

태양광-풍력 복합발전시스템의 용량 산정과 경제성 분석에 관한 연구

김 중 환 이 승 철 권 병 국 오 해 진  
 중앙대학교 전자전기공학부

A Study on the Generation Capacity and Cost Analysis of Solar-Wind Hybrid Power System

Jong-Hwan Kim, Seung-Chul Lee, Byeong-Gook Kwon, Hae-Jin Oh  
 School of EE, Chung-Ang University

**Abstract** - 본 논문에서는 태양광-풍력 복합발전시스템의 발전용량 예측을 통한 시스템 시설투자비 및 발전단가와 경제성에 대하여 분석한다. 도시지역의 일사량 및 풍속 데이터를 기초로 하여 복합발전시스템의 일일 발전량을 구하고, 수용가의 일일부하패턴과 수요부하를 고려하여 태양전지 어레이와 풍력발전기의 용량을 산정한다. 그리고 용량 산정에 따른 복합발전시스템의 초기투자비용과 연간 발전량, 연간 소요경비 등의 요소를 고려하여 총 수명가 분석법(Total Life-Cycle Cost Analysis)에 기초한 발전단가를 계산하고 잉여전력을 계통에 판매할 경우의 경제성을 평가한다.

전시스템 용량을 산정한다[4~6]. 그리고 복합발전시스템의 연간 발전량과 시스템 용량 산정에 따른 시설투자비 등의 요소를 고려하여 총 수명가 분석법(Total Life-Cycle Cost Analysis)으로 복합발전시스템의 발전단가를 분석한다[7]. 또한 잉여전력을 계통에 판매할 경우의 경제성도 분석하기로 한다.

2. 복합발전시스템 출력

2.1 태양전지 어레이 출력

태양전지 어레이의 출력예측에서 일사량의 분포는 일반적으로 Beta Distribution으로 알려져 있다. 매 시간대별 일사량 확률밀도함수는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$f(r_t) = \frac{\Gamma(\alpha_t + \beta_t)}{\Gamma(\alpha_t)\Gamma(\beta_t)} \left[ \frac{r_t}{r_{t,max}} \right]^{\alpha_t - 1} \left[ 1 - \frac{r_t}{r_{t,max}} \right]^{\beta_t - 1} \quad (1)$$

여기서  $r_t, r_{t,max}$  [W/m<sup>2</sup>] : t시간대의 순시 및 최대 일사량  
 $\alpha_t, \beta_t$  : t시간대의 shape parameter  
 $\Gamma$  : Gamma function

따라서 태양전지 어레이의 시간대별 평균출력은 다음과 같이 할 수 있다.

$$P_{st} = \int P(r_t)f(r_t)dr \quad [W/m^2] \quad (2)$$

여기서  $f(r_t)$ 은 일사량 확률밀도함수로 식 (1)에 주어졌으며  $P(r_t)$ 는 일사량  $r_t$ 태양전지 어레이의 출력전력으로 출력전압과 출력전류의 곱으로 구한다.

2.2 풍력발전기 출력

풍속의 분포를 나타내는 통계적 방법으로는 Weibull Distribution이 일반적으로 사용되며 월평균 풍속이나 연평균 풍속으로부터 풍속의 분포를 예측하는데 비교적 잘 맞는 것으로 알려져 있다. 풍속의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다.

$$f(V_t) = \frac{k_t}{c_t} \left( \frac{V_t}{c_t} \right)^{k_t - 1} \text{EXP} \left[ - \left( \frac{V_t}{c_t} \right)^{k_t} \right] \quad (3)$$

여기서  $c_t$  : t시간대의 Scale parameter  
 $k_t$  : t시간대의 Shape parameter

풍속  $V_t$ 에서의 풍력발전기의 출력특성은 일반적으로 보간법(Interpolation)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P(V_t) &= 0 & (V_t < V_i) \\ P(V_t) &= P_r \cdot \left[ \frac{V_t^k - V_c^k}{V_r^k - V_c^k} \right] & (V_i \leq V_t \leq V_r) \\ P(V_t) &= P_r & (V_r < V_t < V_o) \\ P(V_t) &= 0 & (V_t > V_o) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $P_r$  : 정격출력  $V_i$  : 시동풍속

1. 서 론

태양과 풍력에너지는 석유 대체에너지 및 무공해 청정에너지로 각광받는 미래에너지이다. 태양에너지는 낮에만 이용가능하고 에너지 밀도가 낮다. 풍력에너지는 24시간 이용 가능하지만 풍속의 변화로 인해 발전전력이 불규칙하다. 그리고 우리나라의 기후특성을 계절적으로 보면 겨울은 바람이 많고 일사량이 적은 반면, 여름은 바람이 적고 일사량이 많기 때문에 계절적인 보완도 가능하게 된다. 따라서 태양광 및 풍력발전의 상호보완으로써 태양광-풍력 복합발전시스템(이하 복합발전시스템)을 구축한다면 에너지 이용의 신뢰도를 높일 수 있다. 하지만 복합발전시스템이 널리 보급되지 못하는 가장 큰 이유는 과도한 초기시설투자비 일 것이다. 따라서 본 논문에서는 복합발전시스템의 발전단가와 경제성 분석을 통하여 보급화 가능성에 대하여 고찰하고자 한다.

