

태양광 발전시스템의 현장 운전특성 및 문제점

°고강훈, 서기영, 이현우, 홍두성*, 강영철**, 우정민***
 경남대학교, *창원시청, **LG산전, ***동아대학교

A filed operation characteristics and the controversial point of
 Photovoltaic power generation system

(Kang-Hoon Koh, Hyun-Woo Lee, Ki-Young Suh, Doo-Sung Hong*, Jung - In U**)
 (Kyungnam Univ. *Changwon city hall, **Dong-A Univ.)

Abstract - The photovoltaic power generation system has a great future as clean energy instead of fossil fuel which has many environmental problems such as exhausted gas or air pollution. In a utility interactive photovoltaic generation system, a three-phase inverter is used for the connection between the photovoltaic array and the utility. This paper presents a three phase inverter for photovoltaic power system with current controller, voltage controller, PLL control system and the phase detector of interactive voltage by using dq transformation. The proposed inverter system provides a sinusoidal ac current for domestic loads and the utility line with unity power factor. The results of the operated from January to October show the system characteristics.

Key words : photovoltaic system, utility interactive system, three-phase PWM inverter, unity power factor.

계통연계형 인버터는 태양전지 어레이 쪽에서 보면 인버터로 동작하나 계통 측에서 바라보면 컨버터로서 해석이 가능하다. 연계형 시스템은 계통과 위상, 역율을 동기화 시켜 제어해야한다. 그러므로, 계통측면에서 해석을 하고, 인버터를 제어하게 된다면 동일한 위상과 역율을 가진 연계형 인버터를 설계할 수 있게 된다. 이러한 PWM 컨버터 모델을 그림 1에 나타내었으며 수식적인 모델링은 다음과 같다.

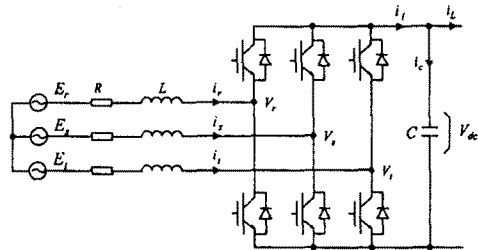


그림 1 3상 PWM 컨버터 모델
 Fig. 1 Model of 3-phase PWM converter

$$E_r = L \frac{di_r}{dt} + i_r R + V_r \quad (1)$$

$$E_s = L \frac{di_s}{dt} + i_s R + V_s \quad (2)$$

$$E_t = L \frac{di_t}{dt} + i_t R + V_t \quad (3)$$

3상으로 표현된 식(1), (2), (3)을 전원 각주파수 ω 로 회전하는 2상 좌표계로 표현하면 각 상태 변수들이 DC량으로 표현되기 때문에 다루기 편리하다. 회전좌표계 시스템 모델링을 유도하기 위한 정지좌표계 식은 다음과 같다.

$$E_{da}^s = L \frac{di_{da}^s}{dt} + R i_{da}^s + V_{da}^s \quad (4)$$

정지좌표계의 dq변수를 회전좌표계의 dq변수로 변환시키는 행렬 T는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{f_d^e}{f_s^e} \\ \frac{f_q^e}{f_s^e} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \frac{f_d^s}{f_s^s} \\ \frac{f_q^s}{f_s^s} \end{bmatrix}, T = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

T의 특성은

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\omega \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} T \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T \frac{df_{da}^e}{dt} &= \frac{d}{dt} (T \cdot f_{da}^s) - \frac{dT}{dt} f_{da}^s \\ &= \frac{df_{da}^e}{dt} + \omega \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} f_{da}^e \end{aligned} \quad (7)$$

식(4) 양변에 T를 곱하여 회전좌표계식을 유도하면

1. 서론

현재 전세제는 유가폭등으로 인하여 고유가시대를 맞이하고 있다. 서구 선진국이나 이웃일본은 오랜 기간동안 대체 에너지 개발에 많은 연구와 시설 설비에 대한 투자를 지원하고 있다. 대체에너지는 화석에너지 의존도와 환경오염, 공해문제의 영향을 줄이기 위한 Clean Energy원인 태양광, 풍력을 이용하며, 시스템의 형태는 태양광과 풍력을 함께 사용하는 복합형을 선호하고 있으며, 80년대 독립형에서 90년대 연계형으로 보급되고 있다. 국내발전현황은 80년대 후반부터 독립형으로 도서지역이나, 산간벽지, 가로등 전원으로 시범 설치 시공 운영되고 있으며, 최근에 연계형시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다.

