

PPT 기반 MPPT 컨버터에 의한 태양광 발전시스템의 효율 개선

論 文

55B-4-5

An Efficiency Improvement of the Photovoltaic Generation System by Using the PPT based MPPT Converter

李 星 龍* · 李 銀 哲*

(Seong-Ryong Lee · Eun-Chul Lee)

Abstract - In this paper, a methodology for the efficiency improvement of the photovoltaic system without adding some elements or increasing the cost comparing with the conventional system is discussed. It is suggested the optimal photovoltaic module configuration through its performance analysis, and also the suitable maximum power point tracking (MPPT) voltage considered the system cost and the efficiency of the converter. The high efficiency photovoltaic system by using the parallel power transfer (PPT) based MPPT converter is proposed and analyzed theoretically comparing with the conventional Buck type MPPT converter. Finally, it is designed and implemented the proposed photovoltaic system for supplying DC 48V by using the PPT based MPPT converter. And the effect of the efficiency improvement and the usefulness of the proposed system is proved through some preliminary simulation and experiment results.

Key Words : 전력변환, DC/DC 컨버터, 효율 개선

1. Introduction

최근 국제정세의 불안으로 인한 유가 폭등과 러시아가 기 후변화협약 교토의정서를 비준하기로 결정하면서 온실가스 감소 문제가 또 다시 글로벌 이슈가 되고 있다. 이에 자연에너지를 이용한 분산전원시스템에 대한 관심이 집중되고 있으며, 이들 시스템 중 태양광을 이용한 전원시스템은 태양전지의 효율이 14[%] 정도로 매우 낮고, 그 가격이 비싸기 때문에 태양광 발전시스템의 가격 대비 시스템 효율을 향상시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1].

태양광 발전시스템의 효율은 크게 태양전지의 발전효율, 케이블 전송 효율, MPPT 컨버터 등의 전력변환 효율에 의하여 결정된다. 여기서 태양전지의 경우, 발전효율이 제조공정에 의해 결정되고, 케이블 전송효율의 경우, 태양전지와 부하가 일정 거리 이상 떨어져 설치되는 경우가 많아 선로 내부 저항에 의한 손실을 피할 수는 없지만 이는 적정설계를 통해 약 94[%] 이상의 효율을 얻을 수 있기 때문에[2], 본 논문에서는 이들을 논외로 하고 논문 전개의 편의상 DC 부하 또는 배터리에 전력을 공급하는 DC 48[V] 전원공급용 태양광 발전시스템에 한정하여 논의하고자 한다. 이에 따라 시스템 효율은 태양전지에서 발생한 전력을 최대한 이용하기 위한 MPPT 컨버터의 전력변환 효율에 의해 결정되는데, 일반적으로 컨버터는 강압모드로 동작할 때 상대적으로 전력변환 효율이 높기 때문에 태양전지의 전압을 높게 설계하는 경향이 있다. 그러나 시스템 설치비의 54[%]를 차지하는 태양전지 모듈을 무한정 직렬 연결하여 사용할 수 없을 뿐 아니라 MPPT 컨버터의 효율 또한 입력전압에 영향을 받기 때문에 부하용량에 따라 컨버터의 효율을 고려한 최적의 태양전지 모듈의 결선을 도출할 필요가 있다[3]. 또한 MPPT 컨버터는 고속 스위칭(20[kHz]~1[MHz])으로 인해 발생하는 스위치의 손실이 전력변환손실의 대부분을 차지하고 있기 때문에, 스위치의 손실을 저감시켜 효율을 향상시키기 위하여 ZVS(Zero Voltage Switching) 또는 ZCS(Zero Current Switching)로 스위칭 하는 소프트 스위칭 컨버터에 관한 연구가 최근 들어 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이러한 소프트 스위칭 방법은 스위치와 공진 소자들이 추가로 필요하게 되어 제어회로가 복잡해지고 제작 단가의 상승을 피할 수 없을 뿐 아니라 공진 소자에 의한 또 다른 손실로 기대만큼의 손실저감효과를 얻기 어렵다[4].

그러므로 본 논문에서는 특별한 소자의 부가나 가격의 증가 없이 기존 태양광 시스템의 효율을 향상시키기 위하여, 태양전지모듈의 특성을 분석, 부하 용량별 최적의 모듈 수 및 연결 방법을 제안하였고, MPPT 컨버터의 효율을 고려한 적정 모듈 전압을 제시하였으며, 병렬 전력전달 (Parallel Power Transfer, PPT) 기반 MPPT 컨버터를 채택한 태양광 발전시스템을 제안하였다. 이의 효율 향상 효과를 이론적으로 해석하고, 기존에 널리 사용되고 있는 벡(Buck) 타입 MPPT 컨버터와 특성을 비교 분석하였다. 마지막으로 이들 제안된 이론을 기본으로 DC 48[V] 전원공급용 태양광 발전 시스템을 설계하고, 구성한 다음 PSIM 시뮬레이션을 통해 시스템의 효율 향상 효과와 유용성을 입증하였고, 실험을 통해 그 타당성을 증명하였다.

이론적으로 해석하고, 기존에 널리 사용되고 있는 벡(Buck) 타입 MPPT 컨버터와 특성을 비교 분석하였다. 마지막으로 이들 제안된 이론을 기본으로 DC 48[V] 전원공급용 태양광 발전 시스템을 설계하고, 구성한 다음 PSIM 시뮬레이션을 통해 시스템의 효율 향상 효과와 유용성을 입증하였고, 실험을 통해 그 타당성을 증명하였다.

