

절연변압기를 생략한 새로운 계통연계형 햇빛발전시스템 고찰

정영석, 정명용, 유권중
한국에너지기술연구소

A Study of New Transformerless Utility Interactive Inverter for Photovoltaic System

Y. S. Jung, M. W. Jung, G. W. Yu
Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

This paper describes a new interactive inverter between a photovoltaic(PV) array and single-phase utility that avoid the bulky input (60Hz) transformer on the AC side. The interface employs a pwm boost converter on the DC side followed by a pwm current-forced single-phase rectifier for injecting the power from the PV array into the mains. The current waveform at the AC side remains sinusoidal and exactly in phase at all time. The circuit also has the advantage of requiring fewer switching device than high-frequency link system. This paper describes modeling of PV array and new system topology. Simulation results on the performance of the connection are also presented.

1. 서론

최근 범세계적으로 기후변화협약과 에너지자원의 고갈에 따른 에너지·환경문제에 능동적으로 대처할 유일한 수단으로서 대체에너지에 대한 관심이 집중되고 있다. 특히 국내에서는 대체에너지를 이용하여 발전된 전력을 상용계통에 공급할 수 있도록 하는 전기사업법의 개정이 진행 중에 있으며, 가까운 시일 안에 주택용 계통연계형 태양광발전시스템의 시범보급사업이 시행될 전망이다. 따라서 국내에서도 계통연계형 태양광발전시스템에 대한 연구가 활성화되어야 할 것으로 사려된다.

현재 국외에서 개발되어 사용되고 있는 계통연계형 인버터의 종류는 저주파 절연변압기형(60Hz), 고주파 링크형, 절연변압기가 없는 형(Transformerless)으로 구분된다. 절연변압기가 없는 형은 계통과 전기적으로 절연이 되지 않기 때문에 안정성을 확보하기 위하여 제어 복잡하고 부가적인 보호회

로를 필요로 하는 단점이 있다. 그러나, 저주파 변압기를 사용하지 않기 때문에 고효율, 소형, 경량화에 가장 유리하며, 시스템을 구성에 필요한 전력용 반도체 소자가 가장 적기 때문에 저가의 시스템 구현에 적합하다. 또한 고주파링크형은 많은 파워 스위치 소자를 사용하는 단점이 있어, 저주파 절연변압기를 사용하지 않음으로써 고효율화, 소형경량화, 전체 시스템 가격의 저가화가 가능하다는 장점이 있다^[1,2].

본 논문에서는 이러한 절연용 변압기를 생략한 새로운 토폴로지를 제시하고 이론적 검토 및 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 고찰하였다.

2. 본론

2.1 태양전지 어레이

태양전지에서 발생하는 전압과 전류의 관계는 매우 비선형 특성을 갖기 때문에, 보다 정확한 시스템 특성의 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 태양전지 어레이의 모델링이 선행되어야 한다. 본 절에서는 태양전지 어레이의 모델링을 이용하여 구현한 PSpice 모델을 제시하였고, 시뮬레이션 결과를 통하여 유효성을 보였다.

2.1.1 태양전지의 모델링

그림 1은 태양전지의 등가회로도를 나타낸다^[3]. 단락전류 I_{sc} 는 이상적으로 광전류 I_L 과 일치하며, 다이오드 포화전류 I_0 에 의해서 결정되는 태양전지의 개방전압은 다음 식 (1)과 같다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_L}{I_0} + 1 \right] \quad (1)$$

여기서, V_{oc} =개방전압, k =볼츠만 상수, q =전하[C], T =태양전지 등작전압[K]을 의미한다.

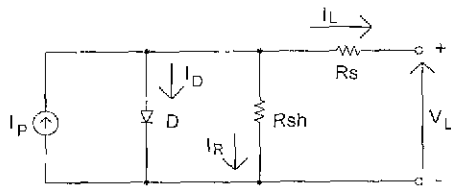


그림 1 태양전지의 등가회로도

또한, 온도의 변화에 따른 단락전류와 개방전압의 관계식은 다음 식 (2)와 같다.

$$I_{sc} = I_o \left[e^{\left(\frac{qV_{oc}}{kT} \right)} \right] \quad (2)$$

태양전지 패널은 원하는 전압과 전류를 얻기 위하여 다수의 태양전지를 직·병렬로 연결하여 구성한다. 또한 태양전지 어레이는 이러한 패널을 직·병렬로 연결하여 구성한다. 일반적으로 36개의 태양전지를 직렬로 연결한 태양전지 패널이 널리 사용되고 있다.

