creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000264158

2014年 2月 碩士學位論文

Micro Inverter를 이용한 태양광발전시스템의 효율개선

金氣炫

2014 年 2月
工學碩士學位論文

Micro Inverter를 이용한 태양광발전시스템의 효율개선

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

金 氣 炫

Micro Inverter를 이용한 태양광발전시스템의 효율개선

Efficiency Improvement of
Photovoltaic Systems Using Micro Inverter

2014 年 2 月 25日

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

金 氣 炫

Micro Inverter를 이용한 태양광발전시스템의 효율개선

指導敎授　曺 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2013 年　10月　　日

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

金　氣　炫

金氣炫의 碩士學位論文을 認准함.

委員長　朝鮮大學校　敎授　白 亨 來　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　崔 然 玉　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　曺 錦 培　印

2013 年　11 月　日

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

Ⅰ. 서 론 1

Ⅱ. 태양광발전의 기본원리 2

A. 태양복사에너지 2

B. 태양전지의 동작원리 4

Ⅲ. 태양광발전 시스템의 PCS 토폴로지 18

A. Power Conditioning System 18

B. PCS의 용도에 따른 분류 21

C. Micro Inverter 26

Ⅳ. 시뮬레이션 및 실험 결과 28

A. 실험 조건 28

B. Central 방식 시뮬레이션 31

C. Micro Inverter를 적용한 방식 실험 35

D. 시뮬레이션 및 실험 결과 검토 39

Ⅴ. 결론 40

참고문헌

감사의 글

List of Tables

Table 1 Classification of the PV system inverter topology ····· 22
Table 2 Hourly temperature in Gwangju area ····· 28
Table 3 Hourly solar radiation in Gwangju area ····· 29
Table 4 Solar array parameters ····· 30
Table 5 Power output of central type ····· 32
Table 6 Daily average power output of central type ····· 33
Table 7 Hourly average power output of central type ····· 34
Table 8 Daily power output of applied Micro-inverter ····· 36
Table 9 Daily average power output of applied Micro-inverter ····· 37
Table 10 Hourly average power output of applied Micro-inverter ····· 38

List of Figures

Fig. 1 Distribution of annual global solar radiation ····· 3
Fig. 2 Solar cell cross section ····· 4
Fig. 3 Short-circuit flow from the ideal ····· 6
Fig. 4 Short-circuit and open-circuit conditions the flow of carrier ····· 7
Fig. 5 The equivalent circuit of solar cell ····· 8
Fig. 6 Solar array module of the voltage-current curve ····· 11
Fig. 7 Parallel-connected solar array I-V characteristics curve ····· 12
Fig. 8 Serially connected solar array I-V characteristics curve ····· 13
Fig. 9 Irradiation according to the difference between V-I characteristics curve · 14
Fig. 10 The difference in the operating characteristics of resistance ····· 15
Fig. 11 The maximum voltage and maximum output of solar cell ····· 15
Fig. 12 MPP by the variable solar radiation ····· 16
Fig. 13 V-I characteristic according to temperature ····· 16
Fig. 14 Grid-connected PV system ····· 18
Fig. 15 Applications of Power conditioner ····· 19
Fig. 16 DC type PV system ····· 23
Fig. 17 AC type PV system ····· 23
Fig. 18 String type PV system ····· 24
Fig. 19 Multi String type PV system ····· 24
Fig. 20 Central type PV system ····· 25
Fig. 21 The Micro-Inverter operation principle ····· 26
Fig. 22 Applied to Micro inverter PV system ····· 31

Fig. 23 CAD drawing of the array ····· 31
Fig. 24 Condition setting screen ····· 31
Fig. 25 Daily average power output of central type ····· 33
Fig. 26 Hourly Average power output of central type ····· 34
Fig. 27 Applied to Micro inverter PV system(Front) ····· 35
Fig. 28 Applied to Micro inverter PV system(Back side) ····· 35
Fig. 29 PV system monitoring screen ····· 35
Fig. 30 Daily average power output of applied Micro-inverter ····· 37
Fig. 31 Hourly average power output of applied Micro-inverter ····· 38
Fig. 32 Compared to the average daily power output in Gwangju area ····· 39
Fig. 33 Compared to the average hourly power output in Gwangju area ····· 39

ABSTRACT

Efficiency Improvement of Photovoltaic Systems Using Micro Inverter

Kim, Ki-Hyun
Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.
Department of Electrical Engineering
Graduate School of Chosun University

The photovoltaic system is generally classified with the stand-alone photovoltaic system or grid-connected photovoltaic system. The distributed power generation system such as the photovoltaic system is normally connected to the grid system through the grid-connected inverter. The photovoltaic system is a clean energy source which can be available infinitely, and has a load leveling function as the distributed power generation system in the summer season of peak load. Because of the energy, recent photovoltaic system generates industry electricity and is used in the larger scale system. As the larger photovoltaic system's capacities are expanded, the higher reliability and efficiency are required to harvest much more energy.

Renewable energy resources are becoming an important part of a power generation in the recent years. In addition, they assist green house gases in reducing the emission. Also, by decreasing the dependence on fossil fuels, the renewable energy resources add flexibility being needed to the energy resource. Due to the fact that photovoltaic system's modular characteristics, they can be installed easily and located to users closely, so the system has the great potential as the distributed power source to the utilities.

The residential PV system adopts String PCS that is connected in series to a solar cell module which is in charge of the power conversion apparatus. However, if it is applied the micro PV inverter system which can be operated individually, efficiency for the equipment can be improved Also, when one inverter breaks down or maintain, another inverter operates so the loss of energy can be reduced.

In this paper, the micro-inverter type power generation is adopted, which is commonly applied to PV inverter method. The efficiency of the micro-inverter type was tried to verify by comparing the power performance under the same conditions.

I. 서 론

최근 대체 에너지원으로써 각광받고 있는 태양광발전 시스템은 햇빛을 반도체 소자인 태양전지 판에 쏘이면 전기가 발생하는 원리를 이용하는 것으로 무공해, 무소음의 무한한 에너지로서 대표적인 에너지 이용시스템의 하나이다. 이러한 태양광발전(Photovoltaic System)은 발전과정에서 환경오염이 없으며 설치대상 지역에 대한 제한이 적고 수명이 20년 이상 이기 때문에 석유자원의 고갈 및 환경오염 문제의 효과적인 대체 수단으로 기대를 받고 있으며, 이것을 해결할 수 있는 유력한 해답을 제시하고 있다.

태양광발전 시스템에서 발전된 전력은 직류 형태로 전기부하에 필요한 전력을 공급하거나 계통과 연계시키기 위해서는 고조파가 적은 양질의 교류전력으로 변환해야 한다. 이러한 역할을 하는 것이 PCS(PCS: Power Conditioning System)로 태양전지 어레이의 출력이 항상 최대 전력점에서 발전할 수 있도록 제어한다. 또한 계통과 연계시 계통 사고로부터 태양광발전 시스템과 계통을 보호하는 여러 가지 보호기능을 보유하고 있어야 한다.[1]

기존의 태양광발전 시스템에서는 직렬로 연결된 태양전지 모듈군을 하나의 전력변환장치가 담당하는 중앙 집중형 방식이 대표적이지만 MPPT 제어 및 스트링 다이오드에 의한 전력손실이 발생하고 시스템 확장 및 유지, 보수에 어려움을 갖고 있다. 하지만 최근에는 태양광 모듈마다 단일 인버터가 연결되는 구조인 모듈 집약형 컨버터 혹은 마이크로 인버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다.[2][3]

본 논문에서는 PV시스템에 일반적으로 적용되고 있는 중앙집중형 인버터 방식에 마이크로 인버터를 적용하여 동일 조건하에서 발전량을 비교 검토하고 마이크로 인버터를 적용한 방식이 기존 Central 발전방식보다 발전효율이 개선됨을 입증하고자 한다.

II. 태양광발전의 기본원리

A. 태양복사에너지

1. 에너지원으로서의 태양

태양으로부터 전자기파의 형태로 방출되는 태양에너지는 복사 형태로 에너지를 공급한다. 태양복사에너지는 태양의 핵에서 수소 원자가 헬륨으로 융합될 때 수소 질량의 일부가 에너지로 변환되면서 생성된다. 태양은 지구에서 매우 멀리 떨어져 있으므로 태양이 방출하는 에너지는 막대하지만 지구에 오는 것은 약 20억분의1에 지나지 않는다. 그 중 70%만 흡수되는데 세계 연간 에너지 소비량은 이 에너지의 겨우 1시간분에 불과하다. 이러한 태양 복사에너지는 1×10^{18}kwh/m^2로 계산된다. 태양복사에너지의 활용방법에는 태양열과 태양광 발전에 널리 이용이 되며 신재생에너지로서 무진장하며, 공해가 없고 지구대기의 열균형이 보존되는 등 인류에게 절대적인 에너지 원천이다. 산업시대에 주로 사용되는 에너지원은 한정되어 있다. 쉽게 추출할 수 있는 석유와 천연가스 보유량의 공급부족은 금세기의 30년 내로 도래할 것으로 예상된다. 새로운 대규모 보유량이 발견된다 할지라도 화석연료는 앞으로 수 년 내에 고갈될 것이다. 지표에 도달하는 태양 복사에너지량은 전세계 에너지 요구량의 약 10,000배다. 결과적으로 인류의 필요한 총 에너지량은 태양에너지의 단 0.01%면 되는 것이다.[4]

지구의 대기권 밖에서 태양복사 강도는 태양과 지구 사이의 거리에 따라 달라진다. 일년중에 태양복사 강도는 1.47×10^8km～1.52×10^8km까지 달라진다. 결과적으로 복사에너지 E_0는 1325w/m^2～1412w/m^2이다. 맑은 날 정오에 지표에 도달하는 복사량은 1000w/m^2에 달할 수 있다. 이 값은 상대적으로 위치와 관계가 없다. 최대일사량은 구름이 조금 낀 맑은 날에 발생한다. 태양 복사가 지나가는 구름에서 반사되어 일사량

은 단 기간에 1400w/m^{2}까지 도달할 수 있다. 그림 1은 세계 연간 태양복사 분포를 나타낸다.

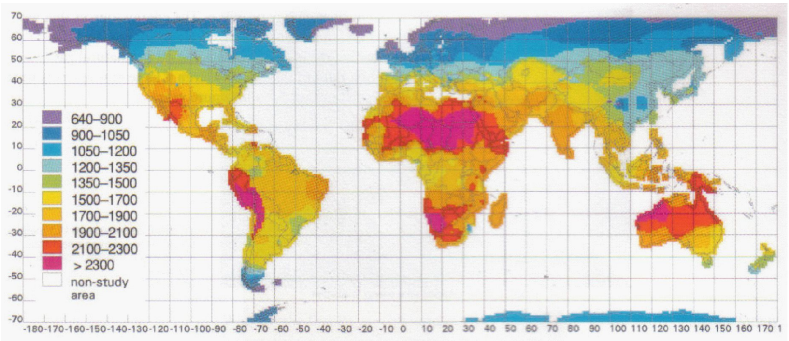


Fig. 1 Distribution of annual global solar radiation

2. 태양 고도와 태양 스펙트럼

태양복사강도는 태양 고도각에 의존하고, 지평선으로부터 측정된다. 태양이 하늘에서 움직임에 따라 고도각은 하루 동안 그리고 일년 중에 변한다. 태양고도가 지구와 수직을 이룰 때, 햇빛은 지구대기에서 최단경로를 취한다. 그러나 태양이 예각을 이룰 경우 대기를 통과하는 경로는 길어진다. 그 결과 태양복사의 흡수와 산란이 높아지고 따라서 복사강도는 감소한다. 대기질량(AM)인자는 햇빛이 대기의 수직 두께를 통과해야 하는 횟수를 지정한다. 태양의 고도각(높이)과 공기질량의 관계는 $AM=1/\sin\Theta$로 정의된다. 지구 대기의 영향을 받지 않는 우주에서의 태양복사는 AM0 스펙트럼으로 언급된다. 햇빛이 지구대기를 통과 할 때 복사는 대기에 의한 반사, 대기 중의 분자들에 의한 흡수(O_3, H_2O, O_2, CO_2), Rayleigh의 산란(분자산란), Mie의 산란 등으로 결과가 감소한다. 흡수와 레일리 산란은 태양 고도가 낮을 수록 증가하며, 대기중의 오염물질에 의한 산란은 위치에 따라 심하게 변하는데 산업지역에서 가장 크다. 구름, 강우, 강설 같은 지역 기상의 영향은 복사를 더욱 약화시킨다.[4]

B. 태양전지의 동작원리

1. 태양전지 구조

태양전지는 태양광을 전기로 변화시키는 하나의 전자 소자이다. 태양전지에 비치는 빛은 전력 생산에 필요한 전류와 전압을 생산한다. 태양전지 구조는 단결정 실리콘 태양전지의 경우 Si에 5 가 원소 (P, As, Sb) 등을 침투시켜 만든 N형 반도체와 3가 원소(B, Ga)등을 침투시켜 만든 P형 반도체로 이루어진 P-N접합 구조로 되어 있다.