† 교신저자, 正會員 : 群山大 工大 電子情報工學部 教授 · 工博
E-mail : srlee@kunsan.ac.kr

* 學生會員 : (주) 월링스 研究員
接受日字 : 2005年 10月 24日
最終完了 : 2006年 2月 23日

2. 태양광 발전 시스템

2.1 시스템의 구성

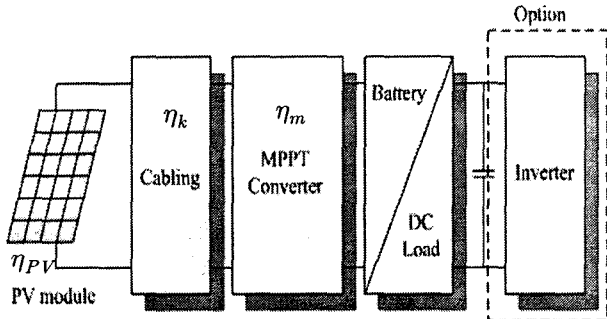


그림 1 기존의 태양광 발전 시스템의 구성
Fig. 1 The Conventional PV Energy System

그림 1은 기존의 태양광 발전시스템의 블록 다이어그램이다. 여기서 η_{PV} 는 태양전지의 에너지 변환 효율이며, η_k 는 태양전지와 컨버터를 연결하는 케이블의 전송 효율이고, η_m 은 MPPT 컨버터의 효율이다. 전체 시스템의 효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{PV} = P_{sun} \times \eta_{PV} \quad (1)$$

$$P_O = P_{PV} \times \eta_k \times \eta_m \quad (2)$$

여기서 P_{PV} 는 태양전지를 통해 발전된 에너지, P_O 는 부하로 전달된 에너지이다. 전체 효율은 식 (2)를 통해 구할 수 있으며, 이는 식 (3)과 같다.

$$\eta_T = \frac{P_O}{P_{PV}} = \eta_k \times \eta_m \quad (3)$$

식 (3)에서 전체 효율을 개선하기 위해서는 태양전지의 에너지 변환 효율을 높이고, 케이블 전송 효율과 MPPT 컨버터의 효율을 향상시켜야 함을 알 수 있다. 그러나 태양전지의 에너지 변환 효율은 제조 공정에 의해 결정되고, 케이블 전송 효율은 적정설계를 통해 94[%] 이상의 효율을 얻을 수 있기 때문에[2], 본 논문에서는 이들을 논외로 하고 논문 전개의 편의상 DC 부하 또는 배터리에 전력을 공급하는 DC 48[V] 전원공급용 태양광 발전시스템에 한정하여 논의한다.

2.2 태양전지의 발전 특성 및 구성

그림 2는 태양전지를 수학적으로 모델링한 것으로 태양전지의 특성을 해석하는데 일반적으로 적용되는 one-diode 모델의 등가회로를 나타내고 있다. 이를 통하여 태양전지의 I-V 특성곡선의 기본 수식을 식 (4)와 같이 얻을 수 있다 [1],[5].

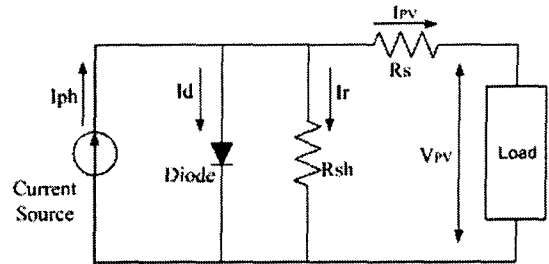


그림 2 태양전지의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a PV module

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{os} \left(\exp \left\{ \frac{q}{AkT} (V_{PV} + I_{PV}R_s) \right\} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

여기서, I_{PV} 는 태양전지의 출력전류, V_{PV} 는 태양전지의 출력전압, R_s 는 내부직렬저항, R_{sh} 는 내부병렬저항 I_{ph} 는 광 발생전류, I_{os} 는 온도 특성 계수, q 는 전하량, k 는 볼츠만 상수, A 는 qn 접합 재료 계수, T 는 태양전지 온도이다. 한편 본 논문에서는 시뮬레이션 및 실험을 위하여, 태양전지 시뮬레이터를 구성하여 사용하였으며 이에 적용된 태양전지 파라미터는 표 1에 보였다.

표 1 80W급 태양전지 PWX750의 파라미터
Table 1 Parameters for 80W Photowatt Panel PWX750

종류	특성
최대출력(P_{max})	80W
최대출력전류 (I_{mpp})	4.6A
최대출력전압 (V_{mpp})	17.3V
단락전류 (I_{sc})	5A
개방전압 (V_{oc})	21.9V

식 (4)와 표 1의 파라미터를 사용하여 Matlab으로 시뮬레이션 한 결과 본 논문에 사용된 PV 어레이 모듈의 I-V 특성곡선은 다음과 같다. 그림 3은 일사량을 $1000[W/m^2]$ 로 주어진 온도를 10도에서 60도 까지 변화시켰을 때의 I-V 특성곡선이다.

