

100% 신재생에너지 자원 기반 에너지 공급을 위한 태양광, 풍력 및 바이오 발전의 통합 전략 및 경제성 평가

황해진 · 문준영[†] · 김지용[‡]

인천대학교 에너지화학공학과
22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
(2020년 3월 4일 접수, 2020년 3월 15일 수정본 접수, 2020년 4월 7일 채택)

Economic Benefits of Integration of Supplementary Biopower and Energy Storage Systems in a Solar-Wind Hybrid System

Haejin Hwang, Junyoung Mun[†] and Jiyong Kim[‡]

Department of Energy & Chemical Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea
(Received 4 March 2020; Received in revised form 15 March 2020; accepted 7 April 2020)

요 약

본 연구에서는 다양한 신재생 에너지원 기반 전력 공급 시스템 구축하고, 각 시스템의 최적 전력 공급 비용을 비교 분석 하였다. 특히, 풍력 및 태양광 등 대표적인 신재생에너지 생산 기술과 더불어 대형 에너지 저장 시스템 및 바이오매스 기반 전력 생산 기술을 포함함으로써, 신재생에너지 자원의 간헐성 및 에너지 공급과 수요의 불균형의 한계를 극복하였다. 본 연구에서 제안한 6가지의 신재생 에너지원 기반 전력 공급 시스템을 실제 제주도 전력 공급 문제에 적용함으로써, 제주도 지역의 최적 에너지 시스템을 규명하였으며, 다양한 에너지 생산 기술의 조합의 효과를 분석하였다. 분석 결과, 태양광 및 풍력 기반 전력 공급 단가는 각각 0.18, 0.28 \$/kWh로 개별 자원 기반의 에너지 생산 시스템의 기존 전력망을 통한 공급 단가에 비해 경쟁력이 낮았다. 또한 자원의 간헐성 및 공급과 수요의 불균형 등 단일 자원 기반의 단점을 효과적으로 개선하기 위하여 3가지 신재생 자원 및 대형 에너지 저장 시스템을 포함한 하이브리드 공급 시스템의 경제적 효과를 분석하였다. 그 결과 기존 전통적 전력망 공급과 가격 경쟁력을 갖는 0.08 \$/kWh 수준의 100% 신재생에너지 기반 전력 공급 시스템 구축이 가능함을 규명하였다.

Abstract – This study analyzed the optimal electricity cost of a 100% renewable energy source (RES) based system. Especially energy storage system (EES) and supplementary biopower system as well as photovoltaic (PV) and wind power component were included in the proposed RES-based system to overcome the intermittence of RESs and to efficiently balance energy supply and demand. To comparatively analyze the levelized cost of electricity (LCOE) of different RES-based systems, six scenarios were developed according to the involved RESs: PV, wind, PV/wind, PV/biopower, wind/biopower, and PV/wind/biopower systems. We then applied the proposed systems to build a 100% RES-based system in Jeju Island, Korea. As a result, the single component based system, PV and wind power system of 0.18 and 0.28 \$/kWh, respectively, cannot compete with the economics of existing electricity grid. However, the optimal LCOE of the hybrid system where PV and wind power are used as main supply options and biopower as supplementary option was identified to be 0.08 \$/kWh, which can compete with the economics of an existing electricity grid.

Key words: Renewable energy, Hybrid system, Economic evaluation, EES, Optimization

1. Introduction

석유, 석탄, 천연가스 등 화석연료 기반 에너지 공급 구조는 이산화탄소 등 온실가스 배출로 인한 지구 온난화, 부존 자원 고갈, 상

대적으로 낮은 에너지 효율 등의 문제로 지속 가능한 에너지 구조로의 전환이 시급하다. 세계 각국에서는 이러한 에너지 환경 문제 해결을 위해 신재생 에너지에 주목하고 있다[1].

2015년에 열린 파리 기후변화협약에서는 거의 모든 산업화 국가인 195개국이 참여하기로 협정하였으며, 이에 따라 각 참여국에 적합한 온실가스 감축 정책들을 수립하고 있다[2].

특히 캐나다 밴쿠버는 2050년까지 100% 신재생 에너지 기반의 에너지 공급 체계 구축을 미래 도시 전략으로 제시하였다. 이에 실제로 밴쿠버는 온실가스 배출량 저감을 위한 다양한 기술적 인프라를

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jymun@inu.ac.kr, jykim77@inu.ac.kr

[‡]이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

구축하고 있다. 호주 시드니는 전력수요의 70%를 고효율 열병합발전을 통해 공급하는 것(재생에너지 30%)을 목표로 하고, 그 효과로 2030년 온실가스 배출 목표를 2007년 대비 70% 감축시키기 위한 투자 전략을 수립하였다. 우리나라는 2030년의 온실가스 배출 전망치 대비 37% 감축 목표를 제시하였으며, 주 에너지 공급 시스템의 11%를 신재생 에너지로부터 공급하는 것을 목표로 하였다[3,4].

신재생 에너지를 이용한 에너지 공급 시스템 연구는 국내외에서 활발하게 수행되고 있다. M. Kim은 전기에너지의 수요 만족을 위한 육/해상 풍력 기반 에너지 생산 공정의 최적 설계 및 경제성 평가를 수행하였다[5].

M. J. Khan은 신재생 에너지를 이용해서 다양한 하이브리드 시스템을 구축하여 시스템에 대한 기술과 경제성 평가가 수행되었다[6].

J. Ahmad는 하이브리드 마이크로 전력망을 구축하여 태양광과 풍력 및 바이오 기반 공급 구조의 비용 효율성을 비교 분석하였다[7].

국가 주도적인 정책에서도 신재생 에너지 보급률 향상을 위한 다양한 접근이 시도되고 있다. 특히, 제주도는 2012년부터 지속 가능한 에너지 구축을 주제로 친환경 녹색 섬, 이른바 가파도 프로젝트를 추진하고 있다. 전통 화석연료 기반의 전력 공급 체제를 태양광 발전, 풍력 발전 등 100% 신재생 에너지 기반 전력 공급 체제로의 전환에 관한 기술적, 경제적 타당성을 분석하고 있다[8].

