ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 64, No. 2, pp. 222～227, 2015
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.2.222

전기충전소의 경제적 운영을 위한 독립발전 시스템 설계

Independent Generation System Design for the Economic Management of Electrical Charging Stations

서 진 규* · 김 규 호† · 이 상 봉**
(Jin-Gyu Seo · Kyu-Ho Kim · Sang-Bong Rhee)

Abstract - This paper presents the optimal energy generation systems for economical EVs(Electric Vehicles) charging stations located in an island area. The system includes grid electricity, diesel generator and renewable energy sources of wind turbines and PV(Photovoltaic) panels. The independent generation system is designed with data resources such as annual average wind speed, solar radiation and the grid electricity price by calculating system cost under different structures. This sensitive analysis on the varying data resources allows for the configuration of the most economical generation system for charging stations by comparing initial capital, operating cost, NPC(Net Present Cost) and COE(Cost of Energy). Depending on the increase of the grid cost, the NPC variation of the most economical system which includes renewable energy generations and grid electricity can be smaller than those of other generation systems.

Key Words : EVs charging stations, Renewable energy, Grid electricity, Net present cost, Cost of energy

1. 서 론

신재생에너지발전 도입 증가에 따라 공해가스 배출이 없고 석유에 의존하지 않는 전기자동차 도입이 늘어나고 있는 추세이다[1-3].

최근 신재생에너지 독립발전과 전력 계통에서 전력을 구매하는 방법을 이용하여 전기 충전소에 전력을 공급하는 연구가 많이 진행되었다. 특히 신재생에너지발전으로 전기자동차(Electric Vehicles : EVs) 충전 스테이션을 운영하는 경우 기상상태의 영향을 많이 받아 발전량이 불안정하게 되므로 충전소의 부하를 최적화하기 위하여 풍력발전과 태양광발전 출력의 확률적인 특성을 고려하여 EVs를 충전하는 방안이 제시되었다[4]. 또한, 풍력발전과 태양광발전으로 구성된 시스템에서 다양한 용량의 배터리와 컨버터를 함께 사용하여 부하소비 패턴을 분석함으로써 신재생에너지의 출력변동 특성을 해결하였다[5]. 풍력발전, 디젤발전기 및 배터리를 사용하여 하이브리드 시스템 구성요소 간 효율적인 전력 흐름과 전압 및 주파수 안정화를 위한 전력공급 운영 전략을 제시하였다[6]. 디젤발전기를 포함시켜 운영하는 것은 신재생에너지의 불안정한 발전 출력을 보완해 줄 수 있으나 유류가격의 증가로 인해 운영비용 및 발전단가가 높아지는 단점이 있다.

현재 운영 중이거나 계획 중인 전기 충전소는 전력계통에서 구매하는 전력에 의존하고 있기 때문에 구매비용이 증가할 경우 운영비용과 에너지 단가가 영향을 받게 된다. 따라서 신재생에너지발전, 디젤발전기, 컨버터, 배터리를 병행함으로써 신재생에너지 발전의 불안정한 발전출력, 유류 값의 변동 및 전력계통에서의 전력구매 가격이 변동할 경우 전기충전소의 총 운영비용을 낮추는 것이 가능하다.

본 연구에서는 도서지역에서 운영할 수 있는 전기 충전소 설계를 위한 경제적 독립발전 시스템을 구성하였다. 독립 발전 시스템은 풍력발전, 태양광발전 및 디젤 발전기로 구성되며 전력계통에서 전력구매와 풍속 및 일사량 변화 시 발전 연계 방식별 운영비용, 총 현재비용 및 전력단가를 비교하여 최적의 발전 시스템으로 설계하였다.

