

태양광발전시스템의 효율 향상을 위한 마이크로컨버터에 관한 연구

A Study on Micro-Converter of Photovoltaic System for Efficiency Progress

채 영 기*, 임 중 열**

Young-Kee Chae*, Jung-Yeol Lim**

Abstract

This paper targets the development of micro-converter such as a power converter for photovoltaic module. In corresponding to the poor performance of centralized PV system under partial shading, the power converter for single PV module to maximize the energy harvest from PV module.

The power converter is constantly tracking the maximum power point of photovoltaic system and increases energy output power. To minimize the quantity of devices and switches, 320W solar micro-converter is developed using synchronous rectifier. From the basis of these results, through simulations and experiments were verified efficiency.

요 약

본 논문에서는 하나의 태양광 모듈에 대한 전력 변환기인 마이크로 컨버터의 개발을 목표로 하고 있다. 중앙집중형 태양광발전시스템이 부분적인 음영에 의해서 성능저하가 발생하는데 반해 단일 태양광모듈의 전력변환기는 태양광모듈의 발전량을 최대화 할 수 있다.

전력 변환기는 지속적으로 각 모듈의 최대 전력 점을 추적하여 태양 광 발전 시스템의 에너지 출력을 증가시킨다.

태양광 전력 변환기의 반도체 스위치 및 외부 장치의 수를 최소화하고, 또한 동기 정류기를 사용하여, 320W급의 태양광 마이크로 컨버터를 개발하였으며, 시뮬레이션과 실험에 적용하여 효율성을 검증하였다.

Key words : Photovoltaic, Distributed Generation, MPP, Micro-converter, Renewable Energy

I. 서론

세계적으로 산업화가 가속되고 산업·사회생활의 고도화됨에 따라 전력수요는 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 특히 국내의 경우 에너지 다 소비형 산업구조와 소비구조로 향후 에너지 대란이 예상되고 있다. 특히, 화석에너지 고갈과 지구환경 문제가 거론되고 있는 최근의 에너지를 둘러싼 심각한 상황을 고

려할 때 기존의 대규모 중앙집중형 전원과 연계하여 운전 할 수 있는 태양광발전설비와 같은 분산형전원의 도입이 절실하다[1][2].

기존의 대규모 중앙집중형 전원은 여름철과 같은 첨두전력부하에 대응이 어렵고 송배전설비에 대한 투자비가 과다하지만 분산형전원은 첨두전력부하에 대응이 유연하고 송배전설비가 저감되는 장점을 가지고 있다. 태양광발전시스템 시장이 활발해지면서 태양광발전시스템의 발전성능을 향상시키기 위한 연구는 시스템 분야와 설치 분야에서 활발하게 진행되고 있다[3][4]. 그러나 높은 설치 비용과 낮은 에너지 발전 효율 등 아직 기술적인 장벽이 존재하고 있다.

특히, 그늘짐 현상에 따른 MPPT 효율 저감은 태양광 발전의 시스템 효율을 높이는데 중요한 요소로 인식되고 있다.

* Department of Digital Management Information,
Nambu University
bbkang6615@naver.com 062-970-0125

★ Corresponding author 062-970-0125 jylim@nambu.ac.kr
Manuscript received Mar.13.2014;revised Mar.24.2014;
accepted Mar. 24. 2014

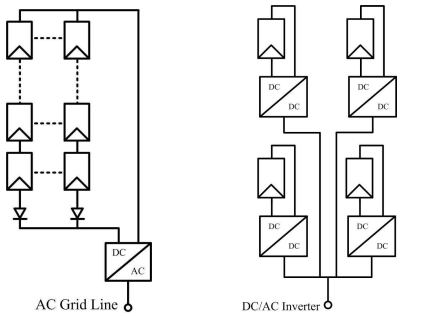
본 논문에서는 태양전지 어레이를 모델링하고 마이크로컨버터 회로 설계 및 제어 기법을 제시하며, 시뮬레이션을 통해서 타당성을 살펴보았다.

