

에너지 자립섬을 위한 신재생복합발전시스템의 최적용량 설계에 관한 연구

장봉철* · 문채주† · 장영학** · 박태식** · 정문선**

A Study on Optimal Capacity Design of Renewable Combined Power System for Energy Self-Sufficient Island

Bong-Chul Chang* · Chae-Joo Moon† · Young-Hak Chang** · Tae-Sik Park** · Moon-Seon Jeong**

요약

최근 발전원가가 높은 도서지역의 디젤발전을 신재생에너지로 대체하는 추세이다. 이에 따라 전라남도는 디젤발전기에 의존하여 섬에 전기를 공급하는 지역을 대상으로 태양광과 풍력 그리고 에너지 저장장치 등을 이용한 친환경에너지원을 통해 전기를 공급하는 에너지 자립섬 조성사업을 추진하고 있다. 하지만 신재생에너지원의 용량 설계는 환경적, 지형적 조건으로 부하에 100%로 대응할 용량의 신재생에너지원을 설치하기란 어렵다. 또한 경제성 있는 하이브리드시스템 최적 구성을 위해서는 설계 단계부터 기후조건과 부하패턴 분석을 통해 시스템 구성요소의 적절한 용량 설계와 효과적인 운영을 고려한 마이크로그리드 설계가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 서남해안에 위치한 도서지역 중 300호 이상의 가구수를 갖고 증설이 요구되는 거문도를 대상으로 디젤 발전량 중 40%를 신재생에너지원으로 대체하는 하이브리드 발전시스템을 구성하여 최적조합과 용량산정 그리고 경제성에 대한 연구를 수행하고자 한다.

ABSTRACT

The recent trend is that diesel power generation on islands where its prime cost for power generation is high is replaced by new and renewable energy. Therefore, south Jeolla province is progressing the construction project of self-sufficient islands for the areas where power is supplied by depending on diesel generators, which is the project that power is supplied through eco-friendly energy source using sunlight, wind power and energy storage device etc. However, it is difficult to construct new and renewable energy source with the capacity to respond to the load perfectly due to its environmental and geographical conditions regarding capacity design of new and renewable energy. Besides, Microgrid design considering appropriate capacity design of the system components and efficient operation is required through the analysis of climate conditions and load patterns from the design stage for optimal composition of a hybrid system with economic feasibility. Therefore, this study is aimed to conduct a research on optimal combination, capacity calculation and economic feasibility by comprising a hybrid power generation system which will replace 40% of power generation by diesel as new and renewable energy source for Geomun Island where has more than 300 households and requires expansion of the facility among islands located in southwest coast.

키워드

Offgrid Island, Carbon Free, Energy Storage System, Hybrid System
전력미연계 도서, 무탄소배출, 에너지저장장치, 하이브리드시스템

* 전라남도 도청 경제과학국 에너지산업과(jbc4577@korea.kr)

• Received : Oct. 05, 2015, Revised : Nov. 13, 2015, Accepted : Nov. 23, 2015

** 국립목포대학교 스마트그리드연구소(yhchang@mkpo.ac.kr, points33@naver.com, suny3124@nate.com)

• Corresponding author : Chae-joo Moon

Dept. of Electrical Engineering College of Mokpo National University

† 교신저자: 국립목포대학교 스마트그리드연구소

Email : cjmoon@mkpo.ac.kr

• 접수일 : 2015. 10. 05

• 수정완료일 : 2015. 11. 13

• 게재확정일 : 2015. 11. 23

1. 서론

국내 전라남도는 2,219개 섬을 보유하고 있으며 전국 대비 65%를 차지하는 등 국내 최대 섬을 보유하고 있으나 원활한 전력공급이 이루어지고 있지 않고 있어, 주민들이 자가발전 하는 등 큰 불편을 겪고 있다. 이에 따라 전라남도는 디젤발전기에 의존하여 섬에 전기를 공급하는 지역을 대상으로 태양광과 풍력 그리고 에너지 저장장치 등을 이용한 친환경에너지원을 통해 전기를 공급하는 신재생에너지 자립섬 조성 사업을 추진하고 있다. 하지만 신재생에너지원은 화석 연료에 비해 연료비용이 들지 않는다는 장점이 있는 반면 에너지양은 간헐성이라는 단점이 존재하고, 도서 지역마다 기후조건과 부하사용량이 다르므로 부하의 용량에 맞추어 설비용량을 설계해야 한다. 또한 섬이라는 지형적조건과 국립공원 등으로 인해 부하에 100%로 대응할 용량의 신재생에너지원을 설치하기란 힘들다.

