

## 대용량 PV 어레이의 최적설계에 관한 연구

황인호\*, 김의환\*\*, 안교상\*\*

\*충북도립대학 전기에너지시스템과(ihhwang@cpu.ac.kr),  
\*\*한국전력공사 전력연구원

### A Study on the Optimal Design of Large-scale Photovoltaic Array

Hwang, In-Ho\* Kim, Eui-Hwan\*\* Ahn, Kyo-Sang\*\*\*

\*Dept. of Electrical Energy Systems, Chungbuk Provincial University(ihhwang@cpu.ac.kr),  
\*\*Korea Electric Power Research Institute

#### Abstract

Recently, a number of large-scale photovoltaic(PV) power generation system has been installed all over the world. Thus, in order to improve the system efficiency, the optimal design of the large-scale PV systems has become an important issue. DC cable loss of PV array is one of the design factors related to the system efficiency.

This paper introduces the array design method of a 500kW Photovoltaic power plant. Three types of the PV array are suggested. Also, string cables, sub-array cables and array cables are designed within 1% of voltage drop in the line, and the DC cable losses are analyzed. The results of this paper show that the DC cable loss of large-scale PV array can be reduced by adopting a proper sub-array design method.

Keywords : 태양광발전시스템(photovoltaic power generation system), PV 어레이(Photovoltaic array), DC 케이블 손실(DC cable loss), 전압강하(voltage drop)

#### 기 호 설 명

$V_{oc}$	: 태양전지 개방전압 [V]	$e$	: 전압강하 [V]
$I_{sc}$	: 태양전지 단락전류 [A]	$A$	: 전선의 단면적 [ $\text{mm}^2$ ]
$V_{mp}$	: 최대출력동작전압 [V]	$I$	: 전류[A]
$I_{mp}$	: 최대출력동작전류 [A]	$L$	: 전선 1본의 길이 [m]
$W_p$	: 태양전지 정격용량	$P_M$	: PV 어레이 손실 [W]
STC	: 표준시험조건	$k$	: 전기전도율 [ $\text{mm}^2/\Omega \cdot \text{m}$ ]

## 1. 서 론

무한한 태양에너지로부터 전력을 얻는 태양광발전방식은 친환경 신재생에너지로 각광을 받고 있다. 국내에서는 중동전쟁이후 에너지위기에 대응한 에너지 확보의 일환으로 1980년대 대체에너지기술개발 촉진법에 의해 연구가 진행되었으나 1990년대 이르기까지 실용화 보급은 한전계통이 미치지 않는 산간, 도서벽지의 독립전원 공급용으로 일부가 보급되거나 정부의 시범사업에 의해 일부 계통연계형 시스템이 보급되는 정도에 불과하였다. 그러나 2002년 발전차액 보전제도가 도입되면서 태양광 설치용량은 기하급수적으로 증가하게 되었고 단일시스템의 용량도 수백kWp에서 수MWp에 달하는 대용량 시스템이 민간 상업용 태양광발전소의 주류를 이루고 있다. 이러한 대용량 상업용 민간발전소는 설립목적상 경제성 확보가 제일 중요한 요소이며 최근 발전차액 기준가격이 점차 낮아지는 추세에서 새로운 돌파구가 필요한 실정이다.

이러한 측면에서 태양광발전시스템의 효율 개선은 발전량의 많고 적음에 관계없이 시스템의 경제성을 제고하는 다른 방안이 될 수 있다. 일반적으로 대용량 상업용 태양광 발전소는 계통연계형 시스템으로 발전소자인 태양전지로 이루어진 태양광 어레이(PV array)와 연계형 인버터(Inverter)로 이루어져 있다. 계통연계형 태양광발전시스템에서 태양전지 출력은 그 순간의 일사량 및 모듈 온도조건에 의해 규정된 변환 효율에 의해 출력이 발생되고 PV 어레이 회로를 거쳐 인버터를 통하여 계통에 들어가게 된다. 이 과정에서 대용량 태양광발전시스템은 대면적의 부지면적이 필요하게 되고 또한 PV 어레이 회로 구성을 위한 케이블도 많은 양이 필요하게 된다. 따라서 대용량 태양광 발전시스템은 대면적 태양광 어레이로부터 나오는 발전량을 수집하는데 따른 집적 손실이 발생하게 된다.