상기의 선례를 바탕으로 현재 국내에서 최초로 에너지 신사업 정책의 일환으로 제주도의 ‘탄소 제로 섬’이 제시되었다. ‘탄소 제로 섬’은 온실가스 배출을 최소화하고 화석연료 의존을 낮춤으로써 지속가능한 신재생 에너지 기반 에코플랫폼 구축 지향한다. 상기 사업은 2012년 가파도의 탄소 제로 섬 시범모델 구축하는 것을 시작으로 2020년 신재생 에너지를 전체 에너지 사용량의 50%로 사용하는 탄소 제로 섬 기반 구축과 2030년 화석연료 사용이 0%로 탄소 없는 섬 조성의 3단계로 이루어져 있다[9].

다양한 신재생 에너지 자원(Renewable energy source; RES) 에너지 공급 시스템의 연구는 많이 수행되고 있다. M. Baneshi은 신재생에너지 자원들과 디젤 발전을 포함한 하이브리드 시스템을 구축하여 독립형 및 그리드 연결 시스템을 최적화하였으며, 이를 통해 경제성 및 환경성을 평가하였다[10].

M. Ngan은 신재생 에너지 자원에서 EES를 포함한 시스템과 포함하지 않는 시스템으로 하이브리드 시스템 구축을 하였고 기술적 타당성 평가와 더불어 비용과 탄소 배출 감소 부문을 연구하였다[11].

A. Kaabeche은 다양한 시스템 크기를 최적화하기 위하여 수학적 모델 개발을 하였고, 이를 통해 신재생 에너지 자원과 대용량 에너지 저장 장치(Energy storage system; EES)의 조합이 최적의 경제성을 가짐을 분석하였다[12].

A. Ogunjuyigbe는 신재생 에너지, 화석 연료 및 EES로 구성된 하이브리드 에너지 시스템을 최적화 모델로 설계하였으며, 비용 대비 탄소 배출 효과를 정량적으로 분석하였다[13]. G. Singh은 기존의 화석연료 기반 에너지 공급 체제를 신재생 에너지와 EES체제로 전환하는데 소요되는 비용을 사례를 통해 분석하였다[14].

상기의 문헌 조사에서 보는 바와 같이, 다양한 에너지를 함께 고려하는 하이브리드 에너지 공급 체제는 단일 자원을 기반으로 하는 체제에 비해 많은 환경적, 경제적 효과를 기대할 수 있다. 특히 RES 고유의 특징인 공급의 시간적 간헐성은 다양한 RES를 동시에 고려함으로써 상당 부분 해소 될 수 있으며, 시간 별, 계절 별 높은 에너지 수요의 변동성 또한 효율적으로 관리 될 수 있다. 하이브리드 시스템의 장점과 효과는 문헌 상의 많은 연구를 통해 검증되는 반면, 문헌 상의 대부분의 연구는 풍력과 태양광의 통합에 의한 시너지에 집중하고 있다. 본 연구에서는 비단 주 신재생에너지 자원으로 태양광과 풍력 발전뿐만 아니라, 또 다른 신재생에너지 자원으로 각광을 받고 있는 바이오매스 기반 전력 생산 기술까지 고려함으로써, 다른 시간적 간헐성을 갖는 다양한 자원의 최적 조합으로 기대할 수 있는 시너지를 분석하고자 한다. 또한 실효적인 신재생에너지 시스템 구축의 기술적 타당성 및 경제적 효과 분석은 비단 상기의 많은 이론적 연구는 물론 정부 및 지방 기관의 실증적인 사업화 타당성 분석 또한 매우 중요하다. 특히 국내의 다양한 대상 지역 중, 상대적으로 높은 신재생에너지 잠재량 및 그 간의 많은 실증화 사업 경험 등을 비취볼 때, 제주도의 100% 신재생에너지 기반 공급 시스템 구축이 가장 실효성이 높다[15].

따라서 본 연구에서는 태양광/풍력/바이오 발전을 포함한 다성분의 신재생에너지 기반 전력 공급 체제를 실제 제주도 전력 공급 시스템에 적용하고자 한다. 특히 자원의 조합에 따라, 6가지의 신재생 공급 체제의 시나리오를 구성하였다. 이를 통하여 제주도의 100% 신재생에너지 시스템의 최적 구조 및 경제성 분석은 물론 다양한 자원 조합의 시너지를 분석하고자 한다.

2. Problem statement

2-1. System and scenarios description

Fig. 1에 본 연구에서 제안하는 100% 신재생에너지 자원 기반 중앙 전력 공급 체제를 나타내었다. 특히, 각 신재생에너지 자원의 잠재량이 많은 지역에서 중앙 집중 생산 및 대용량 에너지 저장 장치(EES)를 이용하여 에너지를 공급하며, 공급 에너지는 기존의 전력 망을 이용하여 각 에너지 수요자에게 공급된다 가정하였다. 독일의 2014년 개정된 재생 에너지 관리법(Renewable Energy Sources

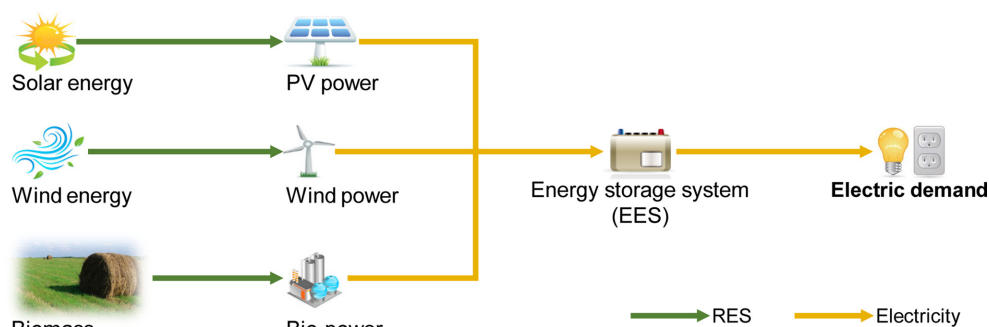


Fig. 1. Schematic diagram of the major technologies and flows in 100% renewable energy source based electricity supply system.

Act-RES Act, 2014)에서 정의하는 재생에너지 자원은 태양복사에너지, 풍력에너지, 수력전기, 바이오 에너지, 지열에너지이다[16].

