

HOMER를 이용한 가정용 태양광-연료전지 하이브리드시스템의 운전 최적화

논문
59P-1-22

Optimization of Residential Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid System Using HOMER[®]

박 세 준* · 이 영** · 최 용 성[†] · 이 경 섭***
(Se-Joon Park · Ying Li · Young-Sung Choi · Kyung-Sup Lee)

Abstract - A hybrid system which is combined several complementary new and renewable power sources, such as photovoltaic, fuel-cell, and wind generator, etc., has been presented in various approaches. For instance, a photovoltaic cannot always generate stable output power with ever-changing weather condition, so it might be co-generated with a wind generator, diesel generator, and some other sources. In this paper, a residential PV-FC hybrid system is suggested as a distribution power source, and its operation is optimized by HOMER[®]. As a result, it is the most economic that 5[kW] PV, 1[kW] FC, 4 batteries, 2[kW] electrolyzer, 0.5[kg] H₂ tank, 3[kW] converter are applied to the hybrid system.

Key Words : Photovoltaic, Fuel Cell, Hybrid Energy System, Residential Appliances, HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)

1. 서 론

신재생에너지를 이용한 발전시스템은 발전 에너지원이 자연조건에 의존하는 특성으로 인하여 전력공급의 안정성 및 지속성에 단점을 가지고 있다. 따라서 서로 다른 특성을 상호보완 할 수 있도록 구성된 것을 하이브리드시스템이라 하는데, 이는 통상적으로 한 가지의 에너지원을 이용하는 발전시스템보다 신뢰성이 높고 경제적이여야 한다[1]-[2].

이러한 하이브리드시스템의 에너지원으로는 태양광, 풍력, 연료전지 등 다양한 신재생에너지를 복합적으로 사용할 수 있으며 사용 여건에 따라 에너지 구성비를 적절히 조절하여 최적의 운전 효과를 얻을 수 있도록 구성해야 할 필요가 있다. 하이브리드시스템은 적용 용도에 따라 계통연계형과 독립운전형으로 구분되며 독립운전형은 전력수요와는 달리 발전량이 자연 조건에 의존하는 점 때문에 배터리와 같은 에너지 저장장치나 디젤엔진 같은 백업용 발전기의 도입이 필요하다[3]-[4].

하이브리드시스템과 관련된 주요한 연구결과를 살펴보면, 1)응용 측면에서 원격지나 미전화 지역의 전력공급시스템으로서 단독운전을 전제로 한 부하와 발전의 에너지 수급균형, 그리고 2)시스템의 최적 구성 및 제어에 관련된 측면에서 주로 태양광 및 풍력 에너지원의 최대 이용이라는 점이 강조되어 최대출력점 추종제어, 3)시스템의 비용측면에서 배터리 용량의 최적화 등이 주요 연구 대상이며 백업시스템으로서 연료전지, 배터리, 디젤엔진 발전기 등의 응답특성에 관련된 연구 결과가 발표되고 있다[5]-[8]. 또한 국내에서도 도서지역 off-grid(독립

형) 발전시스템의 경제성 평가에 대한 연구가 진행되고 있으며, 특히 풍력/배터리/디젤 하이브리드 발전시스템을 적용하기 위한 연구가 몇몇 기관에 의해 진행 중에 있다[9]-[10].

본 논문에서는 우리나라 일반 가정의 전력 수요량이 태양광 발전의 출력 특성과 상반된다는 점에 착안하여, 상용전원을 고려하지 않은 독립형운전형으로서 경제적이고 효율적인 에너지 이용이 가능한 가정용 하이브리드시스템을 제안하였으며, HOMER[®](Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)를 이용 한 시뮬레이션을 통하여 가정의 전력 수요량(부하량)에 따른 각 에너지원의 용량산정, 경제성 평가, 그리고 시스템 최적 동작특성 등을 도출하였다. 이로써 미전화지역 즉 낙도나 오지에 적용될 수 있는 ‘완전하게 독립된 분산전원’으로서 신재생에너지의 이용과 보급에 기여하고자 한다.

