

신재생복합발전시스템의 각 구성품 교체비용변화에 따른 용량 및 경제성 민감도 분석

임 종 환**

* 제주대학교 메카트로닉스공학과

Analysis of Size and Economic Sensitivities according to Changes in Component Replacing Costs of Renewable Hybrid Generation System

Jong Hwan Lim**

* Dept. of Mechatronics, Jeju Nat'l Univ.

(Received July 17, 2014 ; Revised September 5, 2014 ; Accepted October 21, 2014)

Key Word: Hybrid Generation System(하이브리드 발전시스템), HOMER(Hybrid Optimization Model for Electric Renewable), Component Replacement Cost(구성품교체비용), Sensitivity Analysis (민감도분석)

초록: 본 논문에서는 복합발전시스템을 구성하는 각 단위 구성품의 교체비용이 변화할 때 각 단위 구성품의 용량 및 전체시스템의 경제성이 얼마나 변화하는지를 나타내는 민감도 분석을 수행하는 방법을 제시한다. 민감도 분석에는 복합발전시스템 경제 분석용 툴인 HOMER를 이용한다. 민감도 분석을 통해 교체비용 변화에 대해 민감도가 높은 구성품의 비중이 최소화 되게 설계하거나 예상되는 가격변동을 사전에 고려함으로써 복합발전시스템의 경제성을 최적화할 수 있으며, 민감도가 높은 구성품의 비중을 낮추기 위한 다른 조합의 복합발전시스템 구성에 대한 정보도 제공할 수 있다. 민감도 분석의 예로서 주택용 부하 모델에 대해 HOMER에서 제공되는 일반적인 데이터를 사용하여 각 구성품 교체비용에 대한 용량 및 경제성 민감도를 정량적으로 분석하였다.

Abstract: This paper presents a method for analyzing the size and economic sensitivity of a new renewable hybrid generation system according to changes in the component replacement costs based on HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables). The design of a hybrid system can be optimized by reducing the size of a sensitive component based on sensitivity analysis using the change in cost of a component. Sensitivity analysis can also provide information on what combinations are necessary for the optimal hybrid system. As an example, sensitivity analysis was performed on the residential load provided by HOMER, and the effects of component replacement costs on the system size and cost were quantitatively analyzed.

1. 서 론

신재생 복합발전시스템은 태양에너지원과 풍력 에너지원처럼 서로 보완적인 특성을 갖는 에너지원을 결합한 발전시스템 형태로서 신재생 에너지원 단독의 경우보다 비교적 높은 신뢰도의 전력을 공급할 수 있다.^(1,2) 따라서 복합발전시스템은 그 지역 각 에너지원의 밀도 및 사용 목적에 따라 발전효율이 최적이 되도록 각 용량을 설계할

해야 한다.^(3,4)

신재생 에너지원은 에너지밀도가 낮고 통계학적 특성을 가지고 있기 때문에 복합발전시스템의 주요 설계인자는 안정적인 전력공급과 경제성 확보이다. 최적용량 설계는 필요한 부하를 감당할 수 있는 가장 경제적인 각 발전시스템의 용량을 설계하는 것으로서 지금까지 다양한 연구가 수행되었다.⁽⁵⁻¹⁰⁾ 그러나 최적용량설계에 있어서 시스템 각 구성품의 교체 비용이 변화할 때 시스템의 최적 용량이나 경제성이 얼마만한 영향을 받는지에 대한 연구는 아직 없다.

† Corresponding Author, jhlim@jejunu.ac.kr

시스템의 경제성을 최적화하기 위해서는 이러한 교체비용들의 변화에 따른 시스템 용량 및 경제성 변화를 동시에 고려해야 한다. 즉 어떤 구성품의 교체비용이 기술발달로 인해 현저히 떨어질 가능성이 있다면 그것을 고려하여 최적설계를 하는 것이 합당할 것이다. 또한 어떤 한 구성품의 교체비용 변화가 다른 구성품의 비용변화보다 전체시스템의 용량이나 경제성에 민감하게 작용한다면 경제성 최적화를 위해서는 가능한 한 그 구성품의 비용이 최소화 되도록 설계해야 할 것이다. 아울러 사전에 민감도 분석을 통해 민감도가 큰 구성품의 용량 및 비용을 최소화하기 위해 어떠한 조합의 복합발전을 구성해야 하는지에 대한 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 복합발전시스템을 구성하는 각 단위 구성품의 교체비용이 변화할 때 각 단위 구성품의 용량 및 전체시스템의 경제성이 얼마나 변화하는지를 나타내는 민감도 분석을 수행하는 방법을 제시한다. 독립형 풍력-태양광 복합발전시스템에 대해서 경제성이 최적화 되도록 최적용량 설계를 한 다음 각 구성품의 교체비용 변화에 따른 각 구성품 용량 및 경제성 민감도를 분석한다.

