



工學碩士 學位論文

SPM용 전력 공급 시스템 설계에 관한 연구

A Study on the Design of Power Supply System for Single Point Mooring System



韓國海洋大學校 大學院

기관공학과

張 在 希

本 論文을 張在希의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



2015年 6月 26日

韓國海洋大學校 大學院

Collection

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1	연구	배경			 1
1.2	연구	내용	및	구성	 3

2. SPM 전력 공급 시스템

2.1 태양광 발전 시스템	4
2.1.1 태양광 발전의 원리 및 특성	4
2.1.2 단일 태양광 패널 특성 시뮬레이션	7
2.1.3 Partial shading 현상	15
2.2 납축전지 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	19
2.3 발전 제어 시스템	20
2.3.1 벅 컨버터	20
2.3.2 최대 전력점 추종 알고리즘	21

3. SPM 전력 체계 구성

3.1	전력 체계 개요	26
3.2	SPM 운용 환경 분석 및 운용 모드 제안	28
3.3	시스템 용량 계산	29
	3.3.1 태양광 패널 용량 계산	29
	3.3.2 배터리 용량 계산	31
3.4	태양광 발전 기반의 SPM 전력 체계	32
	3.4.1 Partial shading 상태에서 MPP 분석	32
	3.4.2 개선된 최대 전력점 추종 알고리즘	40
	3.4.3 배터리 관리 시스템	44



	3.4.4 컨	비터	설계 …	•••••	•••••			 47
3.5	태양광	발전	기반의	SPM	전력	체계	구성	 49

4.실 험

4.1 실험 구성	51
4.1.1 태양광 패널	52
4.1.2 배터리	55
4.2 태양광 발전 제어기	56
4.3 프로그램	60

5. 실험 결과

5.1	광량	분석	52
5.2	특성	구선 분석 ···································	53
5.3	발전	· 분석 ··································	58
	5.3.1	기존의 MPPT 알고리즘의 발전 경향 6	58
	5.3.2	개선된 MPPST 알고리즘의 발전 경향	59
6. 결	론		1
7 1)] (1945	2
ተ	키 달	아 양 다	3
참고	문헌		4



List of Tables

Table	1	Specification of ATEX - SM085Ex	10
Table	2	Parameter of solar cell	14
Table	3	Output characteristics of different type of panel connection	17
Table	4	Merits and demerits of lead-acid battery	19
Table	5	System operating environment of SPM	28
Table	6	System operation mode of SPM	29
Table	7	Daily required amount of power generation	30
Table	8	Number of minimum required installation panels	30
Table	9	Battery capacity calculation method	31
Table	10	Battery capacity calculation	32
Table	11	Characteristics of solar generation according to irradiation	33
Table	12	Position of MPP according to amount of irradiation	35
Table	13	Simulation condition of characteristic curve	36
Table	14	Output ratio of GMPP-to-first MPP	42
Table	15	System requirement of converter	47
Table	16	SPM system specification	49
Table	17	Comparison of system configuration	51
Table	18	Specification of AP-PN 180	53
Table	19	Technical specification of LP SILICON-PYRA 04 ·····	54
Table	20	Technical specification of ESG-200 ·····	55
Table	21	System configuration of test	56
Table	22	Output characteristic of MPPT algorithm	69
Table	23	Output characteristic of MPPST algorithm	70



List of Figures

Fig.	1 Tanker moored to SPM system	2
Fig.	2 Generation principle of photovoltaic cell	4
Fig.	3 Current-voltage and power-voltage characteristic curve of photo	
	voltaic cell	6
Fig.	4 Single diode model of solar cell	8
Fig.	5 Appearance of ATEX - SM085Ex	9
Fig.	6 Characteristic curve of ATEX - SM085Ex	9
Fig.	7 Model of characteristic curve	12
Fig.	8 Model of solar cell	13
Fig.	9 V-I curve of ATEX - SM085Ex ·····	14
Fig.	10 V-P curve of ATEX - SM085Ex	15
Fig.	11 V-P curve at partial shading	16
Fig.	12 V-I curve of different radiation	18
Fig.	13 Circuit of buck converter	20
Fig.	14 Inductor current of buck converter ·····	21
Fig.	15 Voltage control range of converter	22
Fig.	16 Perturb and observe algorithm	23
Fig.	17 Judgement of voltage position	24
Fig.	18 Incremental conductance Algorithm	25
Fig.	19 Diagram of the existing SPM power system	26
Fig.	20 Sensor, alarm and battery system of SPM	27
Fig.	21 Supervisory and control system of SPM	27
Fig.	22 Characteristic curve in case of different irradiation between	
	panels	34
Fig.	23 Simulation configuration using MATLAB	36
Fig.	24 Characteristic curve in case 300W/m ² on array 1	37
Fig.	25 Characteristic curve in case 500W/m ² on array 1	38
Fig.	26 Characteristic curve in case 700W/m ² on array 1	39
Fig.	27 Outline of maximum power point searching and tracking(MPPST)	
	algorithm	40



Fig.	28	Improved MPPST algorithm	43
Fig.	29	Battery protection algorithm	45
Fig.	30	SPM single line diagram	50
Fig.	31	Text system configuration	52
Fig.	32	Installation of solar panels	53
Fig.	33	Installation of irradiation sensor	54
Fig.	34	Installation of batteries	55
Fig.	35	Schematic diagram of PWM generation board	57
Fig.	36	Schematic diagram of buck converter	57
Fig.	37	PWM generation board	58
Fig.	38	Buck converter board	58
Fig.	39	Wave form of PWM according to duty ratio	59
Fig.	40	Block diagram of MPPST program	60
Fig.	41	Irradiation and power in case of PV-battery direct connection \cdot	62
Fig.	42	Irradiation ratio and power in case of PV-battery direct	
		connection	63
Fig.	43	Characteristic curve at 14:32 April 26th 2015	64
Fig.	44	Characteristic curve at 8:19 April 26th 2015	65
Fig.	45	Characteristic curve at 15:22 April 26th 2015	66
Fig.	46	Characteristic curve during the day	67
Fig.	47	Output characteristic of MPPT algorithm	68
Fig.	48	Output characteristic of MPPST algorithm	69



A study on the design of renewable energy based SPM power supply system

Jang, Jae Hee

Department of Marine Engineering Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Offshore plant industry is to build, install and supply the equipment which is necessary for the development of marine resources, such as gas, crude oil. And offshore plant industry has continued to grow through a growing energy demand and high profits. SPM(Single Point Mooring) System, the offshore plant, is responsible for loading and unloading of crude oil and gases in the alternative of the port terminal. It has many advantages on installation, cost, etc.. In particular, it is possible to relocate the wells in accordance with the depletion of oil wells, and plays an important role in small and medium-sized oil field development projects, in terms of not compromising the marine environment.

The energy stored in the battery is used to operate the SPM system. These battery-based system has demerits that it requires continuous monitoring and management of the battery. The amount of power required by the SPM system is increasing because of upsizing of the crude-oil carrier and increasing required function like monitoring and AIS, etc..

Therefore, in this paper, power supply system suitable for SPM is provided using renewable energy such as solar generation system and battery power management system. Solar generation system design includes



power design to match the SPM system operation environment and maximum power point searching and tracking(MPPST) algorithm for enhancing the power generation efficiency. Battery power management system is configured to be able to improve the efficiency by using power management algorithm according to the operational state. The solar generation system applied to the SPM was simulated by using MATLAB. Based on this, the improved solar generation control algorithm suited to the marine environment was proposed. Also, a configuration of a power system according to the characteristics of system operation is provided. Finally, field experiment with improved algorithm was conducted.

SPM power supply system based on renewable energy can reduce the time and cost required for maintenance. And it seems to be able to become an alternative to the demand and environmental regulations.

KEY WORDS: Single point mooring(SPM) system 일점 계류 시스템; SPM power supply system 일점계류시스템 전력공급체계; Solar generation 태양광 발전; Partial shading 부분음영; Improved maximum power point searching and tracking(MPPST) algorithm



1. 서론

1.1. 연구배경

현재 전 세계적으로 에너지 소비 증가에 따라 에너지 부족 현상에 대한 대비책이 필요한 시점에 있다. 각 국 정부와 산업체에서는 에너지 생산 및 효율적인 소비를 위한 시스템 구축에 많은 관심을 가지고 있으며, 특히 해양 플랜트 산업은 증가하 는 에너지 수요와 높은 수익으로 지속적으로 성장하고 있다.

해양플랜트 산업은 심해자원 개발을 위한 노력의 하나로서 원유, 가스 등 해양자 원개발에 필요한 장비를 건조하고 공급, 설치, 그리고 원유의 생산 및 운송에 이르 는 모든 과정을 포함한다. 세계시장 규모는 2,000억 달러 이상으로 2020년에는 3,200억 달러 규모로 추정되고 있다[3].

이중 SPM(Single Point Mooring) 시스템은 선박의 계류 역할과 더불어 항만 터미 널을 대신하여 육상 시설과 유조선의 연결을 통해 원유, 가스 등의 선적과 하역을 담당하는 해양플랜트이다. 특히 항만의 개발과정에서 발생하는 주변 생태계 및 자 연 경관 파괴 등에 대한 문제로 인해 '선박에 의한 환경오염 방지를 위한 국제협 약(International convention for the prevention of pollution from ship 73/78 : MARPOL 1973/78)'과 같이 항만의 개발 및 운영에 제약이 따르는 경우가 있으므 로, 해양 환경의 보호 측면에서 SPM 시스템이 유리하다[7]. 또한 선적 및 하역 전용 시설을 사용할 수 없는 지역에서도 사용이 가능하며, 유정의 고갈에 따라 이설이 가능하다는 점에서 중소형 유전개발사업에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 이 외 의 SPM 시스템이 갖는 장점은 아래와 같다.

- 기존 항만시스템과 비교하여 설치성, 비용 등에서 유리함
- 선적 및 하역 전용 시설을 사용할 수 없는 지역에서도 사용이 가능
- 흘수가 큰 선박이나 초대형 선박에 대해서도 사용이 용이함
- 선박이 항만까지 올 필요가 없으므로 연료 및 시간을 절약할 수 있음
- 유정의 고갈에 따라 이설이 가능



Fig. 1 Tanker moored to SPM system

일반적인 SPM 시스템은 육상 시스템과 분리되어있으므로 축전지에 저장된 에너 지로 전체 시스템을 운용하게 된다. 이러한 시스템은 축전지 상태에 대한 지속적인 모니터링 및 외부로부터 충전이 필요하기 때문에 유지 및 관리가 어렵다. 다음은 SPM 시스템의 주요 전력 수요처이다.

- communication module
- hawser load pin amplifiers
- main light
- fog detector & fog horn
- HPU(Hydraulic Power Unit) pump motor

또한 원유 운반선의 대형화 추이에 따라 SPM 시스템 또한 커지고 있으며, 모니터 링 시스템, AIS(Auto Identification System) 등 추가되는 기능에 따른 전력 수요처가 늘어남에 따라 SPM 시스템에서 필요로 하는 전력량이 증가하고 있다. 따라서 SPM 시스템의 운용 환경에 맞는 전력 분석 및 전력 공급 시스템의 설계가 필요하다.



