

에너지저장장치와 결합한 WTG를 포함하는 전력계통의 Capacity Credit 평가 및 ESS 적정규모 평가방안

Capacity Credit and Reasonable ESS Evaluation of Power System Including WTG combined with Battery Energy Storage System

오 웅 진* · 이 연 찬* · 최 재 석† · 임 진 택**
(Ungjin Oh · Yeonchan Lee · Jaeseok Choi · Jintaek Lim)

Abstract - This paper proposes a new method for evaluating Effective Load Carrying Capability(ELCC) and capacity credit(C.C.) of power system including Wind Turbine Generator(WTG) combined with Battery Energy Storage System(BESS). WTG can only generate electricity power when the fuel(wind) is available. Because of fluctuation of wind speed, WTG generates intermittent power. In view point of reliability of power system, intermittent power of WTG is similar with probabilistic characteristics based on power on-off due to mechanical availability of conventional generator. Therefore, high penetration of WTG will occur difficulties in power operation. The high penetration of numerous and large capacity WTG can make risk to power system adequacy, quality and stability. Therefore, the penetration of WTG is limited in the world. In recent, it is expected that BESS installed at wind farms may smooth the wind power fluctuation. This study develops a new method to assess how much is penetration of WTG able to extended when Wind Turbine Generator(WTG) is combined with Battery Energy Storage System(BESS). In this paper, the assessment equation of capacity credit of WTG combined with BESS is formulated newly. The simulation program, is called GNRL_ESS, is developed in this study. This paper demonstrates a various case studies of ELCC and capacity credit(C.C.) of power system containing WTG combined with BESS using model system as similar as Jeju island power system. The case studies demonstrate that not only reasonable BESS capacity for a WTG but also permissible penetration percent of WTG combined with BESS and reasonable WTG capacity for a BESS can be decided.

Key Words : Effective Load Carrying Capability(ELCC), Capacity Credit(C.C.), Wind Turbine Generator(WTG), Battery Energy Storage System(BESS), Monte Carlo Simulation(MCS), ESS reliability contribution

1. 서 론

최근 2015년 12월 12일 파리 신기후협약체제 이후에 세계적으로 탄소배출의 감소의무와 맞물려서 신재생에너지 발전원의 계통투입이 더욱 가속화 될 것으로 예상되며 이러한 신재생에너지 발전원은 자원공급의 불확실로 인해서 출력의 변동성이 매우 크므로 이를 완화시켜줄 수 있는 배터리 에너지저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)(여기서는 편의상 ESS라고 부르기로 한다.) 또한 증가할 것으로 예상된다. 이러한 불확실성이 매우 큰 신재생에너지발전원들을 과연 어떻게 공급신뢰도 측면에서 평가하고 그 공급능력의 가치를 얼마나 인정할 것인가에 관한 문제가 대두되어 왔다.

현재까지 불확실성을 갖는 발전원의 실질적인 공급능력 평가에 관한 국내외 연구로는 1966년도에 L.L.Garver에 의하여 발전기의 사고확률을 감안하고 확률론적인 신뢰도평가기법을 적용하여 투입되는 발전기가 부하를 실제로 얼마나 담당할 수 있는가를 나타내는 유효부하전달용량(ELCC: Effective Load Carrying Capability [MW])개념이 처음으로 개발되어 전원개발계획에 실제적으로 많이 활용되었다[1].

그 후 1997년도에 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서 Michael Milligan 연구원과 Brian Parsons 연구원에 의해서 간헐적(Intermittent)인 출력을 지닌 신재생에너지발전기의 투입에 대하여 자원공급중단에 의한 출력변동성을 기존의 발전기의 사고확률과 동일한 의미로 보고 해당 발전기의 유효부하전달용량(ELCC)을 산정하고 이를 그 발전기의 용량신용도(Capacity Credit: C.C.)라고 정의한 알고리즘을 처음으로 제안하고 사례연구[2]를 실시하였다. 나아가 2006년도에는 캐나다 Saskatchewan 대학교의 Wijarn Wangdee 박사와 Roy Billinton 교수팀이 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 풍속을 예측하고 간헐적인 풍력발전기의 투입에 따른 유효부하전달용량(ELCC)을 평가하는 연구[3]를 수행하였으며, 2010년도에는 동 대학교의 Roy