그 중에서 태양광 발전, 풍력 발전 및 바이오매스 발전 등 잠재량이 높고 기술 개발 성숙도가 높은 발전 기술 3가지를 주요 기술로 선정하였다. 또한 100% 신재생에너지 자원 기반 에너지 체제의 특징 및 3가지 자원의 혼합 사용의 효과를 분석하기 위하여, 본 연구에서는 독립형 전력 공급 체제(Off-grid)를 가정한다.

하나의 신재생 에너지원을 기반으로 구성된 전력 공급 체제인 단일 발전 시스템과 더불어 2개 이상의 자원의 조합을 통하여 전력을 생산하는 체제를 하이브리드 발전 시스템이라 정하고, 제주도에 적합한 다양한 전력 공급 체제를 구성하였다. 특히, 태양광과 풍력 발전의 경우, 입지 면적의 제한 외에는 생산 용량에 큰 한계가 없는 반면, 바이오매스 발전의 경우, 지역의 바이오매스 잠재량에 제한을 받는다. 따라서 제주의 제한적인 바이오매스 잠재량을 고려하여 아래의 6가지 전력 공급 체제를 고려하였다[17].

시나리오 #1 (Sc. 1): 태양광 발전 + 에너지 저장

시나리오 #2 (Sc. 2): 풍력 발전 + 에너지 저장

시나리오 #3 (Sc. 3): 태양광/풍력 발전 + 에너지 저장

시나리오 #4 (Sc. 4): 태양광(주)/바이오(보조) 발전 + 에너지 저장

시나리오 #5 (Sc. 5): 풍력(주)/바이오(보조) 발전 + 에너지 저장

시나리오 #6 (Sc. 6): 태양광(주)/풍력(주)/바이오(보조) 발전 + 에너지 저장

2-2. Design and analysis method

본 연구에서 제안하는 100% 신재생에너지 기반 에너지 공급 체제 설계를 위하여, 미국 국립 재생에너지 연구소(National Renewable Energy Laboratory)에서 제공하는 HOMER 소프트웨어를 플랫폼으로 이용하였다[11]. HOMER는 신재생 에너지를 포함한 다양한 하이브리드 발전 시스템의 설계 및 분석을 수행할 수 있는 최적화 소프트웨어이다. 특히 다양한 기술 및 다양한 지역의 신재생에너지 잠재량에 관한 방대한 데이터베이스 제공함으로써 기술 별, 시간 별, 지역 별 신재생에너지 기반 체제의 비교 분석에 매우 유용하다[12].

본 연구에서는 신재생에너지 자원의 간헐성의 효과를 면밀히 분석하기 위하여 모델링 시간 주기(Time interval)를 시간단위로 구성하였으며, 따라서 8,760개의 시간 주기를 갖는다. 각 시나리오의 경제성을 효과적으로 분석하기 위하여 단위 생산 가격(Levelized cost of electricity; LCOE)을 계산하였다[13]. 총 소요 비용은 대상 시스템의 설계 및 운전에서 발생하는 모든 비용으로, 초기투자비용(capital cost; CC), 교체 비용(replacement cost; RC), 유지보수비용(operating and

maintenance cost; OMC), 연료 비용(raw material cost; RMC), 잔존가치(salvage value; SV) 등을 포함한다[14].

$$LCOE = \sum_i^n \frac{CCF \cdot CC + RC_i + OMC_i + RMC_i - SV_n}{E_{served}} \quad (1)$$

여기서, n 는 시스템의 기대 운전 기간(life time), E_{served} 시스템 운전 기간 동안 제공되는 전력의 양이다. CCF는 자본 회수율(capital charge factor)를 나타내며 식 (2)에 의해 계산된다.

$$CCF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

3. Application to Jeju Island

3-1. Demand and resources

Fig. 2는 본 연구에서 고려하고 있는 제주도에 관한 정보를 나타낸다. 2018년 기준 제주도 서귀포시는 870.68 km² 면적에 총 94,383가구를 포함한다. 신재생에너지 기반 에너지 생산 시설은 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 각각의 자원 잠재량이 가장 높은 지원으로 가정한다[5,17,18]. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 현재 제주도의 신재생 에너지 총 발전량은 전체 에너지 요구량에 약 4%에 달하며, 대부분의 신재생에너지 자원 기반 전력은 풍력 발전(1,851 GWh) 유기생활폐기물(Municipal solid waste; MSW) 및 바이오 에너지 발전이며, 태양광 발전으로 연간 206 GWh으로 전체 에너지 요구량의 0.2%에 해당하는 에너지를 생산하고 있다. 본 연구에서는 상기의 신재생에너지 비율을 현재 4% 수준에서 100% 수준으로 전환하였을 때 필요한 최소 비용 및 공급 단가(LCOE)를 추정한다.

Fig. 3은 대상 지역의 전력 요구량과 고려된 신재생에너지 자원의 2018년 기준 월별 잠재량을 보여준다[22,23]. 제주도 서귀포시 전체 가구의 전력 수요량은 월 평균 791 MWh이며, 연간 총 전력 사용량은 9,489 MWh이었다. 인구 수 대비 낮지 않은 전력 수요량을 보이고 있으며 특히 관광객, 폭염 대비 에어컨 등 에너지 소모량이 큰 가전기기 사용으로 초여름부터 초가을(6월~9월)까지 높은 수요량을 보인다. 제주도의 월 평균 태양 복사열은 늦봄에서 여름(4월~8월) 기간 동안 상대적으로 높다. 제주도의 연 평균 일조량은 평균적으로 4.19 kWh/m²/day으로 대한민국 다른 지역에 비해 높은 잠재량을 갖는다. 태양 복사열과 대조적으로 풍속은 여름부터 가을까지(5월~9월) 낮으며 겨울(11월~2월)에는 높은 것을 나타낸다. 평균 풍속은 6.71m/s이다. 바이오 발전을 위한 원료로는 농업 잔존물(벼짚, 벼 거, 보리 짚, 콩 줄기), 산업 폐기물(폐 목재, 폐 가구), 산림 잔존물 등

