

# 계통연계 태양광발전시스템과 회전계자형 동기발전기의 병렬운전 특성

류연수\*, 유왕진\*\*, 이철규\*\*\*, 문종범\*\*\*\*

\*한국농촌공사 기술본부 차장, 공학박사(july6@ekr.or.kr),  
\*\*건국대학교 대학원 벤처전문기술학과 교수(wjyoo@konkuk.ac.kr),  
\*\*\*건국대학교 대학원 벤처전문기술학과 교수(cglee@konkuk.ac.kr),  
\*\*\*\*건국대학교 대학원 벤처전문기술학과 교수(jmoon@konkuk.ac.kr)

## Parallel Operation Characteristics of Utility Interactive Photovoltaic System and Revolving Field Type Synchronous Generator

Ryu, Yeon-Soo\*, Yoo, Wang-Jin\*\*, Lee, Cheol-Gyu\*\*\*, Moon, Jong-Beom\*\*\*\*

\*Technical Engineering Office, Korea Rural Community & Agriculture Corporation(july6@ekr.or.kr),  
\*\*Dept. of Venture Technology & Management, Graduate School, Konkuk University(wjyoo@konkuk.ac.kr),  
\*\*\*Dept. of Venture Technology & Management, Graduate School, Konkuk University(cglee@konkuk.ac.kr),  
\*\*\*\*Dept. of Venture Technology & Management, Graduate School, Konkuk University(jmoon@konkuk.ac.kr)

### Abstract

---

Through simulations and field experiment on A.C. parallel operation of both Utility Interactive Photovoltaic System and Diesel Engine Revolving Field Type Synchronous Generator, following factors have been found.

First, the inverter should be operated in three modes of frequency(mode.1:  $\pm 0.3\text{Hz}$ , mode.2:  $\pm 1\text{Hz}$ , mode.3:  $\pm 2\text{Hz}$ ) as default, considering properties of operating Synchronous Generator.

Second, as a result of supplying 13.5kW of residual power, it has been found that Synchronous Generator takes the power input only as reactive power, because it was electrically stable with frequency of 60.14Hz and high voltage of 222.3V even when power factor was -0.94. Besides, it was mechanically stable, too, because the quake, noise, and temperature of Synchronous Generator in this case were 7.5mm/s, 97dB, and 6°C respectively, which were lower than normal load connection of 145.6kW; 11.03mm/s. Thus, load share of Revolving Field Type Synchronous Generator reduces according to the supply of Photovoltaic System to the load power. In this experiment, 200kW of Synchronous Generator and 40kW of Photovoltaic System were operated in parallel. The load share was 20% in maximum, and 11.1lit/hr of fuel was saved.

Keywords : 계통연계형 태양광발전시스템(Utility Interactive Photovoltaic System), 회전계자형 동기발전기(Revolving Field Type Synchronous Generator), 교류 병렬운전(A.C. Parallel Operation)

---

## 기 호 설 명

V <sub>H</sub>	: 전압 고조파 (V)
I <sub>H</sub>	: 전류 고조파 (A)
THD	: 종합고조파왜형률 (%)
V <sub>GV</sub>	: 동기발전기 수직진동 (mm/s)
V <sub>GH</sub>	: 동기발전기 수평진동 (mm/s)
T <sub>GB</sub>	: 발전기 동체온도 (°C)
T <sub>GA</sub>	: 발전기 주위온도 (°C)

## 1. 서 론

세계 각국은 대체에너지의 확보와 환경보호 과제 해결을 위한 실효성 있는 방안의 하나로 태양광발전시스템에 대한 연구와 발전에 노력하고 있다. 셀은 기존의 단결정 규소와 비교하여 다결정 규소가 낮은 가격과 함께 2000년대 19.8%에서 2006년 현재 20.3% 높은 변환효율을 확보하면서 생산량이 앞서고 있다.<sup>1)2)</sup> 인버터는 수시로 변하는 태양광 기후에 따라 최대전력을 생산하여 고효율로 운전해야 하기 때문에 이를 위한 방법으로 MPPT<sup>3)</sup>제어기법이 적용되고, 여기에는 대표적으로 P&O<sup>4)</sup>, 정전압제어, IncCond<sup>5)</sup> 등이 있으며<sup>6)</sup> 국내에서도 3상 IGBT인버터를 DSP로 제어하는 P&O알고리즘을 적용한 효율 94%이상인 단일용량 계통연계형 120kW급 PCS제어기가 상용화되기 시작하였다.<sup>7)</sup>

