

계통연계형 태양광 발전시스템의 운전특성 해석과 문제점 분석

홍두성*, 고강훈, 고희석, 이현우
 창원시청*, 경남대학교

The Construction and Operating Characteristics analysis of Utility interactive PV power generation s

D.S. Hong*, K.H. Koh, H.S. Koh, H.W. Lee
 Changwon city hall*, Kyungnam 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.

$$E_t = L \frac{di_t}{dt} + i_t R + V_t \tag{3}$$

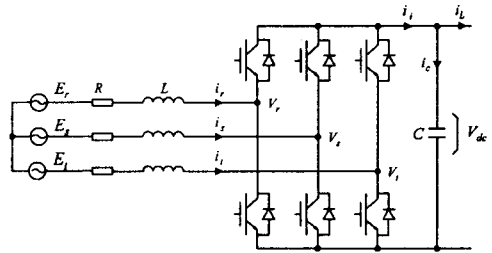


그림 1 3상 PWM 컨버터 모델
 Fig. 1 Model of 3-phase PWM converter

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

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

정지좌표계의 dq 변수를 회전좌표계의 dq 변수로 변환시키는 행렬 T는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} f_d^e \\ f_q^e \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix}, T = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \tag{5}$$

T의 특성은

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

$$T \frac{df_{da}^s}{dt} = \frac{d}{dt} (T \cdot f_{da}^s) - \frac{dT}{dt} f_{da}^s \tag{7}$$

식(4) 양변에 T를 곱하여 회전좌표계식을 유도하면

$$T E_{da}^s = L T \frac{di_{da}^s}{dt} + R T i_{da}^s + T V_{da}^s \tag{8}$$

$$E_{da}^e = L \frac{di_{da}^e}{dt} + \omega L \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} i_{da}^e + R i_{da}^e + V_{da}^e \tag{9}$$

이 된다.

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

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_i - i_L \tag{10}$$

$$V_{dc} i_i = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \tag{11}$$

PWM 컨버터의 사용 목적은 DC link 전압제어와 역률을 1로서 제어하기 위한 것이다. 역률 1이 되도록 하기 위해서는 회전좌표계의 회전각 $\theta (= \omega t)$ 을 $E_d = 0$ 이 되도록 설정하고 $i_d = 0$ 으로 제어함으로 가능하다.

1. 서 론

현재 전세계는 화석에너지의 고갈 및 잇따른 중동사태로 인하여 고유가시대를 맞이하고 있다. 서구 선진국이나 이웃한 일본은 오랜 기간동안 대체 에너지 개발에 연구지원과 시설 설비 구축에 많은 지원을 하고 있다.

분산형전원의 하나인 태양광발전시스템은, 전력계통과 연계 운전하는 시스템을 구성함으로써 보다 안정적인 전원공급이 가능하며 또한 잉여전력을 계통에 공급 할 수 있으므로 다양한 에너지원의 효율적 활용도 가능하다.

본 논문에서는 계통과 원활히 동작할 수 있는 계통 연계형 태양광발전시스템에 대한 특성을 해석하고, 실제 시스템에 적용, 운용되고 있는 시스템의 운전특성 및 효율성을 비교분석하고 실제 운용상에 발생되었던 문제점을 검토한다.

2. 제어알고리즘

2.1 3상 시스템 모델링

계통연계형 인버터는 태양전지 어레이 측면에서 보면 인버터로 동작하나 계통 측에서 바라보면 컨버터로서 해석이 가능하다. 연계형 시스템은 계통과 위상, 역률을 동기화 시켜 제어하여야 한다. 그러므로, 계통측면에서 해석을 하고, 인버터를 제어하게 된다면 동일한 위상과 역률을 가진 연계형 인버터를 설계할 수 있게 된다.

이러한 PWM 컨버터 모델을 그림 1에 나타내었으며 수식적인 모델링은 다음과 같다.

$$E_r = L \frac{di_r}{dt} + i_r R + V_r \tag{1}$$

$$E_s = L \frac{di_s}{dt} + i_s R + V_s \tag{2}$$

즉, $E_d = 0, E_q = E_m$ (E_m 는 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 동기 시키기 위한 전원위상 검출기, DC link 전압 일정 제어를 위한 전압 제어기, 전류 제어기, 2상-3상 및 정자-회전 좌표 변환기, 그리고 전력 소자를 PWM형태로 구동하는 게이트 구동회로로 구성되어 있다.

