마이크로그리드의 안정적 운영을 위한 풍력 및 태양광 <u>논 문</u> 발전원 최적 구성 비율 산정 방안 연구 59-2-8

Assessment of Optimal Constitution Rate of Windturbine and Photovoltaic Sources for Stable Operation of Microgird

이 수 미^{*}·전 영 환[†] (Su-Mi Lee · Yeong-Han Chun)

Abstract – Renewable energy sources are considered to be environment-friendly alternatives those are increasingly introduced in the power systems. Microgrid is one of the systems in which renewable sources have a main role as a energy suppliers. Decision of constitution rates of renewable energy sources is very important for the economical and stable operation of microgird systems. In this paper, we present a method to assess an optimal constitution rate of renewable sources especially of windturbine and photovoltaic systems.

Key Words: Renewable energy, Windturbine generation, Photovoltaic system, Energy storage system, Constitution rate

1.서론

기후변화협약에 따라서 전 세계적으로 온실가스 배출 감 축을 목표로 하는 다양한 분야의 연구들이 진행되고 있다. 전력산업에서 온실가스 배출 감축을 위해서 장기적으로 태 양광, 풍력, 연료전지, 수소, 지열, 수력 등 신재생에너지원은 환경 친화적인 에너지원으로 미래 전력산업의 중요한 발전 원으로서 유력한 대안으로 주목받고 있다.

현재 우리나라는 발전분야에서 신재생에너지원이 차지하는 비중은 매우 낮기 때문에 전력계통에 미치는 영향을 무시할 수 있는 수준이다. 그러나 신재생에너지 기술개발·보급 기본계획 등 다양한 제도를 통하여 신재생에너지원 육성을 장려하고 있다. 이에 따라 점차 그 비중이 높아지면, 신재생 에너지원의 특성상 에너지 출력량의 제어가 자유롭지 못함 에 따라 전력계통 전반에 미치는 영향을 고려해야만 한다. 특히, 마이크로그리드와 같이 신재생에너지원의 점유율이 다 른 에너지원에 비해 높은 경우에는 전력시스템의 안정적인 운용을 위해서는 수급 평형을 위한 많은 노력이 필요하다. 그 중에서도, 신재생에너지원 중 대표적인 발전원인 태양광, 풍력에너지의 경우 전력계통 운영에 있어서 소비와 거의 동 시에 공급량 예측이 이루어져야 한다. 전력산업에서 신재생 에너지원으로 이루어진 새로운 계통에서 공급신뢰도를 높임 으로서 안정성을 확보하는 것은 매우 중요한 일이다.

본 논문에서는 마이크로그리드와 같이 신재생에너지원으로 구성된 소규모 계통에서 효과적인 계통 운영을 위한 운영방 안을 제안하고자 한다. 신재생에너지원의 대표적인 발전원 인 태양광, 풍력 발전, 그리고 배터리로 이루어진 계통을 경

* 교신저자, 시니어회원 : 홍익대학 전자전기공학부 교수·공박
 E-mail : yhchun@hongik.ac.kr
 접수일자 : 2010년 1월 7일
 최종완료 : 2010년 1월 18일

제적, 안정적으로 운영하기 위하여 각각의 전원 특성을 고려 하여 필요한 최적전원비율을 도출하는 알고리즘에 대해서 연구하였다.

2.본론

2.1 풍력 발전원

본 논문에서는 유도형 풍력발전기를 사용하였으며, 2개 이상의 블레이드들로 이루어져 유도발전기의 회전자와 회전 축으로 연결되어 있다. 풍력터빈에서 받아들이는 바람에 따 른 운동에너지를 통하여 기계적 에너지로 변환될시 풍력터 빈의 회전자 면적과 비례한다. 바람에 의한 파워를 나타내 면 다음과 같다.[1]

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_{wind}^3 \tag{1}$$

여기서, ho는 공기밀도, A는 풍력터빈의 회전자 반지름 V_{wind} 는 풍속을 나타낸다.