태양광발전시스템은 구성방법에 따라 기존

배전계통과 병렬 연결하는 계통연계형, 태양광발전 전력을 축전지에 충전하여 사용하는 독립형, 디젤발전기, 풍력발전기, 연료전지 등 여러 발전시스템을 직류로 통합하여 전력 밸런스를 맞추는 DC(직류)병렬형과 양방향 인버터와 축전지를 사용하여 태양광의 잉여 전력 충전하여 과(過)발전에 따른 전력 불균형을 해소하는 AC(교류)병렬방식 등으로 분류할 수 있다.<sup>8)</sup> 특히 기존의 배전계통에 대체에너지 전원이 도입되는 경우 부하의 크기와 운전역률 등에 따라 전압변동이 발생, 도입한계량의 기법과 그 알고리즘이 다양하게 연구되고 있다.<sup>9)</sup>

한전 배전계통이 미치지 못하는 도서산간 지역에서는 주로 디젤엔진의 기계적 회전운동과 계자전류를 받아 부하계통의 상태를 감시, Feedback제어하여 전압과 주파수를 출력하는 회전계자형 동기발전기를 사용하는 데,<sup>10)</sup> 본 연구에서는 이 설비에 전력밸런스용 양방향 인버터나 축전지설비가 없는 AC 출력의 3상 계통연계형 태양광발전시스템을 병렬로 접속하여 운전, 전력부하의 변동에 따른 주파수, 역률, 전압, 고조파 등을 측정·분석하고 효율적으로 운전하기 위한 제어 방안을 제시함으로써 교류병렬운전시스템의 도입 및 이용확대를 도모하는데 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시스템의 구성

임시전력으로 새만금 관리소는 디젤엔진 구동의 회전계자형 동기발전기인 비상발전기에 의해 공급받고 있으며, 이 전력회로에 AC병렬로 접속된 3상 계통연계형 태양광발전시스템으로 구성되어 있다.(그림 1 참조)

1) 김경해, 이욱재, 이준신, 다결정 실리콘 태양전지의 고 효율화 기법에 관한 연구, 13회 신재생에너지 WORKSHOP 발표논문집, 2001.11, pp.201~217.

2) 이준신, 실리콘 태양전지 현황과 전망, 2008태양광산업발전 워크샵, 2008.2.

3) Maximum Power Point Tracking.

4) Perturbation and Observation.

5) Incremental Conductance.

6) 김일승, "계통연계 태양광발전시스템의 태양전지 전류 추정과 강인한 최대전력추 추적을 위한 슬라이딩모드 관측기와 제어기설계," 한국과학기술원, 박사학위논문, 2005, pp.99~101.

7) 나병훈외 6인, 단일용량 120kW급 계통연계형 태양광발전용 PCS개발, 전력전자기술대회 논문집, 2006.6, pp.188~190.

8) Nayar, C.V. Lawrance, W.B. Phillips, S.J., Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Remote Areas, Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-89. Vol. 4, 1989, pp.2029~2034.

9) 김재연, 김태웅, 정원재, 전력품질 향상을 위한 대체에너지전원의 운전역률과 도입한계량 산출기법 및 S/W개발, 2001.11, pp.221~236.

10) 임익현, 동기발전기 디지털 여자제어시스템 개발에 관한 연구, 홍익대, 박사학위논문, 2001, pp.17~18.