태양광발전 시스템은 상용전력 계통과의 접속방법에 따라 두 가지 시스템으로 분류하며, 양자가 전기적으로 항상 접속되어 있는 시스템을 병렬연계 시스템이라 하고, 전기적으로 항상 분리되어 있다가 광발전전력이 부족할 경우에만 접속되는 시스템을 계통절환 시스템이라 한다. 전자는 태양광발전 잉여 전력을 계통에 역송전 가능한 시스템이고, 후자는 역송전이 불가능하며 단순히 부하에만 전력을 공급할 수 있는 시스템이다.[1][2]

본 논문에서는 계통과 원활히 동작할 수 있는 계통 연계형 태양광 발전 시스템에 대한 특성을 해석하고, 실제 시스템에 적용하여 운용되고 있는 시스템의 운전특성 및 효율성을 비교분석, 시스템 운용상의 문제점을 검토하고자 한다.

2. 제어 알고리즘

2.1 3상시스템 모델링

$$TE \dot{i}_{dq}^s = LT \frac{di_{dq}^s}{dt} + RT i_{dq}^s + TV \dot{i}_{dq}^s \quad (8)$$

$$E \dot{i}_{dq}^s = L \frac{di_{dq}^s}{dt} + \omega L \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} i_{dq}^s + R i_{dq}^s + V \dot{i}_{dq}^s \quad (9)$$

3상의 정지좌표계로 표현된 수식을 2상의 정지좌표계로 변환하고, 다시 ω 로 회전하는 2상 회전좌표계로 표현하면 다음과 같다. 이때 ωL 이 포함된 항은 좌표축이 회전하므로써 생기는 속도전압으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} E_q \\ E_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ls+R & \omega L \\ -\omega L & Ls+R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

DC link 콘덴서의 전압 변동에 관한 수식과 컨버터 입력 전력과 출력 전력과의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_i - i_L \quad (11)$$

$$V_{dc} i_i = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (12)$$

역률 1이 되도록 하기 위해서는 회전좌표계의 회전각 $\theta (= \omega t)$ 을 $E_d = 0$ 이 되도록 설정하고 $i_d = 0$ 으로 제어함으로써 가능하다. 즉, $E_d = 0, E_q = E_m$ (E_m 은 상전압의 Peak값)이 되도록 좌표축을 설정하고 $i_d = 0$ 이 되도록 함으로써 전력은 q 축에만 편중되어 존재하게 된다. 또한, 컨버터 입력전류 i_q 를 제어함으로써 DC link 전압을 제어하는 것이 가능하다.

2.2 제어기 구성

PWM 컨버터 및 제어기의 구성은 그림 2와 같다. 리액터, DC link 콘덴서, 그리고 전력용 소자인 IGBT로 구성되어 있는 전력 회로부, 전원 전압과의 위상을 동기시키기 위한 전원위상 검출기, DC link 전압 일정 제어를 위한 전압 제어기, 전류 제어기, 2상-3상 및 정지-회전 좌표 변환기, 그리고 전력 소자를 PWM형태로 구동하는 게이트 구동회로로 구성되어 있다.

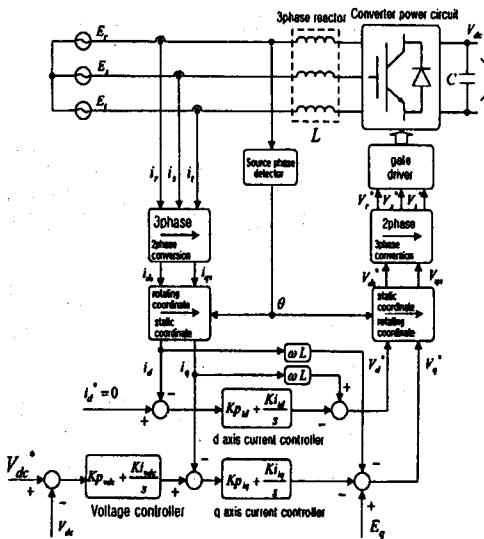


그림 2 PWM 컨버터의 구성
Fig. 2 PWM converter configuration

3. 현장 실증 운전 결과

태양전지의 연결은 직렬 20개×3개 병렬을 1조로 총 4개조(총 240매)로 이루어져 있으며, 인버터는 IGBT를

이용한 PWM INVERTER이다. 효율은 90%이상이며 역률은 0.95이상이다. 연계보호장치로서는 인버터 과전압/과전류, 출력단락시 시스템 보호, 시스템 과열보호, 정전 보호, 결상보호, 역상보호기능을 갖추고 있다. 외부 인터페이스로는 원격 알람 점접출력, 리모트 용급 파워 오프 기능등과 같은 MMI기능을 갖춘 시스템이다. 그림 2는 시스템의 배선도를 나타낸 것이다.

