J., Kuo, Y. C. and Chen, J. F.(2001), "Single-stage photovoltaic energy conversion system", IEE proto-electr. power appl., Vol. 148, No.4, pp.339-244.
- [5] Muhamad, H. R.(1988), "Power Electrics Circuits, Devices, and Applications", Prentice-Hall, Inc, pp.203-206.
- [6] John, H. R. E.(1997), "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 44, No.6, pp 769-772.

---

원고접수일 : 2007년 8월 10일

원고채택일 : 2007년 11월 12일