

신재생에너지전원을 고려한 새로운 유효설비에비율 평가방법의 개발

논문
59-1-5

Development of Methodology of New Effective Installed Reserve Rate considering Renewable Energy Generators

박정제* · 최재석†
(Jeongje Park · Jaeseok Choi)

Abstract - This paper proposes a new effective installed reserve rate in order to evaluate reliability of power system considering renewable generators, which include uncertainty of resource supply. It is called EIRR(effective installed reserve rate) in this paper. It is developed with considering capacity credit based on ELCC by using LOLE reliability criterion. While the conventional installed reserve rate index yields over-evaluation reliability of renewable generators, the proposed EIRR describes actual effective installed reserve rate. However, it is not the probabilistic reliability index as like as LOLE or EENS but another deterministic effective reliability index. The proposed EIRR is able to evaluate the realistic contribution to the reliability level for power system considering wind turbine generators and solar cell generators with high uncertainty in resource supply. The case study in model system as like as Jeju power system size presents a possibility that the proposed EIRR can be used practically as a new deterministic reliability index for generation expansion planning or operational planning in future.

Key Words : Effective Load Carrying Capability, Capacity credit, Effective Installed Reserve Rate, Loss of Load Expectation

1. 서론

최근 세계적으로 친환경에너지원의 개발 및 CO₂ 배출의 감소의무와 맞물려서 풍력, 태양력, 연료전지 및 조력발전등과 같은 신재생에너지원이 크게 증대되고 있다[1,2]. 대부분의 신재생에너지원을 이용한 전원들의 특징은 다음과 같다.

- 1) 그 자원의 공급이 지정학적인 위치에 종속되므로 분산형 전원 형태로 계통에 투입된다는 점.
- 2) 특히 그 에너지자원의 공급 및 이에 따른 출력제어가 기존의 원자력, 석탄 가스에너지원을 이용한 발전원과 비교할 때 불가능하거나 상대적으로 매우 어렵다는 점.
- 3) 에너지원의 불시공급중단은 갑작스런 전력공급중단을 가져오므로 전력공급 신뢰도측면에서는 불시고장(Forced outage)과 동일한 효과를 일으킨다는 점.

그림 1은 기존의 원자력, 석탄 및 LNG등과 같은 발전원과 신재생에너지원을 이용한 발전원들 중에서 풍력 및 태양광발전원과 같은 자원공급의 불확실성이 매우 큰 발전원의 불확실성의 차이점을 그림으로 비교하여 보인 것이다[3,4].

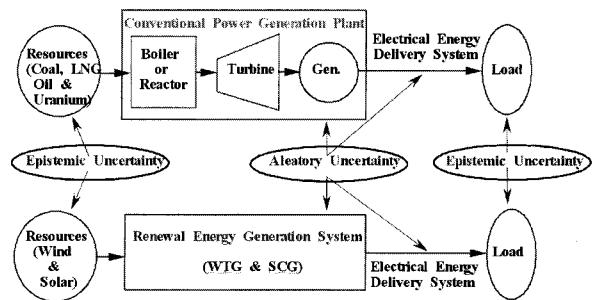


그림 1 기존 발전원과 신재생에너지발전원의 불확실성
Fig. 1 Uncertainties of the renewable energy resource power and conventional plants

그림 1에서 전력계통의 신뢰도평가에서 불확실성은 고장에 의한 불확실성(aleatory uncertainty)과 정보의 불확실성(epistemic uncertainty)등 크게 두 가지로 나누어 질수 있음을 보여준다[3,4]. 즉, 발전기의 고장에 의한 불확실성은 전자에, 부하 및 에너지자원의 공급의 불확실성등은 후자에 속한다. 그러므로 후자는 정보가 정확할수록 불확실성의 정도가 줄어든다. 그러나 부하가 경험하는 공급지장은 발전소의 시스템자체의 사고이든 자원공급의 불확실성에서 비롯된 공급지장이든 부하에 공급지장이 발생한다는 관점에서는 동일하다고 판단한다.