경제성평가는 복합 발전시스템을 구성하는 각 발전시스템 용량에 따른 초기비용, 교체비용, 유지보수비용, 효율, 수명과 이자율, 프로젝트 기간에 따른 순 현재비용을 기준으로 수행된다. 부하를 감당할 수 있는 각 발전시스템의 설계용량에 따른 경제성을 평가하고 이것이 최적화 되는 각 단위 발전시스템 용량이 복합발전시스템의 최적용량이 된다. 이와 같이 설계된 최적용량을 초기 기준용량으로 하여 복합발전시스템을 구성하는 각 구성품 교체비용의 변화가 복합발전시스템의 각 단위 구성품 용량 및 경제성에 얼마만큼 영향을 주는 지에 대한 민감도를 분석한다. 민감도 분석의 예로서 주택용 부하 모델에 대해 HOMER에서 제공되는 일반적인 데이터를 사용하여 각 구성품 교체비용에 대한 용량 및 경제성 민감도를 정량적으로 분석한다.

2. 기준시스템의 최적용량 설계

본 연구에서는 미국의 국립재생에너지연구소에서 개발한 경제성 분석 소프트웨어인 HOMER를 이용하여 복합발전시스템의 최적용량 설계 및 민

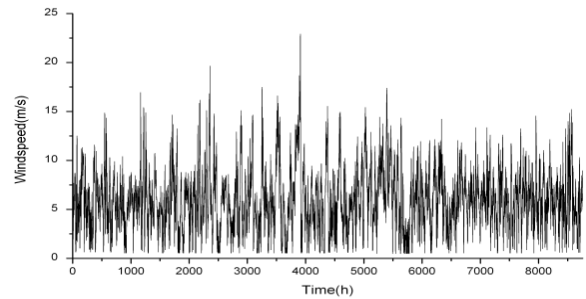


Fig. 1 Wind speed data

감도 분석을 수행한다.⁽¹¹⁾ HOMER는 복합발전시스템의 순 현재비용을 이용하여 다양한 조합의 발전용량에 대해 경제성을 비교 분석함으로써 최적 발전용량을 설계하는 소프트웨어이다.

HOMER를 이용하여 최적 용량을 설계하기 위해서는 복합발전시스템을 구성하는 각 단위 구성품의 모델, 부하모델, 그리고 경제성 및 비용 모델이 필요하다. HOMER는 이와 같은 입력 모델을 바탕으로 경제성이 최적화 되는 시스템의 각 구성품 용량을 도출하고 그에 따른 경제성을 평가한다. 본 연구에서는 신재생발전시스템 중 가장 일반적인 풍력 및 태양광발전시스템으로 구성된 복합발전시스템을 대상으로 한다.

2.1 발전시스템 모델

풍력과 태양광으로 구성되는 복합발전시스템의 주요 구성품은 풍력발전기, 태양광 발전모듈, 배터리, 그리고 컨버터 등이다. 풍력발전시스템 모델은 다음과 같은 가장 일반적인 풍력발전시스템 출력 식을 이용한다.⁽⁴⁾

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서,

ρ : 공기밀도

A : 로터회전면적

V : 풍속[m/s]

$C_p(\lambda, \beta)$: 출력계수

이다. 풍력발전시스템은 단위용량이 10kW인 BWC Excel-S 소형 풍력발전기를 가정하였다. 이 모델의 정격풍속은 12m/s 이며, 수명은 20년으로 가정하였다.

풍력 에너지 자원의 밀도를 나타내는 풍속 데이터는 HOMER에서 제공하는 샘플 풍속 데이터

를 사용하였다. Fig. 1은 가정된 풍속 데이터를 나타내는데 연간 평균풍속은 6m/s 이다.