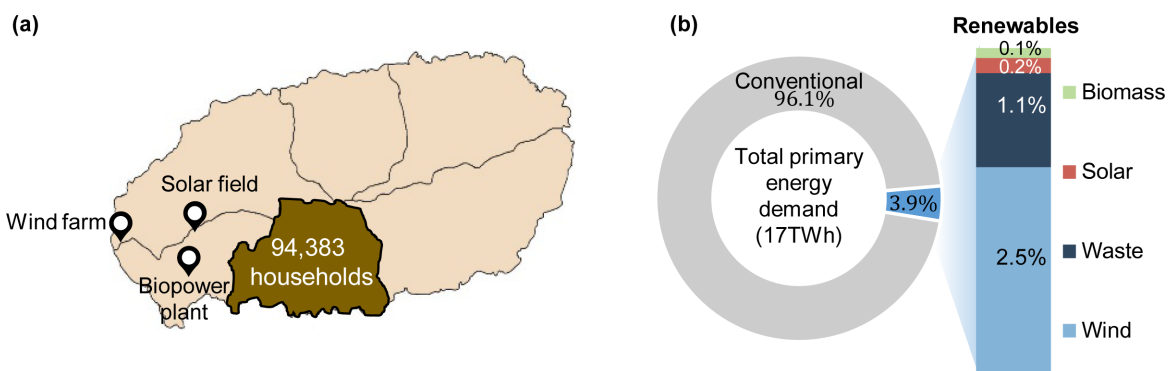


Fig. 2. Information of Jeju Island.

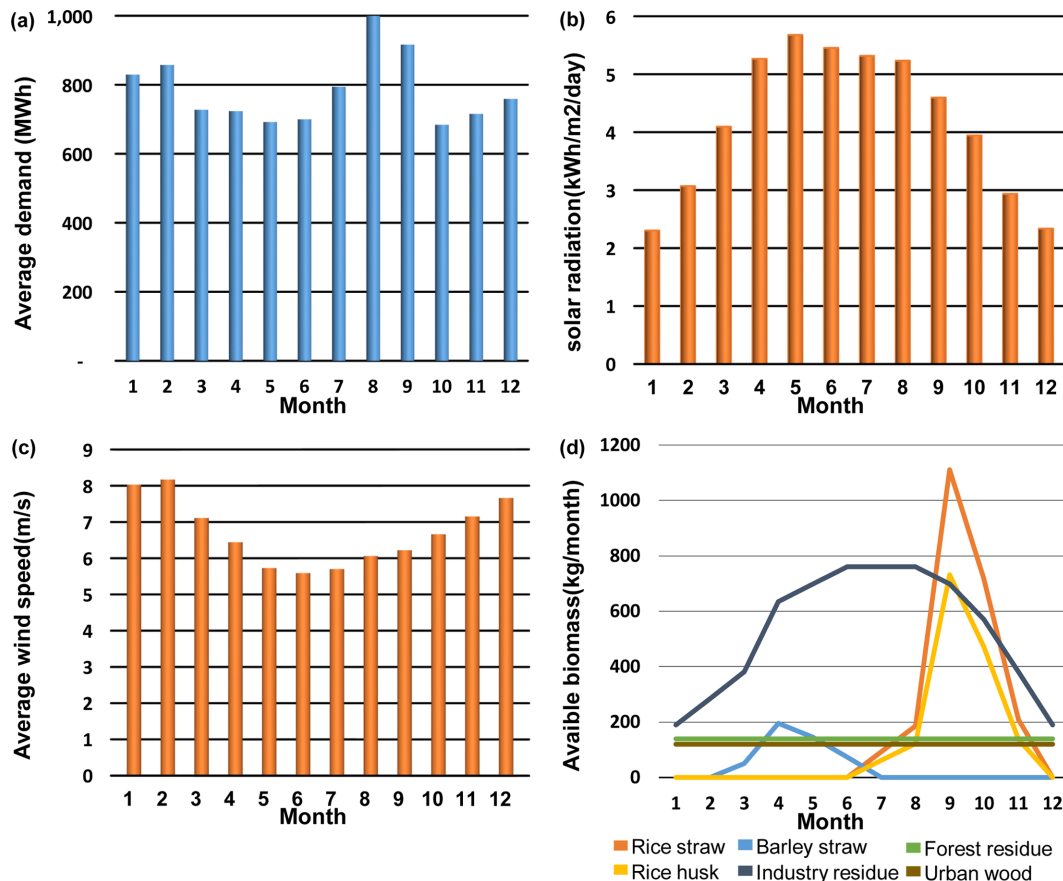


Fig. 3. Regional parameters: (a) electricity demand; (b) solar energy potential for PV system; (c) average wind speed for wind turbine system and (d) available lignocellulosic biomass for biopower system.

생태계 보존을 위하여 목질계 바이오매스(lignocellulosic biomass)만을 이용한다[24]. 원자재의 생산량 중 연간 생산량으로 보았을 경우 산업용 폐 목재가 생산량이 가장 높았으며 벗짚, 폐 목재가 그 다음으로 높은 생산량을 보인다.

3-2. Technology parameters

본 연구에서 사용되는 주요 기술로는 태양광 발전, 풍력발전, 바이오 에너지 발전 및 원활한 에너지 공급을 위한 대용량 EES이다. 특히 본 연구의 전략 공급 방식은 중앙 집중형 전력 생산으로 대량 생산 및 저장에 적합한 대용량 규격을 가정하였다. 첫번째, 본 연구에 사용된 태양광 발전기는 1 kW/module의 용량으로 가정한다[19]. 단위 생산전력 당 시설 비용은 650 \$/kW이며, 수명(10년)이 다된 모듈 교체에 필요한 대체 비용은 650 \$/kW이고, 유지비용(O&M)은 0.001 \$/kW이다. 또한 전력 생산 시 발생하는 손실 보정 계수인 정격 저감 계수(Derating factor)는 95%로 가정하였다.

풍력 발전 또한 태양광 발전과 마찬가지로 중앙집중 전력 생산에

적합 대용량 크기의 풍력 발전기를 선택하였다. 본 연구에 사용된 풍력 발전기는 생산 규격(rate power)이 1.5 MW인 대형 발전기, GE Energy 1.5 MW를 선택하였다[20].

전력 생산 최소 풍속(Cut-in wind speed) 및 최대 풍속(Cut-out wind speed)은 각각 4, 20 m/s이다. 풍력 발전기의 초기 투자 비용은 3,000,000\$/unit이며, 대체 비용은 3,000,000\$/unit이고, 유지비용(O&M)은 30,000\$/unit으로 가정하였으며, 풍력 발전기의 수명은 20년이다.

