

고주파 절연 모듈형 Photovoltaic PCS

권 정민¹⁾, 권 봉환²⁾

Modular Photovoltaic PCS with High-frequency Isolation

Jungmin Kwon, Bonghwan Kwon

Key words : photovoltaic(광발전), SEPIC converter(세픽 컨버터), MPPT(최대 전압점 추적)

Abstract : A modular photovoltaic PCS with high-frequency isolation is proposed. The proposed system consists of a SEPIC converter and a full-bridge inverter. Using the power slope versus voltage of the PV array, the MPPT controller is proposed that produces a smooth transition to the maximum power point. The disturbance of the line voltage is detected using a fast sensing technique. Experimental results obtained on a 500W prototype show high performance such as almost unity power factor, 90% power efficiency, 3.6% THD.

Nomenclature

- I_{pv} : PV current
- I_{sat} : PV array saturation current
- q : charge of an electron
- K : Boltzmann's constant
- A : ideality factor of the p-n junction
- T : PV array temperature (K)
- R_s : intrinsic series resistance of the PV array

subscript

- PCS : power conditioning system
- SEPIC : single-ended primary inductance converter
- PV : photovoltaic
- MPPT : maximum power point tracking
- THD : total harmonic distortion
- CCM : continuous current mode
- DCM : discontinuous current mode

1. 서론

화석에너지는 지구 온난화 등 환경 문제를 야기할 뿐 아니라 매장량도 한정되어 있어 머지않아 고갈 될 것으로 예측된다. 그러나 세계적으로 에너지의 사용량은 계속 증가하고 있어, 지속 가능한 발전을 위해서 재생가능 에너지의 개발이 필수적이다. 재생가능 에너지는 풍력, 지열, 태

양광 발전 등 여러 종류가 있다. 태양광 발전은 설치지역에 제한을 받지 않고 소음이 없어, 특히 소규모 주택용 발전 시스템에 적합하다.

과거에는 Fig. 1(a)과 같이 태양전지판을 직렬, 병렬로 연결하여 비교적 대용량급 PV 발전 인버터 한 개를 사용하여 발전 하였다. 이 방식은 대용량 PV 발전 인버터에서 일괄적으로 MPPT 제어를 하므로, 효율이 나쁘다. 또한 각 태양전지판에 string 다이오드를 연결하여야 하며 THD와 역률이 나쁘다는 단점이 있다. 현재는 Fig. 1(b)과 같이 태양전지 셀(cell)이 직렬로 연결된 높은 전압의 태양전지판과 PV 발전 인버터를 연결하여 중용량급 PV 발전 시스템을 만든다. 이 시스템의 출력은 계통전압에 연결하며, 큰 전력을 얻기 위해서는 여러 대를 병렬로 계통에 연결한다. 이러한 방식은 각 시스템마다 독립적으로 MPPT를 할 수 있다는 장점이 있으며, THD와 역률이 좋다. 그러나 태양전지의 전압이 높아 셀의 그늘 문제에서는 낮은 MPPT 효율과 hot spot의 위험이 존재한다. 미래에는 Fig. 1(c)과 같이 각 태양전지마다 PV 발전 인버터를 연결하여 소용량급의 PV 발전 모듈을 만든다. 이 모듈을 필요한 전력만큼 계통에 병렬로 연결한다. 이 경우 각각의 태양전지마다 MPPT제어를 하므로, 발전 효율이 높고, THD와 역률이 좋다. 또한 낮은 태양전지 전압으로 보다 안정성을 기할 수 있으며, 셀의 그늘 문제로

-
- 1) 포항공과대학교 전자전기공학부
E-mail : jmkwon@postech.ac.kr
Tel : (011)206-1226
 - 2) 포항공과대학교 전자전기공학부
E-mail : bhkwon@postech.ac.kr
Tel : (054)279-2219 Fax : (054)279-8119

인한 MPPT 효율 저감 및 hot spot의 위험도 개선할 수 있다.