따라서 본 논문에서는 서남해안에 위치한 도서지역 중 300호 이상의 가구수를 갖고 증설이 요구되는 거문도를 대상으로 디젤 발전량 중 40%를 신재생에너지원으로 대체하는 하이브리드 발전시스템을 구성하여 최적조합과 용량산정 그리고 경제성에 대한 연구를 수행하고자 한다[1-4].

II. 독립형 하이브리드시스템 모델링

2.1 풍력발전

풍속 v [m/s]으로부터 얻는 풍력발전기의 출력은 식(1)과 같다.[3],[5].

$$P_m = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도(=1.225[kg/m³]), A 는 로터의 회전단면적[m²], C_p 는 풍력발전기의 출력계수이다. 본 논문에서 사용한 풍력발전기는 유니슨 사의 U5X를 사용하였고, 시동풍속과 정격풍속은 각각 3[m/s], 11.5[m/s]이며, 전력곡선은 수식1을 통해 얻어진 결과로 그림 1과 같다.

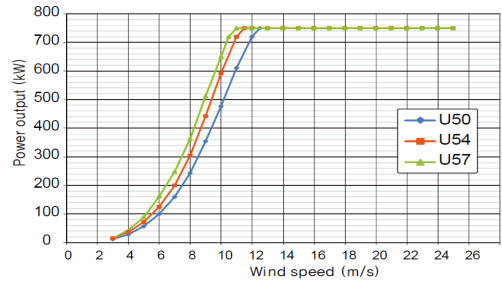


그림 1. U5X 전력곡선

Fig. 1 U5X power curve

풍속 데이터는 기상청에서 측정한 자료를 활용하였으며, 최근 5년간 9m높이에서 측정된 평균풍속은 3.9m/s인 것으로 분석되었다.

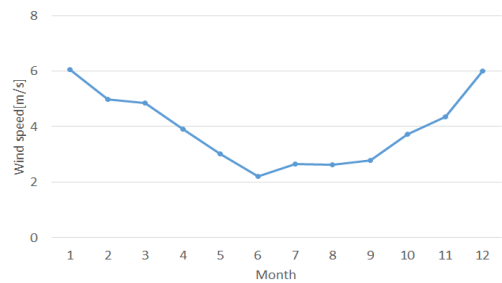


그림 2. 월별 평균풍속

Fig. 2 Monthly average wind speed

2.2 태양광발전

태양광발전설비는 설치 이후 시간이 지남에 따라 발전효율이 떨어지지만 최대 30년까지 사용이 가능하다. HOMER에서 사용하는 태양광 발전 출력은 식(2)와 같다[3],[5].

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\overline{G_T}}{G_{T,STC}} \right) \quad (2)$$

여기서 Y_{PV} 는 PV 어레이의 정격용량[kW], f_{PV} 는 PV derate계수[%], $\overline{G_T}$ 는 PV 어레이의 태양복사[kW/m²], $G_{T,STC}$ 는 표준테스트 조건에서의 입사복사 1[kW/m²]이다. 본 논문에서는 태양광 발전의 수명보다는 최대의 출력을 위해 f_{PV} 의 계수를 100[%]로 설정

하였다. 일사량은 HOMER에서 제공하는 북반구의 대표적인 일사량 샘플 데이터를 활용하였고, 일사량의 연간평균 청명도는 0.495이고, 일일평균 일사량은 4.07 kWh/m²이다.

