

독립형 하이브리드발전시스템 최적설계에 관한 연구

정문선* · 문채주** · 장영학*** · 박태식*** · 이숙희****

A Study on Optimization Design of Off-grid Hybrid Power Generation System

Moon-Seon Jeong* · Chae-Joo Moon** · Young-Hak Chang*** · Tae-Sik Park*** · Suk-Hee Lee****

요 약

전력계통이 연계되지 않는 국내 유인도서의 대부분의 전력은 디젤발전기를 통해 공급하고 있으나 도서지역의 경우 유통비가 내륙지역에 비해 비싸고 이를 운송하는 것이 어렵다. 이러한 이유로 최근 자연자원을 활용하여 신재생에너지를 도입을 하고 있지만 자연환경에 의존하는 신재생에너지원은 안정적인 전력공급이 어렵기 때문에 기존 디젤발전과 신재생에너지가 포함된 하이브리드시스템을 통해 전력을 공급하는 것이 필요하다. 본 논문은 풍력, 태양광, 배터리 및 디젤엔진 등 에너지저장장치를 포함한 하이브리드시스템의 타당성 연구결과를 설명한다. 이 연구 대상은 전력계통에 연계되지 않은 전라남도 서거차도이며, 최소비용을 투자하여 탄소배출을 최소화하는 최적 용량의 하이브리드시스템 구성을 제안한다. 이 시스템에 대한 경제적인 적합성은 HOMER 프로그램을 사용하여 분석하였다.

ABSTRACT

The majority of electric power in the domestic manned islands with off-grid power system is supplied by the diesel generators. However, in the case of off-grid islands the fuel cost is more expensive to inland areas and difficult to transport them to islands. So the development of renewable energy system using natural resource have been recently introduced. But renewable energy that depend on the natural environment, it is necessary to organized the hybrid system with existing diesel engine because the energy is difficult to maintain stable electric power. This paper presents the results of a feasibility study of hybrid system with energy storage system such as wind, solar, battery and diesel engine. The study included off-grid island as the Seogeochoado islands located in Jeollanamdo Province. And, the paper proposed an optimal capacity of hybrid system configuration to maintain carbon free with minimum investment cost. the analysis of economic adaptability performed by HOMER program.

키워드

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

* 국립목포대학교 스마트그리드연구소(suny3124@nate.com)

*** 국립목포대학교 스마트그리드연구소(yhchang@mokpo.ac.kr)

**** 그린정보시스템 대표이사

** 교신저자(corresponding author) : 국립목포대학교 스마트그리드연구소(cjmoon@mokpo.ac.kr)

접수일자 : 2014. 12. 05

심사(수정)일자 : 2015. 01. 16

게재 확정일자 : 2015. 02. 09

1. 서론

국내 유인도서지역의 전력은 디젤발전기를 통해 전력을 공급하고 있고, 전력공급단가는 내륙지역에 비해 평균 4배에서 10배 이상 차이가 발생하므로 경제성 확보를 위해 신재생에너지를 적용하고 있다. 하지만 기상조건에 의존도가 큰 신재생에너지원은 안정적인 전력공급이 힘들다. 따라서 환경측면과 안정성을 동시에 고려한다면 풍력, 태양광 등 신재생 에너지와 디젤 발전을 포함한 하이브리드 발전시스템이 필요하다 [1-3]. 하이브리드시스템과 관련된 주 연구결과를 보면 부하와 발전의 에너지 수급균형, 최대출력점 추종 제어, 배터리 용량 최적화에 따른 백업시스템 응답특성 등이다. 국내외에는 독립형 하이브리드시스템에 대한 사용이 증가하고 있지만 부하에 필요한 신재생에너지원의 효율적 설계와 경제성 분석에 대해서는 아직 많은 연구가 진행되고 있다. HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewable)는 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)연구소에서 개발된 소프트웨어이다. 이 프로그램을 통해 디젤, 풍력, 태양광, 연료전지 및 배터리 등을 쉽게 적용해서 다양한 변수(발전기 가격, 수명, 교체비용, 연유지보수비용, 수명, 경사각, 사용 스케줄, 일산화 탄소량, 질소산화물량, 탄화수소량, 평균풍속, 전력곡선, 충전값, 월별 및 시간별 부하량)들을 고려해 최적의 발전용량과 시스템을 계산한다. 분석에 사용한 HOMER는 결과를 생산비용, 유지비, NPC(Net Present Cost) 등을 고려하여 으뜸차순으로 제시하고 있으며, 발전설비구성의 조합들 중 최적의 시나리오를 보여준다 [5-7].

