

태양광발전시스템의 효율향상을 위한 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Photovoltaic System for Efficiency Progress

최영문*, 임중열**

Young-Moon Choi*, Jung-Yol Lim**

Abstract

This paper compare the operation characteristic and optimal design of Photovoltaic system by computer simulation. The operation characteristic of Photovoltaic system are evaluated and analyzed considering system parameters of specifications, installations, inclination, azimuth and surrounding conditions etc. From the basis of these results, this study will intend to develop an evaluation, analysis tool and construct database for optimal design of PV system

요약

본 논문에서는 3[kW]급 태양광 발전시스템의 환경 조건 및 시스템 파라미터들을 고려하여 태양광어레이와 태양광인버터를 시뮬레이션 하고 태양광어레이의 설치에 따른 최적 조건과 성능을 분석을 하여 태양광 발전시스템의 최적 설계를 구현할 수 있도록 한다.

Key words : Photovoltaic, inclination, azimuth, optimal design, utility interactive

I. 서론

세계적으로 산업화가 가속되고 산업·사회생활의 고도화됨에 따라 전력수요는 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 특히 국내의 경우 에너지 다 소비형 산업구조와 소비구조로 향후 에너지 대란이 예상되고 있다. 특히, 화석에너지 고갈과 지구환경 문제가 거론되고 있는 최근의 에너지를 둘러싼 심각한 상황을 고려할 때 기존의 대규모 중앙집중형 전원과 연계하여 운전 할 수 있는 태양광발전설비와 같은 분산형전원의 도입이 절실하다1)2). 기존의 대규모 중앙집중형 전원은 여름철과 같은 첨두전력부하에 대응이 어렵고 송배전설비에 대한 투자비가 과다하지만 분산형전원

은 첨두전력부하에 대응이 유연하고 송배전설비가 저감되는 장점을 가지고 있다. 태양광발전시스템 시장이 활발해 지면서 태양광발전시스템의 발전성능을 향상시키기 위한 연구는 시스템 분야와 설치 분야에서 활발하게 진행되고 있다3)4).

태양광발전시스템의 시스템 분야에 대해서는 선진국과 대등한 수준을 유지하고 있지만 국내의 여건에 맞는 여건과 분석은 미미한 수준이고 국내에서 태양광발전시스템이 가장 활성화 되어 있는 광주전남 지방에 대한 효율적인 분석이 절실하다.

본 논문에서는 태양광발전시스템이 광주전남지역에서 최대발전량을 확보할 수 있도록 최적설계에 대하여 비교 분석하였다.

II. 본론

가. 시스템 개요

태양광발전설비는 발전전력이 사용량보다 부족하면

* 남부대학교 디지털경영정보학과
(Department of Digital Management Information Graduate school of Nambu University)

★ 교신저자 (Corresponding author)
接受日:2009年 5月 20日, 修正完了日: 2009年 6月 16日

한전계통전력에서 공급받고 초과되면 잉여전력을 역송전하는 방식이지만 분산형 전원설비로써 계통전압을 능동적으로 조정하여서는 안되고 계통에 영향을 주지 않도록 표 2.1과 같은 연계조건이 만족되도록 설계되어야 한다. 그림 2.1은 분산전원용 태양광발전시스템의 계통연계도를 보여주고 있다. 태양광발전시스템의 계통은 크게 4가지로 분류할 수 있는데 DC전력을 생산하는 태양광어레이와 DC전력을 AC계통전력으로 변환하는 계통연계형 태양광인버터, 계통보호장치, 분전반으로 구성되어 있다. 일반적으로 태양광인버터에는 계통을 보호할 수 있도록 시스템화되어 있고 표 2.1에서 제시된 계통연계 조건을 만족하도록 설계되어 있다. 인버터의 입력전압에 맞는 직렬접속된 태양전지 어레이를 병렬 접속하여 발전전력을 결정한다. 태양전지 어레이의 병렬접속수에 맞추어 직류배전반이 결정되고 이것을 경유하여 인버터에 직류전력이 공급된다. 인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환하지만 계통과 동기운전을 하면서 고조파 전류가 적은 정현파전류를 부하기기 및 계통에 공급한다. 또, 인버터는 태양전지 출력특성의 최대전력을 발전하기 위하여 최대전력추종제어를 하고 있다. 부하기기의 가동이 적은 경우, 인버터는 잉여전력을 계통에 역조류시켜 전력을 상용계통에 공급하게 된다.

