

태양광-풍력 복합발전시스템의 축전지 용량산정에 관한 연구

권병국 이송철 박찬엄 김종환 오종환  
 중앙대학교 전자전기공학부

A Study on the Battery Capacity Determination of Solar-Wind Hybrid Power System

Byeong-Gook Kwon, Seung-Chul Lee, Chan-Eom Park, Jong-Hwan Kim, Jong-Hwan Oh  
 School of EE, Chung-Ang University

**Abstract** - 본 논문에서는 태양광-풍력 복합발전시스템의 구성에 있어서 확률적으로 변화하는 시스템 발전량과 부하량을 고려한 적정 축전지 용량산정기법에 관하여 연구하였다. 서울지역에서의 전형적인 날의 시간대별 일사량과 풍속 데이터에 기초하여 태양광-풍력 복합발전시스템의 출력분포를 산정하였고 배전계통과 연계된 전형적인 일반 주택부하를 가정하여 시스템 발전량과 부하량이 서로 상충하도록 풍력발전기와 태양전지의 용량을 결정하였다. 태양광-풍력 복합발전시스템의 예상 발전량은 각각 Beta 분포와 Weibull 분포에 기초하여 산정하였고 수요부하량을 비교하여 잉여 발전량은 축전지에 충전하고 부족 발전량은 축전지에서 방전하여 가능한한 계통으로부터 인입전력을 공급받지 않기 위한 최소 축전지 용량을 산정하는 기법에 관하여 연구하였다.

전지로부터 일반부하에 공급하도록 하고 축전지 수명을 고려하여 방전이 일반적으로 40%정도 되면 인버터 쪽을 차단하고 계통선으로부터 전력을 공급받도록 구성하였다.

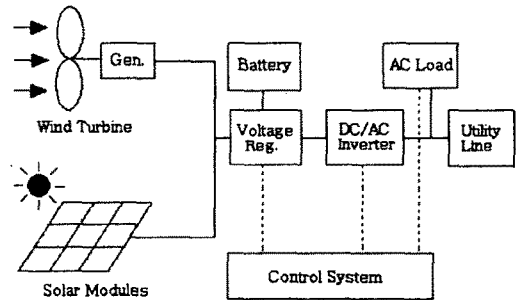


그림 1. 태양광-풍력 복합발전시스템 구성도

1. 서론

일반적으로 일사량과 풍속은 랜덤변수로 고려되어지며 지금까지의 연구 결과 일반적으로 일사량은 Beta 분포, 풍속은 Weibull 분포를 나타내는 것으로 알려져 있다[1~3]. 또한 태양광-풍력 복합발전시스템(이하 복합발전시스템)의 평균출력예측은 일사량 및 풍속의 확률밀도함수와 각 시스템의 평균출력을 구하여 이들의 산술적 합으로 복합발전시스템의 평균출력을 구해오고 있다[4~6].

본 논문에서는 서울지역의 일사량과 풍속의 확률밀도함수로부터 각 시스템의 출력확률밀도함수를 구한 다음, 두 출력확률밀도함수를 convolution하여 복합발전 시스템의 출력확률밀도함수를 구하였다. 이를 기초로 하여 서울지역의 복합발전 시스템의 시간별, 일별, 월별 및 연간 출력을 예측하여 전형적인 날의 출력량을 구하였다.

전형적인 도시지역 주택수용가들이 전력을 사용하는 형태는 일, 월 및 계절에 따라 각각 변화가 있겠으나 본 논문에서는 가구당 일일 부하사용량을 기준으로 하여 축전지를 구비한 복합발전시스템으로 일일 공급가능한 전력이 총부하량과 같도록 복합발전시스템의 총용량을 결정하였다.