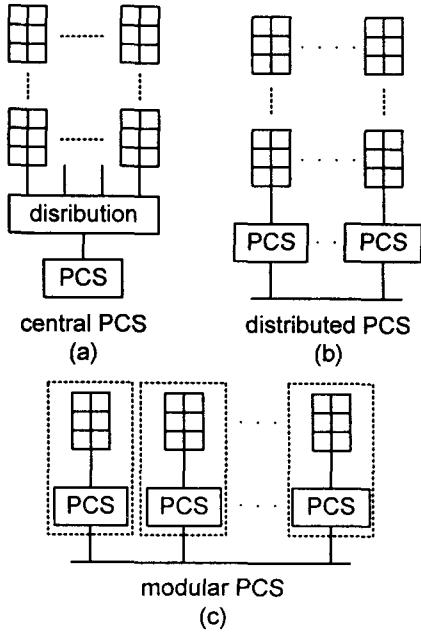


Fig. 1 PV 시스템의 과거(a), 현재(b), 미래(c)

Fig. 1(c)의 방식은 낮은 전압에서 계통전압까지 전압을 올려야 하므로, 전압 승압 기능이 있는 컨버터를 사용해야 한다. SEPIC 컨버터는 전압의 승압기능과 감압기능을 가지고 있고, 또한 입력단에 인덕터가 있어서 입력전압 리플이 적다는 이점이 있다. 본 논문에서는 SEPIC 컨버터와 Full bridge 컨버터를 연결한 500W급 모듈형 PV 발전 인버터를 제안한다. 본 논문에서 제안하는 회로는 Fig. 2와 같다

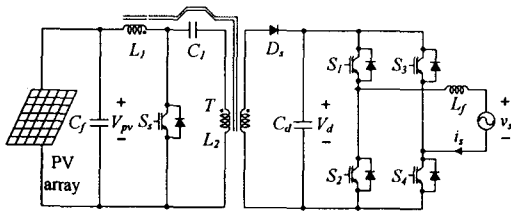


Fig. 2 제안된 태양광 발전 인버터

2. PV 시스템의 하드웨어 분석

2.1 DC/DC 컨버터

입력전류 리플을 비교적 저감시키는 전류 입력형 DC/DC 컨버터인 SEPIC 컨버터를 사용한다. SEPIC 컨버터는 DCM에서 diode와 switch가 도통하지 않을 때에도 전류가 계속 흐른다. 따라서 입력 전류에서 고주파 리플 전압이 작아 MPPT를

좀 더 용의하게 한다. 인덕터 L_r 는 변압기 T와 커플링을 하여 magnetic core 한 개를 줄일 수 있다. 변압기 T의 권선 비는 1:n이다

제안된 SEPIC 컨버터는 CCM으로 작동할 경우 2개의 모드를 가지며 DCM으로 작동할 경우 3개의 모드를 갖는다. 전압 관계식은 다음과 같다.¹⁾

$$\frac{V_d}{V_{pv}} = n \frac{D}{1-D} \quad \text{CCM} \quad (1)$$

$$\frac{V_d}{V_{pv}} = \frac{D}{\sqrt{C}} \quad \text{DCM} \quad (2)$$

여기서 C 는 다음과 같으며 L_e 은 SEPIC 컨버터의 출력저항이다.

$$C = \frac{2L_e}{R_e T_s}, \quad L_e = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (3)$$

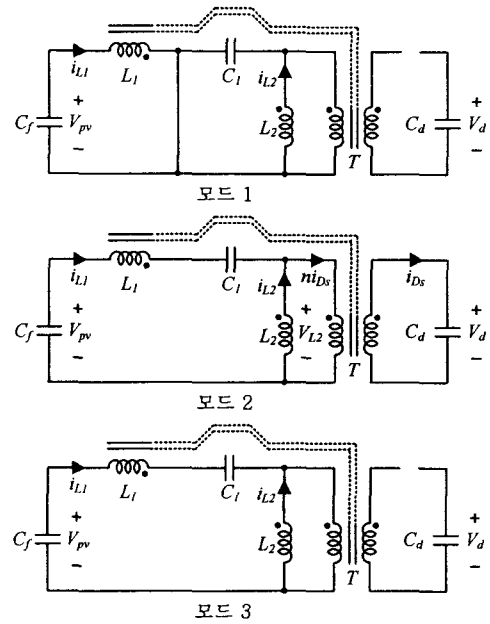


Fig. 3 SEPIC 컨버터의 동작 모드

모드 1: 스위치 S_2 가 닫히면 L_1 에 전압 V_{pv} 이 걸려 i_{L1} 은 증가한다. 또한 i_{L2} 도 증가하며, 다이오드 D_s 는 역전압이 걸려 도통하지 않으므로 i_{L2} 은 모두 커패시터 C_1 로 흘러간다.