우선 빛을 흡수하여 전자를 더 높은 에너지 상태로 올려주는 재료를 필요로 하고, 두 번째는 이 높은 에너지 상태의 전자가 태양전지에서 외부회로로 움직이는 것이 필요하다. 이후에 전자는 그 에너지를 외부회로에서 발산하고 태양전지로 돌아온다. 모든 태양전지는 p-n접합의 형태로 반도체 재료를 이용한다. 그림 2는 태양전지의 단면도를 나타낸다.[5]

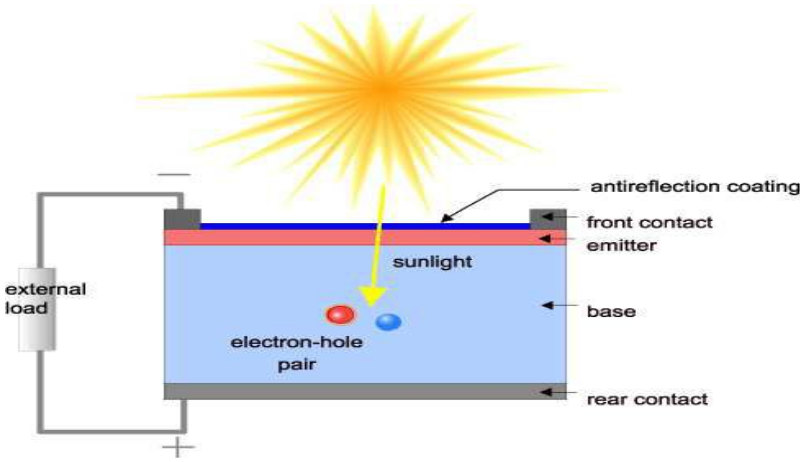


Fig. 2 Solar cell cross section

2. 광전류 생성 및 광전효과

광생성전류(light-generated current)로 알려진 태양전지에서의 전류의 생성은 2가지 과정을 포함한다. 첫 번째는 입사되는 광자(photon)를 흡수하여 전자-정공 쌍을 만들고, 입사되는 광자가 밴드갭 보다 큰 에너지를 가지면 전자-정공 쌍은 태양전지 내에서 만들어지게 된다. 그러나 전자, 정공들은 준안정 상태이고(meta-stable), 재결합하기까지 평균적으로 소수 캐리어의 수명과 같은 시간동안만 존재한다. 만약 캐리어가 재결합하면 빛에 의해 생성된 전자-정공 쌍은 소실되고 전류나 출력은 만들어지지 않는다.

두 번째는 p-n 접합에 의한 이들 캐리어들의 수집(collection)으로, 공간적으로 전자와 정공을 분리할 수 있는 p-n 접합을 이용하여 이 재결합을 방지한다. 캐리어들은 p-n접합에 존재하는 전기장의 작용으로 분리된다. 빛에 의해 생성된 소수 캐리어들이 p-n 접합에 도달하면 접합의 전기장에 의해 접합을 가로질러 신속하게 지나가는데, 그 후에는 다수 캐리어가 된다. 태양전지의 p형과 n형이 연결되어 있으면(태양전지의 단락) 빛에 의해 생성된 캐리어들은 외부회로를 통해 흐르게 된다. 그림 3은 단락회로에서의 이상적인 흐름을 보여준다. 그림 3의 (a)는 p-n 접합을 나타내고 (b)는 포톤이 흡수되어 전자-정공 쌍이 생성되는 과정이다. (c)는 이상적으로 소수 캐리어가 p-n 접합을 통과하여 하나의 다수캐리어가 되는 과정을 나타낸다. (d)에서 부하를 통과한 후에 전자는 하나의 정공을 만나 회로를 완성한다. 여기서 전자와 정공의 이상적인 단락회로 흐름에서 소수 캐리어들은 반도체-금속 경계를 건널 수 없고, 소수 캐리어들이 재결합 되지 않고 전류 흐름에 기여하기 위해서는, 접합에 의해 수집되어야(collected) 한다.

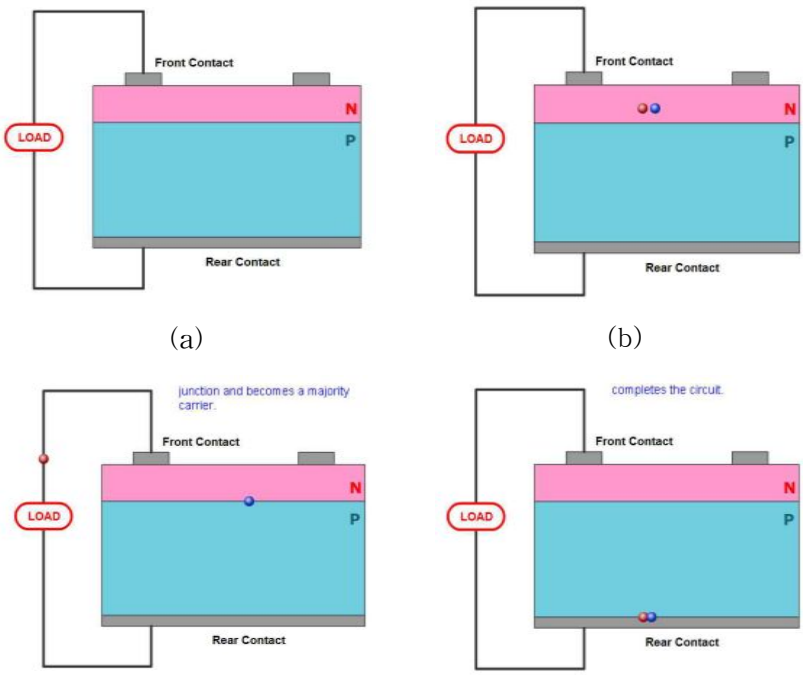


Fig. 3 Short-circuit flow from the ideal

광생성 캐리어들은 수집하는 것만으로는 출력을 만들 수 없으므로 출력을 생산하기 위해서는 전류뿐만 아니라 전압도 생산되어야 한다. 태양전지에서 전압은 광전효과(photovoltaic effect)라고 알려진 프로세스에 의해 만들어 진다. p-n 접합에 의한 광생성 캐리어들의 수집은 전자들이 n형 쪽으로, 정공들이 p형 쪽으로 이동하게 만든다. 단락회로 조건하에서는 전하들이 축적되지 않는데, 이는 캐리어들이 광생성 전류로 소자를 빠져나가기 때문이다.

그러나 광생성 캐리어들이 태양전지를 빠져나가지 못하면 광생성 캐리어들의 수집에 의해 p-n 접합의 n형 쪽에는 전자들이, p형 쪽에는 정공들의 개수가 증가하게 된다. 이렇게 전하들이 분리되면 접합에서 전기장이 형성되는데, 접합에 기존에 존재하던 전기장과는 반대 방향으로 형성됨에 따라 결과적으로 전기장이 감소하게 된다. 전기장은

순방향 바이어스 확산전류 흐름의 장벽이기 때문에, 전기장이 감소하면 확산전류가 증가하게 된다. p-n 접합에 걸쳐 하나의 전압이 존재하게 되면서 여기에 새로운 평형이 구축된다. 개방전압 조건하에서는 광생성 전류가 순방향 바이어스 확산전류와 완전히 같아지는 점까지 접합의 순방향 바이어스가 증가하고, 전류는 제로이다.

이들 2개의 전류를 같아지게 만드는 전압을 개방전압(open-circuit voltage)이라 한다. 그림 4는 단락과 개방 회로 조건에서의 캐리어 흐름을 보여준다.[6]

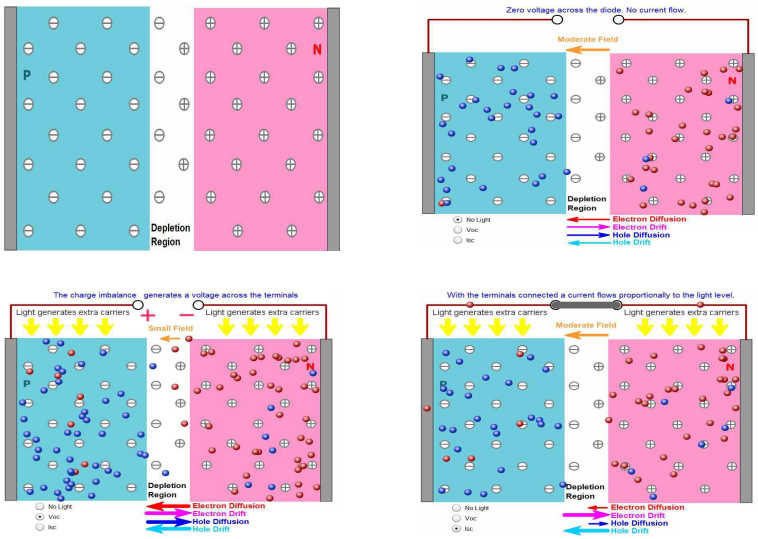


Fig. 4 Short-circuit and open-circuit conditions
the flow of carrier

3. 태양전지의 전기적 특성

태양전지의 모듈을 이해하기 위해서는 먼저 태양전지 특성에 대해서 자세히 알아야 하는데, 태양전지 특성이란 태양전지 모듈에 입사된 광 에너지가 변환되어 발생하는 전기적 출력의 특성을 전압-전류 특성이라 한다. 태양전지의 모델링은 한 개의 이상적

인 다이오드와 I_{ph}의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있지만 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet) 저항 등을 표시하는 직렬저항 R_S와 병렬저항 R_{sh}를 고려한다. 태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수 함수적으로 감소한다. 그림 5는 빛이 조사될 때 광기전력효과를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다.

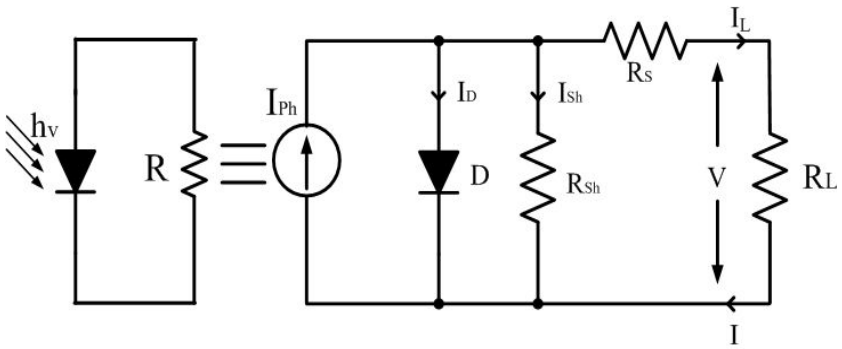


Fig. 5 The equivalent circuit of solar cell

여기서 I_{ph}는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(carrier)가 외부로부터 방해를 받지 않을 때 폐회로를 통해 흐르는 광전류이고, I_d는 암전류로서 I_{ph}와는 반대 방향이다. 병렬저항 R_{sh}는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s와 R_L 각각 전지 내부에 존재하는 직렬저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타낸다. 등가회로에서의 태양전지의 출력전류는 식 (1)과 같다.

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V}{R_{sh}} = I_{ph} - I_0\left(\frac{\exp qV}{nKT} - 1\right) - \frac{V}{R_{sh}} \qquad (1)$$

그리고 출력전압은 식 (2)과 같다. 여기서, I_O는 다이오드 포화전류이다.

$$V_d = V + IR_s = \left[\frac{nKT}{q\ln}\left\{(I_{ph} - \frac{I}{I_o}) + 1\right] + IR \qquad (2)$$

식 (2)로부터 태양전지의 출력전류를 구하면 식(3)과 같다.

$$I = I_{Ph} - I_0[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{nKT}\right) - 1] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \tag{3}$$

그림 5에서 광을 조사하는 경우에 $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$인 이상적인 P-N접합 다이오드인 경우 부하에 흐르는 전류 I_L은 식(4)과 같다.

$$I_L = I_{Ph} - I_0[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1] \tag{4}$$

여기서, I_L은 출력전류, I_{Ph}는 광전류, I_0는 다이오드 포화전류, n은 다이오드 상수, K는 볼쯔만 상수이고 q는 전자의 전하량이다. 개방 전압 V_{oc}, 단락전류 I_{sc}, 충진율 FF (Fill Factor) 등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련되는 파라미터로서 식(4)로부터 $I_L=0$인 조건에서 V_{oc}는 식 (5)와 같다.