2.1.2 태양전지 어레이 모델링

태양전지 어레이의 I-V 특성곡선을 얻기 위한 수식은 다음 식 (3)~(6)과 같이 표현된다[2].

$$I_b = \{ I_{sc} S_N + I_i (T_c - T_r) \} N_p \quad (3)$$

$$I_D = \left\{ I_o \left[e^{\frac{qV_i}{AKT N_s}} - 1 \right] \right\} N_p \quad (4)$$

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (5)$$

$$S = 100 \sin [15 \times SH - 90^\circ] \quad (6)$$

여기서, IP=광전류, SN=단위일사량, It=단락전류 온도계수[A/K], ID=다이오드전류, IO=역포화전류, NP=패널의 병렬연결 수, NS=태양전지의 직렬연결 수, Tc=태양전지온도[K], Tr=태양전지 기준온도[K], A, B=제조상수, Ior=역포화전류, Eg=에너지밴드갭, S=일사량[mW/cm²], SH=시간을 의미한다.

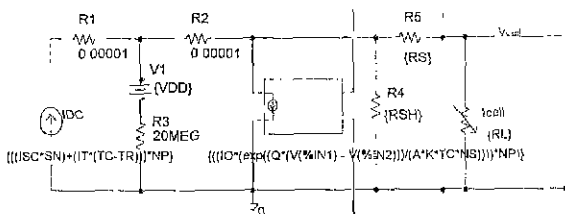


그림 2 태양전지 어레이의 PSpice 모델

그림 2는 PSpice로 구현한 태양전지 어레이의 모델을 나타내고 있다. 그림 2에서 R1과 R2는 광전류원과 다이오드 전류원 사이에 단락회로가 구성되어 나타나는 convergence error를 피하기 위한 것이고, R3는 전압원 V1과의 단락회로를 막기 위한 것이다. 시뮬레이션 수행시 RL의 값을 0~∞까지 변화시킴으로써 태양전지 어레이의 I-V 특성곡선을 얻을 수 있다.

2.1.3 태양전지 패널의 시뮬레이션

그림 3은 (주)삼성전자의 태양전지 패널인 SM-60을 모델로 시뮬레이션을 수행한 결과로 나타난 I-V 특성곡선과 P-V 특성곡선을 나타낸다. SM-60은 36개의 태양전지를 직렬로 연결한 태양전지 패널이다. 그러므로, 여기서 NS=36, NP=1을 대입하였다. 표 1은 SM-60의 카달로그에서 제시된 데이터와 시뮬레이션 결과 데이터의 비교를 나타낸다. 표 1에 의하면 개방전압을 제외한 각각의 오차율이 4% 이내로 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 이러한 태양전지 어레이의 모델을 인버터 시뮬레이션에 적용한다면, 실제의 시스템과 매우 유사한 특성을 나타낼 수 있다.

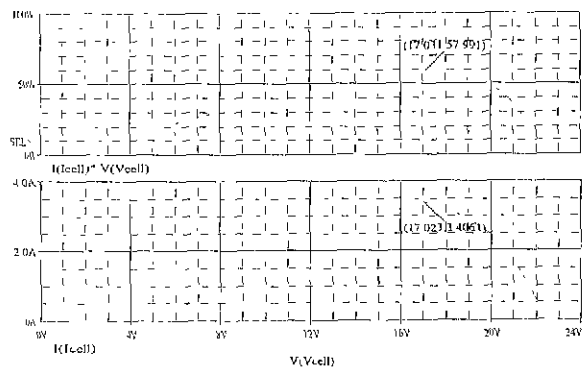


그림 3 SM-60 패널에 대한 (a)P-V, (b)I-V 특성 (S=1000 W/m² Tc=25°C)