바람으로부터의 에너지를 풍력터빈이 흡수하는 비율을 동 력계수라 한다. 반대 방향으로 흐르는 공기에 의해 풍력터 빈의 기계적 파워가 달라진다. 이때의 기계적 파워는 다음 식으로 표현된다.[2]

$$P_{mech} = C_{p}P_{wind}$$

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\rho A C_{p}V_{wind}^{3}$$
(2)

동력계수는 이론적으로 최대값이 0.59 즉, 59% 바람의 운 동에너지를 받아들일 수 있고 이를 Betz's 제한이라 한다. 실제 설계시에는 2개의 블레이드를 가진 빠른 속도의 터빈

^{*} 정 회 원 : 홍익대학 전기전자공학과 박사과정

은 0.5 이하, 더 많은 블레이드를 가진 느린 속도의 터빈은 0.2~0.4 사이의 값을 갖는다. 동력계수는 블레이드의 공기역 학적 특성을 정의하는 바람의 속도대 블레이드 팁의 속도비 (tip speed ratio)와 블레이드의 피치각으로 나타낼 수 있다. [1],[3]

$$C_{p} = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta$$
(3)

여기서, λ 는 블레이드의 tip speed ratio, β 는 블레이드의 피치각, Ω 은 회전자의 기계적 각속도, R은 풍력터빈 회전자 의 반지름, V_w 는 바람의 속도 이다.

풍력발전기는 위의 식과 같이 풍속에 따라 출력량이 결정 됨을 알 수 있다. 즉, 풍력발전기로부터의 출력량은 시간별 풍속 변화 그래프와 동일한 곡선을 지닌다.

풍력발전기의 출력량을 알기위한 풍력에너지원의 측정은 시간별 풍속의 편차가 심하여 예측하기 어려운편이다. 그러 나 우리나라 기상대의 각 측후소와 관측소의 풍속관측 데이 터가 그 지역일대를 대표하는 값이라 가정하여 특정 지역의 다년간 데이터를 이용함으로 우리나라 지역 대표 시간별 풍 속 그래프를 나타낼 수 있다.[4]



그림 1 일평균 풍속 곡선 Fig. 1 Daily average wind speed curve

위 그림 1의 데이터를 이용하여 우리나라 울릉도의 풍속 을 자세히 나타내면 다음과 같다.



그림 2 일평균 울릉도의 풍속 곡선 Fig. 2 Daily average wind speed curve of Ullungdo

울릉도의 풍속은 다른 지역의 풍속과 달리 평균풍속의 변 화율이 적은편이며, 대체적으로 야간에 강한 바람이 부는 것 을 알 수 있다.

2.2 태양 발전원

태양광 발전기는 태양에너지에 따라 그 출력이 결정되는 데. 이는 beam 방사도, diffuse 방사도, 지면에 대한 반사율, 태양광 어레이의 경사도, 주위온도 등에 의하여 나타낼 수 있다.

일사량은(irradiance) 측정하고자 하는 지표의 위치와 그 지표에 대한 태양의 방위각에 따라 관계된다. 태양의 방위 각은 다음의 수식을 통하여 나타낼 수 있다.[5]

$$\alpha_{s} = 180^{\circ} - \arccos\left(\sin(\gamma_{s}) \cdot \sin(\phi) - \frac{\sin(\delta)}{\cos(\gamma_{s}) \cdot \cos(\phi)}\right)$$
(4)

여기서, α_s 는 태양의 방위각, γ_s 는 태양의 고도, ϕ 는 위도, δ 는 하루 중 가장 높은 태양의 고도를 갖는 적위를 나타낸다.

표준기압에서 태양으로부터 직접 전달되는 일사량 (irradiance amounts)은 1,353±7 W/m 이며, 이 값은 "Solar Constant"라고 불린다. 위의 식을 바탕으로 태양의 고도에 따른 일사량을 알 수 있다. 다음의 표는 특정 지역(51°N ,11.5°E)의 태양 고도에 따른 일사량을 보여준다.

표 1 태양 고도에 따른 일사량의 변화 예

 Table 1 Example of irradiance amount according to sun altitude

태양 고도	일사량 [W/m²]
5°	41.9
10°	112.8
20°	290.7
30°	472.1
40°	636.0
50°	781.4
60°	901.1
70°	991.8
80°	1,043
90°	1,063

총 일사량은 태양으로부터의 direct 일사량과 diffuse 일 사량의 합으로 나타내는데, 이러한 일사량을 기준으로 우리 나라 일사량을 나타낼 수 있다. 기상청 자료를 근거로 방위 별 경사면 일사량 측정시스템 운영기간 중 비교적 일사변동 이 적은 1996년 8월부터 1997년 7월까지 기간 동안을 표준 기간으로 설정하였다. 매시간 측정된 실측자료를 사용하였 으며, 이를 4가지의 일사량곡선으로 구분할 수 있다. [모델 1]은 10월 상순부터 다음해 3월 하순에, [모델 2]는 4월 상 순부터 9월 상순까지, [모델 3]은 9월 중순부터 9월 하순에 걸친 곡선이며, [모델 4]는 9월을 제외한 전년에 걸쳐 고르 게 분포된 곡선이다.[6]



그림 3 모델별 일평균 우리나라 일사량 곡선

Fig. 3 Daily average irradiance amount for each model in Korea

위 그림 3에서 [모델 4]인 9월을 제외한 전년에 걸쳐 고 르게 분포된 시간대별 일사량 곡선을 다시 나타내면 다음과 같다.