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Eng., RIGET, ERI, Gyeongsang National University, Republic of Korea

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University, Republic of Korea

** Dept. of Electrical Energy Engineering, International University of Korea

Received : March 21, 2016; Accepted : May 4, 2016

Billinton 교수, D. Huang 교수 및 Rajesh Karki 교수팀이 기존의 전원으로 구성된 시스템에서 신재생에너지발전원인 풍력발전기의 투입에 따른 용량신용도 평가로 시스템의 계획 및 운용에 관한 연구[4]를 실시하였다. 더불어 같은 해에 Texas A&M University의 Lingfeng Wang 박사와 Chanan Singh 교수팀에서는 PIS(Population-based Intelligent Search) 기법을 이용하여 풍력발전원의 투입에 따른 확률론적인 신뢰도 평가모델을 제시하고 이를 이용하여 용량신용도를 평가하는 연구결과를 발표하였다[5]. 이어서 2011년 IEEE RRPA Task Force팀은 유럽과 북미지역을 대상으로 풍력발전기 투입에 따른 용량신용도를 분석한 연구를 발표하였다[6]. 국내에서는 2006년도에 한국전기연구원의 이창호박사팀에서 신재생에너지발전원 중 단속적 특성이 강한 풍력발전원의 용량가치를 확률론적인 모의가 아닌 평균가동율을 이용하여 계산한 평가기법에 관한 연구[7] 및 2010년도에 경상대학교의 최재석교수팀에서 신재생에너지발전원을 포함한 확률론적인 발전 및 신뢰도프로그램을 개발하고 이를 이용하여 제주도 계통과 유사한 모델계통을 대상으로 풍력발전기의 계통투입에 따른 용량신용도, 유효설비비율(EIRR: Effective Installed Reserve Rate)등을 추정하는 연구결과를 발표[8]하였으며 이외에도 국내 외적으로 많은 관련연구들이 진행되고 있으나 현재까지 ESS를 고려한 전력계통의 ELCC연구는 발견되지 않고 있다.

본 논문에서는 출력변동성이 큰 신재생발전원 중 풍력발전원을 대상으로 급속한 출력변동을 완화하고 공급신뢰도 측면에서의 불안함을 해소하고자 ESS를 설치한 전력계통에 대하여 확률론적인 공급신뢰도의 대표적 지수 공급지장시간기대치인 LOLE(Loss of Load Expectation)의 측면에서 유효부하전달용량(ELCC) 및 용량신용도(C.C)를 평가함으로써 풍력발전기만 존재할 경우의 공급능력과 비교하여 변동성이 큰 풍력발전기가 ESS와 결합함으로써 얼마나 더욱 공급능력을 증가시켜줄 수 있는가를 평가하는 방안 즉, ESS의 설치가 갖는 가치성을 산정하는 방법을 새롭게 제안하고 이를 제주도 계통 크기와 유사한 모델계통을 대상으로 하여 다각적으로 분석하여 그 유용성을 살펴보았다. 특히, 사례연구를 통하여 본 연구에서 제안하는 방법을 이용하면 풍력발전기의 용량에 따른 적정 ESS용량을 결정할 수 있음과 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력 비율인 X%를 변화시킨 감도 해석 및 최대 용량신용도를 탐색함으로써 임의의 계통에 대하여 적정 WTG 용량 및 X%등을 결정할 수 있는 가능성도 살펴보았다.

2. 유효부하전달용량과 용량신용도

2.1 유효부하전달용량(ELCC:Effective Load Carrying Capability)

1966년도에 L.L. Garver는 확률론적 신뢰도 측면에서 전력계통에 사고확률과 같은 불확실성을 갖는 발전원의 현실적인 공급능력을 평가하기 위해 유효부하전달용량(ELCC: Effective Load Carrying Capability)의 개념을 처음으로 제안하였다[1]. 이는 “그 전원이 투입되기 전후의 전력계통의 확률론적인 적정신뢰도 수준(Target risk level)에서 바라본 증대 가능한 부하량”으로 정의하였다. 이를 보이면 다음 그림 1과 같다.