태양광 발전은 SPM 시스템처럼 독립형 전력 공급 시스템에 적합하며, 재생에너지 를 이용한 발전이라는 장점을 갖는다. 그러므로 태양광 발전 시스템 및 배터리 전 력 관리 시스템 설계를 통하여 SPM 시스템의 재생에너지를 이용한 발전 및 효율적 인 에너지 사용이 가능한 시스템의 구성이 필요하다.

1.2. 연구 내용 및 구성

본 논문은 SPM 시스템에 적합한 전력 공급 시스템으로서 태양광 발전 시스템과 배터리 전력 관리 시스템의 설계를 목표로 하고 있다. 본 논문은 총 6개의 장으로 구성되어 있으며 내용은 다음과 같다.

1장에서는 본 연구의 연구배경과 연구내용 및 구성에 대해 설명한다.

2장에서는 SPM 전력 공급 시스템을 설명한다. 본 논문에서 목표로 하고 있는 태 양광 발전 시스템의 원리 및 특성과 이를 SPM 시스템에 적용했을 경우의 전력 시 스템의 구성 및 특성을 기술한다.

3장에서는 SPM용 전력체계를 설계한다. SPM 시스템의 일일 전력량 및 필요 발전 량을 분석하여 태양광 패널 개수와 배터리 용량을 제안한다. 또한 해상에서 발생하 기 쉬운 부분 음영 효과(partial shading effect) 현상을 분석하고, 이를 바탕으로 SPM 시스템에 적용되는 태양광 발전 시스템에 적합한 알고리즘을 제안한다. 태양광 패널에서 발전된 전력을 배터리에 효율적으로 축전하기 위해 벅 컨버터를 설계하 고, 배터리 전력관리 알고리즘을 제안한다.

4장에서는 실험을 통해 SPM 전력 공급 시스템의 출력 특성을 확인한다.

5장에서는 4장에서 수행된 실험의 결과를 분석하고 고찰한다.

6장에서는 이상의 연구내용을 바탕으로 결론을 도출한다.



2. SPM 전력 공급 시스템

2.1. 태양광 발전 시스템

2.1.1. 태양광 발전의 원리 및 특성

가. 발전 원리

태양광 발전은 광전효과(photovoltaic effect)를 이용하여 태양에너지를 전기에너지 로 변환시키는 반도체를 이용하는 발전 방식이다. 태양전지(solar cell)는 태양광 발 전의 가장 기본이 되는 단위로서, P형 반도체와 N형 반도체를 연결한 PN 접합체를 기본 구조로 한다. 태양전지에 광자(photon)가 흡수될 때 광자가 지닌 에너지가 PN 접합의 전위장벽보다 크면 태양전지 내에서 전자-정공 쌍(electron-hole pairs, EHP) 이 만들어진다. PN 접합의 전기장의 영향으로 전자는 N형 반도체로 정공은 P형 반 도체로 이동하게 되고, 이때 양단에 부하를 연결하면 외부회로로 전자가 움직여 에 너지를 소비하고 태양전지로 돌아오게 된다. 다음 그림은 태양전지의 단면도를 통 해 발전원리를 설명하고 있다.



Rear contact

Fig. 2 Generation principle of photovoltaic cell



태양전지는 태양광 발전의 가장 기본이 되는 구조로, 이를 직렬 및 병렬로 연결 하여 패널(panel)을 만든다. 태양광 발전 시스템에서는 특성에 맞게 태양광 패널을 직렬 및 병렬 연결하여 어레이(array)로 사용하게 된다. 패널을 직렬로 연결하면 연 결된 모든 패널이 하나의 패널과 동일한 전류 레벨을 가지며 출력되는 전압이 증가 한다. 패널을 병렬로 연결하면 연결된 모든 패널이 하나의 패널과 동일한 전압 레 벨을 가지며 출력되는 전류는 증가한다. 따라서 태양광 발전 시스템에서는 그 시스 템에서 사용하는 부하 특성에 맞는 직병렬 태양광 어레이 설계가 필요하다.

나. 특성곡선

태양전지는 비선형 전원으로서 부하에 따라 출력특성이 변화하게 된다. 이 외에 태양전지의 출력에 영향을 미치는 인자는 태양전지의 내부저항, 태양전지에 입사되 는 광량, 태양전지의 온도 등이 있다.

태양전지의 내부저항은 태양광 패널의 성능과 직접적으로 관련되며 제작 공정상 에서 결정된다. 태양광 패널의 내부 저항에 의해 태양전지의 발전 특성을 나타내는 V-I 특성곡선이 나타나게 되며 제품마다 다른 특성곡선을 갖게 되는 것도 여기에 기인한다.

태양전지에 입사되는 광량의 경우, 광량이 많을수록 더 많은 발전이 가능하며, 태 양전지의 온도는 낮을수록 태양전지의 발전량이 많아진다. 따라서 태양전지에 입사 되는 광량을 늘리고, 태양전지의 온도를 낮게 유지하는 것이 태양전지의 발전량을 증가시킬 수 있는 환경조건이다. 다음은 태양전지의 발전 특성을 나타내는 특성곡 선에 대해서 설명한다.

① 전압-전류 특성

태양전지에 빛을 조사했을 때 발전된 전류는 광전 효과에 의해 생성된 전류에 다 이오드 전류를 뺀 값과 동일하다. 여기에 영향을 미치는 인자는 태양전지에 입사되 는 광량, 태양전지의 온도, 태양전지의 내부 저항 등이다. 태양전지의 V-I 특성곡선 을 그리면 여러 가지 중요한 성능 인자를 얻을 수 있으며, 이는 태양전지의 전기적 특성을 나타내는 척도가 된다. 사양서에 나타나는 태양전지의 V-I 특성곡선은 태양 전지에 입사되는 광량과 태양전지의 온도를 통제하고 외부 부하를 변화시켜가며 측 정하게 된다. 다음 그림은 태양전지의 Vi_ 특성곡선이다.





Fig. 3 Current-voltage and power-voltage characteristic curve of photovoltaic cell

- 단락전류(short circuit current, I_{sc}): 태양전지가 단락회로일 때, 즉 태양전지에 걸린 전압이 0일 때 흐르는 전류이다. 단락전류는 태양전지에서 발전 가능한 최대 전류를 의미한다.
- 개방전압(open circuit voltage, V_{oc}) : 태양전지의 전류가 0일 때의 전압을 의미 하며, 태양전지에서 발전 가능한 최대 전압이다.
- 최대전력점(maximum power point, MPP) : 태양전지의 출력이 최대가 되는 지 점으로 V-I 특성곡선에서 전류와 전압의 곱이 최대가 되는 점을 찾는다.
- 충진률(fill factor): 단락전류와 개방전압은 태양전지에 최대로 발전 가능한 전 류 및 전압이지만, 단락전류에서는 전압이 0이 되고 개방전압에서는 전류가 0 이 된다. 충진률은 단락전류와 개방전압으로 계산된 출력에 대한 실제 태양광 패널의 최대 출력의 비로, 단락전류 및 개방전압과 함께 태양전지의 효율을 나타내는 척도가 된다.
- 효율(efficiency) : 태양전지의 효율은 입사된 태양 에너지에 대한 태양전지에서 출력되는 에너지의 비율로 정의된다. 효율은 태양전지 자체의 성능뿐만 아니 라 입사되는 태양광의 세기나 입사각 등의 조건, 태양전지의 온도 등에서도 변화하게 되므로 태양전지의 효율을 비교하기 위해서는 환경조건을 동일하게 통제할 필요가 있다.



다음은 태양전지의 효율을 나타낸 식이다.

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}F_f}{P_{solar}} \tag{1}$$

여기서 V_{oc} 는 개방전압, I_{sc} 는 단락전류, F_{f} 는 충진률, P_{solar} 는 입사되는 태양광의 에너지를 의미한다.

② 광량에 의한 영향

태양광에 입사되는 광량의 양은 단락전류 및 개방전압, 태양전지 내부 저항 등 태양전지의 효율과 관련된 인자들에 영향을 미친다. 일반적인 태양전지의 사양을 살펴보면 태양광량 1000W/m²을 기준으로 단락전류 및 개방전압 등의 파라미터가 산출되어 있다.

③ 온도에 의한 영향

태양전지의 기본을 이루는 반도체는 온도에 민감하다. 태양전지의 온도가 높아지 면 단락전류는 증가하며, 개방전압은 감소한다. 이때 개방전압의 감소치가 훨씬 커 서 온도가 높아질 경우 태양전지의 효율이 감소하게 된다.

1945

④ 내부 저항에 의한 영향

태양전지를 단일 다이오드 모델로 표현할 때, 등가회로에 직렬저항과 병렬저항이 들어가 있다. 직렬저항은 전극과 실리콘 사이의 저항 등을 의미하며, 병렬저항은 누 설전류를 의미한다. 따라서 이상적인 태양전지는 0의 직렬저항과 무한대의 병렬저 항을 가지게 되며, 실제 태양전지에서 병렬저항이 감소할 때 최대전력점의 전류를 감소시키고, 직렬저항이 증가할 때 최대전력점의 전압을 떨어뜨리게 된다.

2.1.2. 단일 태양광 패널 특성 시뮬레이션

태양광 발전 시스템을 시뮬레이션 하기 위해서는 태양광 패널의 사양서에 제공되 지 않는 몇 가지 파라미터를 추출해야할 필요가 있다. 태양광 패널의 파라미터를 얻는 방법은 적은 광량에서 대상 태양광 패널의 단락전류와 개방전압을 측정하는 방법과 이상계수(ideality factor)를 이용해 직렬저항을 계산하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 V-I 특성곡선을 사용하여 파라미터를 추출하는 방법을 사용하였으며, ATEX사의 SM085Ex 제품을 대상으로 하였다.



가. 단일 다이오드 모델

태양전지의 발전 특성은 일사량과 온도와 같은 외부 환경조건에 따라 변화하게 된다. 또한 배터리, 발전기 등과 같은 일반적인 전기 에너지원과는 달리 부하에 따 라 출력특성이 변화하는 비선형 전원으로 구분된다. 그림은 태양전지의 전기적 등 가회로인 단일 다이오드 모델을 나타낸다.



그림을 보면 태양전지의 특성은 광전류원 I_{ph} 와 다이오드 D 로 묘사될 수 있다.태양전지는 광전효과를 이용하여 발전하므로 전류원과 다이오드를 기본 특성으로 $하고 있으며, 여기에 직렬저항 <math>R_s$ 와 병렬저항 R_{sh} 로 이루어진다. 직렬저항은 태양 전지의 금속전극과 실리콘 사이의 접촉저항과 앞면과 후면 금속전극의 저항에 관계 되며, 병렬저항은 태양전지의 설계불량으로부터 야기되는 누설전류에 관계된다. 그 림과 같은 단일 다이오드 모델에서 태양전지의 출력을 출력전류 *I*와 출력전압 *V*로 나타내면 다음 식과 같다.

$$I = I_{ph} - I_D \left[\exp\left\{\frac{q(V + IR_s)}{nKTN_s}\right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

$$\tag{2}$$

이때 q는 전하량(1.602×10⁻¹⁹C), n은 다이오드의 이상계수, K는 볼츠만 상수 (1.38054×10⁻²³J/K), T는 태양전지의 절대온도, N_{s} 는 태양광 패널을 이루는 태양전지 (solar cell)의 개수를 의미한다. 이 식과 태양광 패널의 사양을 조합하여 I_{ph} , I_D , R_{sh} , R_s , n의 값을 추출할 수 있다[1,5].