수요부하량 및 축전지 충방전량도 랜덤하게 변화하므로 부하확률밀도함수와 축전지 충방전확률밀도함수를 구할 수 있고[6,7], 이들의 기대치로부터 전형적인 날의 축전지 충방전 곡선을 구할 수 있다. 본 논문에서는 전형적인 날의 복합발전시스템 출력예측 곡선과 부하의 모의패턴 곡선으로부터 축전지 충방전 곡선을 산출하고 이로부터 축전지 용량을 산정하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. 시스템 구성

본 논문에서는 복합발전시스템을 다음 그림 1과 같이 축전지 백업시스템을 갖춘 계통연계형으로 구성하였다. 태양전지 모듈과 풍력발전기에서 발생된 직류는 인버터를 통하여 교류로 변환시켜 전력을 일반부하에 공급하고 잉여전력은 축전지에 저장시킨다. 태양광과 풍력이 부족할 때는 축

3. 복합발전시스템의 출력예측

3.1 태양전지 모듈의 출력예측

일반적으로 일사량 분포분석으로 Beta, Weibull, Log Normal과 같은 통계적 방법이 사용되는 데, 본 논문에서는 Chi-Square Goodness of Fit Test에 의해 검증된 Beta Distribution을 사용한다. 일사량 확률밀도함수는 다음 식 (1)과 같이 주어진다.

$$f_s(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left[ \frac{r}{r_{max}} \right]^{\alpha-1} \left[ 1 - \frac{r}{r_{max}} \right]^{\beta-1} \quad (1)$$

여기서  $\Gamma$  : Gamma function

$r, r_{max}$  [W/m<sup>2</sup>] : 순시 일사량과 최대 일사량

$\alpha, \beta$  : shape parameter

일사량에 따른 태양전지 모듈의 순시출력  $P_s$ 와 최대출력  $P_{s,max}$ 는 다음과 같다.

$$P_s = rA\eta \quad P_{s,max} = r_{max}A\eta \quad (2)$$

$$A = \sum_{m=1}^M A_m \quad \eta = \frac{\sum_{m=1}^M A_m \eta_m}{A}$$

여기서,  $A$  [m<sup>2</sup>] : 태양전지 모듈의 면적

$\eta$  : 태양전지 변환 효율

그러므로 태양전지 모듈면적  $A[m^2]$ 로부터 얻을 수 있는 출력의 확률밀도함수는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{P_s}(P_s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left[ \frac{P_s}{P_{s,max}} \right]^{\alpha-1} \left[ 1 - \frac{P_s}{P_{s,max}} \right]^{\beta-1} \quad (3)$$

### 3.2 풍력발전기의 출력예측

풍속의 분포를 나타내는 통계적 방법으로는 Weibull Distribution이 일반적으로 사용되며 풍속의 확률밀도함수는 다음 식(4)와 같이 주어진다.

$$f_V(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \text{EXP} \left[ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (4)$$

여기서,  $V$ : 풍속[m/s]  
 $c$ : scale parameter  
 $k$ : shape parameter

본 논문에서는 미국 Southwest AIR 403 풍력발전기를 사용하였으며 풍속(시동풍속  $V_c$ , 정격풍속  $V_r$ , 정지풍속  $V_f$ )에 따른 출력특성은 그림 2와 같다.

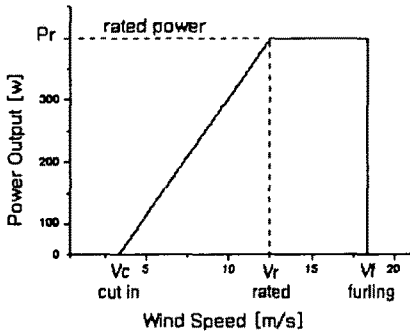


그림 2. 풍력발전기의 출력특성

풍력발전기의 출력특성은 보간법(Interpolation)에 의해 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w(V) = \begin{cases} 0 & (V \leq V_c) \\ a + b^n & (V_c < V < V_r) \\ P_r & (V_r \leq V < V_f) \\ 0 & (V_f \leq V) \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $n$ :  $V_c \sim V_r$  구간의 차수(여기서는 1차)

$$a = P_r \cdot \frac{V_c^n}{V_r^n - V_c^n} \quad b = P_r \cdot \frac{1}{V_r^n - V_c^n}$$

식 (4)의 풍속확률밀도함수  $f_V(V)$ 를 적분하면 식 (6)과 같이 풍속의 누적밀도함수를 구할 수 있다.