그림 2.1 분산전원용 태양광발전시스템의 계통 연계도

나. 태양광발전시스템

태양광발전시스템의 발전량은 파라미터 분석법과 정격변환효율에 의한 방법, 전압·전류특성식에 의한 방법을 통하여 산출할 수 있다(4)5). 본 논문에서는 위의 3가지 방법 중 정확성이 좋은 전압·전류에 의한 비선형 방정식 Newton-Raphson법을 적용하였다.

$$I_A = I_L + I_o(1 - \exp\frac{-q(V + R_s I_A)}{n \cdot k \cdot tc}) - \frac{V + R_s I_A}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_O = C_O \cdot tc \cdot \exp\frac{-q \cdot E_g}{n \cdot k \cdot tc} \quad (2)$$

여기에서, I_A : 출력전류 [A/cm²], I_L : 광 기전류 [A/cm²], I_o : 포화전류 [A/cm²], q : 전자의 전하량[C], V : 전압[V/cm²], R_s : 직렬저항[Ω·cm²], n : 접합정수 [-], k : 볼츠만 상수 [J/K], tc : 태양전지 표면 절대 온도 [K], R_{sh} : 병렬저항[Ω·cm²], C_O : 포화전류 온도 계수[-], E_g : 에너지갭 [eV]

곡선인자(FF)의 특성을 이용하여 전압전류 특성식을 나타내면 식(3)과 같다.

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} = \frac{P_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3)$$

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (4)$$

여기에서, I_{sc} : 단락전류[A/cm²], V_{oc} : 개방전압[V/cm²], P_{max} : 최대발전량, V_m : P_{max} 에서의 최적동작전압, I_m : P_{max} 에서의 최적동작전류

식(1)에서 $I_L = I_{sc}$, $V = V_{oc}$ 일 경우, $I_A = 0$ 이므로 V_{oc} 및 I_{sc} 는 식(5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{n \cdot k \cdot tc}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad (5)$$

$$I_{sc} = I_{Lo} \left(\frac{R_t}{R_{t_o}}\right) / cell A \quad (6)$$

여기에서, I_{Lo} : 표준상태 광기전류 [A], R_t : 태양

Table 2.1 Utility interactive requirement of 표 2.1 분산형 전원 계통 연계 조건

항 목	조 건	규정치
저압 계통	상시전압변동(10분간 평균치) 3% 이하, 순시전압변동(2초 이하)	4% 이하
특고압 계통	상시전압변동(10분간 평균치) 2% 이하, 순시전압변동(2초 이하)	2% 이하
역률 유지		90% 이상
DC전류	정격 최대전류의 0.5% 이상 제한	
Flicker	단시간 Epstl ≤0.35, 장시간 ≥0.25	
고조파	10분간 평균 40차까지 총합전류위험률	5%초과 금지
h<11	11≤h≤17, 17≤h≤23, 23≤h≤35	35≤h
4.0%	2, 1.5, 0.6	0.3
전압 이상 시	다음시간 내 계통분리	기준전압에 대한 %
V<50	50≤V≤86, 110≤V≤120	V≥120
0.16s	2.0s	1.0s, 0.16s
주파수 이상 시		계통을 분리
30Kw 미만	>60.5Hz, >60.5Hz	<59.3, <59.3
30KW 이상	>60.5Hz	<59.3
전압변동범위	220±13V, 380±38V, 23.5~22.4KV, 23.8~22.7KV	

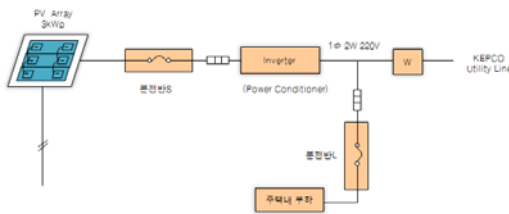


Fig. 2.1 Utility Interactive Structure for PV system in dispersed generation

전지 입사 일사량 [W/m^2],

R_{to} : 표준상태 입사 일사량 [W/m^2], $cellA$: 태양전지 면적 [cm^2]

태양전지의 에너지 변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광 에너지로 나누어 줌으로써, 최대전력과 입사광 에너지사이의 비율이 되고 식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times FF \quad (7)$$

여기에서, P_{in} : 입사된 태양에너지

그리고 태양전지에 일사량 강도의 차이에 따라 태양전지에 미치는 출력전류의 변화는 식 (8)과 같고 그림 2와 같다.

$$I_c(V) = KI_L - I_o(V_o - \Delta V) \quad (8)$$

$$\Delta V = (1 - K)I_L R_s$$

여기서, K는 일사상수이며 음영정도에 따라 $0 < K < 1$ 의 범위를 갖는다. 그리고 ΔV 는 태양전지의 그들의 상태에 따른 직렬저항 양단에 인가되는 전압의 변화분이다.