본 논문에서는 대용량 태양광발전시스템의 발전효율을 개선하기 위한 방안으로 500kW급 PV 어레이의 설계를 통하여 구성형태별 DC 회로 집적손실을 비교 분석하고 이를 저감할 수 있는 회로 구성방법에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 집중배치형 태양광발전시스템의 구성

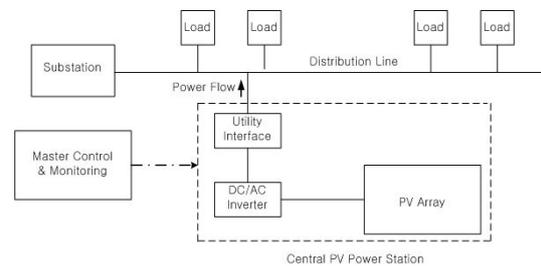


그림 1. 집중배치형 PV 시스템의 기본구성

일반적으로 MW급 규모의 대용량 태양광 발전(PV) 시스템은 변전소로부터 공급되는 특 고압 배전선로에 연계된다. 계통연계형으로 분류되는 대용량 집중배치형 PV 시스템은 그림1의 구성도에 보이는 것처럼 크게 태양전지(PV) 어레이, 연계형인버터, 계통연계장치 그리고 감시제어반으로 구성되어 있다.

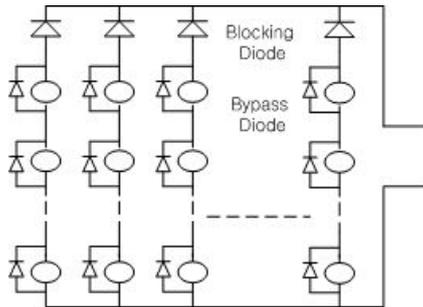
태양전지 어레이(PV 어레이)는 구성단위에 있는 태양전지 모듈을 기계적·전기적으로 집적시킨 것이다. 모듈에는 입사한 태양광을 직접 직류전력으로 변환하는 태양전지 셀이 패널 모양으로 조합되어 있고, 셀은 얇은 실리콘 등의 반도체 디바이스로 되어 있다.

태양전지 어레이에는 태양전지 모듈, 서브어레이, 어레이 부지, 보수·점검을 위한 통로·설비, 보안을 위한 울타리, 접지, 가대, 기초, 배선케이블, 바이패스 다이오드, 피뢰기, 고장검출 등의 보호장치가 포함된다.

태양전지 어레이의 경사각과 방위각은 어레이 출력에 큰 영향을 주는 것으로 시스템 설계의 중요한 요소이다. 일반적으로는 어레이

이 경사각 및 방위각은 고정식의 것이 많다. 고정식의 최적경사각은 설계 장소의 위도, 일사조건, 연간 부하 패턴, 또는 설계조건의 특수성 등에 의존한다.

바이패스 다이오드(by-pass diode)는 직렬 접속된 태양전지 어레이 중에서 어느 모듈이 발전되지 않을 때 다른 정상동작하고 있는 모듈의 전력이 고장 모듈을 통과하도록 바이패스 하기 위해서 설치한다. 바이패스하지 않으면 고장 모듈에 회로의 전압이 역방향으로 집중되어 열화(hot spot)의 원인이 된다. 부분적인 표면 오염이나 그림자 등의 차폐에서도 동일하다. 애노드(anode)를 모듈단자의 (-)측에 캐소드(cathode)를 (+)측에 역병렬로 접속한다. 그림 2는 PV 어레이의 일반적인 회로구성 방법의 한 예를 보여준다.



직/병렬 회로구성

그림 2. PV 어레이 회로방식의 예

### 3. 500kW급 PV 어레이의 설계

시스템 설계의 기본은 시스템으로서 높은 신뢰성과 낮은 손실을 추구하는 것이다. 이외에도 가격, 내구성, 편리성 등을 고려할 필요가 있다. 대용량 PV 어레이 손실분석을 위해 전북 고창지역에 구축 예정인 500kW급 태양광 실증시험장을 기준으로 설계하였다.

#### 3.1 PV 어레이 구성

일반적인 대용량 PV 어레이 손실 비교분

석을 위하여 고정식 어레이의 경우에 최대 경사면 일사량 조건을 고려하여 국내에서 일반적으로 채택하는 30°를 어레이 경사각으로 가정하였다.<sup>1)</sup> 태양전지 모듈은 최근의 대용량화 추세를 감안하여 국내 A사의 200Wp 모듈을 샘플로 선정하였고, 인버터 입력전압을 고려하여 모듈 20개를 직렬 연결하여 총 120개의 병렬회로를 갖는 것으로 PV 어레이를 구성하였다.