표 1 SM-60에 대한 시뮬레이션과 제시된 데이터 비교 (S=1000 W/m², Tc=25 °C)

SM-60	시뮬레이션	카달로그	오차율(%)
개방전압 [V]	22.38	21.10	6.06
단락전류 [A]	3.77	3.80	0.78
최대전력 [W]	57.99	59.85	3.10
전압(P _{PK})[V]	17.03	17.10	0.40
전류(P _{PK})[A]	3.40	3.50	2.85

2.2 계통연계형 시스템

본 절에서는 계통연계형 시스템의 새로운 토폴로지를 제시하고, 구성 및 동작 특성을 간단히 설명한다. 또한 제시한 토폴로지를 시뮬레이션으로 구현하여 그 결과를 나타낸다.

2.2.1 계통연계형 시스템의 구성 및 동작특성

그림 4은 변압기를 생략한 새로운 토폴로지를 나타내고 있다. 제안하는 계통연계형 시스템은 태양전지 어레이, Boost 컨버터, 2개의 단상 하프 브리지 방식의 인버터(S1-S2, S3-S4), 2개의 연계 리액터 L1과 L2 및 커패시터 C1과 C2, breaker, 계통전원 V_S 로 구성된다. 여기서 인버터 측은 계통에 유효전력을 공급하며, 이때 전원 전압 V_S 와 전원 전류 I_S 는 동상의 단위 역률을 갖는다. 또한 Boost 컨버터는 태양전지 셀의 최대 전력(3kW)이 DC 커패시터 측으로 전달 되도록 인덕터 전류 ILB를 제어하여, Vcell이 최대 전력점에서 유지되도록 하는 정전압 제어를 하고 있다.

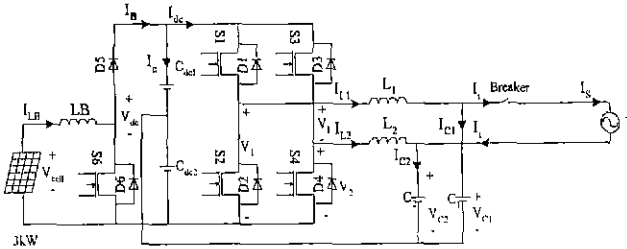


그림 4. 새로운 계통연계형 시스템 토폴로지

한편 이 방식은 절연용 변압기가 없으므로 2개의 하프브리지 인버터를 각각 제어하여 $IL1=Ic1+Ii$, $IL2=Ic2-Ii$ 이 되도록 제어하며, 이때 Ii 는 전원 전류 $I_S=Ii-IL$ 의 관계가 성립한다. 또한, 커패시터 C1, C2의 양단 전압 $Vc1$ 과 $Vc2$ 는 각각 $V_S/2$, $-V_S/2$ 의 AC성분을 갖는다. 그리하며, LC 필터를 거친 인버터 출력 전압차 $Vc1-Vc2$ 는 V_S 의 AC전압만이 나타나게 된다.

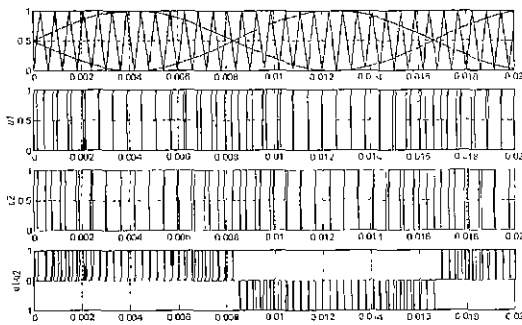


그림 5. 인버터부의 PWM파형 및 게이트 신호

그림 5는 각각의 하프 브리지 인버터를 제어하기 위한 SPWM의 한주기 파형이며, 이는 1과 0 사이의 값을 가지며 중간 값은 1/2가 된다. 첫번째 파형은 180° 만큼 위상차가 있는 2개의 reference 사인파와 삼각파이다. 삼각파와 2개의 reference 사인파와의 비교를 통해 각각의 하프브리지에 대한 gate 신호들이 두 번째, 세 번째 파형과 같이 발생되고, V_{dc} 로 normalize된 인버터 출력 전압 VI은 2개의 gate 신호의 차인 네번째 파형으로 나타난다.