제주도에서 보조 전력 생산 방식으로 선정된 바이오 파워 플랜트는 태양광이 없는 밤이나, 바람이 많이 불지 않는 계절(예, 여름) 에너지 수요량 대비 부족한 전력을 생산한다. 본 연구에서는 2 MW 규모의 제주도 바이오 에너지 자원 잠재량에 적합한 규격의 바이오 파워 플랜트를 가정하였다. 파워 플랜트로 생산하는 전력의 단위 비용은 300 \$/kW이며, 대체 비용은 300 \$/kW이고, 유지비용(O&M)은 0.01 \$/kW이며, 바이오 에너지의 연료 가격은 자원의 출처, 수집 방식, 수집 거리 등에 따라 변화하며, 본 연구에는 제주도에서 활용 가능

Table 1. Economic parameters of major technologies

	Size (kW)	Capital cost (\$)	Replacement cost (\$)	O&M cost (\$/year)	Lifetime (year)
PV power	1	650	650	0.001	30
Wind power	1,650	3,000,000	3,000,000	30,000	20
Bio power	2,000	3,000	3,000	0.010	1.7
EES	1,000	500,000	500,000	5,000	15
Converter	1	300	300	0.001	15

한 농업 잔존물 수집 및 공급 비용으로 0.06 \$/kg을 가정하였다[21].

마지막으로 대형 EES 로 본 연구에서는 기술 성숙도가 높은 리튬 이온 배터리를 선정했으며, 패키지 당 저장 용량은 1MW/package 로 가정했다. 초기 설치 비용 및 대체 비용은 모두 500,000\$/package 이며, 유지비용(O&M)은 5,000 \$/package 이다. 전력 생산 방식(직류)과 에너지 수요의 사용 방식(교류)과의 원활한 변환을 위한 컨버터는 300 \$/unit의 초기 비용과 대체 비용을 가졌고, 유지비용은 없는 것으로 가정했다. 배터리와 컨버터의 수명은 15년이다. 아래 Table 1에 주요 사용 기술들의 비용 정보를 간략하게 나타내었다.

4. Analysis results

4-1. Optimal operation strategy

본 연구에서는 태양광, 풍력, 바이오 에너지를 이용하여 100% 신재생 에너지 전력 생산 시스템을 자원 조합에 따라 6가지 시나리오를 구성하였으며, 최적화를 통하여 각 시나리오 별 최적 에너지 흐름 및 최소 LCOE를 규명한다. 각 시나리오의 최적 전력 흐름을 Table 2에 나타내었다. 시나리오 #1(태양광 기반)의 경우, 연간 총 전력 생산량은 1,862 MW이다. 태양광 에너지의 간헐성으로 인해 전력 수요보다 많은 전력을 생산하고 있고 있으며, 이에 따라 생산 전력 중 53%의 양을 기존 전력 망에 공급하게 된다. 전력 공급과 수요의 최적 균형을 위한 EES의 수는 12,000개로 분석 되었다. 시나리오 #2(풍력 기반)은 시나리오 #1보다 더 많은 2,380 MW의 연간 전력 생산량을 보인다. 이는 태양광 발전의 경우 낮과 밤 등의 짧은 시간(time interval)에서의 변동성이 있는 반면, 풍력 발전의 경우, 겨울과 여름 등 상대적으로 긴 시간에 걸쳐 자원 잠재량의 변동성을 보임으로써 상대적으로 더 많은 과생산 전력(Exceed electricity)을 보인다. 이러한 많은 과량 전력 생산으로 필요한 EES의 개수는 시나리오 #1에 비해 줄었다.

시나리오 #3(태양광/풍력 기반)의 경우, 연간 총 전력 생산량은 2,272 MW이다. 태양광 발전의 전력 생산량은 1,147 MW으로 전체 생산량의 50.5%를 차지한다. 특히 과생산 전력의 양이 시나리오 #1 및 #2 보다 더 많은 1,417 MW(생산량의 62.4%) 보이는 반면 필요한 EES는 4,263개로 시나리오 #1 및 #2의 30% 및 50% 수준으로 매우 낮은 값을 가진다. 시나리오 #4(태양광/바이오 기반)의 경우, 연간 총 전력 생산량은 1,839 MW이다. 특히 태양광 발전은 주 전력 생산 기술로써 전체 생산량의 86% (1578 MW) 차지하며, 바이오 에너지 발전의 전력 생산량은 14%의 기여도를 보인다. 특히, 앞선 시나리오에 비해 과생산 전력은 총 생산량의 54% 수준으로 앞서 평가된 시나리오들보다 그 상대적 양이 적음을 알 수 있다. 또한 필요한 EES 개수(2,201)도 앞선 시나리오들 보다 훨씬 적으며, 이는 바이오 전력 생산 방식이 주요 전력 생산 기술(태양광, 풍력)

의 생산 간헐성을 잘 보완함으로써 상이한 전력 공급과 수요의 흐름을 효과적으로 교정하고 있음을 나타낸다. 시나리오 #5(풍력/바이오 기반)의 경우, 연간 총 전력 생산량은 1,171 MW으로, 풍력 발전이 주 생산기술로 구성된다. 풍력 발전의 전력 생산량은 991 MW으로 전체 생산량의 84.6%이다. 시나리오 #5의 전체적인 전력 흐름은 태양광 발전(시나리오 #1)과 풍력 발전(시나리오 #2)의 구조적 차이와 바이오 발전 고려의 효과(시나리오 #1과 시나리오 #4)과 동시에 나타난다.

마지막으로 시나리오 #6(태양광/풍력/바이오 기반)의 경우, 연간 총 전력 생산량은 1,260 MW으로 단일 생산 체제보다 훨씬 적의 양으로 다른 하이브리드 체제와 비슷한 경향을 보인다. 태양광 발전이 주요 생산 기술로 선택되어 전체 생산 전력의 68.2% (859 MW)을 차지하고 있으며, 뒤를 이어 바이오 발전 19.2% (242 MW), 풍력 발전 12.6% (159 MW)이 따른다. 특히 앞선 시나리오에 비해 가장 높은 Capacity factor (= 실제 생산량 / 최대 생산량)을 보인다. 더불어 상대적으로 적은 양의 과생산 전력량 및 EES 필요 개수를 보임을 알 수 있으며, 이는 다른 시나리오에 비해 전력 생산 전력이 제주도 에너지 수요에 효과적으로 대응하여 공급됨을 나타낸다.