태양광발전시스템은 수명은 20년이고 단위용량이 20kW 인 PV어레이를 가정하였다. 태양광발전시스템의 출력은 다음 식으로 주어진다.⁽⁴⁾

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

여기서,

Y_{PV} : PV 어레이의 정격 용량[kW]

f_{PV} : PV 전력감세요소[%]

G_T : PV 어레이의 일사량[kW/m²]

$G_{T,STC}$: 표준조건에서의 일사량[kW/m²]

이다.

일사량도 풍속과 마찬가지로 HOMER에서 제공하는 북반구의 대표적인 일사량 샘플 데이터를 이용하였는데 Fig. 2와 같다. 일사량의 연간 평균 청명도는 0.563이고 일일평균 일사량은 5.55kWh/m²이다.

축전지는 공칭용량이 1156Ah(6V)이고 효율은 80%인 가장 일반적인 Rolls/Surrette 사의 S6CS25P 납축전지를 가정하였는데, 2개가 1set로 구성되며 수명은 4년이다. 또한 컨버터는 효율이 95%, 수명이 15년인 인버터와 정류기가 통합된 모델로 선정하였으며 용량은 최대 500kW로 설정하였다.

2.2 부하 모델링

부하모델은 통계청의 ‘전력소비형태분석’ 자료 중 주택용 부하 데이터(2008년~2013년)를 사용하였는데 이 자료는 월평균 시간대별 대표 부하만 제공된다. 그러나 HOMER는 1년간의 매 시간 마다의 부하 데이터를 필요로 하기 때문에 HOMER에서 제공하는 Random variability 기능을 사용하여 월평균 대표 부하를 바탕으로 매일 24시간 동안의 순간부하를 1년간 모델링 하였다. Fig. 3은 이와 같이 모델링 된 주택용 부하로서 피크부하는 300kW, 평균부하는 167 kW, 부하율은 54.3%이다.

2.3 경제성 모델

경제성 분석에는 각 단위 구성품에 대한 여러 가지 비용에 대한 정보가 필요하다. 필요한 각 발전시스템의 구성품의 비용은 순 현재비용(Net Present Cost : NPC), 발전단가 비용, 구성품의 초기비용, 교체비용, 유지보수비용 등이다.

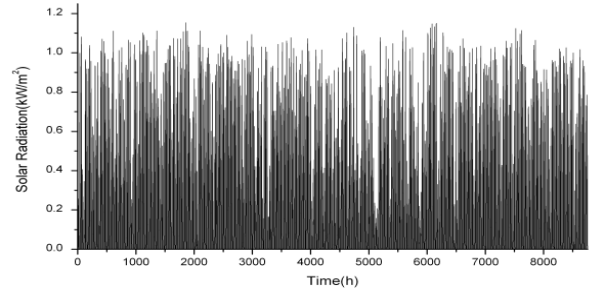


Fig. 2 Solar radiation data

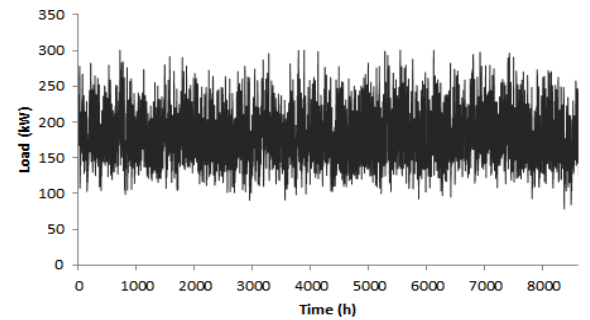


Fig. 3 Load model

순 현재비용은 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽¹²⁾

$$\begin{aligned} NPC &= \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i,N)} \\ &= C_{ann,tot} \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $C_{ann,tot}$ 는 연간 총비용, i 는 연간 이자율, N 은 프로젝트 기간, 그리고 $CRF()$ 는 자본회수율을 나타낸다.

복합발전시스템에서 생산된 전기에너지의 kWh 당 평균비용을 발전단가비용(Levelized Cost of Energy : COE)으로 정의하는데, 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - c_{boiler} H_{served}}{E_{served}} \quad (4)$$

여기서,

c_{boiler} : 보일러 한계비용[\$/kWh]

H_{served} : 총 열부하[kWh/yr]

E_{served} : 총 전기부하[kWh/yr]

이다. 보일러 한계비용이란 전력 1kWh를 더 생산하는 데 들어가는 추가 열비용을 의미한다.