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} ln\left(\frac{I_{Ph}}{I_0} + 1\right) \tag{5}$$

단락전류 I_{sc}는 $V_L=0$인 조건으로부터 $I_{sc}=I_{ph}$가 된다.

전지에 연결된 부하저항의 크기를 조정함으로서 어떤 최적 동작점에서 최대의 출력 P_{max}는 식 (6)과 같다.

$$P_{max} = V_{mpp} \cdot I_{mpp} = FFV_{oc}I_{sc} \tag{6}$$

부하저항에서 소비되는 에너지 P_{out}은 식 (7)과 같다

$$P_{out} = V \cdot I_L = V \cdot \left\{ I_{ph} - I_0 [\exp(\frac{qV_L}{nkT}) - 1] \right\} \tag{7}$$

최적부하조건에서 $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$ 이므로 최적동작전압 V_m은 식 (8)과 같다.

$$V_m = \exp(\frac{qV_m}{nkT})(1 + \frac{qV_m}{nkT}) = (\frac{I_{ph}}{I_0}) + 1 \tag{8}$$

또한 이때의 최적동작전류 I_m 은 식 (9)와 같다.

$$I_m = \frac{(I_{ph} + I_0) \cdot (qV_m / nkT)}{1 + (qV_m / nkT)} \tag{9}$$

$P_{\max}$를 크게 하기 위해서는 특성곡선에서 I_m과 V_m이 I_{sc}와 V_{oc}에 가까워야 함을 알 수 있다. 태양전지의 특성을 평가하는데 있어서 단락전류, 개방전압과 더불어 가장 중요한 요소 중의 하나는 충진율이며 식 (10)과 같다.

$$FF = \frac{V_m}{I_m} / \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \tag{10}$$

태양전지의 에너지 변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광에너지로 나눈 값으로 다음 식 (11)과 같다.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \times I_{SC}}{P_{in}} \times FF \tag{11}$$

여기서, P_{in}은 입사된 태양광 에너지이다. 따라서 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 단락전류 I_{sc}, 개방전압 V_{oc}, 그리고 충진율 FF를 높여야 한다.

지금까지 태양전지의 특성을 고찰한 결과 전기적 특성을 결정하는 요소는 내부적인 변수로서 내부직렬저항 R_s, 내부병렬저항 R_{sh} 그리고 다이오드포화전류 I_0이고, 외부적인 변수로서는 일사량과 온도의 변화 등이 있다. 여기서 내부 직렬저항은 태양전지에 광전류가 흐를 때 전류의 흐름을 방해하는 저항값으로 N층 표면저항, P층 기판저항, 전극 접촉저항 및 전극자체의 고유저항 등이 포함되고 최대의 효율을 얻기 위해서는 직렬저항 값이 최소로 되어야 한다. 또한 일반적으로 태양전지의 출력특성은 주로 일사량을 비롯한 태양전지 표면의 청결상태 및 태양전지의 표면동작온도 등 태양전지 어레이측의 주위여건에 크게 좌우된다. 태양전지의 전류는 일사량에 비례하여 결정되고 온도변화에 대해서는 거의 영향을 받지 않으며, 태양전지의 전압은 일사량 변화에 영향을 받지 않지만 온도변화는 태양전지의 전압과 반비례하는 성질을 가지고 있다.

태양전지의 특성을 알아보는 I-V 특성곡선은 그림 6에 나타내었다. 또한 그림 6 중에 표시되어 있는 각 점의 표시 부분을 기준상태로 하여 다음과 같은 의미로 설명할 수 있다.

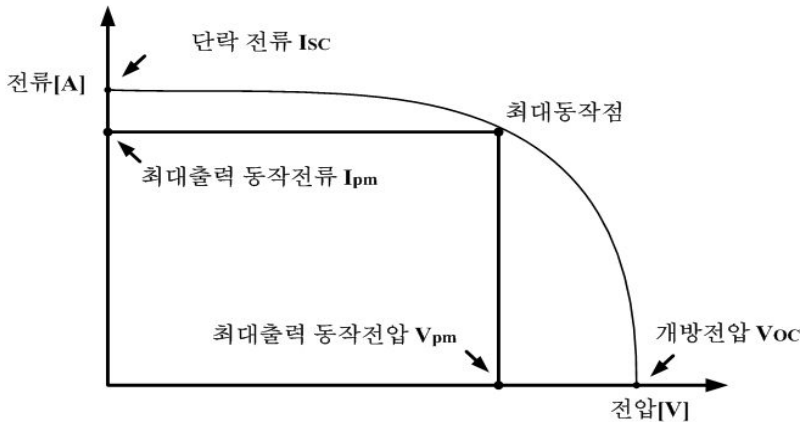


Fig. 6 Solar array of the voltage-current curve

그림 6에 나타나 있는 부분 중 최적 동작점이란 최대출력이 얻어지는 동작점을 말하며, 그때 최대출력 P_m은 I_{pm}과 V_{pm}의 적으로 얻어진다. 현장에 설치된 태양전지의 동작을 보면 태양전지에 연결된 부하의 조건이나 방사조건에 의해서 좌우되기 때문에

실제 동작점은 그림 6에서 나타낸 최적 동작점에서 약간 벗어나게 된다. 또한 태양전지의 출력은 태양의 방사조도, 광원의 종류나 온도 등 여러 가지 자연조건에 의해 좌우된다. 따라서 태양전지의 출력특성을 평가하는 경우에는 태양광의 방사조도와 분광분포를 모의 시험한 시뮬레이션과 옥내에서의 측정을 표준 측정방식으로 하고 있다.

두 개의 태양전지가 동일한 전기적 특성을 갖고 동일한 일사강도를 갖으며, 병렬로 연결된 태양전지의 출력특성은 그림 7과 같이 한 개의 태양전지와 동일한 출력 전압값을 갖는다.

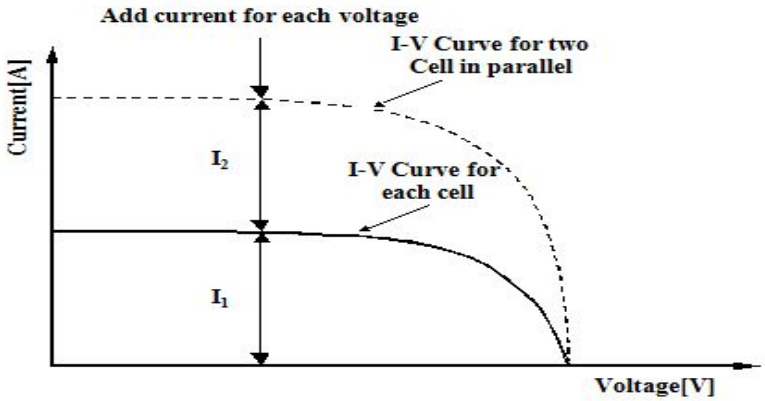


Fig. 7 Parallel-connected solar array I-V characteristics curve

이때의 I-V특성곡선은 일정전압의 크기에 전류만 2배로 증가된 형태를 갖는다. 즉 개방전압은 변하지 않고 단락전류만 2배로 증가한다. 그리고 여러 개의 태양전지가 병렬로 연결될 경우 태양전지의 합성 출력전류는 식(12)와 같이 된다.

$$I_a = N_p I_c \tag{12}$$

여기서 N_P는 병렬 연결된 태양전지의 수이고 I_c는 출력전류이다.

그러나 태양전지에 일사조건의 차이 혹은 태양전지에 파손이 생긴 경우에는 그 동작특성이 큰 차이가 난다. 식 (13)은 셀의 출력전류를 나타낸다.

$$I_c(V) = I_L - I_o(V_o) \tag{13}$$

여기서 I_L은 광전류이고 $I_o(V_o)$는 다이오드 포화전류이다.

일사량 강도의 차이에 따라 태양전지에 미치는 출력전류의 변화는 식 (14)와 같다.

$$I_c(V) = KI_L - I_o(V_o - \Delta V) \tag{14}$$

음영상태에 따라 직렬저항에 인가된 전압의 변화분은 식 (15)와 같다.

$$\Delta V = (1-K)I_L R_s \tag{15}$$

여기서 K 는 일사상수 (음영정도에 따라 0<K<1의 범위)이다.

그림 8은 두 개의 태양전지가 동일한 전기적인 특성을 갖고, 동일한 일사강도를 갖는 경우의 직렬로 연결된 태양전지의 출력특성을 나타내고 있다.

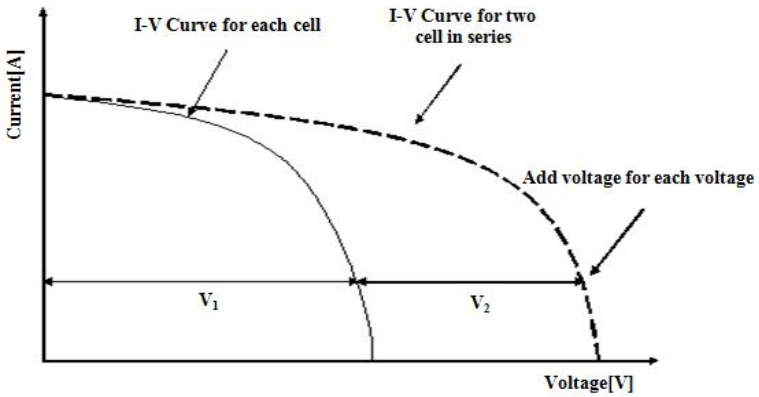


Fig. 8 Serially connected solar array I-V characteristics curve

두 개의 태양전지 양단에는 하나의 태양전지에서 발생된 전류의 크기가 두 개의 태양전지 양단에 흐른다. 이때 I-V특성곡선은 한 개의 태양전지에서 발생된 전류의

크기에 전압만 2배로 된 특성곡선을 갖는다. 즉 단락전류는 변하지 않고 개방전압만 2배로 증가된 특성을 갖는다. 그리고 여러 개의 태양전지가 직렬로 연결될 경우 태양전지의 출력전압은 식 (16)과 같다.

$$V_a = N_s V_c \tag{16}$$

여기서 N_s 는 직렬 연결된 태양전지의 수이고 V_c는 출력전압이다.

일반적인 태양전지는 일사량변화에 대하여 그림 9와 같은 전류-전압 특성을 갖고 있다. 일사량 변화에 따라 출력전압의 변화는 미소하지만 단락전류는 크게 변화되는 것을 알 수 있다.

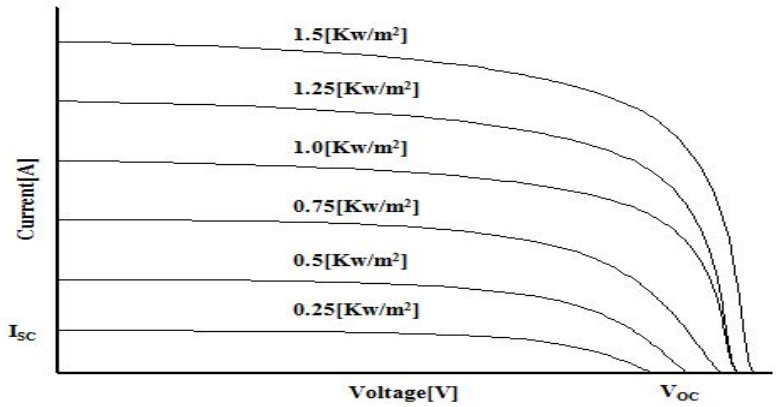


Fig. 9 Irradiation according to the difference between V-I characteristics curve

이러한 태양전지에 저항부하를 연결하여 개방상태에서 단락상태로 서서히 저항을 가변 하면 그림 10과 같이 태양전지의 전압, 전류의 변화를 볼 수 있다. 즉, 개방상태에서는 전류가 0[A]이고, 이때의 전압값을 개방전압(V_{OC})이라 한다. 저항값을 감소시키면 전류는 증가하는 반면 전압은 감소하며 곡선부분에서는 전압의 감소가 적으며 일반적인 건전지의 정전압원 특성을 나타낸다. 저항값을 더욱 감소시켜 단락상태로 근접

시키면 전류의 변화는 적어지며 정전류원 특성을 나타낸다. 저항을 0으로 하면 완전 단락상태로 전압은 0[V] 이며, 이때의 전류를 단락전류 (Isc) 라 한다.