그림 6은 3kW급 태양전지 어레이의 psim 모델을 나타낸다, 그림 7은 구현한 모델의 태양전지 어레이 전압 Vcell과 전류 Icell의 특성곡선을 보여주며, 247V의 Vcell에서 최대출력이 발생하므로, 그림 4의 Boost컨버터에서 Vcell 전압이 247V를 유지하도록 정전압 제어를 한다.

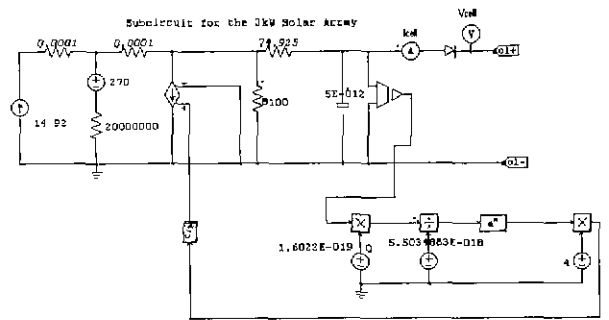


그림 6 태양전지 어레이의 psim 모델 (3kW, S=1000 W/m²)

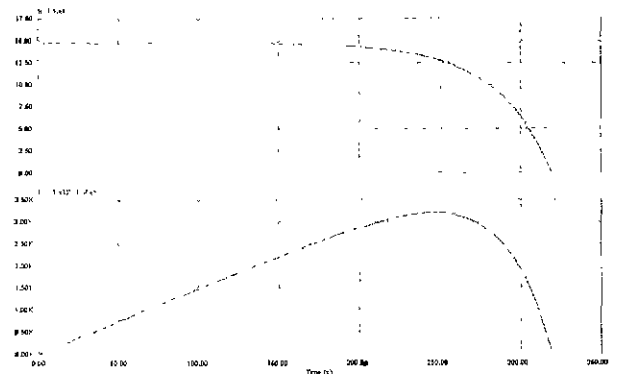


그림 7 태양전지 어레이의 P-V, I-V 특성곡선 (3kW, S=1000 W/m²)

2.2.2 연계형 인버터 시뮬레이션

그림 8은 제안한 시스템의 boost converter부의 psim 모델을 나타낸다. 그림 8에서 보이듯이 태양전지 전압을 247V로 유지하도록 제어하며, dc link의 전압을 약 470V로 승압한다. 그림 9는 제안한 시스템의 인버터부의 psim 모델을 나타낸다. 인버터는 dc link를 둘로 나누어 두 개의 하프브리지를

각각 제어한다. 표 2는 시뮬레이션에서 사용한 시스템 파라미터를 나타낸다.