모드 2: S_2 가 열리고 i_{L1} 과 i_{L2} 는 감소한다. 이때 D_s 는 도통하여 전류 i_{Ds} 는 다음과 같다.

$$i_{Ds} = \frac{i_{L1} + i_{L2}}{n} \quad (4)$$

모드 3: DCM으로 작동할 경우에 존재하는 모드로 i_{L1} 과 i_{L2} 는 일정한 전류가 흐르며 L_1 과 L_2 에는 전압이 인가되지 않는다. 따라서 변압기 T의 2차측에도 전압이 인가되지 않으므로 D_s 는 역전압이 걸려 도통되지 않는다. 이때 i_{L1} 는 모두 L_2 로 흘

려간다.

$$i_{L1} = -i_{L2} \quad (5)$$

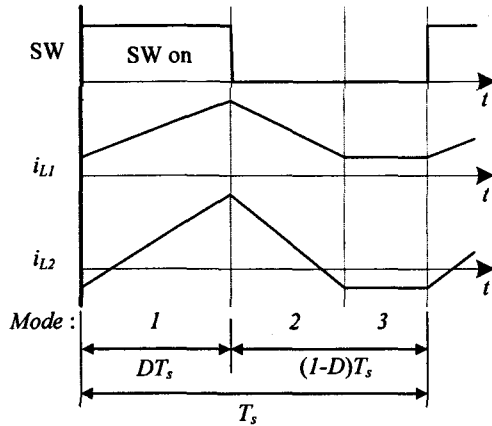


Fig. 4 SEPIC 컨버터의 이론적 파형

2.2 full-bridge 인버터

full-bridge 인버터는 unipolar PWM 방식을 사용한다. Fig. 5와 같이 unipolar PWM 방식은 bipolar PWM 방식에 비해 출력전압 리플이 적다는 장점이 있다. 출력전압 v_s 가 양전압일 경우 S_1 는 항상 켜주며, S_3 과 S_2 를 이용하여 PWM 파형을 만든다. v_s 가 음전압일 경우 S_2 는 항상 켜주며, S_3 과 S_4 를 이용하여 PWM 파형을 만든다.

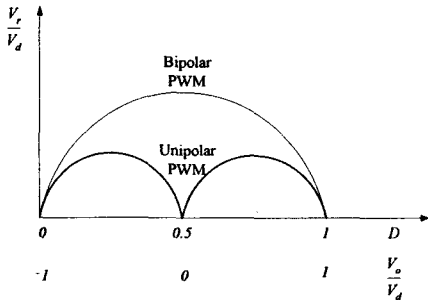


Fig. 5 bipolar PWM과 unipolar PWM 방식의 출력전압 리플 비교

3. PV 시스템의 MPPT 알고리즘

태양전지는 비선형적인 특성을 가진다. 최대 전력을 낼 수 있는 지점(MPP)이 있으며 그 지점 이하의 전압에서는 전류원으로 작용하며, MPP 이후에는 전압원으로 작동한다. 태양전지의 전류 관계식은 다음과 같다.^{2) 3)}

$$I_{PV} = I_q - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{AKT} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

R_s 는 무시할 수 있으므로 식 (6)은 다음과 같다.

$$I_{PV} = I_q - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{qV_{PV}}{AKT} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

태양전지에서 발생한 전력은

$$P_{PV} = V_{PV} I_{PV} \quad (8)$$

이며, 전력 기울기 $\beta = dP_{PV}/dV_{PV}$ 는

$$\beta = I_{PV} + \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} V_{PV} \quad (9)$$