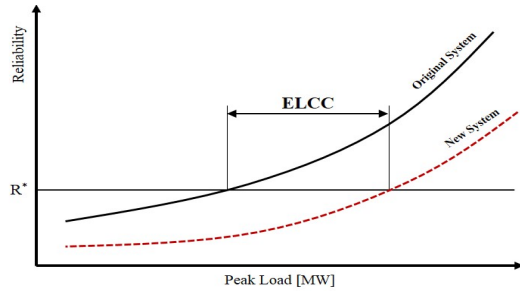


그림 1 유효부하전달용량(ELCC)의 개념도

Fig. 1 Concept of Effective Load Carrying Capability

이때 통상 사용되는 신뢰도지수로는 공급지장시간기대치인 LOLE(Loss of Load Expectation)이다. 이를 구하는 식을 정식화하면 식 (1)과 같고, 풍력발전기와 ESS를 포함하는 LOLE를 구하는 식은 식 (2)와 같다[5]. 식 (1) 및 식 (2)에서 t 는 이산적인 부하지속곡선으로 모델링할 때 부하의 계단 번호 즉, 부하시간대 번호이며 NT 는 총 부하계단수이다.

$$LOLE = \sum_{t=1}^{NT} P(C_{Gt} < L_t) \times \Delta t_t \quad \text{[hours/year]} \quad (1)$$

$$LOLE = \sum_{t=1}^{NT} P(C_{Gt} + C_{WTGt} + C_{ESS} < L_t) \times \Delta t_t \quad \text{[hours/year]} \quad (2)$$

단, P : 공급지장이 일어날 확률

C_{Gt} : t 번째 부하시간대의 일반발전기의 용량[MW]

C_{WTGt} : t 번째 부하시간대의 풍력발전기의 확률론적 출력[MW]

C_{ESS} : t 번째 부하시간대의 ESS의 출력[MW](+:방전, -:충전)

L_t : t 번째 부하시간대의 부하크기[MW]

Δt_t : t 번째 부하시간대의 지속시간[hours]

그러므로 ESS와 결합한 풍력발전기의 전체 유효부하전달용량(ELCC_(WTG+ESS))은 이들이 투입되기 전의 LOLE를 나타내는 식 (1)과 풍력발전기와 ESS가 투입된 후의 감소한 LOLE를 의미하는 식 (2)가 동일한 적정 신뢰도수준까지 유지되도록 공급되어질 수 있는 여분의 부하량[MW]을 의미하므로 식 (3)처럼 정식화된다. 본 연구에서는 식 (3)을 새롭게 제안하며 $C_{Gt} + C_{WTGt} + C_{ESS}$ 를 모의할 수 있는 GNRL_ESS이라는 프로그램을 개발하였다.

$$\sum_{t=1}^{NT} P(C_{Gt} < L_t) = \sum_{t=1}^{NT} P((C_{Gt} + C_{WTGt} + C_{ESS}) < (L_t + ELCC_{(WTG+ESS)})) \quad (3)$$

2.2 용량신용도(Capacity Credit: C.C)

최근 발전기의 사고율을 고려할 때 유효한 공급능력을 평가할 수 있는 전술한 ELCC를 이용하여 자원(풍속, 태양광) 공급의 불확실성에 기인한 출력의 변동성(불확실성)이 큰 신재생에너지발

전원의 유효부하전달용량(유효공급)의 평가가 재조명 받고 있다. 특히 설비용량(투자량)의 증가에 따른 유효공급능력의 평가는 신재생에너지발전원의 적정규모를 결정함에 매우 중요하다. 전술한 ELCC는 투입되는 전원이 증가할수록 계속 증가한다[1]. 따라서 ELCC만으로는 신규설비의 적정용량 즉, 가치성을 결정하기 어렵다. 특히 변동성이 매우 큰 신재생에너지발전원의 경우는 더욱 어렵다. 따라서 ELCC를 투입용량으로 나누어 백분율로 표현하면 이는 투자량에 대한 유효공급능력을 의미하므로 어느 정도 투자에 대한 실질적인 이득율(효과율)을 표시할 수 있다. 이는 설비이용율과 깊은 관련을 가지므로 신규발전원의 경제성을 암암리에 내포한다. 이를 용량신용도(Capacity Credit: C.C.)라고 정의하고 변동성이 매우 큰 신재생에너지발전원의 가치평가의 지수로서 활용하고 있다. 이를 정식화 하면 식 (4)와 같다[20-22].

$$Capacity\ Credit\ (C.C.) = \frac{ELCC}{C_A} \times 100\ [%] \quad (4)$$

단, C_A : 투입되는 새로운 전원(발전기)의 용량[MW]

2.3 풍력발전기(WTG)와 결합한 에너지저장장치(ESS) 운영 모형

전술한 식 (2)의 풍력발전기와 에너지저장장치(ESS)가 결합한 전력계통의 LOLE를 산정하는 것은 쉽지 않다. 본 저자들은 이를 산정하는 알고리즘 및 프로그램을 이미 개발하여 상세하게 발표하였다[13,19](부록 I 참조). 그림 2에 본 논문에서 사용한 다수의 풍력발전단지와 하나의 에너지저장장치(ESS)가 설치되었을 경우의 모형을 다시 보인다.