Fig. 4는 6가지 시나리오의 최적 신재생에너지 기반 전력 공급 체제의 에너지 흐름을 보여준다. 각 계절을 대표하기 위하여 4월(Spring), 7월(Summer), 10월(Fall) 및 1월(Winter) 달의 첫 주(1일~7일)의 주요 흐름을 나타내었다. 시나리오#1의 경우, 봄 및 여름 계절에서의 높은 일조량으로 태양광 발전의 비율이 풍력 발전에 비해 높다. 반대로 가을 및 겨울 계절에서는 상대적으로 낮은 일조량 및 빠른 풍력 속도로 풍력 발전의 비율이 점차 증가한다. 시나리오 #2의 경우, 시나리오 #1 에 비해 상대적으로 높은 전력 생산량을 갖는다, 특히 낮과 밤의 편차가 매우 심한 태양광 발전과는 달리 시간에 따른 변동량은 크게 변하지 않으며, 계절에 따라, 즉 풍력 속도에 따라 발전량의 점차적으로 변하는 경향을 보인다.

시나리오 #3의 경우, 태양광 발전 및 풍력 발전량은 시나리오 각각 시나리오 #1 및 #2에 비해 적다. 그러나 두 기술의 혼합으로 전력 수요를 만족시키기 위한 전략을 수행함으로써, 수요와 공급의 시간적 편차에 의해 발생하는 과생산 전력량이 감소하였다. 특히 강우 강설 등 날씨 등의 영향으로 태양광 발전량이 낮아지는 부분(예, 1월 4일, 5일)에선 상대적으로 과생산 전력이 줄고 풍력 발전의 수요 만족 기여도가 증가함을 볼 수 있다. 시나리오 #4의 경우, 높은 태양광 발전량과 상대적으로 많은 EES충전의 경향이 나타난다. 예를 들어 4월에는 상당한 전력 수요량이 EES 저장 전력으로 만족되는 반면 바이오 발전은 낮은 기여도를 보인다. 그러나, 여름 계절에서는 밤 또는 날씨 등에 의해 간헐적으로 태양광 발전이 낮은 구간에서는 상당히 많은 전력이 바이오 발전을 통해서 공급 된다. 그리고 겨울 계절에서는 해당 계절에서의 바이오 매스의 높은 잠재량으로 인해

Table 2. Electricity flows in different RES-based systems

	Annual production (MW)	Capacity factor (%)	Excess electricity		Required No. of EES
			(MW)	(%)	
Scenario 1	1,862	18.2	981	52.7	12,093
Scenario 2	2,380	32.6	1,525	64.1	9,651
Scenario 3	2,272	54.1	1,417	62.4	4,263
Scenario 4	1,839	55.5	997	54.2	2,201
Scenario 5	1,171	61.6	331	28.3	4,310
Scenario 6	1,260	88.5	421	33.4	2,711



Fig. 4. Scenario-Based Power Production Profiles.

높은 바이오 에너지 발전이 지속적으로 이뤄지고 있으며, 낮 시간대의 태양광 발전과 조합으로 효율적인 전력 공급 운전을 이루어지

고 있어서 EES에 저장되는 전력량 또한 상대적으로 낮다.

시나리오 #6의 경우, 3가지 발전 기술이 상호보완적인 역할을 하

Table 3. Cost break down of the examined Res-based energy systems

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
PV power	6.38B\$(40%)	-	3.93B\$(25%)	5.41B\$(62%)	-	2.94B\$(38%)
Wind power	-	16.9B\$(67%)	7.98B\$(51%)	-	7.03B\$(60%)	1.13B\$(15%)
Bio power	-	-	-	1.26B\$(14%)	1.12B\$(9.5%)	1.22B\$(16%)
Storage	8.91B\$(56%)	7.11B\$(28%)	3.14B\$(20%)	1.62B\$(19%)	3.18B\$(27%)	2.00B\$(26%)
Excess sale credits	-790M\$	-2.83B\$	-1.5B\$	-383M\$	-1.23B\$	-419M\$
Total NPC	16.0B\$	25.0B\$	15.7B\$	8.71B\$	11.7B\$	7.66B\$

면서 최적의 전력 공급을 이루고 있다. 예를 들어 태양광 발전량이 높은 경우(예, 여름 계절) 변동성이 큰 풍력 발전보다는 적은 규모지만 꾸준한 생산이 가능한 바이오 발전을 이용하여 전력 수요를 만족시키고 있다. 즉, 시나리오 #6의 체제가 상대적으로 초기 투자 비용이 비싼 풍력 발전 설비는 최소화하고, 바이오 발전과 함께 태양광 발전의 보조적 역할을 수행함으로써 전력 수요 거동에 가장 효율적으로 대응하는 전력 공급 체제임을 분석할 수 있다.