2. 독립형 하이브리드시스템

본 논문에서 제안한 태양광-연료전지 하이브리드시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 본 시스템을 구성하는 요소 들로는 태양광 어레이, 연료전지, 수전해장치, 수소탱크, 배터리, 컨버터 등으로 구성되어 있으며, 가정에 분산전원으로서 적용이

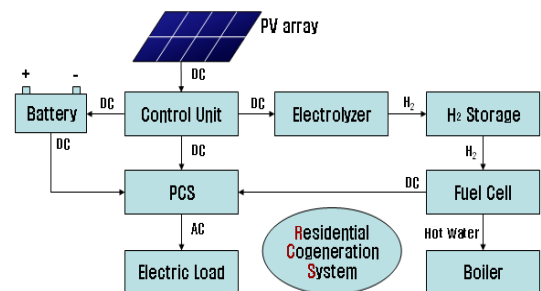


그림 1 태양광-연료전지 하이브리드 시스템의 구성도
Fig. 1 The schematic structure of PV-FC hybrid system

[†] 교신저자, 시니어회원 : 동신대 공대 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr

* 정 회 원 : 동신대 공대 전기공학과 겸임교수 · 공박

** 준 회 원 : 동신대 대학원 전기전자공학과 석사과정

*** 시니어회원 : 동신대 공대 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 12월 15일

최종완료 : 2010년 1월 29일

가능한 독립운전형 발전시스템이다. 본 시스템의 기본적 운전 메커니즘은 낮 동안 태양광발전이 전력을 생산하여 PCS (Power Conditioning System)를 통해 부하에 전력을 공급함과 동시에 배터리를 충전시킨다. 또한 여분의 전력을 이용하여 수전해장치를 구동시키고 생산된 수소는 수소탱크에 저장되었다가 전력 요구량이 많은 시간대에 연료전지에 공급됨으로써 부족한 전력을 부하에 공급하게 되며, 연료전지의 폐열을 재생하여 난방용 온수를 공급할 수 있도록 구현하였다.

3. 시뮬레이션 방법

본 논문에서는 가정용 부하의 전력 요구량에 따른 태양광-연료전지 하이브리드시스템의 효율적 운영을 위하여 HOMER[®] 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. HOMER[®]는 일반 송배전계통과 원거리에 존재하는 도서지역에 송전선로의 손실을 배제하기 위해 신재생에너지를 채택하여 도서지역에서 단독으로 운영되는 하이브리드 발전 시스템의 최적 설계와 운영, 그리고 수소 가격 산출을 위한 프로그램으로 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 개발하였으며, 유저들이 부하량 및 발전시스템 용량 등 다양한 변수를 컴파일링 한 후, 그 시스템의 경제성 평가나 운전 특성 등을 평가할 수 있다.

3.1 태양전지 어레이

태양광 어레이의 용량은 그림 2와 같이 0.8, 1, 2, ..., 8[kW]로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 초기 시설투자비는 1[kW]당 \$4,340이며 유지보수비용을 \$200으로 설정하였다. 태양광발전에 대한 일사량 및 청명도는 한국에너지기술연구원의 신재생에너지 자원지도를 참조하여 그림 3과 같이 작성하였으며, 타 지역에 비해 일사량 및 청명도가 풍부하여 비교적 입지 조건이 양호한 광주지역의 데이터를 발췌하여 본 시뮬레이션에 적용하였다.

Costs				Sizes to consider
Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)	Size (kW)
0.800	3472	200	0	0.800
1.000	4340	250	0	1.000
2.000	8680	300	0	2.000
{..}	{..}	{..}	{..}	3.000

그림 2 태양광발전 용량과 비용 산정
Fig. 2 The schematic structure of photovoltaic system

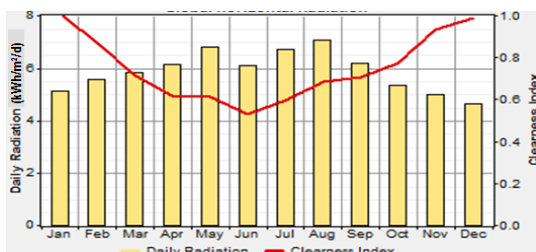


그림 3 광주지역의 월간 일사량 및 청명도
Fig. 3 Monthly irradiation and clearness index in Gwangju

3.2 연료전지시스템

연료전지시스템은 연료전지 스택, 수전해장치(Electrolyzer),

수소탱크 및 주변장치(BOP;Balance of Plant) 등으로 구성되어 있으며, 각각의 용량 설정 및 시설투자비, 유지보수비용 등은 그림 4~그림 6과 같이 설정하였다. 각 구성 요소별 초기 비용은 연료전지와 수전해장치의 경우 1[kW]당 각 \$4,337, \$11,220으로, 수소탱크는 1[kg]을 기준으로 \$660로 설정하였다. 또한 유지보수비용은 연료전지와 수전해장치는 각 \$100로, 수소탱크는 교체를 고려하여 \$660로 설정하였다[11]-[13].