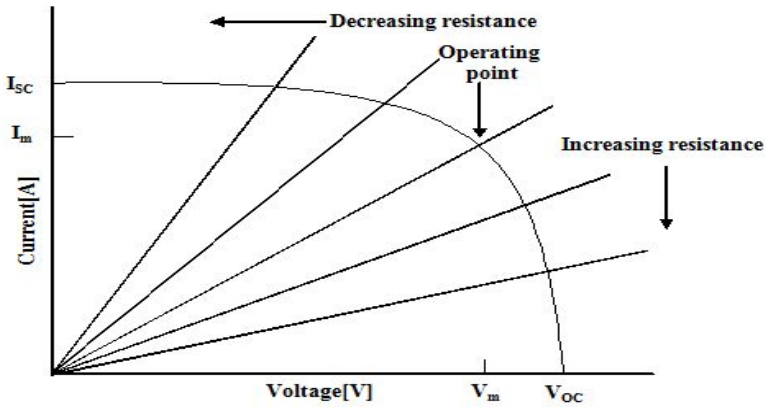


Fig. 10 The difference in the operating characteristics of resistance

태양전지의 출력전력은 출력전압과 출력전류의 곱으로 계산되며 그림 11과 같이 포물선의 형태로 나타나며, 태양전지에는 출력전력이 최대가 되는 점이 존재한다.

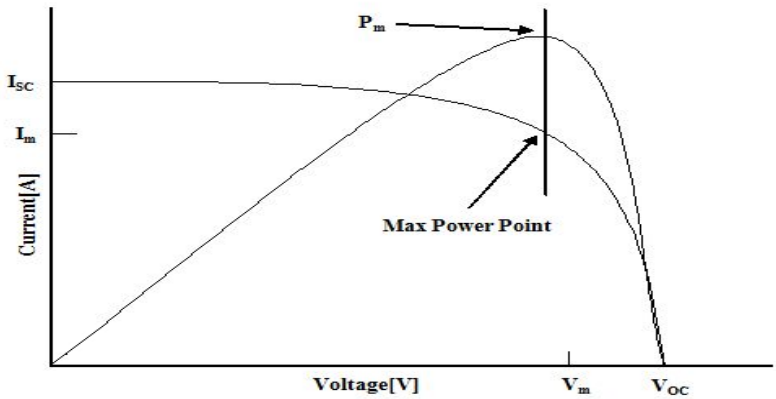


Fig. 11 The maximum voltage and maximum output of solar cell

전류-전압 특성곡선에서도 출력이 최대가 되는 동작점이 일사량 변화에 따라 그림 12와 같다. 출력전력이 최대가 될 때의 전압을 최대출력 동작전압 V_{mp}, 전류를 최대출력 동작전류 I_{mp} 이라 한다.

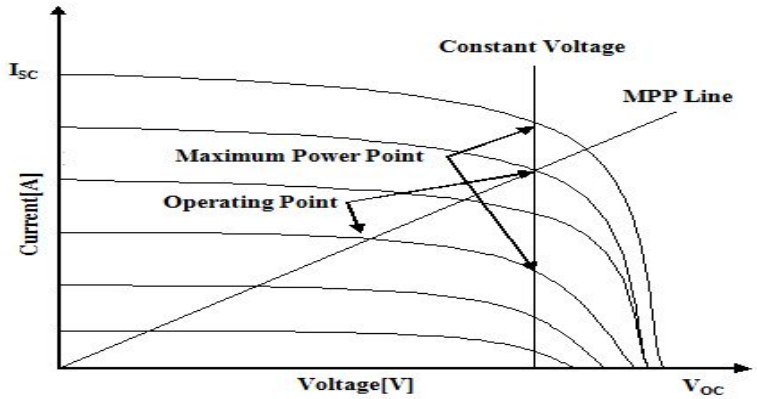


Fig. 12 MPP by the variable solar radiation

또한 태양전지는 온도에 의존하는 특성을 가지고 있다. 그림 13은 온도변화에 따른 태양전지의 전류-전압특성을 나타내고 있으며, 온도변화에 따라 전류는 미소하게 변하고 있지만 출력전압은 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

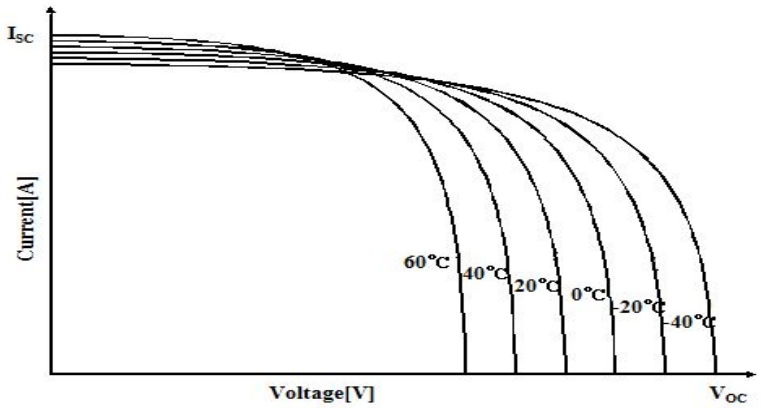


Fig. 13 V-I characteristics according to temperature

태양에너지는 분광에 의해 나타나는 각 파장에 따라 그 에너지 분포가 결정된다. 이러한 특성은 일정한 에너지갭 이상의 에너지만을 흡수하는 태양전지의 특성을 말한다. 일사량이 모두 태양전지에 흡수되어 이용된다면 태양전지의 온도는 외기온도와 같게 된다. 그러나 어느 에너지 값 이상의 일사에너지만을 흡수하는 특성으로 인해 흡수되지 않는 에너지는 열로 변환되어 손실로 나타나고, 열에너지가 태양전지의 온도를 상승시켜 내부 저항을 크게 하여 효율을 감소시킨다.

일사량 및 온도 조건을 고려한 최대 출력식은 식 (17)과 같다.

$$P_m(t) = P_m \times Q \times [1 + \alpha(t-25)] \tag{17}$$

여기서, $P_m(t)$는 동작조건에서의 최대출력, P_m는 정격 출력(온도 25℃, 일사강도 1(kw/m^2), Q는 동작조건에서의 일사강도(kw/m^2), t는 동작조건에서의 태양전지 표면온도(℃), α는 온도 계수 -0.005/℃이다.

온도와 일사량에 따른 단락전류의 관계는 식 (18)과 같다.

$$I_{sc}(t) = I_{sc} \times Q \times 1/[1 - \beta(t-25)] \tag{18}$$

여기서, $I_{SC}(t)$는 동작상태에서의 동작전류, I_{SC}는 표준상태에서의 단락전류(1kw/m^2, 25℃), Q는 동작조건에서의 일사강도(kw/m^2), β는 단락전류의 온도 계수(0.003/℃)이다. 온도와 일사량에 따른 개방전압의 관계는 식 (19)와 같다.

$$V_{oc}(t) = V_{oc} \times [1 - \gamma(t-25) - \delta(1-Q)] \tag{19}$$

여기서, $V_{OC}(t)$는 동작상태에서 개방전압 V_{OC}는 표준상태에서 개방전압(1kw/m^2, 25℃), γ는 개방전압의 온도 계수(-0.00377/℃), δ는 개방전압의 일사량 계수[0.000475/(kw/m^2)]이다.[4][7]~[10]

III. 태양광발전 시스템의 PCS 토폴로지

A. Power Conditioning System

1. PCS의 개요

PCS는 태양전지에서 출력된 직류전력을 교류전력으로 변환하고, 전력계통(특고압 22.kV, 저압 220/380V로 공급)에 역송전하는 장치이며, 건축물 등에 적용하는 계통연계형의 경우에는 교류계통에 접속되는 부하설비에 전력을 공급하는 장치를 말한다. 또한 PCS는 태양전지의 발전 전력을 최대한 효율을 높게 교류로 변환하여 제어를 함과 동시에 일반 배전계통과 연계운전을 하기 때문에 계통 전압에 노이즈나 외란이 유입될 경우 계통의 사고는 빠르게 차단되어야 한다. 그림 14는 일반적인 계통 연계형 태양광 발전 시스템이다.

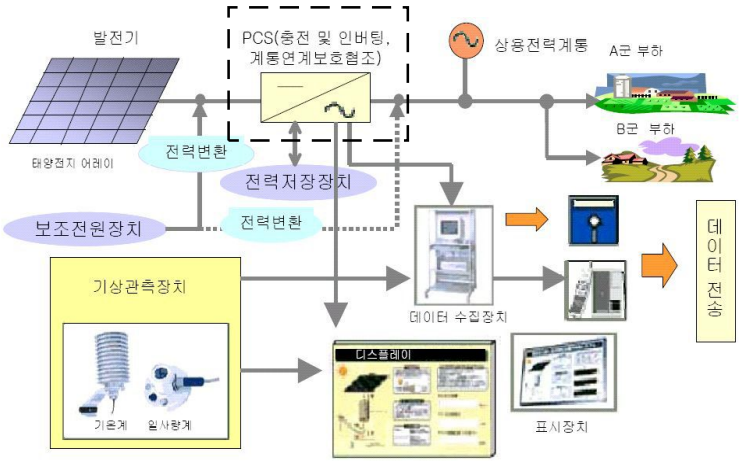


Fig. 14 Grid-connected PV system

태양광 발전 PCS 기술은 전력전자기술을 구사하는 기술로서 고성능 전력용 반도체소자의 개발, New-Topology를 채택한 회로방식 및 마이크로프로세서 등의 기술발전에 의해 전력전자기술은 눈부신 발전을 하게 되어 고효율의 응답성이 뛰어난 전력변환이 가능하게 되었다. 이 때문에 일반산업, 전기철도, 전력계통, 가전·민생기기, 정보기기, 전기자동차, 신재생에너지 특히 태양에너지를 이용한 분산전원용 태양광 발전 PCS 등 전력을 이용하는 모든 분야에서 태양광 발전 PCS 기술이 도입되고 있다. 그림 15은 PCS의 대표적인 응용 사례를 나타낸다.[11]

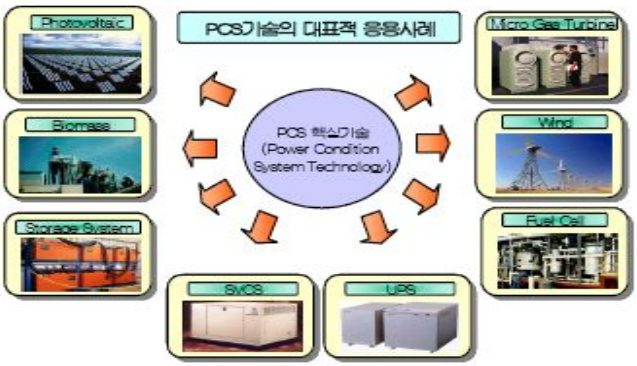


Fig. 15 Applications of Power Conditioner

2. PCS의 기능

PCS는 직류를 교류로 변환할 뿐만 아니라 태양전지의 성능을 최대로 높게 발생시키기 위한 기능과 이상 및 고장시를 위한 보호기능을 종합적으로 갖추고 있다. 태양광발전시스템을 설치한 지역의 기후에 따라서 변동하는 태양전지의 출력을 될 수 있는 한 유효하게 출력하기 위하여 PCS 내부에 자동운전 정지 기능과 최대전력 추종제어 기능이 있고, 전력계통보호를 위하여 단독운전 보호기능과 자동전압 조정기능이 있으

며, 계통이나 PCS에 이상이 발생할 때 안전하게 분리하거나 인버터를 정지 시키는 기능도 있다.

자동운전 정지 기능은 일출과 함께 일사강도가 증대하여 출력이 발생되는 조건이 되면 자동적으로 운전을 시작하게 된다. 일단 운전을 시작하게 되면 태양전지의 출력을 자체적으로 감시하여 자동적으로 운전을 계속 하게 된다. 해가질 때도 출력이 발생되는 한 운전을 계속하며 일몰시에 운전을 정지하게 된다. 흐린 날이나 비오는 날에도 운전을 계속할 수는 있지만 태양전지 출력이 적게 되고 PCS 출력이 거의 0이 되면 대기상태로 되는 기능을 말한다..

단독운전 방지 기능은 태양광발전시스템이 계통에 연계되어 있는 상태에서 계통측에 정전이 발생한 경우 부하전력이 PCS의 출력전력과 동일하게 되는 경우에는 PCS의 출력전압, 주파수는 변화하지 않고 전압·주파수 계전기에서는 정전을 검출할 수 없다. 때문에 계속해서 태양광발전시스템에서 계통에 전력이 공급될 가능성이 있다. 이 같은 운전 상태를 단독운전이라 한다.