나. 특성 인자를 이용한 태양전지의 파라미터 추출



Fig. 5 Appearance of ATEX - SM085Ex



Fig. 6 Characteristic curve of ATEX SM085Ex



태양광 패널의 모델링에 앞서 먼저 태양광 패널의 V-I 특성 곡선, 최대전력점의 전압 및 전류, 개방전압, 단락전류, 태양광 패널 내에서 직렬로 연결된 태양전지의 개수 등이 필요하다. 본 논문에서는 ATEX사의 SM085Ex를 대상으로 시뮬레이션을 하고자 다음 표와 같이 태양광 패널의 사양을 정리하였다.

maximum power	85 [W]
maximum power voltage	17.55 [V]
maximum power current	4.85 [A]
open circuit voltage	22.03 [V]
short circuit current	5.14 [A]
number of solar cells	36 in series
	50

Table 1 Specification of ATEX - SM085Ex

이와 같은 태양광 패널 특성을 바탕으로 태양광 패널 파라미터를 추출하는 식은 아래와 같다.

① 병렬저항(shunt resistance, R_{sh}) 개 으 다

$$R_{sc} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{sc}} \tag{3}$$

$$R_{sh} = R_{sc} \tag{4}$$

여기서, R_{sc} 는 단락전류에서의 저항으로, 그래프에서 전압이 0일 때의 그래프의 접선의 기울기로 구할 수 있다. 이때 기울기가 항상 음수이므로 부호를 바꾸어 준다.



② 이상계수(ideality factor, n)

$$n = \frac{1}{N_{s}} \frac{q}{KT} \frac{V_{oc1} - V_{oc2}}{\ln\left\{\frac{I_{sc1} - \frac{V_{oc1}}{R_{sh}}}{I_{sc2} - \frac{V_{os2}}{R_{sh}}}\right\}}$$
(5)

여기서, N_s 는 패널 내 직렬 연결된 태양전지의 개수를 의미하며, V_{oc1} , I_{sc1} 과 V_{oc2} , I_{sc2} 는 각각 다른 광량 조건에서의 개방전압과 단락전류를 의미한다.

③ 다이오드 전류(diode current,
$$I_D$$
)

$$I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = I_D \exp \frac{V_{oc}}{N_s V_t}$$

$$I_D = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp \frac{V_{oc}}{N_s V_t}}$$
(6)
(7)

여기서 V_t 는 열전압으로 반도체 분야에 많이 사용되는 상수이고 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_t = \frac{nKT}{q} \tag{8}$$



④ 직렬저항(series resistance, R_s)

$$R_{s} = \frac{N_{s}V_{t}}{I_{mpp}} ln \left\{ \frac{I_{D} \exp \frac{V_{oc}}{N_{s}V_{t}} + \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{R_{sh}}}{I_{D} \exp \frac{V_{mpp}}{N_{s}V_{t}}} \right\}$$
(9)

여기서, I_{mpp} 및 V_{mpp} 은 최대전력점에서의 전류 및 전압이다.

⑤ 광생성전류(light-generated current, I_{ph})

$$I_{ph} = I_{sc} + I_D \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{N_s V_t}\right) + \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}}$$
(10)
태양광 패널 특성 시뮬레이션

모델링된 ATEX-SM085Ex 태양광 패널의 특성 곡선을 확인하기 위해 Matlab Simulink 프로그램을 사용하여 그림과 같이 시뮬레이션을 구성하였다.



Fig. 7 Model of characteristic curve

시뮬레이션 모델은 크게 광량입력부(irradiation)와, 태양광 패널부(solar panel), 전 압을 변화시켜 특성곡선을 만들어내는 특성곡선 출력부(curve display), 물리적 모델 에 대한 해석 방법을 설정하는 솔버설정부(solver configuration)로 이루어진다.



다.



Fig. 8 Model of solar cell

태양광 패널부의 내부는 36개의 태양전지모듈(solar cell)로 구성되어 있다. 각 태 양전지모듈에는 대상 태양광 패널의 특성값을 입력한다. 태양광 패널의 특성값은 파라미터 추출 공식에 의해 다음 표와 같이 입력되었다.



shunt resistance, R_{sh}	1034 [<i>Q</i>]
ideality factor, n	34
diode current, I_D	8.096×10^{-11} [A]
series resistance, R _s	0.406 [Ω]
light-generated current, Iph	5.172 [A]

Table 2 Parameter of solar cell



Fig. 9 V-I curve of ATEX - SM085Ex





태양광 단일 패널의 출력곡선 시뮬레이션 결과 단락전류 I_{sc} 는 5.14A, V_{oc} 는 22.03V 로 ATEX - SM085Ex의 사양과 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 본 모델을 활용하여 SPM 발전특성 분석을 진행하였다.

2.1.3. Partial shading 현상

partial shading 현상이란, 두 개 이상의 태양광 패널이 직렬로 연결된 태양광 발 전 시스템에서 태양광 패널에 조사되는 광량이 다르거나, 태양광 패널의 일부가 그 립자나 오염에 의해 가려진 경우 발생하는 손실 현상이다. 다음 그림은 두 패널을 직렬로 연결한 태양광 발전 시스템에 다른 광량을 조사했을 때 발생하는 partial shading 현상을 나타낸다.





그림과 같이 두 개의 패널이 직렬로 연결되고 조사되는 광량이 다를 때, 두 개의 MPP가 존재하게 된다. 이 중 MPPT 알고리즘으로 추종될 수 있는 국부적인 MPP를 LMPP(Local Maximum Power Point), 이 LMPP 중 가장 출력이 큰 MPP를 GMPP(Global Maximum Power Point)라고 한다.

기존의 MPPT 제어방법의 대부분은 알고리즘의 현재 루프와 이전 루프에서 측정 또는 계산된 파라미터 값을 비교하여 전압값을 제어하는 것이다. 이러한 방법은 V-P 특성 곡선의 전반적인 경향을 알 수 없기 때문에 태양광량 또는 온도의 순간 적인 변화, 측정 오차 등에 따라 GMPP를 추종하지 못하고 LMPP와 같은 특정 범위 에서 진동한다거나 GMPP를 추종하는 데 걸리는 시간이 길어지는 등의 문제가 있 다.

태양광 패널 간의 직렬연결을 포함하는 태양광 발전 시스템의 경우 패널간의 광 량차에 의해 다수의 LMPP를 만들어낸다. 이는 기존의 알고리즘은 GMPP를 추종하 지 못하고 LMPP에서 진동하게 되어 전력 생산의 손실을 초래하는 문제가 있다. 다 음은 partial shading 현상이 발생하는 환경의 예를 나타낸다.



- 직렬로 연결된 태양광 패널 간 조사되는 광량이 다른 경우
- 태양광 패널의 일부가 가려진 경우

SPM과 같은 일점 계류형의 해양플랜트에 설치되는 태양광 발전 시스템은 육상용 태양광 발전 시스템과 비교했을 때 파랑이나 바람에 의해 회전 또는 좌우로 흔들리 는 동요(rolling 혹은 yawing) 등으로 인한 패널 간 광량의 차이가 발생하기 쉬우므 로 그림자에 의한 영향인 partial shading 현상을 고려한 알고리즘 설계가 필요하다.

① 단일 태양광 패널과 직렬 연결된 태양광 패널의 특성 비교

태양광 패널에서 발생하는 partial shading 현상은 기본적으로 단일 패널의 출력특 성을 따른다. 두 패널에 조사되는 광량이 다를 경우 개방전압 Voc, 단락전류 Isc가 달 라지면서 최대전력점 전압 Vmpp, 최대전력점 전류 Impp, 최대전력 Pmax 등에 차이가 발생한다. 다음 표는 단일 패널의 출력 특성과 두 개 패널의 출력 특성을 나타낸다.

Table 3 Output characteristics of different type of panel connection단일 패널직렬로 연결된 두 개의 패널I $I = I_{ph}(G) - I_D - \frac{V - IR_s}{R_{sh}}$ $I = \begin{cases} I_{ph1}(G_1) - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} & I_{ph} \ge I_{ph2} \\ I_{ph2}(G_2) - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} & I_{ph} < I_{ph2} \end{cases}$ VV $V = \begin{cases} V_1 & I_{ph} \ge I_{ph2} \\ V_1 + V_2 & I_{ph} < I_{ph2} \end{cases}$

이상의 공식은 패널 한 장에 대해서 전류 및 전압을 산출해내는 공식으로 태양광 패널을 이루는 셀의 개수로 나누어 구하지 않는다.



단일 패널에서 전류는 표에 나타난 공식으로 표현될 수 있으며 여기서 I_{ph} 는 광생 성전류, G는 광량, I_{b} 는 다이오드 전류, $\frac{V-IR_{s}}{R_{sh}}$ 항은 셀 내부저항에 의한 손실 전 류를 의미한다. 직렬로 연결된 두 개의 패널을 panel 1과 panel 2라고 할 때, 각 패 널의 조사되는 광량을 각각 G_{I}, G_{2} 라고 표현하고 $G_{I} > G_{2}$ 라면 식은 표와 같이 나 타낼 수 있다. 식에 따르면 전류는 I_{ph1} 과 I_{ph2} 의 비교를 통해 나타나며, 전압은 현재 전류와 I_{ph1} 과 I_{ph2} 의 비교를 통해 V_{I} 또는 V_{I} 과 V_{2} 의 합으로 나타낼 수 있다. 이를 V-I 곡선으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.



Fig. 12 V-I curve of different radiation

두 개 패널의 개개의 특성의 조합으로 나타나므로 MPP의 위치 또한 단일 패널의 특성을 따른다고 볼 수 있다.



2.2. 납축전지

해상용 독립 전원 시스템 중 태양광 발전 시스템은 일조시간, 일조량 등 환경 특 성에 영향을 많이 받게 되므로 납축전지와 함께 운용된다. 납축전지는 품질이 안정 적이고, 제조 원가가 낮아 다른 전지에 비해 가격경쟁력이 우수하여 자동차용, 비상 전원용 및 에너지 저장용으로 현재도 많이 사용된다. 납축전지의 장단점은 아래와 같다.

Table 4 Merits and demerits of lead-acid battery

장점	단점			
 제조원가가 낮고 다른 2차전지 대비 가격 경쟁력이 우수 다양한 용량으로 제작이 가능(대용 량 축전지 제작 가능) 충전 효율이 우수 	 낮은 에너지 밀도 자기방전 방전 후 장기 보존이 어려움 수소가스 발생 및 중금속에 의한 환 경오염 문제 			

납축전지는 이산화 납으로 이루어진 양극과 납으로 이루어진 음극이 황산에 잠겨 있는 구조로 이루어져 있으며 발전 원리는 아래의 반응식으로 표현이 가능하다.

1945

•	양극 반응 :	$PbO_2 + 3H_3O^+ + HSO_4^- + 2e^-$	$\leftrightarrow \text{PbSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$
•	음극 반응 :	$Pb + HSO_4 + H_2O$	\leftrightarrow PbSO ₄ + H ₃ O ⁺ + 2e

납축전지의 전체 반응식을 보면 납축전지의 충방전시 물(H₂O)이 필수적으로 만들 어지거나 사용된다. 하지만 납축전지에서 과충전 또는 과방전이 발생하게 되면 물 의 전기분해가 일어나는데 이는 수소가스 발생에 의한 위험성과 물을 보충해주어야 하는 불편함이 있다. 또한 물의 전기분해는 비가역적 반응으로서 원래 상태로 돌아 갈 수 없으므로 납축전지의 수명을 급격히 감소시키거나 납축전지를 못 쓰게 만든 다. 따라서 납축전지의 안전한 사용과 유지보수에 들어가는 시간과 비용을 줄이고 배터리의 수명을 늘리기 위해서는 납축전지의 과충전 및 과방전을 방지하는 알고리 즘이 필요하다.



