



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

신재생 하이브리드 발전시스템의  
최적 용량 설계에 관한 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스공학과

朴 根 賢

2010年 12月

# 신재생 하이브리드 발전시스템의 최적 용량 설계에 관한 연구

指導教授 康 喆 雄

朴 根 賢

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010年 12月

朴根賢의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審 查 委 員 長 \_\_\_\_\_ (인)

委 員 \_\_\_\_\_ (인)

委 員 \_\_\_\_\_ (인)

濟州大學校 大學院

2010年 12月

A Study on Optimal Sizing of New and Renewable  
Hybrid Generation System

Kun-Hyun Park  
(Supervised by professor Chul-Ung Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2010年 12月

# 목 차

제 1 장 서론 .....	3
1.1 신재생에너지의 필요성 .....	3
1.2 하이브리드발전의 필요성 .....	4
1.3 최적용량설계 필요성 및 중요성 .....	4
1.4 관련 기존연구내용 .....	5
1.5 본 연구 내용 .....	6
제 2 장 하이브리드 발전 시스템 최적용량설계 .....	7
제 1 절 발전시스템 개요 .....	7
1.1 풍력발전시스템 .....	7
1.2 태양광발전시스템 .....	15
제 2 절 단위 발전시스템 출력 모델링 .....	28
2.1 풍력발전출력 모델링 .....	28
2.2 태양광 발전 출력 모델링 .....	30
2.3 축전시스템 모델링 .....	32
제 3 절 최적 용량설계 모델 .....	33
3.1 전력부족률 기반 최적설계 모델 .....	33
3.2 경제성 모델 .....	37
3.2.1 LCE 기반 경제성 모델 .....	37
3.2.2 발전 단가 기반 경제성 모델 .....	38
제 3 장 결과 및 고찰 .....	40
제 1 절 시뮬레이션 결과 .....	40
1.1 풍력-태양광 하이브리드 발전결과 .....	43
제 2 절 실험결과 .....	44
2.1 데이터 실측 .....	44
2.2 실험장치 구성 .....	45
2.3 실험결과 .....	50

제 4 장 결론 .....54  
참고문헌 ..... 55



## List of Figures

Fig1. A type of vertical wind generator-----	8
Fig2. A horizontal axis wind generator-----	9
Fig3. Wind flow and the oil pipe-----	10
Fig4. Loss of wind generator-----	11
Fig5. Base element and efficiency of wind generator system-----	13
Fig6. Principles of the photovoltaic system-----	17
Fig7. Independent power system of the PV-----	23
Fig8. Flow chart of optimum design-----	42
Fig9. Results of ptimum design (wind 3W, load 2W)-----	43
Fig10. Wind data-----	44
Fig11. Irradiance data-----	45
Fig12. Small wind generator-----	46
Fig13. Size of wind generator-----	46
Fig14. Power of wind generator-----	47
Fig15. wind generation simulator-----	48
Fig16. Power of wind generator(experiment)-----	48
Fig17. Power efficiency graph of Photovoltaic-----	49
Fig18. Results of wind power-----	50
Fig19. Results of PV-----	51
Fig20. Results of total power-----	51
Fig21. Differences between the load and total generating powe-----	52
Fig22. The condititon of battery charging-----	53

## Abstract

With the increasing use of fossil fuels, the problem of global warming is intensifying all over the world. One of its main hazards is the destruction of the Eco-system. One way to solve this problem is the use of Natural Renewable Energy resources instead of hydrocarbon fuels. Therefore the upcoming energy environment on domestic and foreign horizon expects new challenges and variety.

Since solar, wind and tidal energies mainly depend upon statistical parameters with respect to changing climate and environment, focus on hybrid system design increases the availability of the power generation system. It also reduces the dependence on one environment parameter thus providing the consumer with reliable and cheap electricity. Therefore optimal capacity design of hybrid generation system considering the battery has a very important role in the use of renewable energy effectively and economically.

Hybrid generation system basically consists of merging system of two or more different types of generation systems. Hybrid Generation System is more effective than utilization of single renewable energy source. Several approaches were developed to achieve the optimal configurations of the hybrid systems such as the least square method, the trade-off method and the probabilistic approach method.

In this study, we present a methodology to perform the optimal sizing of a new and renewable hybrid generation system. The methodology aims at finding the configuration, among a set of system components, that meets the desired system requirements, with the lowest value of the energy cost. The availability of the methodology is demonstrated with the field data acquired from sets of experiments



# 제 1 장 서론

## 1.1 신재생에너지의 필요성

21세기를 살아가는 인류에게 가장 중요한 문제는 어떻게 깨끗하고 공해 없는 지구환경을 후세에게 물려주는가 하는 것이다. 인류가 살아가기 위해서는 에너지원이 필요하다. 그러나 현재까지 우리는 불행하게도 공해와 환경파괴를 유발시키는 화석연료를 주 에너지원으로 사용하고 있다. 앞으로 전개될 국내외 에너지환경은 새로운 도전과 변화를 예고하고 있다. 전 세계적으로 화석연료의 사용량의 급증으로 발생한 지구 온난화로 인해 전 세계적으로 이상기후의 발생빈도가 증가하고 이로 인해 생태계가 급속히 파괴되고 있기 때문이다. 또한 기후변화협약 및 교토의정서 등 세계적으로 추진되고 있는 환경규제와 관련된 규약은 제품생산에 있어서 온실가스 배출량을 최소화하도록 유도하고 있어 에너지 다소비국인 우리나라로서는 국가경쟁력 향상을 위해 환경 친화적인 새로운 에너지원의 독자적인 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다[1].

배럴당 100달러를 넘나드는 드는 초고유가 시대가 도래함에 따라 청정에너지의 활용에 대한 관심이 고조되고 있으며, 1997년 온실가스 감축 효과를 제고하기 위하여 구속적인 감축목표를 내용으로 하는 기후협약 부속 서인 교토의정서를 채택하였으며, 2005년 11월 몬트리올에서 열린 기후 변화 당사국 총회에서 포스트교토 체제에 대한 논의를 시작하였다. 2002년 이라크전쟁 이후로 OPEC의 시장지배력 회복과 석유수급 불균형이 크게 증가하고, 석유가 완전히 고갈되는 시점보다 세계 석유생산이 수요를 충족시키지 못하는 석유 peak시기가 2037년 경으로 예상되고 있어, 앞으로의 석유부족은 일시적인 현상이 아니라 구조적 현상으로 심화될 것으로 예상됨에 따라, 세계 각국은 이에 대비한 중장기전력을 수립하였다.

이런 심각한 에너지 고갈 문제를 해결하기 위해 태양, 지열, 풍력, 바이오매스 등 다양한 대체에너지에 관한 연구가 수행되고 있다[3]. 이러한 에너지는 지구의 온난화 해소 및 환경 보전에 공헌하고 있으므로 그 중요성이 인식되고 있다[4].

## 1.2 하이브리드발전의 필요성

1970년대 오일쇼크 이후 태양광과 풍력을 이용하는 분야가 아주 중요해 지고 관심이 급증하게 되었다[7].

최근에는 환경보존을 하면서 전력을 동시에 생산한다는 요구조건에 가장 잘 충족하는 대안으로서 다양한 신재생에너지 복합발전시스템이 각광을 받고 있다. 이와 같이 효율성과 보편성을 고려하여 발전 가능성이 있는 신재생에너지 중 실용화에 가장 접근해 있는 분야는 풍력, 태양광/열, 그리고 조류, 조력, 파력의 해양에너지이다. 특정 지역에서의 태양 에너지와 풍력에너지, 해양에너지는 서로 보완적인 특성을 갖고 있어서 이러한 복합발전시스템은 비교적 높은 신뢰도의 전력을 공급할 수 있기 때문에 그에 대한 응용 및 연구에 더욱 많은 관심을 끌고 있다.[7]

하지만 이러한 에너지들은 무공해이며 자원이 무한하다는 장점이 있으나 지속적으로 안정된 에너지 생산이 어렵고 시간에 따라 변동이 크다는 단점도 있다. 환경오염과 에너지 자원의 유한성을 극복하기 위하여 개발되고 있는 태양광발전과 풍력발전은 기상조건에 민감한 단점을 가지고 있다[16].

전원 공급은 풍력발전, 태양광발전, 조류발전, 파력 발전을 이용하여 신재생 전기 에너지를 얻기 위한 다양한 연구 개발이 필요하다. 따라서 단일 시스템 보다는 두 가지 이상을 동시에 이용하는 복합발전시스템을 구축함으로써 지속적이고 안정적인 에너지 생산 및 공급이 가능하다. 이러한 복합발전시스템은 전원공급이 어렵고 관리 또한 지속적으로 하기 어려운 지역에 설치용으로 적합하다.

## 1.3 최적용량설계 필요성 및 중요성

태양에너지, 풍력에너지 및 해양에너지는 기본적으로 통계학적 특성을 갖고 있기 때문에 복합발전 시스템 설계에 있어서 주안점은 변하는 환경조건하에서 어떻게 소비자에게 신뢰성 있는 전력을 공급하느냐 하는 것과 얼마나 싼 전기를 공급하느냐 하는 것이다. 이러한 관점에서 다양한 신재생 에너지를 보다 효과적

이고 경제적으로 이용하기 위해서는 배터리를 포함하는 복합발전시스템의 최적 용량설계가 가장 중요한 역할을 한다.

#### 1.4 관련 기존연구내용

하이브리드 발전시스템은 두 개 이상의 서로 다른 형태의 발전 시스템을 병합한 시스템으로 개별적인 운영 보다 신재생에너지의 활용 면에서 매우 효과적이다. 하이브리드 발전 기술로 상용화 단계에 접어든 태양광과 풍력병합 발전시스템 또한 경험적이고 직관적 방법에 의해 시스템을 설계하고 있어 자원 량에 비해 에너지 발생효율이 극히 저조한 실정이다.

하이브리드 발전시스템의 중요 요소 기술은 각 발전시스템별 발전장치, 에너지 자원의 현황에 따른 발전형태 조합 선정, 선정된 각 단위시스템의 최적 발전 용량설계, 축전시스템 종류 및 용량설계, 단위 시스템 특성에 따른 운전 및 전력 제어 및 통합시스템의 운전 및 전력제어를 위한 중앙제어시스템 설계기술, 그리고 각종 운전 및 출력상태 등을 감시하는 원격모니터링 기술 등을 들 수 있다. 이 중에서 발전장치에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며, 그 결과 또한 상당한 수준에 이르렀으나, 나머지 기술은 아직까지 체계화되지 못하여 발전용량이나 축전용량 등이 경험적이나 직관적으로 설계되고 있어 최적의 효율을 달성하지 못하고 있다. 하이브리드 발전시스템의 구체적인 문제점은 다음과 같다. 먼저 어떤 형태의 복합발전을 구축할 것인가에 관한 것이다. 즉, 설치 지역의 에너지자원 현황에 따라 어떤 종류의 하이브리드 발전시스템을 조합할 것인가에 대한 기준이 마련될 필요가 있으며 이에 따른 주 발전 및 보조 발전방식 선정, 그리고 선정된 주 발전 및 보조 발전 시스템의 개별 용량 설계가 전체 시스템의 효율 및 경제성을 결정하기 때문에 중요한 사항이다.

이와 같이 하이브리드 발전 기술은 기술적 측면은 물론 경제·산업적 측면에서도 그 중요성 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 기술을 토대로 하이브리드 발전시스템을 사업화 시킬 수 있으면 기업의 매출 증대는 물론 국가적으로도 상당한 이익을 볼 수 있는 사업 아이템이라 할 수 있다.

국내 하이브리드 발전기술 현황은 이어도해양과학기술지에 고정 Jacket Type의 태양광과 풍력발전 복합발전으로 필요한 전원을 공급하고 있으며 마라도에 독립형 태양광 발전과 풍력발전 시스템이 설치되어 필요한 에너지를 공급하고 있다. 그러나 현재까지 하이브리드 타입 독립전원 발전은 하이브리드 타입의 발전 형태에 적합한 에너지원 선정 기술, 용량설계 기술, 축전시스템 설계 기술, 제어 및 모니터링 기술 확립이 불분명한 상태이다.

## 1.5 본 연구 내용

최적의 발전형태를 조합 선정하고, 각각의 발전별 최적 용량 설계 및 축전 용량 설계 기술을 개발한다.

본 논문은 4장으로 구성되었으며, 각 장의 내용을 요약하면 다음과 같다.

제 1장에서는 연구의 필요성 및 연구 내용에 대해서 기술하였으며, 제 2장에서는 하이브리드 발전 시스템의 최적용량을 설계함에 있어 각 단위 발전 시스템의 개요와 출력 모델링에 대한 내용, 단위별 최적 용량 설계 및 축전 용량 설계에 대한 내용을 기술하였다. 또한 전력부족률 기반 최적설계 모델링 방법과 LCE 기반 경제성 모델 및 발전 단가 기반 경제성 모델에 대하여 기술하였다. 제 3장에서는 시뮬레이션 결과에 대한 내용과 실제 자원 데이터를 활용하여 실험한 결과에 대한 내용을 기술하였다.

끝으로, 제 4장에서는 본 연구를 통하여 얻어낸 결론을 정리하였다.

## 제 2 장 신재생에너지 발전시스템

### 제 1 절 발전시스템 개요

#### 2.1.1 풍력발전시스템

풍력발전은 어느 곳에나 산재되어 있는 무공해 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없고 국토를 효율적으로 이용할 수 있다. 풍력 발전 단지의 면적중에서 실제로 이용되는 면적은 풍력 발전기의 기초부, 도로, 계측 및 중앙 제어실 등으로 전체 단지 면적의 1%에 불과하며, 나머지 99%의 면적은 다른 용도로 이용될 수 있다. 풍력은 미래의 대체에너지원으로 가장 유망한 신·재생에너지자원으로 부각되고 있으며 발전 기술은 이미 실용화 단계이기 때문에 요소 기술 개발보다는 풍력 발전기의 저가화와 대형화 및 보급 확대에 치중하는 경향을 보이고 있다.

풍력발전은 공기의 유동이 가진 운동 에너지의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 전화시키고 이 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 에너지 변환 기술이다. 공기가 익형 위를 지날 때 양력과 항력이 발생하는 공기역학적 특성을 통해 회전자가 회전하게 되는데 이때 발생하는 기계적 회전 에너지가 발전기를 통해 전기 에너지로 변화되는 것이다.