2. 독립발전 시스템 비용 산출 정식화

경제적 전기충전 스테이션 운영을 위한 비용 산출에서 가장 중요한 요소는 발전방식별 총 현재비용(Total Net Present Cost : NPC)과 에너지 단가(Cost Of Energy : COE) 이다. 현재비용은 미래의 현금 흐름을 현재 비용으로 환산한 것으로 단위는 $이며, 에너지 단가는 전력을 생산하는데 드는 kW당 가격으로 단위는 [$/kWh]이다. 발전별 총 현재비용 및 에너지단가를 산정하는 방법은 다음과 같다.

2.1 풍력발전

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, IT Fusion Research Institute, Korea.
E-mail : kyuho@hknu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Hankyong National University, Korea.
** Dept. of Electrical Engineering, Yeungnam University, Korea.
Received : December 30, 2014; Accepted : January 29, 2015

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

풍력발전 출력량은 식 (1)과 같다. 풍력발전의 출력은 공기 밀도, 풍속 및 풍력터빈의 회전반경에 비례 한다[7].

$$P_{WIND} = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_P \tag{1}$$

ρ : 공기밀도
A : 회전 반경 [m^2]
v : 풍속 [m/s]
C_P : 출력파워계수

이용률(Capacity Factor, CF)은 식 (2)를 이용해 구할 수 있다.

$$CF = 0.087v - \frac{P_R}{D^2} \tag{2}$$

P_R : 정격용량 [kW]
D : 회전 직경 [m^2]

풍력발전의 에너지 단가 산정방법은 다음과 같다.

$$COE_{WIND} = \frac{Annual\ Cost[\$/yr]}{Annual\ Energy[kWh/yr]} \tag{3}$$

$Annual\ Cost$는 설치비를 포함한 풍력발전 단가에 유지, 보수비용을 더한 값이며, $Annual\ Energy$는 풍력발전 출력, 8760[h/yr]와 이용률을 곱한 값으로 구할 수 있다.

2.2 태양광발전

PV(Photovoltaic)는 태양광에서 에너지를 광자 형태로 흡수하여 전자의 이동을 통해 전압으로 바꾸는 반도체이며 [8], 이를 이용한 태양광발전의 출력 및 에너지 단가 산정 식은 다음과 같다.

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \tag{4}$$

$$COE_{PV} = \frac{Annual\ Cost[\$/yr]}{P_{PV}[kWh/yr]} \tag{5}$$

f_{PV} : PV derating factor
Y_{PV} : 정격용량[kW]
I_T : PV 표면 태양광 입사량 [kW/m^2]
I_S : 표준 입사량 [kW/m^2]

태양광발전의 $Annual\ Cost$ 산정방법은 설치비를 포함한 태양광발전 단가에 유지, 보수비용을 더한 값으로 구할 수 있다.

2.3 디젤발전기

디젤 발전기의 발전비용 산출방법은 다음과 같다. 식 (6)은 발전기가 전기를 생산하지 않고 가동할 때의 비용이며 식 (7)은 전기를 생산할 때 발생하는 추가비용 산출식이다.

$$C_{gen,fixed} = C_{om,gen} + \frac{C_{rep,gen}}{R_{gen}} + F_0 Y_{gen} C_{fuel,eff} \tag{6}$$

$$C_{gen,mar} = F_1 C_{fuel,eff} \tag{7}$$

$C_{gen,fixed}$: 전기를 생산하지 않고 가동하는 비용
$C_{om,gen}$: 시간당 발전기 운영 및 유지비용
$C_{rep,gen}$: 발전기 교체비용
R_{gen} : 발전기 수명
F_0 : 연료차단계수
Y_{gen} : 발전기 용량
$C_{fuel,eff}$: 연료 가격
F_1 : 시간당, 1[kW]당 연료의 양

2.4 총 현재비용

총 현재비용은 충전소에 필요한 발전을 운영하는 동안 발생하는 총 비용을 포함함으로써 미래의 비용 가치를 현재의 가치로 환산한 값을 의미하며, 산출하는 방법은 다음과 같다.

$$CRF = \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] \tag{8}$$

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF} \tag{9}$$

CRF : 초기 자금에 대한 자본회수 계수
i : 이자율
n : 대출기한 또는 프로젝트 기간
$C_{ann,tot}$: 총 연간 비용(Total Annualized Cost)

3. 독립 발전 시스템 구성

3.1 시스템 설계

발전방식별 비용 산출을 위한 시스템 구성은 그림 1과 같다.