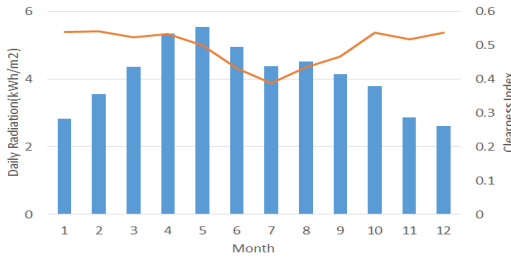


그림 3. 태양광 월별 일사량
Fig. 3 Monthly average solar radiation

2.3 전력사용량

거문도의 발전부하는 7월과 8월에 최대부하가 발생하고, 6월과 10월에 최소부하가 나타나며, 가을과 겨울철 중간부하가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

발전량과 부하량의 최대피크 시점인 7월과 8월 여름철 관광객 유입에 따른 영향으로 인한 것으로 분석된다. 이외의 계절적 영향인자는 냉난방 부하로 파악되며, 기타 주민 생업활동(농어업철) 등의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 2010년부터 5년 동안 도에서 발생한 평균발전량은 889,402[kWh], 부하의 평균 부하량은 1,217[kWh]으로 분석되었다.

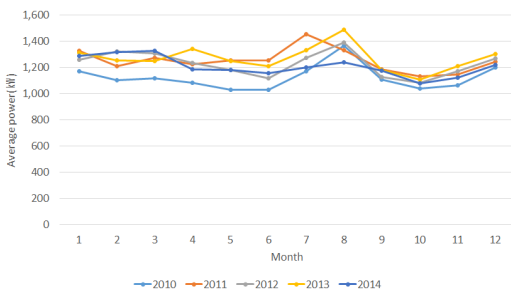


그림 4. 월별 평균전력
Fig. 4 Monthly average electricity generation

또한 거문도 최근 5년 동안의 전력 판매원가와 결손금액을 조사한 결과 판매원가는 평균 590원/kWh, 결

손 금액은 489원/kWh, 전력판매단가 101원/kWh인 것으로 분석되었다.

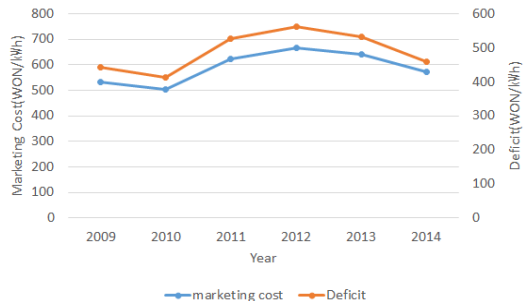


그림 5. 전력 판매원가와 결손금액
Fig. 5 Power marketing cost and the deficit

2.4 발전시스템 비용

각 발전기별 비용은 다음의 표 1과 같다[6]. 풍력, 태양광, 디젤, 배터리는 시중가격을 비교하여 가격을 산정하였고, 디젤발전기의 운영유지비용은 연간이 아닌 시간당으로 동작 시간 동안 계산되어진다[7-8].

표 1. 발전기 타입별 비용
Table 1. Generator type-specific costs

Components	Capital cost(\$)	Replacement cost(\$)	O&M cost(\$/yr)
Wind Turbine(10kW)	26,000	20,000	100
PV(1kW)	7,000	6,000	20
Battery	1,250	1,110	20
Converter(1kW)	800	750	20
Diesel (100kW)	18,000	18,000	0.15(\$/yr)

III. 최적설계 결과 및 민감도 분석

시뮬레이션 수행 결과 태양광발전시스템 1MW, 풍력발전기 750kW 3대, 디젤발전기 1MW, 리튬이온 8MW, 컨버터 1.5MW를 적용하는 것이 최적으로 분석되었으며, 이때 전체 전력사용량 중 40%를 신재생에너지원으로 해당 섬에 전력공급이 가능한 것으로 분석되었다. 발전원별 전력생산량을 월별로 분석한 결

과 그림 6과 같고, 발전 비율은 태양광 14%, 풍력 52%, 디젤 34%로 발전하는 것으로 분석되었다. 또한 최적 설계를 통한 순 현재비용은 약 578.5억원, 하이브리드시스템에서 생산되는 전력의 가격은(LCOE: Levelized Cost of Electricity) 489.17원/kWh이다.