##### 2.1.1.1 풍력발전의 종류

풍력발전기는 축의 형태에 따라 다리우스형, 사보니우스형 등의 수직축 풍력발전기와 프로펠러형의 수평축 풍력발전기로 구분할 수 있는데, 현재는 수평축 풍력발전기가 그 주류를 이루고 있다.

수평축 풍력발전기는 적은 용량에서부터 큰 대형 용량에 이르기 까지 골고루 만들어 지고 있고 수직축 풍력발전기는 중형급 용량 이하의 풍력발전기에서 많이 쓰이고 있다.

그림 1은 수직축 풍력발전기의 종류를 나타낸다.



Fig1. A type of vertical wind generator

수평축 풍력발전기에는 예외 없이 날개의 면이 바람이 부는 방향으로 향해 있어야 한다. 이를 가능케 하기 위해 풍력발전기의 몸통을 인위적으로 회전 (Yawing)시켜 주던가, 혹은 꼬리 날개를 이용하여 스스로 날개 면이 바람과 직 교되는 방향으로 서도록 하여야 한다. 한편 수직축 풍력발전기에는 날개가 수직 축을 중심으로 회전하므로 바람의 방향과 무관하므로 요잉(Yawing)메커니즘이 없다. 그림 2는 수평축 풍력발전시스템을 나타낸다.



Fig2. A horizontal axis wind generator

#### 2.1.1.2 풍력발전시스템의 출력

그림3과 같이 수평 면적이  $A$ 인 유체 관에 풍속이  $V$ 인 바람이 통과하고 있는 경우를 가정하자. 일반적으로 질량이  $m$ 이고 속도가  $V$ 인 물질의 운동에너지  $E_K$ 는 다음과 같다.

$$E_K = \frac{1}{2}mV^2 \quad (1)$$

출력 (power)은 단위시간당의 에너지로 정의되므로  $dt$ 시간동안 통과한 유체의 질량을  $dm$ 이라 하면 출력  $P$ 는 다음과 같이 나타내 진다.

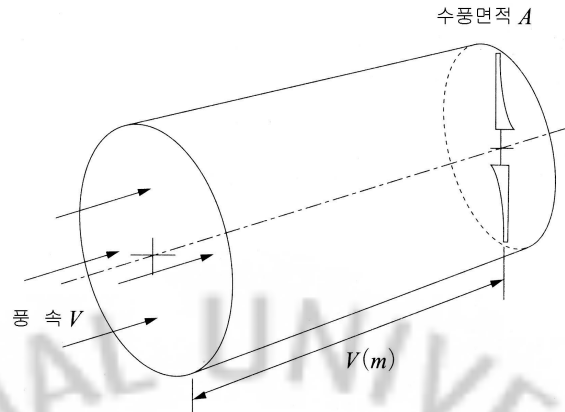


Fig3. Wind flow and the oil pipe

$$P = \frac{dE_K}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm V^2}{dt} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} V^2 \rho A V = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2)$$

여기서,  $dm/dt$ 는 유관속의 기류의 질량유량을 나타내므로  $\rho(AV)$ 로 나타낼 수 있다. 이 식은 풍력의 해석에서 가장 중요한 식으로, 바람의 에너지는 회전자 회전면적에 비례하고 풍속의 3승에 비례함을 나타낸다. 즉, 수풍면적을 2배로 하면 출력이 단지 2배 증가로 그치지만 풍속이 2배가 되면 출력은 8배가 됨을 의미한다. 따라서 보다 많은 풍력에너지를 이용하기 위해서 수풍면적을 크게 하는 것 보다는 풍속이 조금이라도 강한 곳을 선택하는 것이 중요하다.

자연풍으로부터 풍차에 의해 추출되는 출력파워의 비율을 파워 계수  $C_p$ 라 한다. 비록 바람의 총 출력파워는 식 (2)와 같지만 실제의 풍력발전시스템으로부터 얻을 수 있는 출력은 40%를 넘지 못한다. 그림 8은 바람의 에너지가 실제 전기적 에너지로 변환될 때의 각 손실을 나타낸 것이다. 바람의 에너지가 회전자의 기계역학적 회전에너지로 변환되는 과정의 공기역학적 손실이 60%정도로 대부분을 차지하며 증속기의 기계적 손실이 약 4%, 그리고 발전기의 손실이 약 6% 등 총 70%의 손실이 발생한다. 더욱이 실제 풍차는 풍향변동 및 주변지형, 조도 등에 따라 더욱 손실이 커질 수 있다.



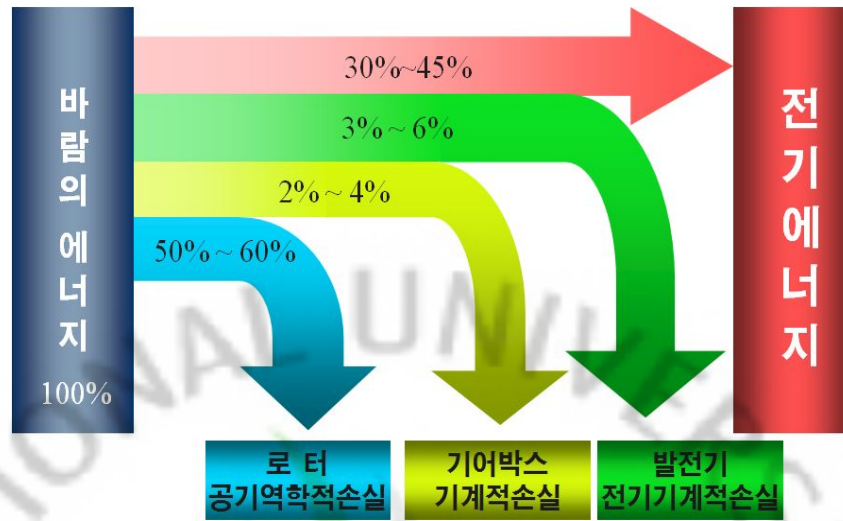


Fig4. Loss of wind generator

즉, 실제 바람에너지로부터 이용할 수 있는 출력  $P$ 는  $C_p$ 를 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3)$$

바람은 시간마다 변하며 일정한 주기도 없다. 따라서 어떤 지역의 풍황을 예측한다는 것은 쉽지 않다. 이와 같이 수시로 변하는 풍속은 통계학적으로 추정할 수 밖에 없다. 일반적으로 풍속  $v$ 가  $v_a$  이상이 될 확률은 와이블 분포에 의해 다음과 같이 계산된다[1].

$$p(v \geq v_a) = \int_{v_a}^{\infty} f(v) dv = \exp\left[-\left(\frac{v_a}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

여기서  $p$ 는 확률,  $k$ 는 형상계수 (shape parameter), 그리고  $c$ 는 척도계수

(scale parameter)이다. 여기서 형상계수는 보통 2로 추정하며 이때 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$p(v \geq v_a) = \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] \quad (5)$$

여기서  $\bar{v}$ 는 연평균 풍속이다. 또한 같은 조건에서 풍속  $v$ 가 출현한 확률은 다음과 같다.

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] \quad (6)$$

주어진 일정한 풍속  $v$ 에서 풍력발전기의 연간 발전 전력량은 다음과 같이 산정한다.

$$P_W = \sum [P(v) \times f(v) \times 8760 \text{ (kWh)}] \quad (7)$$

여기서  $P(v)$ 는 풍속이  $v$ 일 때의 발전기의 발생 전력으로서 기존 시스템은 제조사의 출력곡선으로부터 얻을 수 있으며 새로운 시스템 설계 시에는 풍력터빈의 출력곡선으로부터 추정하여야 하는 설계 파라메타가 된다. 1년간 총 발전 가능한 연간 에너지생산량(AEP)는 발전 시작풍속부터 1m 간격으로 풍속을 증가시키면서 식 (6)과 (7)을 이용하여 연간 발전량을 계산한다. 이 과정을 발전종단 풍속까지 수행한 다음 전체 발전량을 합하여 구한다. 이때 평균 풍속은 실제 터빈의 높이와 측정 높이가 다른 경우 다음과 같이 보정해야 한다.

$$v_z = v_h \times \left(\frac{z}{h}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

여기서,

$v_z$  = 터빈 높이에서의 풍속

$v_h$  = 측정 높이에서의 평균풍속

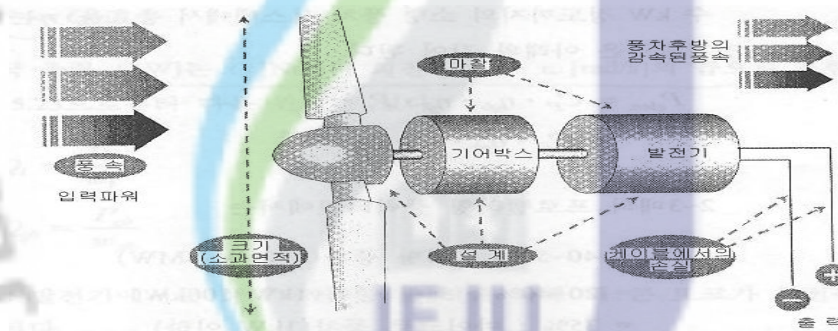
$h$  = 측정 높이

$z$  = 터빈 높이

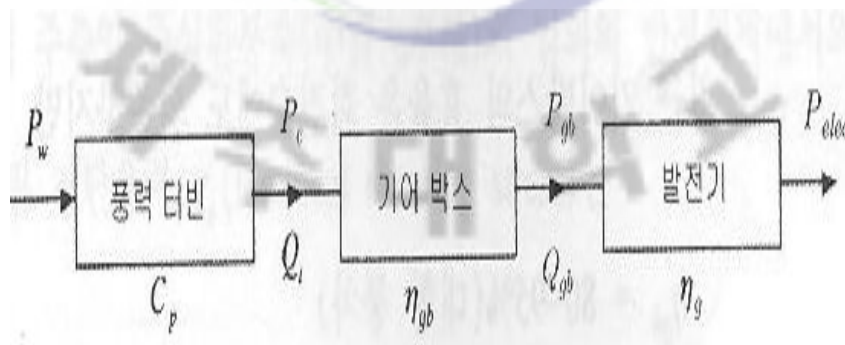
$n$  = 형상계수

이다. 형상계수는 평탄지역은 7~10, 전원에서는 4~6을 사용한다.

풍력발전시스템의 기본적인 요소의 레이아웃은 아래의 그림 (a)와 같고, 그 출력 흐름과 요소효율은 그림 (b)와 같다. 이 그림에서 각 단계에서의 출력의 비 또는 발전시스템의 기본적인 효율은 아래와 같이 된다.



(a) 풍력발전시스템의 기본요소의 레이아웃



(b) 풍력발전시스템의 기본요소와 효율

Fig5. Base element and efficiency of wind generator system

$C_p$ 는 풍력터빈의 효율이며,  $P_e$ 는 실제로 얻을 수 있는 출력[Nm/s]이다.  $P_w$ 는 바람이 보유하는 출력,  $\eta_{gb}$ 는 기어박스의 효율  $\eta_g$ 는 발전기의 효율  $P_{elec}$  전기출력을 나타낸다.

$$\frac{P_e}{P_w} = C_p \quad (9)$$

$$\frac{P_{gb}}{P_e} = \eta_{gb} \quad (10)$$

$$\frac{P_{elec}}{P_{gb}} = \eta_g \quad (11)$$

여기서 이들 단계의 시스템 총 효율  $\eta$ 는

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_w} \times \frac{P_e}{P_w} \times \frac{P_{gb}}{P_e} \times \frac{P_{elec}}{P_{gb}} \quad (12)$$

위 식과 각 요소 효율을 조합하면

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_w} = C_p \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_g \quad (13)$$

의 값을 갖는다.

수 kW정도까지의 소형 풍차 시스템에서 총효율  $\eta$ 는 20~25% 정도이다. 또 전기 출력은 아래와 같이 된다.

$$P_{elec} = C_p \times \eta_{gb} \times \eta_g \times P_w \quad (14)$$

$$= C_p \times \eta_{gb} \times \eta_g \times \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (15)$$

2~3매의 프로펠러형 풍력터빈에서  $C_p$ 는 100kW ~ 3MW급 대형풍차의 경우

40 ~ 50%이며, 1kW ~ 100kW급 소형 풍차의 경우 20 ~ 40%이다. 1kW의 마이크로 풍차의 경우는 35%의  $C_p$  값을 갖는다.

최근 기어박스의 효율( $\eta_{gb}$ )은 회전수에도 의존하지만, 정격 회전수에서 대형 풍차의 경우 80 ~ 95%이며, 소형 풍차의 경우 70 ~ 80%의 효율을 가진다. 발전기는 정격출력의 크기에 따라 효율도 변한다. 기계적인 회전 에너지를 전기에너지로 변환하는 과정은 열에서 일로의 열역학적인 에너지 변환 등으로 본질적으로 높은 효율을 얻을 수 있다. 정격 회전수에서의 발전기 효율 $\eta_g$  은 대형 풍차의 경우 80 ~ 95%, 소형의 경우 60 ~ 80%의 효율을 얻는다. CP를 자연풍 안에서 풍차를 이용하여 뽑아낼 수 있는 출력의 비율을 출력계수 CP라 하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$C_p = \frac{P_e}{\frac{1}{2}\rho A V_\infty^3} \quad (16)$$

여기서,  $P_e$ 는 실제로 얻을 수 있는 출력[Nm/s]이며,  $\rho$ 는 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>], A는 로터 회전면적[m<sup>2</sup>],  $V_\infty$ 는 풍속[m/s]을 나타낸다.

## 2.1.2 태양광발전시스템

### 2.1.2.1 태양광 발전원리

태양광 발전은 우리 인류에게 적어도 앞으로 50억년 이상 무료로 에너지를 사용할 수 있게 해준다. 이러한 태양광 발전의 실용화는 이미 구미 선진국을 중심으로 현재 활발하게 전개되고 있다. 태양광 발전에 관한 기술개발이 최근 10년간 급속히 진보해 우리들의 주변에서도 쉽게 찾아볼 수 있다. 전자계산기, 전자

시계를 비롯 무인등대, 무선전신 중계기지의 전원, 인공위성의 주전원, 개인주택용 전원 등으로 널리 쓰여 지고 있다.

