

3kW 멀티스트링 태양광 인버터 설계 및 시뮬레이션

이종인*, 유병규**, 유권종***, 김흥근****

*한국에너지기술연구원(lji24@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(bgyuyu@kier.re.kr),
한국에너지기술연구원(y-gj@kier.re.kr), *경북대학교(kimhg@knu.ac.kr)

3kW multi-string photovoltaic inverter design and simulation

Lee, Jong-In*, Yu, Beyng-Gyu**, Yu, Gwen-Jong***, Kim, Heung-Geun****

*Korea Institute of Energy Research(lji24@kier.re.kr),
**Korea Institute of Energy Research(bgyuyu@kier.re.kr),
***Korea Institute of Energy Research(y-gj@kier.re.kr),
****Kyung-Pook National University(kimhg@knu.ac.kr)

Abstract

The Power Conditioning System is Power Transfer System which make array DC current to the Grid sinusoidal current. These are Low Frequency Transformer Inverter Type, High Frequency Transformer Inverter Type and Transformer-less Type. Low Frequency Transformer Type has a Excellent Isolation property, but doesn't have competitiveness in Size and Cost. Also High Frequency Transformer Type has a good Isolation property but there are many steps in Power transfer Switching. Now a days, Transformer-less Type inverter change a transformer to DC/DC Converter which is small and cost effective. In this paper shown the DC/DC Converter Transformer-less Type multi-string inverter design and simulation. The Control Algorithm will be introduced and Simulation was accomplished.

Keywords : 태양광(Photovoltaic), 멀티스트링 인버터(Multi-string Inverter), 인버터 설계(Inverter design)

기 호 설 명

I_{ph}	: 광 발생전류 (A)	q	: 전하량 (1.6022×10^{-19})
R_s	: 내부출력저항 (Ω)	I_{sc}	: 단락전류 (A)
R_{sh}	: 내부저항 (Ω)	V_{oc}	: 개방전압 (V)
k	: 볼츠만사수 (1.38×10^{-23})	D	: Duty Ratio
T	: 절대온도 ($273 + ^\circ C$)		

1. 서론

최근 유가가 급변하고 신재생에너지에 대한 국제적인 관심이 높아지면서 안정적이고 깨끗한 미래 에너지원의 확보가 경제적인 측면은 물론이고 국가안보 차원에서도 주요한 과제로 부각되고 있다. 이에 정부는 2008년 8월 27일 제1차 에너지 기본계획에서 2030년까지 국가 에너지 효율을 획기적으로 개선해서 에너지 저소비 사회를 만드는 방안을 추진하기로 했다. 또, 화산 연료의 비중을 줄이고 저탄소 청정에너지 비중을 확대하는 한편 그린 에너지산업을 적극 육성해 환경이 성장을 선도하는 '녹색강국'을 구현해 나갈 것을 발표했다. 최근 선진국의 동향을 살펴보면 정부가 중장기 기술개발전략을 선도해 나가는 것을 알 수 있다. 미국의 경우는 기후변화 기술 프로그램(CCTP, '06)으로 18개 전략기술에 세급 인센티브를 부여하고 있으며, 유럽연합의 경우 전략적 에너지 기술계획(SET Plan, '07)으로 14개 전략기술에 재정지원을 하고 있으며, 일본의 경우는 혁신적 에너지 기술 프로그램(Cool Earth, '08)으로 21개 혁신기술에 보조금을 지원하고 있다. 이와 같이 이슈가 되고 있는 그린에너지 산업 중에서 세계적인 관심 속에 급속한 속도로 성장을 하고 있는 태양광발전 산업은 2000년 이후 부터는 매년 35%이상의 놀라운 성장률을 보이고 있으며, 지금 처해있는 지구환경 및 에너지 문제를 고려해 볼 때, 향후에도 이러한 증가추세는 지속될 것으로 예측하고 있다. 태양광발전의 여러 분야 중에서 PCS 분야는 모듈에서 들어오는 직류를 가정에서 사용할 수 있는 교류로 변환 시키거나, 전압을 가변시키는 기술로써, 현재도 보다 손실을 줄여서 보다 높은 효율을 얻기 위한 연구개발이 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 3kW 멀티스트링 인버터를 직접 설계하고 시뮬레이션 한 결과를 분석해서 기초 자료로 제시하고자 한다.