최대전력 추종제어 기능으로 태양전지의 발생전력은 일사량, 태양전지의 소자온도 및 동작온도 등에 의존하고, 에너지 변환효율은 12~13[%] 정도로 매우 작은 편이다. 그러므로 시스템을 소형화하여 손실을 줄여야 하며, 가능한 한 태양전지로부터 많은 에너지를 끌어내어 효율을 증대시켜야 한다. 태양전지 어레이의 최대전압은 일사량과 온도, 부하상태에 의해서 시시각각으로 변하기 때문에 태양전지 특성이 변화하지 않아도 동작점이 변하게 되어 최대출력을 얻을 수 없다. 따라서, 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서는 태양전지 어레이의 출력을 항상 최대전력점에서 동작시키는 제어가 필요하며 이러한 태양광발전시스템의 최대출력제어를 MPPT(Maximum Power Point Tracking)라 한다. MPPT는 PCS의 직류동작전압을 일정시간 간격으로 약간 변동시켜 그때의 태양전지 출력전력을 계측하여 사전에 발생한 부분과 비교를 하게 되고 항상 전력이 크게 되는 방향에 PCS의 직류전압을 변화시킨다. 이같이 최대 추종출력제어는 출력전력의 증감을 감시하여 항상 최대 출력점에서 동작하도록 제어하는 것이다.[12]

B. PCS의 용도에 따른 분류

태양광발전시스템 PCS는 용도나 쓰임, 태양전지 모듈의 조합에 따라서 MIC (Module Integrated Converter), 스트링(String), 멀티 스트링(Multi-string), 멀티센트럴 (Multi-Central) 인버터로 분류할 수 있다.

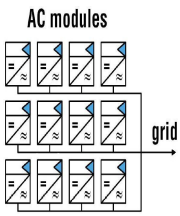
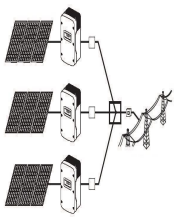
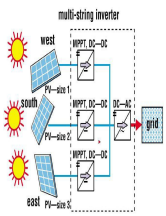
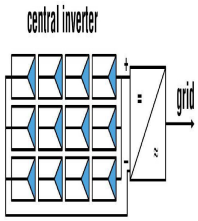
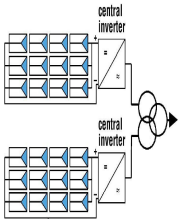
MIC는 PV 모듈에 소형의 DC-AC 변환장치를 장착하여 각각의 PV모듈이 직접 계통과 연계되는 방식이다. 따라서 MIC는 DC 배선이 불필요하며, 각 MIC는 하나의 태양전지 모듈 출력만을 부담하기 때문에 사용되는 소자의 정격이 작다는 장점을 갖는다.

스트링 인버터는 분산형 방식으로써 인버터와 PV 모듈이 직렬로 연결된 형태이다. 센트럴 인버터에 비해 설치 비용의 절감과 유지 보수가 편리한 장점이 있으며, 스트링 그룹 단위로 개별적인 최대 전력점을 추종할 수 있어 에너지 손실이 작고 그룹별로 다른 종류의 모듈을 사용 할 수 있다.

센트럴 인버터는 중앙 집중형 방식으로 인버터와 스트링으로 이루어진 태양광 모듈이 직렬과 병렬로 연결된 형태이다. 단일 인버터로 구성되어 있어서 각 태양광 모듈의 최대 전력점을 추종할 수 없기 때문에 전력 손실이 크다. 그리고 태양광 어레이에 음영이 생기면 다른 인버터에 비해 손실이 크며, 높은 직류 전압으로 인해 안전 문제도 크다. 하지만 단일 인버터를 사용하므로 초기 설치 비용을 줄일 수 있고, 대전력화가 가능하다는 장점이 있다.

전력용 반도체 소자와 필터의 개발로 인해 효율성이 개선되고, 태양광 어레이와 PCS 부품 가격이 저렴해지면서 태양광 발전의 대용량화가 가속화 되고 있는 추세이다. 멀티센트럴 인버터는 주로 발전용으로 사용되며, 센트럴 인버터를 병렬로 연결한 형태로 시스템의 효율 성능, 안전성을 개선한 발전시스템이다. 지금까지 살펴본 토폴로지 각각의 특징과 장점, 단점은 표 1과 같다.[12]

Table 1. Classification of the PV system inverter topology

	MIC (50~400w)	String (0.7~4kW)	Mult-String (4~100kW)	Central (50~500kW)	Mult-Central (500kW이상)
용도	가정용		산업용/발전용		
구조					
	-각각의 PV모듈이 계통과 직접 연계	-PV모듈이 직렬로 연결	-String 모듈이 직렬과 병렬로 연결	-String으로 이루어진 PV모듈이 직렬과 병렬로 연결	-Central 인버터를 병렬로 연결
특징	- 모듈별 MPPT, - 모듈별 DC/AC인버터 제어	- 모듈군별 MPPT - 모듈군별 DC/AC인버터 제어	- 모듈군별 DC/DC컨버터 사용 및 단일 DC/AC 인버터 제어	전체 모듈을 하나의 군으로 취합하여 단일 DC/AC 인버터 제어	Central 구조를 보완한 형태로 시스템 효율 및 성능 개선
장점	-소자 정격이 작다 -DC배선 불필요	-부분적인 그늘에 대해 우수	-부분적 그늘시 String보다 우수	-초기 설치비용 감소 -대전력화 가능	-시스템 종합 효율 높다. -대규모 발전에 유리
단점	-효율낮다 -단위전력당 발전비용이 높다	-정격 전력이 낮다	-2중 전력변환 방식으로 효율이 낮음	-유지·보수시 발전 불가능	건설비 고가

1. Module-Integrated 발전방식

태양광 모듈 직접형 발전방식은 DC모듈 방식과 AC모듈 방식으로 분류된다. 그림 16은 DC모듈 방식이고, 그림 17은 AC모듈 발전 방식을 보여준다. 각각의 태양전지 모듈은 소용량의 DC/AC 변환기를 통하여 최대 전력점에서 운전되기 때문에 부정합 문제에 강인한 특성을 갖는다. AC모듈 방식은 각각의 태양광 모듈마다 인버터를 장착한 구조로 각각의 모듈에서 최대 전력 제어를 할 수 있으며 직류 배선이 요구 되지 않고, 보호 같은 것을 할 필요가 없어 DC모듈 방식에 비해 유리한 특성을 갖는다.

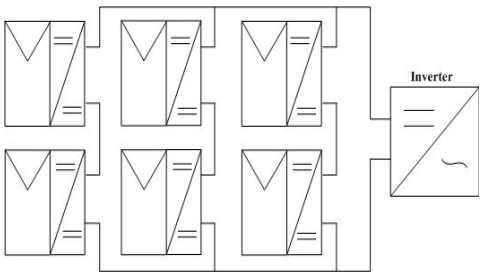


Fig. 16 DC Module-integrated type PV system

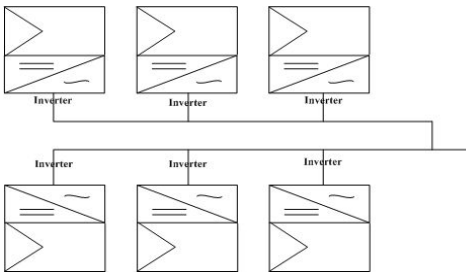


Fig. 17 AC Module-integrated type PV system

2. String 발전방식

그림 18은 String 발전 방식으로 태양전지 모듈이 직렬로 연결되어 인버터에 연결되어 있으며 인버터의 출력이 병렬 연결되어 있는 구조이다. 장점으로는 직렬 연결된 모듈 내에서 최대 출력제어가 가능하므로 에너지 출력이 높다는 것이며 단점으로는 태양전지 모듈이 직렬 연결되므로 직류버스 전압이 실제적으로 제한되어 인버터의 정격용량 또한 제한된다는 점이다.

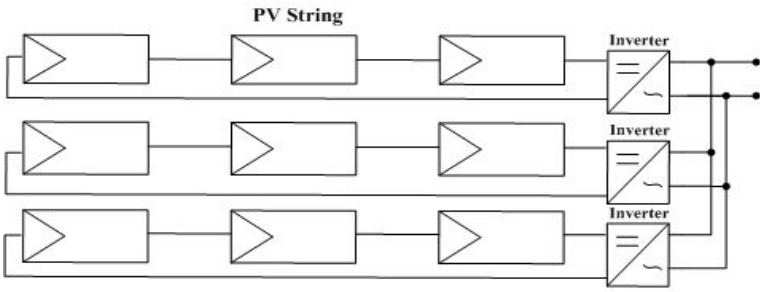


Fig. 18 String type PV system

3. Multi-String 발전방식

그림 19는 Multi-String 발전방식을 보여주고 있다. 이는 인버터 자체가 병렬 연결된 구조가 아니라 각각의 직렬 연결된 태양광 모듈에 최적제어하기 위한 직류변환 컨버터가 장착되어 하나의 인버터에 직류전원을 공급하는 구조이다. String 인버터 구조에서와 같이 각각의 직렬 연결된 태양광 모듈에 최대 전력제어를 할 수 있고, 인버터가 통합되고 시스템 모듈제어 유닛 하나만 사용할 수 있으므로 전체적으로 최대전력을 이끌어 낼 수 있으면서도 전체 단가를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 그러나 대용량 시스템에 적용하기에는 DC/DC 컨버트의 효율이 높은 구조를 가져가거나 사용하지 않는 다른 방법을 구현해야 하는 단점이 있다.

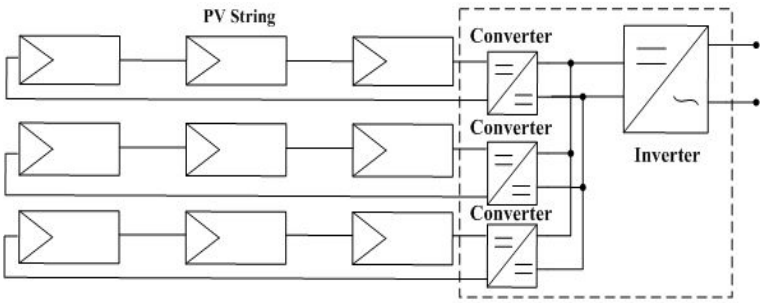


Fig. 19 Multi String type PV system

4. Central 발전방식

그림 20은 대용량 발전 시스템에 주로 상용되는 중앙 집중식 발전방식을 보여주고 있다. 태양전지 모듈이 직류측에 직병렬로 연결되고 인버터는 중앙에 하나가 설치되어 있는 구조이다.

장점으로는 인버터 용량에 제한이 없다는 것이며 단일 모듈로 제작됨에 따른 제작 단가가 낮다는 점이다. 단점으로는 직류 단을 연결하는데 비용이 고가이며 태양광 모듈이 직병렬로 연결되어 있어 모듈간 조사량의 차이로 인해 태양광 모듈 전체가 최대 전력제어가 이루어지지 않을 수 있다는 것이다.[13]~[15]

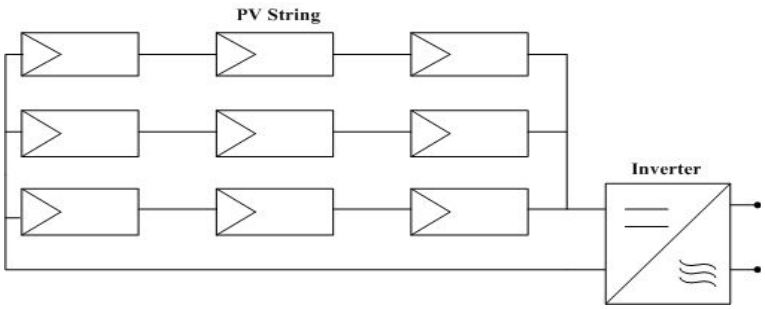


Fig. 20 Central type PV system

C. Micro Inverter

1. Micro Inverter

최근 태양광 인버터의 프론트엔드를 모듈로 이전하는 방식이 늘고 있으며, 이러한 방식은 Micro Inverter를 적용한 발전 방식이다. Micro Inverter매우 안정적인 출력 전압을 제공해 설치 범위를 좁힐 수 있어 더 높은 효율을 가능하게 한다.

그림 21은 Micro Inverter의 동작 원리는 회로로 나타낸 것이다. Micro Inverter는 고주파 DC link 토폴로지와 듀얼 DSP컨트롤러를 적용하여 전체 부하 범위 동안 소프트 스위칭을 위한 정밀 가변주파수제어를 실시한다.

