



工學博士 學位論文

해양시설물용 복합전력 생산시스템의 설계에 관한 연구

A study on the design of hybrid power generation systems for ocean facility



2012년 8월

韓國海洋大學校 大學院

메카트로닉스공학과

趙 琯 濬

本 論文을 趙 琯濬의 工學博士

學位論文으로 認准함.



2012 年 6月 20 日

韓國海洋大學校 大 學 院



<	목	차	>
---	---	---	---

<pre>< Nomenclatures > iii < List of figures > ix < List of table > xi < Abstract > xii </pre>
1.2. 연구 내용 및 구성4
2. 해양시설물용 발전시스템
2.1. 태양광 발전시스템
2.1.1. 발전 특성
2.1.2. 태양광 발전시스템 모델링
2.2. 파력 말선시스템
2.2.1. 신농수수형 파력 말선특성 ····································
2.2.2. 전공부부영 파력 일전지즈몀 모일영 ···································
2.0. ㄱᆸ ᆯ던//ㅡㅁ
2.3.2. 독립형 발전시스템 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
3. 전력제어시스템 설계
3.1. 태양광 발전용 제어시스템
3.1.1. 전력시스템 설계
3.1.2. 스위칭 드라이버 설계
3.2. 파력 발전용 제어시스템
3.2.1. 전력시스템 설계
3.2.2. 스위칭 드라이버 설계
3.3. 복합 발전 제어시스템



4. 전력제어알고리즘 및 발전원	시뮬레이션42
4.1. 전력제어알고리즘	
4.1.1. 태양광 발전	
4.1.2. 파력 발전	
4.1.3. 복합 발전	
4.2. 발전원 시뮬레이션	
4.2.1. 태양광 발전	
4.2.2. 파력 발전	

5. 실험 및 고찰	
5.1. 실험 환경	
5.2. 실험 결과	
5.2.1. 태양광 발전	
5.2.2. 파력 발전	
5.2.3. 복합 발전	
5.3. 복합 발전시스템 고찰	
6 77	
삼고 군연 ···································	



< Nomenclatures >

A	:	다이오드 이상 계수
A_c	:	챔버 단면적
A_t	:	웰스터빈 블레이드 회전면적
A_w	:	해수면과 접촉하는 부체면적
a	:	챔버 내부 수주 가속도
C	:	10시간 기준 축전지 정격 방전용량
$C_{\!A}$:	웰스터빈 입력계수
C_T	:	웰스터빈 토크계수
D	:	터빈에 가해지는 항력
d	:	챔버 내부의 선형 감쇠계수
d_m	:	데이터 측정횟수
d_1	:	부체 감쇠계수
e_L	:	DC-DC 컨버터 인덕터 전압
e_a, e_b, e_c	:	영구자석형 발전기의 유기 기전력
e_{da}, e_{qa}	:	<i>d</i> , <i>q</i> 축 유기 기전력
$e_{lpha a}, e_{eta a}$:	lpha,eta 상 유기 기전력
F_{a}	:	터빈의 수직 방향 힘
F_t	:	터빈의 수평 방향 힘
g	:	중력 가속도
H_0	:	외부 파고
I_a, I_b, I_c	:	영구자석형 발전기 상전류
I_{bi}	:	벅 컨버터 입력전류
I_{bo}	:	벅 컨버터 출력전류



I_{bsi}	:	부스터 컨버터 입력전류
I_{bso}	:	부스터 컨버터 출력전류
I_{ch}	:	축전지 충전 전류
I_d	:	태양전지 셀 포화전류
I_{da}, I_{qa}	:	<i>d</i> , <i>q</i> 축 전기자 전류
I_g	:	광기전 효과 출력전류
I_{ms}	:	태양광발전 최대 출력전류
I_{ms1}, I_{ms2}	:	복합발전에서 최대 출력전류
I_{mwa}	:	파력발전 최대 출력전류
I_n	:	태양광발전의 시비율 변화에 따른 출력전류
I_{pv}	:	태양광발전 단자전류
I_s	:	태양광발전 개방회로에서의 광기전 효과 출력전류
I_{smax}	:	P_{smax} 에서의 태양광발전전류
$I_{lpha a}, I_{eta a}$:	lpha,eta 상 전기자전류
$i_{L}\!,i_{L\!1}\!,i_{L\!2}$:	DC-DC 컨버터의 인덕터전류
i_b	:	축전지 충방전 전류
i_{s1},i_{s2}	:	복합발전에서 각 발전원 전류
i'	:	부하 특성별 방전전류
K	:	볼츠만 상수
k	:	PWM 시비율
k_a	:	분극 상수
k_n	:	최저 전압에 의한 축전지 용량 환산 시간
L	:	영구자석형 발전기 동기 인덕턴스



L_a	:	lpha,eta 상의 자기 인덕턴스
L_b	:	DC-DC 컨버터의 인덕턴스
L_{ba}	:	축전지 보수율
L_c	:	해수면 아래 진동수주 챔버 길이
L_s	:	영구자석형 발전기의 자기 인덕턴스
L_t	:	터빈에 가해지는 양력
М	:	영구자석형 발전기의 상호 인덕턴스
m	:	부체 질량
m_w	:	부체 부가 질량
P_{Lo}	:	전력 소자 스위칭 손실 전력
P_{bat}	:	축전지가 충방전으로 감당해야 하는 전력
P_{ch}	:	충전 전력
P_{gwa}	:	파력발전기 전기적 출력
P_{hp}	:	복합발전 전력
P_{load}	:	부하 소비 전력
P_{ms}	:	태양광발전 최대 출력
P_{ms1}, P_{ms2}	:	복합발전에서 각 발전원 최대 전력
P_{mwa}	:	파력발전 최대 출력
P_n	:	태양광발전의 시비율에 따른 출력
P_{smax}	:	탐색 알고리즘에서의 태양광발전 최대 전력
P_{wave}	:	웰스 터빈 출력
P_0	:	진동수주 챔버 내부 압력
p_{s1}, p_{s2}	:	복합발전에서 각 발전원의 전력

- v -

q	:	전자 전하량
R_b	:	축전지 연결단자 저항
R_{g}	:	영구자석형 발전기 고정자 권선저항
R_l	:	태양전지판 출력단자 외부저항
R_s	:	태양전지판 내부 직렬 저항
R_{sh}	:	태양전지판 내부 병렬 저항
R_t	:	웰스 터빈 반지름
S	:	챔버 내부 수주와 부체의 상대 거리
SOC	:	축전지 충전 상태
T	:	절대 온도
T_b	:	PWM 펄스폭 주기
T_{e}	:	발전기에 가해지는 토크
T_o	:	터빈 출력 토크
t_{off}	:	전력 스위치가 Off상태로 있는 시간
t_{on}	:	전력 스위치가 On상태로 있는 시간
U_a	:	웰스터빈 평균반경 주속도
V_{CL}	:	커패시터 부하의 충전 전압
V_L	:	선간 유효(실효) 전압
V_P	:	발전기 유효(실효) 전압
V_R	:	저항 부하를 갖는 정류 회로의 평균 전압
V_a, V_b, V_c	:	영구자석형 발전기 상전압
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	:	발전원의 선간전압
V_b	:	축전지 전압



V_{bi}	:	벅 컨버터 입력 전압
V_{bo}	:	벅 컨버터 출력 전압
V_{bsi}	:	부스터 컨버터 입력 전압
V_{bso}	:	부스터 컨버터 출력 전압
V_{buo}	:	축전지와 직결된 상태의 태양전지판 출력 전압
V_d	:	태양전지판 개방시 순방향 전압
$V_{da}, \ V_{qa}$:	<i>d</i> , <i>q</i> 축 전기자 전압
V_{dc1}, V_{dc2}	:	H-bridge 인버터의 입력 전압
V_k	:	태양광발전 시비율 변화에 따른 출력 변동 전압
V_m	:	다중레벨 인버터 출력 전압
$V_{ma,} V_{mb}$:	H-bridge 인버터 출력 전압
V_{ms}	:	태양광발전 최대 출력 전압
V_{ms1}, V_{ms2}	:	복합발전 최대 출력 전압
V_{mwa}	:	파력발전 최대 출력 전압
V_{oc}	:	축전지 개방 전압
V_{och}	:	축전지 완전충전 전압
V_{odc}	:	축전지 방전정지 전압
V_{pv}	:	태양광전지 단자 전압
V_{smax}	:	P_{smax} 에서의 태양광발전 전압
$V_{lpha a},~V_{eta a}$:	lpha,eta 상의 전기자 전압
v	:	챔버 내부 수주 속도
v_{s1}, v_{s2}	:	복합발전원 전압
v_{s1}', v_{s2}'	:	복합발전원과 축전지 연결시 발전 전압



v_{wa}	:	Wells 터빈에 공기의 평균 축류 속도
W	:	챔버 내부 공기 유동에너지
ω	:	외부 파랑 각속도
ω_b	:	부체 고유 각속도
ω_c	:	챔버 고유 진동 각속도
ω_e	:	발전기 각속도
ω_{re}	:	계자 각속도
η	:	진동수주 내부 수주 위치(해수면 기준)
η_t	:	웰스터빈의 출력 효율
$ ho_w$:	해수 밀도
$ ho_a$:	공기 밀도
σ_c	:	진동수주 지연 상수
σ_b	:	부체 운동의 위상차
ΔI	:	인덕터 전류 변화량
Δp	:	회전하는 웰스 터빈 압력 변화량
Δ_c	:	진동수주 감쇠비
Δ_b	:	부체 감쇠비
λ	:	해상에 떠있는 물체 위치(해수면 기준)
θ	:	공기 입사각
θ_r	:	U상 전기자 권선 기준의 회전계자 전기각
Φ	:	권선 최대 쇄교 자속
ϕ	:	웰스 터빈 유량 계수
ϕ_a,ϕ_b,ϕ_c	:	영구자석형 발전기 권선 쇄교 자속
$\phi_{lpha a}, \phi_{eta a}$:	lpha,eta 상 전기자 권선 쇄교 자속



< List of figures >

Figure	2.1	Equivalent circuit of photovoltaic cell
Figure	2.2	Equivalent circuit of photovoltaic cell during
		open circuit ($R_{\!\scriptscriptstyle s}=0,R_{\!\scriptscriptstyle sh}=\infty$)6
Figure	2.3	Characteristic of photovoltaic cell due to
		the changed resistance7
Figure	2.4	V-I curve of combination PV panel(same direction)9
Figure	2.5	Structure of OWC type wave generation system
Figure	2.6	Water chamber motion
Figure	2.7	Principle of Wells turbine
Figure	2.8	Equivalent circuit of permanent magnet synchronous
		generator
Figure	2.9	Diode rectifier with a load
Figure	2.10	Waveform of diode rectifier with a resistive load21
Figure	2.11	Waveform of DC current with a capacitive load21
Figure	2.12	Structure of cascaded H-bridge multi level inverter(5-level) 23
Figure	2.13	Structure of hybrid power systems using multi level inverter 24
Figure	2.14	Structure of hybrid power system using a diode
Figure	2.15	Structure of hybrid power systems using
		a power controller
Figure	3.1	Circuit of buck converter
Figure	2.0	Structure of PV power controller
Figure	2.2	Circuit of booster converter
Figure	2.0	Structure of wave power controller
Figure	0.4 2.5	Structure of wave power controller 37
Figure	0.0 2 E	Structure of apparable bettery
Figure	0.0	Characteristic of generation neuron
rigure	J./	Characteristic of generation power
Figure	4.1	P&O algorithm flowchart 43



Figure 4.3	P&O algorithm error by buoy motion44
Figure 4.4	V-I curve of serial combination PV panel
	on difference direction
Figure 4.5	V-P curve of serial combination PV panel
	on difference direction46
Figure 4.6	Measuring scale and interval scale in searching algorithm 47
Figure 4.7	PV output power due to MPPST algorithm control
Figure 4.9	Proposed wave power control algorithm
Figure 4.10	Structure of separable battery
Figure 4.11	Control algorithm of separable battery
Figure 4.12	Simulation of photovoltaic cell
Figure 4.13	MPPT simulation result of V-I curve55
Figure 4.14	MPPT simulation result of V-P curve55
Figure 4.15	V-I curve of serial connected pv panel
Figure 4.16	V-P curve of serial connected pv panel
Figure 4.17	Results of PV simulation cell due to
	changed irradiance(temperature 40°C)57
Figure 4.18	MPP curve due to changed temperature (25°C~70°C)
Figure 4.19	PV experiment system for measuring range on the land 59
Figure 4.20	Results of PV experiment for measuring range
Figure 4.21	MPP & measuring range
	(Black point : MPP, Red box: measuring range)60
Figure 4.22	Structure of Wave simulator
Figure 4.23	Simulator result of wave power system changed
	wave frequency(wave height : 800mm)62
Figure 4.24	Output voltage and power of wave power system
	(wave period : 6.9s)63
Figure 4.25	Comparison of the generation time and output power
Figure 4.26	Output characteristic of wave generation system
	in different charging method(state time)65



Figure	5.3	Communication system for experiment on the sea
Figure	5.4	Experiment results by pv power controller on sunny day70
Figure	5.5	Experiment results by pv power controller on cloudy day71
Figure	5.6	Experiment results by wave power controller
		on small wave height
Figure	5.7	Experiment results by wave power controller
		on big wave height
Figure	5.8	Voltage by wave, PV, main battery at the sea73
Figure	5.9	Output power by wave, PV at the sea74
Figure	5.10	Battery voltage at the sea75
Figure	5.11	Daily generation power by the hybrid system75
Figure	5.12	Average power graph of PV & Wave generation power77

< List of table >



A study on the design of hybrid power generation systems for ocean facility

Kwan Jun, Jo

Department of Mechatronics Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

There is worldwide competition in the field of energy security. As gasoline prices remain high, South Korea, which is highly dependent on the Middle East for oil, will need to develop alternative technologies and energy sources to achieve energy independence. Further, South Korea needs to develop renewable energy technologies in view of environmental issues and new laws on carbon emissions.

The most widely used new renewable energy technologies are solar power, wind power, wave power, sea power, and tidal power. Land-based renewable power generation has problems such as large land requirements (generating power with solar panels requires a great deal of space) and noise (generating electricity with wind power systems creates noise), which have led to a transition to offshore power generation systems. In the case of South Korea, which is surrounded on three sides by water, the western and southern shores have long coastlines and deep waters. Consequently, these offshore regions are suitable for solar power,



wind power, and wave power generation. To develop renewable energy offshore, large-scale power generation systems as well as an offshore base, offshore housing, large-scale seacraft, leisure seacraft, and other offshore facilities are required.

In the development of even a standalone solar power generation system, the initial stages involve significant expenditures of capital, and maintenance and management are difficult. Consequently, an effective approach is to apply a strategy that utilizes a cascaded multi-level inverter in which multiple small-scale power generation systems are installed and then combined to create a larger-scale power source. A cascaded multi-level inverter employs a structure in which one power source is used to charge a separate power source. To develop power systems, it is common to use a battery as an energy storage device. This type of small-scale system is generally based on DC power. A standalone power generation system (powered by just one type of renewable energy) represents major changes for the environment in terms of the amount of energy generated. To resolve such a problem, a hybrid power generation system, in which two or more types of power generation are combined, is used. Together, the various electric power sources constitute an electric power source having mutually complementary properties in the environment where they are deployed, and have the ability to maintain a constant power output level even when the environmental conditions vary.

A small-scale hybrid power generation system is a structure in which power diodes are used to combine electricity from two different power sources. When the different output voltages and electrical currents from



the two power generation sources are combined into a single power source, it is difficult to optimize the output of each of the power generation sources. Moreover, because the two individual power sources store energy in a single storage battery, if the storage battery's voltage changes owing to an increase in the power generated by one of the electric power sources, the output of the other electric power source must also change. To effectively control these problems, a power controller for each power generation system must be installed and used for controlling both output voltages. Further, to reflect the properties of the two power generation sources, an overall power controller design and control algorithm must be configured. In this paper, we propose a power control system and algorithm that reflect the respective properties of a solar power system and a wave power system.

Solar panels are installed at offshore facilities, oriented in different directions, for reasons including the lack of space and the movement of the offshore facility. In so doing, because of an inflection point in the output of the solar panels, it is impossible to track the maximum power point using an MPPT(Maximum Power Point Tracking) algorithm typically used on land. This paper proposes an MPPST(Maximum Power Point Searching & Tracking) algorithm for solar power generation systems. To optimize the search range and interval of the MPPST algorithm, experiments were conducted on land and in simulations.

In this paper, an oscillating water column scheme is used for the wave power generation structure. A Wells turbine and a permanent magnet power generator generate power from the oscillating water column of the wave power generator. This paper provides a mathematical model of an



entire system and proposes a wave power generation control algorithm that reflects the properties of the wave power generation system. The wave power generation control algorithm we propose incorporates properties that have been identified through experiments carried out using a wave power generation simulator.

For actual experimentation at sea, a combined solar power and wind power generation system was tested using a buoy, which is a type of offshore floating device. The results of the experiment confirmed that when the solar and wind power levels change relative to each other because of fluctuations in environmental conditions or the voltage of the storage battery, the power sources simultaneously store charge in the storage battery. Moreover, on clear days, the MPPST algorithm resulted in an 18% increase in solar power output during offshore testing compared to the MPPT perturb and observe (P&O) control algorithm. Even when wave power generation system had a lower output voltage, current was generated, and output was increased by about 5%. Further, we also found that the use of a hybrid power generation system provided about 19% improvement in the stability of the power produced compared to a standalone power generation system using multi-level serial inverter.