근래 신재생에너지원의 발전원이 증가함에 따라 계통 운영자 및 계획담당자는 이와 같은 불확실성이 매우 큰 전원들을 과연 어떻게 신뢰도 측면에서 평가하고 계획 및 운영에 반영할 것인가 하는 문제에 직면하게 되었다. 현재까지 이들

* 정 회 원 : 경상대학교 공대 전기공학과 박사과정
경상대 공학연구원 연구원

† 교신저자, 시니어회원 : 경상대 전기공학과 정교수 · 공박
경상대 공학연구원 연구원

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 9월 17일

최종완료 : 2009년 11월 17일

전원이 투입될 경우에 신뢰도측면에서 얼마나 기여하는지에 대한 소위 기여도 혹은 신용도(credit)라고 불리는 지수로서 실질적인 신뢰도 기여정도를 측정하는 연구가 이루어져서 이들이 제시되고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 설비에비율이나 공급예비율등이 일반 국민에게 더욱 친밀감이 있는 것이 사실이다. 또한 이들 신재생전원의 신뢰도평가에서는 기존의 전원과는 달리 에너지원의 공급의 불확실성이 매우 크므로 그 운전모형은 다개상태 운전모형으로 모델링되어진다. 따라서 이들을 취급하기가 2개상태로 단순화하여 취급하는 기존의 발전기와 비교할 때 그 신뢰도 평가가 상대적으로 어렵다.

본 연구에서는 자원공급의 불확실성이 매우 큰 신재생에너지전원들이 계통에 투입될 경우에 이들의 설비에비율의 평가를 과연 어떻게 취급할 것인가를 신뢰도측면에서 살펴보고 기존의 유효부하전달용량(ELCC; Effective Load Carrying Capability)개념에 바탕을 두고 근래 개발된 용량신용도(Capacity credit)지수를 이용하여 유효설비에비율이란 새로운 평가방안을 제안한다. 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 우리나라 제주도계통크기의 모델계통에 적용하여 그 유용성과 활용가능성을 살펴보았다.

2. 전원의 ELCC 와 Capacity Credit

2.1 신뢰도 측면에서의 유효부하전달용량(ELCC)

지금부터 약 40년전인 1966년에 L.L. Garver는 ‘전원의 사고율등이 존재할 때 이들을 과연 어떻게 신뢰도에 반영하고 나아가 계통계획문제등에 적용할 것인가?’ 하는 하나의 방안으로 ‘임의의 새로운 전원이 계통에 투입될 경우에 확률론적인 신뢰도 측면에서 바라볼 때 실질적으로 부하를 어느 정도로 그 전원이 해소(공급)할 수 있는가?’ 하는 양을 측정하기 위하여 유효부하전달용량(ELCC; Effective Load Carrying Capability)의 개념을 제안하였다[5]. 이는 “그 전원이 투입되기 전후의 전력계통의 적정신뢰도 수준(target risk level)에서 바라본 증대 가능한 부하량”으로 정의하였다[5]. 그림 2는 이를 보인 것이다.

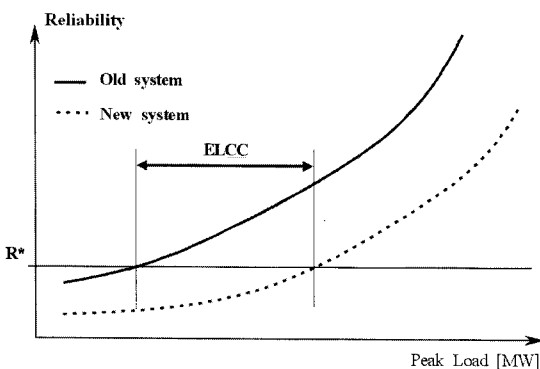


그림 2 유효부하전달용량

Fig. 2 ELCC (Effective Load Carrying Capability)

이때 적용되는 적정신뢰도지수는 새로운 전원의 투입전후의 신뢰도수준을 효과적으로 평가하기위하여 발전기의 사고율등 계통의 불확실성을 반영한 실질적(유효한)인 신뢰도의

지수가 사용되어야한다. 가령, 이때 적용하는 신뢰도기준으로 현재 가장 많이 사용하는 공급지장시간확률기대치(LOLE)를 이용할 때 이를 정식화하면 다음과 같다[6-8].

$$\sum_{i=1}^n P(X_E > C_E - L_i) \cdot t_i = \sum_{i=1}^n P(X_P > (C_E + C_A) - (L_i + \Delta L)) \cdot t_i \quad (1)$$

여기서, n 은 부하지속곡선의 이산화(discrete)한 개수이며, t_i 는 이산화부하지속곡선의 i 번째 지속시간이다. 한편, X_E 및 X_P 는 각각 풍력발전기가 투입 되기전 및 후의 사고용량확률변수, 그리고 C_E 와 C_A 는 각각 풍력발전기가 투입되기 전의 기존의 총 발전용량 및 투입되는 풍력발전기의 용량을 의미한다. 따라서 $P(X_E > C_E - L_i)$ 와 $P(X_P > (C_E + C_A) - (L_i + \Delta L))$ 는 각각 부하지속곡선의 i 시간대에서의 풍력발전기의 투입전과 후의 공급지장시간기대치확률(LOLP; Loss of Load Probability)되며 이에 t_i 를 곱하면 LOLE가 된다. 따라서 ΔL 은 풍력발전기의 투입에 의하여 동일한 적정신뢰도수준까지 유지되도록 공급되어질 수 있는 여분의 부하량[MW]이 되고 이것이 바로 ELCC가 된다.