본 논문에서는 복합발전시스템을 다음 그림1과 같이 계통연계시스템으로 구성하여 연구하고자 한다.

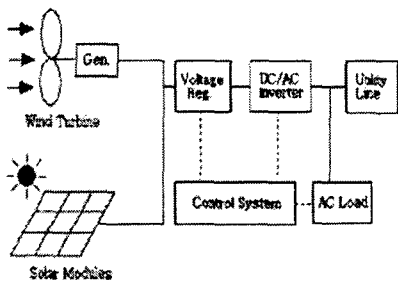


그림1 태양광-풍력 복합발전시스템 구성도

태양전지 모듈과 풍력발전기에서 발생한 직류는 인버터를 통하여 교류로 변환시켜 전력을 일반부하에 공급하며 잉여전력은 계통으로 내보내 판매하고, 부족전력은 계통으로부터 공급받도록 한다.

일사량과 풍속은 랜덤변수로 이므로 일반적으로 일사량은 Beta 분포, 풍속은 Weibull 분포로 나타내는 것으로 알려져 있다[1~3]. 본 논문에서는 일사량 및 풍속의 확률밀도함수를 통해 복합발전시스템의 평균발전량을 구하고, 도시지역 주택수용가의 전형적인 부하패턴과 전력사용량을 구하여 최적 복합발

$$V_r : \text{정격풍속} \quad V_o : \text{정지풍속}$$

따라서, 풍력발전기의 평균출력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{wt} = \int P(V_r)f(V_r)dV \quad [W/\text{대}] \quad (5)$$

### 2.3 복합발전시스템 출력

식 (2), (5)로부터 태양광-풍력 복합발전시스템의 Typical Day의 발전전력량은 다음 개략적인 시간별 출력으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_T = \sum_{i=1}^{24} [A_s \cdot P_{st} + n_w \cdot P_{wt}] \quad [Wh] \quad (6)$$

여기서,  $P_T$  : 복합발전 시스템의 전형적인 날의 총 출력[W/h]

$P_{st}$  : 태양전지 단위면적당 발전량[W/m<sup>2</sup>]

$P_{wt}$  : 풍력발전기 1대당 발전량

$A_s$  : 태양전지 모듈의 면적[m<sup>2</sup>]

$n_w$  : 풍력발전기의 수[대]

태양광전지 모듈 1m<sup>2</sup>와 400W 풍력발전기 1대의 복합발전시스템의 경우의 출력을 그래프로 나타내면 그림.2와 같다.

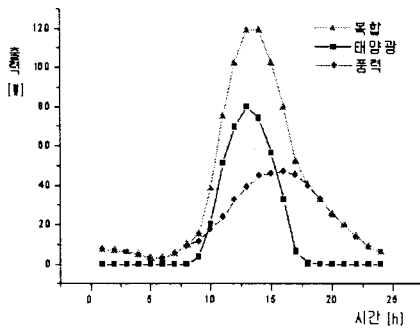


그림.2 복합발전시스템 출력

### 3. 복합발전시스템 발전단가 및 경제성

본 논문에서는 복합발전시스템의 초기 시설투자비와 운전 기간 중 발생하는 운전 및 유지보수에 소요되는 총 투자비를 현재가로 환산하여 시스템의 수명가를 분석하는 총 수명가 분석법(Total Life-Cycle Cost Analysis)을 사용하여 복합발전시스템의 발전단가를 분석하고자 한다.

#### 1) 초기 시설투자비

초기 시설투자비의 주요항목으로는 태양전지 모듈, 풍력발전기, 인버터, 콘트롤 시스템, 지지대, 설치공사비 등이 있다.