태양광 발전은 입사되는 태양복사 에너지가 전혀 경비를 들이지 않는다는 본래의 장점 이외에도 반도체인 태양전지의 양자광전효과를 이용하기 때문에 열 에너지를 매개로 하지 않는다는 점에서 가동부분 없이 조용하고 안전하게 그리고 공해 없이 전기에너지를 일으키는 청정에너지 발생법이다. 태양광 발전 프로젝트를 성공으로 이끄는 핵심기술은 무엇보다도 태양전지의 고효율화와 저코스트화다. 때문에 요소의 재료, 원재료 제조법에서부터 전지의 구조, p-n 접합 등 접합형성기술, 모듈화에서 시스템에 이르기까지 실제로 여러가지 연구개발 노력이 중첩되어 있다.

태양전지의 동작원리는 반도체 p-n 접합으로 구성된 태양전지(Solar Cell)에 큰 에너지를 가진 파장영역의 태양광이 입사되면 광에너지에 의해 전자, 정공 쌍이 여기 되고 분리된다. 이러한 전자와 정공이 이동하여 층과 층을 각각 음극과 양극으로 대전시킴으로써 기전력이 발생, 외부에 접속된 부하에 전류가 흐른다. 그림17과 같이 태양전지와 축전지, 전력변환장치로 구성되어 있다. 태양빛이 P형 반도체와 N형 반도체를 접합시킨 태양전지에 쏘여지면 태양빛이 가지고 있는 에너지에 의해 태양전지에 정공과 전자가 발생한다. 이때 정공은 P형 반도체 쪽으로, 전자는 N형 반도체 쪽으로 모이게 되어 전위차가 발생하면 전류가 흐르게 되는 것이다.

태양광발전의 장점은 공해가 없고, 필요한 장소에 필요한 만큼만 발전할 수 있으며, 유지보수가 용이하다는 것이다. 반면에 전력생산량이 일조량에 의존하고, 설치 장소가 한정적이며, 초기 투자비와 발전단가가 높은 단점이 있다.

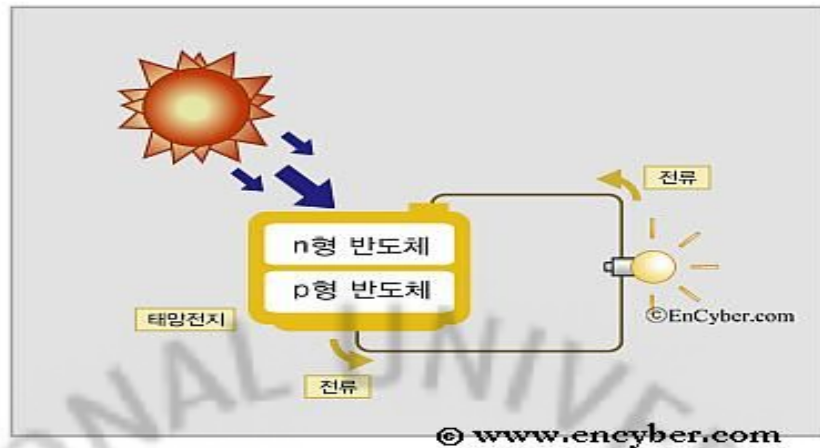


Fig6. Principles of the photovoltaic system

태양전지의 변환효율은 입사되는 태양복사광 에너지와 태양전지의 단자에서 나오는 전기 출력에너지의 비를 퍼센트로 표시한다. 국제 전기규격 표준화위원회 (IEC TC-82)에서는 지상용 태양전지에 관해 태양복사의 공기질량 통과조건이 통과공기질량(AM : Air Mass) 1.5로  $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 입력광 파워에 대해 부하조건을 바꿀 경우의 최대 출력과 비율을 백분율로 표시한 것을 공칭효율이라 정의하고 있다.

현재 시판되고 있는 단결정 실리콘 태양전지 기판은 대부분 IC제조용으로 생산된 실리콘 규격제품을 다시 재용융해 결정을 성장시켜 사용하고 있다. 다결정 실리콘 태양전지는 기판으로 고순도 다결정체를 사용, 원리적으로는 단결정계와 거의 동일하다. 단결정 실리콘 기판의 제조는 고도의 기술과 다량의 에너지가 필요하다. 때문에 태양전지의 제조단가가 높다. 따라서 단결정 실리콘에 비해 가격은 약 30% 정도가 저렴하지만 효율은 거의 버금가는 다결정 실리콘 태양전지가 최근 각광을 받고 있다.

트랜지스터나 IC와 같은 반도체 제품인 태양전지는 양산화에 의한 규모 효과가 크다. 다시 말해 응용분야가 넓으면서 수요가 증가하면 상당한 정도의 저코스트화가 달성될 수 있는 요인을 갖고 있다. 이러한 규모 효과의 이용에 의한 저코스트화의 관점에서 넓은 용도를 갖는 응용시스템의 개발도 이 분야의 산업 육성에 필요한 과제의 하나라고 말할 수 있다. 사실 지난 10년간 솔라 계산기로

대표되는 민생용 전자기기, 고속도로나 철도의 신호기, 양수펌프, 골프카트, 솔라 자동제초기, 솔라 자동차, 솔라 보트 등 새로운 응용분야가 활발히 개척되고 있다.

### 2.1.2.2 태양광 발전시스템 현황

전력용으로 각종 규모의 실험 플랜트가 전세계에서 각국의 건설 프로젝트로 진행되고 있다. 태양광 발전시스템의 최우선 목표는 전력망과 연계한 태양광 발전소의 건설이다. 현재 가동중인 세계 최대의 태양광 발전소는 아르코솔라사가 미국의 캘리포니아주에 건설한 7.2MW 규모의 발전소이다. 대기오염 등 환경문제를 고려해 무공해 운송수단으로 태양열 자동차, 비행기 등의 개발도 시작되고 있다.

태양전지의 모듈가격이 어느 정도까지 내려가면 실용화할 수 있는가? 이 문제는 사용장소에서의 평균 일조시간, 기존 발전기술의 발전원가, 태양전지의 에너지 회수시간 등과 맞물려 각종의 케이스 스터디가 진행되고 있다. 한 구체적인 시산 결과에 의하면 대규모 집중발전에서 BOS(Balance Of System)의 점유율을 50%로 가정해도 모듈원가가 W당 2800원이 되어 향후 10년 정도 상용전력으로도 채산성이 맞을 것으로 예상되고 있다.

미국은 정부의 주도로 “100만호 주택태양광 시스템”과 같은 대규모 태양광 발전시스템을 계속적으로 증설하고 있으며 전기자동차의 생산을 의무적으로 늘려나가는 법안을 통과시켜 이미 시행하고 있다. 산업체 또한 새로운 공장과 생산량을 꾸준히 늘려가고 있다. 일본에서는 주택용 태양광 발전시스템이 보급단계를 맞고 있다. 일본 통산성은 이 시스템의 시장규모를 2000년에는 약 1조 2000억 원으로 예상하고 있다.

한편 가정에서 쓰고 있는 평균적인 전기사용량을 고려하면 4인 가족 기준으로 연간 대략 3000kWh의 전기가 필요하다. 현재 판매되고 있는 3kW급 태양광 발전시스템은 전기의 대부분을 자가 발전할 수가 있고 우기나 야간 등 태양광이 없을 때에는 전력회사로부터 전기를 사고, 반대로 쓰고 남은 태양광발전의 전기는 전력회사에 파는 것으로 되어 있다.



일본의 주택용 태양광 발전시스템은,

- 지붕 위에 설치하는 태양전지 모듈  
(태양광에너지를 전기로 바꾸는 패널)
- 접속상자(태양전지 모듈로 얻은 전기를 모으는 장치)
- 인버터(자가 발전한 직류의 전기를 가정용 교류로 변환하는 장치)

등으로 구성돼 분전반에서 각 전기제품으로 전기가 흐르게 되어 있다. 이외에 태양광 발전과 전력회사 전기의 교류측 개폐기, 파는 전기와 사는 전기의 양을 나타내는 전력량계가 세트되어 있다. 현재 일본은 정부 주도로 개인주택용 태양광 발전시스템의 설치비용을 30% 무상지원해 주고 있으며 “선샤인 프로젝트”라는 국가차원의 대규모 태양에너지 개발계획을 진행 중이다.

국내의 경우 지난 95년 세계 최고 수준의 상업용 태양전지인 변환효율 19%의 BCSC(Buried Contact Solar Cell) 단결정 실리콘 태양전지가 개발됐다. 이것은 실리콘 웨이퍼에 Nd:YAG 레이저로 폭 20미크론( $1\mu\text{m}$  : 1백만분의 1m), 깊이  $60\mu\text{m}$ 의 홈을 형성한 후 니켈, 구리를 무전해도금법으로 증착하여 전극을 형성, 태양전지로 입사되는 빛의 손실을 대폭 줄이고 전하 수집률을 높인 게 특징이다. 또한 변환효율 19.2%의 PESC(Passivated Emitter Solar Cell) 태양전지를 개발해 세계적 공인기관인 독일 프라운호퍼 태양전지연구소의 「PV-Chart」에 기록됐다.

에너지 산업표준에서 볼 때 아직은 미미한 수준이지만 태양에너지 시장은 세계 원유 생산속도보다 10배 빠른 성장을 보였다. 2020년까지 연간 25%씩 성장한다고 보았을 때 2020년에 태양에너지 용량은 10만6000MW에 달하게 될 것이다. 이는 핵발전소 30~40개가 낼 수 있는 전력량이다.

### 2.1.2.3 태양광 발전시스템 종류

가. 어레이 설치형태에 따른 분류

#### ① 추적식 어레이

태양광발전시스템의 발전효율을 극대화하기 위한 방식으로 태양의 직사광선이 항상 태양전지 판의 전면에서 수직으로 입사할 수 있도록 동력 또는 기기조작

을 통하여 태양의 위치를 추적해 가는 방식으로 추적방향에 따라 단방향 추적식과 양방향 추적식으로 나누어 생각할 수 있다. 또한 태양을 추적하는 방법에 따라서 감지식, 프로그램 제어식, 혼합형 추적방식을 생각할 수 있다. 그 밖에 태양광선의 집광유무에 따라서 평판형과 집광형 어레이를 생각할 수 있다.

a. 추적 방향에 따른 분류

- 단방향 추적식

태양전지 어레이가 태양의 한측만을 추적하도록 설계된 방식으로 상·하 추적식과 좌·우 추적식으로 나누어진다. 고정형에 비하여 발전량이 증가하나 양방향 추적식에 비하여 발전량이 줄어든다.

- 양방향 추적식

태양전지판이 항상 태양의 직달일사량이 최대가 되도록 상·하 좌·우동시에 추적하도록 설계된 추적장치이다. 설치단가가 높은 반면에 발전량이 고정형에 비하여 연평균 40~60% 가량 증가한다. 주로 제약된 설치면적에서 최대 발전량을 얻는 데에 목적이 있다.

b. 추적방식에 따른 분류

- 감지식 추적법

태양의 추적방식이 감지부를 이용하여 최대 일사량을 추적해 가는 방식으로 감지부의 종류와 형태에 따라서 오차가 발생하기도 한다. 특히 태양이 구름에 가리거나 부분 음영이 발생하는 경우 감지부의 정확한 태양궤도 추적이 기대할 수 없게 된다.

- 프로그램 추적법

어레이 설치위치에서의 태양의 년 중 이동궤도를 추적하는 프로그램을 내장한 컴퓨터 또는 마이크로프로세서를 이용하여 프로그램이 지시하는 년·월·일에 따라서 태양의 위치를 추적하는 방식이다. 비교적 안정되게 태양의 위치를 추적해 나아갈 수 있으나 설치지역 위치에 따라서 약간의 프로그램 수정이 필수적이다.

#### - 혼합식 추적법

프로그램 추적법을 중심으로 운용하되 설치위치에 따른 미세적인편차를 감지부를 이용하여주기적으로 수정해 주는 방식으로 일반적으로 가장 이상적인 추적방식으로 이용되고 있다.

#### ② 반고정형 어레이

반고정형 어레이는 태양전지 어레이 경사각을 계절 또는 월별에 따라서 상하로 위치를 변화시켜주는 어레이 지지방식으로 일반적으로 사계절에 한번씩 어레이 경사각을 변화시킨다. 이때 어레이 경사각은 설치지역의 위도에 따라서 최대 경사면 일사량을 갖도록 설치한다. 반고정형 어레이의 발전량은 고정형과 추적식의 중간 정도로써 고정형에 비교하여 보통20% 가량의 발전량 증가를 가져온다.

#### ③ 고정형 어레이

어레이 지지형태가 가장 값싸고 안정된 구조로써 비교적 원격지역에 설치면적의 제약이 없는 곳에 많이 이용되고 있으며, 특히 도서지역 등 풍속이 강한 곳에 설치하는 것이 보통이다. 앞서 언급한 추적식, 반고정형에 비하여 발전효율은 낮은 반면에 초기 설치비가 적게 들고 보수 관리에 따른 위험이 없어서 상대적으로 많이 이용되는 어레이 지지방법이다. 국내의 도서용 태양광시스템에서는 이와 같은 고정형 시스템을 표준으로 한다.

#### 나. 태양전지판의 집광 유무에 따른 분류

태양전지변환효율은 일반적으로 어느 한계까지는 태양광선을 집광시켰을 때에 높아진다. 즉 집광 렌즈 등을 사용하여 태양광선을 집광시켜 태양전지에 조사시켰을 때에 보다 높은 발전효율은 기대할 수가 있다.

#### ① 평판형 태양전지 모듈

태양전지 모듈이 어떠한 집광형태의 조작용이 없이 곧 바로 태양광선에 노출

된 형태를 의미한다. 즉 집광이 되지 않는 태양광선을 태양전지에 그대로 입사하는 가장 보편화된 태양전지판이다.

## ② 집광형 태양전지 모듈

프렌넬렌즈 등을 사용하여 태양광선을 집광시킨 뒤에 태양전지에 집광된 빛을 조사시켜 발전하는 태양전지 모듈로써 반드시 집광된 광선이 태양전지 전면에 입사될 수 있도록 양방향 추적식 어레이로 구성되어야 한다. 일반적으로 고가의 태양전지 재료를 사용하여 제작된 고효율의 태양전지에 많이 이용한다. 집광형으로 설치 시에는 집광율에 따라서 태양전지에서 많은 열이 발생하여 변환효율이 온도상승에 따라 비례적으로 감소하므로 공냉식 또는 수냉식 강제냉각시스템을 부착시켜 온도상승을 막는다. 그러나 아직까지 생산가가 높고 구조가 복잡하여 아직까지 경제성이 미흡한 것으로 알려져 있다.