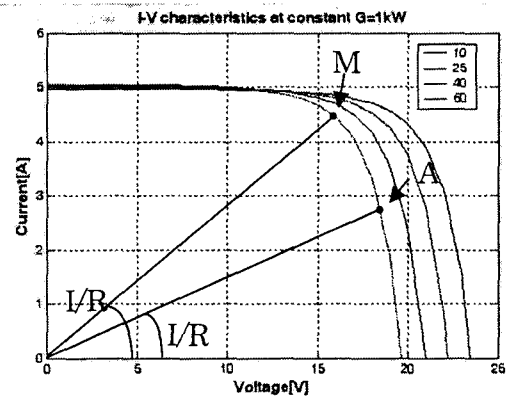


그림 3 일정 일사량 $G=1kW/m^2$ 의 I-V 특성곡선
Fig. 3 I-V characteristics at constant $G=1kW/m^2$

그림 3에서 태양전지의 출력은 일사량 및 온도 등의 주변 환경에 따라 변하게 되고, 부하상태 또한 변하기 때문에 태양 전지의 전압·전류 특성의 MPPT점과 부하에 의해 결정되는 점이 항상 일치하기란 거의 불가능하다. 그림 3에서 부하(R_L)에 의해서 결정되는 태양전지 전압 전류 점은 A가 되어 태양전지의 MPPT점(M)에서 벗어나 있게 된다. 이 동작 점을 MPPT점으로 이동하기 위해서는 등가부하가 MPPT점을 만족하는 부하(R_E)로 바꾸어 주는 MPPT 컨버터가 필요하다 [5]. 또한 태양전지는 에너지 변환 효율이 제조공정에 의해 결정되고, 최근 개발된 Screen-printed silicon 태양전지의 경우 17.3[%]로 매우 낮은 편이며, 태양광 발전시스템의 초기 설치비 중 54[%]가 태양전지에 사용된다[1],[3]. 그러므로 태양전지의 수요는 최소화 하고 전체 시스템의 효율은 극대화 할 수 있는 최적 연결 방법에 대한 논의가 필요하며, 본 논문에서는 DC 48[V] 부하로 연결되는 태양전지의 최적 연결 방법을 제시하였다. 표 2는 본 논문에서 제안한 태양전지의 병·직렬연결 방법 및 전체 모듈의 개수, 이때 모듈의 MPP 전압 및 최대출력 P_{max} 를 나타낸 것이다.

표 2 부하용량에 따른 PV module 파라미터
Table 2 Parameter of PV module

부하용량	PV module($P_{max}=80W$, $V_{mpp}=17.3$)			
	$P_{max}(W)$	병렬×직렬	개수	$V_{mpp}(V)$
300W	320W	1×4	4	69.2
	400W	1×5	5	86.5
	480W	1×6	6	103.8
500W	640W	2×4	8	69.2
	800W	2×5	10	86.5
	960W	2×6	12	103.8
	560W	1×7	7	121.1
	640W	1×8	8	138.4
1kW	1280W	4×4	16	69.2
	1200W	3×5	15	86.5
	1440W	3×6	18	103.8
	1120W	2×7	14	121.1
	1280W	2×8	16	138.4
	1040W	1×13	13	224.9

일반적으로 태양광발전시스템은 그 설치비의 54% 이상을 태양전지 모듈이 차지하기 때문에, 같은 부하용량의 발전시스템을 설계할 때 태양전지의 모듈 수가 적으면 적을수록 전체 시스템 설치비는 낮아지게 된다. 따라서 태양전지의 모듈 수를 가장 적게 사용하는 태양전지의 연결법은 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 300[W] 시스템일 경우, 태양전지 모듈 수와 MPP 전압이 각각 직렬 4개와 69.2V, 500[W]의 경우, 직렬 7개와 121.1V, 1[KW]일 경우에는 직렬 13개, 224.9V임을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서처럼 출력전압이 48V의 경우 MPP 전압이 너무 크면 컨버터의 듀티비가 작아 출력 필터용 인덕터와 캐패시터가 커져 효율 저하의 원인이 되기 때문에 부하용량에 따르는 태양전지의 최적 조합은 전체 시스템 효율을 고려하여 결정할 필요가 있고, 이는 3장에서 논의하기로 한다.

2.3 PPT 기반 MPPT 컨버터의 효율 개선

그림 1과 같이 기존의 태양광 발전 시스템은 태양전지를 통해 발전된 에너지가 모두 MPPT 컨버터를 통해서 부하로 전달되므로 전체 시스템의 효율은 MPPT 컨버터에 의해 결정되어지는 문제가 있다. 따라서 병렬전력전달방식(PPT)을 기반으로 하는 개선된 태양광 발전 시스템을 그림 (4)에 보였다. 이는 부하의 요구 에너지를 입력전원으로부터 일부는 DC/DC 컨버터를 통하여 받고 나머지는 직접 전달하는 구조로서, 입·출력 극성이 다른 컨버터(벅-부스트, Cuk 등)인 경우에 적용이 가능하며, 그림과 같이 에너지의 일부분만이 DC/DC 컨버터의 전력 소자를 통과하기 때문에 같은 효율의 컨버터로도 전력변환 손실을 에너지 분담 비율만큼 감소시킬 수 있다. 즉, 입력에너지의 (V_i/V_{PV})배 만큼의 전력만으로 MPPT를 수행하고, 그 출력은 부하에 전달하게 되므로 (V_o/V_{PV})배 만큼의 전력은 DC/DC컨버터를 거치지 않고 직접 부하로 전달하게 된다. 따라서 이에 의한 전체 시스템 효율은 식 (6)과 같다.

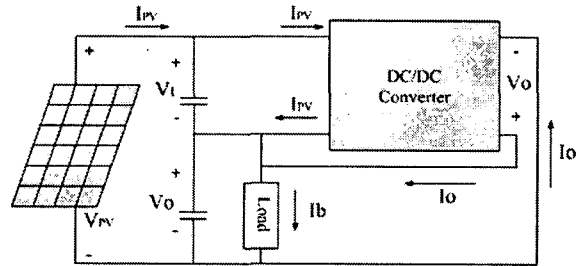


그림 4 PPT 기반 태양광발전시스템의 개념도
Fig. 4 The concept of the PPT based PV energy system

$$I_b = I_{PV} + I_o \quad (5)$$

$$\eta_T = \frac{P_o}{P_{PV}} = \frac{\eta_k \times V_o (I_{PV} + I_o)}{V_{PV} \times I_{PV}} \quad (6)$$

$$= \eta_k \times \frac{\left(1 + \eta_m \times \left(\frac{V_{PV}}{V_o} - 1\right)\right)}{\frac{V_{PV}}{V_o}}$$

여기서 I_b 는 부하전류, I_o 는 DC/DC 컨버터의 출력전류, V_o 는 부하전압, η_m 은 DC/DC 컨버터의 전력변환 효율이다.