#### 2) 초기 투자비의 상환

복합발전시스템의 초기 시설투자비가 크기 때문에 시스템의 수명기간 동안에 할인율(discount rate)  $r$ 을 고려하여 설비수명기간  $n$ 년(year) 동안에 회수되어야 한다. 초기 투자비에 대한 자본회수계수(Capital Recovery Factor) CRF는 다음 식 (7)과 같다.

$$CRF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7)$$

따라서, 수명기간 중 매년 연말에 일정금액을 회수한다고 할 때 연간 회수비용  $C_{ar}$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_{ar} = C_c \times CRF \quad (8)$$

여기서  $C_c$  : 초기 투자비  
CRF : 자본회수계수

#### 3) 연간 유지관리비

연간 유지관리비는 배터리시스템의 유무여부와 태양광과 풍력의 발전비율등, 복합발전시스템의 형태에 따라 다소 다를 수 있겠으나, 일반적으로 시스템 가격의 고정된 퍼센트로서 계산한다. 이 경우 연간 유지관리비  $C_m$ 은 다음 식 (9)와같이 나타낸다.

$$C_m = a \times C_c \quad (9)$$

여기서  $a$  : 유지관리비 비율  
 $C_c$  : 초기 투자비

#### 4) 연간 총 소요경비

연간 소요되는 총 경비는 연간 유지관리비와 초기 투자비의 회수비용이므로 연간 총 소요경비  $C_a$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_a = C_{ar} + C_m \quad (10)$$

여기서  $C_{ar}$  : 연간 회수비용  
 $C_m$  : 연간 유지관리비

#### 5) 발전 단가

복합발전시스템의 발전단가는 연간 총 소요경비를 연간 총 발전량 기댓값으로 나누면 구할 수 있다. 즉 복합발전시스템의 발전단가  $C_p$ 는 인버터의 효율을 무시할 경우 다음과 같다.

$$C_p = \frac{C_a}{P_a} \quad [원/kWh] \quad (11)$$

여기서  $P_a$  : 연간 총 발전량

#### 6) 설비의 경제성 분석

복합발전시스템을 설치하지 않았을 경우 단일 전력요금을 적용하면 연간 총 전력요금은 식 (12)와 같다.

$$C_{TO} = P_{ly} \times C_s \quad (12)$$

여기서  $C_{TO}$  : 연간 총 전력구매비용  
 $P_{ly}$  : 연간 총 전력사용량  
 $C_s$  : 단위전력당 평균 전력요금

복합발전시스템을 설치하여 양방향으로 전력을 구매또는 판매할 수 있을 경우 연간 총 전력비용은 식 (13)과 같다.

$$C_{Ti} = C_a + P_{si}C_s - P_{so}C_r \quad (13)$$

여기서  $C_{Ti}$  : 복합발전시스템 설치시 연간 총 전력비용  
 $C_a$  : 복합발전시스템 연간 총 소요경비  
 $P_{si}$  : 계통으로부터 총 구매 전력량  
 $P_{so}$  : 계통에 판매한 총 전력량  
 $C_r$  : 계통의 보상 구매 단위 전력량 전력요금

따라서  $C_{Ti} < C_{TO}$ 가 될 경우, 복합발전시스템 설치가 이익이 될 수 있다.

여기서  $P_{ly} = P_{si} + (P_a - P_{so})$ 이므로  $C_{Ti} < C_{TO}$ 는

$C_a + P_{si}C_s - P_{so}C_r < P_{si}C_s + (P_a - P_{so})C_s$ 로 놓을 수 있고, 정리하면 식 (14)와 같다.

$$C_a < P_{so}C_r + (P_a - P_{so})C_s \quad (14)$$

발전설비 연간 총 소요경비가 총 금액과 복합발전 발전량 중 자체부하에 공급한 전력량에 전력요금을 곱한 금액 즉, 계통으로부터 그만큼 전력을 구매하였을 경우의 전력요금의 합보다 적으면 복합발전설비를 설치할 경우 이득이 된다.

#### 4. 실증연구

도시지역 주택수용가의 전형적인 일일 부하패턴을 다음 그림.3과 같이 추정하였다[8]

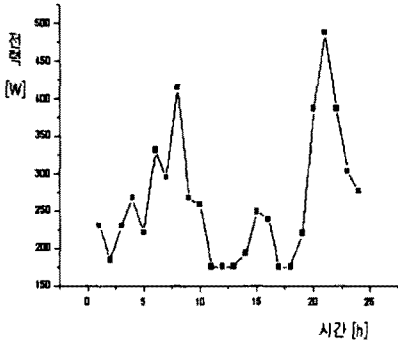


그림.3 도시지역 주택수용가 모의부하패턴

2000년도 에너지 통계조사 결과에 의하면 국내 도시지역 가구당 월평균 전력사용량은 192[KWh]이며 따라서 연간 일일 전력사용량은 약 6300[Wh]로 나타났다.

태양광 발전량은  $P_p$ 는 400[Wh/m<sup>2</sup>], 풍력 발전량  $P_w$ 는 500[Wh] 정도로 예측하고, 풍력발전기 400[W] 1대, 태양전지 어레이 50[W] 30장으로 시스템 용량을 산정하였다. 그리고 인버터는 2[KW]급으로 결정하였다[9].