본 연구에서는 유효부하전달용량(ELCC)과 용량신용도(Capacity Credit)를 평가함으로써 풍력발전기단지에 ESS가 설치될 경우에 공급능력의 확대정도 및 투자량의 효과를 정량적으로 평가할 수 있었다.

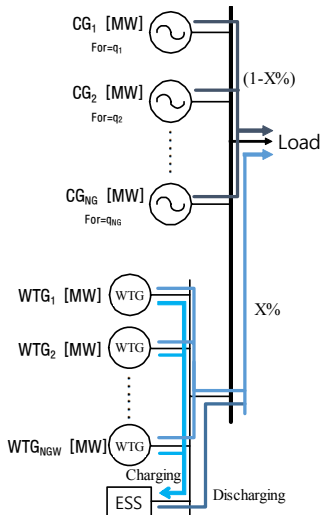


그림 2 본 논문에서 사용한 모형

Fig. 2 Models of CG and WTG combined with ESS used in this study

3. WTG+ESS의 Capacity Credit

본 논문에서는 전술한 유효부하전달용량(ELCC)을 이용하여 풍력발전기와 같은 불확실성을 가지는 신재생에너지발전원에 에너지저장장치를 설치하였을 경우 용량신용도를 평가하는 새로운 식을 개발하였으며 이는 식 (5)처럼 정식화된다.

$$Capacity\ Credit\ (C.C.) = \frac{ELCC}{CG_{WTG} + CG_{ESS}} \times 100\ [%] \quad (5)$$

단, CG_{WTG} : 풍력발전기의 총용량 [MW]

CG_{ESS} : ESS의 용량 [MW]

4. 작업 흐름도

최근 본 저자들에 의해서 개발한 풍력발전기와 에너지저장장치(ESS)가 결합한 전력계통의 신뢰도를 산정하는 GNREL_ESS 프로

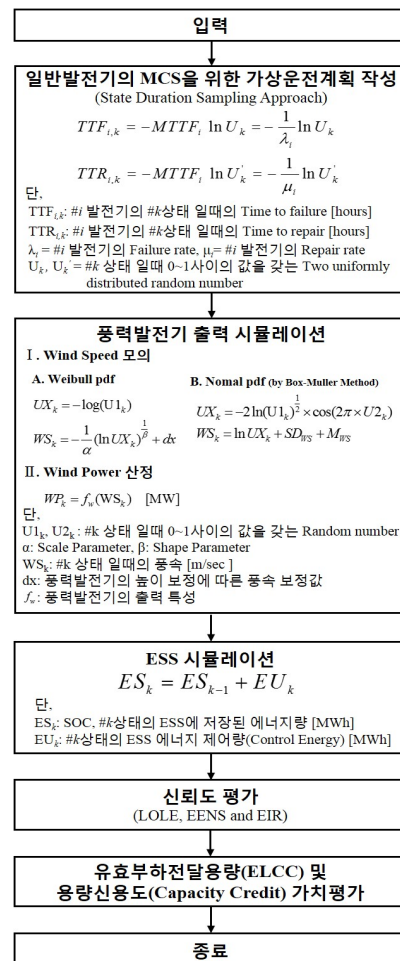


그림 3 신뢰도 평가 흐름도

Fig. 3 Flow chart for ESS reliability contribution evaluation

그림을 이용하여 풍력발전원과 에너지저장장치를 설치한 계통에서 “동일한 계통신뢰도를 유지하면서 과연 실제적으로 부하를 얼마까지 공급할 수 있는가?”를 의미하는 유효부하전달용량(ELCC: Effective Load Carrying Capability)과 용량신용도(Capacity Credit)를 평가하여 보았다. 이의 흐름도를 보이면 그림 3과 같다.