본 논문에서는 전남 진도 조도면에 위치한 서거차도를 대상으로 전력 수요량을 분석하고 경제적이고 효율적인 설계 방안의 독립형 하이브리드시스템을 제시하고, 시뮬레이션을 통해 에너지원증가에 따른 비용산출과 탄소배출량을 비교 분석함으로써 디젤발전시스템 대신 신재생 복합 전력시스템의 보급 가능성을 판단하고 신재생에너지원 최적설계를 통해 신재생에너지원 용량을 도출하고자 한다.

II. 독립형 하이브리드시스템 모델링

2.1 풍력발전

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

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

여기서, ρ 는 공기밀도(=1.225[kg/m³]), A 는 로터의 회전단면적[m²], C_p 는 풍력발전기의 출력계수이다. 본 논문에서 사용한 풍력발전기는 NPS 100-21을 사용하였고, 시동풍속과 정격풍속은 각각 3.5[m/s], 14.5[m/s]이며, 파워커브 수식을 통해 얻어진 결과로 그림 1과 같다. NPS사의 100[kW]급 풍력발전기는 전남 진도군 가사도 에너지 자립섬에 적용된 풍력발전기이다.

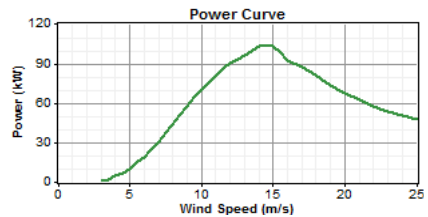


그림 1. NPS - 21 전력곡선
Fig. 1 NPS -21 power curve

2.2 태양광발전

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

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

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 설정하였다.

III. 서거차도 하이브리드시스템 시뮬레이션

3.1 에너지원의 용량산정

서거차도 주민들의 업종특성으로 인해 미역양식이 이루어지는 3월에서 6월까지 전력소비가 높으며 가을은 멀치건조로 인해 최대전력이 높게 나타나고 있다. 2011년부터 3년 동안 도에서 발생한 발전량과 소비량은 86,963[kWh], 25,443[kWh]이며, 부하의 최대평균은 228[kWh]으로 분석되었다.

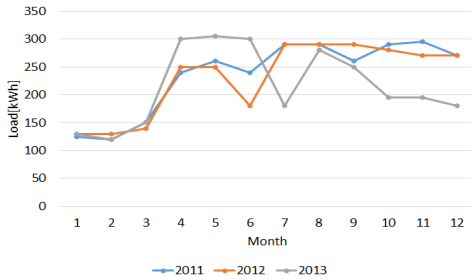


그림 2. 서거차도 월별 최대전력량
Fig. 2 Seogechado monthly maximum

3.2 풍속 및 일사량데이터

서거차도에 풍력발전기 허브 높이인 37[m]에서의 와이블 분포를 나타낸 것이다. 와이블 분포의 척도계수와 형상계수는 각각 $c=8.05[m/s]$, $k=1.93$ 이다.