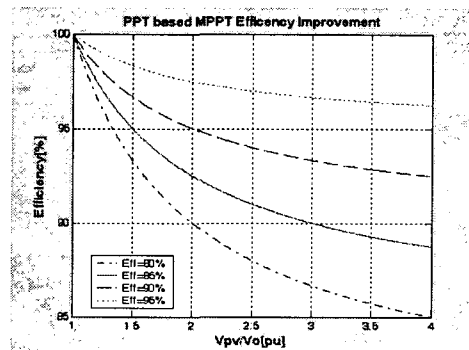


그림 5 PPT 기반 태양광 발전시스템의 개선된 효율
Fig. 5 Improvement in Efficiency of the PPT based PV energy system

그림5는 PPT기반 태양광 발전 시스템(그림 4)의 DC/DC 컨버터의 전력변환 효율(Eff)이 각각 80%, 85%, 90%, 95% 일 때, 태양전지전압(V_{PV})과 부하전압(V_O)의 비(V_{PV}/V_O)에 따른 시스템효율을 식 (6)에 의하여 시뮬레이션 한 결과를 보인 것이다. 식 (6)에서 케이블 효율(η_k)은 2.1절에 언급한 바와 같은 이유로 해석의 편의상, 충분히 높고 일정하다고 가정하고 무시한다. 따라서 PPT 기반 태양광 발전시스템은 그림에서 볼 수 있는 것처럼 DC/DC컨버터의 입력전압(V_i)이 작을수록 효율이 커짐을 알 수 있고, 이의 효과를 구체적으로 설명하면, DC/DC 컨버터의 전력변환 효율(Eff)이 80%인 경우에도 그림 4와 같이 PPT 방식을 적용하면 입·출력 전압비(V_{PV}/V_O)를 1.25로 제어했을 때 변환 효율이 96% 이상으로 향상됨을 보여준다.

이상과 같은 효율 개선효과를 갖는 PPT기반 태양광발전시스템을 구현하기 위하여, 그림 4의 DC/DC 컨버터에 Cuk 컨버터를 적용한 PPT 기반 MPPT 컨버터를 그림 6에 보였다. 이는 입력전류가 불연속인 벡 컨버터 및 벡-부스트 컨버터와 달리 입력 필터를 필요로 하지 않기 때문에 기존의 MPPT 컨버터와 비교하여 시스템을 구성하는 소자의 수는 변동이 없다. 또한 고전압 적용이 가능한 다른 컨버터(벡, 벡-부스트)를 적용한 PPT 기반 컨버터와 비교하여 가장 높은 효율을 가지며 태양광 발전을 통해 얻어진 에너지의 전압 비(V_i/V_{PV})만큼만 컨버터가 담당하므로 소자의 정격 용량을 줄일 수 있어 시스템을 보다 간결하게 만들 수 있다.

한편, PPT기반 컨버터는 그림5에서 볼 수 있듯이 태양전지전압(V_{PV})과 출력전압(V_O)의 차이가 작으면 작을수록 효율이 좋아짐을 알 수 있다. 그러나 입출력 전압비가 작아지면 축 컨버터 자체의 변환 효율은 나빠지므로 PPT기반 컨버터 전체의 전력변환 효율은 이를 고려할 필요가 있고, 이는 실제 실험을 통하여 그 결과를 표 4에 보였다.

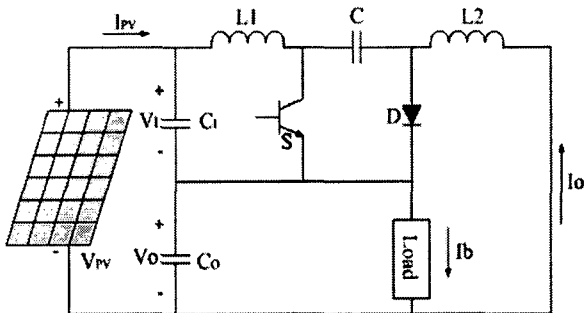


그림 6 PPT 기반 MPPT 컨버터
Fig. 6 PPT based MMPT converter

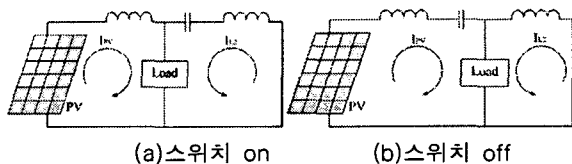


그림 7 PPT 기반 MPPT컨버터의 동작회로
Fig. 7 Operation mode of the PPT based MPPT converter

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 DC 48[V] 시스템의 용량별 태양전지의 최적 연결

방법에 의해 산출되어진 태양전지의 출력 전압을 각각의 고 전압 운용이 가능한 컨버터의 입력 전압으로 했을 경우 효과와 입·출력 전류 및 전압의 특성을 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 조건은 표 3과 같다.