다. 부하의 종류와 계통선 연계 유무에 따른 분류

### ① 독립형 태양광시스템

독립형 태양광발전 시스템은 계통선이 공급되지 않는 산간벽지, 도서지역 등에 전력을 공급하기 위한 시스템으로 주간에 발생시켜 사용하고 남은 전력을 축전지에 저장하였다가 야간에 사용하게 되어있으며, 부하의 종류와 시스템의 구성에 따라서 아래 그림들과 같이 여러 가지 직류부하용과 교류부하용 시스템이 있다.

그림 7은 대표적인 독립전원형 발전시스템을 나타낸다.



Fig7. Independent power system of the PV

이 시스템은 발전한 전력을 그대로 자가 소비하고, 외부, 즉 상용 전력부서의 전력 보급을 받지 않고 운용하는 자급자족적인 운용 방법으로, 상용 전력과 전기적인 접속을 하지 않은 방식을 독립형 전원 시스템 이라고 불린다.

이 방식은 발전하고 있는 시간대와 전력을 소비하는 시간대에 시차가 있는 경우가 많기 때문에 축전지를 구비하고 있으며, 발전한 전력을 일단 배터리로 충전하고, 필요에 따라 배터리로부터 방전해 전력을 사용하는 형태이다. 소규모인 것부터 대규모인 것까지 다종다양하고, 작은 것으로서는 태양전지를 이용한 탁상 계산기나 시계 등도 독립 전원 시스템을 이용한 기기라고 부를 수 있다. 대규모인 것은, 상용 전원이 없는 무 전원 지대에서의 산장이나 별장, 연구 설비나 방재 설비 등의 전원으로 사용되고 있다. 상용 전원과 무관하기 때문에, 재해 등에 상용 전원이 정전된 때에도 독립해 운용할 수 있다.

## ② 계통선 연계형 태양광시스템

계통선연계형 태양광시스템은 계통선이 공급되는 지역에서 태양전지를 이용하여 주간에 생성된 전력을 아래 그림과 같이 인버터를 통하여 계통선에 연계하여 전력을 공급하거나 또는 일부하측에 직접 전력을 전달하게 된다. 이때 계통선의 안정을 피하기 위하여 반드시 계통연계보호장치를 통하여 태양전지에서 발생된 전력이 계통선과 연계되어야 한다.

#### 2.1.2.4 태양광 에너지 양

지표면에 무진장으로 내리쬐는 태양빛은 평방미터당 약 1kW에 상당하는 에너지를 보유하고 있다. 지구 대기권 밖에서 태양 광선에 직교하는 1cm<sup>2</sup>의 면적이 1분 동안에 받는 태양 복사 에너지의 양을 태양상수  $I$ 라 한다. 즉,

$$I = 2 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min} \quad (17)$$

따라서 지구상에 비치는 태양에너지의 총량은 약  $1.2 \times 10^{14}$  kW로서 지구전체 소비량의 약 1만 배에 달한다. 국내의 총 태양에너지 양은  $1.5 \times 10^{10}$  kW로서 역시 국내 전소비량의 약 100배에 이른다.

태양에너지를 태양광발전시스템을 이용하여 전기로 변환할 경우, 시스템의 총 변환효율을 10%로 하면, 1m<sup>2</sup>당 0.1kW(100W)의 정격출력이 된다. 1m<sup>2</sup>에서 태양빛이 1시간 내리쬐면 0.1kWh를 발전하게 되는 것이다. 따라서 10m<sup>2</sup>의 태양전지로 표준상태의 경우, 1kW의 정격출력으로 생각할 수가 있다. 기존의 계산으로부터 필요출력(kW)을 10배하면 태양전지의 필요면적을 구할 수가 있으며, 태양전지의 면적을 10으로 나눈 것이 정격출력이다.

연간 최적 경사각에서 하루 동안 1m<sup>2</sup>당 일사량은 약  $3.4 \sim 4.5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 이다. 연간으로 환산하면 약  $1200 \sim 1650 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{year}$ 가 된다. 이 일사량의 단위는  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{시간}$ 이 되며, 발전량을 계산할 때의 기초자료로 사용한다. 일사량은 실측치를 기초로 하여 추정치에 의해 각지의 값을 구하며, 국내의 일사량은 대략 아래의 범위에 들어 있다. 일사량으로부터 정격출력 당 발전량을 구할 경우는 일사량에 종합설계계수(0.65~0.8정도)를 곱하여 구한다. 예를 들어 계수 0.7로 하면,

$$(1200 \sim 1650) \times 0.7 = 840 \sim 1155 \text{ kWh} \quad (18)$$

로 되어, 1kW정격의 태양광발전 시스템에 의해 1년 동안에 약 1000kWh의 발전을 기대할 수 있다. 또, 정격출력에 기준한 연간 발전량은 다음 식으로 구한다.

$$1\text{kW/h} \times 12(\text{가동율}) \times 760 (\text{시간/년}) = 1051 \approx 1000 \text{ kWh/year} \quad (19)$$

따라서 정격출력(kW)의 약 1000배가 기대할 수 있는 연간발전량이라고 생각할 수 있다.

### 2.1.2.5 일사량

하루 총 수평면 일사량으로부터, 경사 혹은 추적식으로 설치된 태양전지 array로의 일사량 변환은 경사면위의 직달 일사량( $r_{tb}$ )과 수평면 산란일사량( $r_{hd}$ )의 합으로 구해지며 다음 식과 같이 나타낸다.

$$r_{tt} = r_{tb} + r_{hd} = r_{hb} \times R_b + r_{hd} \quad (20)$$

여기서,  $r_{tt}$ 은 경사면 전체의 일사량이며,  $r_{tb}$  경사면 직달일사량의 수치를 나타낸다.  $r_{hd}$ 은 수평면 산란일사량이며,  $r_{hb}$  수평면 직달일이며,  $R_b$ 은 직달 일사량의 입사각, 위도, 적위, 방위각, 들을 반영한 기하학적 인자 값이다.

일사량 확률밀도함수는 일반적으로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$f_n(r) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \left[ \frac{(r - r_{\min})^{\alpha-1} (r_{\max} - r)^{\beta-1}}{(r_{\max} - r_{\min})^{\alpha+\beta-1}} \right] = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left[ \frac{r}{r_{\max}} \right]^{\alpha-1} \left[ 1 - \frac{r}{r_{\max}} \right]^{\beta-1} \quad (21)$$

여기서  $r, r_{\max}, r_{\min}$  [ $\text{W/m}^2$ ]은 순시, 최대 및 최소 일사량 ( $r=r_{tt}$ )이고,  $\alpha, \beta$  파라메타는 형상 파라메타이며,  $\Gamma$ 는 감마함수를 나타낸다.

### 2.1.2.6 태양광 발전 출력

경사면에 대한 태양 복사열과 주변온도와 PV 모듈 제조사가 제공하는 데이터를 모델 입력으로 이용하여, 다음 식으로부터 PV 발전장치의 출력,  $P_{PV}$ ,를 산출할 수 있다.

$$P_{PV} = \eta_g N A_m G_t \quad (22)$$

여기서,

$\eta_g$  : PV 발전기의 순시효율

$N$  : PV 모듈 수

$A_m$  : 단위 PV 모듈의 면적 ( $m^2$ )

$G_t$  : 경사면에 입사되는 복사에너지 ( $W/m^2$ )

이다.

위 식은 PV 발전장치의 연결 및 배선에 연관되는 에너지 손실, 그리고 기타 손실 등 모든 에너지 손실을 0으로 가정한 것이다. 순시 PV 발전효율,  $\eta_g$ , 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\eta_g = \eta_r \eta_{pt} [1 - \beta_t (T_c - T_r)] \quad (23)$$

여기서,

$\eta_r$  : PV의 표준(기준)효율

$\eta_{pt}$  : 에너지 추적 장치의 효율 (제조사에서 제공)

$T_c$  : PV의 온도 ( $^{\circ}C$ ), 주변온도에 따라 결정됨

$T_r$  : PV cell의 기준(표준) 온도 ( $^{\circ}C$ )

$\beta_t$  : 효율의 온도계수 (제조사에서 제공, 일반적으로  $0.004 - 0.006/^{\circ}C$ )

$T_c$ 는 에너지 보존법칙을 이용하면 다음과 같다.



$$T_c = T_a + G_t \left( \frac{\tau\alpha}{U_L} \right) \quad (24)$$

여기서,

$T_a$  : 주변온도 ( $^{\circ}C$ )

$U_L$  : 열손실계수 ( $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ )

$\tau, \alpha$  : PV cell의 투과율과 흡수율 계수

$\left( \frac{\tau\alpha}{U_L} \right)$ 은 총 열손실 계수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\left( \frac{\tau\alpha}{U_L} \right) = \frac{NOCT - 20}{800} \quad (25)$$

여기서  $NOCT$ (Normal Operating Cell Temperature)는 PV cell의 기준 작동 온도를 나타낸다. 결국 PV 발전모듈의 순시 효율은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_g = \eta_r \eta_{pt} \left\{ 1 - \beta_t (T_a - T_r) - \beta_t G_t \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) (1 - \eta_r \eta_{pt}) \right\} \quad (26)$$

여기서  $\eta_{pt}$ ,  $\beta_t$ ,  $NOCT$ ,  $A_m$ 은 PV 모듈에 따라 달라지는 파라메타로서 제 조사에서 제공된다.

## 제 2 절 각 발전시스템 출력 모델링

1970년대 오일쇼크 이후 태양광과 풍력을 이용 분야가 아주 중요해 지고 관심이 급증하게 되었다. 최근에는 환경보존을 하면서 전력을 동시에 생산한다는 요구조건에 가장 잘 충족하는 대안으로서 다양한 가지 신재생에너지 복합발전시스템이 각광을 받고 있다. 특정 지역에서는 태양 에너지와 풍력에너지, 또는 해양 에너지는 서로 보완적인 특성을 갖고 있어서 태양광-풍력 복합발전시스템, 혹은 풍력-태양광-조류 복합발전시스템은 기존 계통선이 없는 독립지역과 같은 소규모 전력을 요구하는 지역에서 탁월한 선택이 될 수 있다. 또한 복합발전시스템은 비교적 높은 신뢰도의 전력을 공급할 수 있기 때문에 그에 대한 응용 및 연구에 더욱 많은 관심을 끌고 있다.

태양에너지, 풍력에너지 및 해양에너지는 기본적으로 통계학적 특성을 갖고 있기 때문에 복합발전 시스템 설계에 있어서 주안점은 변하는 환경조건하에서 어떻게 소비자에게 신뢰성 있는 전력을 공급하느냐 하는 것과 얼마나 싼 전기를 공급하느냐 하는 것이다. 이러한 관점에서 다양한 신재생 에너지를 보다 효과적이고 경제적으로 이용하기 위해서는 배터리를 포함하는 복합발전시스템의 최적 용량설계가 가장 중요한 역할을 한다.

### 2.2.1 풍력발전출력 모델링

서로 다른 풍차는 서로 다른 출력성능을 갖는다. 따라서 풍력 발전기의 출력을 표현하기 위해 사용되는 모델은 서로 다를 수밖에 없다. 어떤 학자들은 터빈 출력은 선형, 2차 함수, 혹은 3차함수로 가정하였다. 다른 부류의 학자들은 몇 개의 노드를 갖는 부분적으로 선형인 지수곡선으로 근사화 하였다. 또 다른 경우의 연구들에서는 Weibull 파라메타를 고려한 모델이 적용되기도 했다.

이상과 같은 모델들은 필드적용을 위한 풍력발전시스템의 시뮬레이션이나 평가를 위해서 주로 이용되었다. 그러나 특정한 풍력발전시스템에 대해서는 제조사가 제공하는 출력특성곡선에 따라 모델링이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 제조사가 제공한 데이터로부터 interpolation을 통하여 풍력발전의 출력을 평가한다. 출력곡선은 곡선이 상당히 완만하기 때문에 1차 곡선을 이용하여 근사화 한다.

$$P_{WG}(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_s \\ a_1v + b_1, & v_s < v < v_1 \\ a_2v + b_2, & v_1 < v < v_2 \\ \dots\dots\dots \\ a_nv + b_n, & v_{n-1} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_c \end{cases} \quad (27)$$

여기서,

$P_{WG}(v)$  : 풍속  $v$ 에서의 풍력발전시스템의 출력

$P_r$  : 정격출력

$v_s$  : cut-in 풍속

$v_c$  : cut-off 풍속

$v_r$  : 정격풍속

$n$  : 근사 직선의 수

$a, b, c, d$  : 풍력발전기의 형태에 따라 달라지는 다항식 계수

식 (28)과 같은 모델은 피치제어나 스톱제어 등 능동출력제어를 수행하는 중대형 시스템에 해당하는 것이다. 능동제어는 일정풍속 (정격풍속) 이상에서는 출력이 증가하지 않고 일정하게 유지하도록 제어를 수행하기 때문이다.

반면에 독립전원 공급 형으로 주로 이용되는 소형 풍력발전시스템은 출력에 대한 제어를 수행하지 아니하기 때문에 정격풍속이상에서도 출력은 계속해서 상승한다. 따라서 출력 모델은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$P_{WG}(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_s \\ a_1v + b_1, & v_s < v < v_1 \\ a_2v + b_2, & v_1 < v < v_2 \\ \dots\dots\dots \\ a_nv + b_n, & v_{n-1} < v < v_c \\ 0, & v_c < v \end{cases} \quad (28)$$

그러나 계속해서 풍속이 증가하면 발전기에 과도한 회전이 발생하여 무리가 갈 수 있고 과도한 전류가 발생하여 부하 및 충전장치에도 손상을 줄 수 있으므로 일정 풍속 (cut-off 풍속, 차단풍속) 이상에서는 발전기를 차단한다. 풍력발전은 설치 높이에 따라 발전가능 에너지가 크게 달라지기 때문에 고도 보정식을 이용하여 풍속을 보정하여야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 보정식을 이용하였다.

$$v = v_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^{\alpha_1} \quad (29)$$

여기서  $v$ 는 허브 높이  $H$ 에서의 풍속,  $v_0$ 는 기준 높이(측정된 높이)  $H_0$ 에서의 풍속이다. 또한  $\alpha_1$ 은 멱 법칙(power law)의 지수로서 하루 중의 시간, 계절, 지형, 풍속 및 온도 등에 따라 달라진다. 본 연구에서는 주변이 잘 트여있고 지형이 대체로 평탄한 경우에 잘 적용되는 값인 1/7을 선택하였다.