표 1. 태양전지 모듈 제원

항 목	규 격
용량	200 Wp
개방전압(Voc)	33.21 V
최대출력동작전압(Vmp)	25.9 V
최대출력동작전류(Imp)	7.75 A
단락전류(Isc)	8.09 A
외형 Size	980 ×1,460 mm

표 2. PV 어레이 설계 개요

항 목	설계사양
정격용량	480kWp
모듈개수	2,400개
직·병렬수	20직렬 × 120병렬
String 정격전압	518 V
String 정격전류	7.75 A
어레이 경사각	30°(고정식)

#### 3.2 지지대 설계 및 배치

태양전지 지지대는 그림 3, 4와 같이 하나의 String을 구성하는 20개의 태양전지 모듈을 2단으로 설치할 수 있는 구조로 설계하였다. 지지대간 최소 이격거리는 동짓날 태양의 남중고도를 기준으로 오전 9시에서 오후 4시까지 음영이 발생하지 않는 조건으로 시뮬레이션 결과, 약 2.8m로 계산되었으나 오차를 감안한 충분한 이격거리를 확보하기 위하여 3m로 결정하였다. 전체 PV 어레이의 배치를 위한 대략적인 부지 규모는 그림 5와 같다.

1) 조덕기 외, "국내 최대 경사면 일사량 분석" VOL. 29, NO. 1, 한국태양에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2009. 4. 10.



그림 3. 태양전지 지지대

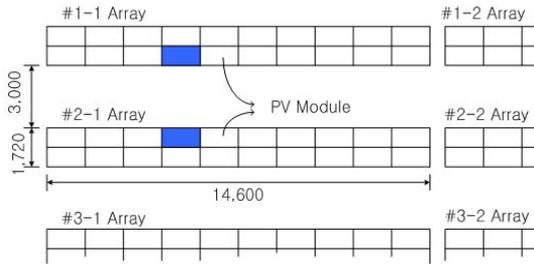


그림 4. PV 어레이 배치 간격

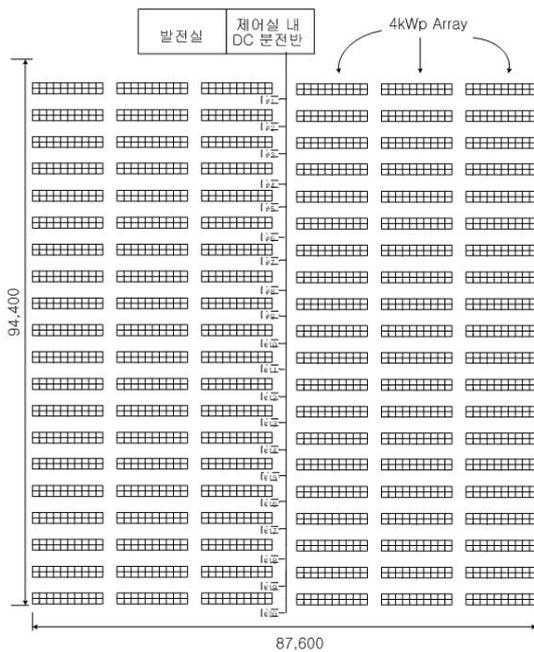


그림 5. 전체 PV 어레이 배치 평면도

#### 4. 어레이 구성방안별 회로손실 비교 분석

##### 4.1 Case별 어레이 구성방안

태양전지 어레이의 스트링(String) 전압은 모듈 정격 및 인버터 입력 동작전압에 따라

결정되고 PV 어레이의 회로 구성은 시스템 설치여건에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 본 논문에서는 대용량 PV 어레이의 DC 케이블 손실을 비교하기 위하여 Case 1: 멀티 스트링 구성, Case 2: 서브 어레이 구성, Case 3: 2단 서브 어레이 구성 등 3가지 Cabling 방법의 경우를 검토하였다. 각각의 구성 개요는 그림 6~8과 같다.