- xv -

1. 서론

1.1. 연구 배경

세계 경제를 이끄는 산업 활동에서 에너지는 재료, 노동력, 자본과 함께 재 화를 얻는 기본요소로 산업화가 진행 될수록 중요성이 증가하고 있다. 또한 에 너지 확보가 국가의 경쟁력을 좌우하게 되자, 세계 각국은 에너지 기술 및 자 원 선점을 위한 치열한 경쟁을 펼치고 있으며, 특히 석유자원에 대한 경쟁이 치열하다. 석유 매장량의 한계, 개발도상국의 유류 소비량 증가 등으로 인한 자원 확보 경쟁은 가속화되고 있다. 우리나라의 중동 지역 석유 의존도는 81.8% 이므로 중동지역 정세불안에 의한 석유공급의 차질이 발생한다면, 경제 에 심각한 문제가 발생하게 될 것이다. 석유자원의 확보는 운송, 전력 등 우리 나라 기간산업에 반드시 필요하다. 최근 전력의 경우 일본의 원전사고로 인하 여 원전안전문제 등이 대두되면서, 화력발전에 대한 의존도가 상대적으로 높아 지고 있다. 앞으로 석유자원에 대한 수요는 증가할 것으로 예상되며, 석유자원 의 확보를 위한 경쟁은 점점 치열해질 것이다[1,2].

화석연료 사용은 온실가스 배출로 인한 기후 변화를 일으키고, 이로 인한 경 제적 손실은 매년 세계 GDP의 5~20 %를 차지하고 있다. 온실가스에 의한 기 후 변화에 대응하기 위하여 미국, 일본, EU 등 38개국은 1997년에 교토의정서 를 체결하였고, 온실가스를 감축하기 위한 지속적인 노력을 해오고 있다. 우리 나라는 온실가스 배출 의무 감축국에서 제외되었으나 OECD 회원국으로서, 개 도국과는 차별화된 감축 노력을 요구받는 상황이다[1].

석유자원의 대체와 온실가스 배출 규제에 대한 대책으로 신재생에너지의 개 발이 필요한 실정이다. 신재생에너지 중에 가장 많이 사용되는 방식은 태양광 발전과 풍력발전이다. 태양광발전은 태양광이 있는 곳이라면 어디든지 설치할 수 있는 장점이 있지만, 설치공간을 많이 차지하는 단점이 있다. 한편 풍력발 전은 바람이 부는 곳이라면 어디든지 설치할 수 있으나, 주변 장애물에 의한 돌풍으로 터빈이 파손될 수 있다. 그러므로 풍력 발전기는 개활지나 산 정상 등 장애물이 없는 곳에 설치되어야 한다. 또한 풍력발전기의 터빈은 회전할 때



큰 소음이 발생하기 때문에 주거지역 부근에 설치하는 것은 바람직하지 않다. 신재생에너지는 육상에서 설치공간의 문제를 갖기 때문에 육상보다 해상에 설 치하는 방향으로 변화하는 추세이다. 우리나라는 삼면이 바다이므로 해상 설치 공간이 넓고, 서해 및 남해안의 경우 수심이 얕은 곳이 많아서 해양발전설비를 설치하기 적합한 위치가 적합하다[2].

현재까지 해상에서 운영되는 발전시스템은 비용 및 기술 등의 문제로 연구개 발이 미진했지만, 신재생에너지의 설치 공간의 문제를 해결하기 위하여 해양발 전설비에 대하여 연구되고 있다. 더불어 해상기지, 해상가옥, 해상플랜트, 신재 생에너지 선박, 해양교통시설물 등 다양한 해양시설물의 개발이 이루어지면서 해양발전시스템에 적용성이 증가하는 추세이다. 특히 해양발전시스템 중에 태 양광, 풍력, 파력 등이 적용성이 높다[3].

해양발전시스템은 용량에 따라 대용량과 소용량으로 나눈다. 대용량 발전시 스템은 계통연계형 구조로 상용전원과 연계하여 육상에 전력을 공급하며, 발전 설비가 크고 설치 및 개발비용이 고가이므로 초기 개발비용이 높다. 한편 소용 량 발전시스템은 직류 또는 교류로 해상시설물에 전력을 공급하며, 발전설비가 작고 설치 및 개발비용이 저가이므로 초기개발 비용이 낮다. 그래서 최근에는 소용량 발전시스템을 다수 복합하여 대용량 발전시스템을 구축하고 있다.

해양발전으로 적용되는 태양광, 풍력, 파력 중에 소용량 발전시스템으로는 태양광과 파력이 주로 사용된다. 해양에 적용되는 풍력은 해수면에 의한 돌풍 을 줄이기 위하여 일정 높이 이상이 요구된다. 또한 터빈이 풍압에 의하여 지 속적인 진동 또는 힘을 받게 되므로 풍력발전은 소형 해양구조물에서 안정성을 확보하기 어렵다. 그러므로 해양에 설치되는 풍력발전은 대부분 대용량발전으 로 개발된다.

신재생에너지를 이용한 단일 발전은 기상상태에 따라 전력생산량이 변하므로 안정적인 전력생산이 어렵다. 태양광은 날씨가 맑은 주간에만 발전되고, 파력 은 파고가 일정 높이, 일정 주기 이상에서만 발전된다. 이를 보완하기 위하여 축전지, 압축공기, 플라이 휠 등과 같은 에너지 저장 시스템을 설치한다. 에너 지 저장 시스템은 발전량이 소비전력량보다 적을 경우 에너지 저장 시스템에서 부족한 전력을 공급하고, 발전량이 많을 경우 에너지 저장 시스템에 전력을 충 전한다. 그러나 에너지 저장 시스템은 충방전 전력손실이 있으며 추가적인 시



스템의 설치로 인하여 설비 비용이 증가한다. 따라서 에너지 저장 시스템의 용 량을 줄이기 위하여 발전 전력량을 안정화할 필요가 있다 최근에는 발전 전력 량을 안정화시키는 방법으로써, 기상환경에 따른 발전특성이 상호 보완적인 두 개 이상의 발전원을 연동하여 발전하는 복합 발전시스템이 연구되고 있다[3].

소용량 발전시스템은 독립전원 형태로 해양시설물에 적용되며 직류전원으로 구성되는 경우가 많다. 소용량 발전시스템을 복합하여 대용량화 하는 경우에도 소용량 발전시스템의 전원체계는 직류 전원 형태로 구성되는 것이 대부분이다. 왜냐하면 직류 전원을 복합하는 것이 교류 전원을 복합하는 것보다 간단하기 때문이다. 그러나 직류전원의 복합에서도 두 종류 이상의 발전원에서 최대전력 생산을 확보하는 것은 어렵다. 이것은 소용량 복합 발전시스템에서 개별 발전 원을 하나의 전원에 연결하기 때문에 각 발전시스템의 출력전압이 다른 제어기 에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 효과적인 복합 발전제어를 위하여 각각의 개 별 전력제어기 및 제어알고리즘에 대한 연구가 필요하다.





1.2. 연구 내용 및 구성

본 논문은 총 6개의 장으로 구성된다. 1장은 연구 배경과 연구 내용 및 구성을 기술한다.

2장은 해양시설물에 사용되는 발전시스템을 설명한다. 해양시설물에 사용되는 태양광, 파력, 복합 발전에 대한 발전특성을 수학적으로 설명하고 복합 발 전으로 생산된 개별전원이 직렬다중레벨 방식의 인버터 구조로 대용량 발전시 스템에 적용될 수 있음을 설명한다.

3장은 태양광, 파력, 복합 발전의 전력제어시스템을 기술한다. 각각의 전력 제어시스템에 적합한 전력구성을 제시하고, 각 전력시스템의 특징을 기술한다.

4장은 각 전력 시스템의 제어알고리즘을 제안하고, 태양광, 파력 발전시스템 을 제작하여 시뮬레이션 및 실험을 수행한다. 실험을 통하여 태양광과 파력 발 전시스템의 개별 출력 특성을 확인한다.

5장은 태양광, 파력, 복합 발전시스템을 해상에서 1개월간 실험하여 실해상 에서의 각 전력시스템 출력을 분석한다.

6장은 연구 내용을 바탕으로 결론을 도출한다.



2. 해양시설물용 발전시스템

2.1. 태양광 발전시스템

2.1.1. 발전 특성

태양전지(PV: Photovoltaic) 출력은 일사량과 태양전지 셀 온도에 의해서 지 속적으로 변동한다. 태양전지의 출력전압, 전류는 비선형 전압원으로서 광량과 온도가 일정하더라도 외부 부하 R_l 에 따라 출력전력이 변화한다. Figure 2.1은 태양전지의 전기적인 등가회로를 나타낸 것이다. I_g , I_d 는 광기전 효과에 의하 여 발생되는 전류와 셀 포화 전류이고, I_{pv} , V_{pv} 는 각각 태양전지 단자전류, 단 자전압을 나타낸 것이다[5].



Figure 2.1 Equivalent circuit of photovoltaic cell

R_s, *R_{sh}*는 태양전지 내부 직렬과 병렬 저항성분이다. 이를 바탕으로 하여 태 양전지의 출력을 나타내면 식 (2.1)과 같다[5-7].

$$I_{pv} = I_g - I_d \left[\exp\left\{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{A K T}\right\} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}}$$
(2.1)

이때 q는 전자 전하량(1.602×10⁻¹⁹ C), K는 볼츠만상수(1.380×10⁻²³J/K)이 고, A는 다이오드 이상 계수, T는 태양전지 셀의 절대온도이다. 이때 R_s 를 0



으로 R_{sh} 를 무한대로 가정하면, 식 (2.1)은 식 (2.2)와 같이 간략화할 수 있다 [6].

$$I_{pv} = I_g - I_d \left\{ \exp\left(\frac{q V_{pv}}{A K T}\right) - 1 \right\}$$
(2.2)

식 (2.2)에서 태양전지의 출력이 개방되면 출력전류 I_{pv} 는 이이 된다. 개방회 로에서의 광기전 효과에 의한 전류 I_g 를 I_s 로 정의한다. 개방회로일 때, 출력 전압은 다이오드 순방향에 인가되는 전압 V_d 이다. 태양전지의 개방회로는 Figure 2.2와 같다.



Figure 2.2 Equivalent circuit of photovoltaic cell during open circuit ($R_s = 0, R_{sh} = \infty$)

이때 $e_d = \exp\left(\frac{qV_{pv}}{A KT}\right)$ 라고 하면, 개방회로의 출력은 식 (2.3)과 같다[6].

$$0 = I_s - I_d(e_d - 1)$$
(2.3)

식 (2.3)에서 다이오드 포화전류를 구하면 식 (2.4)와 같이 정리된다. 이때 출력 전압은 다이오드에 순방향으로 걸리는 전압이 되므로 이 전압을 V_d 라고 한다.



lection

$$I_d = \frac{I_s}{\exp(\frac{qV_d}{AKT}) - 1}$$
(2.4)

그러므로 특정 일사량에서 동작하는 태양전지 출력전류의 일반식은 식(2.5)와 같이 표현된다. 이때 $e_{di} = \exp\left(\frac{qV_d}{A K T}\right)$ 로 한다.

$$I_{pv} = I_g - \frac{I_s}{e_{di} - 1} (e_d - 1)$$
(2.5)

식 (2.5)에서 변수는 I_g , T, V_{pv} , I_{pv} 이다. 이중 태양전지의 환경변수는 I_g 와 T이고, 태양전지의 외부 회로에 의하여 결정되는 값은 V_{pv} , I_{pv} 값이다. 광기 전 효과에 의한 전류 I_g 는 태양전지의 광량에 의하여 결정되는 값이다. 그러므 로 광량과 태양전지 셀 온도가 일정한 상황에서의 전압-전류의 그래프로 도시 하면 Figure 2.3과 같다.



Figure 2.3 Characteristic of photovoltaic cell due to the changed resistance

Figure 2.1에서 태양전지 외부 부하를 저항 R_l 로 가정하면, 저항 크기변화에



따라 출력전력이 변화한다. 또한 R_i 은 태양전지 출력전류와 출력전압의 비율이 된다. 태양전지 출력곡선과 R_i 에 의한 전압 전류의 비율 곡선이 교차하는 지점 이 태양전지의 출력이 된다. 이를 식으로 나타내면 식 (2.6)과 같다.

$$P_{solar} = \left\{ I_g - \frac{I_s}{e_{di} - 1} (e_d - 1) \right\} \times V_{pv}$$

$$where : R_{pvl} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}}$$
(2.6)

식 (2.5)에서 출력전압 V_{w} 는 다음과 같이 정리된다.

$$V_{pv} = \frac{1}{q} A K T \left\{ \ln\left(\frac{-I_{pv}e_{di} + I_{PV} + I_{g}e_{di} - I_{g} + I_{s}}{I_{s}}\right) \right\}$$
(2.7)

2.1.2. 태양광 발전시스템 모델링

해양시설물에서 사용하는 태양광 발전시스템은 여러 태양전지를 직병렬로 혼 합한 형태이다. 동일한 태양전지를 병렬로 연결하게 되면 식 (2.8)과 같은 출력 형태가 된다. 이때 동일한 태양전지로 가정하였으므로 두 태양전지의 차이는 광량에 의하여 발생되는 전류(I_{g1} , I_{g2}), 온도(T_1 , T_2) 차이이다. 태양전지를 병 렬로 연결하였으므로, 태양전지의 출력전압 V_{pv} 는 서로 같다.

$$I_{pv} = I_{g1} + I_{g2} - \left\{ \frac{I_s}{e_{di1} - 1} (e_{d2} - 1) + \frac{I_s}{e_{di2} - 1} (e_{d2} - 1) \right\}$$
(2.8)

$$(2.8) \text{ on } \mathcal{H} \quad e_{d1} = \exp\left(\frac{qV_{pv}}{A K T_1}\right), \quad e_{d2} = \exp\left(\frac{qV_{pv}}{A K T_2}\right), \quad e_{di1} = \exp\left(\frac{qV_d}{A K T_1}\right),$$

 $e_{di2} = \exp\left(rac{q \, V_d}{A \, K \, T_2}
ight)$ 라고 정의한다. 태양전지를 직렬로 연결하게 되면 식 (2.9) 와 같이 정리할 수 있다. 태양전지를 직렬로 연결하면 출력전류는 같고, 출력



$$\begin{split} V_{pv} &= \frac{1}{q} A \; K \bigg[T_1 \bigg\{ \ln \big(\frac{-I_{pv} e_{di1} + I_{pv} + I_{g1} e_{di1} - I_{g1}}{I_s} \big) \bigg\} \\ &+ T_2 \bigg\{ \ln \big(\frac{-I_{pv} e_{di2} + I_{pv} + I_{g2} e_{di2} - I_{g2}}{I_s} \big) \bigg\} \bigg] \end{split} \tag{2.9}$$

직렬연결의 경우에도 병렬연결과 마찬가지로 두 태양전지의 광량, 온도만 다 르고 태양전지 특성 값은 동일하게 된다. Figure 2.4는 광량 및 온도가 같을 때 태양전지의 직병렬 연결에 따른 출력을 나타낸 것이다. 태양전지의 출력은 광량과 온도 변화에 큰 영향을 받는다. 온도의 영향은 외부 온도보다는 태양광 에 의한 복사열의 영향이 더 크다.



Figure 2.4 V-I curve of combination PV panel (same direction)

계통 연계형으로 발전하기 위해서는 직류 300 V 이상, 독립형으로 발전하기 위해서는 직류 12 V ~ 100 V 이상의 전압이 필요하다. 그러므로 태양광 발전시 스템 설치시 우선적으로 태양전지를 직렬로 연결하여 적정 전압을 만들고, 필 요전력량에 따라 태양전지를 병렬로 연결한다.



2.2. 파력 발전시스템

2.2.1. 진동수주형 파력 발전특성

파력 발전은 파랑이 갖고 있는 운동에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 방 식에 따라 구분된다. 수면에 떠있는 부체를 파랑 운동에 따라 상하 또는 회전 운동하도록 하여 발전기를 회전시키는 가동물체형, 파랑 작용에 의하여 공기실 내의 수위가 변동함에 따라 공기실 내의 공기가 압축, 팽창될 때 발생하는 공 기의 흐름으로 발전하는 진동수주형, 그리고 수중에서 파랑의 수압변동을 흡수 하여 공기나 물의 흐름으로 변환하는 수압면형이 있다. 현재 진동수주형 파력 발전방식이 가장 효율적이며 유지관리가 편한 것으로 알려져 있다. 진동수주형 파력 발전은 부체 움직임에 따라 고정식과 해상 부유식이 있다. 고정식은 파랑 움직임에 의한 진동수주 챔버 내부의 수면 움직임을 활용하여 발전하는 방식이 고, 해상 부유식은 파랑에 의하여 진동 수주 챔버 내부 수면의 유동뿐만 아니 라 구조물 전체가 움직임까지 활용하여 발전하는 방식이다.



Figure 2.5 Structure of OWC type wave generation system



Figure 2.5는 진동수주형(Oscillating water column) 파력 발전의 해상 부유 식을 나타낸 것이다. 진동수주 움직임에 따라 진동수주 챔버 내부 공기가 압축 팽창하면서 상부 터빈으로 공기의 입/출입 유동이 발생하게 된다. 터빈을 이용 하여 공기의 유동에너지를 기계적 에너지로 변환하고, 발전기를 통하여 전기적 에너지로 변환한다.