표 1 12kW 태양광발전시스템 설계규격
Table 1 Design specification of a 12kW PV system

항 목	규 격	
	태양 전지	종 류
	태양전지용량	53W
모듈	태양전지 정격전압	DC 313V
태양전지 어레이	결선방법	직렬 20×3병렬×4개 어레이
	경사각	34°
	용량	12 kW(53W모듈 240개)
인버터	연계 운전 방식	전압형 전류제어방식(PWM)
	정격출력	12.72kW
	직류입력전압	DC252~370V
	전류제어방식	MPPT제어
	정격출력	AC220V 60Hz
	전력변환효율	90%이상(정격출력시)
	보호기능	과전압/과전류, 정전, 결상, 역상, 출력단락시 시스템 보호, 동기이상, 온도이상 등
연계계통 보호기능	보호 계전기	UVR, OVR, UFR, OFR

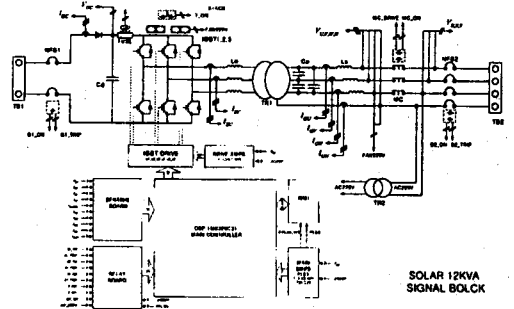
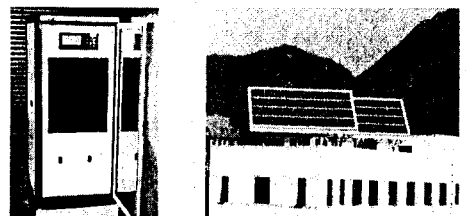


그림 2 시스템의 배선도
Fig. 2 The wiring diagram of system

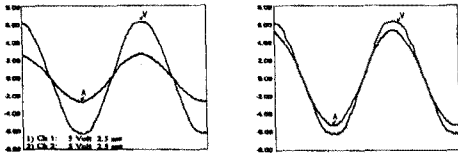


(a) 계통연계형 인버터 (b) 태양전지어레이
그림 3 계통연계형 인버터 및 태양전지어레이 사진
(a) PV Inverter (b) solar cell array
Fig. 3 The picture of PV Inverter and solar cell array

4. 실증실험 운전특성 분석

시스템 스위칭 주파수 10kHz, 3상 리액터 및 커패시터

는 1mH, 25uF, DC 커패시터는 2200uF을 사용하였다. 그림 4(a)는 50% 부하시 (b)는 100% 부하시 출력상 전압·전류파형을 각각 보여 주고 있다. 그림에서 보듯이 전압 전류의 위상은 동위상으로 제어되며, 역률이 1임을 알 수 있다.



(a) 50%부하 (b) 100%부하
 그림 4 인버터 출력전압, 전류.
 (a) 50% load (b) 100% load
 Fig. 4 Output voltage and current of inverter.

그림 5는 모니터링 시스템을 통해 기록된 태양전지 전력과 인버터 전력의 파형을 나타낸 것이다. 인버터의 동작이 태양전지 입력에 따라 원활하게 동작하고 있음을 알 수 있다. 표 2와 3은 월별 운전실적과 이용율을 나타낸 것이다. 2월달은 시스템 고장으로 인하여 나타내지 못하였다. 그림 6은 월별 일평균 발전량을 그래프로 나타낸 것이다. 시스템의 발전량이 일정하지 못한 것은 기후와 일사량과도 관계가 있지만 시스템의 빈번한 고장도 한 원인이다.