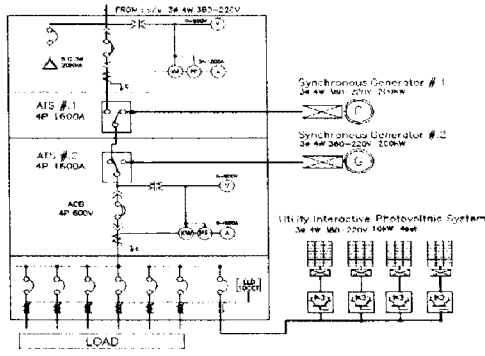


그림 1. Experimental System of Power Line Circuit

### (1) 태양광 발전시스템

태양광입자 에너지를 직류전기에너지로 전환하는 태양전지는 LS산전의 80W(GMG01800) 모듈 126장으로 구성된 10kW 어레이 4set이며, 최대 전력생산과 계통 상태를 감시 제어하는 태양광인버터는 헥스파워시스템(주)의 10kW (PV-C310S) 4대로, 총 발전량은 40kW이다.

### (2) 회전계자형 동기발전기

관리소의 비상발전기로 사용토록 계획되어 설치되었으나 한전전력 인입 지연으로 평소 전력사용으로 운전되며, MTM사의 200kW (MTM-230) 2대를 교대로 운전할 수 있도록 자동절체스위치(ATS)로 모선에 연결되어 있다.

## 2.2 실험 방법

### (1) 실험방법

실험에 앞서 인버터의 동작과 전력계통의 고조파 영향을 검토하기 위하여 PSIM Version 4.1을 이용, 그림 2와 같이 설계하여 시뮬레이션을 실시하였다.

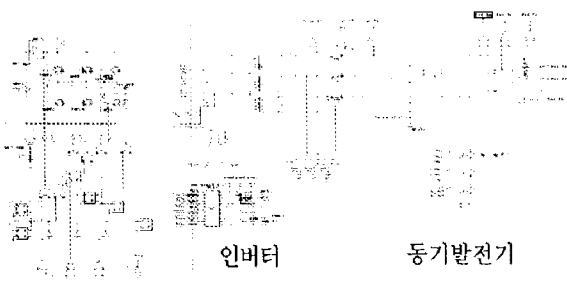


그림 2. Simulation Circuits of Utility Interactive Photovoltaic System and Revolving Field Type Synchronous Generator

현장에서의 AC병렬운전은 그림 3과 같이 부하설비의 부하량을 변화시켜, 두 발전시스템이 부하를 분담하는 경우(a)와 경부하 상태에서 태양광발전시스템의 잉여전력이 동기발전기로 흘러들어가는 경우(b)로 구분하여 실험을 하였다.

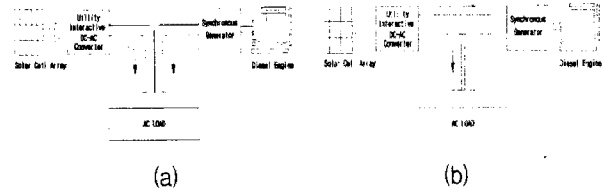


그림 3. Schematic Diagram of Power Supply

실험에서 전력계통의 데이터를 취득하기 위해 YOKOGAWA사의 전력분석기(CW240)와 파형분석기(DL9140L)를 설치하였고, 동기발전기의 물리적 특성분석을 위한 NADA S&V의 진동분석기(VibLow CXII+)와 소음계, 온도계를 설치하였다.