$$F_V(V) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (6)$$

그리고 풍력발전기의 출력누적밀도함수를 다음 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{P_w}(P_w) = \begin{cases} 1 - F_V(V_f) + F_V(V_c), & P_w = 0 \\ (V \leq V_c, V_0 \leq V) \\ F_V(V(P_w)) - F_V(V_c), & 0 \leq P_w \leq P_r \\ (V_c < V < V_r) \\ F_V(V_f) - F_V(V_r), & P_w = P_r \\ (V_r \leq V < V_f) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } V(P_w) = \left[ \frac{P_w - a}{b} \right]^{\frac{1}{k}}$$

따라서  $F_{P_w}(P_w)$ 를  $P_w$ 에 대해 미분하면 풍력발전기의 출력확률밀도함수를 다음 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$f_{P_w}(P_w) = \begin{cases} [1 - F_V(V_f) + F_V(V_c)] \delta(P_w), & P_w = 0 \\ \left[ \frac{(V_r - V_c)}{P_r} \right] \left[ \frac{k}{c^k} \right] \left[ V_c + (V_r - V_c) \frac{P_w}{P_r} \right]^{k-1} \times \\ \exp \left[ - \left( \frac{V_c + (V_r - V_c) \frac{P_w}{P_r}}{c} \right)^k \right], & 0 < P_w < P_r \\ [F_V(V_f) - F_V(V_r)] \delta(P_w - P_r), & P_w = P_r \end{cases} \quad (8)$$

### 3.3 복합발전시스템의 출력예측

복합발전 시스템의 어느 시간대 출력확률밀도함수는 식 (3)의 태양전지 모듈 출력확률밀도함수와 식(8)의 풍력발전기 출력확률밀도함수를 convolution하여 다음 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$f_{P_h}(P_h) = f_{P_s}(P_s) * f_{P_w}(P_w) \quad (9)$$

## 4. 복합발전시스템 축전지 용량결정

일년 중 전력을 사용하는 형태는 일, 월 및 계절에 따라 다르겠지만 도시지역 주택수용가의 전형적인 평일의 반복적인 부하패턴을 개략 그림 3과 같이 추정하였다[8]. 2000년도 에너지 통계조사 결과에 의하면 국내 도시지역 가구당 월평균 전력사용량은 178[KWh]이며 일일 전력사용량은 약 6300[Wh]로 나타나 있다.

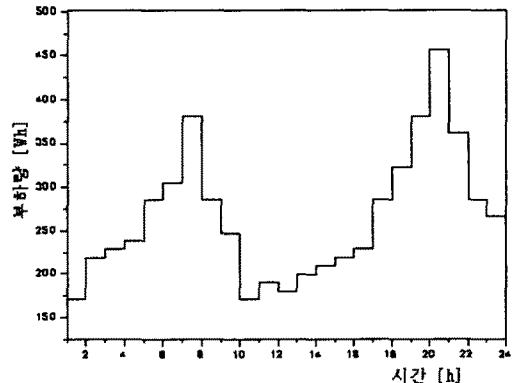


그림 3. 도시지역 주택수용가 모의부하패턴

서울지역에서 전형적인 날의 각 시스템 출력은 상기 식 (3)과 (8)로부터 태양전지 모듈 50W 1장당 출력은 약 160[Wh], 풍력발전기 400W 1대의 출력은 약 290[Wh]로 예측할 수 있다. 일일 가구당 부하량 6300[Wh]을 만족시키기

위한 태양전지 모듈과 풍력발전기의 용량을 다음 식(10)과 같이 구하였다.

$$A_s \cdot P_s + n_w \cdot P_w = L \quad (10)$$

여기서  $A_s$  : 태양전지 모듈의 면적[m<sup>2</sup>]  
 $n_w$  : 풍력발전기의 수  
 $P_s$  : 태양전지 단위면적당 발전량[W/m<sup>2</sup>]  
 $P_w$  : 풍력발전기 1대당 발전량

태양전지 모듈의 면적과 풍력발전기의 수를 결정하기 위해서는 복합발전시스템의 초기설치비용의 경제성을 고려하여야 한다. 복합발전시스템의 경우 풍력발전기 1대(400W), 그리고 태양전지 어레이 약 38장(1.9kW)이 초기 설치비용 면에서 경제적으로 수용부하량을 만족시킬 수 있는 시스템 용량으로 나타났다.