2.3. 발전 제어 시스템

2.3.1. 벅 컨버터

벽 컨버터(buck converter)는 DC-DC 컨버터의 한 종류로 출력 전압이 입력 전압 보다 낮게 나타나는 강압형 컨버터이다. 반도체 소자를 이용하여 스위칭하여 입력 되는 전력을 구형파로 변환한 후 인덕터 및 캐패시터를 통하여 평활하여 직류 출력 을 얻는다. 다음 그림은 벅 컨버터의 기본회로를 나타낸다.



Fig. 13 Circuit of buck converter

이때 인덕터에 걸리는 전압은 다음 식으로 표현이 가능하다.

$$v_L = L \frac{di}{dt} \tag{11}$$

여기서 L은 인덕턴스, *i*는 인덕터에 흐르는 전류이다. 그리고 인덕터 L에 흐르는 전류 파형은 다음과 같이 나타난다.





Fig. 14 Inductor current of buck converter

여기서, *i*₍₀는 인덕터 전류의 초기값, *T*는 주기, *D*는 듀티비(duty ratio)이다. 스위 칭 소자인 *Q*는 주기 *T* 동안 ON, OFF를 반복하며 이때 주기 *T*에 대한 도통시간을 *DT*라고 했을 때 출력측 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

Ó

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o = DV_i \tag{12}$$

출력측 전압은 입력측 전압의 도통률을 곱한 값에 비례하며 이때 D를 스위칭 듀 티비(duty ratio)라고 한다. 따라서 벅 컨버터는 스위칭 듀티비를 변화시킴으로써 출 력측의 전압을 제어할 수 있다.

2.3.2. 최대 전력점 추종 알고리즘

태양광 패널의 발전은 광량 및 온도 뿐 아니라 부하에 따라 출력특성이 변화하므 로 태양광 패널의 최대전력점을 추종하는 제어가 필요하다. 일반적으로 태양광 시



스템에서 발전되는 전압이 시스템 및 배터리 전압보다 높으므로 강압형 컨버터인 벅 컨버터의 듀티비 제어를 통해 태양광 발전 시스템의 전압을 변화시켜 최대전력 점에서 발전이 가능하도록 한다. 다음 그림은 컨버터의 제어 가능 범위를 나타낸다.



Fig. 15 Voltage control range of converter

① P&O(perturb and observe) 알고리즘

태양광 발전 시스템에 적용되는 MPPT 알고리즘 중 가장 기본적인 알고리즘은 P&O(perturb and observe) 알고리즘이다. P&O 알고리즘은 현재 전압에서 출력과 이전 전압에서 출력을 비교하여 PWM 듀티비를 변화시킨다[4]. 그림은 P&O 알고리 즘의 순서도이다.





P&O 알고리즘은 주기마다 전압과 전류값을 측정하여 전력을 계산하고 이전 전력 값과 비교하여 출력값이 더 큰 쪽으로 *dV_{ref}* 만큼 전압값을 이동시킨다. 만약 전압 값을 변화시킨 뒤 이전 측정한 전력값과 비교하여 현재 전력값이 증가했다면 전압 값을 같은 방향으로 이동시킨다. 반대로 감소했다면 전압값을 반대 방향으로 이동 시킨다.

P&O 알고리즘은 측정 파라미터가 적고 계산과정이 간단하여 연산의 시간이 짧다 는 장점이 있지만, MPP 근처에서 진동하는 전압값으로 인해 전력손실이 있을 수 있다는 단점이 있다.

② IncCond(incremental conductance) 알고리즘

IncCond 알고리즘은 태양광 패널의 임피던스와 부하의 임피던스를 비교하여 MPP 를 추종한다[4]. 그래프 상에서 MPP는 전력의 변화가 없는 $\frac{dP}{dV}=0$ 이 되는 지점으 로 이를 기준으로 그래프상에서 현재 전압값의 위치를 판단하면 다음과 같다.





$$\frac{dP}{dV} = 0 \tag{12}$$

 $VdI + IdV = 0 \tag{13}$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \tag{14}$$

이상의 공식으로 알고리즘의 순서도를 나타내면 다음과 같다.







Fig. 18 Incremental conductance algorithm



3. SPM 전력 체계 구성

3.1. 전력체계 개요

해상에서 운용되는 SPM 시스템은 원유 및 가스의 선적 · 하역 역할과 선박의 계 류 역할을 담당하고 있다. 주요 전력 소비처는 원유의 선적 · 하역과 직접적으로 관 련 있는 HPU(hydraulic power unit)와 SPM 시스템의 상태를 모니터링하기 위한 센 서 및 communication module 그리고 항로 표지 기능으로서 main light, fog detector, fog horn 등이 있다.

SPM 전력 공급 시스템은 전력을 공급하기 위해 배터리를 기반으로 하는 내부전 원 시스템을 갖추고 있으며 독립적으로 운용된다. 이러한 시스템은 배터리 상태에 따라 외부로부터 주기적인 전력 보급이 필요하여 유지·관리 측면에서 단점을 갖는 다. 이를 보완하기 위해 태양광 발전 시스템과 같은 재생에너지를 사용할 수 있다. 태양광 발전 시스템은 대표적인 독립 전원 시스템으로 일조시간 동안 발전한 전력 을 배터리에 축전하고 필요에 따라 방전하여 사용함으로서 해상과 같은 상용전원이 없는 환경에서 독립적으로 운용이 가능하다는 장점이 있다. 다음 그림은 SPM 전력 공급 시스템의 구성을 개략적으로 나타내고 있다.



Fig. 19 Diagram of the existing SPM power system




Fig. 20 Sensor, alarm and battery system of SPM

왼쪽 위에서부터 SPM 시스템의 센서 및 알람, 오른쪽은 배터리이다. 다음 사진은 내부 감시 · 제어 패널을 나타낸다.



Fig. 21 Supervisory and control system of SPM



SPM 시스템에 태양광 발전 시스템을 적용하기 위해서는 해상환경 및 시스템의 운용특성을 기반으로 전력 공급 시스템의 설계가 필요하다. 특히 해상에서의 태양 광 발전은 태양광 패널의 설치 면적이나 파랑에 의해 변화하는 부유체의 움직임으 로 인해 육상에서와는 다른 발전 특성을 가지므로 이에 대한 고려도 필요하다. 그 리고 SPM 시스템의 운용 환경과 기기 전력량 분석을 통해 SPM 전력 공급 시스템 에 적합한 태양광 패널 및 배터리 용량이 선정되어야 할 필요가 있다.

3.2. SPM 운용 환경 분석 및 운용 모드 제안

SPM 시스템의 운용환경은 SPM 시스템의 기기별 전력 소모량 및 태양광 발전량 등에 영향을 미친다. 따라서 SPM 전력 공급 시스템 구성 및 최적 전력 설계에 SPM 운용 환경 기준이 필요하다. 다음은 대상으로 하는 SPM 시스템의 운용 환경에 대해 정리한 표이다.

Table 5 System operating environment of SPM					
1945 1945	Data				
daily duration of sunshine	5.4 [h]				
mean solar radiation	1 [kW/m²]				
air temperature	8~48 [℃]				
seawater temperature	13~38 [℃]				

일조 시간 및 평균 태양광 일사강도는 태양광 패널의 용량을 설계하는데 주요 인 자가 되며, 온도는 태양광 패널과 배터리 효율과 관련이 있다. 또한 태양광 발전 기 반의 SPM 시스템은 태양광 발전 상태에 따라 SPM 전력 공급 시스템의 운용 상태 가 결정된다.



태양광 패널에 입사되는 광량에 의해 발전시스템이 충분히 발전 가능하고 SPM 시스템의 기기들이 평균 전력을 소비하는 상태를 '일반 운용 상태'로 정의하며, 이때의 환경 조건에서 태양광 패널의 필요 발전량을 계산하게 된다. 일조량이 부족 하여 태양광을 이용한 발전이 불가능한 상태에 있고 평균 전력을 소비하는 상태를 '부조 상태'라고 정의하며, 배터리에 축전되어 있는 전력으로 기기를 운용해야 하는 상태이므로 이때의 환경 조건으로 SPM 전력 공급 시스템의 배터리 용량을 계 산하게 된다. 다음 표는 SPM 전력 공급 시스템의 운용 모드에 대해 설명한다.

mode	일반운용상태 (normal operation)	부조상태 (autonomy operation)
정의	평상시, 태양광 발전이 가능하고 평균 전력을 소모	일조량이 없을 시, 태양광 발전이 불가능하고 평균 전력을 소모
계산	태양광 패널의 필요 발전량 계산	배터리 용량 계산
	야 양 대	

Table	6	System	operation	mode	of	SPM
-------	---	--------	-----------	------	----	-----

3.3. 시스템 용량 계산

3.3.1. 태양광 패널 용량 계산

태양광 패널의 용량은 일반 운용 상태를 기준으로 산정된다. SPM 시스템에 포함 되는 모든 기기들의 일일 평균 전력 소모량과 평균 전력 소비량의 5%에 해당하는 일일 전력 손실, 그리고 평균 전력 소모량의 15%에 해당되는 최소 배터리 충전량을 합산한다. 다음 표는 SPM 시스템의 기기 소요 전력량 분석과 최소 태양광 발전 용 량 계산 결과를 나타낸다.



항목	계산식	결과깂	ţ
시스템 사용 전압	(A)	24	[VDC]
시스템 Peak 전류	(B)	40.48	[A]
시스템 일일 소요 용량	(C)	714.72	[Wh]
일일 전력 손실	(D)=(C)×0.05	35.74	[Wh]
최소 배터리 충전량	(E)=(C)×0.15	107.21	[Wh]
일일 필요 발전량	(F)=(C)+(D)+(E)	857.66	[Wh]

Table 7 Daily required amount of power generation

TIME AND OCEAN

위의 계산 결과에 따라 SPM 시스템의 일일 필요 발전량 857.66Wh를 기준으로 하여 태양광 패널의 개수 및 배터리 용량을 선정하기로 하였다. 대상 태양광 패널은 lkW/m^2 일사량에서 최대 발전량 85W 기준으로 계산되었다.

1945

Table 8 Number of minimum required installation panel

항목	계산식	결과값
패널 최대 발전량(1kW/m²)	(G)	85 [W]
오염에 의한 출력감소	(H)=(G)×0.1	8.5 [W]
온도에 의한 출력감소	(I)=(G)×0.25	21.25 [W]
패널 발전량	(J)=(G)-(H)-(I)	55.25 [W]
일조시간	(K)	5.4 [Hr]
패널당 일일 발전용량	(L)=(J)×(K)	298.35 [Wh]
최소 요구 패널 개수	(M)=(F)/(L)	3(2.87) [장]
설치 패널 개수	(N)	6 [장]



계산 결과 SPM 시스템의 태양광 패널은 85W 발전 가능한 태양광 패널 기준으로 3장이 필요하다.