### (2) 측정항목

시뮬레이션에서는 전압과 전류의 이상 현상 발생의 여부와 동기발전기의 고조파 발생이 계통에 주는 영향에 대하여 파형을 모니터링 하였고, 교류병렬운전 실험에서는 부하의 가변과 잉여전력의 역 전송을 하면서 계통의 전압과, 전류, 주파수, 역률(Power Factor), 고조파 데이터를 측정 하였으며, 동기발전기 동체에 발생하는 진동, 소음, 온도 등 물리적 특성을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 시뮬레이션

태양광발전시스템이 단독 운전하는 경우, 그림 4의 (a)와 같이 인버터의 스위치가 온(on)되어 계통에 연결되는 순간, 출력전류(I<sub>OU</sub>)가 발생되고 태양전지 개방전압(V<sub>DC</sub>)이 다소 강하되어 안정전압을 유지, 정상적으로 작동되고, 이때 출력 전압과형은 그림 4의 (b)와 같이 정현파에 가까운 특성을 보여주고 있다. 병렬운전에서 동기발전기에 고조파

8%(제3고조파 3%와 제5고조파 2%)을 주입한 결과, 그림 4의 (c)와 같이 왜곡된 파형이 계통에 나타남에 따라 동기발전기의 전력 품질이 계통에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

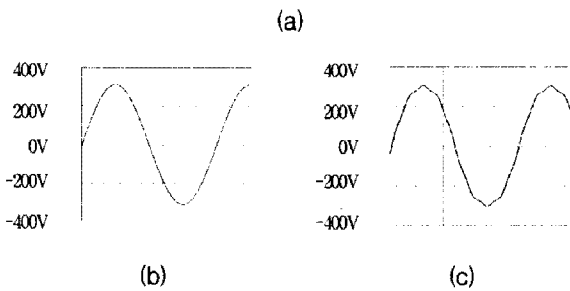
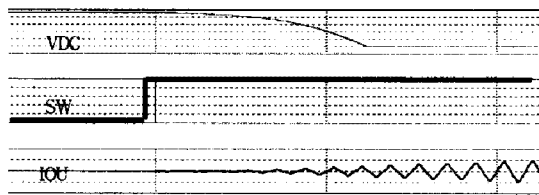


그림 4. Voltage & Current Waveform

### 3.2 실험

#### (1) 부하 병렬 운전

2대의 동기발전기를 태양광발전시스템과 각각 교류병렬운전을 실시하면서 부하전력을 변화시켜 그때의 주파수, 역률 등을 측정할 결과, 표 1과 같이 역률은 20kW 이상의 전력부하에서 0.9이상을 유지하였으나 10kW 이하의 경우 0.78내외의 저 역률을 나타내었다.

표 1. Power Data in Condition(#1)

Condition	Time	Power Factor	Act. Power Inst.	Cur. Ave. Inst.	Volt. CH1 Inst.	Frequency Inst.
Frequency	11:43:46	0.94	28.0	45.1	218.4	59.89
	13:47:46	0.98	67.0	103.3	221.0	60.48
LOAD 9.5(kW)	12:21:46	0.85	11.5	20.1	222.5	60.16
	12:22:46	0.78	9.5	18.3	221.1	60.20
	12:23:46	0.79	9.9	18.7	220.9	60.12
LOAD -10.1(kW)	12:41:46	-0.75	-10.7	21.3	222.3	60.09
	12:42:46	-0.75	-10.1	20.1	221.9	60.06
	12:43:46	-0.71	-8.8	18.6	220.8	60.08
LOAD 51.9(kW)	13:36:46	0.97	45.9	72.2	220.0	60.13
	13:37:46	0.98	51.9	80.5	219.1	60.20
	13:38:46	0.97	49.7	78.1	219.2	60.14
LOAD 102.6(kW)	13:45:46	0.97	45.6	71.1	220.0	60.10
	13:46:46	0.98	102.6	158.3	220.6	59.93
	13:47:46	0.98	67.0	103.3	221.0	60.48

계통 주파수 변화는 역률이 0.5이하인 시간대에서도 60.0Hz~60.1Hz이내의 안정된 값을 나타냈으며, 오히려 역률이 0.98인 13시 47분에 인버터의 주파수 제어범위(59.7Hz~60.3Hz)를 벗어난 60.48Hz로 운전정지를 초래하였다. 이 시점은 계통의 전류가 140A까지 급격히 변화한 지점으로, 유도전동기 등 큰 부하설비의 운전변화에 의한 계통 주파수가 영향을 받은 것으로 판단된다.(그림 5 참조)