III. 시스템 분석

본 논문에서는 3[kW]급 태양광 발전시스템의 환경 조건 및 시스템 파라미터들을 고려하여 제조사 제공 파라미터와 시뮬레이션 예측치, 실제 시스템의 운전을 통한 성능치를 비교하여 예측치의 타당성을 입증하고, 태양광어레이의 설치에 따른 최적 조건과 성능을 시뮬레이션을 통해 미리 예측함으로써 태양광 발전시스템의 최적 설계를 구현할 수 있도록 한다.

사용된 태양전지 모듈은 Solar World AG에서 제작한 165W 단결정 Si 모듈로써 야간에 전류가 모듈로 역류 방지를 위하여 블로킹 다이오드를 어레이와 시스템 입력단 사이에 설치하였다.

설치된 어레이는 9직렬X2병렬로 구성되어 있으며 최대 전압은 약 311.4V 그리고 최대 전류는 약 9.6A, 최대 전력은 2,970W의 특성을 가지며 사용된 태양전지 모듈은 표 3.1과 같은 사양을 가지고 있다.

인버터는 동작전압 125~750Vdc, 효율 0.945, 출력 3kWac을 가지도록 설계하였다. 본 논문에서는 위도 35.08°, 경도 126.55°의 광주지방의 기상조건 및 시스

템 설계 파라미터(일사량, 온도, 풍속, 위도, 경도, 경사각, 방위각, 시스템 효율 등)를 적용하였고 시스템의 운전손실계수(그림자, 선로, 어레이, 인버터 손실 등)를 고려하였다.

표 3.1 태양전지 모듈의 제품 사양
Table 3.1 Specification of photovoltaic module

Model	SW 165
Maximum Power	165 [W]
Maximum Voltage	34.6 [V]
Maximum Current	4.80 [A]
Open Voltage	43 [V]
Short Current	5.3 [A]
Type	Mono Crystal Silicone

그림 3.1은 태양광어레이의 출력을 STC조건과 제조사에서 제공된 자료를 토대로 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 제조업체별 표준조건 STC(Standard Test Condition)은 일사량 $1,000W/m^2$, 모듈온도 $25^{\circ}C$, AM(Air Mas) 1.5이다.

시뮬레이션 결과 최대 출력은 2,989.33W로써 이론적인 출력인 2,970W과 비슷한 출력을 보여주었으며 최대출력점에서의 전압과 전류를 각각 310.69V, 9.62A로 예측되었다.

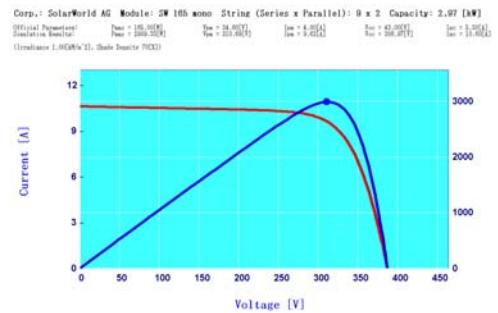


Fig. 3.1 Output Power of PV array in simulation
그림 3.1 태양광어레이 시뮬레이션 출력

그림 3.2는 PSIM을 이용한 인버터 시뮬레이션 회로를 보여주고 있으며 그림 3.3은 시뮬레이션 출력 파형을 보여주고 있다. 태양광어레이는 표3.1에서 제시된 태양광모듈 사양에 맞춰 구성하였고 PLL은 V-grid를 통하여 계통의 전압과 전류를 검출하도록 하였으며, MPPT방법은 Incond법을 적용하였다.

계통연계형 인버터에서 가장 중요한 부분중에 하나가 계통을 보호할 수 있는 단독운전방이지만 본 논문은 태양광발전시스템이 최적으로 운전할 수 있는 설계에 초점을 맞추고 있기 때문에 생략하기로 한다.