연간 총 운영비용(Operating Cost : OC)은 연간 발생하는 시스템의 총 운영비용으로서 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽¹³⁾

Table 1 Costs of components (unit: \$)

Components	Capital	Replacement	OC(\$/yr)
Wind (set)	26,000	20,000	100
PV(1kW)	7,000	6,000	20
Battery(set)	1,250	1,110	15
Converter(1kW)	800	750	5

Table 2 Capacity ranges of components

Components	Capacity Range
Wind Turbine(set)	2 ~ 100
PV (kW)	20 ~ 1,000
Battery (set)	30 ~ 900
Converter (kW)	50 ~ 500

$$OC = C_{ann,tot} - C_{ann,cap} \quad (5)$$

여기서 $C_{ann,cap}$ 는 총 연간자본비용이다.

2.4 비용 모델

Table 1은 가정된 각 구성요소들의 초기자본비용과 교체비용, 그리고 운영비용을 나타낸다. 순현재비용의 변수에서 연간이자율 i 는 8%, 프로젝트 기간 N 은 25년으로 설정하였다.⁽¹³⁾ 각 발전구성요소들의 비용은 국내에서 정확한 비용을 알 수가 없을뿐더러 공개가 되지 않아 외국자료를 이용하였다.⁽¹¹⁾

2.5 기준 용량 최적설계 결과

이상과 같이 설정된 각 모델을 이용하여 최적용량 설계를 수행하였다. 최적용량설계를 위하여 Table 2와 같이 복합발전시스템 각 구성요소의 용량 범위를 설정하였는데, 풍력발전기는 10kW×2기, 태양광발전기는 20kW×1기, 배터리는 1,156Ah×2대, 그리고 컨버터는 10kW단위로 용량이 증가하는 것으로 가정하였다.

HOMER는 가정된 각 단위발전시스템의 용량범위 내에서 가능한 모든 용량조합에 대해 발전량을 계산하고 그것이 부하모델을 충족하는지 여부를 판단한다. 만약 가정된 용량조합이 부하를 충족하면 그 용량조합에 대해 경제성 모델을 적용하여 순 현재 비용(NPC)를 계산한다. 이렇게 계산된 NPC가 최소가 되는 용량조합을 시스템의 최적용량으로 결정한다.⁽⁴⁾

Table 3 Results of optimal sizing for reference system

Component	Wind (kW)	PV (kW)	Converter (kW)	Battery (set)
Size	740(74sets)	680(34sets)	250	900

Table 4 Costs of the optimal reference system

Items	NPC (1,000\$)	COE (\$/kWh)	OC (1,000\$)
Cost	11,312	0.758	201.6

Table 3은 이와 같은 과정을 통하여 가정된 주택용 부하를 감당할 수 있는 복합발전시스템의 최적용량 설계 결과를 나타낸다. 이 결과는 Table 1에서 가정된 각 구성품의 교체비용이 100%일 때의 결과로서 민감도 분석을 위한 기준용량이 된다.

풍력이 태양광 발전용량보다 60kW 더 큰 용량으로 설계되었으며, 배터리와 컨버터는 Table 2에 가정된 용량 범위 내에서 최대 용량으로 설계되었다. Table 4는 설계된 기준시스템의 각 비용을 나타낸다.

3. 용량 및 경제성 민감도 분석

3.1 민감도 분석방법

복합발전시스템을 구성하고 있는 각 구성품은 수명이 유한하므로 프로젝트 기간 동안 연속적인 발전을 위해서는 교체가 불가피하다. 이와 같은 교체비용은 구성품마다 서로 상이할 뿐만 아니라 또한 구성품의 교체는 반드시 초기 설치 이후에 발생하므로 교체비용이 초기 예상과는 달라질 수 있다. 각 구성품의 교체 비용 변동이 전체 시스템 용량 및 경제성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 3과 같이 설계된 최적 기준용량시스템에 대해 각 구성품의 교체비용의 변화가 시스템 최적용량과 경제성에 얼마만한 변화를 가져오는 지에 대한 민감도를 분석한다.