Costs				Sizes to consider
Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/hr)	Size (kW)
1.000	4337	100	0.000	1.000
2.000	8674	100	0.000	2.000
3.000	13011	100	0.000	3.000

그림 4 연료전지의 용량과 비용 산정
Fig. 4 Fuel cell size and cost consideration

Costs				Sizes to consider
Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)	Size (kW)
1.000	11220	100	0	1.000
2.000	22440	100	0	2.000
3.000	33660	100	0	3.000

그림 5 수전해장치의 용량과 비용 산정
Fig. 5 Electrolyzer size and cost consideration

Costs				Sizes to consider
Size (kg)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)	Size (kg)
0.100	66	66	0	0.100
0.500	330	330	0	0.500
1.000	660	660	0	1.000

그림 6 수소탱크의 용량과 비용 산정
Fig. 6 Hydrogen tank size and cost consideration

3.3 배터리

태양광-연료전지 하이브리드시스템이 충분한 전력을 생산할 수 없을 경우를 대비하여 배터리를 본 시뮬레이션에 추가하였으며, 그림 7과 같이 배터리의 가격은 개당 \$350이며 최대 4개의 배터리를 사용할 수 있도록 제한하였다.

Costs				Sizes to consider
Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)	Batteries
1	350	30	0.00	1
2	700	30	0.00	2
3	1050	30	0.00	3

그림 7 배터리의 용량과 비용 산정
Fig. 7 Battery size and cost consideration

3.4 부하 컴파일링

본 시뮬레이션에 적용된 부하는 TV, 냉장고, 진공청소기, 세탁기, 다리미, 전기오븐, 전자레인지, 환풍기, 선풍기, 에어컨, 오디오, 휴대폰 충전기, 컴퓨터, 모니터, 프린터, 스캐너, 헤어드라이어, 랩톱 등으로 구성되어 있다. HOMER를 이용하여 부하량 시뮬레이션을 수행한 결과 하루 평균 총 부하는 9[kWh/day]이며 침투부하(여름철 에어컨 가동시)는 2.5[kW]에 달한다.

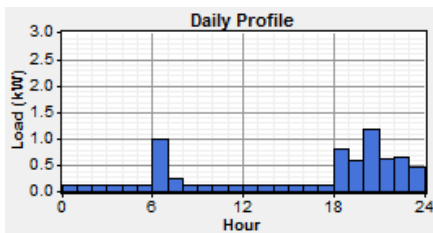
하루 평균 총 부하의 계산은 부하의 용량, 사용 시간, 사용 빈도 등을 예측하여 수행하였다. 그 결과 주간에는 7.575[kWh], 주말에는 10.346[kWh]로 계산되었으며, 이는 에어컨을 가동하지 않는 봄, 가을, 겨울철의 부하 사용량이다. 여름철의 경우에는 에어컨 사용을 고려하여 주간 10.285[kWh], 주말 13.065[kWh]로 계산되었다.

표 1에 시뮬레이션에 사용된 다양한 가전제품(부하)의 전력 요구량과, 그림 8에 가정의 주간 및 주말 부하 특성 현황을 나타내었다.

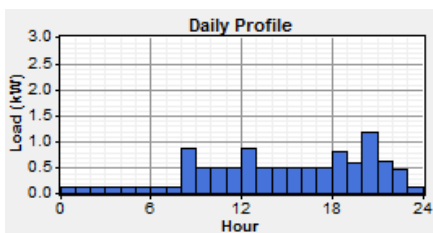
표 1 가정용 부하의 세부 사항

Table 1 The specification of residential loads

종류	전력 요구량[W]	종류	전력 요구량[W]
텔레비전	120	에어컨	1,300
냉장고	128	오디오	40
진공청소기	600	휴대폰충전기	6*4=24
세탁기	130	컴퓨터	70
다리미	600	모니터	100
전기오븐	500	프린터	430
전자렌지	1,250	스캐너	50
환풍기	200	헤어드라이어	1,000
선풍기	55	전등	133



(a) 주간



(b) 주말

그림 8 주간과 주말의 부하 특성

Fig. 8 The load characteristics of weekdays and weekends

4. 시뮬레이션 결과 고찰

본 논문에서는 총 6가지 변수(태양전지 발전, 연료전지, 수전해장치, 수소탱크, 배터리, 컨버터)를 하이브리드 발전 시스템에 적용하여 부하의 형태에 따른 시스템의 경제성 평가를 분석하여 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과로서, 가정용 태양전지-연료전지 하이브리드시스템이 가장 경제적으로 운전될 때는 태양전지 발전 5[kW], 연료전지 1[kW], 배터리