그림 4 일평균 평균 우리나라 일사량 곡선 Fig. 4 Daily average irradiance amounts in Korea

신재생에너지원의 출력은 기존 발전기원들과 달리 운영자 가 임의대로 조정할 수 없기 때문에 신재생에너지원을 사용 하는 발전기들은 최대 출력 운전을 하도록 가정한다면, 입력 값인 태양의 일사량과 주위온도에 따른 출력변화는 가장 큰 요인이다. 이에 따라 그림 4와 같이 때 단위시간 단위별 일 사량을 적용하며, 주위온도는 계절별 대표 온도를 사용하였 다. 태양광발전기의 입출력간 효율은 일사량의 변화에 따라 달라진다. 다음 그림 5는 일사량과 발전기 효율간의 관계를 나타낸다.[7]



그림 5 일사량 변화에 따른 효율 Fig. 5 Efficiency according to irradiance amount

시시각각 변하는 날씨에 따른 구름의 양이나 습도 등으로 인한 변화량이 평균 일사량의 시간당 변화량보다 그 영향이 적다고 가정하면, 일사량에 대하여 t시간에서의 태양광 어례 이 출력은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$P_t = \eta_c G$$

이 때, P_t 는 t시간에서의 태양광 어레이 출력을, η_c 는 어 레이의 효율을, G는 일사량을 나타낸다. t시간에서 태양광 어레이는 동일한 효율을 낸다면, 태양광 어레이의 출력은 일 사량의 변화와 비례한다.

2.3 에너지원 용량산정

에너지원별 용량 산정을 위해서는 각 에너지원에 대한 투 자비를 고려해야 한다. 본 논문에서는 최소 투자비용곡선에 대하여 용량당 투자비는 태양광 발전기는 풍력 발전기에 비 해 단위용량당 약 10배정도 비싸고, 배터리는 풍력에 비해 단위용량당 가격변화도가 작도록 하였다. 이를 반영하여 풍 력과 태양광 발전기는 이차곡선으로, 배터리는 일차곡선으로 각각 나타내었다.

최적 전원별 구성 비율은 투자비용뿐만 아니라 시간대별 출력량과 부하량에도 관계한다. 이를 위해 각 발전원에 대 한 투자비용의 합과 수입의 차를 최소화함으로써 적은 비용 으로 안정적인 운영이 가능하도록 목적함수와 제약조건을 다음과 같이 정식화하였다.

목적함수 :

m

$$\frac{\operatorname{in}\left(C_{1}\left(p_{wind}\right) + C_{2}\left(p_{solar}\right) + C_{3}\left(p_{battery}\right)\right)}{-C_{price}\left(p_{wind} + p_{solar} + p_{battery}\right)}$$

제약조건 :

 $\begin{array}{l} \alpha_{wind} \cdot p_{wind} + \beta_{solar} \cdot p_{solar} + p_{battery1} = p_{load1} \\ \vdots \end{array}$

 $\begin{aligned} &\alpha_{wind} \cdot p_{wind} + \beta_{solar} \cdot p_{solar} + p_{battery6} = p_{load6} \\ &p_{wind} + p_{solar} = p_{battery1} + \dots + p_{battery6} \\ &p_{wind}, p_{solar}, p_{battery > 0} \end{aligned}$

 $lpha_{wind}, \, eta_{solar}: 풍력발전원, 태양광이용율 p_{wind}, p_{solar}, p_{battery}: 풍력, 태양광, 배터리발전량$

목적함수는 지출과 수입의 차가 최소가 되도록 하였으며, 이때의 수입에서 전기요금은 발전원과 관계없이 동일하다고 가정하였다.

배터리는 풍력과 태양광 발전기의 입력값인 풍속과 일사 량의 변화에 따라 필요 수요량만큼 공급량이 지정되며 각 시간대별 공급량과 수요량은 항상 동일하다고 가정하였다. 또한 공급곡선에 따라 9시 ~ 16시에서만 충전된다고 가정 하여 하루 중 총 8시간동안 충전한 후 나머지 16시간 동안 방전된다. 이 때 하루 중 총 충전량과 발전량은 같다.