2.2 신뢰도 측면에서의 용량신용도(Capacity Credit)

위의 ELCC를 이용하여 식 (2)에 보인 것처럼 투입되는 새로운 발전기의 총발전량에 대한 이 여분의 부하량의 백분율, 즉 %ELCC를 투입되는 임의의 발전기의 확률론적 신뢰도기준에서 바라본 용량신용도(Capacity Credit)라고 불리우고 있다. 즉, 풍력발전기와 같이 불확실성이 매우 큰 전원의 투입 시에 실제적인 신뢰도의 기여도는 얼마인가를 정량적으로 평가하는 방법의 하나이다[6-8].

$$\text{Capacity Credit } (\mu) = \frac{\Delta L}{C_A} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

3. 신재생 에너지전원을 고려한 유효설비에비율 지수

현재 사용되고 있는 결정론적 신뢰도 지수인 설비에비율(IRR: Installed Reserve Rate)은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\text{IRR} = g(C_i, L_p) = \frac{\sum C_i - L_p}{L_p} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

이는 가장 간단하면서도 매우 실용적인 신뢰도 지표들중 하나이다. 그러나 본 식에서 보는 바와 같이 전원의 사고율과 같은 불확실을 고려하지 않는바 이들의 영향이 작을 경우에는 거시적인 관점에서 ELCC는 식 (3)의 분자인 공급예비율과 거의 동일하고 매우 실용적인 평가식으로 사용할 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 자원의 공급의 불확실성이 매우 큰 신재생에너지전원의 투입시에는 식 (3)으로 산정한 설비에비율은 부하를 얼마나 더욱 공급하여줄 것인가하는 실제 신뢰도의 의미와 다소 거리가 먼 값을 계산한다. 가령, 현재 계통의 총설비용량이 550MW이고 최대부하가 500MW인 계통에 신재생에너지발전원중 가장 급속히 부상하고 있는 풍력발전기 100MW가 투입된다고 가정할 경우에 식 (3)과 같은 현존의 설비에비율 평가식에 의하면 30%의 설비에비율을 갖게된다. 그러나 100MW의 풍력발전기의 ELCC는 통상 20MW~30MW를 가지고 있으며 따라서 용량 신용도는

20~30%이다. 그러므로 투입되는 100MW의 풍력발전기의 실질적으로 신뢰도에 기여하는 유효한 설비예비율은 20~30MW로 평가되어지며 따라서 실질적인 유효설비예비율은 14~16%로 봄이 타당할 것이다. 이와같이 본 연구에서는 불확실성이 매우 큰 신재생에너지전원이 투입될 경우에 그들의 실질적인 설비예비율을 평가할 있는 식 (4)와 같은 용량신용도를 의미하는 매개변수(μ)를 도입한 새로운 유효설비예비율(EIRR; Effective Installed Reserve Rate) 평가식을 제안한다.

$$EIRR = g(C_k, \mu_k, L_p) = \frac{\left(\sum_{k \in GC} C_{C_k} + \sum_{k \in GR} C_{R_k} \times \mu_k - L_p \right)}{L_p} \times 100 \quad (4)$$

- 단, C_{Ck} : k번째 기존발전기의 용량 [MW]
- C_{Rk} : k번째 신재생에너지전원의 용량 [MW]
- μ : pu로 나타낸 용량신용도
- GC: 기존발전기의 집합
- GR: 신재생에너지전원의 집합

참고로 본 연구는 어디까지나 급증하는 신재생에너지전원을 과연 전력계통에서 신뢰도측면에서 여하히 평가할 것인가에 초점을 두고 있는 바 신재생에너지원에 비하여 상대적으로 그 불확실성이 작은 기존의 전원에 대하여는 용량신용도를 고려하지 않기로 한다.

4. 사례연구

본 연구에서 새로이 제안하는 유효설비예비율 평가식의 타당성을 살펴보기 위하여 최근 풍력발전단지가 급속히 증가할 것으로 예상되고 국가적으로 스마트그리드의 시범지역으로 지정된 우리나라의 제주도 전력계통과 유사한 모델계통에 적용하여 보았다. 표 1은 이의 발전계통의 입력 자료를 보인 것이다.