해상 부유식은 진동수주 내부 유동뿐만 아니라 부체 움직임에 의하여 진동수 주 내부 유동을 형성한다. 그러므로 두 움직임을 서로 공진시켜 진동수주 챔버 내부의 공간적 변화를 크게 한다. 챔버 내부 수주의 위치를 η로 나타내면 식 (2.10)과 같다[8-9].

$$\eta = \frac{\frac{P_0}{\rho_w g}}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_c^2)^2 + (2\Delta_c \omega/\omega_c)^2}} \cos(\omega t - \sigma_c)$$
(2.10)

외부 파랑에 의하여 변화되는 값은 P_0 , ω 로 각각 챔버 내부 압력, 외부 파 랑의 각속도이다. ρ_w , g는 해수의 밀도, 중력 가속도이고, 진동수주의 고유 값 인 ω_c , σ_c , Δ_c 는 챔버 고유 진동 각속도, 진동수주 지연 상수, 감쇠비이다. 고 유 진동 각속도와 감쇠비는 식 (2.11), 식 (2.12)와 같다[9-10].

$$w_c = \sqrt{g/L_c} \tag{2.11}$$

$$\Delta_c = \frac{d/2A_c}{\sqrt{\rho_w^2 g L_c}} \tag{2.12}$$

Figure 2.5에서와 같이 L_c 는 해수면 아래 챔버 길이이다. d, A_c 는 각각 선 형 감쇠계수와 챔버 단면적이다. 식 (2.10)에서 외부 파도 움직임에 따라 진동 수주 챔버 내부 수면위치가 결정된다. 이중 챔버 고유 주파수와 감쇠비에 따라 진동수주 챔버 내부 수면변화가 영향을 받는다. 챔버 고유 주파수와 감쇠비는 진동수주 단면적과 길이에 따라 변화된다.

그러나 해상에서 유동하는 물체라면 물체의 움직임을 추가로 분석하여 내부 공기 유동을 해석해야 한다. 식 (2.12)는 해상에 떠있는 물체가 기준 해수면을 기준으로 움직인 위치 λ를 나타낸 것이다[9-10].

$$\lambda = \frac{\frac{H_0}{\rho_w g A_w}}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_b^2)^2 + (2\Delta_b \omega / \omega_b)^2}} \cos(\omega t - \sigma_b)$$
(2.12)

여기서 H_0 는 외부파고, σ_b 는 부체 운동과 외부 파도 위상차이다. ω_b , Δ_b , A_w 는 각각 부체의 고유 진동수, 감쇠비, 해수면과 접촉하는 부체의 면적이다. 고유진동수는 식 (2.13)과 같고 부표의 감쇠비는 식 (2.14)와 같다[9-10].

$$\omega_{b} = \sqrt{\frac{\rho_{w}gA_{w}}{m+m_{w}}}$$

$$\Delta_{b} = \frac{d_{1}}{2\sqrt{\rho_{w}gA(m+m_{w})}}$$
(2.13)
(2.14)

식 (2.14)에서 d_1 , m, m_w 는 각각 부체의 감쇠계수(부체의 형상), 부체 질량, 부체 부가 질량이다. 해상에서 유동하는 부체 움직임은 부체 질량, 부체와 수 면이 닿는 면적, 부체 형상에 영향을 받는다.

진동수주형 발전은 내부 공간의 변화량에 따라 출력이 변화하게 된다. 진동 수주형 발전시스템의 움직임을 나타내면 Figure 2.6과 같다. 내부 공간의 변화 량은 고정식일 경우에는 식 (2.10)이고, 해상 부유식일 경우에는 식(2.10)과 식 (2.12)의 차이이다. 그러므로 해상 부유식에서 챔버 내부 수면의 이동거리 *S* 는 식 (2.15)와 같다.

$$S = \eta - \lambda \tag{2.15}$$

Collection



Figure 2.6 Water chamber motion

내부 수주의 움직임에 따른 공기가 갖는 유동에너지 W는 식 (2.16)과 같 다. 이때 ρ_a, v, a는 각각 공기 밀도, 내부 수주의 속도, 내부 수주의 가속도를 나타낸 것이다[8].

$$\frac{d}{dt}W = \rho_a v A_c g \left\{ \frac{-\rho_w}{\gamma} (L+s)a + \frac{1}{g} v a \right\}$$
(2.16)

진동수주형 파력 발전은 공기 유동이 지속적으로 변화하므로 유동방향이 변 화하더라도 터빈은 한쪽 방향으로 회전하는 웰스 터빈이 사용된다. Figure 2.7 은 웰스터빈의 원리를 나타낸 것이다. 회전하는 터빈 날개 면에 대한 힘을 수 직 방향의 힘 *F_a*와 수평 방향의 힘 *F_t*로 나누면 식 (2.17)과 같이 정리할 수 있다[9-13].

1945

$$F_t = L_t \sin\theta - D\cos\theta \qquad (2.17)$$

$$F_a = L_t \cos\theta - D\sin\theta$$

식 (2.17)에서 *L_t*, *D*, *θ*는 양력, 항력, 공기 입사각을 나타낸 것이다. 공기 의 입사각이 상하 방향으로 변화하더라도 수평 방향의 힘 *F_t*는 한쪽 방향인 것 을 알 수 있다.





Figure 2.7 Principle of Wells turbine

웰스터빈의 출력효율 η_t 는 식 (2.18)과 같이 나타낼 수 있다[13-14].

$$\eta_t = \frac{C_T}{C_A \phi} = \frac{\frac{2F_t}{\rho_a U_a^2 A_t R_t}}{\frac{2 \Delta p}{\rho_a U_a^2} \times \frac{v_{wa}}{U_a}} = \frac{T_o U_a}{\Delta p v_{wa} A_t R_t}$$
(2.18)

이때 C_T , C_A , $\phi \in \Xi$ 크 계수, 입력 계수, 유량 계수이다. v_{wa} , $U_a \in$ 각각 평균 축류 속도, 평균반경에서의 주속도이다. A_t , R_t , Δp , $T_o \in$ 각각 웰스터 빈 블레이드의 회전면적, 터빈의 반지름, 동익에서의 압력 강하, 출력토크이다. 웰스터빈 출력 $P_{wave} \in$ 식 (2.19)와 같이 나타낼 수 있다[8].

$$P_{wave} = 0.5\eta_t \rho_a u^3 A_t \tag{2.19}$$

진동 수주에서 내부 수주의 움직임에 의하여 일정한 유량이 터빈에 공급되는 상황이라고 가정하면 터빈에 유입되는 공기의 유동에너지는 일정하다. 그러나 식 (2.18)에서 알 수 있듯이 터빈의 회전속도와 출력토크에 따라 출력효율이 변화하게 된다. 출력효율의 변화는 식 (2.19)에서 알 수 있듯이 파력 터빈의 출력에 영향을 준다. 즉 진동 수주에서 공기유량, 유속으로 충분한 에너지가 발생 되더라도 터빈의 에너지 변환효율이 좋지 못하면 기계적 출력은 적게 발



생된다. [13-14].

해상에서 파력 발전의 경우 일시적으로 파랑이 생겼다가 없어지는 등 파도의 변화가 급격하게 일어난다. 파고가 낮고 주기가 긴 너울형 파랑이 발생하게 되 면, 터빈에는 순간적인 공기 유동이 일어나게 된다. 터빈 질량이 너무 가볍게 되면, 공기 유동에 따라 터빈의 속도가 빠르게 변화하므로 발전량의 제어가 어 렵다. 그러므로 터빈 질량을 일정 이상으로 하여 관성에 의하여 순간적인 공기 유동이 발생하였을 때, 터빈이 낮은 속도이지만 일정 회전속도를 갖도록 해야 한다.

2.2.2. 진동수주형 파력 발전시스템 모델링

터빈처럼 속도가 변화하는 시스템에 사용되는 발전기는 여자전류로 출력을 제어하는 발전기와 내부가 영구자석으로 구성되어 외부의 전력제어기로 출력을 제어하는 발전기로 구분된다. 발전기 용량이 큰 경우에는 여자전류 제어 방식, 발전기 용량이 작은 경우에는 내부를 영구자석으로 제작하여 외부에서 출력을 제어한다. 여자전류로 제어하는 방식은 제어 특성이 좋은 반면, 여자전류 제어 회로 및 구조가 복잡한 단점을 갖는다. 영구자석형은 제어 및 구조가 단순하 며, 저가라는 장점을 갖는다. 단일 발전기의 크기가 수백 kW 이상인 발전기의 경우에는 여자전류 제어 방식의 발전기를 사용하며, 그 이하의 경우에는 영구 자석형 발전기를 사용한다.

해상에서 발전하는 경우 큰 용량으로 만드는 것보다 작은 용량으로 여러 개 를 만드는 것이 해양구조물에 설치하기 편리하다. 또한 활용성에서도 소용량으 로 개발하는 것이 효과적이다. 그러므로 본 논문에서는 대형 발전기보다는 소 형에서 주로 사용되는 영구자석형 발전기에 관하여 모델링 하였다. Figure 2.8 은 영구자석 발전기의 등가회로를 나타낸 것이다.

Figure 2.8에서 V_a, V_b, V_c 는 상전압, I_a, I_b, I_c 는 상전류, e_a, e_b, e_c 는 유기 기전 력이다. R_g 은 고정자 권선저항, L은 동기 인덕턴스로 자기 인덕턴스 L_s 에 상 호 인덕턴스 M을 더한 값이다. 영구자석형 발전기의 전압 방정식은 식 (2.20) 과 같다[15].





Figure 2.8 Equivalent circuit of permanent magnet synchronous generator

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_g + \frac{d}{dt}L & 0 & 0 \\ 0 & R_g + \frac{d}{dt}L & 0 \\ 0 & 0 & R_g + \frac{d}{dt}L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$
(2.20)

권선 쇄교 자속을 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_e , 권선 쇄교 자속의 최대값을 Φ , u상 전기자 권 선을 기준으로 회전한 계자 각도(전기각)를 θ_r , 계자의 각속도를 ω_{re} 라고 할 때 유기 기전력은 식 (2.21)과 같다[15-16].

$$e_{a} = \frac{d}{dt}\phi_{a} = -\omega_{re}\Phi\sin\theta_{r}$$

$$e_{b} = \frac{d}{dt}\phi_{b} = -\omega_{re}\Phi\sin(\theta_{r} - \frac{2\pi}{3})$$

$$e_{c} = \frac{d}{dt}\phi_{c} = -\omega_{re}\Phi\sin(\theta_{r} + \frac{2\pi}{3})$$
(2.21)

영구자석형 발전기는 $V_a + V_b + V_c = 0$ 이고, $I_a + I_b + I_c = 0$ 이라고 하면, 식 (2.20)을 2상 교류 좌표계로 변환하면 식 (2.22)와 같이 정리된다[15,17].

lection

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha a} \\ V_{\beta a} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_g + \frac{d}{dt} L_a & 0 \\ 0 & R_g + \frac{d}{dt} L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha a} \\ I_{\beta a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{\alpha a} \\ e_{\beta a} \end{bmatrix}$$
(2.22)

 $V_{\alpha a}, V_{\beta a} 는 \alpha, \beta$ 상의 전기자전압, $I_{\alpha a}, I_{\beta a}$ 는 전기자전류, $e_{\alpha a}, e_{\beta a}$ 는 영구자 석 계자에 의한 유기 기전력이다. L_a 는 자기인덕턴스로 식 (2.23)과 같이 표현 된다[18].

$$L_a = L_s + \frac{3}{2}M$$
 (2.23)

또한 유기 기전력을 권선 쇄교수와 최대값으로 표현하면 식 (2.24)와 같다. 식 (2.24)에서 $\phi_{\alpha a}$, $\phi_{\beta a} \succeq \alpha$, β 상 전기자 권선 쇄교 자속이다. 최대값은 α , β 상으로 변화하면서 $\sqrt{\frac{3}{2}}$ 만큼 커진다. $e_{\alpha a} = \frac{d}{dt} \phi_{\alpha a} = -\omega_{re} \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi \sin \theta_{re}$ (2.24) $e_{\beta a} = \frac{d}{dt} \phi_{\beta a} = \omega_{re} \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi \cos \theta_{re}$

식 (2.22)를 회전 직교 좌표계로 *d*, *q* 축으로 변환하면 식 (2.25)와 같이 정 리된다[15-16].

$$\begin{bmatrix} V_{da} \\ V_{qa} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} R_g + \frac{d}{dt} L_a & -\omega_{re} L_a \\ \omega_{re} L_a & R_g + \frac{d}{dt} L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{da} \\ I_{qa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re} \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi \end{bmatrix}$$
(2.25)

식 (2.25)에서 V_{da} , V_{qa} 는 d, q축의 전기자전압, I_{da} , I_{qa} 는 전기자전류를 나타



lection

낸다. 전기자 권선에 유기되는 기전력, $e_{da} = 0$, $e_{qa} = \omega_{re} \sqrt{\frac{3}{2}} \Phi$ 이다. 여기서 발 전기에 가해지는 토크는 식 (2.26)과 같다[15,19].

$$T_{e} = \frac{3}{4} \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \, \Phi I_{da} \right) \tag{2.26}$$

또한 발전기 출력 P_{qwa} 는 식 (2.27)이다[17-18].

$$P_{gwa} = \frac{3}{2} (V_{da}I_{da} + V_{qa}I_{qa})$$
(2.27)

식 (2.25)와 같이 발전전압은 기전력과 출력전류에 의하여 변화하는 것을 알 수 있다. 식 (2.24)에서 유기 기전력은 발전기의 회전속도에 비례하고, 식 (2.26)에서 발전기 출력토크는 출력전류에 비례한다.

즉 발전기의 회전속도가 증가하게 되면, 유기 기전력이 증가하게 되고, 출력 전압이 증가하게 된다. 발전기의 출력전류가 흐르게 되면 발전기의 출력전압은 무부하시보다 낮아지며 이러한 관계는 식 (2.25)를 통하여 알 수 있다. 또한 발전 출력전류 증가는 터빈의 출력토크 증가를 가져오는 것을 알 수 있다. 앞 서 언급한 것처럼 실제 해상에서 낮고 긴 주기의 너울형 파도가 발생하면, 파 력 발전 터빈은 관성에 의하여 낮은 속도로 회전하게 된다. 이때 발전기 유기 전압은 낮지만 출력을 낼 수 있다.


2.3. 복합 발전시스템

2.3.1. 복합 발전시스템의 구조

신재생에너지 발전시스템은 자연에너지를 전기에너지로 변환하는 동작을 수 행한다. 현재 신재생에너지를 이용하는 다양한 발전시스템들이 사용되고 있으 며 각각에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 태양광 발전시스템은 직류 형태 로, 파력, 풍력, 조류 발전시스템은 터빈을 사용하므로 교류 형태로 발전이 이 루어진다.

태양광 발전시스템의 출력전압과 전류는 발전되는 환경 및 부하에 따라 변화 한다. 터빈을 이용한 발전 방식의 경우에는 발전기 회전속도와 부하 등에 따라 출력주파수 및 출력전압이 변화하게 된다. 주파수와 전압이 변화하는 교류 전 원을 복합하는 것보다 직류 전원을 복합하는 방식이 구조적으로 간단하다. 그 러나 정류로 인한 손실이 발생하며 송전 및 일반가정에서 사용하기 위해서는 교류 전원으로 다시 변환해 주어야 하는 단점을 가진다. 그러므로 대부분의 대 형 발전은 교류 형태로 전원을 복합하는 방식을, 소용량 발전의 경우에는 직류 전원을 복합하는 방식을 채택한다.

1) 정류시스템

발전기를 이용한 복합 발전시스템은 Figure 2.9와 같은 정류회로를 사용하게 된다. 단, 부하는 커패시터가 있는 저항부하일 수도 있고, 축전지와 같은 큰 커 패시터 부하일 수 있다.

각 상의 발전되는 상전압을 식으로 나타내면 식 (2.28)과 같다. 이때 V_a , V_b, V_c 는 상전압이고, V_P 는 실효전압, ω_e 는 전압의 각속도이다[20].

$$V_{a} = \sqrt{2} V_{P} \sin(\omega_{e}t)$$

$$V_{b} = \sqrt{2} V_{P} \sin(\omega_{e}t - 2\pi/3)$$

$$V_{c} = \sqrt{2} V_{P} \sin(\omega_{e}t - 4\pi/3)$$
(2.28)





Figure 2.9 Diode rectifier with a load

식 (2.28)을 선간전압 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} 으로 나타내면 식 (2.29)와 같다. 이때 선 간전압의 실효값을 $V_L (= \sqrt{3} V_P)$ 로 한다[20].

. THIT ...

$$V_{ab} = V_a - V_b = \sqrt{2} V_L \sin(\omega_e t + \pi/6)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = \sqrt{2} V_L \sin(\omega_e t - \pi/2)$$

$$V_{ca} = V_c - V_a = \sqrt{2} V_L \sin(\omega_e t - 7\pi/6)$$
(2.29)

Figure 2.9에서 입력단 인덕턴스가 없고, 출력단에 저항과 작은 커패시터만 있다고 가정하면 출력전압은 Figure 2.10처럼 나타나게 된다. 이때의 저항에 의한 출력전압 V_R 은 Figure 2.10 Section 1의 평균값이다. 이를 식으로 나타 내면 식 (2.30)과 같다[20].

$$V_{R} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} V_{L} \sin(\omega t + \pi/6) \ d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{L}$$
(2.30)

그러나 일반적으로 발전기에는 인덕턴스가 있고 출력단에는 저항 부하보다는 커패시터 부하가 설치된다. 대표적인 커패시터 부하는 축전지이다. 특히 발전 전력으로 축전지를 충전하는 경우라면 정류단 이후에는 매우 큰 커패시터 부하 가 있는 것과 같게 된다. 정류단 이후에 큰 커패시터 부하가 일을 경우 Figure 2.10 Section 1의 전류는 Figure 2.11과 같이 왜곡된다[20].