3. 사례 연구

3.1 에너지 부하곡선

전력은 공급과 수요가 동시에 이루어져야 한다. 전력의 생산량을 신재생에너지원들로 구성한다면, 입출력 제어가 자 유롭지 못한 신재생에너지원의 특성상 부하곡선과 공급곡선 을 추정하여 계통을 운영하여야 한다. 부하곡선은 그 목적 에 따라 여러 가지의 형태로 나타낼 수 있는데, 본 논문에서 는 2004년부터 2006년에 걸쳐 에너지관리공단에서 조사한 <수용가 부하곡선을 이용한 전력사용 행태분석>을 인용하 였다. 주중을 기준으로 연간평균을 내어 기본 단위시간(1시 간)에 대한 24시간에 걸친 주택용, 일반용, 산업용 부하곡선 을 나타내었다.[8]



그림 6 우리나라 대표 부하곡선

Fig. 6 Typical Load curve in Korea

그림 6과 같이 용도에 따라 주택용, 일반용, 산업용으로 구분되어지고, 각각의 용도별로 부하곡선 특징이 다르게 나 타난다. 본 논문에서는 소규모계통을 대상으로 한다는 가정 하에 주택용 부하곡선을 기준으로 모델링 하였다. 일반용 부하곡선은 아침 출근시간을 시작으로 부하량이 급격하게 증가하며, 근무시간에는 변동이 거의 없으며 퇴근시간을 기 준으로 부하량이 다시 급격히 감소하는 특성을 갖는 반면, 주택용 부하곡선은 아침 출근시간에 부하량이 증가하며, 저 넉시간에 가장 많은 부하량을 보이는 특성을 갖는다.



그림 7 우리나라 대표 주택용 부하곡선 Fig. 7 Typical residential load curve in Korea

3.2 에너지원 이용률

각 에너지원별 시간대별 평균 에너지 출력 곡선을 기준으 로 각각의 에너지원별로 최대 용량 대비 정격 용량 비율을 알 수 있다. 이를 이용률이라 하고 이는 각 시간대별시 발 전기들의 실제 이용 용량을 알 수 있다. 본 논문에서는 24 시간동안 각각의 시간대별 안에서 이용률의 평균값을 사용 하였다. 또한 각 전원별로 미치는 기후데이터 분석에 신뢰 도를 높이기 위하여 표준편차를 이용하였다.

풍력발전기의 경우 지역마다 그 이용률이 다른데, 본 논 문에서는 울릉도 지역을 기준으로 산정하였다. 최대 이용률 은 풍속이 가장 높은 오전 1시부터 4시까지로 약 24.9%의 이용률을 보인다. 울릉도의 풍속 변화는 타 지역에 비해 미 세하여 이용률에서도 많은 차이를 보이지 않았다.

태양광발전기의 경우 태양이 떠 있는 낮시간 동안만 발전 하므로 오전 8시부터 오후 6까지 이용률이 나타난다. 오후 12~1시에 최대 이용률이 나타나며 풍력발전기와 달리 우리 나라 지역마다의 차이는 거의 없다. 다음 그림 8은 울릉도 의 각 시간대별 풍력과 태양광 발전기의 설비 이용률을 % 로 나타낸 그림이다.



그림 8 풍력과 태양광의 설비 이용률

Fig. 8 Utilization rate of wind power & photovoltaic system

3.3 소규모 계통에서의 용량 산정 결과

계통에서의 전원별 용량 산정을 위해서 하루단위로 운영 될 때 24시간을 4시간 단위로(시간대별 1~6으로 구분) 나 누어 사용하였다. 주어진 제약조건에서 배터리 용량은 시간 대별로 구분하였다. 배터리의 용량은 다른 발전기와는 달리 시간에 따라 충·방전되는 양으로 따져야 하므로 각 시간대 별로 필요 용량을 계산한 후 그 용량을 산정하도록 하였다. 표 2에서 투자비용곡선이 풍력 발전기에 비해 태양광 발전 기가 10배정도 비쌈에도 불구하고, 태양광 발전기는 풍력발 전기 설비용량에 약 50%를 차지한다. 이는 시간대별 이용률 에 따라 시간대 3과 4에서 태양광 발전기로부터 많은 전력 이 생산되고 있기 때문이다. 시간대별로 각각의 발전기로부 터 생산·소모되는 전력량 계산 결과 다음과 같다.