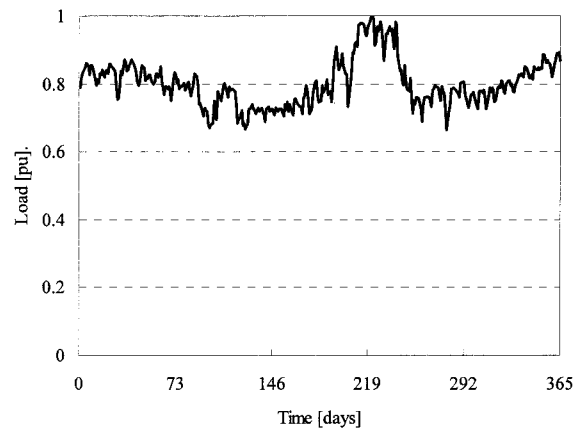
표 1 모델계통의 발전기 입력자료

Table 1 Generators data of model system

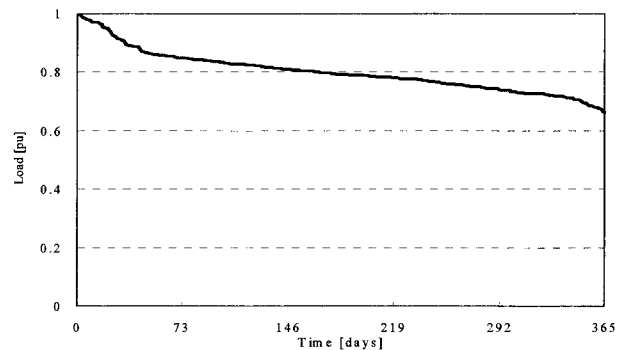
	이름	유형	용량 [MW]	갯수	α [Gcal/MW ² h]	β [Gcal/MWh]	γ [Gcal/hr]	연료비 [10 ³ won/Gcal]	FOR
1	HWN1	WTG	50	1	-	-	-	-	-
2	SSN2	WTG	30	1	-	-	-	-	-
3	HLM3	WTG	20	1	-	-	-	-	-
4*	HVDC	DC	75/150*	2	0.004	1.512	45.207	43.3	0.010/0.028*
5	NMJ3	T/P	100	2	0.004	1.512	45.207	43.3	0.012
6	JJU1	T/P	10	1	0.062	2.100	5.971	43.599	0.015
7	JJU2	T/P	75	2	0.003	1.832	30.231	43.599	0.012
8	HNM1	G/T	35	2	0.004	2.401	20.32	77.909	0.013
9	HNM1	S/T	35	1	0.004	2.401	20.32	77.909	0.013
10	JJU3	D/P	40	1	0.025	0.364	28.484	43.599	0.018
11	NMJ1	D/P	10	4	0.006	1.999	1.36	43.3	0.018
Total			945	18	-	-	-	-	-

(* , HVDC는 3개 상태공간모형으로 모의함.)

본 모델계통에서는 풍력단지가 세 군데 있다고 가정하고 이들 각각의 풍력단지에 속하는 풍력발전기들은 하나의 등가발전기로 등가화하였다. 표 1에서 이들을 WTG(Wind Turbine Generator)로 나타내었다. 그리고 HVDC는 3개 상태를 갖는 하나의 등가발전기로 가정하였다. 한편, 본 모델은 그림 3과 같이 정규화 된 연부하변동곡선 및 일최대부하지속곡선을 갖는다고 가정하고 최대부하는 681MW로 설정하였다. 표 2는 본 모델계통의 가정된 풍력단지(WF: Wind Farm)의 바람의 특성을 보인 것이며 표 3은 풍력발전기의 출력특성함수를 보인 것이다.



(a) 부하변동곡선



(b) 일최대부하지속곡선

그림 3 모델계통의 부하변동곡선과 일최대부하지속곡선
Fig. 3 Load variation and daily peak load duration curves of model system

그러므로 참고문헌 5에 소개된 각 풍력단지별 출력특성함수의 계수 산정식을 이용하여 이를 구하면 표 4와 같다. 그림 4는 세 개의 풍력단지별 등가발전기의 사고용량확률분포함수(f_{WTG})를 보인 것이다. 이제 부록에 소개한 식(부1)을 사용하여 발전기를 부하담당시키면서 유효부하지속곡선을 작성하고 부록의 식(부2), (부3) 및 (부4)을 이용하여 신뢰도 지수를 구할 수 있다. 표 5는 풍력발전원들이 투입되지 않은 경우(Without WTGs)와 투입된 경우(With WTGs)를 비교하여 나타낸 신뢰도평가 결과이다.