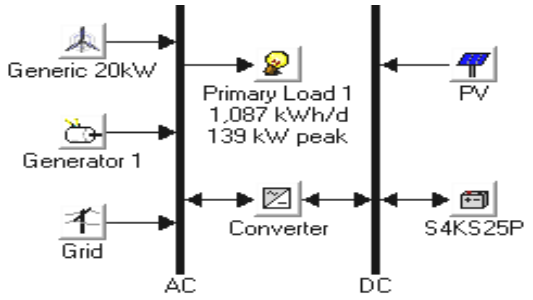

그림 1 독립 발전 시스템 구성
Fig. 1 Configuration of independent power generation system

독립발전 시스템은 풍력터빈, PV(Photovoltaic), 디젤 발전기로 구성되어 있으며, 전력을 신재생에너지 발전과 디젤 발전기로 일부 생산하여 충전소에 공급하고 부족한 전력은 전력계통에서 구매하는 방식으로 구성하였다. 충전소 운영 필요량을 충족시키고 남은 전기는 컨버터와 배터리를 이용해 저장하여 발전량이 부족한 경우 사용하는 독립발전 시스템이다.

3.2 시스템 재원

전기충전소의 일일 전력사용량 및 월별 부하 프로파일은 그림 2 및 그림 3과 같다. 그림 2에서 전기 자동차, 전기 오토바이, 전기 버스의 배터리 용량을 15~25, 0.4~1, 90~100[kW]로 가정하고 충전소 이용시간은 퇴근시간 이후인 17시 이후에 집중되도록 하여 일일 필요 전력을 평균 1,087[kW]로 산정하였다. 그림 3은 월별 최소, 최대 부하, 평균 부하를 나타낸다.

신재생에너지 발전의 재원은 다음과 같다. 풍력발전은 터빈 6, 7, 8대의 경우를 고려하였으며 각각은 20kW 용량을 사용하였다[7]. 풍력터빈 비용은 한 대당 가격, 교체비용 및 유지·보수(Operation and maintenance : O&M) 비용을 $55,000, $55,000, 100[$/yr]로 산정하였다. 그림 4는 풍력발전 월별 풍속을 나타내며 바람이 많이 부는 겨울은 풍속을 높게, 바람이 적게 부는 여름은 풍속을 낮게 하여 연 평균 풍속 4.5, 5.5[m/s]를 고려하였다.

태양광 발전의 재원은 다음과 같다. PV의 kW당 설치 가격, 교체가격과 유지, 보수비용은 $7,000, $7,000, $100으로 산정하였으며 20, 40kW 용량을 고려하였다. 태양광 발전의 월별 일사량 데이터는 그림 5와 같다[7]. 일사량은 북위 33°6' N, 124°11E의 데이터를 바탕으로 하여 기온이 높은 여름의 일사량을 높게 산정 하였으며 평균 일사량 4.359, 5.5[kWh/m^2/d]의 경우를 고려하였다[9].