그러나 풍속 보정 역시 중대형과 같이 풍속측정 높이와 실제 회전자의 높이가 크게 차이가 나는 경우에만 필요하다. 따라서 지면에서 설치 높이가 그다지 높지 아니하는 소형 시스템의 경우에는 풍속 보정이 불필요하다.

## 2.2.2 태양광 발전 출력 모델링

태양광발전장치의 작동과 성능은 생산 가능한 최대전력에 초점이 맞춰져 있다. 따라서 PV 모듈을 평가하기 위해서는 태양광 발전장치의 최대 출력특성을 모델링하는 것이 실제적이다.

태양전지 array의 출력에 대한 확률밀도함수는

$$f_s(P_s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left[ \frac{P_s}{P_{s_{\max}}} \right]^{\alpha-1} \left[ 1 - \frac{P_s}{P_{y_{\max}}} \right]^{\beta-1} \quad (30)$$

$P_s$ 는  $r$ 의 함수로  $P_{s_{\max}}(r) = A \cdot r_{\max} \cdot \eta \cdot K_T$ 로 나타낼 수 있다.[12]

주어진 시간대에서 태양전지의 기대출력 전력은 태양광 발전시스템의 출력 예측을 위해서 일사량분포분석이 수반된다. 일반적으로 Beta, Weibull, Log Normal과 같은 통계적 방법이 사용된다. Chi-Square Goodness of Fit Test에 의해 검증된 Beta Distribution을 사용한다.

태양광 발전시스템의 평균출력은 다음과 같이 구한다.

$$P_{p,ave} = \int P(r)f(r)dr \quad (31)$$

여기서  $f(r)$ 은 일사량 확률밀도함수로 식에 주어졌으며  $P(r)$ 은 태양전기 어레이의 출력전력으로 출력전압과 출력전류의 곱으로 계산된다.

이때 출력전류  $I$ 는 표준상태(25°C,  $1\text{kw}/\text{m}^2$ , AM1.5)에서 전압의 함수로 다음식과 같이 주어진다.

$$I(V) = I_{sc}1 - C_1 \left[ \exp\left(\frac{V}{C_2 V_{oc}}\right) - 1 \right] \quad (32)$$

여기서  $C_1, C_2$ 는 태양전지로부터 계산되지는 값으로 다음식과 같으며  $I_m, V_m$ 은 전류와 전압의 최대값이고  $I_{oc}, V_{oc}$ 는 동작전류와 동작전압을 나타낸다.

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-V_m}{c_2 V_{oc}}\right) \quad (33)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \quad (34)$$

### 2.2.3 충전시스템 모델링

매순간 배터리 상태는 시간  $t-1$ 에서  $t$ 동안의 이전 충전상태, 발전상태, 부하상태 등에 관계된다. 충전과정 동안 PV와 풍력의 총 발전량이 부하요구량보다 크면 시간  $t$ 에서 가용 배터리 충전량은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1)(1-\sigma) + \left(E_{PV}(t) + E_{WG}(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}}\right) \eta_{bat} \quad (35)$$

여기서,

$C_{bat}(t)$  : 시간  $t$ 에서의 사용가능한 배터리 충전량 (Wh)

$\eta_{bat}$  : 배터리 효율 (방전 시 효율은 1, 충전 시 효율은 0.65~0.85 [Bin, 2003])

$\sigma$  : 배터리의 자가 방전율 (제조사 제공데이터, 6개월 간 25% 자가 방전, 즉 하루 0.14% 방전)

$E_{PV}(t), E_{WG}(t)$  : PV 및 풍차에서 발생한 에너지

$E_L(t)$  : 시간  $t$ 에서 요구되는 부하전력

$\eta_{inv}$  : 인버터 효율

이다.

(36)식의 첫 번째 항은 이전 시간까지 자가 방전을 고려한 남은 배터리 가용 충전량이며 두 번째 항은 발생하는 전력과 인버터를 통해 부하에 공급되는 전력의 차 즉, 순수 배터리에 충전되는 전력량을 나타낸다. 반면에 부하요구량이 생산되는 전력량보다 큰 경우에는 배터리는 방전상태가 된다. 따라서 시간  $t$ 에서 배터리 가용 충전량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1)(1-\sigma) - \left( \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} - (E_{PV}(t) + E_{WG}(t)) \right) \quad (36)$$

매 순간 배터리에 충전량은 다음 조건을 만족해야한다.

$$C_{bat \min} \leq C_{bat}(t) \leq C_{bat \max} \quad (37)$$

여기서,  $C_{bat \min}$  과  $C_{bat \max}$  는 각각 최소 및 최대 배터리 충전량이다. 최대 배터리 충전량을 공칭 충전량,  $C_{batn}$ , 으로 하면 최소 충전량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{bat \min} = DOD C_{batn} \quad (38)$$

여기서  $DOD$ 는 배터리의 허용 가능한 최대 방전율 (%)이다.

## 제 3 절 최적 용량설계 모델

### 2.3.1 전력부족률 기반 최적설계 모델

기술적인 측면에서 복합발전시스템의 최적구성을 얻기 위해 다양한 접근방법이 시도되었다. 이들 중에는 최소자승법과 trade-off 방법, 그리고 확률접근법

등 다양한 기술적 접근방법 등이 있다. 본 연구에서는 전력부족률 개념을 기반으로 하여 풍력-태양광 복합발전의 용량을 최적화 하는 방법을 이용한다.

시간  $t$ 에서 풍차와 PV에서 생산되는 총 전력  $P_{tot}(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$P_{tot}(t) = P_{PV}(t) + P_{WG}(t) \quad (39)$$

그러면 인버터에 입력되는 전력  $P_{inv}(t)$ 는 대응되는 부하요구전력을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$P_{inv}(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \quad (40)$$

여기서  $P_{load}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 부하에서 소비되는 전력이다. 이 과정동안 다음과 같은 세 가지 서로 다른 상황이 발생한다.

- a) PV와 풍차에서 생산되는 총 전력이 부하에서 요구하는  $P_{inv}$ 보다 큰 경우 : 잉여 전력은 배터리에 충전되며 최대 충전이 되기 전까지는 새로운 충전량은 식 (35)을 이용해서 계산된다. 최대 충전 이후의 잉여 전력은 사용하지 않는다.
- b) 총 생산전력이 부하요구전력보다 작은 경우 : 전력 부족분은 배터리에서 보충되며 식 (36)을 이용하여 새로운 배터리 충전량을 계산한다.
- c) 인버터 입력전력과 생산되는 전력이 같은 경우 : 배터리 충전량은 불변이다.

(a)의 경우에 배터리가 완전 충전이 되면 제어기가 충전 과정을 정지한다. 시간  $t$ 에서 생산되지만 시스템에서 사용되지 아니하는 에너지로 정의되는 불용에너지  $WE(t)$ 는 다음과 같다.

$$WE(t) = P_{tot}(t)\Delta t - \left( \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \Delta t + \left( \frac{C_{bat\max} - C_{bat}(t-1)}{\eta_{bat}} \right) \right) \quad (41)$$

위 식에서 우변의 첫째항은 시간  $t-1$ 에서  $t$ 동안 생산된 총 전력량을, 두 번



제 항은 부하에 사용된 전력량, 그리고 세 번째 항은 배터리 충전에 사용된 전력량을 나타낸다. 만약 배터리 충전량이  $C_{bat\ max}$  이하 인 경우에는  $WE(t)$ 는 0이며 충전량  $C_{in}$ 은 다음과 같다.

$$C_{in} = P_{tot}(t)\Delta t - \left( \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \Delta t \right) \quad (42)$$

(b)의 경우에 만약 배터리 충전량이 최소 충전량인  $C_{bat\ min}$  까지 떨어지면 제어시스템이 부하 연결을 차단하며 그 이후부터 발생하는 전력부족량 PLPS(Loss of Power Supply)는 다음과 같이 계산된다.

$$P_{LPS}(t) = P_{load}(t) \Delta t - ((P_{PV}(t) + P_{WG}(t))\Delta t + C_{bat}(t-1) - C_{bat\ min})\eta_{inv} \quad (43)$$

우변의 첫째항은 시간  $\Delta t$  동안 부하에서 요구되는 총 전력량, 두 번째 항은 풍차와 PV에서 생산한 전력량과 배터리에서 방전된 전력량이 인버터를 통해서 부하로 소비된 전력량을 나타낸다. 위 식은  $\Delta t$  시간 동안에 생산되는 전력은 일정하다고 가정한 것이다. 만약 배터리 충전량이  $C_{bat\ min}$  까지 떨어지기 이전까지는 계속 방전이 이루어지며 방전량  $C_{out}$ 은 다음과 같다.

$$C_{out} = P_{load}(t) \Delta t - ((P_{PV}(t) + P_{WG}(t))\Delta t)\eta_{inv} \quad (44)$$

고려되는 기간  $T$  동안 전력부족률은 그 기간 동안 총 전력부족량과 필요한 총 부하요구량과의 비로 정의된다.

전력부족률 RLPS(Ratio of PLPS)는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{LPS} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{LPS}(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t) \Delta t} \quad (45)$$

알고리즘 입력 데이터는 시간단위로 된 경사면에서의 태양광 조도, 평균온도와 풍속, RLPS, 그리고 연간 부하전력요구량 및 시스템 스펙 등이다. 또한 다음과 같은 두 가지 개념이 본 알고리즘에 도입하였다.

첫 번째는 일정한 기간 동안 복합발전시스템으로부터 생산되어 부하에 공급된 총 전력량과 같은 기간 동안 부하에 공급된 총 전력량의 비로 정의되는 재생에너지 공헌도 비율이다. 즉, 필요 전력량 중에서 복합발전시스템에서 생산된 순수 재생에너지가 차지하는 비율을 나타낸다. 이것은 RLPS를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉 기간  $T$  동안 복합발전시스템에서 생산된 총 발생량,  $E_{ren}(T)$ , 는 총 부하요구량을 뺀 것이므로 다음과 같다.

$$RC(T) = \frac{E_{ren}(T)}{E_{tot}(T)} = \frac{E_{tot}(T) - \sum_{t=1}^T P_{LPS}(t)}{E_{tot}(T)} = 1 - R_{LPS} \quad (46)$$

두 번째 개념은 과잉에너지비율이다. 이것은 일정 기간 동안에 (78)식으로 정의되는 총 불용에너지량과 동일 기간동안 총 부하에너지 량의 비로 정의된다. 즉,

$$EXC(T) = \frac{WE(T)}{E_{tot}(T)} \quad (47)$$

주어진 RLPS값과 기간에 대해 전력공급의 신뢰성 요구조건을 충족할 수 있는 시스템 구성은 기술적으로 매우 다양하다. 이와 같은 개념의 구성으로부터 다음 장에서 소개되는 경제성 모델을 달성 할 수 있는 최적 구성을 최종적으로 정의할 수 있다.

## 2.3.2 경제성 모델

### 2.3.2.1 LCE 기반 경제성 모델

복합발전 시스템 연구 및 보급에는 에너지 생산 비용에 대해 민감할 수밖에 없기 때문에 비용 분석에 있어서 경제성 접근이 무엇보다도 가장 중요하다. 서로 다른 선택에 따른 에너지 시스템을 평가하기 위해 다양한 방법들이 사용되어졌다. 그 중 LCE (Levelised Cost of Energy : 초기투자, 운전 및 유지보수, 연료, 금융관련비용 등 에너지 생산에 관련된 모든 비용에 대한 경제성 평가) 방법이 주로 이용되어 왔다. 본 장에서는 이 LCE를 이용하여 풍력-태양광 복합발전 시스템의 경제적인 용량을 결정하는 방법을 소개한다. 단위  $kWh$  생산에 필요한 총 비용인 LCE는 다음과 같이 정의된다.

$$LCE = \frac{TPV \cdot CRF}{E_{load}} \quad (48)$$

여기서  $E_{load}$ 는 발전시스템의 연간 출력( $kWh$ )을 나타내고  $CRF$ 는 자본회수계수 (Capital Recovery Factor : 현재의 금액을 연간등가로 환산하는데 사용되는 이자율과 기간의 함수로 된 공식의 계수) 로서 다음과 같다.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (49)$$

여기서  $i$ 는 연이율이며  $n$ 은 시스템의 수명연도이다. 또한  $TPV$ 는 모든 시스템 구성요소들에 대한 실제비용의 총 현재가치로서 다음과 같다.

$$TPV = C_{PV} + C_{wind} + C_{bat} : \text{내구 연한동안 소요되는 제반 비용} \quad (50)$$

여기서,

$C_{PV}$  : PV 발전시스템의 총 수명연한에 걸친 유지 및 금융관련 비용에 대한 현재가치의 합

$C_{wind}$  : 풍력 발전시스템의 총 수명연한에 걸친 유지 및 금융관련 비용에 대한 현재가치의 합

$C_{bat}$  : 풍력 발전시스템의 총 수명연한에 걸친 유지 및 금융관련 비용에 대한 현재가치의 합이다.

요구되는 RLPS를 보장하는 다양한 시스템 구성들 중에서 최저  $LCE$ 를 만족하는 구성을 최적 구성으로 선택한다.

일반적으로 태양광 시스템의 수명은 PV 모듈 수명과 동일하게 설정하며, 풍력시스템의 수명은 25년, 그리고 축전시스템의 수명은 4년으로 설정한다. 따라서 축전시스템은 다른 시스템의 수명동안 여러 차례 교체해야 할 필요가 있다. 아울러 구조물 유지비, 전력조정 및 인터페이스, 시스템 설치, 안전 및 제어요소 등과 같은 시스템의 추가비용은 풍력터빈비용의 25%와 PV 모듈의 50%로 계상한다. 연간 유지보수비용은 풍차비용의 5%, PV 발전시스템의 1%로 설정한다.

### 2.3.2.2 발전 단가 기반 경제성 모델

$LCE$  기반 경제성 모델보다 간단한 방법은 각 발전 타입별 발전단가를 기준으로 하는 방법이다. 즉, 발전 시스템별 kW당 발전단가를 기준으로 복합발전 시스템 kW 당 최소 단가에 해당하는 발전 조합을 선택하는 방법이다. 풍력발전 단가를  $T_w$ , 조류 발전단가를  $T_t$ , 태양광 발전 단가를  $T_{pv}$ , 그리고 배터리의 단위 Wh당 비용을  $T_{bat}$ 라 하면 발전 총비용을  $T_{cost}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{tot} = T_w E_w + T_t E_t + T_{pv} E_{pv} + T_{bat} C_{bat} \quad (51)$$

여기서,

$E_w$  : 풍력발전 용량

$E_t$  : 조류발전 용량

$E_{pv}$  : 태양광 발전 용량

$C_{bat}$  : 배터리 용량

이다.