표 3 시뮬레이션 파라미터
Table 3 Parameter of Simulation

파라미터	값
전류 리플	< 5%
입·출력 전압 리플	< 1%
스위칭 주파수	50kHz
스위치 내부 저항	36m
다이오드 전압강하	0.7V
인덕터 내부 저항	0.4/1mH
커패시턴스 내부 저항	50*10 ⁻⁶ /C
입력 전압	121.1V
출력 전압	48V
부하 용량	1kW

3.1 시뮬레이션 결과

표 3의 조건에 만족하는 출력 전류 및 입력 전류리플을 5[%] 이내로 줄이기 위해 출력 인덕터 값을 300[μH]로 정하고, 입력 필터 인덕터 값은 150[μH] 하였으며, 출력 커패시턴스의 값을 220[μF], 입력 필터 커패시터 값을 130[μF]으로 정하였다.

그림 8은 벡 컨버터의 시뮬레이션 파형으로 입력전압은 14개(지령7개 모듈 2조를 병렬로 연결)의 태양전지 모듈을 연결한 121.1[V], 전류는 8.7[A]이고 부하 전압은 48[V], 전류는 20.8[A]이다. 입력 필터로 인하여 태양전지 출력전류(I_{PV})가 불연속이 아니며 리플은 입·출력 모두 5[%] 미만이다. 또한 전압리플도 설계 범위인 0.83[%]인 것을 알 수 있으며, 이때의 벡 컨버터의 효율은 94.76[%]이다.

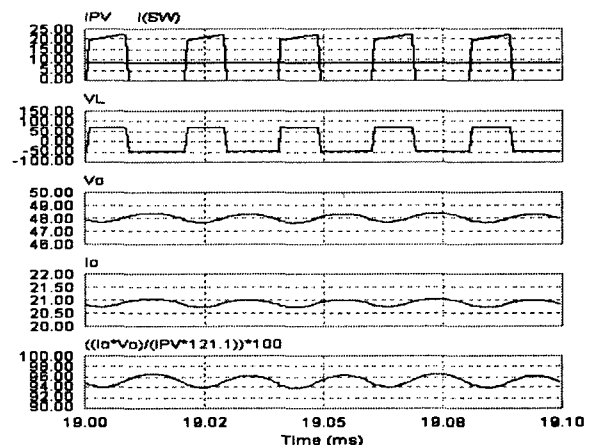


그림 8 Buck 컨버터의 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulation waveform of the Buck Converter

그림 9는 PPT기반 MPPT 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 인덕터의 값은 L1 220[μH], L2 400[μH]이며, 시스템의 입력

전압을 두 개로 배분하는 캐패시터의 값은 10[μF]이다. 그림 9에서 볼 수 있는 것처럼 비록 효율은 PPT 기법에 의해 95.5[%]로 벅 컨버터에 비해 1.6[%] 향상시킬 수 있으나, L1의 전류리플은 20.1[%]이며, L2를 통해 흐르는 전류리플은 5.7[%]로 매우 커 설계범위를 벗어나는 문제점이 있다. 이 문제는 Cuk 컨버터에 적용하는 인덕터를 커플드 인덕터로 설계함으로써 해결할 수 있을 뿐 아니라 시스템 효율의 향상도 기대할 수 있다[6]. 그림 10은 PPT 기반 MPPT 컨버터에 커플드 인덕터(L1:10[μH], L2:10[μH], M:500[μH])를 적용했을 때의 시뮬레이션 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 L1의 전류리플은 4.2[%], L2의 전류리플은 4.0%, 출력 전압리플은 0.1[%], 부하 전류리플은 0.2[%]로 설계 범위 내에서 동작할 뿐 아니라 변환 효율 또한 97[%]로 매우 높음을 알 수 있다.

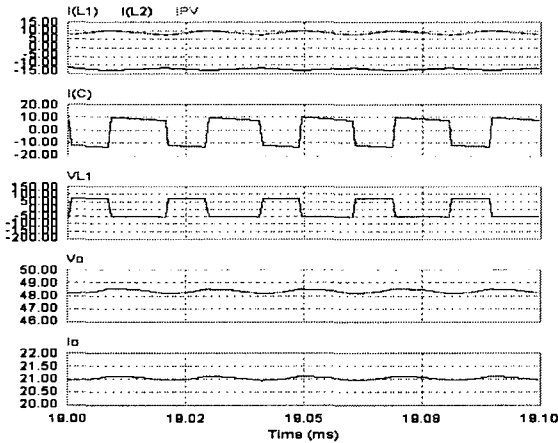


그림 9 PPT 기반 MPPT 컨버터의 시뮬레이션 파형
Fig. 9 Simulation waveform of the PPT based MPPT converter

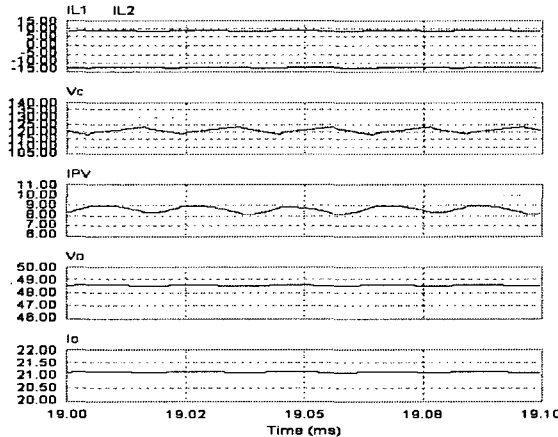


그림 10 Coupled 인덕터를 적용한 PPT 기반 MPPT 컨버터의 시뮬레이션 파형
Fig. 10 Simulation waveform of the PPT based MPPT converter with coupled inductor

본 연구에서 제안한 PPT 기반 MPPT 컨버터가 기존의 컨버터와 마찬가지로 태양광의 MPPT를 수행할 수 있는지를 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 수행 하였는데 이를 그림 11과 12에 보였다. 그림 11에서 태양전지는 DLL 파일로 Visual C++ 프로그램을 사용하여 식 (4)와 표1의 파라미터를

기준으로 작성하였으며, 케이블의 내부저항은 1.4[Ω]이고, MPPT 알고리즘으로는 IncCond 방법을 사용하였다[7]. 그림 12는 커플드 인덕터를 사용한 PPT 기반 MPPT 컨버터의 파형으로 일사량이 $G=1[kW/m^2]$ 일 때 태양전지의 출력 전압이 MPPT 전압인 121.1[V]이며 전류는 9.24[A]로 최대 전력인 1120[W]를 발전하며, 일사량을 변동시켰을 때 출력 전류가 변하고 이에 따라 태양전지의 출력 전압을 제어하여 최대전력점을 추종하는 것을 알 수 있다.