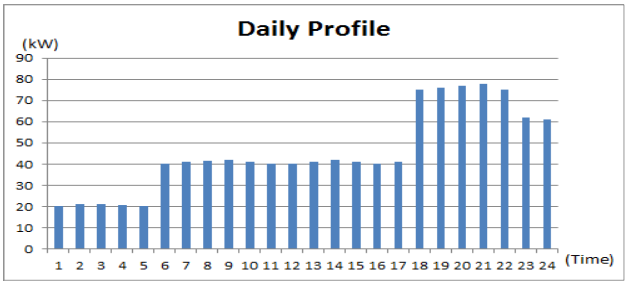

그림 2 일일 부하 소비량 (부하)
Fig. 2 Daily power consumption (Load)

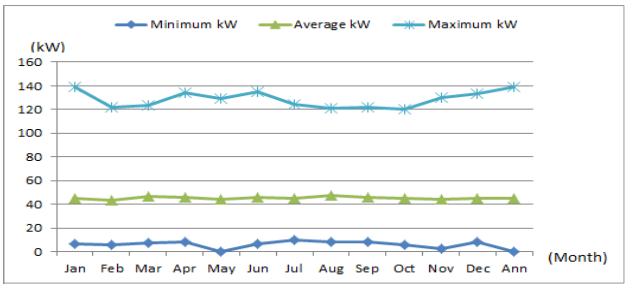

그림 3 월별 부하 프로파일
Fig. 3 Monthly load profile

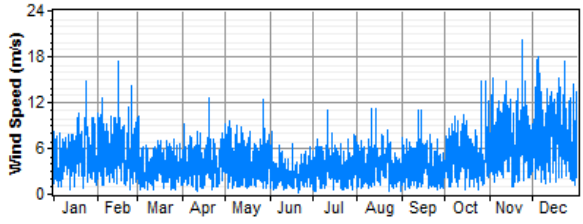

그림 4 월별 풍속
Fig. 4 Monthly wind speed

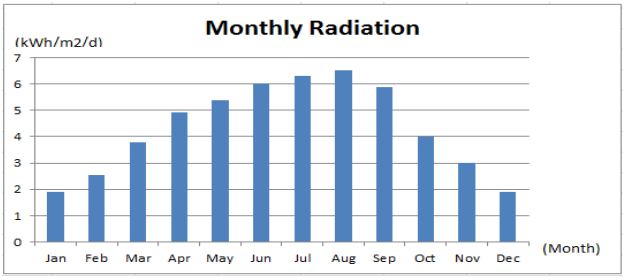

그림 5 월별 일사량
Fig. 5 Monthly radiation

디젤발전기와 컨버터(인버터)의 kW당 용량 및 비용은 표 1과 같고, 디젤 가격은 $1.3로 산정하였으며 컨버터 용량은 40, 50, 60[kW]를 고려하였다[10]. 배터리는 Surrette 4KS25P 모델을 사용하였고 비용은 $120로 산정하였으며 50, 100, 200[EA]의 경우를 고려하였다.

전력계통에서 구매하는 전력 용량은 표 2에 나타내었고 여기

표 1 디젤 발전기 및 컨버터(인버터) 용량 및 비용
Table 1 Diesel generator and converter capacity and cost

	Capacity [kW]	Cost [$]	Replacement Cost[$]	O&M Cost [$/hr]
Diesel Generator	1	1,500	1,500	0.050
Converter (Inverter)	1	900	900	10

표 2 전력계통에서 구매하는 전력 용량 및 비용
Table 2 Power capacity and cost to purchase from power system

Power Capacity[kW]	Cost[$/kWh]
80, 140	0.3, 0.7 0.9, 1.0, 1.1

서 0.3[$/kWh]는 월 전기사용시간이 500시간을 초과할 경우의 요금이며 0.7[$/kWh]는 피크일의 최대부하시간대 사용 전력량 단가이다. 0.9, 1.0, 1.1[$/kWh]는 변동이 가능한 범위 내에서 임의의 값을 사용하였다.