2. 이론정리

2.1 태양광 모듈

(1) 태양전지

태양전지는 얇은 웨이퍼 혹은 반도체 층의 p-n접합으로 구성된다. 빛이 없을 때에 태양전지의 출력특성은 다이오드의 지수함수적인 특성과 유사하다. 태양전지가 빛에 노출될 때에 반도체의 band gap 에너지보다 더 높은 에너지를 가진 광자가 흡수되고 전자-정공 쌍을 생성한다. 이런 운반자들을 내부 전계의 영향아래 뿔뿔이 흩어지고 입사하는 빛 에너지에 비례하여 전류를 생성한다. 태양전지가 단락되었을 때에 생성된 전류는 외부회로로 흐르며 개방상태에서는 전성의 p-n접합에 의해 내부적으로 분포한다.

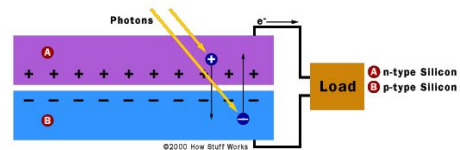


그림 4 태양전지 동작원리

(2) 태양전지 모델링

태양전지의 단순화한 등가 회로는 다이오드와 전류원의 병렬구성과 병렬저항 및 직렬저항으로 구성된다.

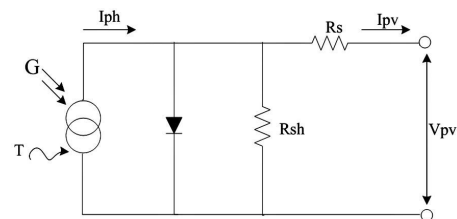


그림 5 태양전지 등가회로

출력전류는 태양전지에 입사하는 빛의 양과 직접적으로 비례한다. 태양전지의 I-V 곡선과 P-V 곡선은 비선형곡선이고 모델링을

위하여 다음과 같은 수식을 사용하였다.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0(e^{(V_{pv} + I_{pv}R_s)/nkT} - 1)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}}(I_{ph}(T_{ref}) + K_0(T_w - T_{ref}))$$

$$I_{ph}(T_{ref}) = G \times I_{SC}(T_{ref}) / G_{ref}$$

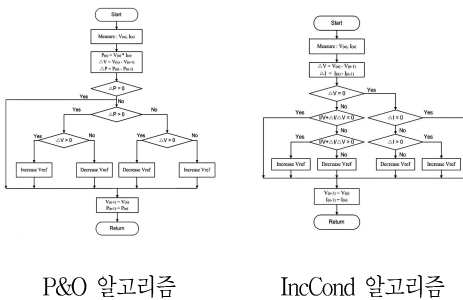
$$K_0 = (I_{SC}(T_w) - I_{SC}(T_{ref})) / (T_w - T_{ref})$$

$$I_0 = I_0(T_{ref}) \times (T / T_{ref})^{3/n} \times e^{-qV_0/nk \times (1/T_w - 1/T_{ref})}$$

$$I_0(T_{ref}) = I_{SC}(T_{ref}) / (e^{qV_{oc}(T_{ref})/nkT_{ref}} - 1)$$

2.2 최대전력추종(MPPT) 기법

태양전지는 비선형의 I-V커브 특성을 가지므로 P-V커브 역시 비선형적인 특성을 가진다. 따라서 동작 점에 따라서 다양한 전력 점을 가지게 된다. 이런 태양전지를 효율적으로 이용하기 위하여 즉, 최대 전력을 끌어내기 위하여 태양광 인버터에서 최대 전력 추종제어(MPPT : Maximum Power Point Tracking) 기능이 사용된다. 최대전력추종제어 기능은 태양광 어레이의 전압 또는 전류의 동작점을 임의로 가변시켜서 태양광 어레이가 가질 수 있는 최대전력점(MPP : Maximum Power Point)에서 동작하도록 하는 기능이다. 최대전력추종제어의 방법에는 여러 가지가 있지만 현재 널리 이용되는 제어 방법으로는 Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (IncCond) 방법 등이 있다.