이와 같이 구성된 복합발전시스템의 일일 예상출력을 구하면 6,262[Wh]가 되며, 미국 NREL의 HOMER Program에 입력하여 시뮬레이션하면 연간 총 발전량은 2,727[kWh] 정도로 예상된다. 복합발전시스템 용량을 산정한 후, 시스템 초기 시설투자비용을 계산하여 보면 표.1과 같다.

표.1 복합발전시스템 초기투자비용 (단위 : 만원)

품목	규격	단위	수량	금액
Solar Module	50W	장	30	1,350
Solar Module 지지대		식	3	60
Wind Turbine	400W	대	1	150
Controller System	2kW	EA	1	100
Inverter	2kW	EA	1	200
설치공사비 및 잡자재비		식	1	100
계				1,960

(일일 부하용량 : 6300[Wh] 기준)

할인율(discount rate)  $r = 8\%$ , 설비수명기간  $n=20$ 년(풍력발전기 수명 : 20-25년, 태양전지 어레이 : 20년 이상)을 적용하여 초기 투자비에 대한 자본회수계수를 구하면,  $CRF = 0.102$  이 된다. 표.1에서의 초기 시설투자비용 19,600,000원을 적용한 연간 회수비용  $C_{ar}$ 은 1,999,200원이 된다. 그리고 연간 유지관리비는 초기 시설투자비의 1%로 결정하였다. 연간 소요되는 경비 중에 포함되는 것은 여러 가지가 있지만, 본 논문에는

가장 큰 요소인 유지관리비와 초기 투자비의 회수비용만을 고려하였다. 따라서 연간 총 소요경비  $C_a$ 는 2,195,200원이 된다. 따라서 발전단가를 구하면 약 805[원/kWh]이 계산된다. 그림.2와 그림.3에서 산출한 연간 잉여전력 판매량은 약 1927[kWh] 정도이고 정부의 전력구입 금액은 제통한계가격 48.8[원/kWh]일때 667.6[원/kWh]이고, 이 가격을 적용하면 잉여전력 판매비는 약 1,240,000원으로 계산된다[10]. 따라서 이 경우 주택가의 평균전력요금 약 92[원/kWh]를 적용하면 식 (14)에서  $P_{so}C_r = 1,240,000$ 원,  $(P_a - P_{so})C_s = 73,600$ 원으로 총 1,313,600원이 되어  $C_a$ 보다 작아져 부하와 같은 수준의 설비 용량으로는 경제성이 낮은 것으로 나타났다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 태양광-풍력 복합발전시스템의 발전용량 예측을 통한 시스템 시설투자비 및 발전단가에 대하여 분석하였고, 도시지역에서의 복합발전시스템의 발전량과 주택수용가의 수요부하를 고려하여 태양전지 어레이와 풍력발전기의 용량을 산정하였다. 용량 산정에 따른 복합발전시스템의 초기투자비용, 연간 소요경비 등의 요소를 고려하여 총 수명가 분석법(Total Life-Cycle Cost Analysis)을 통하여 발전단가를 계산하였다. 부의 대체에너지 활성화와 정책에 따른 전력구입 금액을 감안하더라도 주택수용가 평균전력요금 보다는 높은 가격이다.

본 논문에서는 2000년도 전형적인 도시수용가를 예로 전력 발전용량을 산정하였다. 실제 전력소비가 큰 수용가들의 경우 누진전력요금을 적용되고, 이 경우 전력요금이 급격히 늘어나므로 본 연구에 기초하여 복합발전시스템의 경제성이 생길 것이다. 후속 연구과제로 복합발전시스템의 누진전력요금을 반영한 경제성 평가를 할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Imad Abouzahr, "Loss of Power Supply Probability of Stand-Alone Photovoltaic Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, March 1991
- [2] S. H. Karaki, "Probabilistic Performance Assessment of Autonomous Solar-Wind Energy Conversion Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.14, No.3, Sep. 1999
- [3] Bogdan S. Borowy, "Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996
- [4] Ziyad M. Salameh, "Photovoltaic Module-Site Matching Based on the Capacity Factors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, June 1995
- [5] Bogdan S. Borowy, "Optimum Photovoltaic Array Size for Hybrid Wind/PV System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, Sep. 1994
- [6] Fadia M.A.GHALL, "Simulation and Analysis of Hybrid Systems using Probabilistic Techniques", Power Conversion Conference-Nagaoka 1997., Proceedings of the, Vol 2, 1997
- [7] 이춘식 외, "한·독 태양-풍력 복합발전 관련 연구", 한국과학기술원, 1986년 5월
- [8] "부하곡선 자료집", 한국전력공사, 2000년 12월
- [9] Byeong-Gook Kwon, Seung-Chul Lee "A Capacity Estimation Technique of Solar-Wind Hybrid Power System for an Urban Residential Load", IFAC, 2003년 6월
- [10] "대체에너지의 이용 발전전력의 기준가격", 산업자원부, 2002년