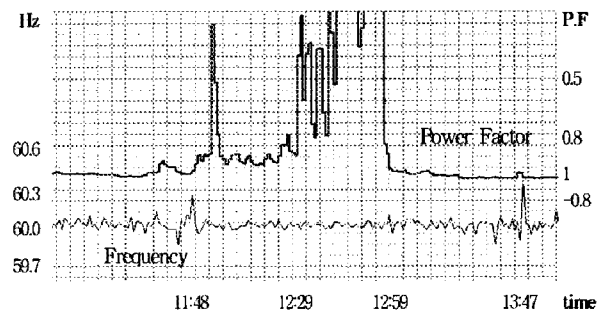


그림 5. Frequency & Power Factor Waveform

2호기 동기발전기의 태양광발전시스템과 병렬운전의 경우도 표 2와 같이 부하전력의 변화에 대한 역률과 전압이 1호기와 유사한 운전 특성을 보였으며, 주파수는 60.02Hz~60.27Hz로 안정적인 특성을 보임에 따라 부하전력의 변화 정도와 동기발전기 고유특성이 계통에 영향을 줄 수 있음을 추정할 수 있다.

표 2. Power Data in Condition(#2)

Condition	Time	Power Factor	Act. Power Inst.	Cur. Ave. Inst.	Volt. CH1 Inst.	Frequency Inst.
Frequency	10:46:08	0.97	75.7	117.8	219.6	60.27
	11:21:08	0.97	76.5	119.6	218.1	60.02
LOAD -13.5(kW)	13:48:08	-0.75	-5.7	14.7	222.8	60.13
	13:49:08	-0.94	-13.5	22.6	222.3	60.14
	13:50:08	-0.89	-9.4	18.8	221.8	60.14
LOAD 11.7(kW)	14:39:08	0.93	11.4	20.9	222.2	60.09
	14:40:08	0.94	11.7	21.1	221.8	60.13
	14:41:08	0.91	9.1	17.0	220.8	60.13
LOAD 55.1(kW)	14:54:08	0.99	54.7	84.1	221.0	60.17
	14:55:08	0.99	55.1	84.6	220.0	60.10
	14:56:08	0.99	50.4	77.6	220.2	60.13
LOAD 145.6(kW)	15:18:08	0.97	138.1	213.2	221.8	60.03
	15:19:08	0.98	145.6	221.2	220.7	60.10
	15:20:08	0.99	151.4	229.4	221.6	60.17

(2) 잉여전력 역 전송 운전

① 주파수, 전압, 역률특성

태양광발전시스템의 잉여전력을 동기발전기 1호기에 10.7kW, 2호기에 13.5kW를 역 전송한 실험결과에서 주파수는 60.09Hz, 60.14Hz, 상 전압은 222.3V로 안정된 값이었으며, 역률은 각각 -0.75와 -0.94로 측정되었다. 역률이 부(-)의 값으로 표시된 것은 회전계자형 동기발전기가 그림 6 (a)과 같이 운전하다가 잉여전력의 역 전송으로 전류의 방향이 반대로 유입되어(그림 6의 (b)) 동기전동기로 변환되어 구동된 것으로 판단된다. 이때의 동기전동기로써의 출력( $P_M$ )은 유입전류  $I'$ 와  $V$ 의 벡터 합  $P_M$ 이 된다.(그림 6의 (c)) 이 기계적 출력( $P_M$ )에 대하여, 동기발전기를 구동하는 디젤엔진이 엔진 브레이크로 작용함으로써 에너지의 균형을 이루고 운전되고 안정된 전압(211V~222.3V)과 주파수(60.14Hz)가 유지되어 측정됨을 알 수 있다. 또한 동기발전기가 동기전동기로 운전되는 동안의 역률이 비슷한 크기의 부하에 동기발전기로 운전하는 경우와 비교할 때, 부(-)표시를 제외하고는 유사한 값으로 측정되는 것은 동기발전기의 자동전압조정기(AVR)에 의해 계자전류가 가감되고 조정<sup>11)</sup>되어 보상됨을 알 수 있다.