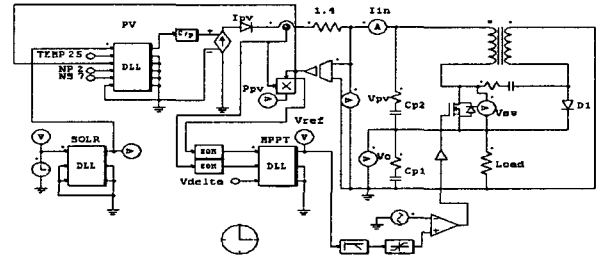


그림 11 PPT 기반 MPPT 컨버터의 MPPT 시뮬레이션도
Fig. 11 MPPT Simulation circuit of PPT based MPPT converter

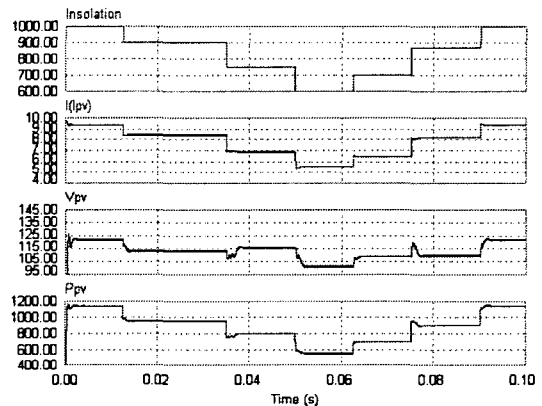


그림 12 PPT기반 MPPT 컨버터의 MPPT 시뮬레이션 파형
Fig. 12 Simulation waveform of PPT based MPPT converter

표 4는 표 2에 보인 각 부하 용량별로 조합 가능한 태양 전지 모듈의 수와 그 때의 최대출력전압(V_{mpp})에 따른 MPPT 컨버터의 전력변환 효율을 기존의 벅 컨버터와 제안된 컨버터에 대해서 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 조합 가능한 태양전지 MPP 전압은 전 범위에서 본 연구에서 제안한 PPT 기반 MPPT 컨버터가 기존의 벅 컨버터에 비하여 전력변환 효율이 높고, 최대 2.2[%]까지 효율 개선효과를 가짐을 알 수 있다. 한편, 시스템 설치비용 면에서 보면 조합 가능한 태양전지 모듈의 수가 적을수록 좋기 때문에 각 부하 용량별로 태양전지의 모듈 수가 300[W]에서 4개, 500[W]에서 7개, 1[kW]에서 13개일 때가 최적이지만, 컨버터의 전력변환 효율은 이 경우가 최적이지 않음을 알 수 있다. 따라서 태양광 발전시스템 설계 시에 시스템의 효율, 부하 용량 등을 고려한 설치비용 등을 종합적으로 판단할 필요가 있다.

한편, 태양광발전 시스템의 전체 효율은 식 (3)에서 처럼 케이블 효율까지를 고려해야 하지만 이는 적정 설계를 통해

표 4 백 컨버터와 PPT 기반 MPPT 컨버터의 입력 전압과 효율과의 관계
 Table 4 Comparison of the efficiency of the Buck & PPT based MPPT converter

부하용량	PV module($P_{max}=80W, V_{mpp}=17.3$)				Buck	PPT based MPPT	효율향상
	$P_{max}(W)$	병렬×직렬	개수(개)	$V_{mpp}(V)$	Efficiency(%)	Efficiency(%)	PPT-buck(%)
300W	320W	1×4	4	69.2	97.1	97.1	0
	400W	1×5	5	86.5	97.7	97.8	+0.1
	480W	1×6	6	103.8	98.2	98.5	+0.3
500W	640W	2×4	8	69.2	95.4	96.0	+0.6
	800W	2×5	10	86.5	96.1	97.1	+1.0
	960W	2×6	12	103.8	97.0	98.0	+1.0
	560W	1×7	7	121.1	97.1	98.2	+1.1
	640W	1×8	8	138.4	97.3	98.9	+1.6
1kW	1280W	4×4	16	69.2	92.8	94.5	+1.7
	1200W	3×5	15	86.5	93.7	95.7	+2.0
	1440W	3×6	18	103.8	94.6	96.7	+2.1
	1120W	2×7	14	121.1	94.8	97.0	+2.2
	1280W	2×8	16	138.4	96.2	98.4	+2.2
	1040W	1×13	13	224.9	93.1	95.1	+2.0