표 2 모델계통의 풍력단지별 풍속

Table 2 Wind speed of wind farm in model system

Wind speed[m/sec]			
WF Name	HWN-WF	SSN-WF	HLM-WF
Wind speed range	0-35	0-40	0-45
Mean wind speed	8.5	7.6	6.4
Standard deviation	7	6	5

표 3 모델계통의 풍력발전기의 출력특성입력자료

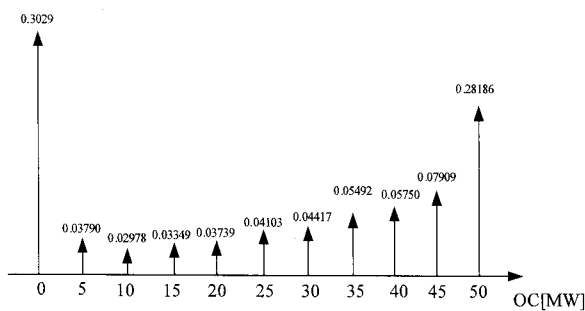
Table 3 WTG power function in model system

WTG capacity	50MW	30MW	20MW
Cut-in speed(V_{ci})	5m/sec	5m/sec	5m/sec
Rated speed(V_R)	16m/sec	15m/sec	14m/sec
Cut-out speed(V_{co})	25m/sec	25m/sec	25m/sec

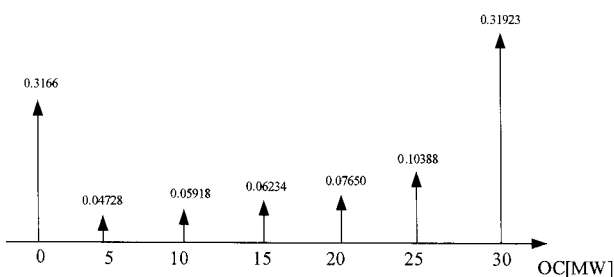
표 4 모델계통에서의 풍력발전기의 출력특성곡선의 계수

Table 4 The coefficients of WTG power function of model system

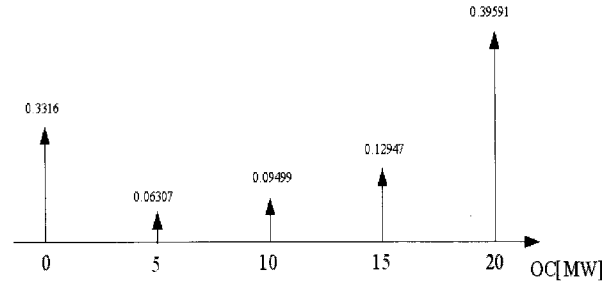
특성 계수	HLM-WF	SSN-WF	HWN-WF
A	0.09275	0.1111	0.12034
B [m/sec] ⁻¹	-0.06486	-0.06296	-0.06
C [m/sec] ⁻²	0.00926	0.00815	0.00719



(a) HWN 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o1})



(b) SSN 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o2})



(c) HLM 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o3})

그림 4 모델계통의 풍력단지별 등가발전기의 사고용량 확률 분포함수

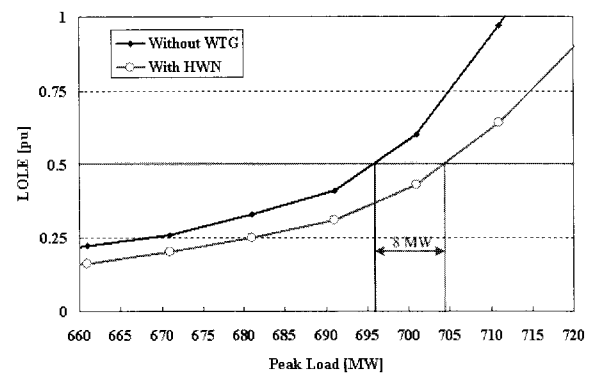
Fig. 4 Outage capacity PDF(f_{oWTG}) of equivalent WTGs of wind farms in model system

표 5 모델계통에서의 신뢰도지수

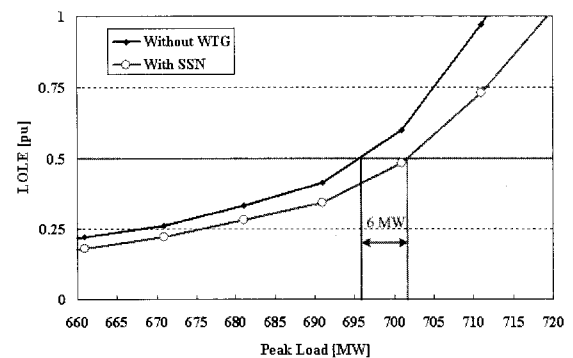
Table 5 Reliability indices of model system