4.2. Optimal supply cost

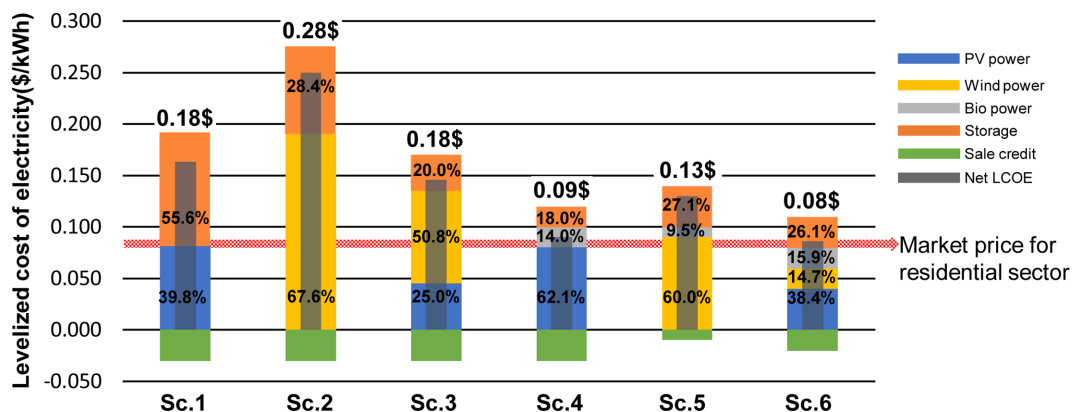
앞 절의 최적화 결과를 바탕으로 설계된 신재생에너지 시스템 설계 및 운전에 필요한 주요 비용 요소와 단위전력비용(LCOE)을 분석한다. 본 연구에서 구성된 6가지 시나리오의 주요 비용 요소를 Table 3에 나타내었다. 시나리오 #1(태양광 기반)의 경우, 태양광 발전, EES의 총 소요 비용 각각 6.38, 8.91 B\$/year이며, 전체 소요 비용(16 B\$/year)의 97%를 차지한다. 앞서 분석한 바와 같이 태양광 발전만을 이용하기 때문에 전력 생산과 수요의 큰 시간적 간극을 대응하기 위하여 매우 높은 EES 비용이 소요된다. 시나리오 #2(풍력 기반)의 경우, 시나리오 #1 과는 달리 풍력 발전 설비의 소요 비용(16.9 B\$/year)이 EES 설비 비용(7.11 B\$/year)보다 높게 나타났다. 이는 시나리오 #1의 태양광 발전에 비해, 높은 과생산 전략에도 불구하고 전력 생산 설비를 수요보다 높게 설계함으로써 EES 설비 비용을 최소화하는 운전 전략이 비용 관점에서 더 효과적이기 때문이다.

시나리오 #3(태양광/풍력 기반)의 경우, 3가지 주요 설비의 소요 비용이 상대적으로 균등하게 나타나고 있다; 태양광 발전, 풍력 발전 및 EES의 소요 비용은 각각 3.93, 7.98 및 3.14 B\$/year이다. 총 소요비용은 시나리오 #1 및 #2보다 각각 0.3, 9.3 B\$/year 더 경제적이다. 이는 시나리오 #1 및 #2와 같이 신재생 에너지를 단독으

로 발전하는 것보다 두 가지를 결합하여 발전하는 방식이 더 경제적이기 때문이다. 특히 두 발전 설비의 통합 시너지 효과로 인하여 EES 설비 비용의 감소가 전체 경제성 개선에 큰 기여를 함을 알 수 있다. 시나리오 #4(태양광/바이오 기반)의 경우, 태양광 발전 설비 소요 비용(5.41 B\$/year)의 전체의 약 65%를 차지하며, 바이오 발전 및 ESS 설비에 관련된 비용은 각각 1.26, 1.62 B\$/year로써 비슷한 경향을 보인다. 시나리오 #5(풍력/바이오 기반)의 경우도 시나리오 #3 및 #4와 비슷한 소요 비용 분포를 보이고 있으며, 하이브리드 체제의 경우 단일 자원 기반의 체제 보다 상대적으로 적은 총 소요 비용을 결과를 보인다.

2 가지 이상의 자원을 동시에 활용하는 하이브리드 체제의 비용적 관점에서의 시너지 효과는 시나리오 #6에서 더욱 확실하게 보여진다. 시나리오 #6(태양광/풍력/바이오 기반)의 경우, 4 가지 주요 설비에 필요한 비용에 상대적으로 매우 균등하게 분포하고 있다. 특히 7.66 B\$/year의 총 소요 비용은 단독 발전 체제 시나리오 #1 (8.34 B\$/year) 및 #2(17.3 B\$/year)에 비해 매우 낮음을 알 수 있다. 더욱이 2가지 신재생에너지 자원을 이용한 시나리오 #3, #4 및 #5에 비해서도 총 소요 비용이 상당히 감소함을 알 수 있다. 전체적으로 바이오 에너지 발전이 보완적 수단이 포함된 시나리오(시나리오 #4, #5, #6)의 총 소요 비용이 상대적으로 낮음을 보이며 이는 바이오 발전이 그 생산 규모는 상대적으로 작지만, 태양광 및 풍력 발전 등 간헐성이 높은 자원과의 함께 활용된다면 비용적 관점에서의 시너지 효과는 매우 크다는 것을 의미한다.

Fig. 5에 본 연구에서 제안된 6가지 시나리오의 신재생에너지 자원 기반 전력 공급 체제의 단위 전력 비용(LCOE)과 주요 설비의 기여를 나타내었다. 앞서 분석한 바와 같이 같은 전력 요구량을 만족시키기 위하여 하이브리드 체제의 LCOE가 단일 자원 기반 체제 보다 30~50% 수준을 보이는 등 매우 개선된 경제성을 보인다. 특

**Fig. 5. Cost contribution of major components on the LCOE.**

히 바이오 에너지 발전이 보조적 전력 생산 기술로 선택된 시나리오 #4, #5 및 의 경우 태양광 발전과 풍력 발전의 하이브리드 체제(시나리오 #3)보다 상당히 35~50% 수준을 보인다. 즉, 앞선 절에서 분석한 바와 같이, 바이오 발전이 다른 두 주 생산 기술에 비해 상대적으로 적은 양을 생산함에도 불구하고, 보조적 생산 기술로써 바이오 발전의 고려는 경제적 관점에 효과가 매우 크다. 이러한 바이오 발전의 경제적 시너지는 시나리오 #6(태양광/풍력/바이오 하이브리드 발전 체제)에 더욱 극명하게 보여진다. 즉 100% 신재생에너지 자원만을 이용한 전력 공급 체제에서도 0.08 \$/kWh의 단가로 전력을 공급할 수 있다. 더욱이 신재생에너지 기반 전력 생산에 관한 중앙 정부 및 지방 자치단체에서의 적절한 수준의 보조비 또는 성과비가 부여된다면 기존의 전력 시장에서도 경쟁 가능한 경제성을 확보할 수 있다.