Perturb and Observe (P&O) 알고리즘은 간단한 구조와 적은 측정 파라미터가 필요하다. 하지만 매 주기마다 동요가 있어서 최대 전력점에서도 전력의 손실을 야기 한다. 또

한 일사량 급변시에 최대전력점을 벗어난다. Incremental Conductance (IncCond) 알고리즘은 출력전압이 최대전력점의 전압에 맞추어 항상 조절된다. P&O 제어보다는 전력손실이 적고 최대전력을 항상 추종하지만, 두 번의 나뉠셈으로 인하여 좀 더 빠른 연산속도를 가진 마이크로프로세서를 필요로 하고 센서로부터 변환되는 시간이 길어 전력손실을 피할 수 없는 단점이 있다.

3. 전력단 회로 설계

이상의 자료를 바탕으로 3kw 멀티스트링 태양광 인버터의 설계는 다음과 같다.

3.1 컨버터 부분 설계

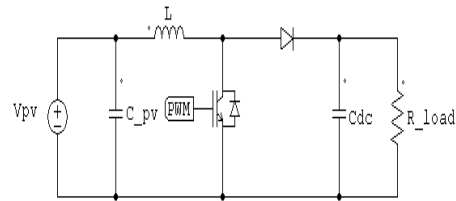


그림 6 Boost Converter

(1) 입력 커패시터 (C_{pv})

태양전지의 직류전압을 항상 리플 없이 유지하기 위해서 태양전지 뒷단에 커패시터를 삽입한다. 이 입력 커패시터는 태양광 인버터 입력단 전압을 안정하도록 즉, 필터로써의 역할을 한다. 수식1)은 다음과 같다.

$$C_{pv} = \frac{I_{opt} \times 10}{U_{opt} \times \omega_{mains}} = \frac{5 \times 10}{300 \times 2\pi \times 60} = 442.097 [\mu F]$$

시뮬레이션에서는 충분한 마진을 준 750[μF]을 사용했다.

1)Module Integrated Converter for Interfacing Photovoltaic Modules with the Distribution Grid P41 참조

(2) 인덕터 (L)

컨버터측 인덕터를 구하는 수식²⁾은 다음과 같다.

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} = 1 - \frac{150}{380} = 0.6$$

$$P = \frac{V^2}{R}, R = \frac{V^2}{P} = \frac{380^2}{3000} = 48.13\Omega$$

$$L \geq \frac{D \cdot (1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} = \frac{0.6 \cdot (1-0.6)^2 \cdot 48.13}{2 \cdot 10000} = 0.227[mH]$$

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{150}{(1-0.6)^2 \times 96.27} = 9.74[A]$$

$$\frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_s D T}{2L} = \frac{150 \times 0.6}{2 \times 1.5 \times 10^{-3} \times 10000} = 3[A]$$

$$I_{Max} = 9.74 + 3 = 12.74[A]$$

$$I_{Min} = 9.74 - 3 = 6.74[A]$$

시뮬레이션에서는 충분한 마진을 준 1[mH]를 사용했다.

(3) 커패시터 (C_dc)

컨버터측 커패시터를 구하는 수식³⁾은 다음과 같다.

$$C_{dc} \geq \frac{DT_s}{R} \times \frac{V_o}{\Delta V_o}$$

$$= \frac{0.6 \times 380}{48.13 \times 10000 \times 380 \times 10^{-3}} = 1257.47[\mu F]$$

시뮬레이션에서는 충분한 마진을 준 2350[μF]을 사용했다.