3.3.2. 배터리 용량 계산

SPM 전력공급시스템의 배터리는 SPM 시스템의 운용 모드 중 부조상태를 기준으 로 용량계산이 이루어져야 하며 시스템의 사용전력량과 부조일수가 고려된다. 배터 리는 부조일수 동안 기기에 전력 공급이 가능해야 하며, 태양광 패널에서 생산되는 전력으로 충분히 축전이 가능해야 한다. 또한 태양광 시스템에 적용되는 배터리의 용량 계산에서는 부조일수와 온도 변화에 의한 보정, 과방전 방지, 방전심도(depth of discharge, DOD)등이 고려되어야 한다. 배터리 용량 계산식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$C = E \times n_l \times \frac{k_l \times k_d \times k_t}{k_{dod}}$$

(15)

Table 9 Battery capacity calculation method

항목	계산식	결과값
일일 필요 발전량	표.7 의 (F)	857.66 [Wh]
배터리 필요 용량(일일)	(O)=(F)/24V	29.78 [Ah]
배터리 노화 보정(0%)	(P)=(O)*1	29.78 [Wh]
과방전 방지(20%)	(Q)=(P)*1.2	35.74 [Wh]
온도변화 보정(10.5%)	(R)=(Q)*0.105	39.49 [Wh]



여기서 *E*는 일일 필요 발전 용량, *n*_l은 부조일수, *k*_l은 배터리의 노화로 인한 보정 계수, *k*_d는 과방전 방지 계수, *k*_t는 온도 계수, *k*_{dod}는 방전심도를 의미한다. 다음 표 는 부조일수와 방전심도를 고려하지 않고 계산한 결과를 바탕으로 부조일수와 방전 심도를 다르게 하여 계산한 결과이다.

<i>C</i> -20 <i>A</i>	0 [45]	부조일수						
C=39.4	19 [AII]	3일	4일	5일	6일			
((70%	169.23 [Ah]	225.65 [Ah]	282.06 [Ah]	338.47 [Ah]			
D(lepth of	60%	197.44 [Ah]	263.25 [Ah]	329.07 [Ah]	394.88 [Ah]			
)D discharge	50%	326.93 [Ah]	315.90 [Ah]	394.88 [Ah]	473.86 [Ah]			
(e)	40%	296.16 [Ah]	394.88 [Ah]	493.60 [Ah]	592.32 [Ah]			
			10/5	· ~ /				

Table 10 Battery capacity calculation

이 중 SPM 시스템의 설치 환경조건을 고려하여 부조일수 4일, DOD 50%를 기준 으로 하여 배터리 용량을 315.9Ah로 선정하기로 하였다.

10/

3.4. 태양광 발전 기반의 SPM 전력 체계

3.4.1. Partial shading 상태에서 MPP 분석

① 단일 패널에서의 MPP 분석

두 개의 패널에 적용하기 위해 단일 패널의 최대전력전압 V_{mpp}의 위치를 2장에서 설계한 모델을 시뮬레이션하여 도출하였다. 결과는 다음 표와 같다.

$G(W/m^2)$	Pmax	V_{mpp}	Impp	Voc	Vmpp/Voc
50	3.92	15.95	0.25	18.58	0.86
100	8.07	16.41	0.49	19.17	0.86
150	12.29	16.70	0.74	19.51	0.86
200	16.54	16.85	0.98	19.76	0.85
250	20.78	16.92	1.23	19.95	0.85
300	25.03	16.97	1.48	20.10	0.84
350	29.26	17.00	1.72	20.23	0.84
400	33.46	16.95	1.97	20.35	0.83
450	37.65	17.11	2.20	20.45	0.84
500	41.82	17.07	2.45	20.54	0.83
550	45.96	17.04	2.70	20.62	0.83
600	50.06	17.09	2.93	20.69	0.83
650	54.15	17.01	3.18	20.76	0.82
700	58.17	16.81	3.46	20.82	0.81
750	62.19	16.80	3.70	20.88	0.80
800	66.17	17.01	3.89	20.94	0.81
850	70.15	16.86	4.16	20.99	0.80
900	74.01	16.96	4.36	21.04	0.81
950	77.92	16.66	4.68	21.08	0.79
1000	81.79	16.68	4.90	21.13	0.79
max	81.79	17.11	4.90	21.13	0.86
min	3.92	15.95 94	0.25	18.58	0.79
average	43.47	16.84	2.57	20.38	0.83

Table 11 Characteristics of solar generation according to irradiation

따라서 태양광 패널의 MPP는 V_{oc} 의 83% 근처의 전압에서 존재한다는 것을 확인 할 수 있다.

② 직렬 연결된 패널의 MPP 분석

partial shading 현상은 패널에 조사되는 광량의 차이에 의해 발생하게 되며, 직렬 로 연결된 태양광 패널의 수만큼 LMPP가 나타난다. 2장에서 설계한 SPM 시스템에 서 구름이나 오염으로 태양광 패널의 일부가 가려서 발생하게 되는 partial shading 현상을 제외한다면, 패널에 조사되는 광량의 차이에 의해 발생하는 partial shading 현상은 두 개의 LMPP를 갖게 된다. 이때 partial shading이 발생한 전압-출력 곡선 의 형태는 다음 그림과 같이 크게 두 가지로 구분할 수 있다.





(a) $800W/m^2$ on panel 1 and $200W/m^2$ on panel 2



(b) $600W/m^2$ on panel 1 and $400W/m^2$ on panel 2

Fig. 22 Characteristic curve in case of differenct irradiation between panels

그림 22를 살펴보면 두 개의 LMPP가 발생하는 것을 확인할 수 있다. GMPP가 (a) 에서는 왼쪽에 위치하고, (b)에서는 오른쪽에 위치한다. 이러한 차이는 각 패널에 조사되는 태양광량의 차이에 기인하게 된다. 광량 차이에 따른 MPP 위치에 대하여 다음 표와 같이 정리된다.



		R _{itt} (%)							
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P _{LMPP} /P _{GMPP}	0.23	0.23	0.68	0.90	0.89	0.76	0.66	0.59	0.53
GMPP	Left	Left	Left	Left	Right	Right	Right	Right	Right
V _{mpp1} /V _{oc}	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
V_{mpp2}/V_{oc}	0.91	0.90	0.89	0.88	0.86	0.85	0.84	0.82	0.81

Table 12 Position of MPP according to amount of irradiation

여기에서 광량의 비율 R_{irr}은 다음으로 정의하였다.

$$R_{irr} = \frac{G_2}{G_1}$$
 , $G_1 > G_2$
1945

(16)

두 패널에 조사되는 광량의 비율이 40~50% 근처에서 두 개의 LMPP가 동일한 출 력을 갖게 된다. 광량의 차이가 이보다 크게 되면, 즉 광량의 비율이 50% 이하일 때 LMPP는 왼쪽에 생기고, 광량의 차이가 이보다 작게 되면, 즉 광량의 비율이 50% 이상일 때는 LMPP가 오른쪽에 발생한다.

③ 특성곡선 시뮬레이션

위의 내용을 바탕으로 앞서 선정된 여섯 장의 태양광 패널에 대하여 2장에서 설 계된 모델을 이용하여 광량 차이에 따른 발전량을 시뮬레이션 하였다. 다음 그림은 시뮬레이션 구성을 나타내며 표는 시뮬레이션 조건을 나타낸다.



Fig. 23 Simulation configuration using MATLAB



Table 13 Simulation condition of characteristic curve

위의 조건에 대하여 총 100가지 case에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 다음은 시 뮬레이션 결과 중 array 1에 조사되는 광량이 각각 300W/m², 500W/m², 700W/m²일 때 array 2에 조사되는 여러 가지 경우의 광량에 대하여 특성곡선을 나타낸 것이다.



Fig. 24 Characteristic curve in case of $300W/m^2$ on array 1





Fig. 25 Characteristic curve in case of $500W/m^2$ on array 1





(b) V-P curve

Fig. 26 Characteristic curve in case of $700W/m^2$ on array 1



이상의 시물레이션의 결과를 살펴보면 광량의 비율이 50% 보다 조금 더 클 때 두 개의 LMPP의 발전량이 같아짐을 확인할 수 있었다. 이는 MPP의 판단 기준을 계산 값으로부터 여유를 둘 필요가 있음으로 해석할 수 있다.

3.4.2. 개선된 최대전력점 추종 알고리즘

① LMPP 회피

SPM 시스템에 설치된 태양광 발전 시스템과 같이 태양광 패널에 입사되는 태양 광량이 급격하게 바뀔 가능성이 있고 지속적인 에너지 생산을 위해서 태양광 패널 을 여러 방향으로 설치하게 되는 경우 partial shading 현상에 취약하다. LMPP를 회 피하기 위해서는 PWM의 듀티비를 변화시켜 전압에 따른 출력을 측정하여 비교하 는 것이 가장 정확하다.



Fig. 27 Outline of maximum power point searching and tracking(MPPST) algorithm



그림은 GMPP 서칭을 포함하는 MPPST(Maximum Power Point Searching and Tracking) 알고리즘이다. MPPST 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성된다. V_{oc}에서부 터 배터리 전압까지 PWM의 듀티비를 변화시켜 최대 전력점을 찾는 searching 알고 리즘부와 이전 주기와 현재 주기의 출력값을 비교하여 최대 전력점을 추종하는 tracking 알고리즘부로 나뉜다. 이 알고리즘은 LMPP를 회피하고 GMPP를 찾는데 효율적이며, 광량 변화에 의해 V-P 곡선이 자주 변화할 시 P&O 알고리즘에서 MPP를 제대로 추종하지 못하는 문제점을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

② 알고리즘의 효율

하지만 PWM으로 전압 범위 전체를 서칭하는 것 자체가 손실이 되므로 자주 서 칭을 하거나 전체를 모두 서칭하는 것은 발전에 불리하다. 어느 정도 긴 주기를 두 고 서칭을 하거나, MPP가 존재하는 구간만 서칭하는 등 서칭 시간을 최소화하여야 서칭 알고리즘으로 인한 손실을 줄일 수 있다. MPPST 알고리즘의 효율을 높을 수 있는 방법은 다음과 같은 방법이 있다.

- 서칭 구간 축소
- 서칭 속도 증가
- 서칭 주기 연장

서칭 속도는 연산 속도와 관련이 있고, 서칭 주기는 SPM 시스템의 설치 환경의 영향을 크게 받으므로 제외하기로 하고 본 논문에서는 서칭 구간의 축소 관점에서 알고리즘을 설계하고자 한다.

1945

③ 서칭 구간의 축소

태양광 패널에 조사되는 광량 차이에 의해 발생하는 partial shading 현상에서 MPP의 위치는 개방전압으로부터 추정이 가능하다. 처음 알고리즘이 시작될 때 태 양광 패널의 개방전압을 측정하여 첫 번째 MPP 위치의 예상 범위를 서칭구간으로 제한한다. 다음 PWM을 변화시켜 가며 가장 출력이 높은 MPP를 도출한다. 이때 출 력값을 비교하여 추가로 MPP를 찾을지, 혹은 서칭한 MPP 위치에서 P&O 알고리즘 으로 동작할지를 결정한다. 추가로 MPP를 찾을 경우 두 번째 MPP 위치 예상 범위



까지 서칭하여 두 구간에서 도출된 MPP점의 출력을 비교하여 최종 GMPP로 이동한 다. 이때 MPP 서칭 범위의 기준은 다음과 같다.