II. 본론

1. 시스템 개요

기존에 많이 사용되고 있는 중앙 집중식의 태양광 전력변환장치는 그림 2.1 (a)에서와 같이 직렬 및 병렬 PV 모듈로 구성된 태양광 어레이의 최대전력점을 추종하기 때문에, 태양광어레이에 그림자가 발생했을 경우에 현상에 아주 낮은 성능을 보고 있다[5][6].

태양광모듈 생성된 음영 및 눈, 오염물질 등에 대한 중앙집중형 태양광 전력변환장치의 성능 저하에 대응하여, 본 논문에서는 태양광 발전의 에너지 생산을 극대화하기 위해 단일 PV 모듈에 마이크로 컨버터를 연결하여 그림 1 (b)와 같이 구성하여 개별적으로 PV 모듈의 성능을 조정하여 최대 전력 점을 추적하는 구조로 설계하였다.



(a) 중앙 집중형 방식 (b) 마이크로 컨버터 방식
Fig. 1. Photovoltaic power conversion system
그림 1. 태양광 전력변환장치

2. 태양광모듈 모델링

태양전지 어레이의 출력은 일사량과 온도에 따라 최대출력이 변동하며 비선형 특성을 지니고 있다. 따라서 이러한 출력특성에 따라 시스템을 시뮬레이션 하기 위해서는 태양전지 어레이를 모델링하여 시뮬레이션으로 구현하여야 한다. 태양전지의 특성은 일반적으로 그림 2에서 보이는 바와 같은 등가회로로 표현되며 다음의 수식으로 표기할 수 있다[7].

$$I_{OUT} = I_{PH} - A \left\{ \exp \left(\frac{q}{BkT} (V_{OUT} + I_{OUT}R_s) \right) - 1 \right\} - \frac{V_{OUT} + I_{OUT}R_s}{R_{SH}} \quad (1)$$

- I_{PH} : 광발생전류
- I_{OUT} : 부하측에 흐르는 전류
- V_{OUT} : 태양전지 출력전압
- R_s : 내부 직렬저항

- R_{SH} : 내부 병렬저항
- A : pn접합의 재료특성과 온도특성 계수
- B : 재료 계수
- k : 볼츠만 상수
- T : 전지 온도. (K)
- q : 전하량

식 (1)이 수식을 간단히 하기 위해서 $R_s = 0$, $R_{SH} = \infty$ 로 설정하면 식 (2)로 간략화 시킬 수 있다.

$$I_{OUT} = I_{PH} - A \left\{ \exp \left(\frac{q}{BkT} V_{OUT} - 1 \right) \right\} \quad (2)$$

일사량 1kW/m²일때의 단락전류를 I_{MAX} 로 놓으면 다음 식 (3)과 같이 정의되며

$$I_{OUT} = I_{PH} = I_{MAX} \quad (3)$$

태양전지의 출력을 개방($I_{OUT} = 0$)하면, 태양전지의 출력전압은 다이오드의 순방향 전압이 되기 때문에 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$0 = I_{MAX} - A \left\{ \exp \left(\frac{q}{BkT} V_D - 1 \right) \right\} \quad (4)$$

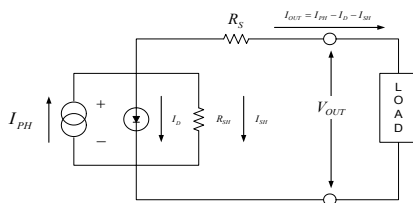


Fig. 2. Equivalent circuit of solar cell
그림 2. 태양전지의 등가회로

여기서, 계수 B는 제조상수이며 결정질 실리콘 태양전지에서는 일반적으로 1에서 2사이의 수치를 사용한다. 본 연구에서는 수식을 좀더 단순히 하기 위해 B=1로 선정하였다. 따라서, 식(3),(4)를 정리하면 다음의 식 (5)를 통해 온도특성 계수 A를 구할 수 있다.