4. 시뮬레이션 결과

전기 충전소에 경제적으로 전력을 공급하기 위한 최적 독립발전 시스템 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 표 3, 표 4 및 표 5는 전력계통에서의 전력 구매 가격이 0.3, 0.7, 0.9[$/kWh], 평균 일사량 4.36[kWh/$m^2$/d] 및 평균 풍속 4.5[m/s]에서 초기비용(Initial capital), 운영비용(Operating cost), 총 현재비용 및 에너지 단가를 계산하고 그 결과를 비교하여 가장 최적의 발전 방식을 위에서부터 나열한 것이다. 여기서 G는 전력계통에서의 전력 구매, P는 태양광 발전, W는 풍력발전, D는 디젤 발전기를 나타낸다. 표 3에서 전력계통에서 구매하는 전력 가격이 0.3[$/kWh]일 때 G-W 연계방식이 초기비용, 운영비용, 총 현재비용, 에너지 단가가 $110,000, 108,257[$/yr], $1,493,891, 0.295[$/kWh]로 가장 경제적이었다. 또한 표 4에서 계통으로부터의 전력 구매 가격이 0.7[$/kWh]일 때 G-P-W-D 연계방식이 초기비용, 운영비용, 총 현재비용, 에너지 단가 $450,000, 201,139 [$/yr], $3,201,226, 0.596[$/kWh]로 가장 경제적이었다. 전력계통에서의 전력 구매 가격이 0.9[$/kWh]인 경우의 비용 계산 결과는 표 5와 같이 G-P-W-D 연계 방식이 초기비용, 운영비용, 총 현재비용, 에너지단가가 $575,000, 211,825[$/yr], $3,282,830, 0.647[$/kWh]로 가장 경제적인 것으로 나타났다.

표 6 및 표 7은 전력계통에서의 전력구매 가격이 0.9[$/kWh]까지 증가하고 평균풍속과 평균일사량이 5.5 [m/s], 5.5[kWh/m^2/d]로 증가하였을 경우의 최적 발전연계방식을 순서대로 나타낸 것이다. 평균 풍속이 증가함에 따라 G-W-D 연계가 가장 최적으로 나타났고 평균 일사량이 증가함에 따라 G-P-W-D 연계가 충전소 전기 공급을 위한 가장 최적의 방식으로 나타났다.

그림 6 및 그림 7은 전력계통에서의 전력 구매 가격이 0.9[$/kWh], 1.0[$/kWh], 1.1[$/kWh] 일 때 총 현재비용과 에너지 단가의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯 계통 전력 단가가 증가하여도 신재생에너지 발전과 전력계에서 전력을 구매하는 방법을 병행할 시 총 현재비용과 에너지 단가의 변화폭이 작아 장기적으로 경제적이다.

표 3 전력구매 가격이 0.3[$/kWh]일 때
Table 3 0.3[$/kWh] of power purchase price

	Initial Capital	Operating Cost [$/yr]	Total NPC	COE [$/kWh]
G/W	$110,000	108,257	$1,493,891	0.295
G	-	119,026	$1,521,555	0.300
G/D	$45,000	118,249	$1,556,615	0.307
G/P	$185,000	116,822	$1,678,371	0.331
G/P/W/D	$340,000	105,683	$1,690,980	0.333

표 4 전력구매 가격이 0.7[$/kWh]일 때
Table 4 0.7[$/kWh] of power purchase price

	Initial Capital	Operating Cost [$/yr]	Total NPC	COE [$/kWh]
G/P/W/D	$450,000	201,139	$3,201,226	0.596
G/W	$330,000	219,090	$3,130,706	0.617
G/D	$60,000	247,667	$3,226,014	0.636
G	-	277,728	$3,550,294	0.700
G/P	$585,000	247,825	$3,753,032	0.740

표 5 전력구매 가격이 0.9[$/kWh]일 때
Table 5 0.9[$/kWh] of power purchase price

	Initial Capital	Operating Cost [$/yr]	Total NPC	COE [$/kWh]
G/P/W/D	$575,000	211,825	$3,282,830	0.647
G/D	$75,000	269,427	$3,519,185	0.694
G/W	$440,000	268,561	$3,873,110	0.764
G/P	$465,000	305,247	$4,367,079	0.861
G	-	357,079	$4,564,664	0.900