Figure 2.10 Waveform of diode rectifier with a resistive load



Figure 2.11 Waveform of DC current with a capacitive load

커패시터 부하의 충전전압 V_{CL} 과 선간전압의 차이에 따라 충전이 이루어지 며, 저항부하만 있을 때와 같이 전류가 흐르지 못하고, 시정수 곡선에 따라 전 류가 흐르게 된다. 커패시터 부하에 전류가 흐르게 되면 발전기의 자기 인덕턴



스 L_s 에 에너지가 충전된다. 이후 선간전압이 축전지 전압보다 낮아지게 되면 발전기의 자기 인덕턴스 L_s 에 충전된 에너지가 부하로 흐르면서 전류가 흐르 게 된다.

발전기의 출력전류는 식 (2.26)에서와 같이 토크에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 출력전류 파형의 왜곡이 발생하면 발전기에도 토크 맥동이 발생한다. 토크 맥동은 발전시스템의 효율을 떨어뜨리거나 전력제어에서의 오동작의 원인 이 된다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 발전기 출력단에 인덕턴스 를 설치하여 전류의 맥동을 평활하게 하거나, 전체 부하 중에 커패시터 부하 용량을 줄여야 한다. 전력량이 매우 큰 경우에서는(수십 kW 이상) 변압기와 전 류회로를 이용하여 12 pulse이상의 정류회로를 이용하는 방법도 있다. 소용량 발전시스템에는 인덕턴스의 설치나 커패시터 부하 용량을 줄이는 방법을 사용 한다.[20]

2) 부하 출력

소용량 발전시스템은 대부분 직류 전원 체계로 구성되며 송전이나 220 V 이 상의 상용전원을 만들기 위하여 직류를 교류로 변환해야 한다. 특히 소용량 발 전시스템은 220 V 보다 낮은 전압을 발전하는 경우도 있다. 낮은 직류 전압으 로 높은 교류 전압을 만드는 방법은 다음과 같다.

먼저 인버터로 낮은 전압의 교류 전원을 만들고, 이를 변압기로 승압하는 방 식이다. 이러한 방식은 인버터에 대전류 부하를 가져오기 때문에 전력소자의 전류용량 및 변압기의 용량이 크다.

다른 방법으로 낮은 직류 전압을 부스터 컨버터로 승압하고, 높아진 직류 전 압을 인버터를 통하여 교류로 변환한다. 높은 전압을 스위칭 해야 하기 때문에 스위칭 회로의 구성이 어려우며, 교류 출력전압에 높은 고조파가 섞일 수 있 다. 그러나 변압기를 사용하지 않아도 되는 장점을 갖는다.

후자의 높은 직류 전압을 만드는 방법을 개선한 형태가 다중레벨인버터를 이 용한 방법이다. 다중레벨인버터를 이용하게 되면, 단일 스위칭 회로에 높은 전 압이 인가되지 않으며, 높은 고조파율을 줄일 수 있다. 다중레벨을 만들 수 있 는 방식은 다이오드 클램프 방식, 플라잉 커패시터 방식, 직렬다중레벨 방식



등이 있다. 이중 직렬다중레벨 방식의 인버터(cascaded H-bridge multi level inverter)는 Figure 2.12와 같은 H-bridge 인버터의 구조를 갖는다. 직렬다중레 벨 방식의 인버터는 축전지, 연료전지, 태양전지로부터 얻을 수 있는 분리된 직류 전원으로부터 원하는 전압을 형성하는 것이 가능하다. Figure 2.12는 직 렬다중레벨 방식의 인버터 구조 및 간단한 스위칭 동작을 나타낸 것이다. 현재 다중레벨 방식의 인버터 스위칭 기법에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다[20]. 스위칭 기법을 통하여 고조파 저감, 입력전원의 전압변화에도 일정한 출력제어 등이 가능하다. 출력전압은 두 개의 H-bridge 인버터에 의하여 결정된다. 그러 므로 직렬다중레벨 방식의 인버터 출력 V_m 은 식 (2.31)과 같다[4,20].



Figure 2.12 Structure of cascaded H-bridge multi level inverter (5-level)

$$V_m = V_{ma} + V_{mb}$$

$$(-V_{dc1} \le V_{ma} \le V_{dc1}, -V_{dc2} \le V_{mb} \le V_{dc2})$$
(2.31)

여기서 V_{ma} , V_{mb} 는 각 H-bridge 인버터 출력이고, V_{dc1} , V_{dc2} 는 각 H-bridge 인버터 개별 입력전원의 전압을 나타낸다. 다중레벨방식의 인버터 출력은 H-bridge 인버터 스위칭 소자의 조합에 따라 결정된다. 소자 하나가 감당해야 하는 전압은 H-bridge 인버터의 입력전압이 된다.



직렬다중레벨 방식의 인버터를 통하면 여러 전원을 복합하는 것과 동시에 승압하여 사용할 수 있다. Figure 2.13은 다중레벨인버터를 이용한 복합 발전 시스템 구조를 나타낸 것이다.



Figure 2.13 Structure of hybrid power systems using multi level inverter

직렬다중레벨 방식의 인버터에서 개별 입력전원을 축전지로 보면, 전력을 생 산하여 축전지에 충전하는 부분은 독립형 발전시스템과 동일한 형태가 된다. 독립형 발전시스템은 발전전원을 축전지에 충전하는 구조로 하나의 독립된 전 원을 갖는다. 독립전원에 하나의 발전원이 있을 수도 있고 두 개 이상의 발전 원을 복합하여 사용할 수도 있다.

독립형 발전시스템은 축전지 전원을 기반으로 운용되므로 발전기를 직접 연 결하게 되면 발전기에서 전류 맥동이 발생하게 된다. 소용량 발전시스템으로 나누어 개별 독립 전원을 형성하여 다중레벨방식으로 출력전압을 형성하면 하 나의 발전기에 연결되는 축전지 용량을 줄일 수 있다.



2.3.2. 독립형 발전시스템

신재생에너지의 발전전원을 복합하는 가장 손쉬운 방법은 다이오드를 이용하 여 전원을 합치는 것이다. 두 개의 신재생에너지원이 있다고 가정하고 출력전 압과 전력을 식 (2.32)와 같다고 가정한다. p_{s1} , p_{s2} 는 각 발전원의 전력생산량, v_{s1} , v_{s2} 는 각 발전원의 발전전압, i_{s1} , i_{s2} 는 각 발전원의 출력전류이다.

$$p_{s1} = v_{s1}i_{s1}$$
(2.32)
$$p_{s2} = v_{s2}i_{s2}$$

신재생발전원의 출력전력은 비선형적이다. 태양광 발전시스템은 일사량과 온 도가 일정할 때, 특정 출력전압, 출력전류에서 최대출력전력을 발전한다. 파력 이나 풍력발전시스템에서도 터빈으로 유입되는 공기의 유속이 일정할 때, 터빈 은 특정 회전속도와 토크에서 최대출력을 갖으며, 영구자석형 발전기를 사용하 는 발전시스템의 출력 전류는 출력 토크에 비례하고 출력전압은 발전기의 회전 속도에 영향을 받는다. 그러므로 파력이나 풍력발전시스템의 경우 특정 출력전 압, 출력전류에서 최대출력전력을 발전한다. 신재생에너지원의 환경요인이 변 하지 않는다고 가정하였을 때, 최대출력을 정리하면 식 (2.33)과 같다.

$$P_{ms1} = V_{ms1}I_{ms1}$$
(2.33)
$$P_{ms2} = V_{ms2}I_{ms2}$$

 P_{ms1}, P_{ms2} 는 발전원의 최대출력전력, V_{ms1}, V_{ms2} 는 최대 출력전력에서의 전압, I_{ms1}, I_{ms2} 는 최대출력전력에서의 전류를 나타낸 것이다.

축전지의 단자전압을 수식으로 나타내면 식 (2.34)와 같다[21-24].

$$V_b = V_{oc} + (R_b + \frac{k}{SOC}) \times i_b \tag{2.34}$$



V_b, *V_{oc}*, *R_b*는 각각 축전지 전압과 개방전압, 축전지 연결 단자 저항이고, *k_a*, *i_b*, *SOC* 는 분극 상수, 충방전전류, 축전지 충전상태 값(0~1)을 나타낸다.
이를 충전 전류에 관하여 정리하면 식 (2.35)와 같다.

$$i_b = \frac{V_b - V_{oc}}{R_b + \frac{k}{SOC}}$$
(2.35)

두 개의 전원을 다이오드를 통하여 복합한다면 Figure 2.14와 같은 구조가 될 것이다. 이때 하나의 전원만 발전이 이루어지고 있다면 식 (2.36)과 같은 출력이 될 것이다. *P_{ch}*는 충전전력량이며 다이오드에 의한 전압강하 및 전력 손실은 무시하였다.



Figure 2.14 Structure of hybrid power system using a diode

$$P_{ch} = \begin{cases} 0 &, \quad v_{s1} < V_b \\ V_b i_b &, \quad v_{s1} \ge V_b \end{cases}$$
(2.36)

각 발전원이 축전지와 연결되어 있을 때의 발전원 전압을 v_{s1}' , v_{s2}' 라고 하 면 이 전압은 식 (2.37)로 되어 축전지 충전 전압과 같게 될 것이다.

$$v_{s1}' = \begin{cases} v_{s1}, & v_{s1} < V_b \\ V_b, & v_{s1} \ge V_b \end{cases}, \quad v_{s2}' = \begin{cases} v_{s2}, & v_{s2} < V_b \\ V_b, & v_{s2} \ge V_b \end{cases}$$
(2.37)



각 발전원의 출력전력은 식 (2.38)과 같게 된다.

$$p_{s1} = v_{s1}'i_{s1}, \ i_{s1} = f(v_{s1}')$$

$$p_{s2} = v_{s2}'i_{s2}, \ i_{s2} = f(v_{s2}')$$
(2.38)

식 (2.38)에서의 각 발전원의 출력전력은 최대출력전력과 같을 수도 있지만 대부분의 경우에서는 같지 않게 된다. 특히 신재생에너지는 비선형의 특성을 가지므로 발전원은 부하에 의하여 출력전압 또는 출력전류의 제한이 이루어지 고 일정 출력전력을 발전한다. 축전지 용량이 발전전원의 발전량보다 크기 때 문에 축전지 전압 변동은 작다. 이러한 상태에서 발전기 출력은 축전지 전압에 구속을 받게 되고, 출력전류는 출력전압과 발전전원의 특성 곡선함수 $f(\cdot)$ 에 따라 변화한다[25-27].

발전기가 최대출력을 내는 전압이 축전지 전압보다 낮거나 높게 되면 축전지 에 충전을 하지 못하거나 최대전력으로 충전하지 못하는 현상이 발생한다. 또 한 축전지 전압은 충전전류와 축전지 충전 상태에 따라 변화하게 된다. 한쪽에 서 많은 전력을 생산하여 축전지 전압이 올라가게 되면 다른 쪽은 충전을 하지 못하게 되는 현상이 발생한다.



Figure 2.15 Structure of hybrid power systems using a power controller

각 발전원에서 최대전력을 축전지에 충전하기 위하여 Figure 2.15와 같은 전 력 구조를 제안한다. 각각의 발전원 출력에 전력제어기를 설치하고, 각 전력제 어기의 출력을 다이오드로 복합하여 축전지에 충전되도록 구성한다. 전력제어



기는 축전지 전압과 다르게 입력되는 전력원의 전압을 제어하여 발전원에서 최 대전력을 생산할 수 있도록 한다. 또한 다른 전력제어기의 충전에 의하여 축전 지 전압 V_b 가 변화하더라도 축전지에 안정적으로 전력을 충전할 수 있도록 제 어한다. 이러한 전력제어기는 일반적으로 DC-DC컨버터 구조로 발전원의 전압 과 축전지의 전압관계에 따라 설계한다.





3. 전력제어시스템 설계

3.1. 태양광 발전용 제어시스템

3.1.1. 전력시스템 설계

태양광 발전시스템에서 일반적인 발전용 설비로 가장 많이 사용되는 태양전 지는 80~160 W 이고, 개방전압은 20~40 V 이다. 또한 태양광 최대출력전력은 대부분 출력전압 17 V 이상이다. 그러므로 태양전지와 축전지가 직결로 연결하 게 되면 태양전지는 최대출력을 낼 수 없다. 대부분의 시스템의 경우 태양전지 출력전압이 축전지 전압보다 높다. 그러므로 DC-DC 컨버터 중에 벅 컨버터를 사용한다. Figure 3.1은 벅 컨버터의 구조를 나타낸 것이다. Figure 3.1에서 V_{bi} , I_{bi} 는 각각 벅 컨버터 입력전압, 전류이고 V_{bo} , I_{bo} 는 벅 컨버터 출력전압, 전류이다.



Figure 3.1 Circuit of buck converter

벅 컨버터는 전력 스위치 소자가 On상태에서는 인덕터와 축전지에 충전하 고, Off상태에서는 인덕터의 에너지로 축전지에 충전한다. 식 (3.1)은 인덕터에 충전되는 전압을 나타낸 것이다. 이때 e_L , i_L 및 L_b 는 인덕터 전압, 인덕터 전 류 및 인덕턴스이다[4-7].



$$e_L = L_b \frac{di_L}{dt} \tag{3.1}$$

전력 스위치가 On상태에 있는 시간을 t_{on} 이라고 하고, 이 시간 동안 인덕터에 흐르는 전류가 i_{L1} 에서 i_{L2} 까지 선형적으로 변화한다면 식 (3.1)은 식 (3.2)와 같이 정리된다. ΔI 는 인덕터 전류 변화량을 나타낸다[4].

$$V_{bi} - V_{bo} = L_b \frac{i_{L2} - i_{L1}}{t_{on}} = L_b \frac{\Delta I}{t_{on}}$$
(3.2)

전력 스위치가 Off되어 있는 상태의 시간을 t_{off} 라고 하고, 이 시간동안의 인 덕터에 흐르는 전류가 i_{L2} 에서 i_{L1} 까지 선형적으로 감소한다면 출력은 식 (3.3) 과 같다.

$$V_{bo} = L_b \frac{i_{L2} - i_{L1}}{t_{off}} = L_b \frac{\Delta I}{t_{off}}$$
(3.3)

이때 인덕터에 흐르는 전류 변화량이 전력 스위치의 On 상태와 Off상태가 같다면 식 (3.2)와 식 (3.3)의 인덕터 전류의 변화량은 같다. 이를 식으로 나타 내면 식 (3.4)와 같다.

$$\Delta I = \frac{(V_{bi} - V_{bo})t_{on}}{L_b} = \frac{V_{bo}t_{off}}{L_b}$$
(3.4)

전력제어기의 스위칭방법은 PWM(Pulse Width Modulation)기법을 적용하여 일정 주파수의 펄스폭을 제어하는 방법이다. 이때 전체 주기와 스위칭 On상태 의 시간 비율을 시비율 k 라고 한다. 이를 식으로 나타내면 식 (3.5)와 같으며 T_b 는 펄스폭의 주기를 나타낸다.



Collection

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T_b} \ (0 \le k \le 1)$$
(3.5)

식 (3.4)를 식 (3.5)로 입·출력전압에 따라 정리하면 식 (3.6)과 같이 정리된 다.

$$V_{bo} = \frac{t_{on}}{T} V_{bi} = k V_{bi}$$
(3.6)

전력소자의 스위칭 손실이 P_{L_o} 라면 입·출력전력의 관계는 식 (3.7)과 같다. 이때 스위칭 손실 P_{L_o} 는 스위칭 주파수와 스위칭 On/Off시간에 영향을 받는 다[4].

$$V_{bi}I_{bi} = V_{bo}I_{bo} + P_{Lo} \tag{3.7}$$

법 컨버터 출력에 축전지가 연결되면 식 (3.6)에서 V_{bo} 는 축전지 전압과 같 게 된다. 축전지 전압은 충전전력, 축전지 용량, 축전지의 현재 충전량에 따라 변화한다. 충전 전류량에 비하여 축전지 용량이 크기 때문에 태양광발전을 이 용하여 축전지에 충전을 하더라도 축전지 전압은 크게 변동하지 않는다.