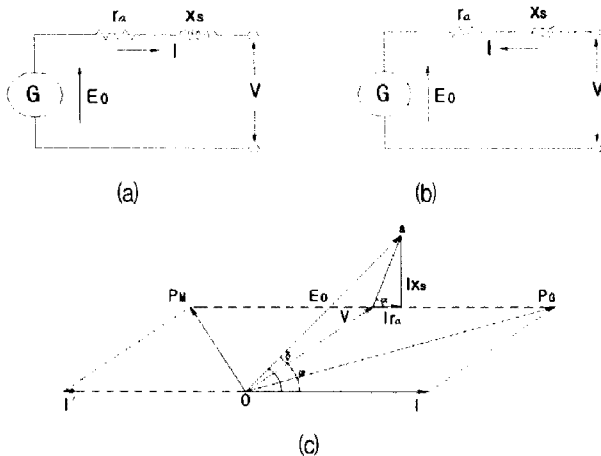


그림 6. Equivalent Circuit & Vector Diagram

11) 고태연, 김민희, 배영호, 이명연, 이종필, 조문택, 전기기기, 북스힐, 2004, pp.186~196.

② 고조파 특성

정상적인 부하운전과 잉여전력이 동기발전기로 역 전송되는 경우의 계통 고조파 성분과 크기를 측정한 결과, 표 3과 같이 전류고조파는 전압고조파에 비하여 여러 차수에서 발생되고 있으며, 부하의 증가에 따라 전압 및 전류의 고조파의 값이 증가함을 알 수 있다.

표 3. Instant of 1st-11th Harmonics

Con dition	Harmo nics	1st	2nd	3rd	4st	5st	6st	8st	11 st
LOAD 102.6(kW)	VH	219.8	15.2	7.3	3.0	3.2			
	IH	136.2	17.8	12.7	3.0	2.4	2.4	1.4	0.8
LOAD 51.9(kW)	VH	220.7	10.3	6.0	4.8				
	IH	49.4	12.2	7.9	4.6	3.0	1.1	1.5	
LOAD -10.7(kW)	VH	221.8	7.9						
	IH	18.3	2.9	2.8	2.7	3.0		0.8	

종합고조파왜형률을 식(1)과 (2)에 의해 산출하면, 표 4와 같이  $V_{THD}$ 은 부하의 증가에 따라 다소 상승하였으며,

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100[\%] \quad (2)$$

$I_{THD}$ 는 각 차수별 고조파 값이 크더라도 부하의 증가로 기본파(1st)전류가 커짐으로 덜 왜곡되는 현상을 알 수 있다.

표 4. Instant of Total Harmonic Distortion

Load (kW)	Voltage			Current		
	1st(V)	VH	THD	1st(A)	IH	THD
102.6	219.2	28.7	7.92	136.2	45.3	16.63
51.9	220.7	21.1	5.82	49.4	33.4	32.01
-10.7	221.8	10.9	3.80	18.3	13.8	32.66

③ 물리적 특성

부하전력의 증가에 따라 동기발전기의 진동, 소음, 온도는 표 5와 같이 증가하였으며, 태양광발전 잉여전력 13.5kW를 동기발전기에

역 전송한 경우는 정상적인 부하접속(145.6kW; 11.03mm/s)보다 낮은 7.5mm/s, 소음 97dB, 동체온도 6°C로 측정되어 안정된 운전을 확인하였다. 따라서 잉여전력의 역 전송이 동기발전기를 동기전동기로 변화시켜 운전되는 상태는 전기적으로는 물론 물리적으로도 탈조나 불안정한 운전을 발생시키지는 않는 것을 알 수 있다. 또한 태양광 생산전력에 의해 동기발전기는 부하분담을 덜게 되어 엔진의 선형적인 연료소비특성에 의해 최대 11.1lit/hr를 감소시킬 수 있다.