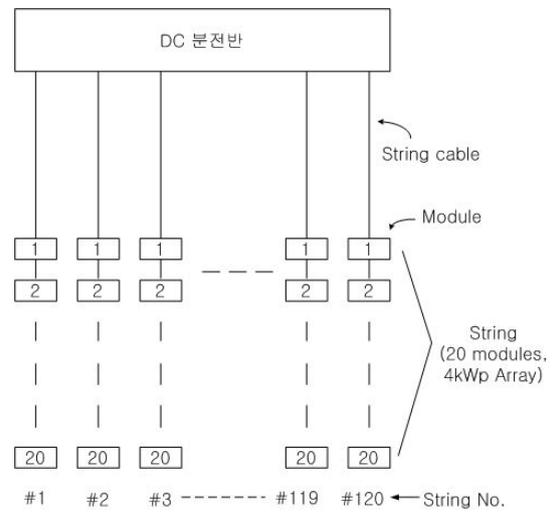


그림 6. Case 1: 멀티 스트링 구성

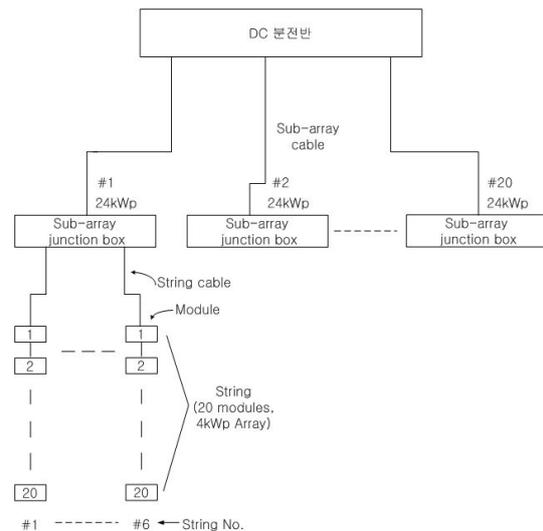


그림 7. Case 2: 서브 어레이 구성

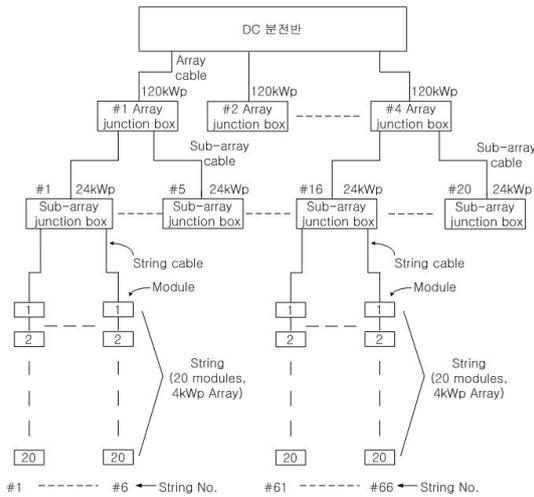


그림 8. Case 3: 2단 서브 어레이 구성

### 4.2 DC 케이블 설계

태양전지 케이블의 전선 굵기는 최소 허용 전류용량 요구조건과 최대 전압강하 요구조건을 고려하여 결정되어야 하고, 이 두가지 조건중에서 더 굵은 단면적을 갖는 케이블이 선택되어야 한다. 일반적으로 PV 어레이의 DC 전원 케이블은 KSC IEC 60364-7-712 기준에 따라 STC(표준시험조건, Standard test conditions)에서 PV 어레이 단락전류의 1.25 배의 허용전류를 갖도록 설계되어야 하고, PV 어레이 전압강하는 IEC 62257-7-1 등에 따르면 최대부하 조건하에서 어레이의 가장 먼 모듈로부터 응용회로의 단자까지의 전압강하가 공칭 시스템 전압의 제한된 범위를 초과하지 않아야 한다.<sup>2) 3)</sup>

내선규정에 의해 저압배선중의 전압강하는 간선 및 분기회로에서 각각 표준전압의 2% 이하로 유지하는 것을 원칙으로 하고 있다. 다만 수용장소 내에 설치한 변압기에 의하여 공급되는 경우에는 간선의 전압강하는 3%이

하로 하여도 가능하다.<sup>4)</sup> 한편, 국내의 신재생 에너지 설비의 원별 설치기준에 따른 전압강하 기준은 태양전지판에서 인버터 입력단간 및 인버터 출력단과 계통연계점간의 전압강하는 3% 이내가 원칙이다. 단, 60m를 초과할 경우에는 표3에 따라 시공할 수 있도록 규정되어 있다.<sup>5)</sup>