태양광 발전시스템의 최대출력전력을 P_{ms} 이라면 이때 출력전압, 출력전류는 V_{ms} , I_{ms} 이다. 스위칭 손실이 없다고 하면 출력전압과 입력전압의 관계는 식 (3.8)과 같다. V_b , I_{ch} 는 각각 축전지 전압, 충전전류이다. 축전지 전압이라고 변화하지 않는다면 PWM의 시비율을 변경하여 태양전지의 출력전압을 제어할 수 있다. 태양광 발전 전력제어기는 태양전지의 출력전압 제어를 통하여 태양전지에서 최대출력을 발전하도록 할 수 있다.

$$P_{ms} = V_{ms}I_{ms} = V_bI_{ch} = \frac{1}{k}V_bI_{ms} \ (V_{ms} > V_b)$$
(3.8)



3.1.2. 스위칭 드라이버 설계

태양광 발전시스템은 복합 발전 회로의 다이오드를 통하여 축전지에 전력을 충전한다. Figure 3.2는 태양광 발전 전력제어기와 단순화한 복합 발전시스템 에서의 충전 구조를 나타낸 것이다. 태양광 발전 전력제어기 동작전원은 전력 제어기의 출력 V_{bo} 에서 가져온다. 이때 태양광 발전 전력제어기의 출력 V_{bo} 는 식 (3.9)와 같다.

$$V_{bo} = \begin{cases} V_{sol} , & V_{sol} < V_b \\ V_b , & V_{sol} \ge V_b \end{cases}$$
(3.9)



Figure 3.2 Structure of PV power controller

전력소자로 MOSFET-P형을 사용하기 때문에 스위칭 신호가 있지 않으면 전 력소자는 연결된 상태가 된다. 즉 MOSFET의 게이트 신호가 MOSFET의 소스 전압보다 10 V 이상 높지 않으면 전력 스위치는 동작하지 않는다. 태양전지 출 력전압이 10 V 이상이 되면 마이크로컨트롤러가 동작하고, PWM신호를 만든다. 이러한 신호를 포토커플러를 통하여 MOSFET 드라이버에 전달하고 이를 통하



여 MOSFET에 스위칭 신호를 보낸다. MOSFET-P형 전력소자를 Off하기 위해 서는 MOSFET의 게이트 전압에 소스 전압보다 10V이상 높은 전압을 인가한 다. 전력소자를 On하기 위해서는 MOSFET의 소스전압보다 낮은 전압을 인가 하면 된다.

태양전지의 출력이 축전지 전압보다 높게 되었을 때, MOSFET의 소스단의 전압은 축전지 전압이 된다. 제어기의 입력전압이 축전지 전압이므로 축전지 전압만으로는 MOSFET를 제어할 수 없다. 그러므로 제어회로에서 Voltage doubler라는 칩을 이용하여 전압 V_{bo} 를 2배로 승압한다. 이렇게 승압된 전압으 로 MOSFET의 스위칭 회로를 제어한다.

제어회로에서 제너다이오드와 MOSFET 드라이버는 스위칭 신호의 상승 시 간 및 하강 시간을 개선하기 위하여 사용된다. 포토커플러는 벅 컨버터의 Off 시점에서 코일의 에너지가 방전될 때, MOSFET의 소스 측에 순간적으로 임펄 스 형태의 전압맥동이 발생하게 된다. 이 전압 맥동이 게이트 단을 타고 제너 다이오드와 MOSFET 드라이버를 통과하여 영향을 미친다. 그러므로 제어회로 를 보호하기 위하여 포토커플러를 설치하여 노이즈를 막는 역할을 한다

또한 전류가 많이 흐르는 부분과 제어부분을 분리하여 제어보드를 설계한다. 본 논문에서는 전류가 많이 흐르는 부분은 단자대 결선 등으로 회로를 구성하 였고, 스위칭 드라이버 및 제어부분은 PCB형태로 구성한다.



3.2. 파력 발전용 제어시스템

3.2.1. 전력시스템 설계

파력 발전기는 2장에서 설명하였듯이 회전하면서 영구자석에 의한 유기 기 전력이 발생하게 된다. 또한 출력전류에 따라 발전기에 가해지는 토크가 변경 된다. 영구자석형 발전기는 무부하시 회전속도에 따라 출력전압이 비례한다. 그러므로 회전속도가 낮은 경우에는 출력전압이 낮다.

발전기의 출력전압이 축전지 전압보다 낮은 경우에는 부스터 컨버터로 승압 하고, 축전지 전압보다 높을 경우에는 벅 컨버터로 강압해야 한다. 그러므로 이러한 경우에는 벅 부스터 컨버터를 사용하는 것이 일반적이다.

그러나 벽 부스터 컨버터로 축전지를 충전하려면 전력 스위칭 모듈을 2개 이상 사용하여 충방전 제어를 수행해야 한다. 이럴 경우 스위칭 소자에서의 전 력 손실이 크게 발생하게 된다. 소용량에서는 벽 부스터 컨버터로 출력을 제어 하기 보다는 스위칭 손실을 줄이기 위하여 부스터 컨버터를 사용하는 것이 더 효과적이다. Figure 3.3은 부스터 컨버터 구조를 나타낸 것이다. V_{bsi} , I_{bsi} 는 각 각 부스터 컨버터 입력전압, 전류이고, V_{bsi} , I_{bsi} 는 부스터 출력전압, 전류이다.



Figure 3.3 Circuit of booster converter

전력소자가 On 상태일 때 코일에 흐르는 전류가 선형적으로 i_{L1} 에서 i_{L2} 까지 증가한다면 입력전압과 전류의 관계는 식 (3.10)과 같다. 이때 전류 변화량을 △I, 인덕턴스를 L_b , 전력소자가 On 되어 있는 시간을 t_m 으로 한다[4,8-9].



$$V_{bsi} = L_b \frac{i_{L2} - i_{L1}}{t_{on}} = L_b \frac{\Delta I}{t_{on}}$$
(3.10)

전력소자가 Off상태일 때 코일에 흐르는 전류가 선형적으로 i_{I2} 에서 i_{I1} 까지 감소한다면, 전압과 전류의 관계는 식 (3.11)이다.

$$V_{bsi} - V_{bso} = L_b \frac{i_{L2} - i_{L1}}{t_{off}} = L_b \frac{\Delta I}{t_{off}}$$
(3.11)

식 (3.10)과 식 (3.11)을 전류 변화량에 관하여 정리하면 식 (3.12)와 같다 [4].

△
$$I = rac{V_{bsi}t_{on}}{L_b} = rac{(V_{bso} - V_{bsi})t_{off}}{L_b}$$
 (3.12)
(3.12)를 시비율로 정리하면 식 (3.13)이다.
 $1-k = rac{V_{bsi}}{V_{bso}}$ (3.13)

입·출력전압의 관계를 나타내면 식 (3.14)와 같다[4].

$$V_{bsi}I_{bsi} = V_{bsi}I_{bsi} + P_L \tag{3.14}$$

부스터 컨버터 출력에 축전지를 연결하게 되면 부스터 컨버터로 승압을 하더 라도 출력전압은 축전지 전압이 된다. 그러므로 부스터 컨버터의 동작은 축전 지 전압보다 입력전압이 낮은 경우에만 승압하는 동작을 하고, 입력전압이 축 전지 전압보다 높게 되면 전력소자를 스위칭하지 않고 직결한다. 스위칭 손실



식

이 없다고 할 때 부스터 컨버터가 동작에 의한 입·출력전압의 관계는 식 (3.15)와 같이 정리된다.

$$P_{mwa} = V_{mwa}I_{mwa} = V_bI_{ch} = \frac{1}{1-k}V_{mwa}I_{ch} , \ (V_{mwa} < V_b)$$
(3.15)

P_{mwa}은 파력발전의 최대 출력 전력이고, 이때의 전압, 전류는 V_{mwa}, I_{mwa} 이 다. 발전기가 낮은 회전수로 일정하게 회전한다면 발전기의 출력전압은 축전지 전압보다 낮게 된다. 이때 승압하지 않고 직접 연결한다면 충전이 이루어지지 못한다. 전력을 생산하기 위해서 시비율을 조정하여 전력제어기의 출력전압을 축전지 전압 이상으로 승압해야 한다. 출력전압을 승압하게 되면 발전기에서 출력되는 전류는 충전전류에 비하여 식 (3.15)에서 보는 것과 같이 큰 값이 된 다. 이를 통하여 발전기의 유기전압이 출력전압보다 낮을 경우에도 발전이 가 능하다.

3.2.2. 스위칭 드라이버 설계

ollection

파력 발전 전력제어기는 파력에서 만들어진 전력을 복합 발전시스템의 다이 오드를 통하여 축전지에 충전한다. 파력 발전 전력제어기는 부스터 컨버터 기 반으로 구성된다.

$$V_{bso} = \begin{cases} V_{wav} , & V_{wav} < 5 V \\ V_b & , & 5 V < V_{wav} < V_b \\ V_b & , & V_{wav} \ge V_b \end{cases}$$
(3.16)

다이오드를 통하여 축전지에 연결되기 때문에 부스터 컨버터의 출력전압 V_{bso} 는 식 (3.16)과 같이 정의할 수 있다. Figure 3.4는 파력 발전 전력제어기 의 스위칭 구조를 나타낸 것이다.



Figure 3.4 Structure of wave power controller

파력 발전 전력제어기의 구조는 태양광 전력제어기에 비하여 단순한 구조로 되어 있다. 파력 발전 전력제어기의 부스터 컨버터는 출력전압이 5 V 이하 영역 에서는 동작하지 않는다. 부스터 컨버터가 동작하지 않는 동안 부스터 컨버터 의 출력전압은 입력전압과 같은 전압이 된다. 발전기의 출력전압이 5 V 이상이 되면 제어기가 구동하고 Voltage doubler를 통하여 10 V 의 전압을 만들어 MOSFET-N형을 스위칭 하도록 구성된다. MOSFET-N형은 소스의 전압보다 게 이트의 전압이 10 V 이상이 되면, On상태가 되고 소스의 전압보다 게이트 전압 이 낮으면 Off상태가 된다. MOSFET-N 형과 MOSFET 드라이버 사이의 다이오 드는 MOSFET-N 형의 스위칭 Off 시의 동작을 빠르게 한다. 코일 및 다이오드 의 전류 용량은 크게 하였으며, MOSFET의 전류 용량은 작게 하였다. 이것은 부스터 컨버터가 동작하게 되는 영역에서의 출력이 15~30 W 수준일 것으로 판 단되기 때문이다.



3.3. 복합 발전 제어시스템

다수의 소용량 발전시스템을 복합하여 대용량 발전시스템을 구축할 때, 직렬 다중레벨 방식의 인버터를 적용한다. 대용량 발전시스템에 사용되는 소용량 발 전시스템과 독립 전원시스템으로 사용되는 소용량 발전시스템은 모두 발전전력 의 안정화를 위하여 축전지를 에너지 저장 장치로 사용한다. 축전지는 발전전 력이 많을 경우 충전을 통하여 부하의 전압상승을 막고, 발전전력이 적을 경우 방전을 통하여 부하에 안정적인 전압을 유지한다. 또한 복합 발전을 하는 경우 에 두 개의 개별전원의 기준전압 역할을 하며, 각각의 발전전원을 안정적으로 복합하는 역할을 수행한다. 복합 발전은 다이오드 회로를 통하여 전원계통이 연동되도록 구성된다. Figure 3.5는 전체 시스템 중에 복합 발전시스템을 나타 낸 것이다.



Figure 3.5 Structure of hybrid power systems

기상환경에 따라 신재생에너지의 발전량은 가변적으로 움직이기 때문에 전력 을 안정화하는 것은 매우 어렵다. 특히 해상에서의 발전 전력량의 변화는 더욱 빠르게 일어난다. 발전 전력량이 많은 날의 경우에는 부하전력 사용량보다 많 기 때문에 축전지가 충전되고 축전지 전압은 상승하게 된다. 또한 발전량이 적 은 경우에는 부하에 안정적인 전원을 공급하기 위하여 축전지를 방전하므로 축



전지 전압이 하강한다.

축전지는 일정 전압 범위에서 충·방전되는 횟수가 제한을 받는다. 축전지의 전압의 변화폭이 커지거나 충·방전의 횟수가 많아지면 축전지 수명은 단축된다. 통상 500~1000회 정도 충·방전이 이루어지면 교체해야 한다. 축전지의 충·방 전 횟수를 줄이거나 축전지 변동전압을 줄이는 것이 축전지의 수명을 연장할 수 있는 방법이다. 본 논문에서는 축전지 수명 연장을 위하여 Figure 3.6과 같 이 분리형 축전지 시스템을 제안한다.



Figure 3.6 Structure of separable battery

OFTH

축전지를 충전하면 전압은 서서히 증가하게 된다. 축전지를 완충한 후 계속 충전하게 되면 과충전이 이루어지게 된다. 축전지가 과충전이 되면 축전지 수 명은 단축된다. Figure 3.6에서 주 축전지가 완충되면 보조 축전지로 전원을 변경하여 보조 축전지를 충전하고, 보조 축전지가 완충 되면, 더미저항으로 전 원을 소비하여 과충전을 막는다. 보조 축전지의 용량은 일일 전력의 변화량을 감당할 수 있는 용량으로 하고, 주 축전지 용량은 발전 전력량이 부족한 일수 를 기준으로 하여 산정한다. 보조 축전지 전압은 매일 변화하지만, 주 축전지 는 평균전력생산량보다 전력이 부족한 경우에만 동작함으로 거의 변화하지 않 는다. 이렇게 축전지의 용량을 다르게 구성하게 되면 단일 축전지를 사용할 때 보다 보조 축전지의 수명은 단축되지만 주 축전지의 수명은 증가하게 된다. 또 한 분리형 축전지 구조는 발전전원에서 보았을 때 대용량 커패시터 부하가 아



닌 분리된 형태의 커패시터 부하를 갖도록 한다.

축전지의 용량 산정은 생산전력량과 소비전력량의 불균형의 차이에서 나타난 다. 발전량은 실시간으로 변화하고 부하는 일정하다고 가정하면 일일 전력 생 산량과 소비량은 Figure 3.7과 같다.



발전량을 P_{hp} , 부하를 P_{load} 라고 할 때, 축전지가 감당해야 하는 총 전력량 P_{bat} 는 식 (3.17)과 같다. d_m 은 측정 횟수를 나타낸 것이다.

$$P_{bat} = \frac{\int_{0}^{d_{m}} |P_{hp} - P_{load}| dt + 2 \left| \int_{0}^{d_{m}} P_{hp} dt - \int_{0}^{d_{m}} P_{load} dt \right|}{2d_{m}} \times 24$$
(3.17)

발전량과 소비량의 차이가 크게 될수록 축전지에서 감당해야 하는 전력량이 커지게 된다. 축전지가 감당해야 하는 전력량이 증가하게 되면 축전지 용량도 커져야 한다. 일일 생산량에서의 전력생산 불균형이 크게 발생하게 되면 보조 축전지 용량이 커지게 된다. 식 (3.17)을 장기간으로 적용하여 축전지 용량을 계산하면 축전지가 감당해야할 전력량이 커지게 되고 주 축전지 용량이 늘어나 게 된다. 또한 전력생산량이 부하량보다 낮아지는 시점이 길고 전력량이 가장



큰 경우를 기준으로 하여 축전지 용량을 선정해야 한다. 현재 사용되는 축전지 용량 환산 공식은 식 (3.18)과 같다[23-24].

$$C = \frac{1}{L_{ba}} \{ k_1 i_1' + k_2 (i_2' - i_1') + \dots + k_n (i_n' - i_{n-1}') \}$$
(3.18)

이때 C는 10시간 기준 정격 방전율 용량, L_{ba} 은 보수율(0.8), k_n 은 최저전 압에 의한 용량 환산 시간, i'는 부하 특성별 방전전류를 나타낸 것이다. 식 (3.18)은 부하의 방전 패턴이 일정하다면 축전지의 용량 산정이 가능하다. 그 러나 현재 시스템은 충전과 방전이 동시에 일어나기 때문에 축전지의 충방전 전력량이 항상 변화한다. 그러므로 식 (3.18)과 같이 정확하게 전력량을 예상 하여 설계하는 것은 어렵다. 본 논문에서는 축전지 용량산정 방식으로 식 (3.17)의 축전지가 감당해야 하는 전력량을 현재 기준전압으로 나눈 값을 총 방전 전류량을 계산한다. 이렇게 축전지 방전전류를 결정하면 방전이 되는 최 대 시간을 측정하여 이를 축전지 용량 산정을 하는 것이 발전과 소비가 동시에 이루어지는 시스템에서 효과적일 것이다.



4. 전력제어알고리즘 및 발전원 시뮬레이션

4.1. 전력제어알고리즘

4.1.1. 태양광 발전

1) 최대전력추적 제어알고리즘

태양광 발전시스템은 비선형적인 전원특성을 갖는다. 그러므로 최대전력을 추적하기 위하여 P&O(Perturbation and Observation) 제어기법, Inc-Cond (Incremental Conductance) 제어기법 등이 많이 사용되고 있다[28-29].

P&O 제어기법은 태양전지 어레이의 출력전압을 주기적으로 증가, 감소시키 고 이전의 출력전력과 현재의 출력전력을 비교하여 최대전력지점을 찾는다. 제어알고리즘이 간단하여 적용성이 용이한 장점이 있으며, 동작 속도가 빠른 특징이 있다. 그러나 일사량이 급변할 경우에 순간적으로 태양전지의 출력전압 이 최대출력지점을 벗어나는 경우가 있다[20].

Inc-Cond 제어기법은 태양전지 출력의 컨덕턴스와 증분 컨덕턴스를 비교하 여 최대출력지점을 추종하는 방법이다. Inc-Cond제어기법은 최대출력지점 도 달 후에 안정적으로 동작하며 일사량이 급변하게 되는 경우에도 빠르게 추적하 여 안정적인 제어를 수행할 수 있다. 그러나 2회의 나눗셈 연산과 많은 계산량 이 필요하여 빠른 프로세서가 요구되며 전압, 전류 측정에서도 빠른 스피드가 요구된다. 태양전지의 출력특성이 변화하게 되면 최대출력지점을 추적할 수 없 게 된다[20-21].