5. 사례연구

5.1 사례연구 모델계통

본 논문에서는 그림 4와 같은 제주도 전력계통과 유사한 모델 계통에 적절히 풍력발전단지와 에너지저장장치(ESS)를 포함시킨 모델계통을 상정하고 이를 대상으로 사례연구를 수행하였다[13,19].

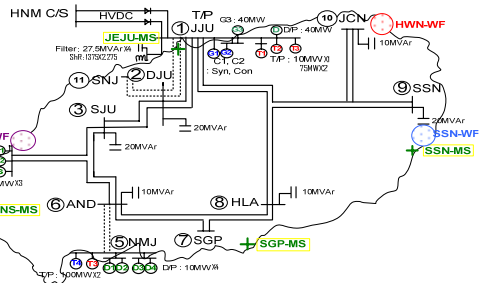


그림 4 사례연구의 모델계통도

Fig. 4 Model power system for case study

5.1.1 입력자료

표 1은 모델계통의 발전기 특성 데이터이다. 풍력발전기의 경우 제주도 계통의 풍력발전단지(성산, 한림, 행원)와 유사하게 3개의 단지(HWN, SSN and HLM)로 나누었으며 표 2는 이들 풍력발전단지의 풍속 및 단지별로 하나를 증가화한 증가풍력발전기의 출력특성곡선 자료이다[9,10]. 또한 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력 비율인 $X\%=0.1[\text{pu}]$ 로 하였다[13~15,19].

표 1 사례연구 모델계통의 발전기 특성 데이터

Table 1 The generators data of case study power system

	Name	Type	Capacity [MW]	Num.	α [Gcal/MWh]	β [Gcal/MWh]	γ [Gcal/hour]	Fuel cost [\$/Gcal]	FOR
1	HWN	WTG	150	1	-	-	-	-	-
2	SSN	WTG	90	1	-	-	-	-	-
3	HLM	WTG	60	1	-	-	-	-	-
4*	HVDC	DC	75/150*	2	0.004	1.512	45.207	43.300	0.010/0.028*
5	NMJ3	T/P	100	2	0.004	1.512	45.207	43.300	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	HLM1	G/T	35	2	0.004	2.401	20.320	77.909	0.013
9	HLM1	S/T	35	1	0.004	2.401	20.320	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	1.360	43.300	0.018
	Total		1145	18	-	-	-	-	-

표 2 사례연구 모델계통의 풍력발전단지 특성

Table 2 Data of wind seed and WTG for wind farms

Wind Data			
Wind farm	HWN	SSN	HLM
α (scale 변수)	3.42 m/s	3.42 m/s	3.42 m/s
β (shape 변수)	1.85 m/s	1.85 m/s	1.85 m/s
WTG Data			
Capacity [MW]	150	90	60
Cut-in speed (V_{ci})	5 m/s	5 m/s	5 m/s
Rated speed (V_R)	10 m/s	10 m/s	10 m/s
Cut-out speed (V_{co})	25 m/s	25 m/s	25 m/s

여기서 α 및 β 는 풍속의 Weibull 확률분포함수에서 각각 스케일 변수(Scale parameter) 및 모양 변수(Shape parameter)이다. 그림 5는 사례연구 모델계통의 부하 변동 곡선(pattern)을 나타낸 것이며 그림 6은 제주도에서의 1998~2007년도까지의 평균 풍속 변동곡선을 참고로 보인 것이다. 한편, 본 연구에서 설치하여 사용하는 ESS 사양은 표 3과 같다고 가정하였다. 또한 연 최대부하 $L_p=781[\text{MW}]$ 로 하였다.

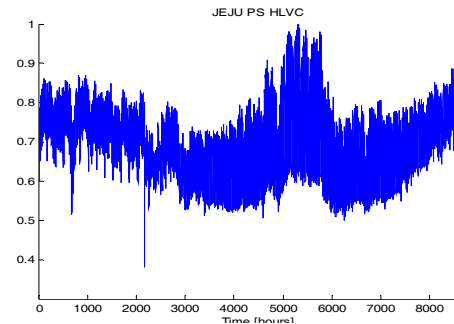


그림 5 사례연구 전력계통의 부하 변동 곡선

Fig. 5 The load variation curve (pattern) of power system

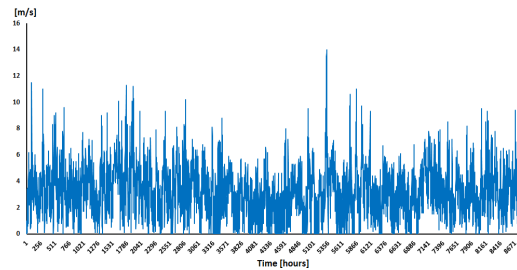


그림 6 사례연구 모델계통의 풍속 변동 곡선($\alpha=3.42, \beta=1.85$) (1998~2007)