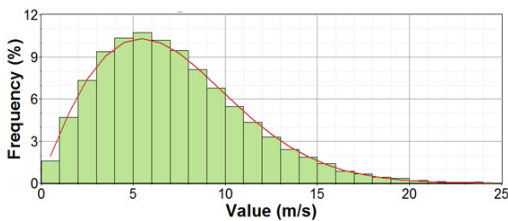


그림 3. 와이블 분포
Fig. 3 Weibull distribution

일사량은 NASA Surface Meteorology and Solar Energy 홈페이지를 통해 동경 125° 54', 북위 34° 15'의 서거차도의 데이터를 사용하였다[8].

수식(2)를 통해 서거차도 태양광의 평균 일사량은 4.13596[kWh/m²/d]이며, 청명도는 0.493으로 분석되었다.

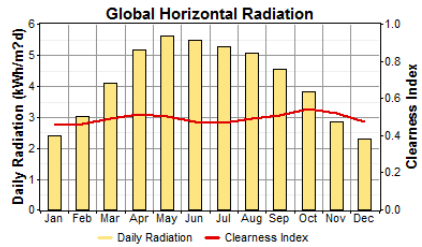


그림 4. 일사량 및 청명도
Fig. 4 Radiation and clarity

3.3 발전시스템 비용

HOMER 프로그램을 통해 경제성을 평가하기 위해서는 초기투자비용과 교체비용, 그리고 운영유지비용 변수를 적용하여 경제성을 평가한다. 시뮬레이션을 위한 각 발전기별 1kW당 비용은 다음의 표 1과 같다[9]. 풍력, 태양광, 디젤, 배터리는 시중가격을 비교하여 가격을 산정하였고, 디젤발전기의 운영유지비용은 연간이 아닌 시간당으로 동작 시간 동안 계산되어진다.

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

| Generator | Capital [\$] | Replacement [\$] | O&M [\$/yr] |
|-----------|--------------|------------------|-------------|
| Wind | 4,806 | 1922 | 4.6 |
| PV | 5,765 | 3,075 | 97.5 |
| Battery | 404 | 386 | 10 |
| Diesel | 1,345 | 1,076 | 0.012 |
| converter | 800 | 750 | 20 |

3.4 발전기별 용량 고려사항

기존 발전시스템에서 신재생에너지를 적용해야 할 최적의 용량 산정을 위해 표2와 같이 각각의 용량을 변수로 고려하였다.

표 2. 신재생에너지 용량 변수
Table 2. Renewable energy capacity variable

| Generator | [kW] |
|--------------|---------------|
| Wind turbine | 100, 200 |
| PV array | 100, 150, 200 |
| Battery | 500, 1000 |
| Diesel | 50, 100, 150 |
| Converter | 300, 600, 900 |

IV. 최적설계 결과

본 논문에서는 총 5가지 변수(풍력, 태양광, 배터리, 디젤, 컨버터)를 하이브리드시스템에 적용하여 HOMER를 통해 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과로서, 태양광발전 100[kW], 풍력 100[kW], 배터리 0.5[MWh], 디젤 50[kW]를 적용 하였을 경우 가장 경제적인 것으로 분석되었고, 1년 간 사용되는 디젤연료는 약 922[L]이다.

| | PV (kW) | NI(B) | Label(SK) | Conv. (kW) | Initial Cost(\$) | Operating Cost(\$/yr) | Total NPC | CO ₂ (kg/yr) | |
|--------|---------|-------|-----------|------------|------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|--------|
| Case-1 | 100 | 1 | 50 | 72 | 300 | \$ 59,633,400 | 40,249 | \$ 59,154,364 | 36,000 |
| Case-2 | 100 | 1 | 100 | 72 | 300 | \$ 59,070,000 | 39,476 | \$ 59,211,738 | 36,000 |
| Case-3 | 100 | 1 | 150 | 72 | 300 | \$ 58,774,000 | 36,794 | \$ 59,270,264 | 36,000 |
| Case-4 | 100 | 1 | 50 | 144 | 300 | \$ 59,941,000 | 52,615 | \$ 59,514,440 | 36,000 |
| Case-5 | 100 | 1 | 50 | 72 | 600 | \$ 59,879,000 | 52,226 | \$ 59,547,472 | 36,000 |