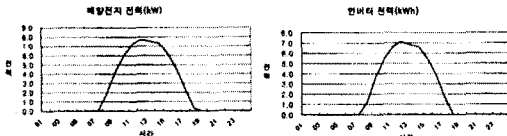


그림 5 실제 운전 파형 (2000.10.4)
 Fig. 5 The waveform of real operating

표 2 월별 운전실적(어레이 경사각 34°)
 Table 2 Operation results at a part of month
 (Array declination angle 34°)

월	1	3	4	5	6	7	8	9	
발전량 (kwh)	합 계	507.4	367.5	786.5	245.2	516.6	787.3	638	454.3
	일평균	16.4	11.9	26.2	7.9	17.5	25.4	20.6	15.1
수평면일사량 (H/mm)		86.5	58.4	12.3	28.4	74.8	134.8	104.4	78.9
	계측일수	24	13	21	11	23	29	28	17

표 3 월별 시스템 이용율
 Table 3 System utilization ration at a part of month

월	1	3	4	5	6	7	8	9	
사용량 (kwh)	한전 사용량	10394	770	493	215	247	358	457	357
	태양광 발전량	574	375	765	262	566	783	68	4643
	계	10968.4	8125	5795	2372	2976	4353	520	4081.3
이용률	49	47	159	11.6	219	224	14	127	

4.1 실증 운전 에 따른 태양광 발전 시스템의 문제점

1) 집광판 배열을 2단배열 설치하였기 때문에 동절기에는 뒷면의 집광판 하단부에 그림자가 생기기 때문에 발전효율이 떨어진다.(집광판 간격 3.5m, 집광판 높이3m) 태양광 발전 시스템의 발전효율은 태양전지 어레이에 조사되는 일사량과 밀접한 관련이 있으므로 설계시 가장

우선적으로 고려되어야 함에도 불구하고 최적화하지 못하였다. 미국이나 일본과 같은 경우는 일사량 데이터를 항상 기록하고 배포함으로써 효율 높은 태양광 발전 시스템을 구축 할 수 있도록 하고 있음에 반해 우리나라에 현실에 맞는 일사량 데이터가 없다.

2) 태양광 발전 시스템과 관련된 전문적인 관리자가 없으므로 고장시 장시간 발전이 안되므로 발전 효율이 저하되는 문제점을 갖고 있다.

3) 태양전지 어레이, 인버터, 제어회로와의 인터페이스관계에 있어서 불안정한 요소로 인한 고장으로 발전 효율이 떨어지는 점이 있다. 이상적인 환경만을 고려한 시스템이므로 실제 발생되는 문제점을 도출하여 개선하고자 한다.

4) 시스템이 설치된 지역(창원)은 지형적으로 분지이므로 먼지 등이 많이 쌓이므로 발전효율이 저하된다. 따라서 일사량이 좋을 경우 태양전지 어레이를 청소할 수 있는 시스템을 보조적으로 부착해야 할 것이다. (비온뒤에 발전량이 최대)

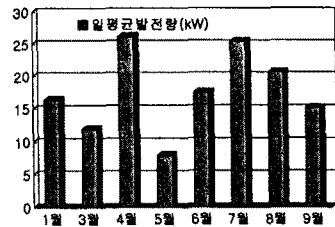


그림 6 월별 일평균 발전량 그래프
 Fig 6 Graph of day average generating capacity at a part of month

5. 결 론

태양광발전 시스템에 이용되는 전력변화장치는 전력변동에 대하여 정전압의 높은 신뢰성을 보장할 수 있어야 하며, 계통과 연계시 상호 협조관계를 유지하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 3상 전력에 대한 해석방법으로 dq좌표변환을 이용하고, 가변 입력전력에 대하여 DC link 전압을 일정하게 유지하는 컨버터 시스템에 대한 해석을 행하여 인버터 시스템에 안정된 전력을 공급한다. 인버터 제어신호는 계통 주파수를 사용하여 인버터 출력을 계통과 동위상의 전력으로 부하에 공급하는 것을 확인 하였다. 반면 실증 운전시에 발생되는 문제점을 소개하므로써 타 시스템 설계시 개선방안에 대하여 모색하는 자료로서 활용 될 것이라 여겨진다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. J. Chiang, K. T. Chang, C. Y. Yen, "Residential Photovoltaic Energy System", IEEE Trans. Indus. Electronics, vol.45, No.3, pp.385~394, 1998
- [2] 황인호 외 3명, "3kW 계통연계형 태양광 발전시스템의 설계 및 실증운전특성 분석", 태양에너지 Vol. 18, No. 1, 1998
- [3] C. Hua, J. Lin, C. Shen, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking", IEEE Trans. Indus. Electronics, vol.45, No.1, pp.99~107, 1998
- [4] B. K. Bose, P. M. Szczesny, R. L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-21, No.5, pp.1182~1191, 1985
- [5] 黒川浩助, 若松清司, 共編, "太陽光發電システム設計ガイドブック", 太陽光發電技術研究組合 監修, pp.29~40, 1994