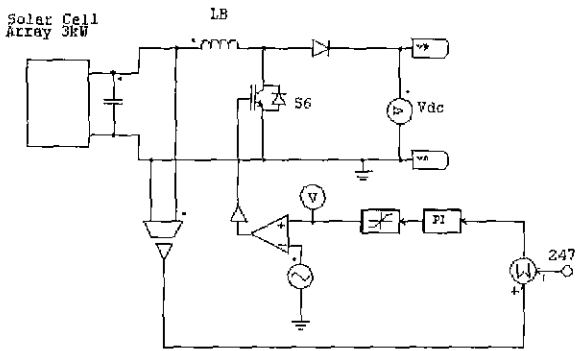


그림 8 Boost Converter의 psim 모델

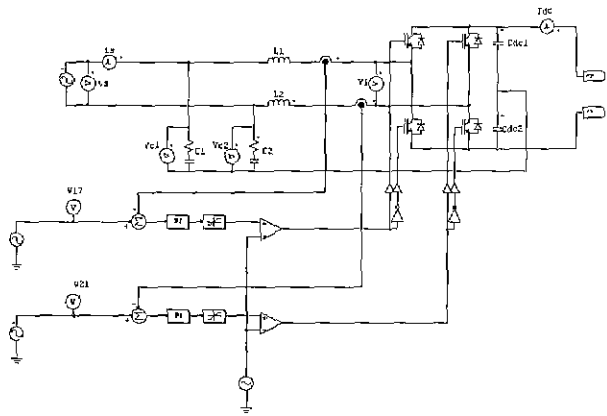


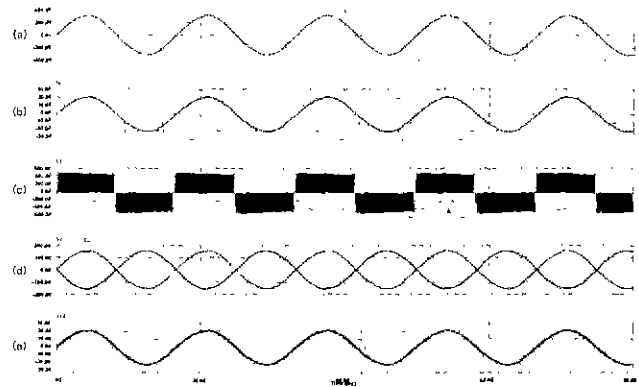
그림 9 연계형 인버터의 psim 모델

표 2 시뮬레이션에서 사용한 시스템 파라미터

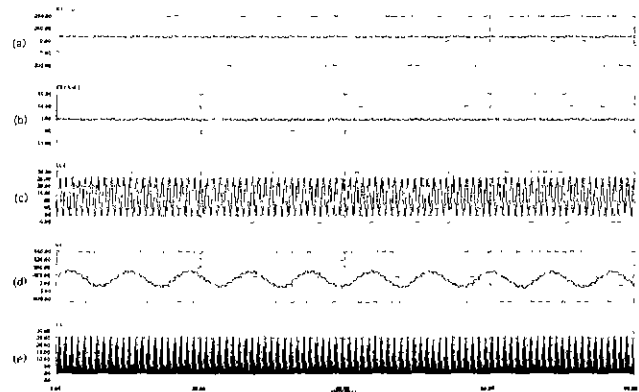
항목	기호	값
AC 전원 전압	V_s	220[V _{rms}]
기본 주파수	f_s	60[Hz]
승압용 리액터	LB	2[mH]
DC Link 커패시터	C_{dc1}, C_{dc2}	800[μ F]
연계형 리액터	L_1, L_2	2[mH]
필터용 커패시터	C_1, C_2	3[μ F]

그림 10은 인버터의 각부 전압, 전류에 대한 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 그림 10에서 보이듯이 전원전압 v_s 에 대하여 동상의 정현파 전류 i_s 가 유입되고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 컨버터의 각부 전압, 전류에 대한 시뮬레이션 결과 파형이다. 그림에서 보이듯이 태양전지 전압은 최대전력이 발생하는 247V로 유지되고 있으며, DC link 전압 V_{dc}

는 약 470V로 승압되고 있음을 알 수 있다.



(a) V_s , (b) I_s , (c) V_I , (d) V_{C1}, V_{C2} , (e) I_{L1}
그림 10 인버터의 각부 전압 전류 파형



(a) V_{cell} , (b) I_{cell} , (c) I_{LB} , (d) V_{dc} , (e) I_{dc}
그림 11 컨버터의 각부 전압 전류 파형

3. 결론

본 논문에서 제시한 토폴로지는 절연변압기를 생략한 방식으로, 인버터를 2개의 half bridge로 구성함으로써 인버터에서 발생할 수 있는 dc 성분을 원천적으로 방지하였다. 제시한 토폴로지를 psim으로 구현하여 시뮬레이션을 통하여 타당성을 보였다.

참고 문헌

- [1] R.L. Steigerwald, A. Ferraro, F.G. Turnbull, "Application of Power Transistors to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-19, pp. 254-267, March/April 1983.
- [2] V. John, N. Mohan, "Standby Power Supply with High Frequency Isolation", APEC'95. Conference Proceedings, pp.990-994, 1995.
- [3] R. Katan, V. G. Ageledis, C. V. Nayar, "Pspice Modelling of Photovoltaic Arrays", International Journal Electrical Engineering Education, pp. 319-332, October 1995.