그림 3.3은 그림 3.2의 계통연계형 태양광인버터의 시뮬레이션 파형이다. 그 결과 전압 220Vac, 전류 13.5A, 전력 3kW로 시스템의 설계가 안정적으로 이루어 졌을때 최대 전력을 생산할 수 있음을 확인하였다.

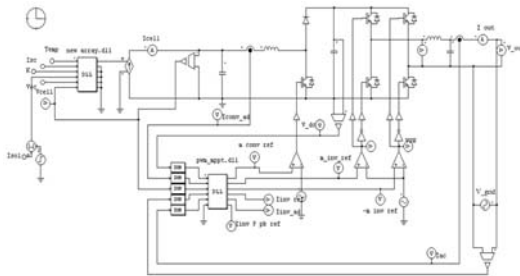


Fig. 3.2 Circuit of Inverter at 3kW PV system
그림 3.2 3kW 태양광 발전 시스템 인버터 회로

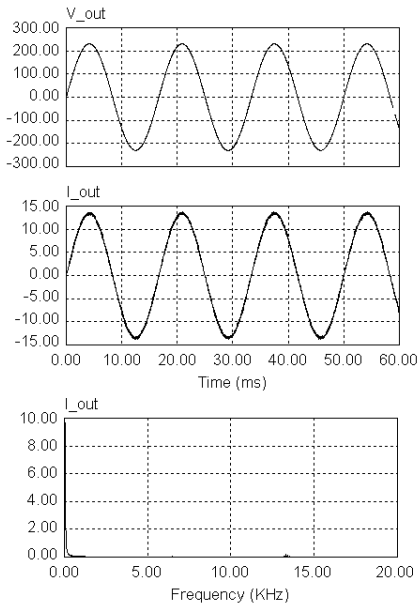
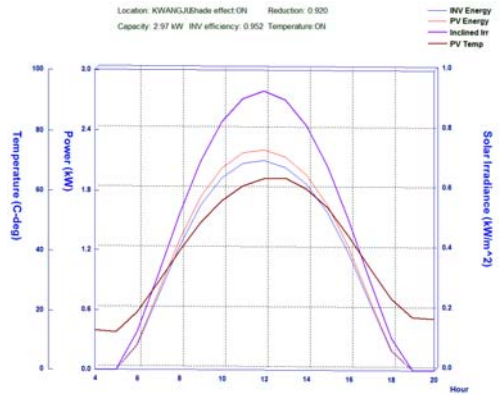


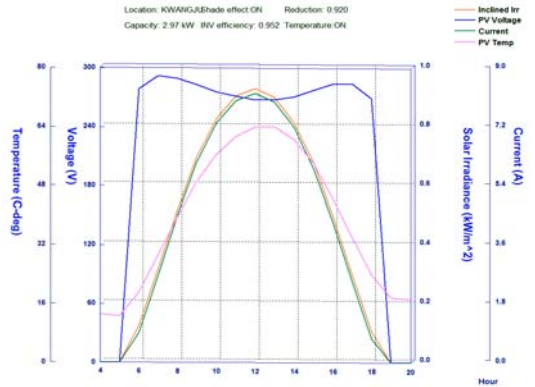
Fig. 3.3 Output characteristic of Inverter
그림 3.3 인버터 출력특성

그림 3.4는 5월달 날씨가 좋은 날을 기준으로 하여 시뮬레이션을 통하여 하루동안의 발전량을 예측한 것이다. 최대일사량은 0.95kWh/m²이고 태양광어레이의

최대출력은 2.23kWh, 평균전압 277.7V, 평균전류 5.08A, 인버터의 최대출력은 12:00시에 2.13kWh로 나타났다.



a. 전력 특성



b. 전압 전류 특성

Fig. 3.4 Output power of PV system at the one-day
그림 3.4 태양광발전시스템의 일일 발전량

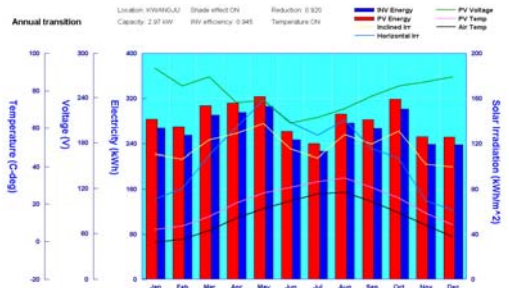
그림 3.5는 태양광어레이의 경사각 변화에 따른 발전량을 분석한 것으로 방위각은 정남향으로 하고 어레이의 경사각을 0°에서 45°까지 변동하였을때 1년동안 태양광발전시스템의 출력이 미치는 영향을 분석하였다.