그림 9 하이브리드시스템의 최적화 결과

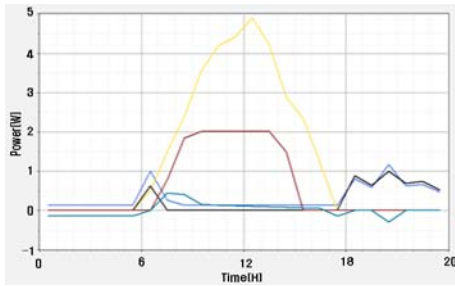
Fig. 9 The optimization results of the hybrid system

4개, 컨버터 3[kW], 수전해장치 2[kW], 수소탱크 0.5[kg]를 적용하였을 경우로 분석되었으며, 이때의 초기투자비용은 \$53,207이며 운전비용은 30[\$/year], COE(cost of electricity)는 1.281[\$/kWh]로 가장 저렴한 특성을 보였다. 또한 연료전지의 총 운전 시간은 2,362[h/year]로 분석되었다.

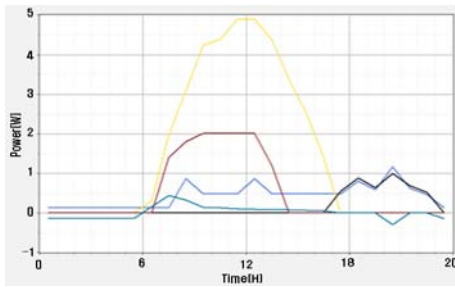
서[9]에 의하면 현재 디젤발전기만으로 발전하는 서해안 도서지역 선유도의 연간 전력 수요량은 909,022[kWh]이며, 연간 평균부하와 첨두부하, 부하율은 각각 2,490[kWh/d], 410[kW], 25.3[%]를 나타낸다. 또한 디젤발전기만을 이용하여 발전을 하는 경우 발전단가(COE)는 1.633[\$/kWh]로 본 논문에서 제안하는 태양광-연료전지 하이브리드시스템의 발전단가 1.281[\$/kWh]보다 약 27[%]가량 높게 형성됨을 확인하였다(2010년 1월 현재 경유의 가격은 \$1.27 임을 감안).

한편 일반 가정의 부하에 따른 전력 요구량은 일정한 패턴을 가지고 있다. 그림 10 (a)에 나타난 바와 같이 주간에는 아침 6~9시까지 그리고 오후 6시 이후에 많은 전력을 필요로 하게 되며, 낮 동안에는 냉장고와 같이 항상 켜져 있어야할 부하만 동작하기 때문에 전력 요구량이 적다. 반면, 그림 10 (b)와 같이 주말의 경우 가족이 집에 머무르는 시간이 많기 때문에 주간에 비하여 낮 동안 전력 요구량이 많음을 확인할 수 있었다.

가정의 부하 요구량에 따른 태양광-연료전지 하이브리드시스템의 동작 특성을 살펴보면, 주간의 경우 그림 10 (a)와 같이 일사량이 적은 오전 6시경에 연료전지가 약 1시간 30분간 운전되어 부하에 전력을 공급하게 되며, 그 이후에는 일사량이 증가하기 때문에 태양광에서 전력을 생산하여 부하에 공급하게 된다. 이와 동시에 태양광에서 발생하는 전력을 이용하여 배터리를 충전시키고 수전해장치를 구동시키며 발생된 수소를 수소탱크에 저장하게 된다. 가족이 집으로 돌아와 전력 요구량이 많아지는 오후 5시 30분경부터는 일사량이 적어 태양광이 전력을 생산하지 못하기 때문에, 하이브리드시스템은 저장된 수소를 이용한 연료전지와 낮 동안 충전된 배터리의 전력에 의존하는 운전 특성을 확인할 수 있었다. 주말의 경우에도 주간의 하이브리드시스템 동작 특성과 마찬가지로 그림 10 (b)와 같이 저녁시간대에는 연료전지나 배터리가 부족한 전력을 보충해 주어야 하는 점을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.