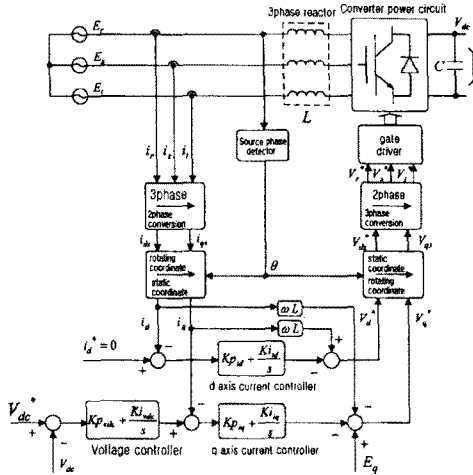


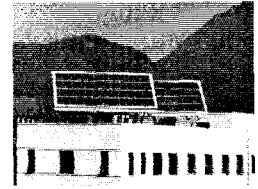
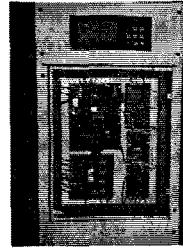
그림 2 PWM 컨버터의 구성
Fig. 2 PWM converter configuration

3. 현상실증 운전결과

태양전지의 연결은 직렬 20개×3개 병렬을 1조로 총 4개조(총 240개)로 이루어져 있으며, 인버터는 IGBT를 이용한 PWM 인버터이다. 효율은 90[%]이상이며 역률은 0.95이상이다. 연계보호장치로서는 인버터 과전압/과전류, 출력단락시 시스템 보호, 시스템 과열보호, 정전보호, 결상보호, 역상보호기능을 갖추고 있다. 외부 인터페이스로는 원격 알람 접점출력, 리모트 응급 파워 오프 기능 등과 같은 MMI기능을 갖춘 시스템이다. 표 1은 시스템의 설계규격, 그림 3은 계통연계형 인버터와 태양전지 어레이 사진을 나타낸 것이다.

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

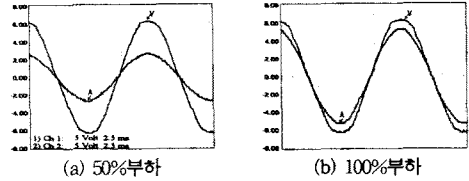
항목	규격	
태양 전지 모듈	종 류	단결정 실리콘 태양전지
	태양전지용량	53[W]
	태양전지 정격전압	DC 313[V]
태양전지 어레이	결선방법	직렬 20×3병렬×4개 어레이
	경사각	34°
	용량	12[kW](53[W]모듈 240개)
인버터	연계 운전 방식	전압형 전류제어방식(PWM)
	정격출력	12.72[kW]
	직류입력전압	DC252~370[V]
	전류제어방식	MPPT제어
	정격출력	AC220[V], 60[Hz]
	전력변환효율	90%이상(정격출력시)
연계계통 보호기능	보호 계전기	과전압/과전류, 정전, 결상, 역상, 출력단락시 시스템 보호, 동기이상, 온도이상 등
	보호 계전기	UVR, OVR, UFR, OFR



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

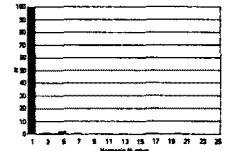
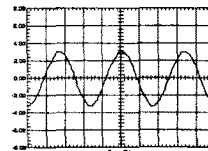
3.1 운전특성 분석

시스템 스위칭 주파수 10[kHz], 3상 리액터 및 커패시터는 1[mH], 25[μF], DC 커패시터는 2200[μF]을 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.

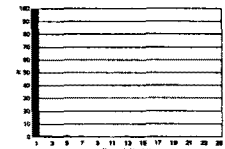
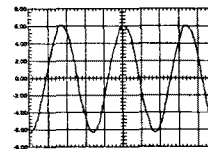


(a) 50%부하 (b) 100%부하
그림 4 인버터 출력전압, 전류
(a) 50% load (b) 100% load
Fig. 4 Output voltage and current of inverter

그림 5는 50[%] 부하시의 출력전류 및 THD를 그림 6은 100[%] 부하시의 출력전류 및 THD를 각각 나타내고 있다. 50[%] 부하시 THD는 2.52[%]로 나타났으며, 100[%] 부하시 THD는 2.03[%]를 나타내었다.



(a) 전류파형 (b) 고조파 스펙트럼
그림 5 50% 부하
(a) Current waveform (b) harmonic spectrum
Fig. 5 50% load



(a) 전류파형 (b) 고조파 스펙트럼
그림 6 100% 부하
(a) Current waveform (b) harmonic spectrum
Fig. 6 100% load

제작된 태양전지의 어레이 경사각은 34°이다. 표 2,3은 월별 운전실적과 이용률을 나타낸 것이다. 1월 달은 시스템 고장으로 인하여 계측일수가 짧았다. 일평균 발전량과 계측일수와의 오차로 인해 정확한 값을 내지 못하였다. 그러므로 측정데이터를 통하여 정확히 하계가 발전량이 많았다고 말할 수 없다. 원인은 잦은 오동작과 시스템의 고장으로 인함이다.