최적용량 설계조건을 만족하는 다양한 복합발전 용량 조합 중 위 식을 최소화하는 조합이 최종적인 복합발전 최적 용량이 된다.



## 제 3 장 결과 및 고찰

### 제 1 절 시뮬레이션 결과

#### 3.1.1 최적 설계조건

복합발전은 독립형을 기준으로 설계하였으며, 따라서 풍력발전시스템은 소형으로서 대형 시스템에서 요구되는 피치제어나 기타 전력제어는 불필요한 것으로 가정하였다. 또한 팬테일 방식의 풍력발전기를 채택함으로써 풍향에 따른 제어는 수동적으로 수행되는 것으로 가정한다.

표1은 최적설계를 위해 미리 설정된 조건을 나타낸다.

표1. Condition of optimum design

발전형태	단위용량	총용량	Wh당 단가 (원)
풍력	3 W	3 W	105
태양광	2 W	설계대상	640
배터리	5 Wh	설계대상	320
부하	-	2 Wh	-

이것은 풍력은 3W로 고정하고 나머지는 최적 설계알고리즘에 의해 설계한다는 의미이다. 부하는 실험장치를 고려하여 LED로 가정하였다. 일반적으로 소형 LED 소비전력은 약 2Wh에서 3Wh이며, 따라서 부하전력을 2Wh로 설정하였다. 부하의 경우 점등 소등이 가능하게 할 수 있지만 편의상 24시간 항시 점등하는 것으로 가정하였다.

풍력발전기는 완제품으로 판매되는 풍력발전시스템 중에서 가장 소형인 3W급 발전시스템을 채택하였다. 실제 산업적으로 응용할 경우에도 발전용량을 편의대로 정할 수 없으므로 풍력발전시스템은 기존 판매되는 용량을 기준으로 하며 용량을 설계할 때에도 일정용량의 시스템에 대해 개수를 증가시키는 방법을 쓴다.

또한 태양광발전은 가장 보편적인 PV 모듈을 설정하여 판넬 당 최소 출력 2W로 가정하였다.

최적설계 과정에서 필요한 각종 파라메타는 표2에 나타내었다. 시동 풍속을 설정한 반면에 정격풍속을 설정하지 아니한 것은 중대형 시스템과는 달리 정격풍속이상에서는 제어를 하여 정격출력을 유지하지만 소형의 경우는 출력을 제어하지 아니하므로 출력이 계속 상승하기 때문이다.

배터리 최대방전 허용율은 복합발전 제어기에서 임의로 제어가 가능한 것이기 때문에 임의의 값으로 설정하였다. 인버터의 경우 본 시스템은 DC로 발전하여 부하에 그대로 DC로 공급되므로 인버터가 불필요하여 1로 가정하였다. 전력부족률은 0으로 설정하였는데 이것은 설계된 복합발전시스템은 외부 전원의 도움 없이 단독으로 부하에 항상 충분한 전력을 공급 할 수 있음을 나타낸다.

표2. Parameta of optimum design

파라메타	설정 값	비고
인버터 효율	1	1이하
태양광 발전효율	0.87	일반적인 효율
배터리 자가방전을	0.00058%/h	0.14%/day
배터리 충전효율	0.7	0.65-0.85
배터리 최대허용방전을	0.2	임의로 조정가능
시동풍속	1.5 m/s	
R <sub>LPS</sub>	0 %	독립전원만으로 작동

그림8은 복합발전 최적용량설계 알고리즘을 나타낸다. 풍속, 일사량 데이터가 미리 제공되며, 각 발전 용량 및 배터리 용량 조합이 설정되면 거기에 따라 1년간 전력부족량을 계산한다. 계산된 전력 부족량으로부터 전력 부족률을 산정하고 이 결과가 설정된 전력부족률보다 작으면 그 발전 조합은 적합한 것이 된다. 이와 같이 적합한 조합으로 선택된 것들중에 경제성 모델은 최적화 시키는 조합이 최종 설계 조합이 된다.

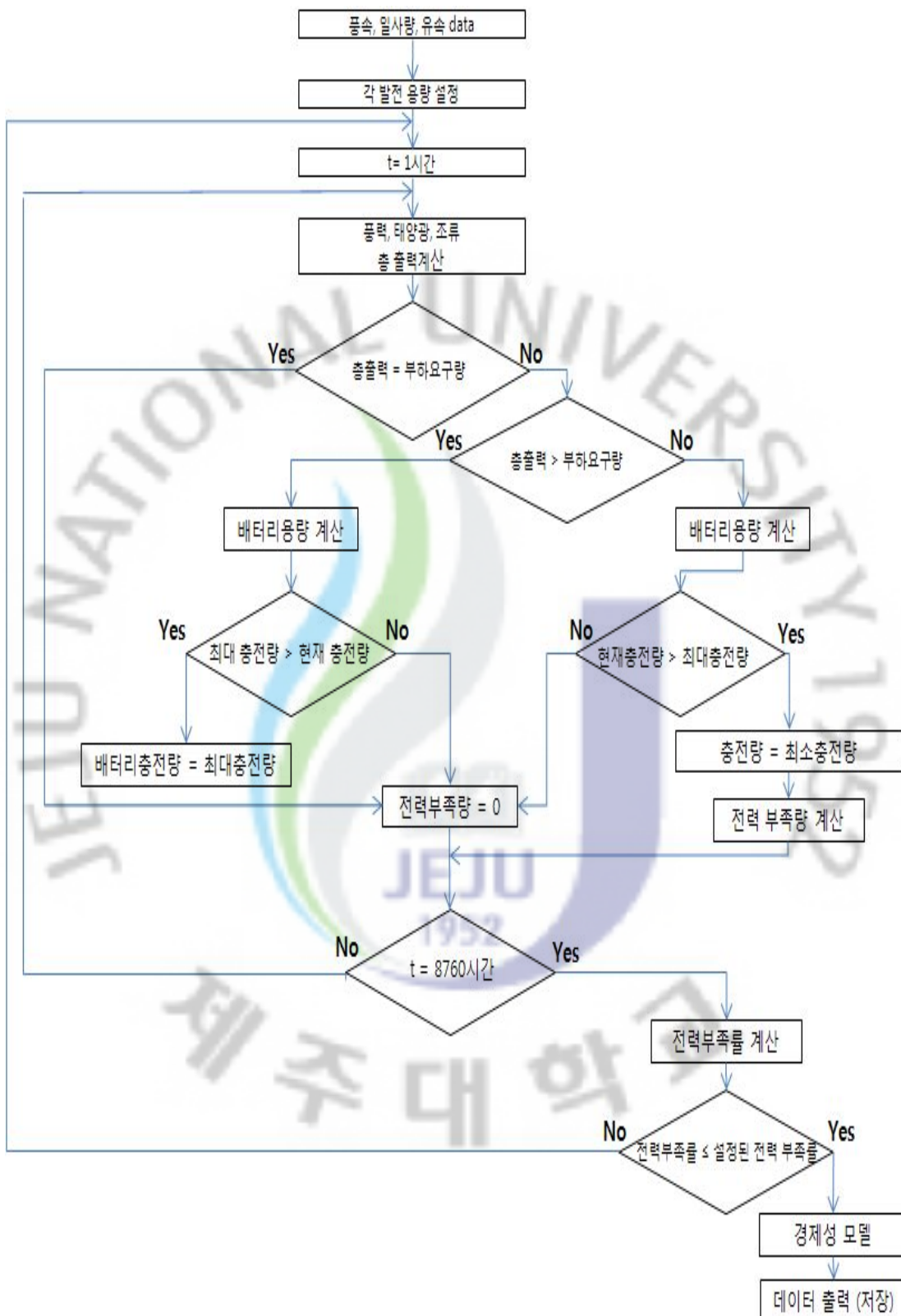


Fig8. Flow chart of optimum design



### 3.1.2 풍력-태양광 복합발전 결과

그림9는 풍력발전 용량이 3W, 부하가 2W일 때의 최적설계 결과를 나타낸다.

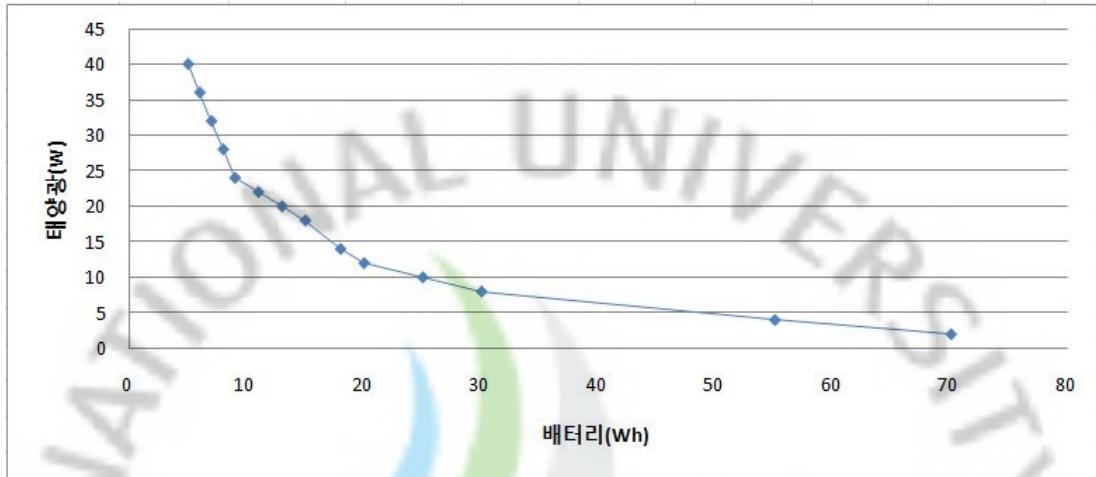


Fig9. Results of optimum design (wind 3W, load 2W)

이상과 같이 설정된 전력부족률  $P_{LPS}$  조건을 만족하는 여러 가지 복합발전 조합 중에서 식 (50)과 같이 정의되는 경제성 모델을 최소화하는 조합을 찾은 결과 표 11에 나타낸 것과 같은 결과를 얻었다. 이 결과에서 풍력과 사전에 고정된 것이며 PV 패널은 10W일 때가 가장 최적으로 나타났다. 배터리 용량은 25Wh로 설계되었다.

표3. Results of optimum design

발전형태	용량	비고
풍력	3W	1대
태양광	10W	1 패널
배터리	25Wh	12V-2.1Ah

## 제 2 절 실험결과

### 3.2.1 데이터 실측

3장에서 제시한 복합발전 최적설계방법을 풍력, 태양광발전에 적용하기 위하여 일정한 위치에서 풍속, 일사량 데이터를 측정하였다. 신뢰성 있는 설계를 위해서는 1년간의 데이터가 필요하지만 해상의 열악한 조건으로 인하여 약7일 간의 데이터를 확보하였다. 이 데이터는 실제 적용 시스템의 설계에는 미흡하지만 본 연구에서는 제시한 최적설계방법론의 검증, 그리고 설계된 제어기의 성능 등의 평가에는 유용한 것으로 사료된다.

그림10은 풍속자원량, 그림11은 일사량자원량 데이터를 나타낸 것이다. 그림10에서처럼 최고풍속은 9.8m/s정도이며, 평균풍속은 5.1m/s이다.

그림11은 제주의 5월 중 7일간의 일사량 데이터이며, 오전7시부터 일사량의 값이 측정되기 시작하여, 오후 7시까지 데이터 값을 얻을 수 있었다.

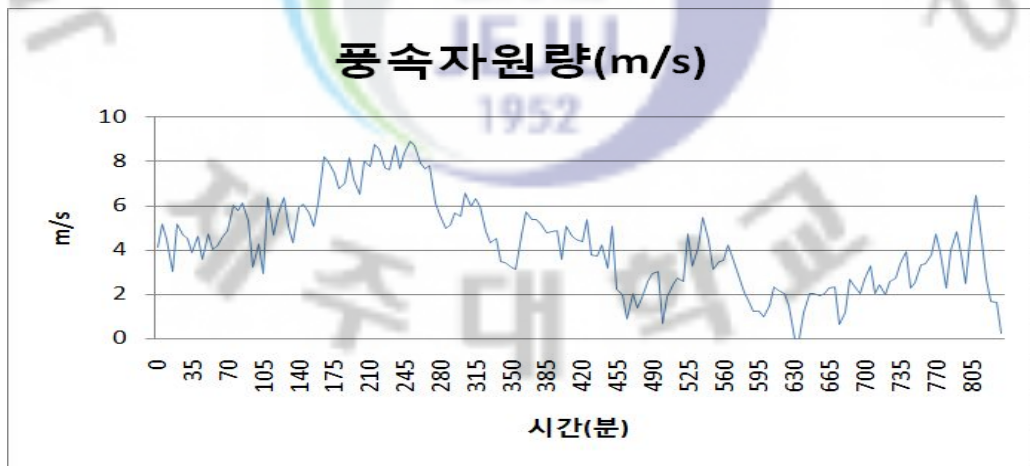


Fig10. Wind data

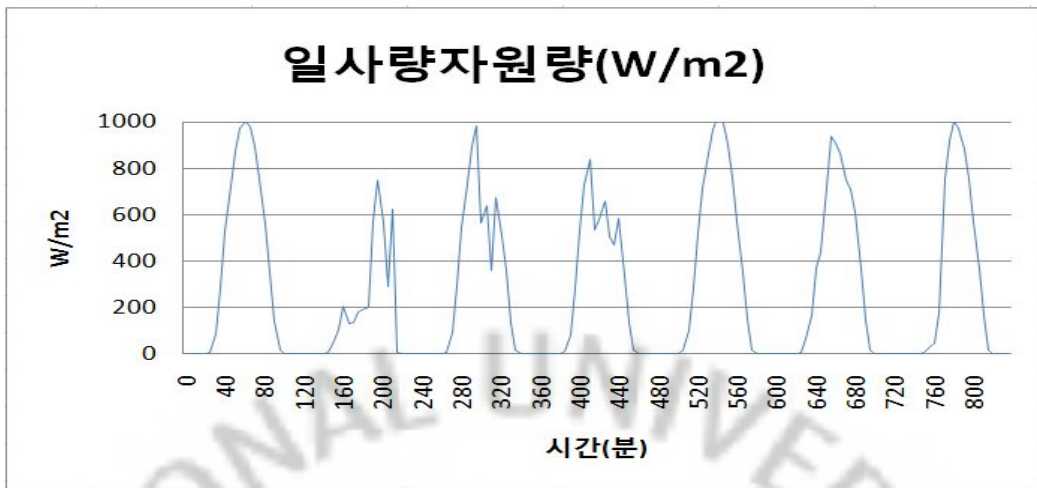


Fig11. Irradiance data

### 3.2.2 실험장치 구성

#### 3.2.2.1 풍력발전시스템

전술한 바와 같이 가장 소형 풍력발전기를 선택하였다. 선택된 소형풍력발전기는 그림12와 같으며 그 제원은 표 4와 같다.