그림 5. 하이브리드시스템의 최적화 결과
Fig. 5 Optimization results in a hybrid system

실제 신재생에너지원과 디젤발전기 가동 비율을 보면 태양광 32[%], 풍력발전기 67[%], 디젤발전기 1[%]로 분석되었다. 또한 신재생에너지원의 용량 변화에 따른 전기 생산 비용과 탄소배출 등을 비교해보기 위해 디젤용량과 배터리 용량은 그대로 둔 상태에서 풍력발전기와 태양광 용량에 변화를 주었을 때를 비교하면 표 3과 같다.

표 3. 태양광 및 풍력용량 변화
Table 3. Capacity change of solar and wind

| | PV | Wind |
|--------|-----|------|
| Case-1 | 100 | 100 |
| Case-2 | 100 | 200 |
| Case-3 | 150 | 100 |
| Case-4 | 150 | 200 |
| Case-5 | 200 | 100 |

그림 6과 그림 7과 같이 발전시스템의 초기투자비용, 교체비용 및 운영과 유지비용을 합한 전체 비용을 봤을 경우 Case-1이 가장 저렴한 것으로 분석되었다.

또한 Case-1을 제외한 나머지 Case들은 초기투자비용이 크지만, 태양광과 풍력발전용량 증가로 인해

디젤발전기 가동과 시운전 횟수가 줄어드는 것을 확인 하였다. 하지만 본 논문에서 사용한 프로그램은 연료비만 고려되었기 때문에 디젤 가동율이 높아질수록 연료 운송비 또한 추가 발생하고, 탄소배출량 또한 증가 한다는 단점을 가지고 있다.

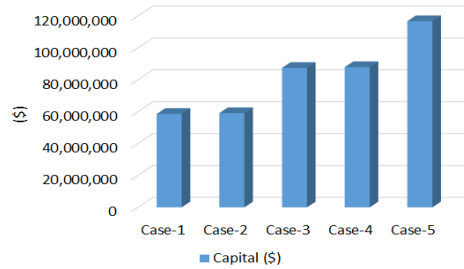


그림 6. Case 별 초기 투자비용
Fig. 6 Case-specific initial investment costs

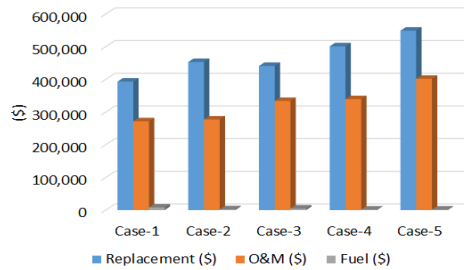


그림 7. Case 별 추가 비용
Fig. 7 Case-specific additional cost

Case별 일산화탄소, 질소산화물, 이산화탄소 배출량은 그림 8과 같다. Case-3의 경우 Case-1보다 태양광을 50[kW]높였지만 탄소배출량이 많다. 이는 서거차도의 소비량이 낮 시간보다는 아침에 소비량이 많아 디젤 발전기를 가동하고 그로 인해 탄소배출량이 많아진 경우로 분석된다.

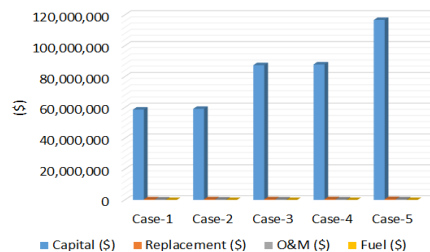


그림 8. 각 Case별 탄소배출량
Fig. 8 Case-specific carbon emission quantity

V. 결론

본 연구에서는 하이브리드시스템을 도서지역에 적용하고자 하는 신재생에너지원의 최적설계를 수행하고 그 결과를 검토하였다. 또한 신재생에너지원을 증가했을 때 발생하는 초기투자비용과 전체 비용 그리고 탄소배출량에 대한 분석을 통해 하이브리드시스템의 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

최적용량 산정 결과 태양광발전 100[kW], 풍력 100[kW], 배터리 0.5[MWh], 디젤 50[kW]이며, 가동 비율은 태양광 32[%], 풍력발전기 67[%], 디젤발전기 1[%]로 분석된 Case-1이 투자대비 가장 최적이다.