Fig. 6 The wind speed variation curve (pattern) of power system ($\alpha=3.42, \beta=1.85$) (1998~2007)

표 3 ESS 사양

Table 3 ESS Specification

최대용량(ES_{max}) [MWh]	최소용량(ES_{min}) [MWh]	전 충/방전 소요시간 [hours]	ESS의 초기용량 [MWh]
300	10	2	15

5.2 각 Case에 따른 유효부하전달용량(ELCC)과 용량신용도 (Capacity Credit:C.C.)의 감도해석

5.2.1 ESS설치여부에 유효부하전달용량(ELCC)과 용량신용도 (Capacity Credit:C.C.)의 기본분석

풍력발전기와 ESS가 설치하였을 경우의 ELCC와 C.C.의 신뢰도 측면에서 다양하게 살펴보기 위하여 그림 7과 같은 3개의 가상모델계통을 상정하였다. 여기서 System A는 일반발전기들에 WTG는 설치되어 있으나 ESS가 없는 모델 계통이며, System B는 System A에 풍력발전기를 제외한 모델 계통을 System C는 System A에 ESS가 설치된 모델 계통이며, 신뢰도 평가 지수인 LOLE=1.92[hours/year], EENS=104.5[MWh/year]의 값을 가지 는 것을 알 수 있었다[19].

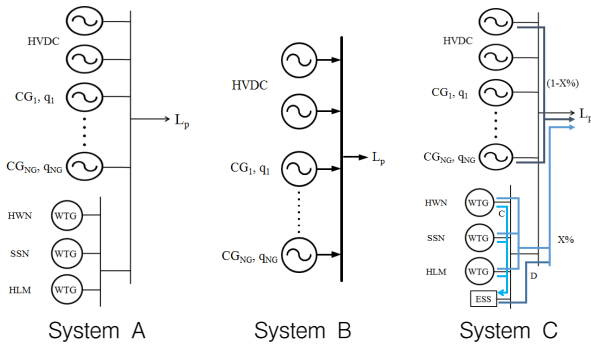


그림 7 사례연구를 위한 3개의 모델계통들
Fig. 7 Three model systems for case study

그림 8은 연 최대부하를 변화 시켰을 경우의 그림 7의 모델계통의 LOLE 변동을 나타낸 것이다. 여기서 본 계통의 신뢰도 기준으로는 LOLE=10[hours/year]로 설정하였다.

그림 8로부터 산정된 풍력발전기, ESS 그리고 풍력발전기에 ESS가 설치되었을 경우의 ELCC와 C.C.는 아래처럼 계산되고 이를 정리하면 표 4와 같다.

- 1) WTG Capacity Credit(C.C.)= 13.3%
 - $ELCC = 764 - 724 = 40[MW]$
 - $C.C. = \frac{40}{300} \times 100 = 13.3\%$
- 2) ESS Capacity Credit(C.C.)= 38%
 - $ELCC = 821 - 764 = 57[MW]$
 - $C.C. = \frac{57}{150} \times 100 = 38\%$
- 3) WTG+ESS Capacity Credit(C.C.)= 21.6%
 - $ELCC = 821 - 724 = 97[MW]$
 - $C.C. = \frac{97}{450} \times 100 = 21.6\%$

풍력발전기에 ESS를 설치함으로써, ELCC는 40[MW]에서 97[MW]로 약 2.4배 가량 증가하며 C.C.는 13.3[%]에서 21.6[%]로 약 2배 가량 증가함을 알 수 있다. 이는 풍력발전기의 ELCC 및