Micro Inverter가 각각의 태양광 모듈마다 단일 인버터가 연결되고, 이를 통해 독립적인 MPPT 운전이 가능하여 효율을 극대화 할 수 있다. 그리고 간단한 병렬 운전을 통하여 고효율, 높은 신뢰성 및 역률, 낮은 고조파 왜곡을 나타낸다. 또한 plug and play 기능으로 인한 설치와 유지보수가 용이 하며 파라미터의 설정을 하지 않아도 되고 높은 수준의 시스템 신뢰성과 잡음이 적으며 시스템의 에너지 이득을 극대화 할 수 있다.

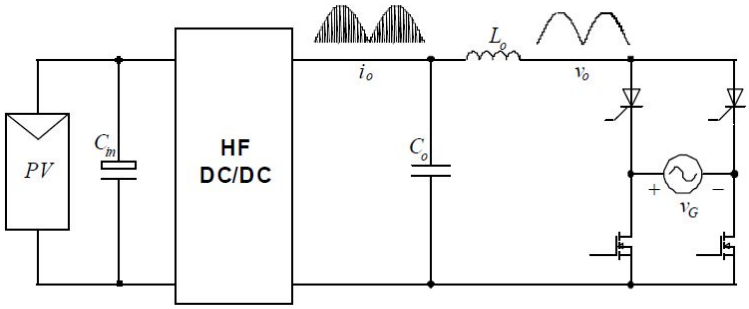


Fig. 21 The Micro-Inverter Operation Principle

2. 마이크로 인버터를 적용한 발전 방식

마이크로 인버터를 적용한 발전방식은 그림 22와 같이 마이크로 인버터를 적용한 구조로 한 장의 태양전지 모듈에 하나의 인버터를 설치하여 각 태양전지는 MPPT방식으로 동작하고, 병렬 운전시 또는 부분적인 그림자 발생으로 하나의 태양전지에 문제가 발생하여도 다른 시스템에는 영향을 주지 않는다.

기존 인버터에 사용되는 하드 스위칭 기술의 인버터를 소프트 스위칭 기술로 대체하여 효율성을 높이고 열 발생을 줄일 수 있다. 인버터의 용량 제한이 없어 단일 모듈로 제작 되어짐에 따른 제작 단가가 낮다.

Central 발전 방식의 단점인 모듈의 부분 고장시 발전을 할 수 없으며, 설비의 용량이 커질수록 인버터 용량도 증가하고 이로 인해 인터버가 대전력을 수용하게 되므로 단가 상승 뿐만 아니라 인버터의 수명도 줄어드는 단점이 있다. 그러나 Micro Inverter를 사용하게 되면 각 모듈 별로 모니터링을 실시하므로 부분 고장시 고장 지점을 정확히 찾을 수 있다. 또한 대전력을 각각의 인버터가 분담하여 감당하므로 인버터의 수명이 길어진다.

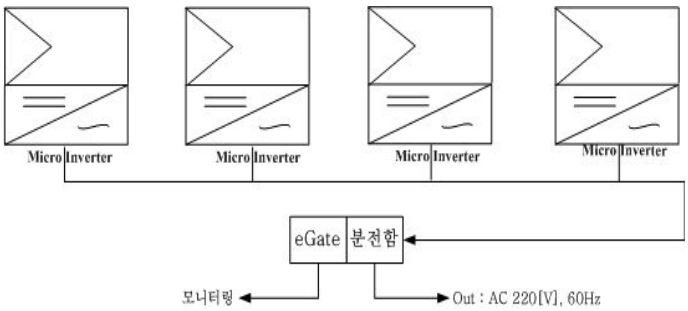


Fig. 22 Applied to Micro Inverter PV system

IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

A. 실험 조건

1. 온도 및 일사량

시뮬레이션 및 실험에 적용된 온도 및 일사량 등 기상에 관한 조건은 광주지방 기상청을 통하여 광주지역의 기상조건을 실시간으로 자동 측정된 값을 적용하였다. 표 2는 4월 18~5월 8일 까지 광주지역 온도를 표 3은 광주지역 일사량을 나타낸다.

Table 2 Hourly temperature in Gwangju area

관측	기온[℃]															
일자	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
4-18	12.6	12.8	13.3	13.1	13.7	14.6	15.2	15.2	16	18.2	18.5	17.5	16.2	14.6	11.5	9.8
4-19	5.4	5.2	6.3	8.4	10.5	12.9	14.2	15.2	16.4	16.4	17.4	16.5	15.4	14.1	12.1	10.9
4-20	9.4	9.2	7.8	7.1	5.9	5.2	6.1	6.6	7.1	7.4	7.3	6.7	6.1	5.7	5.8	5.6
4-21	4.9	5.1	5	6.9	8.2	9.9	11.8	13.5	14.3	15.3	15.2	14.8	13.9	13.5	11.7	10.5
4-22	4.5	4.2	4.8	7.4	10.3	13.7	16	17	18.7	19.2	19.2	19.7	20.3	17.3	15.4	14.5
4-23	11.7	11.3	8.5	8.7	8.9	9.3	9.7	10.2	10.3	10.9	11.5	12.9	14.3	14.3	14.9	15
4-24	10.6	10.3	10.5	10.9	11.7	13.3	15.6	16.2	17.5	17.5	18.5	18.1	17.3	15.8	14.2	12.4
4-25	7	6.5	6.8	7.8	8.4	12.3	12	11.6	11	11.1	11.9	12.5	13.8	14.1	12.9	11.2
4-26	6.1	5.9	7.1	9.8	12.2	14.5	16	16.9	17	17.4	18.2	17.4	17.1	16.7	15	13.1
4-27	6.8	6.7	7.6	9.7	11.9	14.4	16.9	19.3	19.6	18.8	18.5	16.9	14.7	11.8	12	12.6
4-28	10.3	10.2	11.6	14.7	17.5	19.1	21.4	21.6	22.4	22.4	23.6	23.2	21.6	19.9	18.6	17.8
4-29	16.9	17.3	17.8	18.4	18.5	19.3	17.2	16.7	15	14.1	13.6	14.2	14.6	14.9	14.1	13.4
4-30	7.7	7.6	7.9	8.4	11.4	13.2	14	18.8	19.9	20.3	20.4	19.7	18.7	17.8	15.7	14.1
5-01	6.9	6.8	7.7	9	11.5	13.3	15	17.9	18.4	18.2	18.2	19.4	18.8	17	15	13.5
5-02	9.1	8.7	8.8	10.9	13	14.3	16.2	18.9	18.8	19	18.5	18.5	18.2	16.8	15.5	14.3
5-03	7.9	8	8.6	8.3	10.3	12.5	16.4	17.2	19.5	19.9	20.2	18.8	17.1	15.5	13.9	13
5-04	10.3	10.5	10.8	13	14	15.5	16.9	18	9.1	20.6	20.2	19.7	19.3	18.4	17	15.3
5-05	8.3	7.9	9	11	13.5	17	19.2	21.4	23.2	23.7	23.9	23.5	22.5	21.1	19.4	17.4
5-06	9.5	8.7	9.4	13.4	17.5	19.2	21.3	22.5	24.1	25	25.5	24.9	23.8	22.6	19.9	17.4
5-07	12	11.8	12.8	15	17.3	19.8	21.4	23.6	25.2	26.3	26.8	26.7	24.3	22.8	21	19.4
5-08	12.5	12.2	13.8	15.9	17.8	20.2	22.8	24.5	26.8	27.6	29	28.1	27.3	26.2	22.9	20.5

Table 3 Hourly solar radiation in Gwangju

관측	일사량 [w/m^2]														
일자	6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	20시
4-18	0	8.3	31	118	242	373	539	708	786	692	547	375	200	47	0
4-19	0	50	223	434	620	756	853	884	845	742	547	405	211	50	0
4-20	0	0	8	25	58	92	119	252	97	113	50	36	22	5	0
4-21	0	53	223	425	631	789	887	906	878	786	617	397	205	58	0
4-22	0	64	242	453	653	798	887	911	836	795	631	425	158	38	0
4-23	0	0	2.9	16.7	47	58	88.9	105	88	80	47	36	11	0	0
4-24	0	11	45	147	328	720	870	889	864	786	647	464	247	61	0
4-25	0	14	50	213	545	623	319	86	55	127	164	316	208	75	0
4-26	0	67	247	450	631	787	878	911	881	795	656	469	264	75	0
4-27	0	73	228	398	567	737	822	808	369	152	91	52	50	8	0
4-28	2.9	69	212	378	503	673	811	783	795	739	631	378	233	58	0
4-29	0	5.6	41.7	50	47	17	25	55	36	33	72	102	111	41	2.9
4-30	0	42	156	406	592	698	828	822	853	750	656	469	272	83	2.9
5-01	0	81	245	470	648	789	884	920	806	636	672	425	283	50	0
5-02	0	69	253	475	639	801	889	914	653	781	558	450	252	72	0
5-03	0	78	101	356	623	773	806	761	789	414	380	261	69	38	0
5-04	0	81	265	470	637	789	808	786	886	792	656	472	266	83	2.9
5-05	2.9	87	275	480	660	804	897	925	903	817	672	489	289	97	0
5-06	2.9	95	295	495	680	804	884	906	870	786	611	447	280	88	0
5-07	0	67	213	369	570	698	792	828	800	714	567	405	227	58	5.7
5-08	5.6	107	186	389	610	713	783	884	878	764	644	461	258	72	2.9

2. 태양전지 모듈

시뮬레이션 및 실험에 사용된 태양전지 모듈은 국제 시험 조건 일사량 1000w/m^2, AM 1.5, 온도 25℃에 서 P_{Max} 250[W], V_{MP} 30.46[V], I_{MP} 8.21[A], V_{OC} 36.78[V], I_{SC} 8.93[A]인 태양전지 모듈 4개를 사용하였으며, 각각의 모듈에는 그림자가 생기지 않도록 설치하였다.

표 4는 실험에 적용된 태양전지 모듈의 파라미터 값을 나타낸다.

Table 4 Solar array parameters

Parameter	Value
Peak Poewr (P_{max})	250[W]
Maximum Power Voltage (V_{mp})	30.46[V]
Maximum Power Current (I_{mp})	8.21[A]
Open-Circuit Voltage (V_{oc})	36.78[V]
Short-Circuit Current (I_{sc})	8.93[A]
Maximum System Voltage	1000[VDC]
STC : 1000W/㎡, AM 1.5, 25℃ Cell Temperature	
Dimension(W*L*T):1628mm*982mm*40mm, Weight 19.0 kg	

B. Central 방식 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 구성

Central 발전방식에 대한 시뮬레이션은 Solar Pro 시뮬레이션 툴을 사용하여 진행하였다. Solar Pro의 주요 기능으로는 그림자 궤적분석, I-V 곡선 분석, 발전량 계산, 경제성 분석 등을 할 수 있다. 또한 전기적인 스트링 방식을 실험과 동일하게 설정 할 수 있으며, 모듈, 태양광인버터, 지역의 데이터를 추가 할 수 있다.

그림 23은 시뮬레이션 툴을 사용하여 옥상에 설치된 어레이의 CAD 화면을 나타낸다. 설치된 어레이는 그림자의 영향을 받지 않도록 배치하였으며, 추적 방식은 양축형으로 설계하였다. 그림 24는 조건 설정 화면이다. 지역은 광주이고, 인버터는 1대, 모듈은 직렬연결, 인버터의 효율을 95%를 적용하였다.

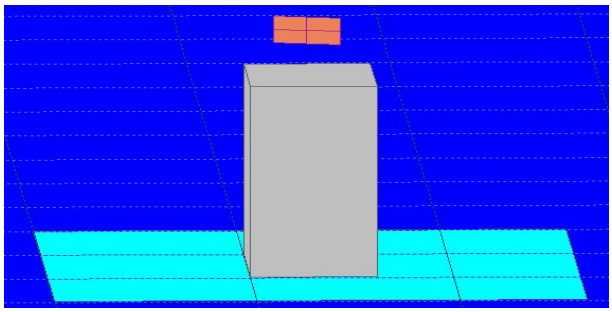


Fig. 23 CAD drawing of the array

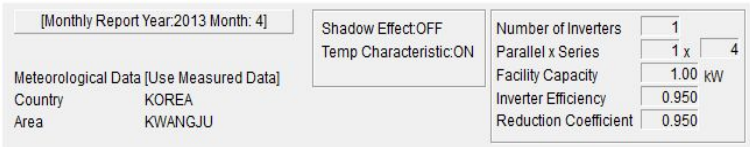


Fig. 24 Condition setting screen

2. 시뮬레이션 결과

Central 발전방식의 발전량은 Solar Pro 시뮬레이션 툴을 사용하여 태양전지 모듈군에 하나의 인버터를 연결하고, 실제 설치된 태양전지 모듈의 배치와 동일하게 하였으며 동일한 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 5는 동일한 모듈, 온도, 일사량을 적용하여 4월 18일~5월 8일 까지 발전량을 나타낸다.