어렵지 않게 보완이 가능하기 때문에 해석의 편의 상, 본 연구에서는 제안한 PPT 기반 MPPT 컨버터의 전력변환 효율만을 고려하기로 하였으며 이에 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 컨버터의 전력변환 효율은 입력 전압 즉, 태양전지의 MPP 전압이 클수록 높아진다. 하지만 부하용량 1[kW]의 태양전지 조합 모듈 수 13개($V_{mpp}=224.9[V]$)의 경우와 같이 컨버터의 입·출력 전압 비가 너무 커지면 백 컨버터의 경우 듀티비가 너무 작아 출력 전압 및 전류의 요구 맥동율을 만족시키기 위해서 필터 인덕터 및 커패시터의 크기가 커지고, 이에 따라 효율 저하를 피할 수 없다. 또한 제안한 PPT 기반 컨버터의 경우는 듀티비 문제 뿐 아니라 그림 5에서 보인 바와 같이 입·출력 전압 비(224.9/48)가 4.68로 매우 커 높은 효율 개선 효과를 기대 할 수 없다. 그러므로 시스템의 효율, 부하 용량 등을 고려한 설치비용 등을 고려하면 부하용량 300[W]의 경우 태양전지 모듈 4개(320[Wp], $V_{mpp}=69.2[V]$)로, 500[W]의 경우 태양전지 모듈 7개(560[Wp], $V_{mpp}=121.1[V]$)로, 1[KW]의 경우 태양전지 모듈 14개(1120[Wp], $V_{mpp}=121.1[V]$)로 구성하는 것이 가장 바람직할 것으로 생각 된다.

3.2 실험 결과

이상 시뮬레이션 결과를 통해 검증된 시스템을 그림 13과 같이 DC 48[V], 1[kW]급 시작품을 제작 실험하였다. 실험조건은 표 3의 시뮬레이션 조건과 일치하며, 다만 태양전지 모듈은 표 4에서 도출한 1[kW]의 제안 모듈수인 14개의 특성(개방전압(V_{oc}): 153.3[V], 단락전류(I_{sc}): 10[A])을 DC 파워서플라이 DHP300-10에 의한 시뮬레이터로 구성하여 사용하였고, 컨버터의 스위칭 소자와 다이오드는 IGBT 모듈인 2MBI75N-060을 사용하였다.

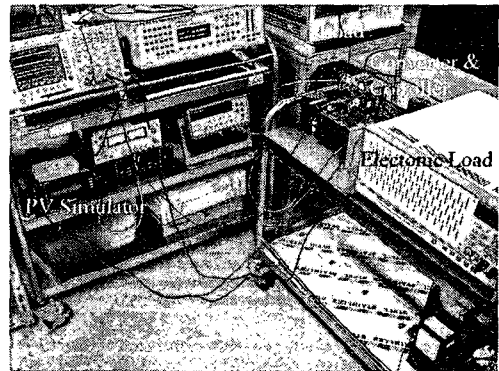


그림 13 제안된 시스템의 실험사진
 Fig. 13 Photograph of the proposed system

그림 14는 PPT 기반 MPPT 컨버터의 실험 결과 파형으로 파형 측정에는 Tektronix사의 4채널 디지털 스코프인 TDS3054B를 사용하였고, 효율 측정에는 Voltech사의 PM3000A 전력분석기를 이용하였다.

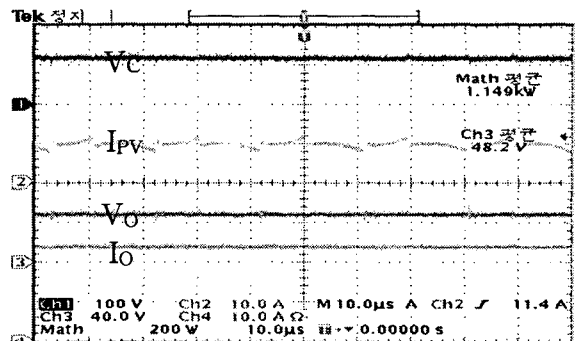


그림 14 PPT 기반 MPPT 컨버터의 실험파형
 Fig. 14 Experiment waveforms of the PPT based MPPT converter

그림 14에서 볼 수 있는 것처럼 제안된 시스템의 전류 리플은 1.25[%], 전압 리플은 0.67[%]로 설계 조건에 부합하고 있으며, 효율은 96.23[%]로 커플드 인덕터를 적용한 PPT 기반 MPPT 컨버터의 시뮬레이션 결과와 근접하고 있음을 알 수 있었다. 다만, I_{pv} 의 스위칭 주기 마다 발생하는 서지는 실험에 사용된 스위치의 턴 온 및 턴 오프시 발생하는 서지의 영향으로 이는 Buck 컨버터에서도 동일하게 나타나는 문제이다. 이는 성층형 DC 버스 바를 사용하거나 스너버 회로를 사용하여 해결 가능하다. 따라서 실험과 시뮬레이션의 결과를 종합하면 PPT 기반 MPPT 컨버터는 전압 및 전류 리플을 제안된 조건에 부합하면서 효율은 96.23[%]로 벽 컨버터에 비해 최대 2.2[%]까지의 효율 향상을 기대할 수 있다.

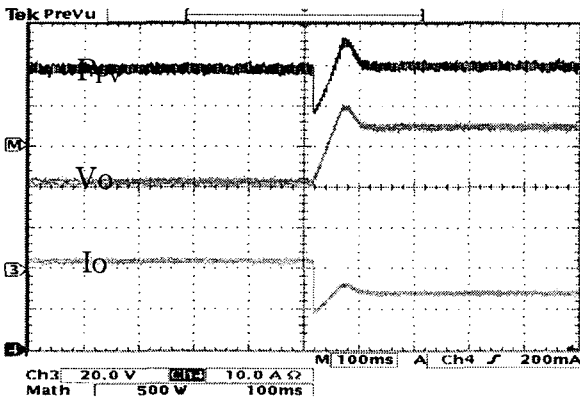


그림 15 MPPT 동작 실험 파형
Fig. 15 Experiment waveform of the MPPT

그림 15는 PPT 기반 MPPT 컨버터를 사용한 태양광 발전 시스템의 MPPT 운전 시 파형으로 사용된 알고리즘은 IncCond 알고리즘을 적용하였고, 일사량이 $G=960[W/m^2]$ 일 때 부하 저항을 50[%]증가 하였다. 실험 결과 부하의 크기가 변해도 태양광 발전 에너지는 최대 전력 점을 추종하는 것을 알 수 있다.