민감도란 어떤 특정한 파라메타가 전체 결과에 얼마나 중요하게 작용하는지, 또는 그 파라메타의 변화에 따라 얼마나 결과가 변하는 지를 나타내는 지표이다. 특정 구성품의 교체비용변화에 대한 각 구성품의 용량 변화 또는 전체시스템의 비용변화를 나타내는 민감도(Sensitivity Index: SI)를 다음과 같이 정의 한다.⁽¹⁴⁾

$$SI = \frac{R(\%)}{R_c(\%)} \quad (6)$$

Table 5 System sizes and sensitivity index for change of wind turbine replacement costs. ([]: sensitivity index)

Component	80%	70%	50%
Wind(kW)	740 [0.0]	740 [0.0]	740 [0.0]
PV(kW)	680 [0.0]	680 [0.0]	680 [0.0]
Battery(set)	900[0.0]	900[0.0]	900[0.0]
Converter(kW)	250 [0.0]	250 [0.0]	250 [0.0]

여기서 $R(\%)$ 은 각 구성품의 용량변화율 또는 시스템 비용변화율을 나타내며 $R_c(\%)$ 는 특정 구성품의 비용변화율을 나타낸다.

민감도는 다음과 같은 방법으로 분석한다. 먼저 복합발전시스템 구성품의 교체비용이 Table 1에 제시된 기준비용보다 일정비율 하락 할 때 하락된 교체비용을 HOMER의 입력 값으로 하여 최적설계를 다시 수행한다. 그 결과 산출된 새로운 최적시스템의 용량 및 비용과 Table 3 및 4에 제시된 기준 용량 및 비용으로부터 (6)식을 이용하여 민감도를 평가한다.

3.2 용량 민감도 분석 결과

Table 5는 풍력발전기의 교체비용이 Table 1에 가장한 초기교체비용의 80%, 70% 및 50%로 감소 할 때 새롭게 설계된 시스템 최적 용량 및 민감도를 나타낸다. 풍력발전기의 교체 비용이 변화함에도 불구하고 최적 시스템의 용량은 전혀 변화가 없음을 알 수 있다.

일반적으로 특정 구성품의 교체비용이 낮아지면 경제적으로 최적시스템이 되기 위해서는 그 구성품의 용량이 커져야 하는 것이 당연하다. 그러나 풍력의 교체비용이 태양광 및 배터리의 교체비용에 비해 낮기 때문에 풍력의 교체비용이 현저히 낮아져도 전체 비용에 큰 영향을 주지 못하므로 다른 구성품의 용량에 영향을 주지 못하는 것으로 분석된다.

Table 6은 태양광발전기의 교체비용 변화에 대한 전체 시스템의 최적용량 변화 및 민감도이다. 각 구성품의 용량은 교체비용이 70%까지 하락할 때까지는 변화가 없었으나 50%로 하락 할 때 풍력 및 배터리 용량이 줄어들고 태양광의 용량이 늘어나는 결과를 보이고 있다. 이것은 다른 구성품에 비해 교체비용이 비싼 태양광 모듈이 하락함에 따라 태양광 발전 단가가 낮아져 풍력의 용량이 줄어들고 태양광 용량이 증가한 것이다.

Table 6 System sizes and sensitivity index for change of PV replacement costs. ([]: sensitivity index)

Component	80%	70%	50%
Wind(kW)	740 [0.0]	740 [0.0]	700 [0.114]
PV(kW)	680 [0.0]	680 [0.0]	720 [-0.118]
Battery(set)	900[0.0]	900[0.0]	870[0.067]
Converter(kW)	250 [0.0]	250 [0.0]	250 [0.0]

Table 7 Costs and SI according to change of wind turbine replacement costs. ([]: SI)

Cost	80%	70%	50%
NPC (1,000\$)	11,279.5 [0.014]	11,262.8 [0.014]	11,229.3 [0.014]
COE (\$/kWh)	0.756 [0.013]	0.755 [0.013]	0.753 [0.013]
OC (1,000\$)	196.3 [0.131]	193.9 [0.127]	191.2 [0.104]

태양광의 민감도가 음수인 것은 교체비용은 감소한데 반해 용량이 늘어났음을 의미한다.

배터리 용량이 줄어든 이유는 다음과 같이 분석할 수 있다. 풍력은 바람이 불 때는 큰 전력이 발생하지만 연간 바람이 부는 에너지 발생 빈도가 떨어져 태양광에 비해 더 큰 축전 용량이 필요하다. 따라서 태양광 교체비용이 감소하여 태양광 용량이 늘어나고 풍력의 용량이 낮아짐에 따라 요구되는 배터리 용량이 줄어든 것이다.