	LOLE [days/year]	EENS [MWD/year]	EIR [pu]
With WTGs	0.19	7.01	0.99996
Without WTGs	0.33	12.88	0.99994

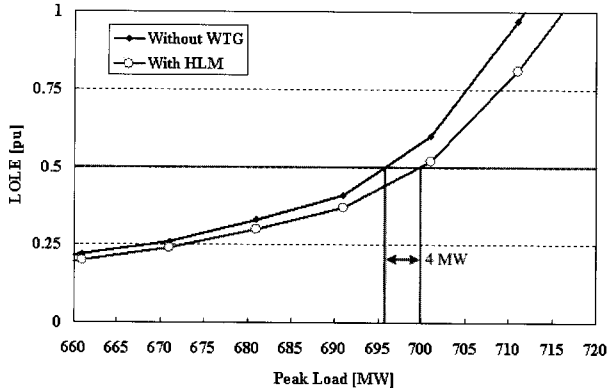
그림 5는 세군데의 풍력발전단지의 풍력발전기에 대하여 각각 최대부하를 증가시키면서 동일한 신뢰도기준을 유지하는 증가부하량을 구한 ELCC를 보인 것이다. 그리고 그림 6은 전체 풍력발전원의 유효부하전달용량을 구한 것이다.



(a) HWN의 ELCC



(b) SSN의 ELCC



(c) HLM의 ELCC

그림 5 모델계통의 풍력단지별 유효부하전달용량
Fig. 5 ELCCs of wind farms in model system

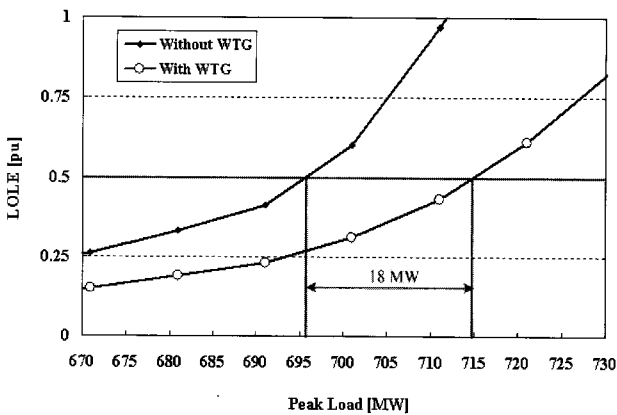


그림 6 전체 풍력발전원의 유효부하전달용량
Fig. 6 ELCC(Effective Load Carrying Capability) of total WTG

표 6 모델계통에서의 풍력발전단지의 ELCC 및 용량신용도

Table 6 ELCC and Capacity credits of WTG farms

WTG-WF	용량 [MW]	ELCC [MW]	Capacity Credit [%]	μ [pu]
HWN	50	8	16	0.16
SSN	30	6	20	0.2
HLM	20	4	20	0.2
합계	100	18	18.67*	
All WTG	100	18	18	0.18

(단, *: 평균치임)

이의 결과로부터 각 용량신용도는 표 6과 같이 얻어진다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 새로운 신재생에너지전원의 불확실성을 고려한 유효설비예비율($EIRR$)은 다음과 같이 산정된다.

$$EIRR = \frac{(845 + 50 \times 0.16 + 30 \times 0.2 + 20 \times 0.2 - 681)}{681} \times 100 = 26.73\%$$

기존의 설비예비율 평가식에 의한 본 계통의 설비예비율 $IRR = (945 - 681) \times 100 / 681 = 38.77\%$ 가 되고, 이와 본 연구에서 제안하는 $EIRR$ 을 비교할때 현실적으로 12.04%의 차이가 발생함을 알 수 있으며 이는 기존의 설비예비율 평가대로 한다면 신재생에너지전원이 과잉되게 평가되어 실질적으로 신뢰도에 기여하는 능력과는 매우 거리가 있음을 알 수 있다. 한편, 전체풍력발전기의 ELCC를 이용하여 아래와 같이 유효설비예비율($EIRR_{ALL}$)을 산정하여 보았다.

$$EIRR_{ALL} = \frac{(845 + 100 \times 0.18 - 681)}{681} \times 100 = 26.73\%$$

본 모델계통에서는 세 곳의 풍력발전단지를 각각 고려했을 때와 세 곳을 동시에 고려했을 때의 $EIRR$ 은 같은 값이 얻어짐을 알 수 있었다. 표 7은 이를 정리하여본 것이다.