표 6 평균풍속 5.5[m/s] 일 때
Table 6 5.5[m/s] of average wind speed

	Initial Capital	Operating Cost [$/yr]	Total NPC	COE [$/kWh]
G/W/D	$445,000	179,587	$2,740,727	0.540
G/P/W/D	$630,000	176,029	$2,880,238	0.568
G/W	$440,000	222,579	$3,285,309	0.648
G/D	$75,000	269,427	$3,519,185	0.694
G	-	357,079	$4,564,664	0.900

표 7 평균일사량 5.5[kWh/m^2/d] 일 때
Table 7 5.5[kWh/m^2/d] of average solar radiation

	Initial Capital	Operating Cost [$/yr]	Total NPC	COE [$/kWh]
G/P/W/D	$575,000	209,335	$3,251,006	0.641
G/P/D	$540,000	232,324	$3,509,879	0.692
G/D	$75,000	269,427	$3,519,185	0.694
G/P/W	$655,000	247,782	$3,822,485	0.754
G/W	$440,000	268,561	$3,873,110	0.764

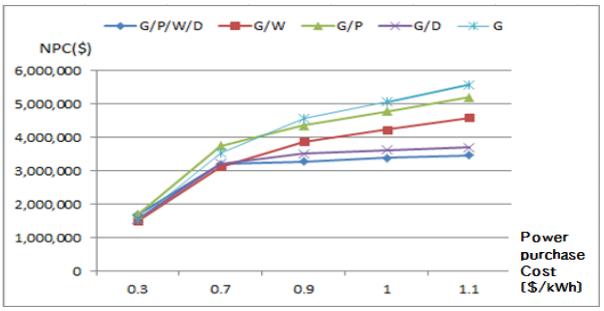

그림 6 전력 구매 가격에 따른 총 현재비용 변화
Fig. 6 NPC variation in accordance with power purchase price

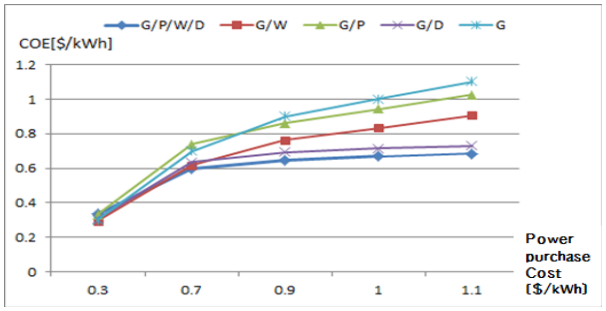

그림 7 전력 구매 가격에 따른 에너지 단가 변화
Fig. 7 COE variation in accordance with power purchase price

표 8은 표3 ,표 4 및 표 5와 같은 조건에서 각 발전 방식 별 이산화탄소 배출량을 나타낸 것이다. 결과적으로 전력계통에서 전력을 구매하는 방법과 신재생에너지 발전을 병행하였을 경우 이산화탄소 배출량이 가장 적은 것으로 나타났다.

표 8 각 발전 방식 별 이산화탄소 배출량
Table 8 Carbon dioxide emission of each generation method

	이산화 탄소 배출량[kg/yr]		
	0.3[$/kWh]	0.7[$/kWh]	0.9[$/kWh]
G/P/W/D	206,797	229,859	231,786
G/D	250,794	313,921	337,387
G/W	221,484	189,350	179,819
G/P	235,157	205,785	205,785
G	250,749	250,749	250,749

5. 결 론

본 논문에서는 전력계통에서 전력구매, 평균풍속 및 평균일사량을 이용하여 경제적 전기 충전소 운영을 위한 최적 독립 발전 시스템을 구성했다.