서울지역 주택수용가의 전형적인 날의 어느 시간대에서 축전지 충방전량  $C(t)$ 는 식(10)에 구한 복합발전시스템 출력과 부하량의 차이로서 다음 식(11)와 같다.

$$C(t) = P(t) - L(t) \quad (11)$$

복합발전시스템 출력과 마찬가지로 수요부하 또한 랜덤하므로 통계적 방법으로 나타낼 필요가 있다. 본 논문에서는 수요부하가 최대부하  $L_{max}$ 와 최소부하  $L_{min}$  사이에서 일정하게 분포한다고 가정하여 부하의 확률밀도함수를 다음 식(12)과 같이 구하였다.

$$f_L(\ell) = \begin{cases} \frac{1}{L_{max} - L_{min}} & \text{for } L_{min} \leq \ell \leq L_{max} \\ 0 & \text{for otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

따라서 축전지의 시간대별 충방전확률밀도함수는 다음 식(13)과 같이 구할 수 있다.

$$f_C(C) = f_P(P) * f_L(-\ell) \quad (13)$$

그리고 전형적인 날의 각 시간대별 축전지 충방전 전력량의 기내치는 다음 그림 5와 같다.

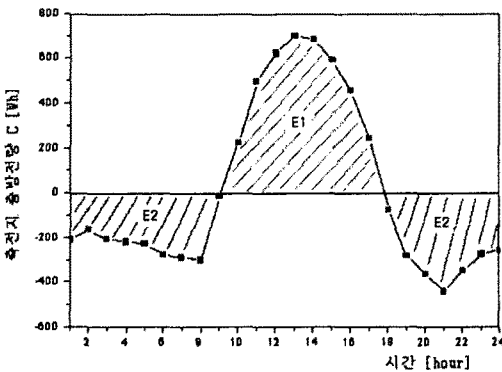


그림 4. 축전지 충방전 곡선

그림 5에서 축전지가 충전되는 E1의 면적을 축전지에 충전되는 용량으로 결정하였으며 약 4000[Wh] 정도이다. 복합발전시스템의 백업으로 사용할 축전지 용량을 방전시간을 단위인 Ampere-Hour로 표시하면 다음 식 (14)와 같다.

$$\text{축전지 용량[AH]} = \frac{C}{V \times U \times R} \quad (14)$$

여기서 C : 충전량[Wh]  
V : 전압(12V)  
U : 방전심도(60%)  
R : 인버터 효율(90%)

상기 식에서 전압을 12V, 방전심도를 60%, 인버터 효율을 90%로 할 경우 복합발전시스템에 백업으로 설치하고자 하는 축전지의 최소용량은 약 620[AH]로 산정할 수 있으며 운전설치가 비교적 용이한 65[AH]의 축전지 경우 약 10개 정도를 결정할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 복합발전시스템의 출력확률밀도함수와 부하확률밀도함수를 convolution하여 축전지 충방전확률밀도함수를 구하였다. 아울러 배전계통과 연계된 도시지역 주택수용가의 전형적인 날의 시간대별 축전지 충방전량을 구하여 최소 축전지 용량을 산정하였다. 계통과 연계된 복합발전시스템의 경우 계통으로부터 전력이 유입될 확률은 독립형의 경우의 LPSP (Loss of Power Supply Probability)에 해당되며 보다 정확한 축전지 용량산정을 위해서는 앞으로 이러한 통계지수의 기준이 반영되어야 할 것이며 또한 전력산업의 구조개편에 따라 시간대별로 변화하는 전력요금과 충누적부하 전력량에 따른 누진 전력요금의 영향도 적정 축전지 용량산정에 반영할 예정이다.

## [참고 문헌]

- [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] Imad Abouzahr, "Loss of Power Supply Probability of Stand-Alone Wind Conversion Systems : A Closed Form Solution Approach", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 5, No. 3, September 1990.
- [8] "부하곡선 자료집", 한국전력공사, 2000년 12월