태양광발전시스템이 최대 전력을 발전할 수 있는 경사각을 산출해보면, 하절기 경우에는 경사각 15°, 동절기의 경우에는 경사각 45°로 나타났으며 1년동안의 총발전량은 경사각이 동절기와 하절기의 평균이

되는 30°에서 3,330kWh/year로 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서, 고정식으로 태양광어레이를 설치할 경우에는 30°를 유지했을 경우 최대 발전량을 확보함을 알 수 있다.

이것은 광주지역의 태양의 고도가 계절에 따라 변하기 때문에 태양광어레이에 직달되는 일사량 또한 변동되어 태양광발전시스템의 출력에 영향을 미치기 때문이다.

태양의 입사각과 태양광어레이의 입사각이 항상 수직에 가깝도록 경사각을 조정 할 수 있다면(하절기 15°, 동절기 45°) 연간 발전량이 5%이상 개선 될 수 있을 것이다.

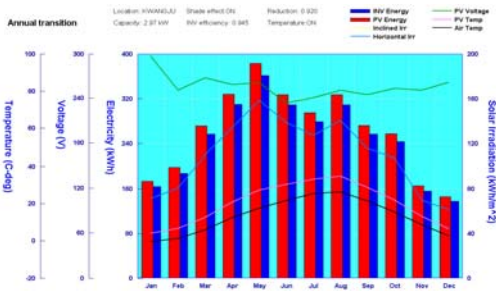


d. 경사각 45°

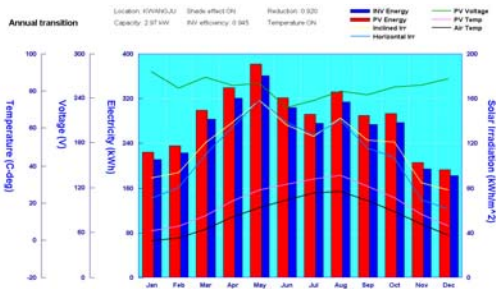
Fig. 3.5 Output power of PV system with variable inclination
그림 3.5 경사각 가변시 태양광발전시스템의 출력 변화

그림 3.6은 경사각을 30°로 고정하고 방위각을 남동30°에서 남동30°까지 변동 시켰을 경우 태양광발전시스템의 발전량 변화를 분석한 것이다.

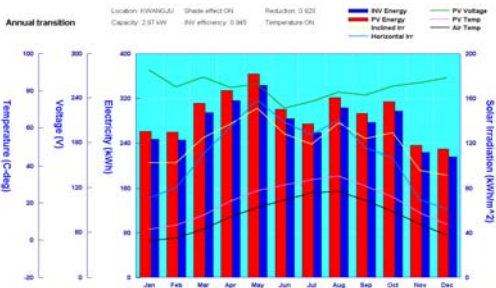
방위각 0°(정남) 경사각 30°일때의 태양광발전시스템의 출력을 나타내고 있는 그림 3.5 c와 발전량을 비교해보면, 방위각이 커질수록 일사량과 태양광발전시스템의 출력은 저하됨을 알 수 있다.