이고 식 (7)을 대입하여 β 값을 구할 수 있다. 전력 기울기 β 는 다음과 같이 계산한다.

$$\beta = I_{PV} + \frac{\Delta I_{PV}}{\Delta V_{PV}} V_{PV} \quad (10)$$

ΔI_{PV} 와 ΔV_{PV} 는 PV의 전압, 전류의 변화량이다. V_{ref} 는 다음과 같으며, k_1 와 k_2 는 이득상수이다.

$$V_{ref,n} = \begin{cases} V_{ref,n-1} + k_1\beta & \text{if } \Delta V_{PV} \neq 0 \\ V_{ref,n-1} + k_2\Delta I_{PV} & \text{if } \Delta V_{PV} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$\beta < 0$ 일 경우 V_{ref} 를 감소시키고, $\beta > 0$ 일 경우 V_{ref} 를 증가시켜 β 가 0이 되도록 한다. β 가 0이면 V_{ref} 는 변화하지 않는다. $\Delta V_{PV} = 0$ 의 경우, V_{ref} 는 ΔI_{PV} 에 의해 결정된다. I_{PV} 가 증가하면 V_{PV} 는 감소하며, I_{PV} 가 감소하면 V_{PV} 는 증가하므로 I_{ref} 는 다음의 식에 의해 결정된다.

$$I_{ref} = k_v (V_{ref} - V_{PV}) \quad (12)$$

여기서 k_v 는 이득 상수이다.

4. 계통 검출

계통 전압이 갑자기 바뀌어 계통에 과전류가 흐르는 경우, 또는 PV PCS가 단독 운전 하는 경우 PV PCS의 전원을 즉시 꺼야 한다. 이를 위해서, 계통 전압의 최대치와 주파수를 빨리 검출하여야 한다. 계통 전압의 최대치 검출의 경우, 과거에는 정류기 회로, 커패시터와 저항을 이용하여 최대 전압을 검출 하였다. 입력전압이 증가할 때는 커패시터의 전압이 즉각적으로 올라가지만, 입력전압이 감소할 때는 커패시터의 전압이 천천히 감소하는 단점이 있다. 저항 값을 줄이면 입력전압이 감소할 때 커패시터의 전압도 빨리 감소하지만 전압 리플이 커지는 단점이 있다. Fig. 6은 빠른 계통 전압 검출기이다. 입력 전압을 제공한 값과 입력전압의 위상을 90° 늦춘 값의 제공한 값을 합하여 계통전압을 찾는다.

$$\begin{aligned} v_{sd}^2 &\propto V_s^2 \sin^2 \omega t + V_s^2 \cos^2 \omega t \\ &= G_d V_s^2 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 G_d 는 계통 전압을 검출 이득 값이다.

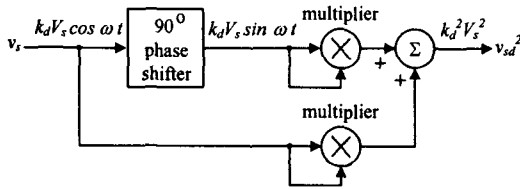


Fig. 6 계통 전압 검출기

주파수 검출은 디지털 phase-locked loop (PLL)을 사용하였다. 가상의 정현파 전압파형을 만들고 이 정현파 전압파형이 계통의 전압 곡선의 주파수와 일치하게 만든다.

5. 실험 결과

DC/DC 컨버터의 스위치는 MOSFET을 사용하였으며, DC 리플 전류를 저감시키기 위하여 스위칭 주파수는 100kHz로 하였다. full-bridge 인버터의 스위치는 IGBT를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 15.4kHz로 하였다. Fig. 7은 MPPT를 시작할 때의 태양전지의 전압과 전류의 파형이다. 최대 전압 지점은 25V이고 생산 전력은 500W이다. Fig. 8은 계통 전압과 전류의 파형이며 전류와 전압 파형의 위상이 일치하는 것을 볼 수 있다. 계통 전류는 역률은 99.7%이며, THD는 3.6%로 측정되었다. 계통 전류의 고조파 성분은 Fig. 9에 나타나있으며, 각 성분은 2.2% 보다 작다. 이는 THD가 5% 이하이고 고조파 성분이 3% 이하여야 한다는 규제를 만족한다. Fig. 10은 시스템 전체의 전력 손실 분포도를 나타낸다. 최대 전력에서 시스템 전체의 효율은 90%로, SEPIC 컨버터에서 6%, full-bridge 인버터에서 3.5%, 제어회로에서 0.5%의 전력 손실이 발생하였다.