일반적으로 태양광 발전시스템에는 P&O 제어기법이 많이 사용되며, 간단한 피드백 구조 및 소수의 측정 파라미터를 기준으로 출력을 제어한다. 특히 해상 에서는 해수에 의하여 태양전지 표면이 오염되면 전체적인 출력특성이 변한다. 이러한 변화에도 P&O 제어기법은 최대출력지점을 추적할 수 있는 장점을 갖는 다. Figure 4.1은 P&O 제어기법의 제어 흐름도를 나타낸 것이다. 제어 흐름도 에서 V(k)와 P(k)는 현재 전압 및 전력, V(k-1)과 P(k-1)은 이전 전압 및 전 력이며, Vref는 현재 벅 컨버터 제어를 위한 기준 전압, △V는 벅 컨버터 제어



기가 최소로 변경할 수 있는 전압 값이다[5-6,28].



Figure 4.2 PV output power due to P&O algorithm control



제어시스템은 지속적으로 현재 전압, 전류만을 측정하여 빠르게 벅 컨버터 시비율을 변화시켜 태양전지 출력전압을 변경한다. 2장에서 설명하였듯이 축전 지 전압이 고정되어 있고, 시비율을 변경하면 태양전지의 출력전압은 변경될 것이다. Figure 4.2는 P&O 제어기법의 제어동작을 나타낸 것이다. P&O 제어 기법의 동작에서 제어기는 현재 전력과 이전 전력을 비교하여 전력이 큰 방향 으로 태양광 출력전압을 조절하여 제어한다. P&O 제어기법은 제어알고리즘이 단순하고 복잡한 연산이 요구되지 않으며, 태양전지의 출력특성이 변하더라도 최대출력지점을 추종하는데 무리가 없다. 그러나 해상의 부유물에 빠른 움직임 이 발생하게 되면 최대출력지점을 추종하지 못하게 된다. 즉 해상에서 부유 물 체가 P&O 제어기법을 통한 최대출력지점을 찾는 시간보다 빠르게 움직이게 되 면 최대출력지점과 다른 방향으로 제어동작을 수행할 수 있다. Figure 4.3은 P&O 제어알고리즘의 오동작을 나타낸 것이다.



Figure 4.3 P&O algorithm error by buoy motion

초기 태양전지 출력곡선은 ⓐ곡선이었다. 현재 상황에서 시비율을 제어하여 태양전지 출력전압을 증가시킨다.(①번 동작) 제어기의 시비율을 변화시키는 시 간동안에 해양시설물이 움직임으로 인하여 광량이 변화하여 태양전지의 출력곡 선이 ⓑ곡선으로 변화한다. 이렇게 되면 이전에 비하여 현재전력생산량이 감소 하게 된다. P&O 제어기법에서는 이전과 현재 출력전력비교를 통하여 최대출력



지점을 지난 것으로 판단하고, 시비율을 제어하여 전압을 감소시킨다.(②번 동 작) 이때 다시 광량이 변화하여 출력곡선이 ③곡선이 되면 제어기는 출력전압 을 감소시키는 방향이 최대출력지점으로 접근하고 있는 것으로 판단하게 된다. 다음 단계에서 계속적으로 출력전압을 감소시키는 방향으로 진행하게 된다.(③ 번 동작) 이때 다시 광량이 변화하여 태양전지 출력곡선이 ⓒ가 되면 계속 출 력전압을 감소하는 방향으로 동작하게 되어 최대전력지점과 상이한 방향으로 제어동작이 이루어지게 된다.

태양광 발전시스템은 낮은 광량에서도 일정이상의 출력전압을 얻기 위하여 태양전지를 직렬로 연결한다. 해양시설물의 구조적인 원인에 의하여 태양전지 의 설치 각도가 서로 다르다면, 각각의 태양전지에는 입사되는 광량의 차이가 발생하게 될 것이다. 또한 대형으로 설치되는 태양광 발전시스템의 경우에 지 면이나 해수면에 가까운 태양전지와 멀리 떨어져 있는 태양전지 사이에 온도차 이가 발생하게 된다. 이러한 차이로 인하여 태양전지 간의 출력의 차이가 발생 하게 된다. Figure 4.4는 직결로 연결된 두 태양전지의 광량에 의한 태양전지 출력 차이를 나타낸 것이다.



Figure 4.4 V-I curve of serial combination PV panel on difference direction

태양전지 출력이 서로 다르게 되면, 변곡점이 생긴다. Figure 4.5는 광량 차 이로 인한 출력특성이 다른 두 개의 태양전지를 직렬로 연결하였을 때의 전압 -전력 곡선을 나타낸 것이다. 현재 @지점에서 전압을 증가하는 방향으로 시비



율을 제어하여 태양전지 출력전압이 증가한다.(①번 동작) ⑩지점에서 전압을 증가시키는 방향으로 시비율을 변화시키면 출력전력은 ⓒ지점이 된다.(②번 동 작) ⓒ지점이 되면 ⑩지점보다 출력이 작기 때문에 전압을 감소시키는 방향으 로 시비율을 변화시킨다.(③번 동작) 이러한 동작을 수행하면 계속 최대전력지 점이 아닌 상이한 지점에 멈추어 있게 된다. 이러한 현상은 태양전지 출력곡선 에 변곡점이 있기 때문이다.



2) 최대전력추적탐색 제어알고리즘

해상에서의 P&O 제어기법은 해상 구조물의 빠른 움직임과 태양전지의 설치 에서 오는 환경적 요인에 의하여 최대출력지점을 찾지 못하는 경우가 발생한 다. 그러나 P&O 제어기법은 태양전지의 특성이 변화하더라도 최대전력지점을 찾을 수 있는 장점이 있다. 그러므로 P&O 제어기법을 근간으로 하되 빠른 움 직임에 의한 동작의 오류나 변곡점 발생에 따른 제어의 오류를 보완하고자 하 였다. 이를 위하여 본 논문에서는 P&O 제어기법에 탐색제어기법을 추가하였 다. 탐색제어기법은 전체 개체에서 표본을 뽑고, 선택된 개체 중에 목표 값을 찾는 방식이다. 이를 위하여 태양전지 전체 전압구간을 일정간격으로 분할하여



출력전력을 측정한다. Figure 4.6은 탐색제어기법에서의 측정 범위와 측정 간 격을 나타낸 것이다.



Figure 4.6 Measuring scale and interval scale in searching algorithm

측정 간격이 너무 좁게 하면 최대전력지점을 추적하는 시간이 늘어나게 되 고 측정 간격을 너무 넓게 하면 측정 간격 사이에 변곡점이 발생하게 되어 최 대전력지점을 추적할 수 없게 된다. 또한 측정 범위에 최대전력지점이 없으면 최대전력지점을 추적하지 못하게 된다. 그러므로 측정범위를 좁게 설정하면서 최대전력지점을 포함하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 시뮬레이션 및 실험을 통하여 탐색 범위를 제안하고자 한다. 탐색제어기법으로 측정하는 태양전지의 출력 값을 식으로 나타내면 식 (4.1)과 같다.

$$\begin{split} P_1 &= V_{buo}I_1, \quad P_2 = (V_{buo} + V_k)I_2, \quad P_3 = (V_{buo} + 2\,V_k)I_3, \cdots, \qquad (4.1) \\ P_n &= (V_{buo} + n\,V_k)I_n, \quad (n = 1, 2, 3, \cdots, n) \end{split}$$



이때 V_{buo} 는 축전지와 태양전지가 직접 연결되어 있을 때 전압으로 벅 컨버 터 시비율이 0인 경우이다. V_k 는 시비율 변화에 따른 전압 변화로 탐색 제어알 고리즘의 측정간격 전압이다. 탐색제어기법에서 측정 간격은 일정하게 유지된 다. $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 은 측정 간격 전압에 따른 충전 전류이다. $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 은 측 정 간격에 따른 생산 전력량이다. 각각의 출력 값 중에 최대전력 값을 찾으면 식 (4.2)와 같다. P_{smax} 는 탐색제어기법에서의 최대전력 값이고 이때의 출력전 압을 V_{smax} , 출력전류를 I_{smax} 라고 한다.

$$P_{smax} = Max(P_1, P_2, P_3, \dots, P_n) = V_{smax}I_{smax}$$
(4.2)

탐색제어기법은 측정간격을 갖기 때문에 정확한 최대출력지점을 추종할 수 없다. 본 연구에서는 탐색제어기법으로 최적출력지점 인근으로 출력전압을 제 어 한다. 이후 P&O 제어기법으로 최적출력지점을 추종한다. 이때, P&O 제어 기법의 동작범위는 $V_{smax} - V_k$ 에서 $V_{smax} + V_k$ 까지이다.

Figure 4.7은 최대전력추적탐색 제어알고리즘으로 최대 전력지점을 추종하는 방법을 나타낸 것이다. 탐색제어기법으로 P_{smax} 로 출력전압을 제어하고, 이후 P&O 제어기법으로 P_{ms} 를 추종한다.



Figure 4.7 PV output power due to MPPST algorithm control



이러한 최대전력추적탐색 제어알고리즘에서 축전지의 전압이 변화하더라도 최대전력지점을 추적하는 데에는 문제가 없다. 또한 축전지 전압변화는 매우 천천히 이루어지며 탐색 시간 간격에서의 축전지 전압의 급격한 변동은 발생하 지 않는다. Figure 4.8은 최대전력추적탐색 제어알고리즘의 제어 흐름도를 나 타낸 것이다. 최대전력추적탐색 제어알고리즘은 일정 시간간격으로 탐색제어기 법을 적용하고 계속적으로 P&O 제어기법으로 최대전력지점을 추적한다.



Figure 4.8 MPPST algorithm flowchart

4.1.2. 파력 발전

기존 영구자석 발전기에서 사용되는 최대전력제어 방식은 공기의 유속 또는 발전기 속도를 이용한 토크제어 방식과 속도계를 이용한 회전속도제곱 비례토 크제어방식이 있다. 두 가지 방식은 최대출력제어를 위하여 직접 전력 계산하 는 방식이 아닌 유체에너지에서 기계에너지로 변환되는 에너지 비율인 터빈 에 너지변환효율을 측정하여 그 값을 기준으로 출력을 제어하는 알고리즘이다. 이 러한 방식은 터빈 에너지변환효율 오차가 발생할 경우와 장기간 운전 후 기계 적 파라미터가 변경 되었을 때 최대전력지점을 추종하지 못한다[31-32]. 그러



므로 환경조건이 변화되는 상황에서 출력제어를 하기 위해서는 P&O 제어기법 과 같은 최대전력추적 제어알고리즘이 적합하나 파력 발전시스템처럼 출력전력 의 변화가 빠른 경우에는 최대출력을 찾도록 제어하는 것은 매우 어렵다. 그러 나 파력 발전기의 발전 전압을 계측해 보면 일정 주기의 파고가 일정시간 이상 지속되면 일정범위의 전압이 유기되는 것은 알 수 있다. 그러므로 파력 발전 전력제어기는 발전전압의 빠른 변화는 무시하고, 일정시간 간격으로 발전전압 을 측정하여 평균한 값으로 출력을 제어한다. 또한 터빈이 일정한 질량을 갖도 록 하여 관성으로 터빈 회전속도 변화를 작게 한다.

본 논문에서는 파력 발전 제어알고리즘으로 P&O 제어기법을 적용한다. P&O 제어기법은 축전지 전압이 변화하더라도 안정적으로 축전지에 충전을 할 수 있다. 파력 발전 전력제어기는 3장에서 설명하였듯이 파력 발전기에서 유기 되는 전압이 낮은 경우에 부스터 컨버터를 통하여 승압하는 동작을 수행하고 그 외의 경우에는 제어동작을 수행하지 않는다. 2장에서 언급하였듯이 파력 발 전기의 유기전압은 발전기의 회전수와 관련이 있고, 출력전류는 발전기의 토크 와 관련이 있다.



Figure 4.9 Proposed wave power control algorithm



전력제어알고리즘은 제어기의 동작 범위에서 최대전력을 추적하도록 제안한 다. 파력 발전 전력제어기는 P&O 제어알고리즘으로 시비율을 제어하고 발전 기에서 출력전압, 전류를 제어한다. Figure 4.9는 제안하는 파력 발전 전력제어 알고리즘을 나타낸 것이다. 입력전압에 대한 일정범위에서만 P&O 제어알고리 즘이 동작한다. 부스터 컨버터의 출력단에 축전지가 있기 때문에 출력전압은 크게 변하지 않는다. 그러므로 입력전압이 출력전압보다 커지면 부스터 컨버터 는 스위칭 손실만 발생하므로 입력전압이 출력전압보다 커지면 시비율을 0으로 제어한다.

4.1.3. 복합 발전

복합 발전시스템은 2장에서 언급하였듯이 다이오드로 두 종류의 전원을 복 합하므로 별도의 제어가 필요하지 않다. 그러나 출력제어를 하기 위해서는 태 양광 발전시스템과 파력 발전시스템이 축전지 전압의 변동에도 출력을 제어해 야 한다. 태양광 발전시스템은 최대출력에 접근하기 위하여 P&O 제어기법을 보완하여 최대전력추적탐색 제어알고리즘을 적용한다. 또한 파력 발전 전력제 어기에도 최대전력추적 알고리즘으로 파력 발전특성을 반영한P&O 제어기법을 적용한다. 태양광과 파력시스템에 모두에 제어알고리즘으로 P&O 제어기법을 적용하였으므로 축전지 전압이 변경하더라도 출력제어를 하는 데에는 문제가 없다.



Figure 4.10 Structure of separable battery



복합 발전 제어알고리즘은 축전지를 두 개로 구분하여 운영하는 부분이다. Figure 4.10은 주 축전지와 보조 축전지의 분리형 축전지 구조를 나타낸 것이 다. 축전지를 두 개로 분리하여 운영하는 목적은 용량이 큰 주 축전지의 수명 을 연장시키는 것과 기상환경의 변화에서 발생하는 전력생산량의 차이에 따라 축전지의 충방전 운용을 다르게 하는 것이다.

주 축전지와 보조 축전지의 용량 차이는 일일 전력 변동량과 부조일수 및 환 경에 의한 발전 전력량의 차이에서 발생한다. 주 축전지는 항상 충전하여 발전 량이 부족한 날이 지속될 때 사용하고, 보조 축전지는 일별 발전 전력량 변화 에 따라 사용된다.

분리형 축전지 제어는 주 축전지를 완전 충전시키고 나서 보조 축전지를 충 전하는 방식으로 이루어진다. Figure 4.11은 충전전류와 방전전류, 축전지 전 압에 따른 제어동작을 나타낸 것이다.



Figure 4.11 Control algorithm of separable battery

Figure 4.11에서 입력 전류량이 출력 되는 전류량보다 크게 되면 전력제어기 는 축전지를 충전한다. 전력제어기는 주 축전지부터 완전 충전 전압 *V_{och}* 까지 충전한 이후에 보조 축전지를 충전한다. Figure 4.11 a 기간 동안에는 주 축전 지를, b 기간 동안에는 보조 축전지를 충전한다. c 기간처럼 충전전력량 보다 방전 전력량이 많으면 보조 축전지가 방전된다. d 기간처럼 방전되고 있는 상 황에서 보조 축전지가 방전정지전압이 되면, 주 축전지가 방전하면서 부하에



전원을 공급한다. 즉, 보조 축전지 전압이 방전정지전압인 V_{odc} 까지 떨어지면 주 축전지 전압을 방전하도록 제어한다. 이러한 제어를 통하여 주 축전지는 거 의 완전 충전되어 있는 상태 또는 전력변동이 작은 상태를 유지하도록 한다. 부하에 공급되는 전원의 전압변화량은 V_{oc} 에서 V_{odc} 까지 이다.

이렇게 축전지 제어를 하면 주 축전지의 전압변화량은 작아지고 보조 축전지 의 전압 변화량은 커지게 된다. 그러므로 보조축전지의 수명은 단축된다. 그러 나 추후 에너지 저장 시스템으로 소용량의 압축공기나 플라이 휠 등이 개발되 면 보조 축전지를 대신함으로써, 안정적인 전력운용이 가능할 것이다.





4.2. 발전원 시뮬레이션

4.2.1. 태양광 발전

식 (2.5)를 이용하여 태양전지의 출력을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 모 델은 80 W급 태양전지로 하였다. Figure 4.12는 태양전지 한 장의 출력특성을 나타낸 것이다. 태양전지 출력이 비선형으로 나오는 것을 알 수 있다. Figure 4.13은 태양전지 출력에서 P&O 제어알고리즘으로 최대전력지점을 찾은 것이 다. 이때 최대전력지점이 축전지 전압(12 V)보다 높은 것을 알 수 있다. Figure 4.14는 태양전지의 전압-전력의 출력곡선을 나타낸 것이다. 출력곡선이 포물선 형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 출력전압에 따라 출력전력이 변화한 다. 단일 태양전지의 시뮬레이션에서 태양전지 출력은 변곡점이 없는 것을 알 수 있다. 또한 P&O 제어알고리즘으로 최대전력지점을 정확히 찾을 수 있음을 확인하였다.