- 서칭 첫 번째 : Voc에서 Voc의 80%까지
- 서칭 두 번째 : Voc의 45%에서 Voc의 35%까지

또한 첫 번째 MPP에서의 출력이 어느 정도 이상이라면 GMPP로 판단이 가능하므 로 첫 번째 MPP에서의 출력으로 다음 서칭을 결정할 수 있다. 다음 표는 태양광 패널의 최대 출력 대비 GMPP에서의 출력의 비를 나타낸다.

						1			
		R _{irr} (%)							
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
P _{MPP} /P _{MAX}	0.50	0.50	0.50	0.50	0.55	0.66	0.76	0.85	0.93
GMPP	Image: Apply and the second								
ें दि टम									

Table 14 Output ratio of GMPP-to-first MPP

첫 번째 MPP에서의 출력이 최대출력의 0.55배 이상이라면 첫 번째 MPP가 GMPP 라고 판단한다.

④ MPPST 알고리즘

LMPP를 회피하기 위한 searching 알고리즘과 searching 판단 및 searching 구간 계산을 포함하는 최종 MPPST 알고리즘은 다음과 같다.



Fig. 28 Improved MPPST algorithm

• 첫 번째 searching 알고리즘

먼저 알고리즘이 시작되면 개방상태의 태양광 패널의 전압을 측정한다. N channel MOSFET을 스위칭 소자로 사용하게 될 경우, 듀티비 0%에서의 전압을 측 정하면 된다. 그리고 전압이 개방전압의 80%가 될 때까지 PWM의 듀티비를 변화시 켜가며 전압에 따른 출력을 저장한다.

• MPP 판단 알고리즘

첫 번째 측정 범위인 개방전압부터 개방전압의 80%까지의 출력 중 최대출력점을



추출한다. 이때 추출된 최대출력점이 태양광 패널에서 발전될 수 있는 최대 전력의 55%보다 크다면 partial shading 현상이 발생하였다고 하더라도 이 점을 GMPP로 판 단할 수 있으므로 P&O 알고리즘(기존 MPPT 알고리즘)을 수행하면 된다. 반면 추출 된 최대출력점이 최대 전력의 55%보다 작으면 LMPP일 가능성이 있으므로 다음 두 번째 searching 알고리즘을 수행하도록 한다.

• 두 번째 searching 알고리즘

앞선 알고리즘에서 두 번째 searching 알고리즘을 수행하도록 선택될 경우, 개방 전압의 45% 지점부터 개방전압의 35% 지점까지 PWM의 듀티비를 변화시켜 가며 출력을 계산한다. 그리고 첫 번째 searching 알고리즘에서 도출한 최대출력점과 함 께 비교하여 최종적으로 GMPP를 도출하도록 한다.

• P&O 알고리즘(기존 MPPT 알고리즘)

최종적으로 도출된 GMPP의 전압에서부터 기존의 MPPT 알고리즘을 수행한다. time out 시간을 정하여 충분한 시간동안 P&O 알고리즘이 수행되도록 하고 이후 다시 첫 번째 searching 알고리즘으로 돌아간다.

3.4.3. 배터리 관리 시스템

가. 배터리 보호 알고리즘

태양광 발전은 에너지 생산이 일조시간과 직접적으로 연관되기 때문에 전력 공급 이 지속적이지 않은 문제가 있다. 따라서 안정적인 전력공급시스템을 구성하기 위 해서는 배터리가 필수적이며 배터리의 안정적인 운용이 시스템의 신뢰성을 확보하 는데 주요 인자가 될 수 있다.

1945

① 과충전 방지

태양광 패널에 입사되는 태양광량이 많거나 발전이 가능한 일조시간이 길어질 때 기기에서 전력을 사용하더라도 배터리가 완충되는 경우가 발생할 수 있다. 배터리 과충전 방지 알고리즘이 없을 경우 태양광 패널에서 발전되는 전력을 배터리에서 모두 수용해야 하므로 배터리의 수명을 감소시킨다. 이를 방지하기 위해서 배터리 상태를 감시하여 배터리의 과충전을 방지 알고리즘이 필요하다.



② 과방전 방지

과충전 상태와 반대로 부조상태가 지속되는 경우 배터리의 과방전이 발생할 수 있다. 일정 방전심도 이하에서 기기에서 지속적으로 전력을 소비하게 된다면 배터 리의 수명을 단축시키고, 재충전이 불가능해지는 경우도 있으므로 과방전 알고리즘 으로 부하를 제어할 필요가 있다.

또한 과방전 방지를 보다 효율적으로 수행하기 위해 시스템 부하를 중요부하 (important load)와 비중요부하(unimportant load)로 분류하여 유사시 비중요부하를 먼저 차단시켜 최소한의 시스템 운용이 가능하도록 한다면, 보다 안정적인 시스템 운용이 가능하다.

앞서 제안된 과충전 및 과방전 방지 기능을 포함하는 배터리 보호 알고리즘은 다 음과 같이 나타낼 수 있다.



Fig. 29 Battery protection algorithm



나. 배터리 용량 계산

배터리의 효과적인 관리 및 보호를 위해서는 배터리의 잔존용량(state of charge, SOC)을 측정할 필요가 있다. 배터리의 잔존용량은 배터리에서 사용 가능한 전력량 을 의미하며 0%를 완전 방전 상태, 100%를 완전 충전 상태로 본다. 배터리의 잔존 용량은 직접적으로 측정할 수 없으며 간접적으로 배터리의 용량을 계산하는 방법으 로 배터리의 양단 전압을 측정하는 전압 측정법, 충전 또는 방전된 전류량을 적산 하는 전류 적산법, 배터리의 전해액의 비중을 측정하는 비중 측정법 등이 있다[2]. 본 논문에서는 전류 적산법을 기본으로 전압 측정법을 병행하는 배터리 용량 계산 알고리즘을 제안한다.

① 전압 측정법

배터리의 방전 특성을 나타내는 방전곡선(discharge curve)은 배터리의 전압변화 에 비례한다. 따라서 배터리의 양단 전압을 측정하여 해당 배터리의 방전곡선과 대 조해봄으로서 배터리의 잔존용량을 측정할 수 있다. 하지만 배터리가 충방전 중일 때의 배터리 양단전압과 방전곡선에 나타나는 배터리 전압은 정확히 일치하지 않으 며 충전 또는 방전 후 배터리가 휴지기 동안 배터리의 전압이 바뀌는 경우가 있으 므로 배터리의 충방전 중에는 배터리의 잔량을 정확하게 측정할 수 없다는 단점이 있다.

1945

② 전류 적산법

Y OF LH

전류 적산법은 배터리 사용 시간 동안 충전 또는 방전되는 전류량을 적분하여 잔 존용량을 산출한다. 하지만 측정 시간이 길어질수록 오차가 누적되므로 배터리를 사용하지 않을 때 다른 잔존용량 측정법을 통하여 잔존용량의 보정이 필요하다. 전 류 적산법은 다음의 공식으로 구할 수 있다.

$$Q = C_0 + \left(\frac{\int I_C \, dt - \int I_D \, dt}{Q_0}\right) \times \eta \tag{17}$$

여기서 Q는 현재 잔존용량, C₀은 초기 잔존용량, I_c는 충전전류, I_b는 방전전류, Q₀ 은 배터리 정격용량, η은 충방전 효율을 나타낸다.



③ 배터리 용량 계산

배터리 용량 계산에서는 전압 측정법과 전류 적산법을 이용하여 배터리의 잔존용 량을 측정하도록 한다. 배터리의 사용 시간 동안은 배터리에 충방전되는 전류량을 적산하여 잔존용량을 표시하도록 하고, 배터리의 휴지 시간이 충분히 지나 배터리 전압이 안정되었을 때 배터리 양단의 전압을 측정하여 잔존용량을 보정한다.

3.4.4. 컨버터 설계

가. 시스템 특성

법 컨버터는 시스템의 특성에 맞게 설계되어야 한다. 법 컨버터를 구성하는 소자 들에 가해지는 전압과 전류를 분명히 하여 소자를 선정, 설계하는 것이 중요하다. 실험 시 구성하고자 하는 시스템의 입력전압, 출력전압, 출력전류 및 스위칭 주파수 를 다음 표와 같이 정리하였다.

Table 15 System requ	airement of converter
입력전압 (V) 194	44.06 [V]
입력전류 (I)	7 [A]
출력전압 (<i>V_o</i>)	24 [V]
출력전류 (I _d)	13 [A]
스위칭 주파수 (f)	20 [kHz]

나. 스위칭 소자

스위칭 소자는 N channel MOSFET으로 하였으며 MOSFET의 정격전압은 1.4배, 정격전류는 3배가 되도록 설계한다.



다. 인덕턴스

시스템 특성에서 주어진 입력전압과 출력전압, 출력전류, 스위칭 주파수를 이용하 여 인덕터의 인덕턴스를 구한다. 인턱턴스 L은 다음 식으로 표현 가능하며 시스템 특성 값으로 인덕턴스를 구하였다.

$$L = \frac{(V_i - V_o)V_o}{0.3 \times I_o f V_i}$$

= $\frac{(44.06 - 24)24}{0.3(13)(20 \times 10^3)(44.06)}$
= $140(\mu H)$

(18)

라. 입력 캐패시턴스

입력측 캐패시터는 스위칭 전류에 전압의 변동이 발생하지 않도록 하는 역할을 한다. 전압 변동률을 입력전압의 1% 이하로 하여 설계한다. 다음은 입력 캐패시터 에 발생하는 전압리플 V_{Cm} 을 구하는 공식이다.

$$V_{Cin} = I_{Cin} \frac{1}{C_{in} f} \frac{V_o}{V_i}$$

= $(7) \frac{1}{(480 \times 10^{-6})(20 \times 10^3)} \frac{24}{44.06}$
= $3 \times 10^{-7} (V)$ (19)

여기서 ICm은 입력측 캐패시터 입력 전류, Cin은 입력 캐패시터 용량이다. 계산 결과 전압리플이 입력전압 42.06V의 1% 이하를 만족한다.



3.5. 태양광 발전 기반의 SPM 전력 체계 구성

앞에서 계산된 시스템 사양을 정리하면 다음 표와 같다. 그림 30은 계산 결과를 바탕으로 태양광 발전 기반의 SPM 전력 체계를 single line diagram으로 나타낸 것이다.

 항목	계산식			
일일 필요 발전량	857.66	[Wh]		
일조시간	5.4	[A]		
태양광패널 설치개수	6	[장]		
태양광패널발전량	344.28	[Wh]		
부조일수	4	[일]		
배터리 용량	315.90	[Ah]		

Table 16 SPM system specification





Fig. 30 SPM single line diagram



4. 실험

4.1. 실험 구성

본 논문에서 수행하는 SPM 전력공급시스템의 발전 분석 실험은 설치 공간의 제 약으로 인해 3장에서 설계된 SPM 전력공급시스템과 비교하여 다음과 같은 차이로 구성되었다.