배터리 및 컨버터의 교체 비용 감소에 따른 전체시스템의 민감도 분석 결과 두 경우 모두 시스템 용량에는 영향이 없는 것으로 나타났다. 컨버터는 직접적으로 발전량에 영향을 주는 구성품이 아니기 때문에 발전시스템 비용에는 영향을 줄 수 있지만 시스템 용량에는 영향이 없는 것이 당연하다.

그러나 배터리는 직접적인 발전 구성품은 아니지만 교체비용 변화에 따라 태양광 및 풍력발전 최적 용량에 영향을 미칠 수 있다. 동일 크기의 부하에 필요로 하는 배터리의 용량은 에너지원의 발생빈도가 높을수록 작아지고 빈도가 낮을수록 더 큰 축전용량이 필요하여 커진다. 이에 따라 배터리 교체비용이 낮아지면 풍력발전과 같이 구성품 비용은 낮으나 요구되는 배터리 용량이 큰 발전 구성품의 최적 용량이 커질 수 있기 때문에 배터리 용량 변화가 전체 시스템의 용량에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서 가정된 에

Table 8 Costs and SI according to change of PV replacement costs. ([]: SI)

Cost	80%	70%	50%
NPC (1,000\$)	11,213.1 [0.043]	11,163.7 [0.043]	11,057.2 [0.044]
COE (\$/kWh)	0.752 [0.039]	0.749 [0.040]	0.743 [0.044]
OC (1,000\$)	187.4 [0.354]	180.3 [0.354]	171.4 [0.299]

Table 9 Cost and SI according to change of battery replacement costs. ([]: SI)

cost	80%	70%	50%
NPC (1,000\$)	11,151 [0.071]	11,147 [0.071]	10,904 [0.072]
COE (\$/kWh)	0.747 [0.071]	0.741 [0.071]	0.731 [0.072]
OC (1,000\$)	185.7 [0.392]	177.9 [0.392]	162.3 [0.390]

Table 10 Cost and SI according to change of converter replacement costs. ([]: SI)

Cost	80%	70%	50%
NPC (1,000\$)	11302.9 [0.004]	11298.4 [0.004]	11289.4 [0.004]
COE (\$/kWh)	0.757 [0.005]	0.757 [0.005]	0.756 [0.005]
OC (1,000\$)	200.7 [0.022]	200.3 [0.022]	199.2 [0.022]

너지 밀도 환경과 다른 환경에서는 경우에 따라서는 배터리 교체비용 변화가 각 발전시스템의 용량에도 영향을 줄 수도 있을 것으로 예상된다.

3.3 경제성 민감도 분석결과

Table 7은 풍력발전기의 교체비용 변화에 따른 시스템 제반 비용변화 및 민감도 분석 결과를 나타낸다. 풍력의 교체비용이 감소할 때 NPC 및 COE에는 미미한 영향을 미치지만 OC에는 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이것은 NPC와 COE는 시스템 전체 비용에 대한 것으로서 풍력의 교체비용의 변화에 크게 영향을 받지 않는 자본비용이 포함되므로 민감도가 떨어지는 반면에 OC는 연간 운영비용으로서 자본비용이 포함되지 않기 때문에 교체비용의 변화에 대한 영향이 더욱 크게 나타난 것으로 분석된다. 교체비용이 감소할수록 OC의 민감도가 미세하게나마 떨어지는데 이것은 교체비용이 감소할수록

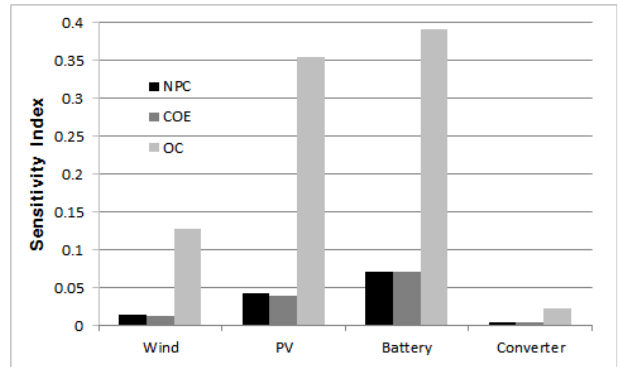


Fig. 4 Comparison of economic sensitivities

OC에 대한 교체비용의 비중이 낮아지기 때문이다.