$$A = \frac{I_{MAX}}{\exp \left\{ \frac{q}{BkT} V_D \right\} - 1} \quad (5)$$

다이오드 순방향 전압 V_D 를 새로운 계수 K로 정의($V_D = K$)하면, 특정일사량에서 동작하는 태양전지 출력전류의 일반식은 다음과 같이 표현 된다.

$$I_{OUT} = I_{SC} - \frac{I_{MAX}}{\exp \left\{ \frac{q}{BkT} K \right\} - 1} \left\{ \exp \left(\frac{q}{BkT} \frac{V_{OUT}}{V_{OP}} K \right) - 1 \right\} \quad (6)$$

- I_{SC} : 일사량에 따른 단락전류
- I_{MAX} : 일사량 1kW/m²시의 단락전류
- V_{OP} : 일사량 1kW/m²시의 개방전압

K : 계수(다이오드 순방향 전압 V_D)

3. 마이크로 컨버터 설계

마이크로 컨버터에서 회로적으로 요구되는 기능은 2가지이다. 하나는 태양광 모듈전압을 DC 링크전압만큼 높여 주는 승압기능이 필요하고, 이와 더불어 태양광 어레이에서 발생하는 전력을 최대한 추종하는 최대전력 제어 기능이 들어가는 것이다.

고효율의 전압 상승분을 위해서 부스트 컨버터를 그림 3과 같이 설계하였다. 그림 4는 부스트 컨버터의 제어 블럭도를 보이고 있다. 부스트 컨버터는 MPPT제어와 승압기능을 동시에 수행하며, 사용된 파라미터는 다음과 같다

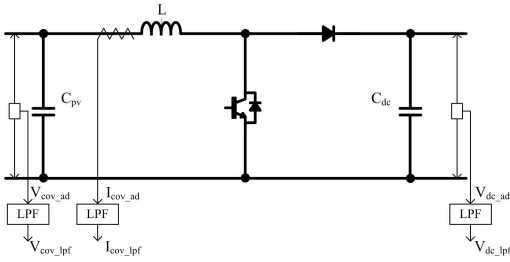


Fig. 3. Circuit diagram of boost converter
그림 3. 부스트컨버터 회로구성도

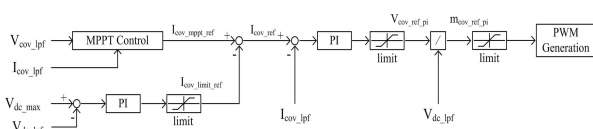


Fig. 4. Control block diagram of boost converter
그림 4. 제어 블럭 다이어그램

- Vcov_lpf : 필터 후 태양전지 전압 센싱 값
- Icov_lpf : 필터 후 태양전지 전류 센싱 값
- Icov_mpppt_ref : MPPT제어 출력 값
- Icov_limit_ref : 부스트 컨버터의 전류 제한 레퍼런스
- Icov_ref : 부스트 컨버터의 전류 레퍼런스
- Vdc_lpf : 필터 후 DC link 전압 센싱 값
- m_cov_ref : 부스트 컨버터의 PWM modulation Index 값

제어블럭도에서 Icov_limit_ref가 필요한 이유는, 부스트 컨버터는 입력단(태양전지 출력)을 제어하기 때문에 계통쪽 양방향 인버터가 DC link전압을 제한한다고 하더라도, 일정부분은 부스트 컨버터 측에서 제어 협조가 필요하기 때문이다.

따라서, 만약 DC link 전압이 최대치 근처라면 그

Icov_limit_ref은 매우 작아지며, DC link 전압이 작아질수록 Icov_limit_ref는 커지게 되어 컨버터의 전류 레퍼런스를 제한하게 된다.

이로써 인버터 부분에서의 DC link 제어를 좀더 용이하게 할 수 있다.

이를 구현하기 위해서, 그림 5에서와 같이 4상의 부스트 컨버터를 인터리브드(Interleaved) 방식으로 제어하는 구조를 갖도록 설계하였다.