5. Conclusion

본 연구에서는 100% 신재생 에너지 자원 기반 에너지 공급 체제 최적 설계 및 운전 전략을 분석하였다. 특히 주요 신재생에너지 자원으로 각광받고 있는 태양광과 풍력 발전은 물론 대용량 에너지 저장 장치(EES)와 바이오매스를 이용한 발전 기술을 포함함으로써 6가지의 전력 공급 체제를 제안하였다. 특히, 신재생 에너지 자원의 간헐성 개선을 통한 안정적인 에너지 공급 및 수요 변화에 효과적인 대응 등 3가지 신재생에너지 자원과 EES의 조합은 최적의 경제성을 나타냄을 규명하였다. 특히, 태양광/풍력/바이오 하이브리드 기반 전력 생산 및 EES를 이용하여 공급하는 시나리오 #6의 경우, 실제 한국 전력 시장에서 가격 경쟁력을 갖는 0.08 \$/kWh의 단위 전력 비용(LCOE)으로 에너지를 공급할 수 있음을 분석하였다. 이는 비록 바이오 자원의 낮은 잠재량에도 불구하고 주 생산 설비(태양광 및 풍력 발전)의 간헐성을 효과적으로 보완함으로써 고비용의 EES 설치비를 최소화함에 기인한다.

2016년 기준, OECD 국가들의 신재생 에너지의 전력 공급 비율은 평균 24.5%를 넘어서는 반면, 국내의 신재생 에너지 전력 공급 비율은 2.2% 수준에 머물고 있다. 특히 파리 협약이 체결된 이후로 국가적 차원에서의 더욱 적극적인 신재생에너지 보급 비율 개선시키기 위한 노력과 투자가 절실하다. 본 연구는 국가가 목표하고 있는 100% 신재생에너지 자원 기반 에너지 공급 시스템 구축에 관한 예비 타당성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 다양한 바이오 매스 자원의 활용, 전력 수요반응(Demand response) 제도 적용, 기존 전력망과의 통합 등 100% 신재생 에너지 자원 기반 에너지 공급 체제 수립을 위한 다양한 실증적 연구가 계속될 수 있다.

Acknowledgments

이 논문은 인천대학교 2018년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q. and Dasgupta, P., *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Ipcc(2014).
- Oh, J., "Results of the 2015 Global Climate Change Results in paris," *Korea energy economic institute*(2015).
- Yoo, K., Park, E., Kim, H., Ohm, J. Y., Yang, T., Kim, K. J., Chang, H. J. and Del Pobil, A. P., "Optimized Renewable and Sustainable Electricity Generation Systems for Ulleungdo Island in South Korea," *Sustainability*, **6**(11), 7883-7893(2014).
- Park, Y. C., Kim, D. S., Huh, J. and Kim, Y. G., "New and Renewable Energy Policies of Jeju Island in Korea," (057), 2446-2453(2011).
- Kim, M. and Kim, J., "Optimal Design and Economic Evaluation of Energy Supply System from on/off Shore Wind Farms," *Korean Chemical Engineering Research*, **53**(2), 156-163(2015).
- Khan, M. J., Yadav, A. K. and Mathew, L., "Techno Economic Feasibility Analysis of Different Combinations of PV-wind-diesel-battery Hybrid System for Telecommunication Applications in Different Cities of Punjab, India," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **76**, 577-607(2017).
- Ahmad, J., Imran, M., Khalid, A., Iqbal, W., Ashraf, S. R., Adnan, M., Ali, S. F. and Khokhar, K. S., "Techno Economic Analysis of a Wind-photovoltaic-biomass Hybrid Renewable Energy System for Rural Electrification: A Case Study of Kallar Kahar," *Energy*, **148**, 208-234(2018).
- Hur, K., "Green Community 'the International Green Island Forum Corporation' and Birth of Carbon Free Island 'Gapado,'" *World Environment and Island Studies*, **4**(2), 21-43(2014).
- Han, S. and Shin, H. W., "Policy Trends of Renewable Energy in Korea," 218-221(2014).
- Baneshi, M. and Hadianfard, F., "Techno-economic Feasibility of Hybrid Diesel/PV/wind/battery Electricity Generation Systems for Non-residential Large Electricity Consumers Under Southern Iran Climate Conditions," *Energy Conversion and Management*, **127**, 233-244(2016).
- Ngan, M. S. and Tan, C. W., "Assessment of Economic Viability for PV/wind/diesel Hybrid Energy System in Southern Peninsular Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**(1), 634-647(2012).
- Kaabeche, A. and Ibtouen, R., "Techno-economic Optimization of Hybrid Photovoltaic/wind/diesel/battery Generation in a Stand-alone Power System," *Solar Energy*, **103**, 171-182(2014).
- Ogunjuyigbe, A., Ayodele, T. and Akinola, O., "Optimal Allocation and Sizing of PV/wind/split-diesel/battery Hybrid Energy System for Minimizing Life Cycle Cost, Carbon Emission and Dump Energy of remote Residential Building," *Appl. Energy*, **171**, 153-171(2016).
- Singh, G., Baredar, P., Singh, A. and Kurup, D., "Optimal Sizing and Location of PV, Wind and Battery Storage for Electrification to an Island: A Case Study of Kavaratti, Lakshadweep," *Journal of Energy Storage*, **12**, 78-86(2017).
- Lee, B., "A Study of Strategy for Carbon-Free Island Jeju," *Korea Environment Institute (KEI) Report 2016-05*(2016).
- Act, R. E. S., "Act on the Development of Renewable Energy Sources," *Renewable Energy Sources Act-RES Act*(2014).
- Lee, M. and Kim, J., "Feasibility Study and Benefit Analysis of Biomass-derived Energy Production Strategies with a MILP (mixed-integer linear programming) Model: Application to Jeju Island, Korea," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **34**(6),

- 1604-1618(2017).
18. Lee, D., Han, S. and Kim, J., "Economic and Environmental Assessment of a Renewable Stand-alone Energy Supply System Using Multi-objective Optimization," *Korean Chemical Engineering Research*, **55**(3), 332-340(2017).
19. Energy, H., "Getting Started Guide for HOMER Legacy (version 2.68)," *Homer Energy and National Renewable Energy Laboratory, Colorado*(2011).
20. Miller, N. W., Sanchez-Gasca, J. J., Price, W. W. and Delmerico, R. W., "Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 MW Wind Turbine-Generators for Stability Simulations," **3**, 1977-1983(2003).
21. IRENA I., "Renewable Power Generation Costs in 2017," *Report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*(2018).
22. KEPCO, "Korea Electric Power Corporation, www.kepco.co.kr."
23. KMA, "Korea Meteorological Administration, www.kma.go.kr."
24. KOSIS, "Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr>."