표 7 기존의 설비예비율과 본 논문에서 제안하는 유효설비예비율의 비교

Table 7 The comparison of the conventional installed reserve rate and the proposed effective installed reserve rate

	총설비용량[MW]	설비예비율[%]
IRR	945	38.77
$EIRR$	945	26.73
$EIRR_{ALL}$	945	26.73

한편, 본 사례연구에서는 풍력발전기를 예를 들어서 연구를 하였으나 태양광발전원의 경우도 동일한 방법을 이용하여 용량신용도가 평가되므로 본 유효설비예비율 평가식의 적용이 가능하다고 판단된다[10].

5. 결론

본 연구에서는 불확실성이 매우 큰 신재생에너지전원의 투입시에 기존의 설비예비율평가식이 갖는 한계를 극복하고 나아가 이를 실질적으로 신뢰도에 미치는 효과를 평가하기 위하여 새로운 유효설비예비율로 정의한 평가식을 개발하고 제안하였다. 여기서는 확률론적인 신뢰도 평가 방안중 하나로 개발된 용량신용도(Capacity credit)를 도입하여 보다 실제적인 유효설비예비율을 평가하도록 하였다. 참고로 기존의 전원에 대하여는 신재생에너지원에비하여 상대적으로 불확실성이 작고 또한 본 연구가 어디까지나 신재생에너지전원을 과연 전력계통에서 신뢰도측면에서 여하히 평가할 것인가에 초점을 두고 있는바 기존 전원의 용량신용도는 고려하지 않았다. 또한 본 연구에서 제시하는 유효설비예비율 평가 방법은 LOLE의 적정수준에 해당하는 ELCC를 바탕으로 한 용량신용도의 매개변수를 사용하였다. 차후에는 보다 광범위한 확률론적인 신뢰도지수(가령, EENS, EIR 등)에 따른 용량신용도를 측정하고 이를 이용한 유효설비예비율 평가식도 살펴보아야할 것이다. 그리고 설비비용율의 개념에서 출발한 용량신용도도 정의되어 다소 이용되고 있는 바 이의 비교연구도 필요하다고 사료된다.

본 연구에서 개발한 유효설비예비율 평가식은 현재 가장

많이 사용하고 있는 LOLE에 바탕을 둔 용량신용도를 사용하고 신재생에너지전원을 실질적으로 설비에비력측면에서 평가한다는 관점에서 매우 현실적이라고 판단되며 이는 실제 활용 가능한 적정 설비에비율의 평가 및 수준결정에 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2009-0058632) 미래형 전력 네트워크 신뢰도 연구센터 지원하에 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen and Goran Strbac: EMBEDDED GENERATION, IEE, 2000.
- [2] "Wind Power Today", Federal Wind Program Highlights, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, April, 2005.
- [3] Roy Billinton and Dange Huang, "Aleatory and Epistemic Uncertainty Considerations in Power System Reliability Evaluation", PMAPS, May 25-29, 2008.
- [4] 박정제, 오 랑, 최재석, 문승일, "풍력발전기를 고려한 전력계통의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 연구" 대한전기학회논문지, 제57권, 9호, 2008년 9월, pp.1491~1499.
- [5] L. L. Garver, "Effective load carrying capability of generating units," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-85, no. 8, 1966, pp. 910-919.
- [6] Claudine D'Annunzio, Surya Santoso, "Noniterative Method to Approximate the Effective Load Carrying Capability of a Wind Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, June, 2008, pp. 544-550.
- [7] Lennart Söder and Mikael Amelin, "A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit" IEEE GM2008, Pittsburg, PA, USA.
- [8] Cornel Ensslin, Michael Milligan, Hannele Holttinen, Mark O'Malley, and Andrew Keane, "Current Method to Calculate Credit of Wind Power, IEA Collaboration" IEEE GM2008, Pittsburg, PA, USA.
- [9] 박정제, 오 랑, 최재석, 차준민, "풍력발전기의 확률론적 발전비용 절감기여도 평가" 대한전기학회논문지, 제57권9호, 2008년12월, pp.2153-2160.
- [10] 박정제, 오 랑, 최재석, 차준민, "태양광발전원을 고려한 전력계통의 확률론적 신뢰도평가에 관한 연구" 대한전기학회논문지, 제58권3호, 2009년3월, pp.486-495.
- [11] P. Giorsetto and K. F. Utsurogi, "Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators," IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. PAS-102, no. 1, 1983.
- [12] X. Wang, H. T. Dai, and R. J. Thomas, "Reliability modeling of large wind farms and associated electric utility interface systems," IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. PAS-103, no. 3, 1984.
- [13] C. Singh and A. Lago-Gonzalez, "Reliability modeling of generation systems including unconventional energy sources," IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. PAS-104, no. 5, May 1985.
- [14] Rajesh Karki, PoHu, Roy Billinton, "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.21, No.2, June, 2006, pp.533-540.