3.2 인버터 부분 설계

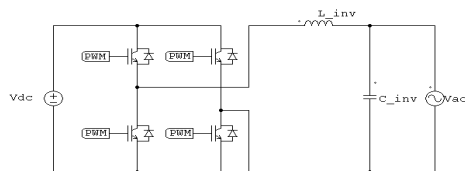


그림 7 H-bridge Inverter

2) Introduction to power electronics P.198 참조
3) Introduction to power electronics P.200 참조

(1) 인덕터 (L_inv)

인버터측 인덕터를 구하는 수식⁴⁾은 다음과 같다.

$$L_{inv} \leq \frac{\sqrt{V_{dc}^2 - 4E_m^2}}{I_m \times \omega}$$

$$= \frac{\sqrt{380^2 - 4 \times (\sqrt{2} \times 220)^2}}{13.64 \times \sqrt{2} \times 2\pi \times 60} = 67.76[mH]$$

$$L_{inv} \geq \frac{V_{dc}}{8 \times i_{ripple Max} \times f_{sw}}$$

$$= \frac{380}{8 \times \sqrt{2} \times 13.64 \times 0.15 \times 10000} = 1.64[mH]$$

시뮬레이션에서는 충분한 마진을 준 3[mH]를 사용했다.

(2) 커패시터 (C_inv)

인버터측 커패시터를 구하는 수식⁵⁾은 다음과 같다.

$$C_{inv} = 15\% \times \frac{P_{rates}}{3 \times 2\pi \times f_r \times V_{rated}^2}$$

$$= \frac{3000 \times 0.15}{3 \times 2\pi \times 60 \times (\sqrt{2} \times 220)^2} = 4.11[\mu F]$$

시뮬레이션에서는 충분한 마진을 준 20[μF]을 사용했다.

4. 시뮬레이션

표 1. 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값

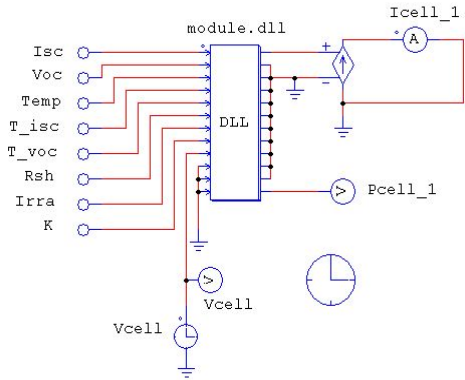
태양광 모듈	인버터
Temp = 25 [°C]	C _{pv} = 750 [μF]
I _{sc} = 5.8 [A]	L = 1[mH]
k = 0.38	C _{dc} = 2350 [μF]
Irrad = 1.0 ⇒ 0.5 [kW/ m]	L _{inv} = 3[mH]
V _{oc} = 380 [V]	C _{inv} = 20 [μF]
R _{sh} = 500[Ω]	f _{sw} = 10 [kHz]
P _{max} = 1500 [W]	P _{max} = 3000[W]

4.1 태양광 모듈 시뮬레이션

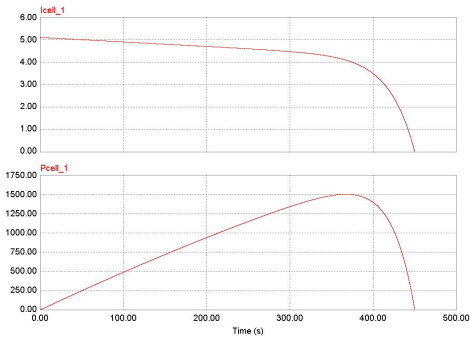
1.5kW 모듈을 PSIM으로 다음과 같이 구현했다.