(a) 주간



(b) 주말

■ AC Primary Load ■ PV Power ■ Fuel Cell Power
■ Battery Input Power ■ Electrolyzer input

그림 10 주간과 주말의 부하조건에 따른 하이브리드시스템의 운전 특성

Fig. 10 The operating characteristics of hybrid system by load conditions of weekdays and weekends

5. 결 론

현재 가정에 적용되는 태양광발전 설비는 계통연계형이 대부분이며 이를 독립적인 분산전원으로써 이용하기 위하여 태양광과 풍력발전을 통합한 하이브리드시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 풍력발전의 간헐적인 전력생산 특성으로 인해 하이브리드시스템을 독립적으로 운전하기에 효율적인 에너지생산 및 이용을 기대할 수 없었다. 반면, 본 논문에서 제안한 가정용 태양광-연료전지 하이브리드시스템은 부하의 변동에 따라 안정적인 전력 생산이 가능하기 때문에 독립적인 운전이 가능한 분산전원으로써 일반 가정에 보급하거나, 또는 미전화지역, 즉 낙도나 오지에 적용된다면 더욱 경제적이고 효율적인 에너지원으로 성장할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단)

참 고 문 헌

[1] 전진홍 외, “계통연계형 태양광-풍력-축전지 하이브리드 분산전원 시스템 개발”, 대한전기학회:하계학술대회 논문집, pp. 517-518, 2006.

[2] Rodolfo Dufo-Lopez et al., “Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage”, Renewable Energy, Vol. 32, No. 7, pp. 1102-1126, 2007.

[3] Muselli M et al., “Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management”, Sol Energy, Vol 65, No. 3, pp. 143 - 157, 1999.

[4] Andrew Mills et al., “Simulation of hydrogen-based hybrid systems using Hybrid2”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 29, No. 10, pp. 991-999, 2004.

[5] D.B. Nelson et al., “Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems”, Renewable Energy, Vol. 31, No. 10, pp. 1641-1656, 2006.

[6] Ahmad Zahedi et al., “Balancing Cost and Performance in a PV/Wind/Battery Hybrid Power System”, In Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference, pp. 24-27, 2000.

[7] N. Argaw et al., “Renewable Energy for Water Pumping Applications in Rural Villages”, National Renewable Energy Laboratory Report, pp. 23-28, 2003.

[8] D. Corbus et al., “Integration of Xantrex HY-100 Hybrid Inverter with an AC Induction Wind Turbine”, National Renewable Energy Laboratory Report, pp. 15-24, 2003.

[9] 서현수 외, “새만금 부근 섬 지역에서 풍력-디젤 복합 전원 시스템의 경제 및 환경적 타당성에 관한 연구”, 한국신·재생에너지학회 추계학술대회논문집, pp. 277-280, 2006.

[10] G.P. Giatrakos et al., “Sustainable energy planning based on a stand-alone hybrid renewable energy/hydrogen power system: Application in Karpathos island, Greece”, Renewable Energy, Vol. 34, No. 12, pp. 2562-2570 2009.

[11] A. Demiroren et al., “Analysis of change in electric energy cost with using renewable energy sources in Gökceada, Turkey: An island example”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 1, pp. 323-333, 2010.

[12] Various H-SAPS, Market potential analysis for the introduction of hydrogen energy technology in stand-alone power systems. Available at www.hsaps.ife.no, 2007.

저 자 소 개



박 세 준 (朴世俊)

1980년 10월 10일생. 2002년 동신대학교 전기전자공학과 졸업(학사). 2004년 동대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학). 현재 동신대학교 전기공학과 겸임교수.

Tel : 061-330-3218

Fax : 061-330-3105

E-mail : ssejoo@nate.com



이 영 (李 盈)

1985년 6월 22일생. 2007년 중국 강소과학기술대학교 전자정보과학기술과 졸업(학사). 현재 동신대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정

Tel : 061-330-3218

Fax : 061-330-3105

E-mail : yinglee.100@hotmail.com



최 용 성 (崔 龍 成)

1967년 11월 14일생. 1991년 동아대학교 전기공학과 졸업 (학사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공박). 1999년~2001년 JAIST Post-Doc.. 2001년~2003년 Osaka Univ. Post-Doc.. 2002년~2005년 원광대학교 연구교수. 2006년~현재 동신대학교 전기공학과 교수. 2006년~현재 전력산업인력양성사업단 기획운영부장.

Tel : 061-330-3204

Fax : 061-330-3105

E-mail : yschoi67@dsu.ac.kr



이 경 섭 (李 炘 燮)

1956년 11월 09일생. 1983년 조선대학교 전기공학과 졸업(학사). 1986 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~현재 동신대학교 전기공학과 교수. 1994년~1995년 동경공업대학 객원연구원. 2006년~현재 전력산업인력양성사업단 단장.

Tel : 061-330-3203

Fax : 061-330-3105

E-mail : kslee@dsu.ac.kr