6. 결론

본 논문에서는 100kHz에서 작동하는 500W급 SEPIC 컨버터와 full-bridge로 구성된 모듈형 PV PCS를 제안하였다. 태양전지의 전력 기울기를 이용하여 MPPT 제어를 하였으며, 계통 전압을 빨리 찾는 방식을 이용하였다. 모든 제어는 마이크로 프로세서 한 개로 모두 구현하였다. 실험을 통해 역률은 99.7%, 효율은 90%, THD는 3.6%로 나타났다.

References

- [1] G. Spiazzi, and L. Rossetto, 1994, "High quality rectifier based on coupled inductor sepic topology", *IEEE PESC*, pp. 336-341 vol.1
- [2] B. Bose, P. Szczeny, and R. Steigerwald, 1985, "Microcomputer control of a residential photovoltaic power conditioning system", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 21, pp. 1182-1191
- [3] C. Hua, J. Lin, C. Shen, 1998, "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with

peak power tracking", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, pp. 99-107

- [4] 유권중, 정영석, 최주엽, 2002, "60Hz 절연변압기가 없는 고주파링크방식 계통연계형 태양광발전시스템 고찰", *전력전자학회 논문집* 제7권 제6호, pp. 563-569

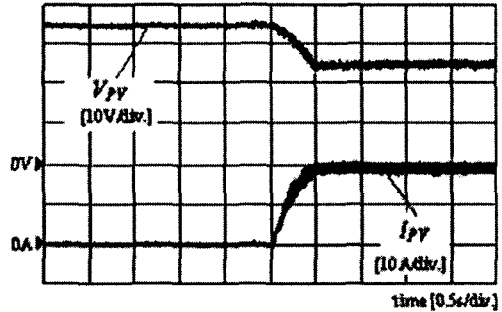


Fig. 7 MPPT를 시작할 때 PV의 전압과 전류 파형

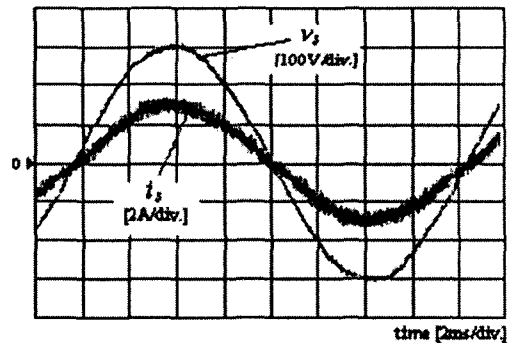


Fig. 8 계통의 전압과 전류 파형

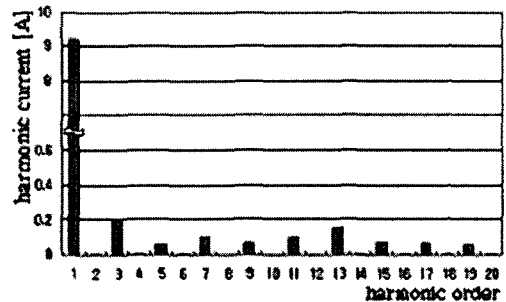


Fig. 9 고조파 성분

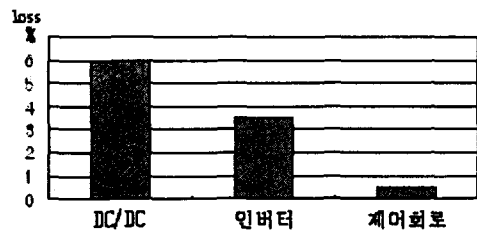


Fig. 10 전력 손실 분포도