Table 8은 태양광 교체비용 하락에 따른 시스템의 각 비용 변화 및 민감도를 분석한 결과이다. 풍력의 경우와 마찬가지로 NPC 및 COE보다는 OC의 민감도가 크게 나타났다. 민감도 크기는 풍력의 교체비용에 대한 민감도에 비해 NPC 및 COE는 약 3배, 그리고 OC는 2.7배 정도 민감도가 높은 것으로 나타났다. 이것은 단위 kWh당 태양광 모듈의 비용이 다른 구성품의 비용에 비해 높기 때문에 태양광 교체비용이 낮아짐에 따라 시스템 비용이 현저히 낮아지기 때문으로 분석된다. OC가 50%일 때 다른 경우에 비해 민감도가 낮은 것은 태양광의 운영비가 다른 구성품에 비해 높으므로 태양광 용량이 증가한 만큼 운영비 부담이 커져 80%나 70% 경우보다 OC가 덜 감소하였기 때문으로 분석된다.

Table 9와 10은 각각 배터리 및 컨버터의 교체비용 감소에 따른 전체시스템의 민감도 분석 결과이다. 배터리에 대한 NPC, CEO 및 OC에 대한 민감도가 모두 높게 분석되었는데, 이는 설계된 배터리의 용량이 클 뿐만 아니라 수명도 4년으로서 교체가 잦아 배터리 교체비용이 전체 비용에 차지하는 비중이 크기 때문이다. 반면에 컨버터에 의한 민감도는 컨버터의 교체비용 및 용량이 다른 구성품에 비해 작기 때문에 전체적인 민감도가 낮게 분석되었다.

Fig. 4는 각 구성품의 교체비용이 초기 교체비용에 비해 70%로 감소할 때 시스템 비용에 대한 민감도 지수를 비교한 그래프이다. 각 구성품별 NPC와 COE는 비슷한 값을 가지는 반면에 OC는 5~9배 정도 더 높은 민감도를 보이고 있다. 이것

은 전술한 바와 같이 NPC나 COE는 초기 설치비 등 모든 비용이 고려된 것이기 때문에 상대적으로 교체비용의 비중이 작지만 OC에는 초기 설치비용이 포함되지 않기 때문에 교체비용의 변화가 상대적으로 크게 작용하기 때문이다.

각 구성품의 경제성 민감도를 비교해 보면 용량 민감도와는 달리 배터리의 민감도가 가장 크고 그 다음이 태양광이며 컨버터가 가장 민감도가 낮았다. 이 결과는 배터리와 태양광의 가격 변동여부가 전체 시스템의 경제성에 가장 큰 영향을 주는 반면에 컨버터는 거의 영향을 주지 못하는 것을 의미한다. 따라서 배터리와 태양광 구성품의 교체비용을 가능한 한 최저가 될 수 있도록 설계할 뿐만 아니라 향후 가격변동 가능성을 면밀히 고려하여야 할 필요가 있다.

태양광의 교체비용이 풍력의 3배정도 되기 때문에 민감도도 3배정도인 것은 당연한 결과이다. 그러나 배터리의 교체비용이 태양광의 1/6에 불과함에도 불구하고 민감도가 태양광보다 높게 분석된 것은 전술한 바와 같이 배터리의 용량이 태양광이나 풍력에 비해 월등히 크고 교체주기가 짧기 때문이다. 배터리의 용량이 큰 것은 풍력이나 태양광과 같은 신재생 에너지원은 에너지 밀도가 낮기 때문에 높은 부하용량을 감당하기 위해서는 저장장치인 배터리의 용량이 커질 수밖에 없기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 HOMER의 복합발전 최적 용량 설계 기능을 이용하여 풍력-태양광 복합발전시스템의 각 구성품 교체비용 변화가 전체 시스템에 미치는 용량 변화 및 비용 변화의 민감도를 분석하는 방법을 제시하고 주택용 부하에 대해 실제 분석을 수행하였다. 분석에 필요한 각종 데이터는 HOMER에서 제공되는 일반적인 데이터를 사용하였다.

각 구성품의 교체비용 변화에 따른 시스템의 용량 민감도를 분석 한 결과 풍력과 같은 교체비용이 낮은 구성품의 교체비용 변화는 시스템의 용량 변화에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 반면에 교체비용이 비싼 태양광의 경우 교체비용이 낮아지면 태양광 용량이 증가하고 풍력의 용량이 낮아 질 뿐만 아니라 배터리 용량도 영향을 받는 것으로 분석되었다. 또한 직접적인

발전 구성품이 아닌 배터리의 경우 에너지 밀도 환경에 따라 용량에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 가능성을 보였다.