표 3. 태양광설비 설치기준(전압강하)

전선길이	전압강하
60m 이하	3%
120m 이하	5%
200m 이하	6%
200m 초과	7%

직류 2선식인 PV 어레이 선로의 전압강하 및 전선 단면적은 다음 식에 의해 계산된다.<sup>6)</sup>

$$e = \frac{35.6LI}{1,000A} \quad (1)$$

$$A = \frac{35.6LI}{1,000e} \quad (2)$$

단,  $e$  : 각 선간의 전압강하[V]  
 $A$  : 전선의 단면적[mm<sup>2</sup>]  
 $K$  : 전선 1본의 길이[m]  
 $I$  : 전류[A]

### 4.3 어레이 회로손실 분석

국내의 대용량 PV 어레이의 설계방법에 대한 적정성 비교 분석을 위하여 4.1절에 정의된 3가지 Case 별 PV 어레이 구성방안에 대한 어레이 선로 공장을 계산한 후에 이에 따른 DC 회로 손실을 검토하였다.

이를 위해 각 구성방안별로 태양전지 스트링 케이블, 서브 어레이 케이블 및 어레이 케이블의 전선 굵기와 배선 길이를 계산하였다. F-CV 전선 및 케이블 트레이 방식을 적용하였고, 전압강

2) IEC 62257-7-1, Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification, Part 7-1: Generators - Photovoltaic arrays.  
 3) KSCIEC 60364-7-712 건축전기설비-제7부 712절 태양전지 전원시스템

4) 내선규정, 대한전기협회, 2006.  
 5) 신재생에너지 설비의 지원·설치·관리에 관한 기준, 산업자원부 고시 제2008-3호.  
 6) 이원교 편저, 전기설비의 설계 및 시공, 동일출판사, 1998.

하는 어레이 손실을 최소화하기 위하여 1% 이내로 설계하였다. 표4~6은 3가지 Case별 어레이 구성방안에 대한 케이블 설계결과를 보여준다.

표 4. 케이블 설계내역(Case 1: 멀티 스트링 구성)

String No.	String 전류[A]	전선 굵기[mm <sup>2</sup> ] (F-CV 1C×2)	배선 길이 합계[m]
#1-1~#1-6	7.75	4	150
#2-1~#2-6	7.75	4	178
#3-1~#3-6	7.75	4	206
#4-1~#4-6	7.75	4	235
#5-1~#5-6	7.75	4	263
#6-1~#6-6	7.75	4	292
#7-1~#7-6	7.75	4	320
#8-1~#8-6	7.75	4	348
#9-1~#9-6	7.75	4	377
#10-1~#10-6	7.75	4	405
#11-1~#11-6	7.75	6	433
#12-1~#12-6	7.75	6	462
#13-1~#31-6	7.75	6	490
#14-1~#14-6	7.75	6	518
#15-1~#15-6	7.75	6	546
#16-1~#16-6	7.75	6	575
#17-1~#17-6	7.75	6	603
#18-1~#18-6	7.75	6	631
#19-1~#19-6	7.75	6	660
#20-1~#20-6	7.75	10	688

또한 표4~6의 설계결과를 바탕으로 PV 어레이의 DC 회로 케이블 손실을 계산하였다. 다음 공식은 특정 케이블 단면적을 갖는 태양전지 어레이 회로의 케이블 손실을 계산하는데 사용된다.<sup>7)</sup>

$$P_M = \frac{2 \times n \times L_M \times I_S^2}{A_M \times k} \quad (3)$$

- 단,  $P_M$  : PV 어레이 손실[W]
- $L_M$  : 어레이 배선 길이[m]
- $I_S$  : 스트링 전류[A]
- $A_M$  : 케이블 단면적[mm<sup>2</sup>]
- $k$  : 전기전도율[mm<sup>2</sup>/Ω·m], 동선:56
- $n$  : 스트링 수

7) 이현화, 저탄소 녹색성장을 위한 태양광발전, (주)도서출판 기다리, 2009.