Figure 4.12 Simulation of photovoltaic cell




Figure 4.13 MPPT simulation result of V-I curve



Figure 4.14 MPPT simulation result of V-P curve



Figure 4.15는 태양전지 두 장을 직렬 연결하고 두 개의 광량과 온도를 다르 게 하였을 때의 출력을 나타낸 것이다. 시뮬레이션에서 사용된 태양전지의 상 수는 Figure 4.12와 동일한 값을 사용하였다. 두 개의 태양전지 광량과 온도 차이가 발생하게 되면 Figure 4.15와 같은 출력이 된다. 두 개의 태양전지 출 력전력 차이가 있는 지점에서 변곡점이 발생한다. Figure 4.16은 Figure 4.15 의 V-I곡선을 V-P곡선으로 변환한 것이다. Figure 4.15에서 제어기가 낮은 전압 부분에서 전압이 증가하는 방향으로 제어하고 있었다면 변곡점으로 인하 여 P&O 제어알고리즘으로 최대전력지점을 찾는 것은 불가능하다.

본 논문에서는 최대전력추적탐색 제어알고리즘을 제안하였다. 최대전력추적 탐색 제어알고리즘에서 가장 중요한 것은 탐색 범위와 간격을 설정하는 것이 다. 본 논문에서는 이를 위하여 태양전지를 시뮬레이션하고 실험을 수행하였 다. Figure 4.17는 온도가 일정할 때 광량의 증가에 따른 태양전지의 출력곡선 의 변화를 나타낸 것이다. Figure 4.17의 검은 점을 이은 곡선이 광량에 따른 최대전력 곡선이다.



Figure 4.15 V-I curve of serial connected pv panel





Figure 4.17 Results of PV simulation cell due to changed irradiance(temperature 40°C)





Figure 4.18 MPP curve due to changed temperature $(25^{\circ}C-70^{\circ}C)$

1945

Figure 4.18은 Figure 4.17의 태양전지 광량에 따른 최대전력 곡선을 온도에 따른 변화량을 추가했을 때의 전력량을 나타낸 것이다. 온도가 낮고 광량이 많 을 때, 태양전지 출력이 높게 나타나게 된다. Figure 4.18에서 태양전지 최대 전력지점은 일정 범위를 이루는 것을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션만으로는 정확한 범위를 선정하는 것은 어렵다. 시뮬레이션 결과를 보완하기 위하여 육 상에서 Figure 4.19와 같이 실험을 수행한다.

태양전지 출력을 알아보기 위하여 Figure 4.19와 같이 태양전지 두 장을 설 치하고, 이를 벅 컨버터를 이용하여 축전지에 충전하였다. 실험에서 벅 컨버터 의 시비율을 제어하여 축전지에 충전되는 전력량을 계측하였다. 시비율은 0에 서 100%까지 5%단위로 변화시키면서 측정한다. 구름에 의한 광량의 변화를 줄이기 위하여 구름이 없는 맑은 날에 실험을 수행하였다.





Figure 4.19 PV experiment system for measuring range on the land

태양전지는 60 W 두 장을 직렬로 연결하고, 축전지 용량은 12 V 200 AH 로 하고, 부하는 30 W의 부하를 설치한다. 실험 시작시의 축전지 전압은 12 V이 고 실험종료시의 전압은 13 V였다. 축전지 전압 변화에 따른 영향은 작다고 판 단된다. 시비율 변화에 따른 태양광 출력 1개의 곡선을 1분 간격으로 측정하였 으며 탐색 측정 시간은 20 초이다. 맑은 날 측정하였고 20초 동안에 측정하였 음으로 태양 움직임, 기상의 영향은 작다. Figure 4.20은 1분에 1개의 태양광 발전 출력곡선을 나타낸 것이다. Figure 4.20에서 보듯이 데이터 수가 너무 많 아 분석이 어렵다. Figure 4.21은 Figure 4.20의 각 파형을 10분 단위로 평균 화한 것이다.

태양전지는 같은 방향을 보고 있지만 태양전지의 온도 분포 차이 등으로 인 하여 태양전지 곡선이 선형적으로 나타나지 않고 매우 불균형 한 것을 알 수 있다. Figure 4.21에서 검은 점은 각 그래프의 최대전력지점을 나타낸 것이다. 전체에서 최대전력지점이 시비율 45~70 % 사이에 위치하는 것을 알 수 있다. 출력 15 W이하에서는 일정한 패턴 없고, 최대전력지점과 일반 지점의 출력 값의 차이는 1~2 W 밖에 나지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 탐색 범위를 45~65 % 범위로 선정한다. 또한 태양전지의 출력 분포 결과와 측정시간을 고 려하였을 때 5 % 간격으로 측정하는 것이 적합할 것으로 생각된다.





Figure 4.21 MPP & measuring range (Black point : MPP, Red box: measuring range)



4.2.2. 파력 발전

파력 발전시스템은 어떤 해양시설물에 설치되는가에 따라 출력특성이 크게 변화한다. 앞서 2장에서 언급하였듯이 고정식과 부유식의 특성이 전혀 다르며 출력에서도 형상에 의한 영향이 크다. 특히 부유식의 경우에는 내부 파고의 움 직임과 외부 파고의 움직임 등 공진에 대한 설계 내용이 포함되어야 하므로 그 설계가 매우 복잡하다. 또한 설계를 하더라도 그 수치적 값이 맞지 않기 때문 에 실험을 통하여 이를 보정한다. 그러므로 2장의 수치적 값들은 대부분 실험 계수로 이루어진다. 구조 형상 설계의 주요 내용은 내부수주의 움직임을 극대 화하는 것이 목적이고 주기는 외부 파고의 주기와 같은 주기가 되면서 위상 지 연을 통한 공진을 하도록 설계한다. 진동수주는 제작되면 운용에서는 그 특성 을 제어할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 파력 발전의 유체 형상 및 구조적 인 특징 보다는 터빈 및 발전기의 전력생산에 초점을 맞추어 시뮬레이션 하였 다. 발전기의 출력은 수학적으로 해석이 가능하다. 그러나 터빈은 유체 흐름에 따른 출력특성과 터빈 자체에 대한 효율 문제로 인하여 그 특성을 수치적으로 해석하여 시뮬레이션 하는 것은 어렵다. 시뮬레이션을 하더라도 발전량의 추이 는 알 수 있으나 정확한 발전량의 예측은 어렵다[8-9,11].



Figure 4.22 Structure of Wave simulator



본 논문에서는 파력 발전 실험을 위하여 발전시스템을 제작하고, 가상의 파 력 발전시뮬레이터를 구축하여 파력 발전 특성을 확인하였다. 실험에서 사용하 는 웰스터빈은 현재 가장 많이 사용되고 있는 NACA0020의 터빈 형상을 기반 으로 하여 발전기를 설계하고, 파력 발전기는 출력전압 12V 100W를 기준으 로 하여 제작한다[8,11]. 파력 발전 설비의 실험을 위하여 Figure 4.22와 같이 파력 발전시뮬레이터를 구성하였다.



Figure 4.23 Simulator result of wave power system changed wave frequency(wave height : 800 mm)

Figure 4.23은 파력 발전 시뮬레이터에서 800 mm의 파고 주기에 따른 출력 특성을 나타낸 것이다. 파고가 고정된 상황에서 주기가 빨라질수록 더 높은 출 력이 나오는 것을 알 수 있다. 실험에서 발전전력을 축전지에 직접 충전하는 방식을 사용하였다. 진동 수주에 일정 파고를 넣기 시작하여 빠르면 30 초 느 리면 약 150초 정도 지나면서부터 발전이 이루어지며, 발전 출력이 맥동하는 것을 알 수 있다. 이러한 출력의 맥동은 발전 터빈에 흐르는 유체흐름(속도)이 변화하기 때문이다. 출력이 맥동하더라도 일정 시간동안 평균화하면 평균 전력 을 구할 수 있다.





Figure 4.24 Output voltage and power of wave power system (wave period : 6.9 s)

Figure 4.24는 실제 주기 6.9 초에서 파력 발전기 전압과 출력 관계를 나타 낸 것이다. 출력전압은 먼저 상승하지만 발전은 되지 못한다. 출력전압이 축전 지 전압 이상으로 될 때에만 실제 발전이 이루어진다. 파랑의 변화가 빠르게 발생하게 되면 축전지와 직결한 전력시스템은 발전이 불가능 할 것이다. 낮은 파고에서도 발전이 가능하도록 전력제어기로 출력전압을 승압하여야 한다.

전력제어기와 다이오드로 직접 연결한 제어시스템을 파력 발전 시뮬레이터에 서 비교 실험하였다. Figure 4.22에 측정 시스템 부분에 전력제어기를 설계한 내용을 실제 제작하여 실험을 수행하였다. Figure 4.25는 실험결과를 나타낸 것이다. Figure 4.25는 시간에 따른 파력 발전기의 출력특성을 나타낸 것으로 파고가 일정 이상으로 높고 주기가 빠른 경우 직결방식과 전력제어기로 제어하 는 형태를 비교하였다. Figure 4.25의(a)에서 높은 파고의 경우에도 직결방식 에 비하여 전력제어기를 적용한 형태가 출력이 높게 나왔다. 또한 Figure 4.25 의 (b)에서 보는 것과 같이 파고가 낮고, 출력전압이 낮은 경우에 전력제어기 를 이용하면 더 빠르게 발전이 이루어진다. 발전기의 출력전압이 낮더라도 전 력제어기로 승압하여 축전지에 충전할 수 있다. Figure 4.26의 결과는 출력이 안정된 상황에서의 출력전력을 비교한 것이다. 출력에서 낮은 파고, 낮은 주파 수에서 큰 차이를 갖는 것을 알 수 있다.





(b) Wave height 600mm, wave frequency 0.95 Hz Figure 4.25 Comparison of the generation time and output power









5. 실험 및 고찰

5.1. 실험 환경

해양시설물에 적용되는 복합 발전시스템을 실험하기 위하여 본 논문에서는 해상용 등부표에 제어시스템을 적용하였다. 해양시설물 중에 가장 많은 진동과 흔들림을 받는 물체인 등부표는 일점 계류 방식으로 인하여 표체가 지속적으로 회전한다. 등부표에서 제어시스템이 안정적으로 운전이 가능하면 선박, 해양 플랜트, 해양 기지 등에서도 적용이 가능하다. 대형 해상 플렌트나 소형 선박, 주거 시설 등에서도 공간적 문제로 인하여 태양전지를 다른 각도로 설치한다. 등부표는 전체의 공간이 협소하기 때문에 일반적으로 등부표에 많이 사용되는 80W급의 태양전지 두 장 이상을 설치하기 어렵고, 두 장이 설치되는 경우에도 등부표 회전등으로 인하여 서로 다른 각도로 설치된다. 또한 등부표가 다른 해 양시설물에 비하여 파도에 의한 좌우 진동이 심하기 때문에 다른 해양시설물 보다 가혹한 발전환경 조건을 지닌다. 실험용 등부표에 사용된 파력 발전시스 템은 진동수주형 방식으로 최대출력전력 100 W로 설계 및 제작하였다.

본 논문에서 태양광 발전시스템의 경우 제안하는 최대전력추적탐색 제어알고 리즘의 효과를 알아보기 위하여 두 개의 등부표에 최대전력추적 제어알고리즘 과 최대전력추적탐색 제어알고리즘을 적용한 제어기를 각각의 등부표에 설치하 고 해상실험을 하였다. 또한 제안하는 파력 발전전력제어기의 동작을 확인하기 위하여 파력 발전기를 축전지와 직결한 방식과 전력제어기를 이용한 방식을 실 제 실험으로 비교하였다. 또한 두 개의 개별 전원이 원활히 복합 발전되는지, 두 발전원의 출력이 실제 상황에서 충전제어에 문제가 없는지, 제안하는 제어 알고리즘의 효과 등을 알아보기 위하여 해상실험을 수행하였다. 실험에서 각각 의 등부표는 모두 같은 해상에 설치하여 실험하였다. 태양광 발전시스템의 실 험은 2009년도에 수행한 내용이고, 파력 및 복합 발전시스템의 실험은 2011년 도에 수행한 내용이다. 각각에서 사용된 복합 발전 전력제어기기, 데이터 취득 시스템 및 등부표의 기본 사양 등은 모두 동일하다. Table 5.1은 실험용 등부 표의 기본 사양을 나타낸 것이다.



Item	Dimension
Outer radius of the buoy	2.6 m
Length of buoy	10.89 m
Buoy mass	7,200 kg
Internal radius of WEC	6.4 m
Water length of internal water column	1.4 m



Table 5.1 Specification of experiment buoy





Figure 5.1은 실험용 등부표 구성을 나타낸 것이다. 상부 태양전지가 서로 다른 방향으로 설치되어 있으며, 표체 중앙 부분에 진동수주형 파력 발전기가 설치되어 있다.

Figure 5.2는 태양광 전력제어기와 복합 발전 전력제어기를 나타낸 것이다. 전력소자들은 상자 내부에 부착하여 상자를 방열판으로 사용 할 수 있도록 하 였다. 내부 제어기와 외부기기 연결은 방수 컨넥터를 통하여 연결된다. Figure 5.3은 실험을 위한 통신 구조를 나타낸 것이다.



Figure 5.2 Photograph of hybrid power system & PV power system

해상에서 복합 발전 전력제어기의 전압, 전류 계측 값을 무선 통신을 통하여 육상 무선 통신 중계기로 전송하고, 무선 중계기에서 TCP/IP통신으로 변환하여 데이터 수집 컴퓨터에서 계측 값을 저장한다. 전체 실험용 등부표의 계측 및 관측 주기는 1분으로 하여 실험하였다. 2009년도의 해상실험에서는 태양광 발 전시스템을 비교 실험하고, 2011년도에는 파력 및 복합 발전시스템에 대한 실 험을 수행하였다





Figure 5.3 Communication system for experiment on the sea





5.2. 실험 결과

5.2.1. 태양광 발전

Collection

본 논문에서 제안하는 태양광 전력제어기의 효과를 알아보기 위하여 두 개의 등부표 각각에 최대전력추적 제어알고리즘과 최대전력추적탐색 제어알고리즘을 적용한 제어기를 탑재하였다. 두 제어기의 전력제어기 및 태양전지, 축전지등 의 하드웨어 구성은 동일하게 하였다. Figure 5.4는 맑은 날의 해상실험 결과 이고, Figure 5.5는 흐린 날의 실험결과를 나타낸 것이다. 실험 결과에서 맑은 날의 경우 최대전력추적 제어알고리즘에 비하여 최대전력추적탐색 제어알고리 즘이 최대 약 18%정도 출력전력이증가한 것을 알 수 있다. 또한 흐린 날에는 두 제어알고리즘의 출력차이가 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 육상 실험 결과와 같이 15 W 이하의 출력에서는 두 제어알고리즘의 차이가 거의 없 는 것을 알 수 있다.



Figure 5.4 Experiment results by pv power controller on sunny day





Figure 5.5 Experiment results by pv power controller on cloudy day

5.2.2. 파력 발전

파력 발전시스템의 실험 결과를 비교하기 위하여 하나의 등부표는 파력 발전 기와 축전지를 직결하고 다른 등부표는 파력 발전기와 축전지 사이에 파력 발 전 전력제어기를 설치하였다. Figure 5.6는 낮은 파고에서의 출력전력량이고 Figure 5.7은 높은 파고에서의 출력전력량이다. Figure 5.6에서 축전지와 직결 했을 때의 평균 전력량은 152.68 Wh 이고, 파력 발전 전력제어기를 연결하였을 경우에는 162.12 Wh 이다. 또한 Figure 5.7의 높은 파고에서는 축전지와 직결 하였을 때는 574.56 Wh 이고, 파력 발전 전력제어기를 연결하였을 때는 574.8 Wh 였다. 실험 결과에서 낮은 파고에서는 약 5.8 % 정도(평균 9.44 Wh)의 출 력이 향상되었으며, 높은 파고에서는 파력 발전 전력제어기에 의한 차이가 거 의 없는 것을 확인하였다.





Figure 5.6 Experiment results by wave power controller on small wave height







5.2.3. 복합 발전

복합 발전의 실험 결과를 알아보기 위하여 각 전력제어기의 출력전압, 전류, 부하로 소비되는 전력량, 축전지의 충전전류, 전압 등을 측정하였다. Figure 5.8은 태양광 발전 제어기의 출력전압, 파력발전 제어기의 출력전압, 주 축전 지 전압을 나타낸 것이다. 각 발전원의 전압이 축전지 전압보다 높은 전압으로 발전되어야 충전이 가능하다. 태양광 발전은 낮 시간동안에 발전이 가능하며, 파력 발전은 파도가 있는 동안에는 항상 발전이 가능하다. 태양광과 파력 발전 이 동시에 발전되는 시점에서, 태양광과 파력 발전시스템의 출력전압은 거의 비슷한 전압이 된다. 각 발전원의 전압은 축전지와 약 0.7 V의 차이를 갖는 것 을 알 수 있다. 이것은 다이오드에 의한 전압강하이다. 충전중일 때 축전지 전 압은 충전되는 발전원에 따라 변동되는 것을 알 수 있다.



Figure 5.8 Voltage by wave, PV, main battery at the sea



Figure 5.9는 태양광과 파력 발전시스템의 출력전력을 나타낸 것이다. 각각 의 출력전력은 태양광과 파력 발전 전력제어기의 출력단에서 측정한 것이다. Figure 5.9에서 태양광과 파력 발전의 출력전력이 동시에 이루어지며, 하나의 축전지에 복합하여 충전되는 것을 알 수 있다. 파력 발전의 경우 Figure 5.8에 비하여 더 크게 변화하는 것을 볼 수 있는데 이것은 충전이 이루어지기 시작하 는 시점에서 파력 발전 전력제어기의 출력전압은 축전지 전압에 영향을 받아 일정 전압으로 고정되기 때문에 Figure 5.8의 파력 발전 변동폭은 작게 나타난 것이다.