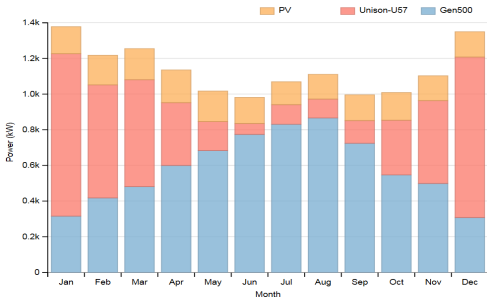


그림 6. 발전원별 월별 발전량
Fig. 6 Monthly power generation

Architecture						
	PV (kW)	Unison-U57	Gen500 (kW)	1kWh L	Converter (kW)	
	1,000	3	1,000	8,000	1,500	
	1,500	3	1,000	8,000	1,500	
	1,500	3	1,000	6,000	1,500	

그림 7. 하이브리드시스템의 최적화 결과(1)
Fig. 7 Optimization results in a hybrid system(1)

Cost					System
COE (₩/kWh)	NPC (₩)	Operating cost (₩/yr)	Initial capital (₩)	Ren Frac (%)	
₩489.17	₩57.88	₩2.578	₩22.58	40	
₩507.06	₩60.08	₩2.448	₩26.68	44	
₩507.77	₩60.18	₩2.558	₩25.18	41	

그림 8. 하이브리드시스템의 최적화 결과(2)
Fig. 8 Optimization results in a hybrid system(2)

민감도 분석의 변수로 연간 평균풍속과 디젤연료 가격을 적용하였다. 태양광발전시스템 1MW, 풍력발전기 750kW 3대, 디젤발전기 1MW, 리튬이온 8MW, 컨버터 1.5MW를 적용한 상태에서 디젤가격 변동에 따른 민감도 분석을 한계발전비용, 발전량당 비용으로 분석한 결과 그림 9과 같다. 디젤가격이 상승할수록 한계발전비용과 디젤 발전량당 비용은 최소 3%에서 최대 4% 상승하는 것으로 분석되었다.

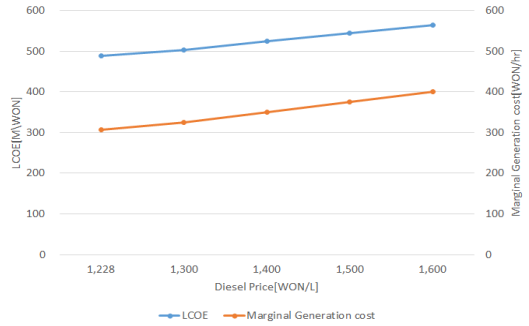


그림 9. 디젤가격 변동에 따른 LCOE와 한계발전비용

Fig. 9 LCOE and marginal generation costs on diesel price fluctuations

풍속변동에 따른 민감도 분석을 평균출력, 발전량당 비용을 분석한 결과 그림 10과 같다. 풍속이 증가함에 발전량은 증가하고 LCOE는 485.3 WON/kWh에서 353.25 WON/kWh로 감소하는 것으로 분석되었다.

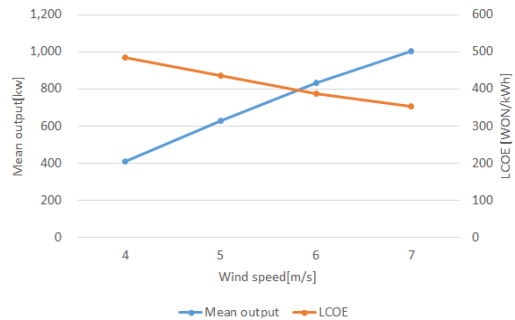


그림 10. 풍속변화에 따른 출력량 변화

Fig. 10 Average power cost according to the wind speed variation

IV. 결 론

본 논문에서는 거문도를 대상으로 디젤발전량 중 40%를 신재생에너지원으로 대체하고자 HOMER프로그램을 이용해 신재생복합발전시스템을 구성하여 최적조합과 용량산정 그리고 디젤과 풍속에 따른 LCOE 민감도를 분석한 결과 다음과 같다.

최적용량 산정 결과 태양광발전 1MW, 풍력발전기

750kW 3대, 디젤발전기 1MW이며, 이 경우 총 발전량 대비 40%를 신재생에너지원으로 전력 생산이 가능하며, 순 현재비용은 약 578.5억원, LCOE값은 489.17원/kWh으로 분석되었다.