Table 5 Power output of central type

관측	발전량 [w/m^2]														
일자	6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	20시
4-18	0	0	20	100	210	320	460	590	640	570	346	320	170	0	0
4-19	20	40	200	390	540	630	690	710	680	610	460	350	180	0	0
4-20	0	10	0	20	80	308	310	230	80	100	40	30	20	0	0
4-21	0	40	200	380	550	670	730	730	710	640	520	340	180	0	0
4-22	0	50	220	410	560	660	710	720	660	630	520	360	130	0	0
4-23	0	0	0	10	40	50	80	90	80	70	40	30	10	0	0
4-24	0	10	40	130	290	600	700	710	680	630	530	390	210	0	0
4-25	0	80	340	540	670	700	700	660	590	480	280	70	0	0	0
4-26	0	60	220	400	650	650	700	720	700	647	540	400	230	0	0
4-27	0	60	200	350	490	610	660	640	310	130	70	40	40	0	0
4-28	0	60	180	330	430	550	630	610	620	580	500	310	190	0	0
4-29	0	0	30	40	40	10	20	40	30	30	60	90	90	0	0
4-30	0	30	140	360	510	590	680	650	670	600	530	390	230	0	0
5-01	0	70	220	420	560	650	710	720	640	530	550	360	240	0	0
5-02	0	60	230	420	540	660	710	710	540	620	470	380	210	0	0
5-03	0	70	90	320	540	640	650	620	630	350	320	220	60	0	0
5-04	0	70	230	410	540	640	650	630	690	620	530	400	230	0	0
5-05	0	700	250	420	560	650	700	700	680	630	530	400	240	0	0
5-06	0	80	260	430	560	640	680	680	650	600	480	360	230	0	0
5-07	0	50	180	320	480	560	620	630	610	550	450	330	190	0	0
5-08	0	90	160	340	500	570	610	660	650	570	490	370	210	0	0

표 6은 Central 발전 방식의 일 평균 발전량을 나타내고, 그림 25는 실험 기간 동안 Central 발전 방식의 발전량을 그래프로 나타 낸 것이다.

Table 6 Daily average power output of central type

관측 일자	일 평균 발전량[w]	관측 일자	일 평균 발전량[w]
04월 18일	257	04월 29일	32
04월 19일	367	04월 30일	359
04월 20일	51	05월 01일	378
04월 21일	379	05월 02일	370
04월 22일	375	05월 03일	301
04월 23일	33	05월 04일	376
04월 24일	328	05월 05일	389
04월 25일	341	05월 06일	377
04월 26일	387	05월 07일	331
04월 27일	240	05월 08일	348
04월 28일	333		

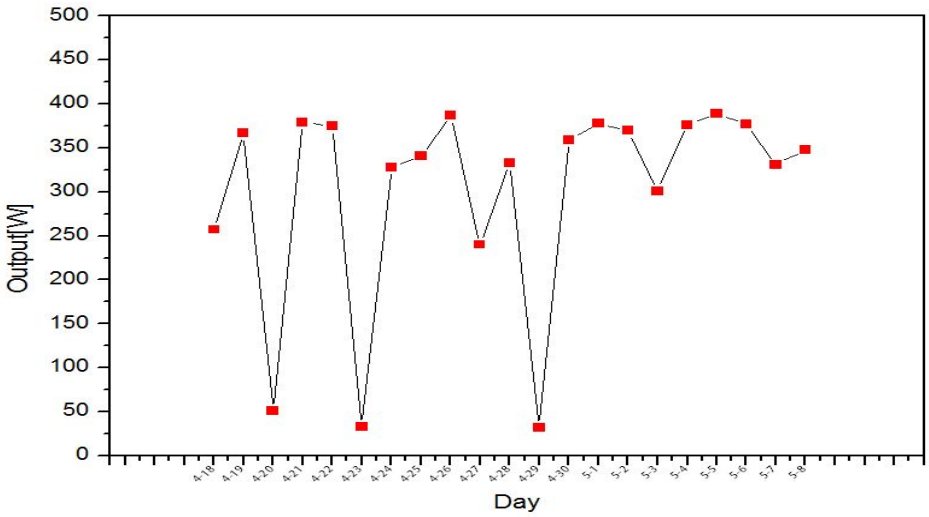


Fig. 25 Daily average power output of central type

표 7은 Central 발전 방식의 시간대별 평균 발전량을 나타내고, 그림 26은 실험 기간 동안 Central 발전 방식의 발전량을 그래프로 나타 낸 것이다.

Table 7 Hourly Average power output of central type

기간	시간[H]	시간대별 평균 발전량[w]
2013년 4월18일~ 5월 8일	6	0.95
	7	47.62
	8	162.38
	9	311.43
	10	438.1
	11	530
	12	580.48
	13	592.86
	14	549.52
	15	484.76
	16	398.57
	17	282.86
	18	156.67
	19	42.7
	20	0

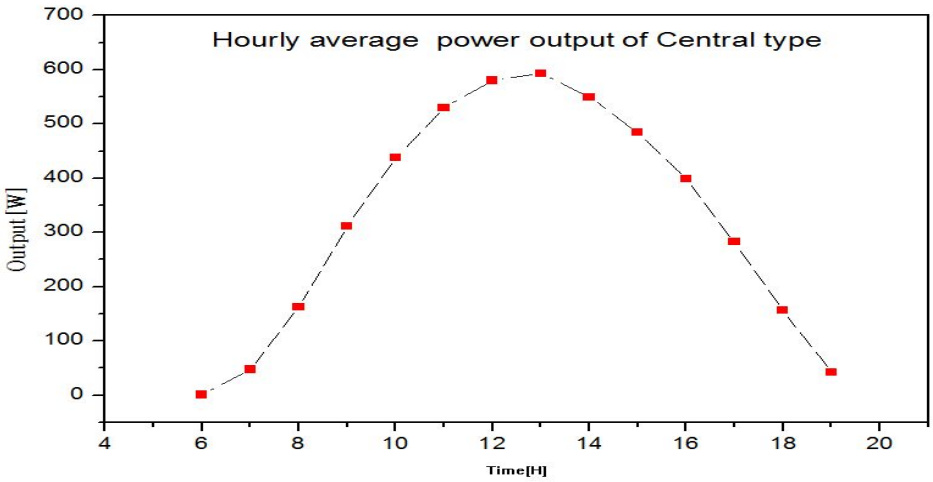


Fig. 26 Hourly Average power output of central type

C. Micro Inverter를 적용한 방식 실험

1. 실험 구성

Micro Inverter를 적용한 실험 그림 27와 28의 사진과 같이 구성하였다. 250W태양광 모듈에 각각의 Micro Inverter를 연결하였으며, 그림 29와 같이 모니터링을 통하여 데이터를 수집였다.

Fig. 27 Applied to Micro inverter PV system(Front)

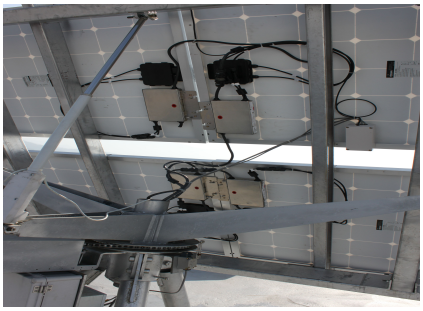


Fig. 28 Applied to Micro inverter PV system(Back side)

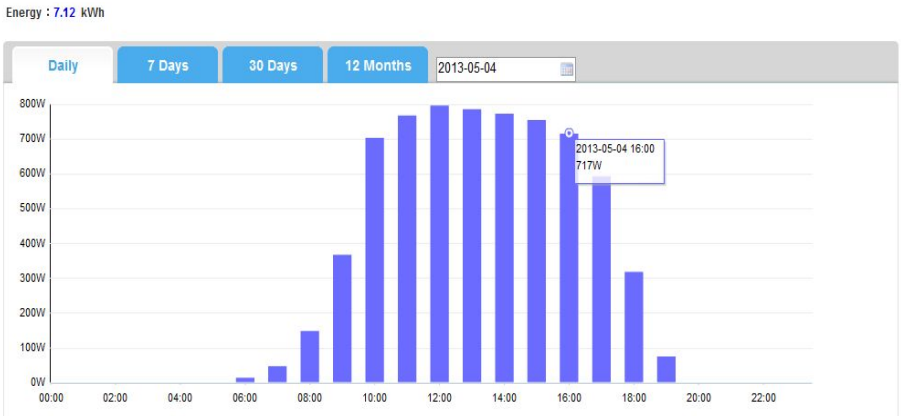


Fig. 29 PV system monitoring screen

2. 실험 결과

Micro Inverter를 적용한 발전방식에 대한 실험은 옥상에 설치된 1kw 태양광 설비를 통하여 진행된 모니터링을 통하여 얻어진 발전량은 표 8과 같다. Central 발전 방식과 동일한 조건을 적용하였으며, 동일한 기간 동안의 데이터를 수집하였다.

Table 8 Daily power output of applied micro-inverte

관측 일자	발전량 [w/m^2]														
	6시	7시	8시	9시	10시	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	18시	19시	20시
4-18	0	8	21	85	199	247	327	521	625	690	465	505	264	48	0
4-19	0	108	224	234	285	556	780	739	750	727	680	549	265	35	0
4-20	1	19	10	22	78	98	180	284	104	125	88	60	34	0	0
4-21	3	54	548	693	772	827	846	845	846	812	707	618	348	170	0
4-22	3	62	344	592	680	772	820	764	754	761	698	614	272	120	0
4-23	0	0	20	90	170	180	330	360	290	260	200	90	30	0	0
4-24	0	20	90	240	496	739	835	812	818	778	752	661	417	71	0
4-25	0	110	430	605	755	836	704	655	636	524	432	343	145	22	0
4-26	3	80	254	473	609	703	747	794	802	741	743	704	569	270	0
4-27	0	87	237	395	529	681	766	784	410	330	214	162	84	28	0
4-28	7	78	292	396	617	719	760	770	760	788	690	663	360	69	0
4-29	0	2	56	100	52	40	24	64	48	32	92	114	102	19	0
4-30	9	41	164	530	601	671	719	717	705	630	569	504	491	113	0
5-01	6	112	248	461	676	755	838	864	759	628	651	463	376	26	0
5-02	0	87	307	483	609	648	793	414	571	651	557	522	254	130	0
5-03	6	102	170	386	583	706	695	686	668	382	371	258	82	15	0
5-04	8	93	360	470	646	761	797	797	778	777	732	663	451	102	0
5-05	0	97	289	512	634	698	774	791	743	673	567	422	361	120	0
5-06	11	124	317	376	528	614	698	652	738	715	692	650	498	102	0
5-07	4	120	256	360	560	644	673	679	674	651	504	369	287	164	0
5-08	2	103	215	368	604	654	669	698	674	604	525	410	273	173	0

Micro Inverter를 적용한 발전 방식의 일 평균 발전량은 표 9와 같고, 그림 30은 Micro Inverter를 적용한 발전 방식의 일 평균 발전량의 그래프이다.

Table 9 Daily average power output of applied Micro-inverter

관측 일자	일평균 발전량[w]	관측 일자	일평균 발전량[w]
04월 18일	267	04월 29일	50
04월 19일	395	04월 30일	431
04월 20일	74	05월 01일	458
04월 21일	539	05월 02일	402
04월 22일	484	05월 03일	341
04월 23일	135	05월 04일	496
04월 24일	449	05월 05일	445
04월 25일	413	05월 06일	448
04월 26일	499	05월 07일	396
04월 27일	314	05월 08일	398
04월 28일	465		

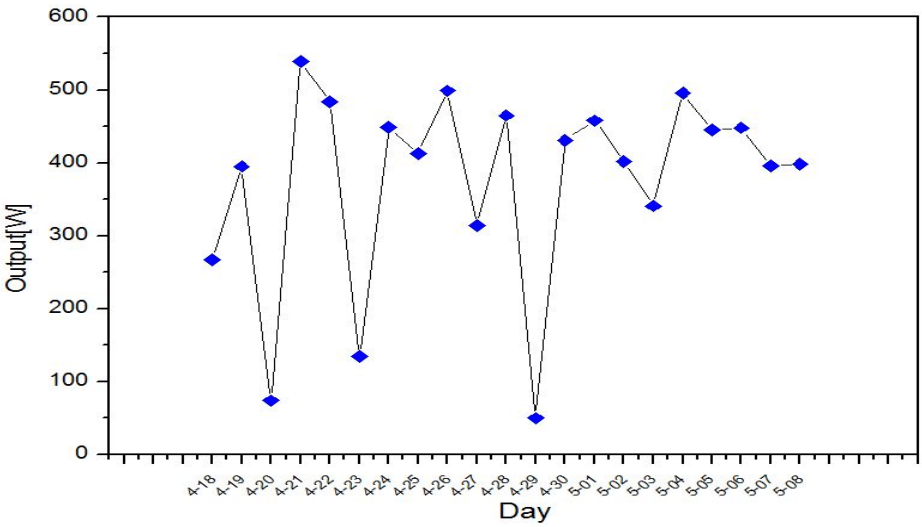


Fig. 30 Daily average power output of applied Micro-inverter

Micro Inverter를 적용한 발전 방식의 시간대별 평균 발전량은 표 10과 같고, 그림 31은 Micro Inverter를 적용한 발전 방식의 시간대별 평균 발전량의 그래프이다.