경제성 민감도 분석결과 태양광과 같이 교체비용이 비싸거나 배터리와 같이 교체주기가 짧고 용량이 큰 구성품의 민감도가 크게 나타났다. 또한 모든 구성품에 대해 NPC 및 COE보다는 OC에 대한 민감도가 현저하게 높게 나타났다. 이것은 NPC나 COE에는 초기비용이 포함되지만 OC에는 포함되지 않으므로 교체비용의 변화가 OC에 더욱 크게 영향을 주기 때문이다. 또한 경제성 민감도가 가장 큰 구성품은 배터리로 분석되었다.

배터리의 민감도가 높은 것은 다른 구성품에 비해 용량이 크고 교체주기가 짧기 때문이다. 배터리의 용량이 높은 것은 신재생 복합발전시스템의 에너지 밀도가 낮기 때문인데 배터리용량을 낮추기 위해서는 서로 보완적인 관계에 있는 신재생 에너지를 추가로 이용함으로써 에너지 밀도를 높여야 한다. 따라서 신재생 복합발전시스템의 경제성 향상을 위해서는 태양광과 같이 교체비용이 높은 구성품의 비중이 낮아질 수 있게 설계하고 교체 비용을 가능한 한 줄이며, 배터리 용량을 줄이기 위해 에너지밀도를 높일 수 있는 보완적인 신재생 에너지를 추가로 이용하는 것이 필요하다.

참고문헌 (References)

- (1) Park, S. J., Lee, Y., Choi, Y. S. and Lee, K. S., 2010, "Optimization of Residential Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid System Using HOMER," *The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 59, No. 1, pp. 129~133.
- (2) Park, K. H., 2009, "A Study on Optimal Sizing of New and Renewable Hybrid Generation System," M.Sc. Thesis, Department of Mechatronics, Jeju National Univ.
- (3) Park, K. H., Kang, C. U. and Lim, J. H., 2011, "Optimal Sizing of Hybrid Wind-PV-Tide System," *Studies in Computational Intelligence*, Springer, Vol. 365, pp.209~218.
- (4) Lim, J. H., 2013, "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, pp.1103~1109.
- (5) Kellogg, W., Nehrir, M. H., Venkataramanan, G. and Gerez, V., 1996, "Optimal Unit Sizing for a Hybrid Wind/Photovoltaic Generating System," *Electric Power Systems Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 35~38.
- (6) Chedid, R. and Saliba, Y., 1996, "Optimization and Control of Autonomous Renewable Energy Systems," *Int. J. Energy Res.*, Vol. 20, No. 7, pp. 609~624.
- (7) Karaki, S. H., Chedid, R. B. and Ramadan, R., 1999, "Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-Wind Energy Conversion Systems," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 14, No. 3, pp. 766~772.
- (8) Bagul, A. D., Salameh, Z.M. and Borowy, B., 1996, "Sizing of Stand-Alone Hybrid PV/Wind System Using a Three-Event Probabilistic Density Approximation," *Solar Energy*, Vol. 56, No. 4, pp. 323~335.
- (9) Diaf, S., Diaf, D., Belhame, M., Haddadi, M. and Louche, A., 2007, "Methodology for Optimal Sizing of Autonomous Hybrid PV/Wind System, Energy Policy," Vol. 35, No. 11, pp. 5708~5718.
- (10) Lim, J. H., 2012, "Optimal Combination and Sizing of a New and Renewable Hybrid Generation System," *Int. J. of Future Generation Communication and Networking*, Vol. 5, No. 2, pp. 43~60.
- (11) HOMER, <http://www.nrel.gov/homer>
- (12) Jang, H. N. and Kim, D. S., 2006, "Pre-Feasibility Test of Introducing Renewable Energy Hybrid Systems," *Environmental and Resource Economics Review.*, Vol. 15, No. 4, pp. 693~712.
- (13) Hossan, M. S., Hossain, A. R. and Haque, R., 2011, "Optimization and Modeling of a Hybrid Energy System for Off-Grid Electrification," *10th Int. Conf. on EEEIC*, pp. 1~4.
- (14) Kim, J., 2010, "Economic Analysis on a PV System in an Apartment Complex," *Climate Change Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 163~177.