이는 인덕터에 흐르는 전류의 스위칭전류 리플(Ripple)을 저감하기 위한 방식이지만, 기본 동작원리는 하나의 인덕터로 구성된 부스트 컨버터와 동일하다. SPV 1020제어기는 그림 2-7의 스위치 SW1, SW2, SW3, SW4와 D1, D2, D3, D4을 통합한 형태로 구성된다.

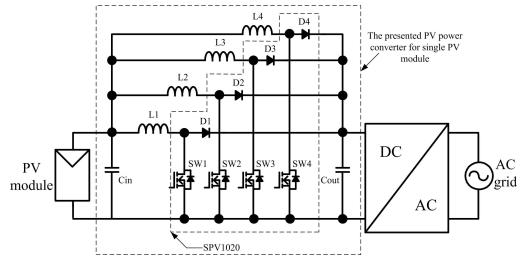


Fig. 5. Block diagram of micro-converter
그림 5. 마이크로컨버터 블럭도

인덕터에 흐르는 전류는 최대입력전류(Imp)의 크기에 의해서 결정되고, 4상 인터리브드 방식의 부스트 컨버터 제어에 의해서 흐르는 최대 크기의 인덕터 전류는 다음과 같이 결정된다.

$$I_{Lx,RMS} \approx \frac{I_{mp}}{4} \tag{7}$$

그림 6에서, 주어진 스위칭 주파수가 100kHz이고, 주기가 Ton+Toff로 지어져 있을 때, 최대의 시비율은 90%로 선정하였다. 즉, 스위칭 주기 중 스위치 도통 시간 Ton은 10us*0.9=9us로 결정된다.

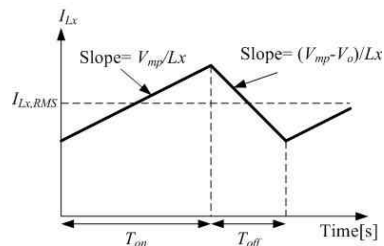


Fig. 6. Control block diagram of micro-converter
그림 6. 마이크로컨버터 제어 블럭 다이어그램

따라서, 최대 인덕터 전류의 크기는 다음 식에 의해서 결정된다.

$$I_{Lx, pk} \approx I_{Lx RMS} + \frac{1}{2} \frac{V_{mp}}{Lx} 9us \quad (8)$$

320W급의 태양광 전력변환장치의 설계임으로, 과전류 설정값은 4.5A이고, 최대 인덕터 전류 ILx,pk는 4.5A 이내가 되도록 해야 한다.

$$L_x \approx \frac{1}{2} \frac{V_{mp} * 9us}{4.5 - I_{Lx RMS}} = \frac{1}{2} \frac{V_{mp} * 9us}{4.5 - \frac{I_{mp}}{4}} \quad (9)$$

위 식으로부터, 인덕턴스값은 47uH로 선정하였다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 300W 태양광 어레이를 기준으로 부스트컨버터를 사용한 전력변환장치를 바탕으로 한다. 일단 입력전원으로써의 태양전지 모듈의 사양 검토를 위해서 PSIM 소프트웨어를 이용하여, 태양전지 모듈의 사양을 정의한다. 개방전압은 40V, 단락전류는 10A로 선정하였고, 이를 그림 7과 같은 회로로 구성하였다. 일사량은 4가지 경우로 나누어 1kW/m2, 0.75kW/m2, 0.5kW/m2, 0.25kW/m2 로 구성하여, 시뮬레이션을 하였다.

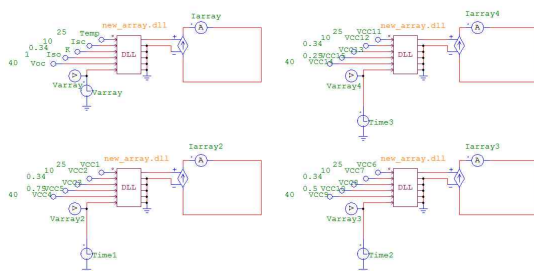


Fig. 7. Simulation circuit of 300W PV module by irradiation
 그림 7. 일사량에 따른 300W급 태양광모듈 회로도

그 결과, 그림 8에서와 같이, 일사량에 따라, 태양전지의 전력-전압 곡선이 그려짐을 확인하였고, 이때의 태양전지 최대출력 전력은 일사량이 100%인에서 1kW/m2에서 300W가 출력됨을 확인하였다.