그림 13은 풍력발전기의 외형 치수를 나타낸다. 또한 그림14는 제조사가 제공한 출력성능곡선을 나타낸다. 출력성능곡선은 풍속에 거의 비례하는 특성을 보인다.



Fig12. Small wind generator

표4. Wind generator specification

프로펠라 직경	28cm (4엽)
출 력	3W(12m/s)
발 전 기	동기식(12극)
기동풍속	0.6~0.8m/s
시동풍속	1.0m/s
정격풍속	12 m/s
사용온도	-20℃~50℃
중 량	약460g

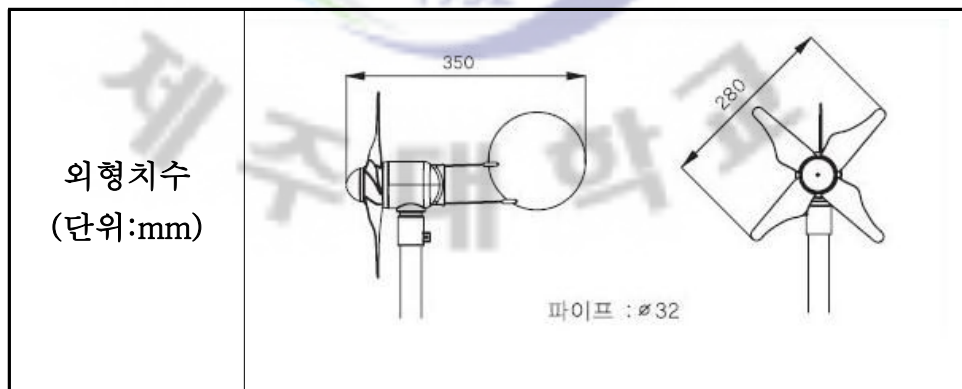


Fig13. Size of wind generator

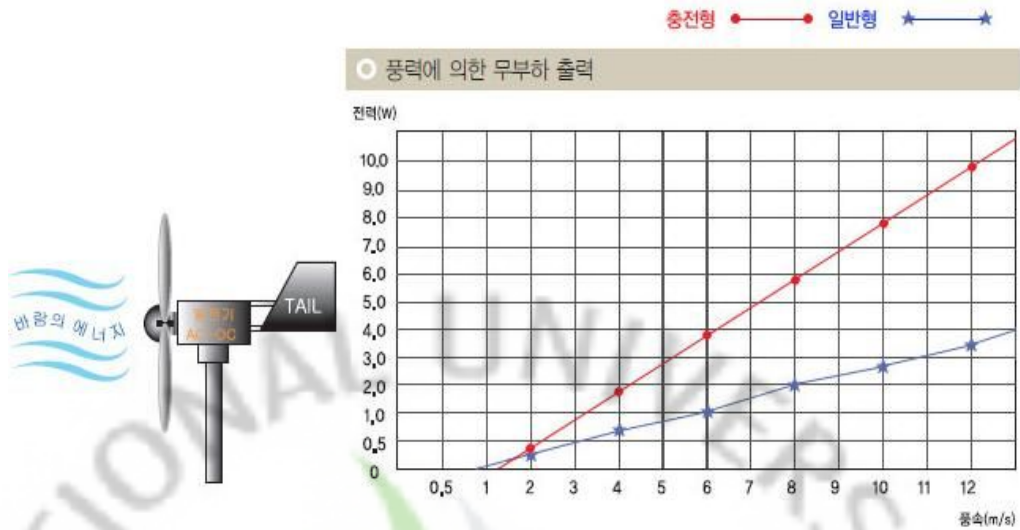


Fig14. Power of wind generator

풍력발전기의 성능을 실제 실험으로 그 성능을 확인하여보았다. 그림 15는 성능실험을 위한 장치이다. 이 장치는 원하는 풍속형태를 입력하면 자동으로 송풍기가 그 풍속을 발생시킬 수 있도록 설계되어 있다. 그림 16은 그 결과를 나타낸다. 결과를 살펴보면 시동 풍속은 약 0.5 m/s이고 풍속에 따른 출력도 제조사가 제공한 출력곡선과 유사함을 알 수 있다. 따라서 최적용량설계 시에 1차식으로 모델링한 출력곡선이 타당함을 알 수 있다.



Fig15. Wind generation simulator

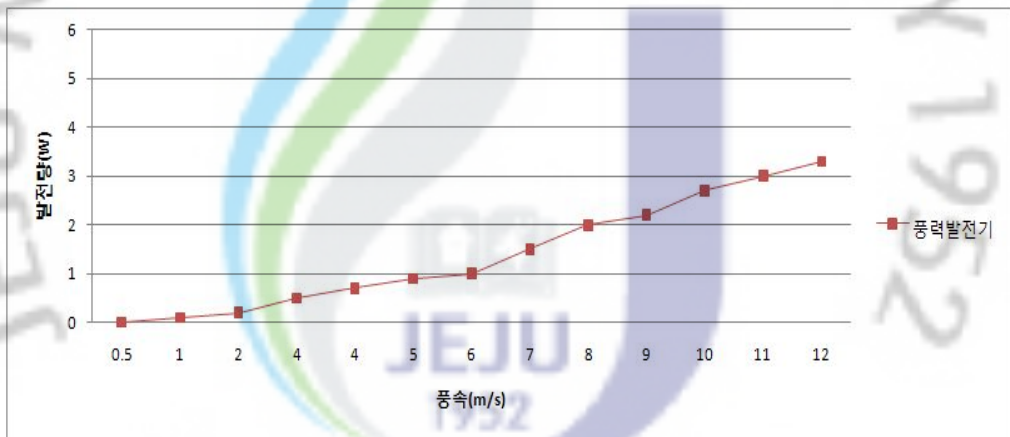


Fig16. Power of wind generator(experiment)

### 3.2.2.1 태양광 발전시스템

앞에서 제시되었던 최적 설계된 태양광 전지판은 10W이지만, 본 실험에 사용된 태양광 전지판은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 정격발전용량이 12W인 태양광 전지판이며 기타 사양을 표5에 나타내었다. 그림17은 태양광 전지판의 성능 곡선

을 나타낸다. 출력곡선에서 보여 지는 바와 같이 출력은 일사량에 따라 전체 발전량이 달라진다. 태양전지판은 또한 온도에 따라서도 성능이 달라지는데 일반적으로 온도가 높아지면 발전량이 줄어든다.

표5. Solar panel specification

규격	310*368*18mm
구분	단결정
무게	1EA = 1.5kg
정격용량	12W
최대전류	0.68A
개방전압	21.9V
단락전류	0.79A
최대전압	17.6V
배터리충전	12V

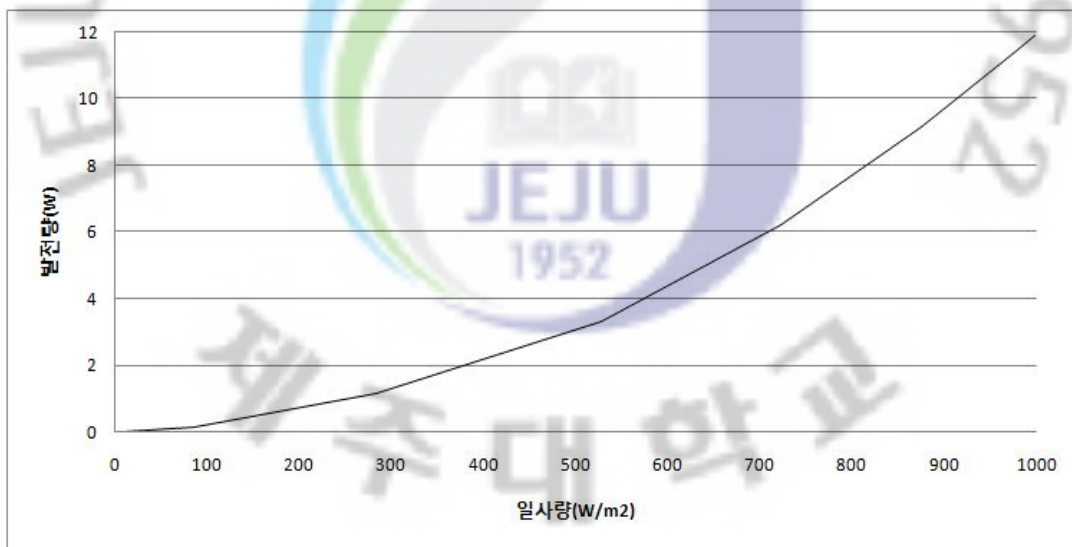


Fig17. Power efficiency graph of Photovoltaic

### 3.2.3 실험결과

최종 선택된 최적발전조합에 대하여 동일 기간의 자원량 데이터를 적용하여 각각의 발전량 및 배터리 충전 변화 등을 알아보았다. 그림 18은 풍력발전기에서 발생한 전력량, 그림19는 태양광발전기의 발생량, 그림20은 각 발전기에서 발생된 총 발전량이다. 각 발전기별 발전량을 측정된 결과는 풍력이 123Wh, 태양광이 396Wh이었다.

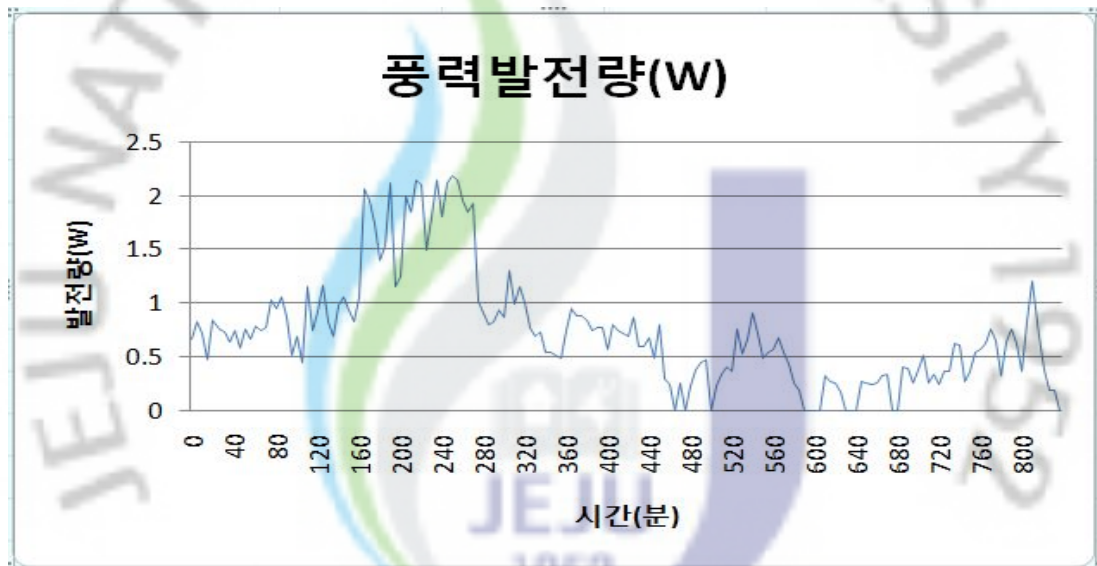


Fig18. Results of wind power



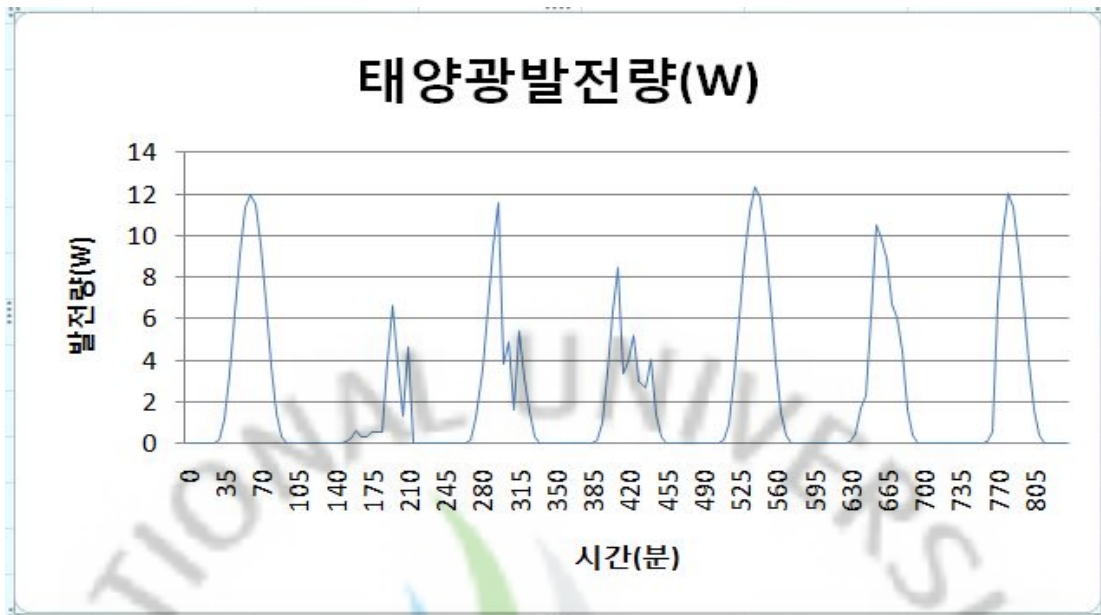


Fig19. Results of PV

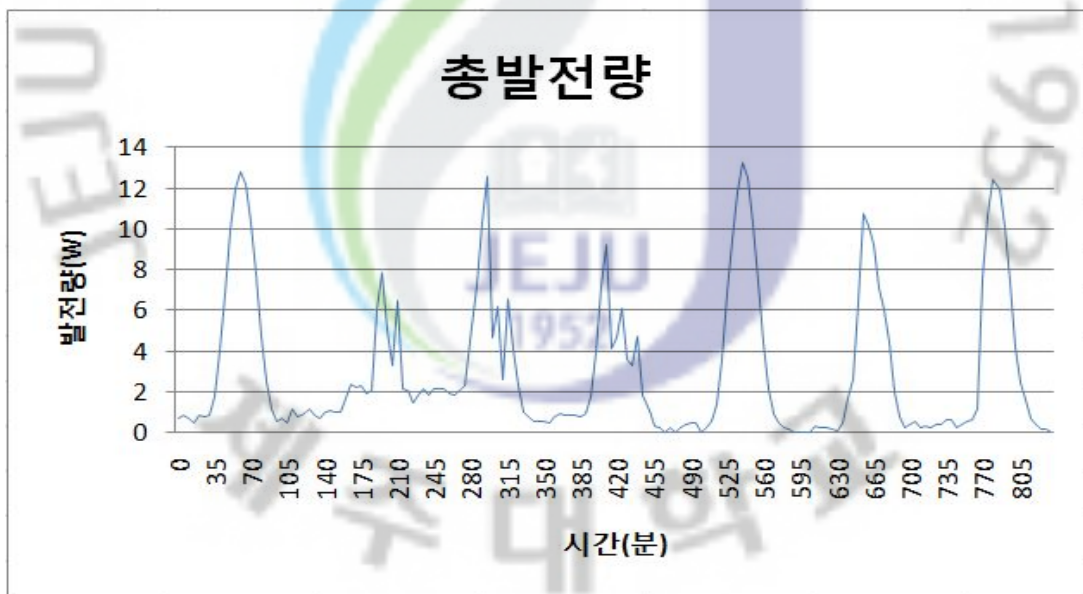


Fig20. Results of total power

그림21은 시간대별 발생한 총 전력과 요구되는 부하전력의 차를 나타낸 것이다. 그림에서 세로축 0W 이하로 전력은 복합발전시스템에서 발전된 전력이 부하요구전력보다 부족함을 나타낸다. 즉, 이 경우는 배터리에 충전된 전력이 방전되어 부족분을 채운 것이다.