신재생복합발전시스템의 디젤과 풍속에 따른 민감도를 분석한 결과 한계발전비용, 디젤 발전량당 비용은 평균 3%~4%로 유사한 비율로 증가하는 것으로 분석되었고, 풍속이 높아질수록 균등화발전가는 485.3원/kWh에서 353.25원/kWh로 9%~13%까지 감소하는 것으로 분석되었다.

향후 풍력발전기 최적 설치위치에 기상탑을 설치하여 보다 더 정확한 기상자료를 적용한다면 기상청 자료를 기반으로 현재 분석된 발전용량보다 더 정확하고 높은 값을 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구논문은 2015년 목포대학교 연구년 교수 지원금과 목포대학교 스마트그리드연구소 지원 및 한국정보통신산업진흥원, 전라남도, 여수시의 2014년도 지역SW융합제품 상용화지원사업의 연구결과로 수행되었습니다.

Reference

[1] S. Park, Y. Lee, Y. Choi, and K. Lee, "Optimization of Residential Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid System Using HOMER," *The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 59, no. 1, Mar. 2010, pp. 129-133.

[2] S. Yang, J. Kwon, and W. Kim, "The Design of Operating System on Wind Power Plant," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 1, Feb. 2011, pp. 136-141.

[3] M. Jeong, C. Moon, Y. Chang, T. Park, and S. Lee, "A Study on Optimization Design of Off-grid Hybrid Power Generation System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 2, Feb.

2015, pp. 247-252.

[4] H. Kim, "Development of a stand-alone solar street light controller integrated," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 6, June 2014, pp. 641-647

[5] J. Lim and H. Lim, "Optimal Capacity Design and Economic Evaluation of Hybrid Generation Systems Based on the Load Characteristics," *J. of Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 30, no. 10, Oct. 2013, pp. 1103-1109.

[6] Intergovernmental Panel for Climate Change(IPCC), "IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation(SRREN)," IPCC' special reports, Nov, 2011.

[7] U.S. Energy Information Administration(EIA), "Assumptions to Annual Energy Outlook 2011," Annual Energy Outlook Report, July 2011.

[8] S. Baron, "Developing Power Business Plan: Empowering the Bottom of the Pyramid," Master's Thesis, *Natural Resources and Environment, University of Michigan*, Apr. 2004.

저자 소개

장봉철(Bong-Chul Chang)



1986년 조선대학교 전기공학과 (학사)
 2008년 2월 전남대학교 산업공학과(석사)
 1977년~현재 전라남도청 근무 (에너지, 환경, 바이오산업 등 분야에서 근무)

※ 관심분야 : 에너지자립성, 풍력발전단지개발, 에너지저장



문채주(Chae-Joo Moon)

1983년 및 1994년 전남대학교 계측공학과(공학사), 대학원 전기공학과(공학석사, 공학박사),

1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기공학과 교수

1986~1997 한국전력기술책임연구원

2011 광주일보 테마칼럼니스트

2011~2012 전력전자학회 부회장

현재 이투데이 및 한국전기신문 칼럼니스트

목포대학교 스마트그리드연구소장

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 풍력성능평가, 전력변환시스템, 스마트그리드, 마이크로그리드



정문선(Moon-Seon Jeong)

2009년 목포대 전기공학과 졸업, 2011년 목포대 대학원 전기공학과 졸업(공학 석사)

2011년~2014년 목포대 대학원 전기공학과 박사 졸업

현재 목포대학교 스마트그리드 연구소 연구전임교수

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 풍력단지 설계, 풍력성능평가, 스마트그리드, 마이크로그리드



장영학(Young-Hak Chang)

1981년 전남대학교 공대 계측공학과 졸업

1984년 전남대학교 대학원 전기공학과(석사)

1991년 전남대학교 대학원 전기공학과(공박)

1991년 ~ 현재 목포대학교 제어로봇공학과 교수

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 제어 로봇, 스마트그리드, 마이크로그리드

박태식(Tae-Sik Park)



1996년 고려대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)

2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박)

2000년~2005년 삼성전자 책임연구원

2005년~2013년 특허청 사무관,

2010년~2011년 미국 University of Michigan Researching fellow

2013년~현재 국립목포대학교 전기공학과 조교수

※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템