그림 9는 마이크로컨버터 시뮬레이션 회로도도를 나타내고 있다. 300W PV array 출력은 new_array.dll로 모의 되었고, 이 후 Boost converter로 전력단이 구성되었다. 출력 DC 부하는 R로 구성이 되고, 320W에 대해서, 약 4.7ohm으로 선정하였다.

그림 10은 100% 일사량 조건에서 300W PV 어레이의 출력성능을 나타내고 있는데, 최고 299W로써 MPPT 성능이 평균적으로 98% 수준을 보임을 확인할 수 있었다.

단 이때의 출력부하는 R1으로 고정되어 시뮬레이션 되었다.

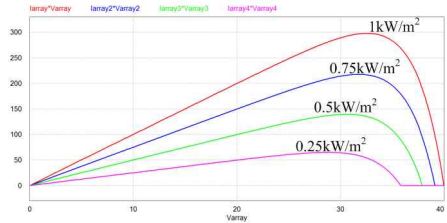


Fig. 8. Simulation result of 300W PV module by irradiation
 그림 8. 일사량에 따른 300W급 태양광모듈시뮬레이션결과

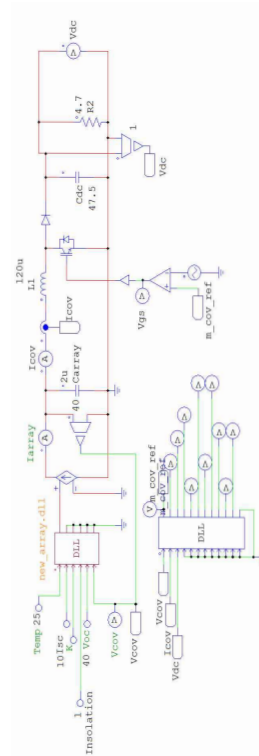


Fig. 9. Simulation circuit of micro-converter
 그림 9. 마이크로컨버터 시뮬레이션 회로도

그림 10은 100% 일사량 조건에서 300W PV 어레이의 출력성능을 나타내고 있는데, 최고 299W로써 MPPT 성능이 평균적으로 98% 수준을 보임을 확인할 수 있었다. 단 이때의 출력부하는 R1으로 고정되어 시뮬레이션 되었다.

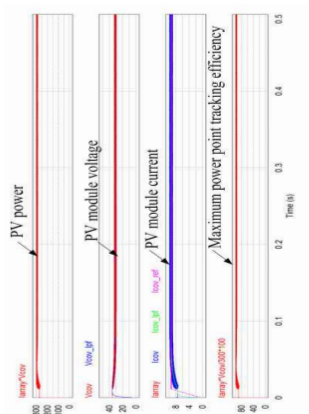


Fig. 10. Simulation result of micro-converter
그림 10. 마이크로컨버터 시뮬레이션 결과 파형

5. 실험 분석

실험을 위해 태양광 마이크로 컨버터를 그림 11과 같이 4상의 인터리브드 부스트 컨버터로 회로를 설계하였다.

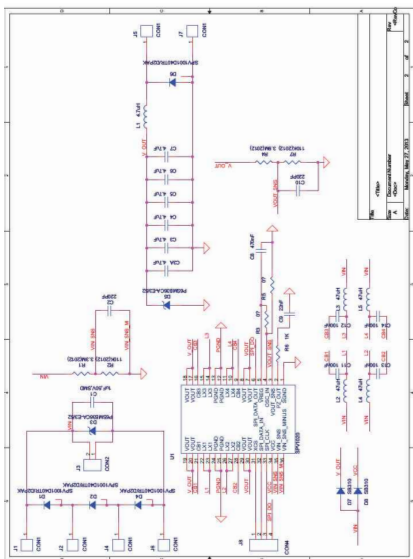


Fig. 11. Design of micro-converter circuit
그림 11. 마이크로컨버터 설계도

시제작된 태양광 마이크로 컨버터의 성능을 살펴보기 위해, 태양광 전력변환효율과 태양광 최대전력 추종효율을 각각 실험을 통해서 그 성능을 검증하였다.