Fig21. Differences between the load and total generating power

그림 22는 시간대별 배터리 충전상태를 나타낸 것이다. 고려된 기간동안 발생한 총 전력은 약 519Wh이며 부하에서 소비된 전력량은 336Wh 이다. 따라서 에너지 사용효율은 약 64.7%이다. 부하에 사용되지 아니한 전력의 대부분은 발생한 전력이 부하요구량보다 크면서 배터리가 최대로 충전된 상태여서 그대로 버려진 것이며 그 다음은 각종 변환효율 때문에 손실된 전력이다.

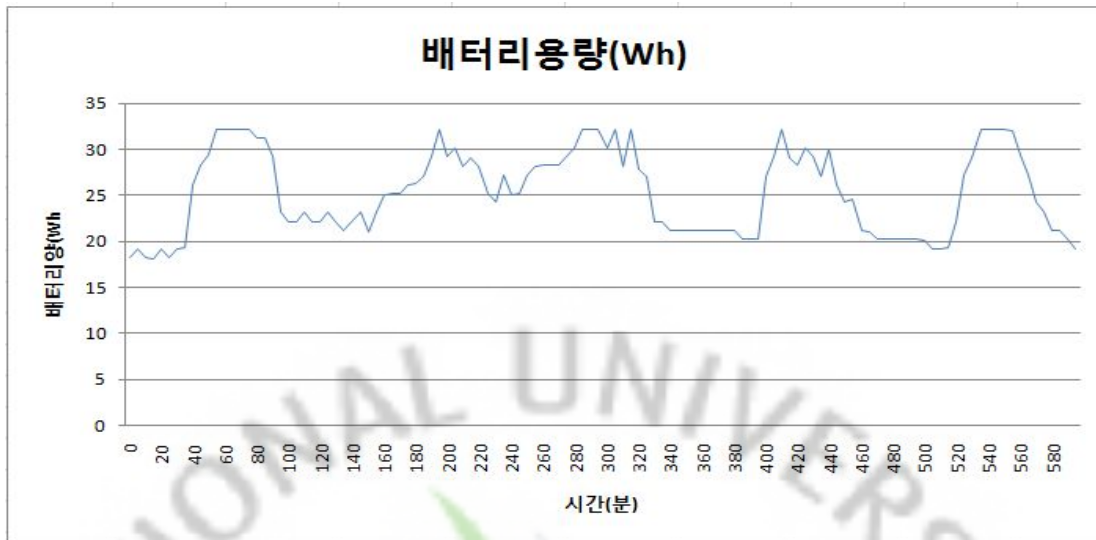


Fig22. The condition of battery charging

에너지 사용 효율을 높이기 위해서는 여분의 충전시스템을 설치하여 회수하는 방법이 있다. 이 경우는 다시 배터리 비용이 추가되므로 앞의 최적화 알고리즘에서 충전되지 않고 손실되는 에너지양 및 추가되는 배터리 용량도 함께 변수로 추가함으로써 경제성을 유지하는 여분의 충전 시스템을 설계할 수 있을 것이다. 또 다른 방법은 복합발전시스템 단독운전보다 한진 등 기존 계통과 연계하여 보조전력을 이용하는 방법이 있다. 이것은 최적화 알고리즘에 전력부족률  $P_{LPS}$ 를 또 다른 변수로 추가함으로써 최적의 복합발전 조합과 보조전력조합을 찾아 낼 수 있다. 그러나 이 방법은 독립전원용으로는 적용이 될 수 없다.

## 제 4 장 결론

본 연구에서는 두 가지 이상의 서로 다른 형태의 신재생 에너지발전 장치를 서로 병합하여 복합발전시스템을 구성함으로써 각각의 신재생 발전의 단점을 보완하여 개별 시스템 운영보다 경제적이며 효율적인 시스템을 설계 운영함으로써 신재생 에너지 이용의 효율성과 이용율을 동시에 높이기 위해서 복합발전시스템 최적용량설계에 대한 연구를 수행하였다.

먼저 풍력, 태양광 및 조류발전시스템의 기본 원리를 제시하고 이에 근거한 개별시스템의 출력과 축전시스템을 모델링 하였다. 또한 이를 기반으로 전력부족률에 따른 각 단위발전시스템의 최적 용량조합을 찾아내는 방법을 제시하였다. 이것은 다양한 복합시스템에 그대로 확장 적용되며 축전용량을 동시에 고려하는 신뢰성 있는 방법이다. 따라서 최적 축전시스템을 별도로 설계하지 아니하고 용량최적설계 시에 하나의 변수로 추가됨으로써 최적 축전시스템 용량이 자연스럽게 설계되는 방법이다. 아울러 경제성 모델을 도입하여 최적용량조합 중에서 가장 경제적인 용량조합을 도출하는 방법을 제시하였다.

이와 같이 최적 설계된 결과를 풍력, 태양광 복합발전시스템에 적용하여 시스템을 설계 실험을 수행하였다. 실험을 통한 결과 64.7%의 에너지 이용율을 나타내었으며, 부하에 안정적인 전력을 공급하면서 부하에 사용되지 아니한 전력은 대부분 발생된 전력이 부하요구량보다 크면서 배터리가 최대로 충전된 상태여서 그대로 버려진 전력과 각종 변환 손실로 인하여 방전된 것을 확인할 수 있었다.

이와 같은 연구결과의 기대효과는 최적복합발전 용량설계를 통해 복합발전시스템의 효율 및 경제성이 향상됨으로 인해 신재생 에너지 이용 및 보급이 활성화됨에 따라 좁게는 관련 업체들의 활성화부터 넓게는 국가 전체적으로 저탄소 녹색성장이라는 목표를 달성할 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 신재생에너지의 활용 확대는 청정에너지의 생산량 증대 및 그에 따른 석유 수입 대체 효과를 볼 수 있으며 산간 오지나 낙도에도 안정적인 전력공급이 독립적으로 가능하며, 신재생 에너지 복합발전의 폭넓은 새로운 장을 열어 일자리 창출 등 경제 활동의 활성화 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

향후 에너지 사용 효율을 높이기 위한 방법으로 배터리 비용과 용량을 최적화 알고리즘 변수로 추가하여 경제성을 유지하는 시스템 설계 및 최적화 알고리즘에 전력부족률  $P_{LPS}$ 를 또 다른 변수로 추가하여 최적의 복합발전 조합과 보조 전력조합(한전계통 연계) 대한 연구를 통하여 좀 더 효율적이고 경제적인 에너지 사용에 대하여 연구할 계획이다 .



## 참고문헌

- [1] 윤경훈, 2004, “태양광 기술 현황,” 한국에너지기술연구원 태양전지연구센터, 대전, pp.2~14
- [2] W.D. Sellogg, G. Venkataramanan, and V. Gerez, “GENERATION UNIT SIZING AND COST ANALYSIS FOR STAND-ALONE WIND, PHOTOVOLTAIC, AND HYBRID WIND/PV SYSTEM”, IEEE transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No.1, 1998.
- [3] 나계연, 정유근, 신동인, “태양광추적방식에 관한 사례 연구”, 대한건축학회, pp. 895-898, 2007.
- [4] 최정식, 고재섭, 정동화, “태양광 발전 시스템의 추적식 및 MPPT 제어기 개발”, Journal of the Korean Institute of Illuminationg and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.8, pp. 54~63, 2007.
- [5] S. H. Karaki, R. B. Chedid, R. Ramadan, “Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-Wind Energy Conversion Systems”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, 1999.
- [6] Ziyad M. Salameh, Bogdan S. Borowy, Atia R. A. Amin, “Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, 1995.
- [7] S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, “A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system”, Energy Policy, Volume 35, Issue 11, pp. 5708-5718, 2007.
- [8] G. Tina, S. Gagliano, S. Raiti, “Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment”, Solar Energy 80, 578-588, 2006.
- [9] TOMAS MARKVART, “SIZING OF HYBRID PHOTOVOLTAIC-WIND ENERGY SYSTEMS”, Solar Energy Vol. 57, No. 4, pp.277-281, 1996.
- [10] A. D. BAGUL, Z. M. SALAMEH and B. BOROWY, “sizing of a

stand-alone hybrid wind-photovoltaic system using a three-event probability density approximation", Solar Energy Vol. 56, No. 4, pp.323-335, 1996.

[11] Riad chedid, Saifur Rahman, "UNIT SIZING AND CONTROL OF HYBRID WIND-SOLAR POWER SYSTEMS", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No.1, 1997.

[12] 권병국, 이승철, 박찬업, "태양광-풍력 복합발전 시스템의 최적구성에 관한 연구", 200. 대한전기학회, pp. 1306-1308, 2002.

[13] 송도성, "태양광 발전효율 향상을 위한 태양 추적 제어에 관한 연구", 제주대학교

[14] Eftichios Koutroulis, Dionissia Kolokotsa, Antonis Potirakis and Kostas Kalaitzakis, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms", Solar Energy, Volume 80, Issue 9, pp. 1027-1088, 2006.

[15] Bogdan S. Borowy, Ziyad M. Salameh, "Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, 1994.

[16] 이정일, 서장수, 윤필현, 차인수, "태양광-풍력 복합발전시스템의 출력제어 특성에 관한 연구", 전력전자학술대회논문집, PP. 933-937, 2003.

## 감사의 글

굳은 각오를 다지고 대학원 생활을 시작하였지만 막상 뒤를 돌아보니 최선을 다하지 못한 것 같아 후회스럽습니다. 앞만 보고 달려오다 보니 놓친 것도 많고, 잃은 것도 많은데 이러한 저에게 따끔한 충고와 따뜻한 격려로 도와주신 제 주위에 모든 분들에게 감사의 말씀을 드립니다.

우선 여기까지 올 수 있도록 6년간 늘 저를 믿고 가르침을 주신 강철용 교수님께 가장 먼저 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 교수님께서 저에게 주신 가르침은 평생 잊지 않고 가슴에 새겨두겠습니다. 대학원을 무사히 졸업할 수 있게끔 지도해 주신 임종환교수님에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 논문 심사위원으로 저의 논문을 검토하여 주신 변영철 교수님과 대학생활과 대학원 생활까지 긴 시간동안 격려해 주신 조경호교수님, 최경현교수님, 김상재교수님께도 감사드립니다.

제가 연구실 랩장으로서 WBML연구실을 잘 이끌어 나갈 수 있게끔 도와주는 상섭이와 정규, 뽀질이 간다, 식구가 된지 얼마 안됐지만 열심히들 하는 상준이, 기민이, 동건이, 래운이, 준일이, 연구실 졸업생으로써 항상 연구실 일에 충성을 다해주시는 용환이형, 현철이형과 경훈이형, 동엽이, 대학원 생활에 많은 도움을 준 전조교 형찬이형에게도 고마움의 마음을 전합니다.

힘든 시련이 닥치면 힘들어하는 저에게 항상 큰 힘이 되어준 베프 남혁이와 지혜, 얼마안지나 태어날 짱이, 오쌍상민, 아방재석, 준자형진, 눈썹현식, 울보지훈에게 고마움을 전하며, 바쁘다는 핑계로 모임에 제대로 나가지는 못하지만 항상 챙겨주는 성철이, 정환이, 용만이, 효성이, 승환이, 대학생활시절부터 함께해온 거인으뜸, 제가 가장 두려워하는 박과돌 세용이, 항상 싫은 내색없이 묵묵히 실험을 도와주었던 의장이, 준호, 일만아라 캡틴 학성이형, 생각대로캡틴 경남이, 영원한 슈퍼스타캡틴 현철이, 영원한 부총 혁진이, 성환이, 용호, 만재형, 재용, 병훈, 진강, 태현, 동수, 원식, 영필, 봉진, 형우, 경호에게도 고마움을 전합니다.



물가에 내다놓은 어린아이 마냥 항상 저를 걱정해주고 챙겨주시는 어머니, 자식 뒷바라지에 고생하시는 아버지, 내 인생에 정신적 지주 근태형과 형수님, 사랑스런 건혁이와 건우, 예은이, 항상 막내동생이라며 챙겨주는 큰누나와 매형 그리고 시우, 나의 물질적 지주 작은누나에게 고마움을 전하며 마지막으로 항상 바쁘다는 핑계로 제대로 챙겨주지 못하는 쫄메난이뿐이 민선이, 내가 사랑하는 가족과 민선이에게 이 논문을 바칩니다.

2010년 12월 어느날.....



# 슈퍼스타여~~ 영원하라!!