그림 9 주택용 시간대별 부하·공급 곡선 Fig. 9 Hourly residential load & supply curve

표	2	주택용	시간대별	발전량	
Table	2	Hourly	residential	electricity	generation

	풍력	태양광	배터리	합계	부하
시간대1 (1~4시)	0.76991	0	0	0.76991	0.77
시간대2 (5~8시)	0.73899	0.06481	0.296	1.09980	1.11
시간대3 (9~12시)	0.72353	1.0455	-0.669	1.10003	1.1
시간대4 (13~16시)	0.72971	1.1554	-1.016	0.86911	8.7
시간대5 (17~20시)	0.7359	0.16063	0.603	1.49953	1.5
시간대6 (21~24시)	0.7544	0	0.785	1.5394	1.54

그림 9는 시간대별 공급곡선과 부하곡선을 나타낸다. 시 간대별로 신재생에너지원의 입력값과 이용률에 따라 공급곡 선이 확보되는데, 이때의 공급량과 부하량의 차이에 의하여 배터리의 용량이 결정된다. 시간대별로 필요한 배터리 용량 에서 가장 큰 용량을 산정하였을 경우, 이 계통의 단독운전 이 가능하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서 제시한 신재생에너지원들의 발전용량은 각 발전원들의 투자비용함수와 이용률에 따라서 각 지역마다 다르게 나타날 수 있다. 실제 용량당 태양광 발전기의 투자 비용이 풍력 발전기의 투자비용과 비슷해질 경우, 풍력에 비 해 이용률이 높은 태양광 발전기와 배터리만으로 계통 운영 이 가능하다. 또한 풍력에너지원이 풍부한 다른 지역을 대 상으로 할 경우, 풍력발전기의 비중이 더 큰 결과를 얻을 수 있다. 이는 계통에 특징에 따라서도 다른 결과를 얻을 수 있다. 주택용 부하에 비해 상대적으로 일반용, 산업용 부하 곡선은 낮시간대에 부하의 사용이 빈번하다. 때문에 주택용 부하 곡선을 사용한 경우와 달리, 태양광 발전기의 용량이 증가할 것이다. 이는 앞으로 소규모 계통에 신재생에너지원 을 사용할 경우, 그 계통의 부하 특성, 자연·기후 조건의 특징, 구성 신재생에너지원에 따라 각기 다른 결과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구의 내용을 바탕으로 이들의 특징을 반영한다면, 해당 소규모 계통의 신재생에너지원 용량을 산 정할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식 경제부(K-Grid P/N 설계지원 및 K-Grid 배전 계통 안정화 연구, 2009C112601)에 의해 지원된 연구임

참 고 문 헌

 Ezzeldin S.Abdin, Wilson Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE, transaction on Power Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 91-96, March. 2000

- [2] Thomas Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, pp.527–533, 2005
- [3] Mukund R.Patel, Ph.D., P.E, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, pp.37–41, 1999
- [4] 박경호, 김건훈, 정헌생, "국내외 풍력자원 특성 분석", 태양에너지(Solar Energy) Vol. 10. No. 2. pp.3-9, 1990
- [5] Stefan Krauter, "Solar Electric Power Generation", Springer, pp.117–123, 2006
- [6] 조덕기, 전일수, 이태규, "태양에너지 최적 이용을 위한 Typical Day 산출에 관한 연구, 태양에너지(Solar Energy)" Vol. 20. No. 1. pp.21-29. 2000
- [7] 서정민, 배인수, 김진오, "태양광 발전이 연계된 배전 계통의 신뢰도 평가 기법", 전력선행기술 초록집, 2004
- [8] http://epsis.kpx.or.kr/epsis 전력거래소 수요예측팀

소



저

자

이 수 미 (李 水 美)

개

1982년 11월 05일생. 2006년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기정보제어공학과 석사졸업 2008~현재 동 대학원 전기정보제어공학과 박사 재학 Tel: 02-320-1620 Fax: 02-320-1110

E-mail : dlcjftn33@yahoo.co.kr



전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과. 1985년 서울대 공대 전기공 학과 졸업(석사). 1985~1994년 한국전기연구소 근무. 1997년~1998년 동경대 조수 역임. 1998년~2002년 한국전기연구원 그룹장 2002년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수 Tel: 02-320-1620 Fax: 02-320-1110 E-mail: yhchun@hongik.ac.kr