Figure 5.9 Output power by wave, PV at the sea

Figure 5.10은 축전지의 전압변화를 나타낸 것이다. 주 축전지(12 V 200 AH) 와 보조 축전지(12 V 65 AH)로 축전지용량을 다르게 하였다. 분리형 축전지 구 조로 두 개의 축전지를 제어하였다. 평균축전지 전압은 주 축전지와 보조 축전 지의 용량을 고려하여 축전지 전압을 계산한 것이다.





Figure 5.11 Daily generation power by the hybrid system



축전지 전압 변화량을 알아보기 위하여 축전지 전압의 표준 편차를 계산하였 다. 주 축전지는 평균 전압 12.91 V, 표준 편차 0.46, 보조 축전지는 평균 전 압 13.16 V, 표준 편차 0.59이다. 주 축전지와 보조 축전지를 평균한 축전지 전압의 평균은 12.99 V, 표준 편차는 0.48이다. 보조 축전지의 전압변동을 크 게 하는 대신 주 축전지 편차를 작게 할 수 있었다. 축전지 전압 표준 편차가 작을수록 축전지 전압 변화가 작은 것이 되며, 축전지 수명을 연장할 수 있을 것이다. 그러므로 Figure 5.10의 결과에 따라 보조 축전지수명은 단축되나, 주 축전지 수명은 연장될 것이다.

Figure 5.11은 복합 발전시스템의 일일 평균발전 전력량을 나타낸 것이다. 전력량은 누적전력량으로 1시간당 평균발전량을 구하여 하루 동안 누적하여 계 산하였다. 실험은 해상에서 약 1개월간 진행하였다. Figure 5.11에서 태양광 발전출력과 파력 발전출력은 상호 보완적으로 발전되는 것을 알 수 있다. 맑은 날은 태양광 발전시스템이, 흐리고 비오는 파도가 높은 경우에는 파력 발전시 스템이 더 많은 전력을 발전하였다. 태양광 발전시스템의 일일 평균발전량은 245.45 Wh 이고, 파력 발전시스템은 233.06 Wh 이다.





5.3. 복합 발전시스템 고찰

복합 발전시스템의 설계에서 가장 중요한 것은 축전지 용량을 산정하는 것이 다. 신재생에너지 발전은 언제 많이 이루어지는지 예측하는 것은 어렵다. 실제 해상에서 환경 실험을 하지 않는 이상 출력량을 예측하는 것은 매우 어렵다. 본 논문에서는 1개월간의 파력 및 태양광 발전량을 취득하여 각 시간의 분당으 로 평균화 하였다.

Figure 5.12는 태양광 및 파력 발전의 각 시간의 평균 발전 전력량이다. 여 기에 분당 부하 소비량을 예측할 수 있다면 축전지가 감당해야 하는 총 전력량 을 구할 수 있다. 발전 전력량, 부하 소비량, 발전량과 소비 전력량 등으로 축 전지 소비 전력량과 소비 시간을 산출한다면 축전지 용량 선정을 할 수 있다.



Figure 5.12 Average power graph of PV & Wave generation power



하루 동안 10 W의 전구를 켜 놓았다면 일일 전력 소비량은 240 Wh가 될 것이다. Figure 5.12에서 축전지가 감당해야 하는 전력량은 태양광만 있는 경 우 약 133 Wh 이고, 파력만 있을 경우 약 25 Wh 이다. 발전 전력량과 부하 소 비량의 시간이 같을수록 축전지가 감당해야할 전력량은 줄어들게 된다.

Figure 5.11에서 알 수 있듯이 태양광과 파력 발전은 일별 전력발전량에서 서로 상호 보완적인 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 그러므로 두 개의 발전시스 템을 동시에 설치하는 것이 전력생산의 안정성을 증대할 수 있다. 그러나 Figure 5.12에서 보듯이 파력 발전은 어느 시점에나 발전이 가능하여 일정한 부하가 있는 경우라면 태양광에 비하여 파력 발전을 사용하는 것이 축전지 용 량을 줄일 수 있다.





6. 결론

본 연구에서는 태양광과 파력 발전 전력을 복합하여 축전지에 충전할 수 있 는 복합 전력시스템을 제안하였다. 일반적으로 많이 사용되는 태양광 발전시스 템은 해양 환경과 태양전지 설치 구조에 의하여 최대전력을 생산하지 못하게 된다. 또한 파력 발전시스템은 터빈이 저속으로 구동할 경우 발전이 이루어지 지 못하는 문제를 갖는다. 본 논문에서는 최대전력추적탐색 제어 알고리즘을 적용하여 태양광 발전시스템에 해양환경 특성을 반영하였다. 그리고 부스터 컨 버터 기반의 전력제어기 개발을 통해 파력 발전시스템이 저속에서도 발전이 가 능하도록 하였다. 또한 분리형 축전지 구조를 적용하여, 복합 발전시스템의 축 전지 전원을 효과적으로 관리할 수 있었다.

태양광과 파력 발전시스템을 컴퓨터 시뮬레이션 또는 시뮬레이터를 통하여 실험을 수행하였다. 태양광 발전시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어알고리즘에 탐색범위를 선정하고, 이를 통하여 최대전력추적탐색 제어알고 리즘의 동작성능을 향상시켰다. 제안하는 파력 발전시스템을 시뮬레이터에서 실험을 통하여 낮은 파고에서 기존에 비하여 더 빠르게 발전이 이루어지고, 동 일한 실험조건에서 출력이 증가하는 것을 확인하였다. 제안하는 각각의 시스템 을 실험을 통하여 제어 알고리즘의 동작 및 성능을 확인하고, 이를 검증하기 위하여 해상실험을 수행했다.

해상실험결과 태양광 발전시스템의 경우 기존 제어시스템에 비하여 최대 18 % 의 출력전력이 증가하였고, 파력 발전시스템은 낮은 파고에서 직결하는 경우 에 비하여 약 5%의 출력이 증가하였다. 또한 각각 시스템의 발전량을 복합하 여 축전지에 충전하고, 태양광과 파력 발전 전력제어기가 축전지 전압에 맞추 어 출력전압을 제어하는 것을 확인하였다. 분리형 축전지 구조는 주 축전지 전 압 변화를 작게 할 수 있었다. 1개월간의 실험을 통하여 태양광과 파력 발전시 스템의 출력전력이 상호 보완적인 발전특성을 갖는 것을 확인하였고, 해상실험 을 통하여 전체 시스템이 운용 안정성을 갖는 것을 알 수 있었다. 출력전력량 을 분석한 결과 파력 발전시스템은 안정적인 전력생산을 보였지만 태양광발전 시스템의 경우 낮 시간에만 집중되는 전력생산량을 나타내었다.



실제 해상에서의 태양광, 파력 발전실험의 결과의 분석 내용으로 해상에서의 태양광, 파력 발전의 출력 전력량을 예측할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 부 하시스템의 시간에 따른 소비 부하 전력량을 알 수 있다면 에너지 저장 장치, 해양시설물에 적용되는 신재생에너지 발전시스템의 용량 등을 설계할 수 있을 것이다.





참고 문헌

- 1. 한국에너지기술평가원 "그린에너지 전략 로드맵 2011"
- 2. 이광식, 고희석, 곽희로, 김인식, 송현직, "에너지 공학의 기초"
- 국토해양부, "해양시설물용 hybrid 전력생산시스템 기술 개발", 한국해양과 학기술진흥원, 2012.
- 4. Muhammad H. Rashid, "Power electronics, circuit, devices, and applications"
- 5. 유권종, 김기현, 정영석, 김영석, "MPPT제어 알고리즘 고찰 및 효율 시험 평가법", 전력전자학회지 제 6권 2호, pp.164-172, 2001
- 6. 유권종, 정영석, 최주엽, "새로운 고효율 MPPT제어 알고리즘 고찰", 한국 태양에너지학회 논문집, 제 22권 3호, pp.11~20, 2002
- Kwan-Jun Jo, Hee-Han Yoo, Seung-Gi Gug and Jin-Seok Oh, "Design and analysis of power system for buoy", Journal of korean navigation and port research, vol. 31, no. 3, pp.229~233, 2007
- 한국전력공사, "해양에너지 이용 파력 발전 (60kW) 장치 개발", 한국전력 기술연구원 최종 연구보고서, 2001
- 9. Jin-Seok Oh, "Research of DC-DC converter for ocean buoy", Journal of korean navigation and port research, vol. 31, no. 10, pp 839-844, 2007
- 10. K. Kaneko, Setogichi, T., and Raghunathan, S. "Self-rectifying turbine for wave energy conversion", International journal of offshore and polar engineering, vol. 2, no. 3, 1992
- 11. 현범수, 서정천, 이판묵, "파력 발전용 웰즈터어빈의 유체역학적 성능연 구", 대한조선학회 논문집, 제30권, 제4호, pp.23-30,1993
- K. Kenji, Manabu, T., Setogichi, T. "Air turbine with cambered blades for wave emergy conversion: performances in steady flow condition" Proc. international offshore and polar engineering conference, vol. 1, pp.77~82, 1997



- M. Inoue, Kaneko, K., Setoguchi, T., Raghunathan, S., "Simulation of starting characteristics of wells turbine", AIAA/ASME 4th fluid mechanics, plasma dynamics and lasers conference, Atlanta, America, May, 1986
- S. Raghunathan, Setoguchi, T., and Kaneko, K. "Aerodynamics of monoplane wells turbine - a review.", Proc. International offshore and polar engineering conference, UK, pp.11~16, 1991
- 15. 강기환, 정영석, 유권종, 정명웅, 송진수, "태양광, 풍력 복합 발전 시스템
 의 기상조건에 따른 발전특성", 1999년도 대한전기학회 하계 학술대회, pp.2581~2583, 1999
- 16. 이승철, 문우철, 권병국, 김종환, "태양광-풍력 복합 발전시스템의 경제적 운용을 위한 최적 용량산정에 관한 연구", 한국 조명설비학회 제 18권 3호 2004
- 17. W.D Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan and V Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic and hybrid wind/pv systems", IEEE transactions on energy conversation vol 13, no 1, 1998
- Kaoru, F. and Yutaka, N "Performance evaluation of photovoltaic power-generation system equipped with a cooling device utilizing siphonage", journal of the american society of mechanical engineers, vol 128, pp.146~151, 2006
- 19. 정영석, 유권종, 강기완, 송진수, 김홍정,"태양광 풍력 복합 발전용 PCS 시스템 제어 특성 분석",전력전자학회지 제 5권 1호, pp.19~25, 2000.2
- 20. Bin Wu, "High power converters and ac driver"
- Eckhard Karden, "Using low-frequency impedance spectroscopy for characterization, monitoring, and modeling of industrial batteries", Doctoral thesis at RWTH aachen university (ISEA), Shaker verlag, 2002
- 22. D. Feder, T. Croda, K. Champlin, M. Hlavac, "Field and laboratory studies to assess he state of health of valve regulated lead acid batteries", Proceeding of 14th international telecommunications energy



conference, pp.218~233, 1992

- Hongxing Yang, Wei Zhou, Kin Lu, Zhaohong Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm", Science direct, Solar energy 82, pp.354~367, 2008
- 24. M. Hlavac, D. Feder, "VRLA battery conductance monitoring", proceeding of 18th international telecommunications energy conference, pp.632-639, 1996
- 25. 박근현, 임종환 박의장, 김병기, 강철웅, "풍력, 태양광, 조류복합 발전 시 스템의 최적 용량 및 축전지 용량 설계", 한국정밀공학회 2010년도 추계학 술대회 논문집, pp.299-300, 2010
- 26. 김종환, 이승철, 권병국, 오해진, "태양광, 풍력 복합 발전시스템의 용량 산정과 경제성 분석에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술 부문 추계학술대 회, pp.348-350, 2003
- 27. 최병수, 김재철," 독립형 태양광 풍력 복합 발전 시스템에서 안정적인 전 력공급을 위한 축전지 용량의 최적 산정에 관한 연구", 한국 조명설비학회 제 25권 9호, pp.26-32, 2011
- 28. 이경수, 정영석, 소정훈, 유권종, 최재호, "태양광 시스템에서의 새로운 MPPT 알고리즘 제안"전력전자학회지, 제 10권 1호, pp.21~28, 2004
- 29. 최정식, 고재섭, 정동화, "태양광발전 시스템의 추적식 및 MPPT제어기 개 발", 한국 조명 설비학회 제21권 8호 , pp.54~63, 2007
- 30. 권병국, 이승철, 박찬영, "태양광-풍력 복합발전시스템의 최적구성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1306~1308, 2002
- Michael E. McCormick, "Analysis of a wave energy conversion bouy",
 J. Hydronautics, vol 8, pp.77~82, 1974
- 32. Ajit Thakker, Zia Usmani, T.S. Dhanasekaran, "Effects of turbine damping on performance of an impulse turbine for wave energy conversion under different sea conditions using numerical simulation techniques." Renewable energy 29, pp.2133~2151, 2004.



<감사의 글>

해양대학교에서 학부, 석사, 병역특례, 박사 등을 거치면서 벌써 10년 이상 을 살아온 것 같습니다. 학부를 시작할 때에는 이렇게 긴 시간 공부를 하고 있 을 것이라고 생각하지 못했습니다. 학부를 졸업했을 때, 호기심과 무엇인가를 이루기 위하여 석사과정 진학했습니다. 석사과정을 마치면서 내가 오른 산이 작은 언덕이었고 저 멀리 보이는 큰 산을 보며 오르고 싶다는 생각으로 학위 과정을 마무리 하였습니다. 2년의 석사과정이 너무도 짧고 아직도 채우지 못한 무엇인가가 있다는 생각이 마음속을 떠나지 않은 것 같습니다. 특히 병역특례 를 수중 운동체 특화연구센터에서 하면서 박사를 향한 많은 생각을 하고, 연구 자의 길로 들어서서 무엇인가 완성해보고 싶다는 생각으로 박사과정을 시작하 였습니다. 박사과정에서 많은 프로젝트도 해보고 큰 프로젝트를 맡아서 진행을 해보면서 경험과 안목의 부족을 느낀 것 같습니다. 다른 누군가와의 경쟁이 아 닌 저 자신과의 경쟁이 어려운 것임을 다시 생각하게 되었습니다. 학위 과정 중 많은 어려움이 있었지만 "생각하면 할 수 있고, 할 수 있으면 이룰 수 있 다."는 생각이 저에게 있었던 것 같습니다. 저 자신과의 싸움을 묵묵히 지켜봐 주시고 항상 끝까지 최선을 다하라는 부모님의 말씀이 오늘의 성과를 이룰 수 있는 원동력 같습니다.

학부과정부터 저를 지도해주신 오진석 교수님에게 감사드립니다. 부족한 논 문을 정성껏 심사하시고, 토의해 주신 소명옥 교수님, 유희한 교수님, 윤병우 교수님, 정병건 교수님에게 감사드립니다. 심사 교수님들의 질책과 관심이 없 었다면 현재의 논문은 만들어지지 못했을 것 같습니다. 부족한 저의 논문에 많 은 관심을 가져주신 것에 대하여 감사드립니다. 또한 지난 공부의 과정동안 지 도해 주신 김성환 교수님, 이상태 교수님, 오세준 교수님에게도 감사드립니다.

긴 시간동안 같이 연구를 하며 이제는 졸업하신 곽준호 선배님, 김연형 선배 님, 이종호 선배님에게 감사드립니다. 여러분의 배려와 관심이 지금 이 자리의 저를 만들어 주신 것이 아닌가 생각됩니다. 프로젝트와 연구실 생활을 하면서 고생한 배수영, 정성영, 김지윤, 한성훈, 박도영, 강훈, 이헌석 등에게 그동안의 어려움에 대한 감사를 드리고 싶습니다. 또한 장기간의 프로젝트에서 연구 성



과를 위하여 해상 실험의 어려움을 극복해준 여러 후배들에게 감사의 말을 드 리고 싶습니다. 아울러 졸업 이후에도 저에게 관심을 가져주시는 박재현 선배 님, 진선호 선배님, 유병랑 선배님, 이지영 선배님, 박용주 선배님에게 감사드 립니다. 또한 학위 과정에서 외부 대학원생으로써 조언과 관심을 가져주셨던 함연재 사장님, 양향권 사장님, 유대완 님, 류승현 님, 이창노 님에게 감사의 인사를 드립니다. 그 외에도 일일이 거명하지 못하는 많은 선후배님들에게 감 사의 인사를 드립니다.

오늘의 박사과정은 해양시설물용 Hybrid 전력생산시스템 개발이라는 국토해 양부의 과제가 없었다면 이룰 수 없었을 것입니다. 이 자리를 빌어서 과제를 지원해주신 국토해양부와 해양과학기술진흥원의 여러분들에게 감사의 인사를 드립니다. 과제를 성공적으로 끝내고 학위과정도 잘 마칠게 된 점 모두 여러분 들의 보이지 않는 도움이라고 생각합니다. 또한 과제의 진행 기간 동안 공동연 구를 같이한 항로표지기술협회와 안세기술연구소, 중소조선연구소의 여러 연구 원들에게 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 오늘에 있기까지 항상 지켜봐 주신 부모님에게 고마움을 전하며, 저의 작은 배움의 뜻을 큰 결실이 되도록 도와주신 오진석 교수님에게 다시한 번 깊은 감사의 마음을 올립니다. 그리고 박사학위 기간 동안 기다려준 사랑하 는 민경이에게 항상 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다.

2012.07.03.

The for them