표 5. Vibration Data of Revolving Field Type Synchronous Generator

Load(kW)	VGH	VGV	Noise(dB)	TGB	TGA
145.6	11.03	10.33	98.2	7.5	1.0
55.1	8.42	11.39	98.0	6.0	0.3
11.7	9.49	10.71	97.6	6.0	0.3
-13.5	7.50	8.57	97.0	6.0	0.3

### 3. 요약 및 결론

3상 계통연계형 태양광발전시스템과 회전계자형 동기발전기의 교류병렬운전에 대한 실험 결과에 대하여 요약하면 다음과 같다.

(1) 한전 전력계통과 병렬로 사용하는 계통연계형 태양광인버터와 회전계자형 동기발전기가 병렬운전 하기 위해서는 실험결과와 같이 인버터 기존 주파수 제어범위를 벗어나 태양광발전시스템의 운전중단 등을 유발할 수 있기 때문에 비상발전기의 품질과 부하설비의 종류 등을 감안하여 태양광인버터의 주파수 운전모드를 3가지( $\pm 0.3\text{Hz}$ ,  $\pm 1\text{Hz}$ ,  $\pm 2\text{Hz}$ ) 이상 다양하게 적용할 필요가 있었다.

(2) 태양광발전시스템에서 생산된 잉여전력을 동기발전기에 역 전송한 결과에서는 전력계통에 과도현상이 없이 전압과, 주파수가 안정된 값을 유지하였고, 동기발전기의 진동, 소음, 온도 등 정상적인 물리적 특성이 측정되고 탈조가 발생하지 않은 안정된 운전을 확인하였다.

(3) 부하의 증가에 따라 전압 및 전류의 고조파의 값이 증가하고, 전류고조파는 전압고조파에 비하여 여러 차수에서 발생되고 있음

은 태양광발전시스템과 병렬운전으로 인한 고조파의 증가보다는 부하의 증가에 영향이 큼을 확인할 수 있었다.

한전 전력계통에 병렬로 접속하여 사용하는 계통연계형 태양광발전시스템을 동기발전기와 교류 병렬운전을 하는 경우, 잉여전력 역 전송에 대한 계통과 발전기의 영향여부에 대하여 확인하였으며, 주파수와 전압의 일정한 운전범위를 발전기나 부하설비의 특성을 고려하여 설정, 운전하여 태양광발전시스템의 운전효율을 높이고 디젤엔진의 연료를 절감하는 방안을 제안함으로써 기존 디젤발전기를 사용하는 도서산간지역에서 태양광발전시스템 도입에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 고태언, 김민희, 배영호, 이명언, 이종필, 조문택, 전기기기, 북스힐, 2004, pp.186~196.
2. 김경해, 이욱재, 이준신, 다결정 실리콘 태양전지의 고 효율화 기법에 관한 연구, 13회 신재생에너지 WORKSHOP 발표논문집, 2001.11, pp.201~217.
3. 김재언, 김태웅, 정원재, 전력품질 향상을 위한 대체에너지전원의 운전역률과 도입한계량 산출기법 및 S/W개발, 2001.11, pp.221~236.
4. 김일송, 계통연계 태양광발전시스템의 태양전지 전류 추정과 강인한 최대전력점 추적기를 위한 슬라이딩모드 관측기와 제어기설계, 한국과학기술원, 박사학위논문, 2005, pp.99~101.
5. 나병훈외 6인, 단일용량 120kW급 계통연계형 태양광발전용 PCS개발, 전력전자학술대회 논문집, 2006.6, pp.188~190.
6. 이준신, 실리콘 태양전지 현황과 전망, 2008 태양광산업발전 워크샵, 2008.2.
7. 임익현, 동기발전기 디지털 여자제어시스템 개발에 관한 연구, 홍익대, 박사학위논문, 2001, pp.17~18.
8. Nayar, C.V. Lawrance, W.B. Phillips, S.J., Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System for Remote Areas, Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-89. Vol. 4, 1989, pp.2029~2034.