표 2 월별 운전실적 (2001. 1~ 7)

Table 2 Operation results at a part of month (2001. 1~ 7)

구분	월	1	2	3	4	5	6	7
발전량 (kwh)	합 계	62.1	489.1	813.5	699.6	685.3	529.4	582.4
	일평균	2	17.5	26.2	23.3	22.1	17.6	18.8
수평면일사량 (H/mm)		15.5	124.9	166.4	156	141.5	116.9	127.8
계측일수		5	23	29	26	29	30	31

표 3 월별 시스템 이용률 (2001. 1~ 7)

Table 3 System utilization ration at a part of month (2001. 1~ 7)

구분	월	1	2	3	4	5	6	7
사용량 (kwh)	한전 사용량	10,423	10,060	7,545	3,742	2,391	2,444	3,822
	태양광 발전량	62.1	489.1	813.5	699.6	685.3	529.4	582.4
	계	10,485.1	10,549.1	8,358.5	4,441.6	3,076.3	2,973.4	4,404.4
이용률		0.59	4.86	10.78	18.69	28.66	21.66	15.23

그림 7은 월별 일 평균 발전량을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 통하여 알 수 있듯이 발전량이 일정하지 못한 것은 기후와 일사량과 먼지 기타 환경의 문제도 있지만 모니터링 시스템의 빈번한 고장으로 기록되지 못한 데이터와 예상치 못한 외부유입 고조파로 인한 시스템의 고장도 한 원인이다.

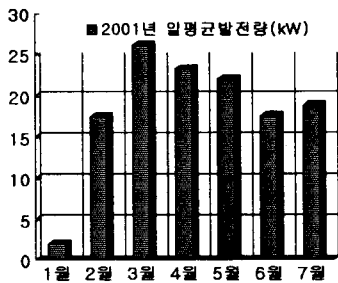


그림 7 월별 일평균 발전량 그래프

Fig 7 Graph of day average generating capacity at a part of month

3.2 실시스템 적용시 문제점과 대책

3.2.1 구조적인 문제점과 대책

- 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 구축할 수 있도록 하고 있음에 반해 우리나라에 현실에 맞는 일사량 데이터가 없다.
- 2) 태양전지 어레이, 인버터, 제어회로와의 인터페이스관계에 있어서 불안정한 요소로 인한 고장으로 발전 효율이 떨어지는 점이 있다. 이상적인 환경만을 고려한 시스템이므로 실제 발생하는 문제점을 도출하여 개선하고자 한다.
- 3) 태양광 발전 시스템과 관련된 전문적인 관리자가 없으므로 고장시 장시간 발전이 안되므로 발전 효율이 저하되는 문제점을 갖고 있다.

4) 시스템이 설치된 지역(장원)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)

3.2.2 관리적인 문제점과 대책

- 1) 초기산정한 모니터링 시스템의 자료저장 용량 및 백업 시스템의 용량 부족으로 인하여 시스템 고장이 유발된다. 이러한 점을 해결하기 위하여 전용 모니터링 시스템의 구축 및 초기산정 시 충분한 용량선정, 데이터 백업 시스템과의 연계가 요구된다.
- 2) 전용 운영시스템을 사용하지 않으므로 다양한 에러에 대한 대책이 없으므로 복구시간이 길어진다. 또한 모니터링 시스템의 독립적 환경의 구축이 안되어 있으므로 장기간 사용시 냉각문제로 인한 오동작 현상이 발생한다. 따라서 모니터링 시스템 전용 냉각장치의 구축 및 독립된 운영시스템을 개발함으로써 빠른 유지, 보수가 요망된다.

4. 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 제어신호로 계통 주파수를 사용하여 인버터 출력을 계통과 동위상의 전력으로 부하에 공급하는 것을 확인 하였다. 반면 실증 운전시에 발생하는 문제점을 소개하므로써 타 시스템 설계시 개선방안에 대하여 모색하는 자료로서 활용 될 것이라 여겨진다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-302-014-3)지원으로 수행되었음.

〔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] 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 pp.885~892, 1994
- [4] 長尾道彦, 他, "昇降壓PWM電力形インバータを用いた太陽光發電システム", 電學論D, 114卷 9号, pp.885~892, 1994