하지만 부하증가와 계통의 안정성 그리고 탄소배출량을 고려했을 때 Case-2로 설계하는 것이 최적이라 판단된다. 초기투자비용은 증가하지만 연료비와 탄소배출량은 상당히 감소시킬 수 있는 하이브리드시스템이 적합할 것으로 판단된다.

향후 각 발전기별 실제 전력 출력량과 시뮬레이션 결과를 비교하는 연구가 진행되어야 하며, 이를 통해 탄소배출과 투자비용을 비교함으로써 최적 하이브리드시스템을 구성할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 목포대학교 스마트그리드연구소 지원과 한국정보통신산업진흥원, 전라남도, 여수시의 2014년도 지역SW융합제품 상용화지원사업의 연구결과로 수행되었음

References

- [1] D. J. Lee, and L. Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/ Energy Storage System Part 1: Time-Domain Simulation," *IEEE Trans. of Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, Mar. 2008, pp. 311-320.
- [2] S. Yang, J. Kwon, and W. Kim, "The Design of Operating System on Wind Power Plant," *The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 1, February. 2011, pp. 136-141.
- [3] H. Kim, J., "Development of a stand-alone solar

street light controller integrated," *The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 6, June. 2014, pp. 641-647.

- [4] S. Park and Y. LI and Y. Choi and K. Lee, "Optimization of Residential Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid System Using HOMER," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 59P, no. 1, March. 2010, pp. 129-133.
- [5] S. Silva, M. Oliveira and M. Severino, " Sizing and optimization photovoltaic, fuel cell and battery hybrid system," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 9, no. 1, June. 2011, pp. 83-88.
- [6] P. Bajpai, S. Kumar and N. Kishore, " Sizing optimization and analysis of a stand-alone WTC system using hybrid energy storage technologies," *Int. Conf. Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies*, June. 2010, pp. 1-6.
- [7] A. Rohani, K. Mazlumi and H. Kord, " Modeling of a hybrid power system for economic analysis and environmental impact in HOMER," *IEEE Electrical Engineering Iranian Conf.*, May. 2010, pp. 819-823.
- [8] <http://eosweb.larc.nasa.gov>
- [9] S. Baron, "Developing Power Business Plan: Empowering the Bottom of the Pyramid," *Master of Science in Natural Resources and Environment, University of Michigan*, April. 2004, pp. 8-12.

저자 소개



정문선(Moon-Seon Jeong)

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

2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

2014년~현재 목포대학교 스마트그리드 연구소 연구전임교수

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



문채주(Chae-Joo Moon)

1983년 및 1994년 전남대학교 계측공학과(공학사), 대학원 전기공학과(공학석사, 공학박사), 1997년~현재 목포대학교 공과대

학 전기공학과 교수

1986~1997 한국전력기술책임연구원

2011 광주일보 테마칼럼니스트

2011~2012 전력전자학회 부회장

현재 이투스 및 한국전기신문 칼럼니스트

목포대학교 스마트그리드연구소장

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



이숙희(Lee-Suk Hee)

2006 서강정보대학 사회복지학과 졸업

2010년 동신대학교 컴퓨터학과 졸업

2013~현재 목포대학교 전기공학 석사 수료

2009년 (주)그린테크 설립

2010년 (주)그린정보시스템 법인 전환 및 기업부설 연구소 설립

2005년~현재 KT 1군 협력업체

2006년~2012 한국정보통신기술협회 광주전남지회 이사

2008년~현재 한국정보통신공업협동조합 전국 대위원

※ 관심분야 : 정보통신, 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