Table 10 Hourly average power output of applied Micro-inverter

기간	시간[H]	시간대별 평균 발전량[w]
2013년 4월 18일~ 5월 8일	6	3
	7	71.76
	8	231.03
	9	374.81
	10	508.71
	11	597.57
	12	655.95
	13	651.90
	14	626.33
	15	584.71
	16	520.43
	17	444.95
	18	283.95
	19	85.57
	20	0

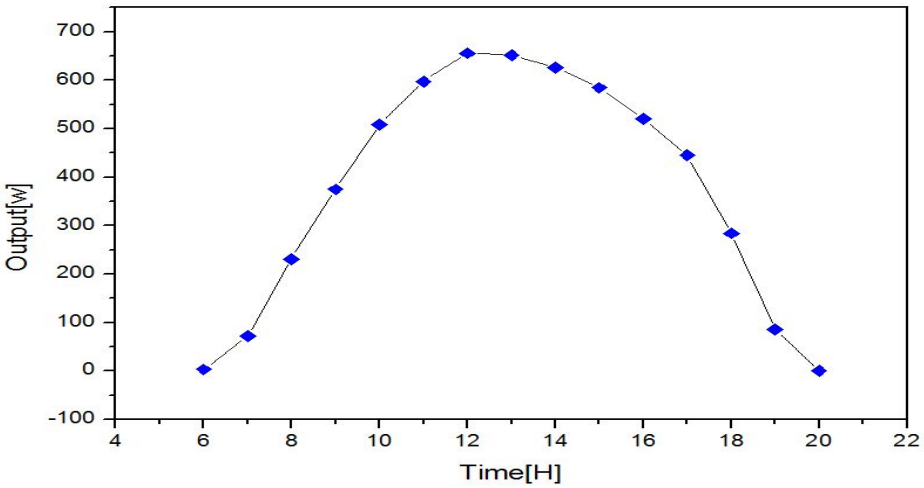


Fig. 31 Hourly average power output of applied Micro-inverter

D. 시뮬레이션 및 실험 결과 검토

그림 32은 광주지역 일일 평균발전량, 그림 33은 광주지역 시간대별 평균발전량을 비교 한 것이다. Micro Inverter 발전 방식이 Central 발전 방식에 비하여 발전량이 항상 높게 발전되고 일사량이 높은 경우 Micro Inverter를 적용한 발전 방식이 40%이상 높게 발전됨을 볼 수 있다.

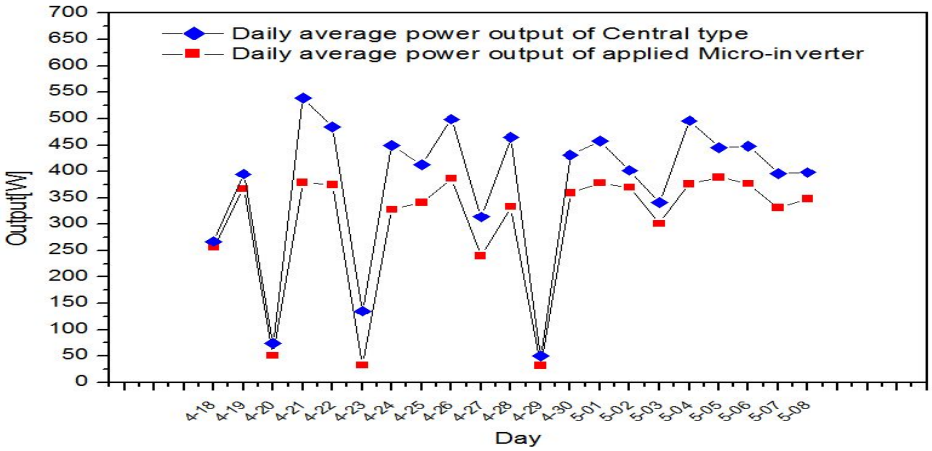


Fig. 32 Compared to the average daily power output in Gwangju area

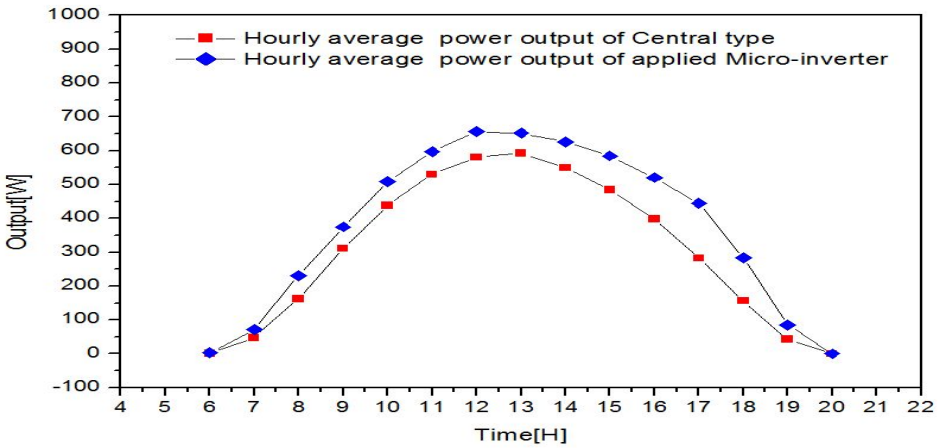


Fig. 33 Compared to the average hourly power output in Gwangju area

V. 결과

본 논문에서는 기존의 태양광 발전시스템에 적용 되는 PCS 토폴로지 중 보편적으로 사용되는 Central 발전방식과 Micro Inverter를 적용한 발전방식을 비교하였다.

Central 발전 방식에 적용된 인버터는 시뮬레이션 툴에서 제공하는 인버터를 사용하였으며 효율 95%로 Micro Inverter와 동일한 효율을 가진 인버터를 적용하였으며, 실험시 기상에 관한 조건은 광주지방기상청에서 제공하는 데이터이다. 실험 기간 동안 광주지역에서 수집된 온도 및 일사, 일사량 등 외부변수에 대한 조건은 동일하게 적용하였다.

1. Central 발전 방식은 인버터 한 대를 사용하여 초기 설치비가 감소하고 대전력화가 가능 하다는 장점이 있으나 유지 보수시 발전이 불가능 하고 용량이 커짐에 따라 인버터의 비용이 증가하는 단점이 있다. 이러한 Central 발전 방식의 단점을 보완하고자 Micro Inverter를 적용한 발전 방식을 운영하여 유지 보수시 발전을 가능하게 하며 고가의 대용량 인버터를 여러 대의 Micro Inverter로 대체 하여 비용 상승의 문제점을 해결 할 수 있다.

2. 동일 조건하에서 진행된 Micro Inverter를 적용한 발전방식이 중앙 집중식의 Central 발전방식에 비하여 효율이 20%이상 높게 나옴을 알 수 있다. 기상조건이 좋은 날은 Central 발전 방식에 비해 30%이상 효율이 높게 발전이 되었다.

본 논문에서는 시뮬레이션과 실험을 통하여 발전 방식에 따른 발전량을 알아보고 Central 발전 방식과 Micro Inverter를 적용한 방식을 비교하여 Micro Inverter의 발전 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] D. Amorndechaphon, S. Premrudeepreechacharn and K. Higuchi, "Modified Grid-Connected Current Source Inverter for Multi -string PV System", IEEE, Innovative Smart Grid Technologies(ISGT), 2012

[2] 박승원 “PV-MIC용 준공진 방식을 사용한 2중 인턱터 승압 컨버터”, 성균관대학교 석사학위 논문, 2011

[3] Cuauhtemoc Rodriguez and Gehan A. J. Amaratunga “Long -Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 55, NO. 7. 2008

[4] Roger A. Messenger, Jerry Ventre “Photovoltaic Systems Engineering”, CRC PRESS, 2004

[5] Keoleian, G. A. and G. M. Lewis. "Modeling the life cycle energy and environmental performance of amorphous silicon BIPV roofing in the US." Renewable Energy 28(2): 271-293. 2003

[6] Christiana Honsberg and Stuart Bowden “태양광 개론”, 한국에너지기술연구원, 2012

[7] Eicker, U. Solar Technologies for Buildings. Chichester, John Wiley & Sons Ltd. 2003

[8] 최연옥, 조금배, 이현화, 최문한 “태양광발전의 이해와 설계 응용”, 조선대학교 신재생에너지 융합 에너지인력양성센터. 2013

[9] 홍종경 “직・병렬 저항성분 변화에 의한 PV모듈의 전기적 출력 특성분석”, 건국대학교 석사학위논문, 2009

[10] Yano, A., K. Tsuchiya, et al. "Development of a Greenhouse Side-ventilation Controller driven by Photovoltaic Energy." Biosystems Engineering 96(4): 633-641. 2007

[11] 고광수, “대용량 태양광발전용 멀티센트럴 인버터 시스템”, 경북대학교 석사학위논문, 2010

[12] 고광수 외 4명, “대용량 PV 시스템용 멀티센트럴 인버터 제어”, 전력전자학회, 385~386, 2010

[13] 이종필, “넓은 동작 범위에서 고효율을 가지는 대용량 계통연계형 태양광발전용 PCS에 관한연구”, 고려대학교 박사학위논문, 2012

[14] 강영주, “멀티스트링 태양광 PCS용 3상 인터브리드 부스트 컨버터의 설계 및 제어”, 충남대학교 석사학위논문, 2010

[15] 모상철, “시뮬레이션에 의한 태양광 발전시스템의 최적 설계”, 서울산업대학교 석사학위논문, 2009

감사의 글

설레임과 꿈을 가지고 시작한 석사 과정이 아쉬움을 남기고 졸업이라는 끝과 시작을 향해 갑니다. 길면서도 짧았던 2년의 과정을 마무리 하면서 무사히 시간을 보낼 수 있도록 도와 주신 모든 분들께 감사드립니다.

본 학위 논문이 완성되기 까지 2년 동안 학문의 폭과 깊이를 더하여 주시고 부족한 저를 다독이시고, 큰마음과 아낌없는 가르침을 주신 조금배 지도교수님, 백형래 교수님께 감사드립니다.

그리고 학위과정 동안 많은 가르침을 주신 조선대학교 전력전자 실험실의 문은아, 서강성, 박정민, 오만석, 백승학, 장인혁, 임지혜 선배님들께 감사드리며, 항상 저희를 걱정하고 지도해 주신 최연옥 선배님께 진심으로 감사드립니다. 또한 학위과정 동안 힘들 때 다독여 주고 의지할 수 있는 권이형, 오랜 시간 우정을 나눈 법준이, 긍정적이고 항상 노력하는 현준이, 적극적이며 의욕이 넘치는 청담이, 매일 같이 놀림 받는 여동생 같은 형지, 힘들지만 밝게 생활 하는 이미경 누나와 오랜 벗으로서 응원하고 고민을 같이 해주었던 해골 박웅찬, 마법사 마영신에게 즐거운 추억과 소중한 인연을 맺을 수 있게 해주어 감사드립니다.

끝으로, 막내 아들의 장성한 모습을 하늘에서 지켜보실 아버지와 막둥이를 가장 좋아하시는 어머니, 철없는 동생을 이끌어 주고 아버지 역할을 대신 해 준 큰형과 아닌 척 하지만 항상 걱정해 주는 작은형에게 고맙고 사랑한다고 전하고 싶습니다.

졸업이 끝이 아닌 새로운 시작이라는 마음가짐으로 2년 동안의 가르침 잊지 않고 앞으로 더욱더 배우고 노력하는 사람이 되도록 하겠습니다.

저와 인연을 닿은 모든 분들께 감사드리고 무궁한 발전과 안녕을 기원합니다.

2013년 12월