	SPM용 전력공급시스템	실험 구성	
태양광 패널 개수	6장(직병렬)	2장(직렬)	
태양광 패널 출력	85W*6장 = 510 [W]	180W*2장 = 360 [W]	
태양광 패널의 개방전압	22.03V*2경 = 44.06 [V]	42.5V*2장 = 85 [V]	
배터리 전압	24 [V]	12 [V]	
설치 환경	해상	육상	

uration	,
urati	on

태양광 패널의 개수가 줄어 전체 태양광 출력은 태양광 패널에서 발생하는 손실 을 제외하고 510W에서 360W로 감소하였다. 또한 설치 환경이 육상이므로 파랑 및 바람에 의한 급격한 광량 변화로 인한 영향은 받지 않는다. 반면 배터리 전압을 감 소시킴으로써 충분한 전류 측정 및 partial shading 현상 관찰이 유리하도록 구성하 였다. 다음 그림은 실험의 전체 구성도를 나타낸다.





Fig. 31 Test system configuration

본 실험은 기존 태양광 발전 시스템과 MPPST 알고리즘을 적용한 태양광 발전 시 스템의 효율 분석과 SPM 전력 공급시스템에 적용했을 시 발전 경향 분석을 목표로 진행하고자 한다.

4.1.1. 태양광 패널

본 실험은 육상에서 진행되므로 partial shading 현상을 임의로 만들기 위해 태양 광 패널 두 장을 각기 다른 방향으로 설치하였다. 다음은 태양광 패널의 실제 설치 모습이다.





Fig. 32 Installation of solar panels

태양광 패널은 해양대학교 해사대학관 옥상에 설치되었으며, 좌표값은 위도 35° 4′33″, 경도 129°5′20″에 해당된다. 태양광 패널은 각각 155°남동, 335°북서로 설치되었다. 실험에 사용되는 태양광 패널의 사양은 다음과 같다.

				1	945
Table	18	Specification	of	AP-PN	180

maximum power	180 [W]
maximum power voltage	35.5 [V]
maximum power current	5.07 [A]
open circuit voltage	5.93 [V]
short circuit current	42.5 [V]
number of solar cells	72 in series



또한 광량에 대한 영향을 분석하기 위해 태양광 패널의 설치 방향으로 광량센서 를 설치하였다. 광량센서의 설치 모습 및 사양은 다음과 같다.



Fig. 33 Installation of irradiation sensor

1945

Table 19 Technical specification of LP SILICON-PYRA 04			
감도	20 [µV]		
측정범위	0~2000 [W/m ²]		
스펙트럼범위	400~1100 [nm]		
직선성	<1 [%]		
작동온도	-40~65 [°C]		

Table 19 Technical specification of LP SILICON-PYRA 04



4.1.2. 배터리

실험에 사용되는 배터리는 ESG-200 제품으로 2V 배터리 6개를 직렬로 연결하여 12V로 구성되었다. 배터리는 아래 그림과 같이 구성되었으며, 표는 실험에 사용된 배터리의 제원을 나타낸다.



Fig. 34 Installation of batteries

Table	20	Technical	specification	of	ESG-200
-------	----	-----------	---------------	----	---------

공칭전압		2 [V]		
각 시간율 용량	10hr 1.80V/cell	200 [Ah]		
	5hr 1.75V/cell	183 [Ah]		
	3hr 1.7V/cell	166 [Ah]		
	lhr 1.6V/cell	130 [Ah]		
	0.5hr 1.6V/cell	100 [Ah]		
외형치수(<i>L</i> × <i>W</i> × <i>H</i>)		106×170×325 [mm]		
중량		12 [kg]		



4.2. 태양광 발전 제어기

실험에 사용될 태양광 발전 제어기는 3장에서 설계된 SPM 전력공급시스템의 벅 컨버터와 차이가 있으므로 실험에 알맞도록 다음과 같이 재설계 되었다. 3장에 설 계된 SPM과 실험 환경의 차이는 표 17에서 기술되었으며 벅 컨버터 설계 방법은 3 장의 내용을 바탕으로 진행되었다. 설계 결과는 아래 표에 나타나있다.



Table 21 System configuration of test

표 21과 3장의 설계방법을 바탕으로 PWM을 만들어내는 기능을 갖는 보드와 벅 컨버터 보드, 총 두 개의 보드가 제작되었다. 본 논문에서 태양광 발전 제어용으로 사용될 벅 컨버터는 절연형으로 태양광 패널에서 발전된 전력을 배터리로 충전시키 는 전력부와 PWM, 전압 및 전류를 측정하는 센서를 포함하는 신호부로 나누어진 다. 이 외 데이터 측정 및 수집에는 NI사의 c-RIO 및 my-RIO를 사용하였다.

다음 그림은 NI사의 c-RIO로부터 PWM 신호를 입력받아 15V의 MOSFET 게이트 파형을 만들어내는 보드이다.



Fig. 35 Schematic diagram of PWM generation board

그림 35의 보드는 MOSFET 드라이버와 15V를 만들어내는 소형 절연형 컨버터를 포함하고 있다. 다음 그림은 벅 컨버터로 구성된 보드의 도면이다.



Fig. 36 Schematic diagram of buck converter

그림에서 나타난 벅 컨버터는 두 개의 MOSFET을 병렬 스위칭하도록 되어 있고 그 외 다이오드와 컨버터로 구성되어 있다. 인덕터는 단자대를 통해 연결된다. 다음 그림은 제작된 보드의 실제 모습이다.





Fig. 38 Buck converter board

다음 그림은 제작된 벅 컨버터의 동작을 확인하기 위해 시험한 스위칭 파형을 나타낸다.





(c) 80% duty ratio

Fig. 39 Waveform of PWM according to duty ratio



4.3. 프로그램

태양광 패널 및 배터리의 전압 및 전류 측정과 태양광 광량 데이터의 수집은 NI 사의 c-RIO와 my-RIO를 사용하였다. 제어 프로그램은 NI LabVIEW를 이용하여 비 교군으로서 기존의 알고리즘인 MPPT와 개선된 알고리즘인 MPPST, 두 가지 프로그 램을 제작하였으며 MPPST 제어 프로그램의 블록 다이어그램은 다음 그림과 같다.



(b) Blcok diagram of MPPST : find second MPP





(c) Blcok diagram of MPPST : MPPT

Fig. 40 Block diagram of MPPST program

MPPST 제어 프로그램은 '첫 번째 MPP 찾기 및 판단', '두 번째 MPP 찾기 및 GMPP 판단', 'MPPT', 총 3 단계로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 MPP가 분포하는 구간에 대하여 PWM의 듀티비를 변화시켜가 며 출력을 측정하고 측정된 데이터 중에 가장 큰 출력을 갖는 지점이 첫 번째 MPP 가 된다. 그리고 첫 번째 MPP로 두 번째 MPP 찾는 동작의 여부를 판단하게 되는 데, 첫 번째 MPP에서 출력이 태양광 발전 시스템의 최대 출력의 55% 이상을 만족 한다면 두 번째 MPP를 찾는 동작을 할 필요 없이 첫 번째 MPP를 GMPP로 판단하 고 MPPT 알고리즘 동작을 수행하도록 한다. 만약 55% 이상을 만족하지 못한다면 두 번째 MPP를 찾는 알고리즘으로 이동하도록 한다. 다음 단계에서는 마찬가지로 두 번째 MPP가 분포하는 구간에 대하여 PWM의 듀티비를 변화시켜가며 출력을 측 정한다. 다음 본 단계에서 측정된 MPP와 이전 단계에서 측정된 MPP를 비교하여 최 종적으로 GMPP가 선택된다. 마지막으로 알고리즘을 통해 선택된 GMPP로 이동하여 MPPT 알고리즘을 수행한다.



5. 실험 결과

5.1. 광량 분석

태양광 발전 시스템의 발전량은 광량에 직접적인 영향을 받는다. 하지만 partial shading과 같이 두 개의 패널에 조사되는 광량이 다를 경우 아래의 그래프와 같이 태양광 발전 시스템의 발전량은 구간을 나누어 광량을 따라가는 형상을 보인다. 다 음 그림은 태양광 패널에 조사되는 광량과 태양광 발전 제어기 없이 태양광 패널과 배터리를 직결 연결 하였을 때의 발전량을 나타낸 그래프이다.



Fig. 41 Irradiation and power in case of PV-battery direct connection

위와 같은 그래프는 서로 다른 광량에 의한 다른 특성곡선이 중첩되어 발생하는 현상으로서 배터리 전압에 해당하는 전압 구간에 걸쳐진 특성곡선에 맞춰 태양광 발전 시스템의 출력이 결정된다.

partial shading이 발생한 태양광 발전 시스템의 특성곡선은 패널에 조사되는 광량 뿐 아니라 패널 간 광량의 차이에도 영향을 받는다. 그림은 광량비와 출력의 관계 를 나타낸 그래프이다.




Fig. 42 Irradiation ratio and power in case of PV-battery direct connection

여기에서 광량의 비 $\eta_G = \frac{G_2}{G_1}$ 으로, G_1 은 태양광 panel 1에 조사되는 광량, G_2 는 태양광 panel 2에 조사되는 광량을 의미하여 $G_1 > G_2$ 이다. 그래프를 살펴보면 광량의 비가 20% 근처에서 출력이 급격하게 줄어드는 것을 확인할 수 있으며 이는 광량의 차이에 의한 특성곡선의 변화로 설명된다.

5.2. 특성곡선 분석

태양광 발전 시스템은 비선형 발전원으로서 시스템 부하를 변경시킴으로서 태양 광 패널의 출력을 변화시킬 수 있다. 태양광 패널의 출력을 V-I 또는 V-P 곡선으로 나타내면 시스템 전압 변화에 따른 특성곡선의 변화를 확인하기 쉽다. 더불어 태양 광 패널 간 조사되는 광량이 다를 경우 다른 두 개의 특성 곡선이 중첩되어 나타나 게 된다. 본 실험은 4장에서 제안한 것과 같이 두 개의 태양광 패널이 다른 광량을 받도록 시스템을 구성하였으며 따라서 만들어질 수 있는 특성곡선은 크게 세 가지 로 분류할 수 있다.

- 하나의 MPP가 존재하는 경우
- 두 개의 MPP가 존재하고, GMPP가 왼쪽에, LMPP가 오른쪽에 위치하는 경우
- 두 개의 MPP가 존재하고, LMPP가 왼쪽에, GMPP가 오른쪽에 위치하는 경우



다음 그림은 실험을 통해 관측된 특성곡선을 나타내고 있다.

① 하나의 MPP가 존재하는 경우



(b) V-P curve

Fig. 43 Characteristic curve at 14:32 April 26th 2015

그림 43은 하나의 MPP가 발생할 경우에 대한 V-I 및 V-P 특성곡선이다. 이와 같 은 상황은 두 개의 태양광 패널에 입사되는 태양광량이 동일할 때 발생하게 된다. 그림의 특성곡선의 측정 시각은 14시 32분이다.



② 두 개의 MPP가 존재하고, GMPP가 왼쪽에, LMPP가 오른쪽에 위치하는 경우



(b) V-P curve

Fig. 44 Characteristic curve at 8:19 April 26th 2015

그림 44는 두 개의 MPP가 발생하고 GMPP가 왼쪽에, LMPP가 오른쪽에 존재하는 경우를 나타낸다. MPP의 위치는 앞서 3장에서 시뮬레이션 된 것과 같이 패널에 입 사되는 광량에 차이에 영향을 받는다. 그림 44와 같이 GMPP가 왼쪽에 위치하는 경 우는 두 태양광 패널 간의 광량 차이가 클 경우에 나타난다. 특성곡선의 측정 시각 은 8시 19분이며, 이때 광량은 패널 각각 약 556W/m² 과 약 114W/m² 이다.