4) A Novel Design Method of LCL Type Utility Interface for Three-Phase Voltage Source Rectifier, IEEE 2005

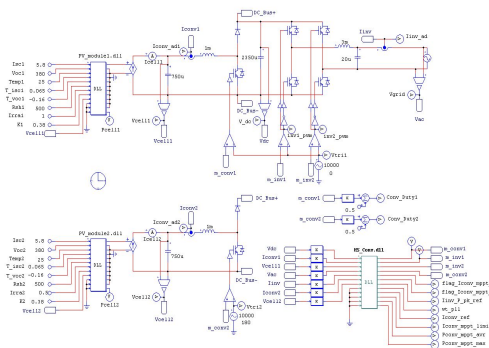
5) Output Filter Design for a Grid interconnected Three-Phase Inverter, IEEE 2003



시뮬레이션 결과 파형은 다음과 같다.

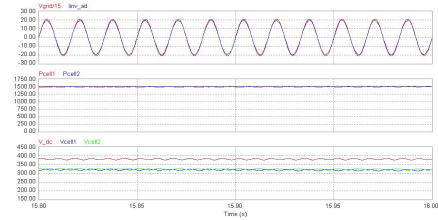


4.2 멀티스트링 인버터 시뮬레이션
3kw 멀티스트링 인버터를 PSIM으로 구현한 회로도이다. 1.5kW 모듈 두 개를 각각의 입력으로 사용했다.



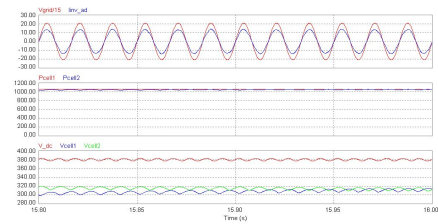
4.3 결과 파형

일사량을 1 [kW/m²]로 줬을 때의 시뮬레이션 결과 파형은 다음과 같다.



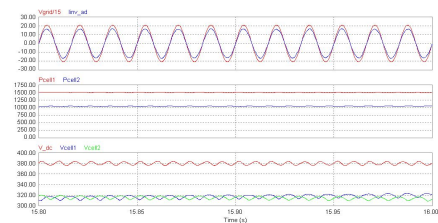
Pcell1, Pcell2 둘다 1.5kW의 파워를 출력했고, DC Link 전압은 380V에 수렴하였다.

일사량을 0.75 [kW/m²]로 줬을 때의 시뮬레이션 결과 파형은 다음과 같다.



Pcell1, Pcell2 둘다 약 1kW의 파워를 출력하였으며, DC Link 전압은 380V에 수렴하였다.

PV1의 일사량은 1 [kW/m²], PV2의 일사량은 0.75 [kW/m²]로 줬을 때의 시뮬레이션 결과 파형은 다음과 같다.



Pcell1은 일사량이 1[kW/m²]이므로 1.5kW의 파워를

출력했고, P_{cell2} 는 일사량이 $0.75[kW/m^2]$ 이므로 약 $1kW$ 의 파워를 출력하였다. 또한 DC Link 전압은 $380V$ 에 수렴하였다.

5. 결 론

$3kW$ 멀티스트링 태양광 인버터를 설계했고, 설계한 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 통해 검증했다. 하지만 좀 더 확실한 검증을 위해서는 손실부분이 포함되어야 할 것 같다. 그리고 추후에는 $3kW$ Central 인버터를 설계 한 후 시뮬레이션 파형을 비교 하도록 하겠다. 또한 실험을 통해 시뮬레이션 결과도 검증을 하도록 하겠다.

참 고 문 헌

1. 유권중, 예기연 보고서, 태양광발전시스템세어의 최대전력추종제어기법, 2005.02.
2. Frede Bladbjerg, Aalborg University, Module Integrated Converter for Interfacing Photovoltaic Modules with the Distribution Grid, 2000.06.
3. Daniel W.HART, INTRODUCTION TO POWER ELETRONICS,
4. Yongqiang Lang, A Novel Design Method of LCL Type Utility Interface for Three-Phase Voltage Source Rectifier, IEEE 2005.
5. Timothy CY Wang, Output Filter Design for a Grid-interconnected Three-phase Inverter, IEEE 2003.