부록 : 풍력발전원의 신뢰도평가

그림 부1은 풍속확률밀도함수와 풍력발전기의 출력특성곡선을 결합하여 WTG의 다개상태로된 가용용량확률분포함수(Available capacity PDF(probability distribution function))를 얻는 모습을 보인 것이다. 여기서, (P_{SWbi}, PB_{SWbi}) 는 i 번째 풍속밴드의 풍속인 $SWbi$ 일 때의 WTG의 출력 및 풍속을 의미한다. 이로부터 다개상태로 구성된 WTG 사고용량확률분포함수를 얻을 수 있다[10-14].

한편, 다개상태를 갖는 $\#i$ 발전기에 해당하는 유효부하를 원래의 부하와 상승적분한 Φ_i (ELDC: Effective Load Duration Curve)를 구하는 식은 식 (부1)과 같다.

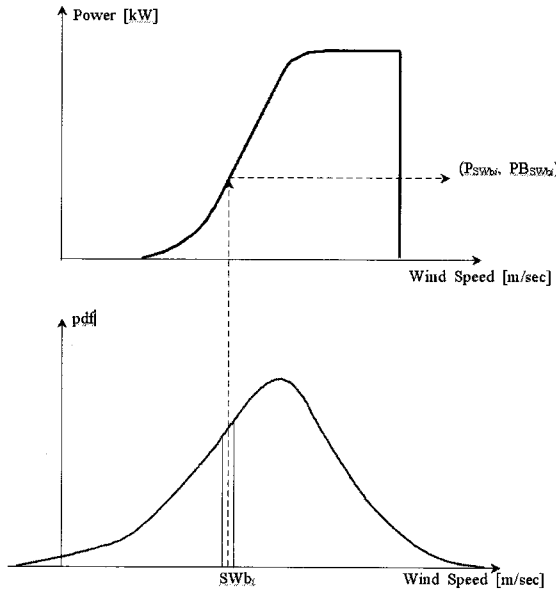


그림 부1 WTG의 가용용량 확률분포함수를 얻기 위한 풍속 모형과 WTG의 출력곡선특선과의 결합모습
 Fig. A1 The combination between wind speed model and WTG power output model for obtaining available capacity PDF of WTG

$$\Phi_i = \Phi_{i-1} \otimes f_{oi}$$

$$= (1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij}) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \quad (\text{부1})$$

단,

- Φ_0 : 원래의 부하지속곡선(LDC)
- f_{oi} : $\#i$ 발전기의 사고용량확률분포함수
- NS_i : $\#i$ 발전기의 상태의 수
- C_{ij} : $\#i$ 발전기의 $\#j$ 상태의 사고용량[MW]

그러므로 우선순위에 의해 첫번째 발전기부터 $\#NG$ 발전기까지 상승적분하여 얻어진 유효부하확률분포함수 $\Phi_{NG}(x)$ 를 이용하여 신뢰도지수인 공급지장시간기대치(LOLE: Loss of Load Expectation) 및 공급지장에너지기대치(EENS: Expected Energy Not Served) 그리고 상대적 신뢰도지수인 EIR(Energy Index of Reliability)을 각각 식 (부2), 식 (부3) 및 식 (부4)처럼 구할 수 있다.

$$LOLE = \Phi_{NG}(x) \Big|_{x=IC} \quad [\text{hours/year}] \quad (\text{부2})$$

$$EENS = \int_{IC}^{IC+L_p} \Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/year}] \quad (\text{부3})$$

$$EIR = 1 - EENS/ED \quad (\text{부4})$$

여기서,

- L_p : 최대부하[MW]
- IC : 총설비용량 $(= \sum C_i)$ [MW]
- C_i : $\#i$ 발전기의 용량[MW]
- ED : 총부하에너지[MWh]

저 자 소 개



박정제 (朴正濟)

1981년 11월 9일생. 2007년 경상대 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : 055-751-5347
 Fax : 055-759-2723
 E-mail : pakjan@hanmail.net



최재석 (崔在錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~현재 경상대 교수
 Tel : 055-751-5347
 Fax : 055-759-2723
 E-mail : jschoi@gnu.ac.kr