태양광 전력변환효율의 경우, 그림 12에 나타난 바와 같이, 98.26%의 높은 성능을 보였고, 최대전력추종

효율의 경우에는 그림 13에 나타난 바와 같이 99.6%의 높은 최대전력 추종 성능을 확보하였다.

UMC1	34.214	U	UMC2	36.026	U
Idc1	9.368	A	Idc2	8.741	A
P1	320.53	W	P2	314.96	W
η	98.26	%			

Fig. 12. Experiment result of power quality
그림 12. 전력품질 실험결과

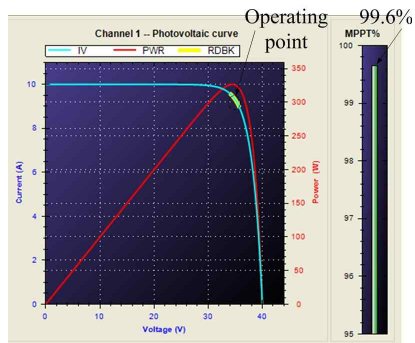


Fig. 13. Experiment result of MPPT
그림 13. 최대전력추종효율 실험결과

III 결론

태양광모듈에 생성된 음영 및 눈, 오염물질 등에 대한 중앙집중형 태양광 전력변환장치의 성능 저하에 대응하여, 본 논문에서는 태양광 발전의 에너지 생산을 극대화하기 위해 단일 PV 모듈에 마이크로 컨버터 개별적으로 태양광모듈의 성능을 조정하여 최대전력점을 추적하도록 하였다.

마이크로컨버터를 설계하고 시뮬레이션과 시제품 제작을 통해서 98%의 변환효율과 99.6%의 MPPT 효율을 확인하였다

결과적으로, 음영 및 오염물질로 인한 태양광모듈의 발전량 저하를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 태양광어레이에 적용하여 최대 발전량을 확보 할 수 있는 방안에 대하여 연구할 예정으로 보다 효율적인 성능개선을 도출하고자 한다.

References

- [1] R. Chenni, M. Makhoulf, T. Kerbache and A. Bouzidura, "A detailed modeling method of photovoltaic cells, energy, Vol. 32, pp.1724-1730, 2007
- [2] IEA PVPS, Trends in Photovoltaic applications, IEA, Report IEA-PVPS, 2006
- [3] Takashi Oozeki and Toshiyau Izawa, "The evaluation method of PV systems", Technica Digest of the International PVSEC-12, pp.741-742, 2001
- [4] Werner Knaupp, "Evaluation of PV module design at irregular operation conditions", 26th PVSC, pp.1213-1216, 1997
- [5] W. Desoto, S.A. Klein and W.A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, Vol.80, pp.78-88, 2006
- [6] J. Kwon, K. Nam, B. Kwon, "Photovoltaic power conditioning system with line connection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 4, pp. 1048-1054, 2006.
- [7] S. Chen, T. Liang, and K. Hu, "Design, Analysis, and Implementation of Solar Power Optimizer for DC Distribution System", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1764-1773, 2013.

Lim Jung-Yeol (Member)



1996 : BS degree in Electronic Engineering, Dongshin University.

1998 : MS degree in Electronic & Electrical Engineering, Dongshin University.

2002 : PhD degree in Electronic & Electrical Engineering, Dongshin University.

2003~ 2014 : Assistant Professor. Nambu University

BIOGRAPHY

Chae Young-Kee (Student Member)



2009 : BS degree in Computer Electrical Information

Engineering, Nambu University.

2011 : MS degree in Digital Management Information, Nambu University.