결과적으로 충전소의 월 전기사용시간이 500시간을 초과할 경우 가장 경제적 운영 방법은 전력계통에서 전력구매와 풍력발전을 병행하는 방법이다. 전력구매 가격이 0.7[$/kWh]가 되면 전력계통에서의 전력구매, 풍력발전, 태양광발전 그리고 디젤발전기를 병행하였을 때 전력구매 가격이 증가함에 따라 발생하는 추가 운영비용 및 kW당 추가 전력생산 비용의 변화폭을 최소화할 수 있어 가장 경제적인 충전소 운영이 가능하다. 따라서 경제적인 충전소 운영을 위해 운영비용 및 전력생산 단가를 낮출 수 있는 전력 공급 시스템을 갖추어 전력계통의 전력구매 가격 상승에 대비해야 한다.

향후 유류 가격의 변화와 생산된 전력을 전력계통에 재판매하는 경우를 연구할 필요가 있다고 사료된다.

References

[1] Sung-Yul Kim, Je-Seok Shin and Jin-O Kim, “Transmission Network Expansion Planning for the Penetration of Renewable Energy Sources- Determining an Optimal Installed Capacity of Renewable Energy Sources”, Journal of Electrical Engineering Technology, Vol. 9, No. 4, pp.1163 -1170, 2014.

[2] Seung-Hoon Jung, Min-Ju Oh, Yeong-Han Chun, Ho-Hyer Youn, Hong-Geun Kim and Yong-Cheol Kang, "Assessment of Wind Turbine Output Variability from the Measured Wind Speed over South Korea", The 20th International Conference on Electrical Engineering, 2014.

[3] Sung-Yong Lim, Jin-Gyu Seo, Kyu-Ho Kim and Charles Kim, “The Optimal Network Configuration to Operate Economical Electric Stations”, Wind energy Grid-Adaptive Technologies, pp.436-440, 2014.

[4] Hong Liu, Jianyi Guo and Pingliang Zeng, "A Controlled Electric Vehicle Charging Strategy Considering Regional Wind and PV", IEEE PES General Meeting, PESGM2014-001436, 2014.

[5] Ajay Sharma, Anand Singh and Manish Khemariya, “Homer Optimization Based Solar PV; Wind Energy and Diesel Generator Based Hybrid system”, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Vol. 3, Issue. 1, 2013.

[6] A. M. O. Haruni et al., “Dynamic Operation and Control of a Hybrid Wind-Diesel Standalone Power Systems,” In Proceedings of IEEE APEC, pp.162-169, 2010.

[7] K. R. Ajao, O. A. Oladosu and O. T. Poppla, “Using HOMER Power Optimization Software for Cost Benefit Analysis of Hybrid- Solar Power Generation Relative to Utility Cost in Nigeria”, IRRAS, Vol. 7, Issue. 1, 2011.

[8] Ali Al-Karaghouli and L. L. Kazmerski, “Performance and Economic Analysis of a Medium-Size Reverse-Osmosis

Plant using HOMER and DEEP-3.2 Software", National Center for Photovoltaic under DOE. Contract No. DE-AC36-08GO28308

[9] Yousif El-Tous, "Grid Connected PV System Case Study: Jiza,Jordan", Modern Applied Science, Vol. 6, No. 6, 2012.

[10] Deepak Kumar Lal, Bibhuti Bhusan Dash and A. K. Akella, "Optimization of PV/Wind/Micro-Hydro/ Diesel Hybrid Power System in HOMER for the Study Area", International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 3, No. 3, 2011.

저 자 소 개

서 진 규(Jin-Gyu Seo)

1989년생. 2014년 한경대 전기공학과 졸업. 2014년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

김 규 호(Kyu-Ho Kim)

1966년생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년 안산공과대학 전기과 부교수, 2011년 9월 ~ 2012년 8월 Baylor University Visiting Scholar, 2008년 9월 ~ 현재 국립 한경대학교 전기공학과 부교수

이 상 봉(Sang-Bong Rhee)

1968년생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2012년~현재 영남대학교 전기공학과 조교수.