이상, 시뮬레이션과 실험 결과를 종합하면 태양광 발전 시스템의 설계 시에 시스템의 효율, 부하 용량, 설치비용 등을 고려하여 종합적으로 판단할 필요가 있고, 이에 따라 태양전지 모듈로 PWX750 (80[Wp], $V_{mpp}=17.3[V]$)을 사용할 경우, 부하 용량 300[W]는 태양전지 모듈 4개(320Wp, $V_{mpp}=69.2[V]$)로, 500[W]는 태양전지 모듈 7개(560[Wp], $V_{mpp}=121.1[V]$)로, 1[KW]는 태양전지 모듈 14개(1120[Wp], $V_{mpp}=121.1[V]$)로 구성하는 것이 바람직하다.

또한 기존의 MPPT 컨버터인 벽 컨버터는 발전된 에너지를 모두 컨버터의 전력소자를 통해 부하로 전달하게 되므로 전력소자를 통해 발생하는 손실을 피할 수 없고 부하 용량 크기의 정격용량을 갖는 전력소자를 선정해야하는 부담이 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 PPT 기반 MPPT 컨버터를 적용할 경우 소자의 정격 용량은 감소하고 (태양전지의 전압이 121.1[V]일 경우 (V_i/V_{pv})만큼만 컨버터가 담당하므로 소자의 정격 용량은 39.63[%] 감소), 효율은 최대 2.2[%]까지 향상 되는 것을 알 수 있다. 따라서 제안된 PPT 기반 MPPT 컨버터를 기존의 태양광 발전 시스템에 적용하면, 태양전지 모듈의 수 및 MPP 전압 등이 동일 조건일 경우 별도의 소자나 회로의 증가 없이 오히려 기존의 벽 컨버터에 비하여 소자 정격용

량을 줄이고 PPT 프로세싱에 의한 MPPT 컨버터의 전력 부담을 줄여 여기서 발생하는 손실을 줄일 수 있어 태양광 발전 시스템 전체의 효율을 향상을 기대할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 태양광 발전 시스템의 효율 향상과 시스템 설치비용을 저감시키기 위하여, 태양전지모듈의 특성을 분석하고, 부하 용량에 따라 조합 가능한 태양전지의 모듈 수 및 연결 방법을 제시하였으며, 이에 따른 MPPT 컨버터의 전력변환 효율을 비교 분석하였다. 또한, PPT 기반 MPPT 컨버터를 제안하여 이의 효율 향상 효과를 이론적으로 해석하고, 기존에 널리 사용되고 있는 벽(Buck) 타입 MPPT 컨버터와 특성을 비교 분석한 결과, 벽 컨버터에 비하여 특별한 소자의 부가나 가격의 증가 없이 전력변환 효율을 제어전압 전 범위에서 개선할 수 있음을 보였다. 이에 따라 제안된 PPT 기반 MPPT 컨버터의 효율과 설치비용 및 부하용량을 고려한 태양전지 모듈 수를 종합적으로 고려한 시스템 설계 방안을 제시하였다. 이들 제시된 이론 및 토폴로지를 보다 구체적으로 입증하기 위하여, 본 논문에서는 태양전지 모듈 PWX750 (80[Wp], $V_{mpp}=17.3[V]$)를 14개 조합(1120[Wp], $V_{mpp}=121.1[V]$)와 PPT 기반 MPPT 컨버터를 적용한 부하전압 DC 48[V], 1[kW] 전원공급용 태양광 발전 시스템을 설계하고 구성하였다. 실험결과 제안된 시스템이 동일 조건일 때 기존의 벽 컨버터에 의한 시스템 보다 최대 2.2[%]까지 효율을 개선할 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] M. M. Hilali, A. Rohatgi, and S. Asher, "Development of screen-printed silicon solar cells with high fill factors on 100/sq Omega/sq emitters," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 51, pp. 948-955, 2004.
- [2] D. B. Snyman and J. N. R. Enslin, "Technique for improved power conversion efficiency in PV system with battery back-up," INTELEC'91, pp. 86-91, 1991.
- [3] J. H. R. Enslin, Mario S. Wolf, Daniel B. Snyman and Wernher Swiegers, "Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 44, pp. 769-770, 1997.
- [4] C.-J. Tseng and C.-L. Chen, "A novel ZVT PWM Cuk power-factor corrector," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, pp. 780-787, 1999.
- [5] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, pp. 539-562. 2001.
- [6] Slobodan Cuk and Zhe Zhang, "A High Efficiency 1.8kW Battery Equalizer," APEC'93, march, pp221-227, 1993.
- [7] C. Hua and C. Shen, "Comparative Study of Peak Power Tracking Techniques for Solar Storage System," Proceedings of the 13th annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 679-685, 1998.

저 자 소 개



이 성 룡 (李 星 龍)

1958년 11월 30일생. 1980년 명지대 전기 공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1988년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1998년 미국 Virginia Tech. Visiting Professor. 2003년~2005년 호주 Curtin University of Technology. Visiting Professor. 1990년~현재 군산대 전자정보공학부 교수.
E-mail : srlee@kunsan.ac.kr



이 은 철(李 銀 哲)

1978년 3월 4일생. 2004년 군산대 전자정보공학부 졸업(학사). 2006년 동 대학원 전자정보공학부 졸업(석사). 2006년~현재 (주) 윌링스 연구원.