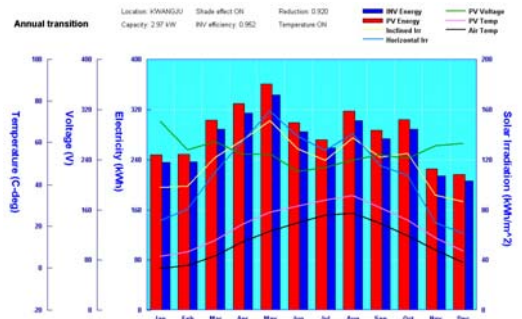
a. 경사각 0°



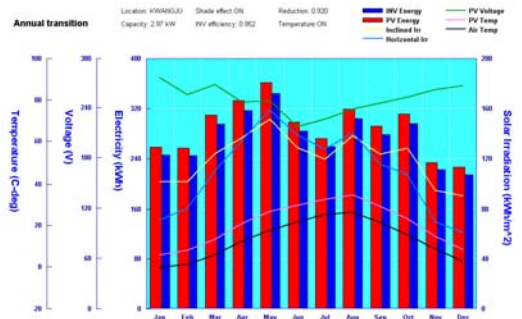
b. 경사각 15°



c. 경사각 30°



a. 방위각 SE 30°



b. 방위각 SE 15°

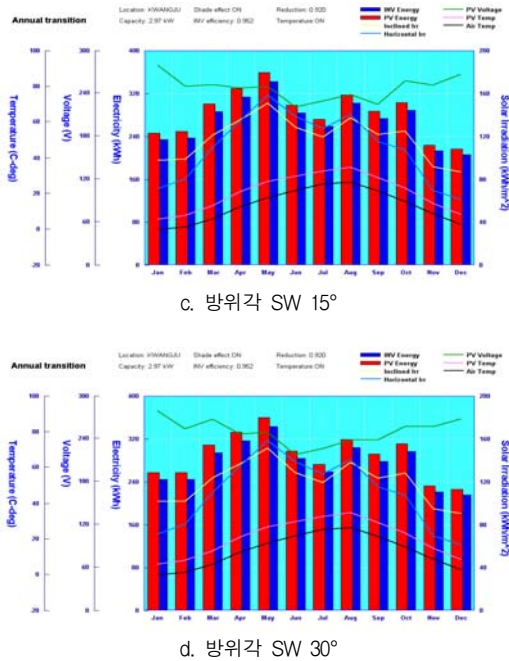


Fig. 3.6 Output power of PV system with variable azimuth
 그림 3.6 방위각 가변시 태양광발전시스템의 출력 변화

IV. 결론

태양광발전시스템의 발전량에 큰 영향을 미치는 설계 파라미터의 변화에 대하여 운전특성을 분석하여 최대 발전량을 확보할 수 방안으로 다음과 같은 결과를 산출하였다.

- (1) 태양광발전시스템은 계절별로 태양의 고도의 변화 때문에 발전량에 변동함을 확인하였다.
- (2) 태양광발전시스템의 최대발전량은 태양의 입사각과 태양광어레이가 수직으로 위치하였을 때 발생함을 확인하였다.
- (3) 방위각에 의한 발전량 감소 보다 경사각에 따른 발전량 손실이 더욱 큼을 알 수 있다.
- (3) 광주전남지역에서 최대 발전량을 확보하기 위한 경사각은 하절기 15°, 동절기 45°이고 방위각은 정남향임을 확인하였다.

결과적으로, 태양광발전시스템의 최대발전량을 확보하기 위해서는 계절에 따라 경사각을 변경할 수 있는 경사/방위각 추적 시스템이 가장 적합하지만 유지보수에 대한 추가적인 지출이 발생한다. 따라서, 투자대비 최대의 발전량을 확보하기 위해서는 방위각은 고정하고 경사각을 가변할 수 있는 시스템이 효율적

인 것으로 판단된다. 향후 다양한 태양광모듈에 대한 데이터베이스를 확보하여 동일한 조건하에서 최대 발전량을 확보 할수 있는 방안에 대하여 연구할 예정으로 보다 효율적인 성능개선을 도출하고자 한다.

참고문헌

- [1]R. Chenni, M. Makhlof, T. Kerbache and A. Bouzidura, "A detailed modeling method of photovoltaic cells, energy, Vol. 32, pp.1724-1730, 2007
- [2] IEA PVPS, Trends in Photovoltaic applications, IEA, Report IEA-PVPS, 2006
- [3] Takashi Oozeki and Toshiyau Izawa, "The evaluation method of PV systems", Technica Digest of the International PVSEC-12, pp.741-742, 2001
- [4] Werner Knaupp, " Evaluation of PV module design at irregular operation conditions", 26th PVSC, pp.1213-1216, 1997
- [5] W. Desoto, S.A. Klein and W.A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, Solar Energy, Vol.80, pp.78-88, 2006

저 자 소 개

최영문 (학생회원)



1994년 : 광주대학교 전자계산학과 컴퓨터학 졸업 (공학사)
 2004년 : 남부대학교 산업정보대학원 디지털 정보학과 졸업(석사)
 2006년 3월~현재 : 남부대학교 대학원 디지털경영정보학과(박사과정)
 <주관심분야> 신·재생에너지, 정보 보안 및 백업, 멀티미디어 통신

임중열 (정회원)



2002년 : 동신대학교 전기전자공학과 박사 졸업
 2003년 3월~현재 : 남부대학교 컴퓨터전기정보학과 조교수
 <주관심분야> 전력변환, 신·재생 에너지, 멀티미디어 통신