(b) V-P curve

Fig. 45 Characteristic curve at 15:22 April 26th 2015

그림 45는 두 개의 MPP가 발생하고 LMPP가 왼쪽에, GMPP가 오른쪽에 존재하는 경우를 나타낸다. 측정 시각은 15시 22분으로 이때 광량은 각각 약 262W/m² 과 약 404W/m² 이다.



④ 시간에 따른 특성 곡선의 변화

다음 그림은 시간에 따른 특성곡선의 변화를 3차원으로 나타낸 그래프이다.



(b) V-P curve

Fig. 46 Characteristic curve during the day



5.3. 발전량 분석

앞서 확인된 특성곡선을 갖는 태양광 발전 시스템에 대하여 기존의 MPPT 알고리 즘과 개선된 MPPST 알고리즘에 의한 발전량을 분석하였다. 기존의 MPPT 알고리즘 과 개선된 MPPST 알고리즘은 최초 MPP 추종 방법에 가장 큰 차이가 있으므로 태 양광 패널의 발전 전력과 배터리 충전 전력 및 MPP에서의 전압인 V_{mpp} 의 분석에 초점을 맞추었다.

5.3.1 기존의 MPPT 알고리즘의 발전 경향

AND OCH 140 80 70 120 60 100 50 S 80 Vmpp Pmpp 40 60 30 40 20 20 10 0 0 8:19 10:13 11:24 12:06 13:52 14:32 14:58 15:22 15:43 16:54 Time

하루 동안 MPPT 알고리즘을 실험하였을 때 시간에 따라 다음 그림과 같은 발전 경향을 갖는다.

Fig. 47 Output characteristic of MPPT algorithm

그래프를 살펴보면 태양광 발전 전력 및 배터리 충전 전력은 광량의 변화와 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 V_{mpp} 가 70V 근처의 값을 갖는다. 이는 기 존의 MPPT 알고리점이 첫 번째 MPP 만을 추종 가능하기 때문으로 기존의 MPPT 알고리즘으로 추종한 V_{mpp} 가 GMPP 인지 아닌지는 판단할 수 없다. 다음은 그래프 의 정보를 정리한 표이다.



시각	광량		MPPT					
	panel 1	panel 2	solar (W)	battery(W)	duty ratio(%)	V _{mpp} (V)		
8:19	555.83	113.96	32.13	28.63	16.28	71.66		
10:13	875.45	159.08	39.74	34.96	16.89	69.58		
11:24	926.88	295.57	72.96	60.25	16.97	70.96		
12:06	901.76	308.80	93.34	74.82	17.01	71.80		
13:52	602.02	342.91	130.02	101.42	17.43	69.79		
14:32	464.17	378.66	131.14	102.04	18.02	68.57		
14:58	370.28	395.05	99.11	78.64	17.03	71.08		
15:22	261.52	404.48	69.93	58.56	16.61	72.11		
15:43	173.90	413.95	48.21	41.22	16.22	72.53		
16:54	78.16	391.32	17.53	16.53	16.53	71.14		
	average		73.41	59.71	16.90	70.92		

Table 22 Output characteristic of MPPT algorithm

5.3.2. 개선된 MPPST 알고리즘의 발전 경향

다음 그림은 개선된 MPPST 알고리즘으로 하루 동안 실험한 결과이다.



Fig. 48 Output characteristic of MPPST algorithm



시각	광량			MPPST				
	panel 1	panel 2	R_{irr}	solar	battery	duty	V _{mpp} (V)	
				(W)	(W)	ratio(%)		
8:19	555.83	113.96	0.21	78.72	73.15	46.36	28.00	
10:13	875.45	159.08	0.18	72.03	64.62	37.81	37.74	
11:24	926.88	295.57	0.32	108.60	95.08	43.68	31.46	
12:06	901.76	308.80	0.34	118.83	103.57	44.97	30.65	
13:52	602.02	342.91	0.57	124.82	99.92	19.92	63.59	
14:32	464.17	378.66	0.82	134.52	105.87	20.22	63.48	
14:58	370.28	395.05	0.94	99.56	80.78	19.25	65.61	
15:22	261.52	404.48	0.65	70.35	59.69	19.13	65.38	
15:43	173.90	413.95	0.42	70.93	64.34	44.20	29.78	
16:54	78.16	391.32	0.20	68.55	61.25	45.23	29.30	
average				94.69	80.83	34.08	44.50	

Table 23 Output characteristic of MPPST algorithm

개선된 MPPST 알고리즘으로 제어한 태양광 발전 시스템은 기존의 MPPT 알고리 즘과 비교하였을 때 안정적인 출력을 얻는 것을 확인할 수 있다. 또한 기존의 MPPT 알고리즘과 비교했을 때 V_{mpp} 의 변화가 크게 나타나는 것은 개선된 MPPST 알고리즘이 GMPP를 추종하기 때문으로 GMPP의 위치는 3장에서 수행된 광량의 차 이에 따른 GMPP의 위치 및 앞에서 실험을 통해 도출된 특성 곡선에 기인한다. 3장 에서 광량의 비율이 50% 이하일 때 GMPP가 왼쪽에 나타나는 것으로 시뮬레이션 되었으며 이는 표 23에 나타난 결과와 일치함을 확인할 수 있다.



6. 결론

기존의 축전 시스템 기반의 SPM 전력 공급 시스템은 저장된 에너지로 전체 시스 템을 운용해야 하므로 주기적으로 외부로부터 충전이 필요하고 SPM에 요구되는 기 능이 늘어남에 따라 축전 시스템이 커져 유지 및 관리가 어렵다. 이에 대하여 본 논문에서는 재생에너지 기반의 SPM의 전력 공급 시스템 설계에 관한 연구를 수행 하였다.

재생에너지로는 태양광 발전을 선정하여 SPM 시스템의 운용 환경에 맞도록 전력 설계가 선행되었으며, 태양광 발전 효율을 높이기 위하여 최대전력점 추종 알고리 즘을 개선하고 발전 제어기를 설계하였다. 또한 배터리 상태에 따른 배터리 관리 알고리즘을 제안하었다.

SPM 전력 체계 구성에서는 SPM의 운용 환경 분석을 통해 태양광 발전 시스템을 적용한 운용 모드를 제안하고 시스템 용량을 산정하였다. 일일 전력 소요량이 714.72Wh인 SPM 시스템에서 일일 필요 발전량은 857.66Wh로 태양광 패널은 최대 발전량 85W 제품 기준 최소 3장 이상이 설치되어야 하며, 배터리는 부조일수를 고 려하여 315.9Ah로 선정하였다.

SPM 태양광 발전 제어 시스템 설계에서는 해양 시설물에 설치된 태양광 발전 시 스템에서 발생하기 쉬운 partial shading 현상을 MATLAB simulink를 통해 분석하였 으며, 분석한 결과는 MPPT(maximum power point tracking) 알고리즘에 적용하여 개 선된 MPPST(maximum power point searching and tracking) 알고리즘을 제안하였다. 제안한 MPPST 알고리즘은 특정 주기마다 MPP가 발생하는 구간을 제한하여 출력을 측정함으로써 partial shading이 발생하는 환경에서 LMPP를 회피 가능하도록 설계하 였다. 배터리 관리 시스템 설계에서는 배터리의 안정적인 운용을 위한 배터리 용량 계산 방법, 과충전 및 과방전 방지 알고리즘을 제안하였다.

실험에서는 태양광 패널 두 장을 다른 방향으로 설치하여 partial shading 현상이 발생하도록 구성하여 실험을 진행하였다. 시스템에 맞는 발전 제어기를 설계하였으 며 LabVIEW로 작성된 MPPT 알고리즘과 MPPST 알고리즘을 비교 실험하였다. 실험 결과 시뮬레이션과 같이 특성곡선의 형태가 광량의 차이에 영향을 받는다는 것을



확인할 수 있었으며 MPP 검색 구간을 제한하여 MPPST 알고리즘의 추종속도를 높 일 수 있었다. 또한 기존의 MPPT 알고리즘과 비교결과 개선된 MPPST 알고리즘의 평균 출력은 94.69W, 기존의 MPPT 알고리즘의 평균 출력은 74.41W로 평균 발전량 약 20W(기존의 알고리즘 출력의 약 27%)가 증가하였으며, 보다 안정적인 출력을 얻 는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문을 통해 연구된 재생에너지 기반 SPM 전력공급시스템은 이후 SPM 시스템 특성에 적합하도록 추가 보완 설계를 통해 대상 SPM에 설치하여 성능을 평가할 예 정에 있으며, 재생에너지 기반의 복합발전 전력체계로서 확장성을 갖도록 연구를 진행할 계획이다.





참고문헌

- 1. 김욱, 김상현, 이종학, 최우진, 2009. 새로운 태양전지 모델의 파라미터 추출법. 전력전자학회논문지, 14(5), pp.372-378.
- 문종현, 2009. *납축전지용 BMS(Battery Management System)에 관한 연구*. 석사학 위논문, 경북;영남대학교.
- 3. 안지운, 2013. 국제 신재생에너지 정책변화 및 시장 분석, 에너지경제연구원
- 4. 이용식, 김남인, 정성원, 김재현, 2012. 독립형 태양광 발전 시스템의 MPPT 제어 기법 특성 비교. 전기학회논문지, 61(1), pp.75-79.
- 5. 최성원, 류지형, 이창구, 2011. I-V 특성곡선을 통한 태양전지 패널의 모델 파라 미터 추출 방법. 한국산학기술학회논문지, 12(2), pp.847-851.
- 6. 최정식, 정동화, 2012. 그림자 영향을 고려한 PV MIC 시스템의 새로운 MPPT 제
 어. 조명・전기설비학회논문지, 26(5), pp.21-33.
- 7. 한국해양수산개발원, 2003. *환경친화적 항만개발 및 운영방안*. 한국해양수산개발 원
- 8. Belhaouas, N., Cheikh, M. S. A., Malek, A. and Larbes, C., 2013. Matlab–Simulink of photovoltaic system based on a two-diode model simulator with shaded solar cells. *Revue des Energies Renouvelables*, 16(1), pp.65–73.
- Ishaque, K., Salam, Z., and Taheri, H., 2011. Accurate MATLAB Simulink PV system simulator based on a two-diode model. *Journal of Power Electronics*, 11(2), pp.179–187.
- 10. Lee J.Y., Yang H.K., Oh J.S. 2015. A Study on Effects of Partial Shading on PV System applied to the Offshore Plant. 한국마린엔지니어링학회지, 39(2), pp.152-158.
- 11. Patel, H. and Agarwal, V., 2008. Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions. *IEEE Transactions on*



industrial electronics, 55(4), pp.1689-1698.

- 12. Ramaprabha, R. and Mathur, B. L., 2009. Impact of partial shading on solar PV module containing series connected cells. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2(7), pp.56–60.
- 13. Seyedmahmoudian, M. et al. 2013. Analytical modeling of partially shaded photovoltaic systems. *Energies*, pp.128-144.
- Tey K. S. and Mekhilef S., 2014. Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 61(10), pp.5384–5392.
- 15. Villalva, M. G., Gazoli, J. R. and Filho, E. R., 2009. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 24(5), pp.1198–1208.