표 5. 케이블 설계내역(Case 2: 서브 어레이 구성)

케이블 No.	전류[A]	전선 굵기[mm <sup>2</sup> ] (F-CV 1C×2)	배선 길이 [m]
[String cable]			
#1-1~#20-6	7.75	4	1,800
[Sub-array cable]			
#1	46.5	16	10
#2	46.5	16	15
#3	46.5	16	20
#4	46.5	16	24
#5	46.5	16	29
#6	46.5	25	34
#7	46.5	25	38
#8	46.5	25	43
#9	46.5	35	48
#10	46.5	35	52
#11	46.5	35	57
#12	46.5	35	62
#13	46.5	50	67
#14	46.5	50	71
#15	46.5	50	76
#16	46.5	50	81
#17	46.5	50	86
#18	46.5	50	90
#19	46.5	70	95
#20	46.5	70	100

표 6. 케이블 설계내역(Case 3: 2단 서브어레이 구성)

케이블 No.	전류/cable [A]	전선 굵기[mm <sup>2</sup> ] (F-CV 1C×2)	배선 길이 [m]
[String cable]			
#1-1~#15-6	7.75	4	1350
#16-1~#20-6	7.75	6	450
[Sub-array cable]			
#1~#5	46.5	35	48
#6~#10	46.5	35	48
#11~#15	46.5	35	48
#16~#20	46.5	35	48
[Array cable]			
#1	232.5	150	10
#2	232.5	150	34
#3	232.5	240	57
#4	232.5	240	81

표7과 그림8은 3가지 구성방안에 따른 DC 케이블 손실내역과 손실값을 비교 분석한 것이다.

표 7. 구성방안별 케이블 손실

구성방안	전선 굵기[mm <sup>2</sup> ] (F-CV 1C×2)	배선 길이 합계 [m]	케이블 손실[W]
Case 1	4	2,774	1,488
	6	4,918	1,758
	10	688	148
소계			3,394
Case 2	4	1,800	965
	16	98	473
	25	115	355
	35	219	483
	50	471	727
	70	195	215
소계			3,218
Case 3	4	1,350	724
	6	450	161
	35	192	424
	150	44	566
	240	138	1110
소계			2,985

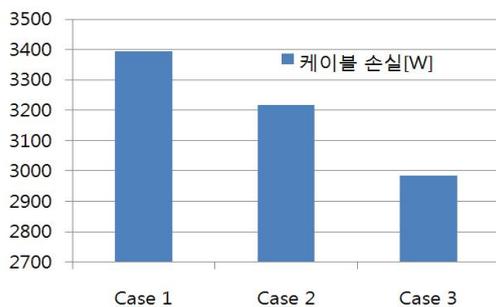


그림 9. 구성방안별 손실 비교

## 5. 결 론

태양광발전시스템의 설계에서 손실저감 노력을 통한 효율 개선 및 경제성 확보는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 대용량 태양광발전시스템의 DC 회로 손실을 분석하기 위하여 500kW급 PV 어레이의 구성 가능한 3가지 방안을 제시하였고 각 구성방안별로 소요 케이블 및 배선길이를 산출하여 이에 따른 케이블 손실을 비교 분석하였다.

PV 어레이의 구성방안별 DC 케이블 손실을 분석한 결과, 3가지 방안 중에서 2단 서브

어레이 구조를 갖는 Case 3의 경우가 손실이 가장 작은 것으로 나타났고, 이 결과는 PV 어레이 구성방법에 따라 DC 회로 손실의 크기가 달라질 수 있음을 보여준다.

또한 어레이 선로의 전압강하 설계기준을 1% 이상으로 설계했을 경우 실제 케이블 손실은 더 크게 되어 PV 어레이 설계 여하에 따라 회로 손실의 차이는 더욱 증가할 것으로 예상할 수 있다.

결과적으로 태양광발전시스템 용량 및 부지 여건을 고려한 적절한 서브 어레이 방식에 의한 PV 어레이의 구성은 시스템의 체계적인 관리가 가능할 뿐 아니라 전체 시스템의 효율을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 전력산업 인프라 구축사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

1. 조덕기 외, "국내 최대 경사면 일사량 분석" VOL. 29, NO. 1, 한국태양에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2009. 4. 10.
2. 이원교 편저, 전기설비의 설계 및 시공, 동일출판사, 1998.
3. IEC 62257-7-1, Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification, Part 7-1: Generators - Photovoltaic arrays.
4. 내선규정, 대한전기협회, 2006.
5. KSC IEC 60364-7-712 건축전기설비-제7부 712절 태양전지 전원시스템.
6. 신재생에너지설비의 지원·설치·관리에 관한 기준, 산업자원부 고시 제2008-3호.
7. 이현화, 저탄소 녹색성장을 위한 태양광발전, (주)도서출판 기다리, 2009.