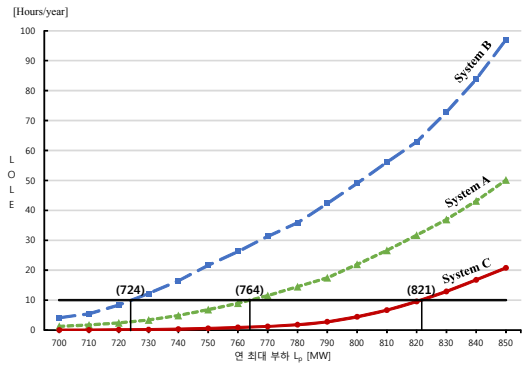


그림 8 연 최대부하를 변화에 따른 모델계통들의 LOLE 변동 (WTG=300[MW], ESS=300[MWh])

Fig. 8 Variation of LOLE of three model systems according to changing of peak load(WTG=300[MW], ESS=300[MWh])

표 4 모델계통별 신뢰도 지수

Table 4 Reliability evaluation result of model systems

	ELCC [MW]	Capacity Credit [%]
WTG	40	13.3
ESS	57	38
WTG+ESS	40+57=97	21.6

표 5 X%의 변화에 따른 LOLE C.C.[%] (WTG=300[MW])

Table 5 Variation of LOLE C.C.[%] according to changing of X% (WTG=300[MW])

	Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
	WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Case 1*	300	300	0.1	13.3 (40)	38 (57)	21.6* (40+57=97)
Case 2	300	300	0.2	14.3 (43)	22.7 (34)	17.1 (43+34=77)
Case 3	300	300	0.3	14.3 (43)	13.3 (20)	14 (43+20=63)
Case 4	300	300	0.4	14.3 (43)	10.7 (16)	13.1 (43+16=59)
Case 5	300	300	0.5	14.3 (43)	5.3 (8)	11.3 (43+8=51)
Case 6	300	300	0.6	14.3 (43)	0.7 (1)	9.8 (43+1=44)

C.C.를 증가시키는데 ESS의 효과를 본 것으로 사료된다.

5.2.2 X%를 변화 시켰을 경우

표 5는 WTG 용량을 300[MW], ESS에너지용량을 300[MWh] (ESS출력용량=150[MW])으로 고정하고 X%의 변화에 따른 ELCC와 C.C.를 나타낸 것이다. 여기서는 편의상 Case 1*을 Base Case로 설정하였다. 표 5에서 최대부하대비 WTG의 허용공급비율 X%를 증가시킬 경우에 WTG의 ELCC 및 C.C.는 증가하나 ESS 자체의 ELCC 및 C.C.가 급격히 감소함으로 WTG+ESS 총합

의 ELCC 및 C.C.도 감소함을 알 수 있다. 먼저, 최대 C.C.=21.6[%]을 갖는 최적 X*는 0.1[pu]임을 알 수 있다. 더불어 X%=0.29[pu]정도에서 C.C.가 반전되는 점(Break point)이 발생함을 알 수 있으며 그림 9는 이를 보인 것이다. 따라서 본 계통의 경우에 WTG의 계통투입 허용은 최대부하의 29% 즉, 781[MW]×0.29=226[MW]까지 WTG의 출력이 부하로 바로 공급 되도록 허용하여주면 C.C.면에서 이득을 볼 수 있다고 사료된다. 또한 X%=0.6 [pu]일 경우에는 ESS C.C.의 값이 거의 0에 가까우므로, ESS의 설치의미가 전혀 없다고 사료된다.

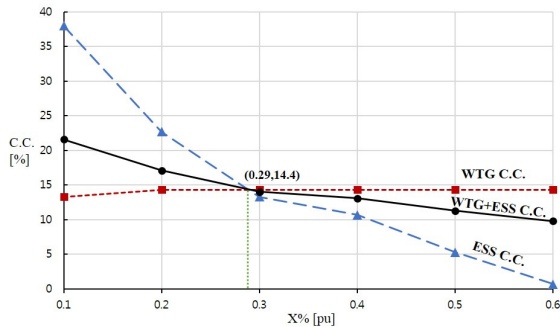


그림 9 X%의 변화에 따른 LOLE C.C. [%]
 Fig. 9 Variation of LOLE C.C. [%] according to changing of X%

표 6 X%의 변화에 따른 LOLE C.C. [%] (WTG=600[MW])
 Table 6 Variation of LOLE C.C. [%] according to changing of X% (WTG=600[MW])

	Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
	WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Case 7	600	300	0.1	9.3 (56)	41.67 (63)	15.81 (56+63=119)
Case 8	600	300	0.2	11.7 (70)	58.7 (88)	21.1* (70+88=158)
Case 9	600	300	0.3	11.7 (70)	46.67 (70)	18.67 (70+70=140)
Case 10	600	300	0.4	11.7 (70)	32.67 (49)	15.87 (70+49=119)
Case 11	600	300	0.5	11.7 (70)	21.87 (33)	13.73 (70+33=103)
Case 12	600	300	0.6	11.7 (70)	16.67 (25)	12.67 (70+25=95)

한편, 표 6 및 표 7은 ESS에너지용량을 300[MWh]로 고정하고 후 WTG 용량을 각각 600[MW], 1200[MW]로 할 경우에 X%의 변화에 따른 계산결과를 보인 것이다. 이들 표로부터 풍력발전기의 용량에 따라서 최대 C.C.을 갖는 최적 X%의 값이 달라짐을 알 수 있다. 즉, WTG=600[MW]과 1200[MW]에 대하여 각각 최적 X*=0.2[pu](Case 8) 및 X*= 0.3[pu](Case 15)이 됨을 알 수 있으며 ESS의 용량이 일정할 때 WTG 용량이 증가할수록 최대 C.C.값은 감소하지만 최적 X*는 증가하는 것으로 나타났다.

이는 ESS의 용량이 일정할 때 WTG 용량이 증가할수록 증가된 WTG 용량으로 인하여 C.C.값은 떨어지지만 동일한 WTG 용량 조건하에서는 최대부하대비 WTG 공급의 허용폭인 X%를 높여주는 것이 상대적으로 양호하다고 사료된다. 그러나 WTG의 과도한 허용은 주파수변동을 초래하므로 X%는 작을수록 좋다. 표 8은 ESS=300[MWh] 조건하에서 전술한 3가지 경우에 대하여 ELCC, C.C. 및 최적 X*를 비교하여 본 것이다. 참고로 Case 1, Case 8 및 Case 15에 대한 ELCC를 부록 II에 보인다.

표 7 X%의 변화에 따른 LOLE C.C. [%] (WTG=1200[MW])
 Table 7 Variation of LOLE C.C. [%] according to changing of X% (WTG=1200[MW])

	Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
	WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Case 13	1200	300	0.1	5.67 (68)	39.3 (59)	9.41 (68+59=127)
Case 14	1200	300	0.2	8 (96)	72.7 (109)	15.2 (96+109=205)
Case 15	1200	300	0.3	8.3 (100)	95.33 (143)	18* (100+143=243)
Case 16	1200	300	0.4	8.3 (100)	88.67 (133)	17.26 (100+133=233)
Case 17	1200	300	0.5	8.3 (100)	78 (117)	16.07 (100+117=217)
Case 18	1200	300	0.6	8.3 (100)	68 (102)	14.96 (100+102=202)

표 8 ESS=300[MWh] 조건하에서 WTG용량에 따른 3가지 경우의 최적 X*
 Table 8 Optimal X* for three cases according to changing of WTG capacity under condition of ESS=300[MWh]

WTG [MW]	WTG+ESS		X* [pu]
	ELCC [MW]	C.C. [%]	
300	97	21.6	0.1
600	158	21.1	0.2
1200	243	18	0.3

5.2.3 WTG 및 X%는 일정한 상태에서 ESS 최대용량을 변화시켰을 경우

이번에는 풍력발전기의 용량 및 X%를 각각 300[MW] 및 0.1[pu]로 고정하고 ESS 최대용량을 100~600[MWh]로 변화시켜 ELCC와 C.C.를 살펴보았다. 표 9는 이의 결과를 보인 것이다. 이들 표로부터 ESS를 설치함에 따라 X%=0.1[pu]인 경우에는 ESS=200[MWh]인 Case 20이 C.C.의 값이 가장 큰 값을 가지는 것으로 얻어졌다. 이는 ESS 최대용량이 커질수록 WTG+ESS의 ELCC는 증가하지만 투입된 설비용량대비 ELCC인 C.C.의 값은 감소하는 것에서 비롯된다. 즉, ESS 용량을 증설하여도 ELCC 증가변화량은 그보다 작기 때문이다. 따라서 X%를 작게 하면 ESS

표 9 ESS 용량 변화에 따른 LOLE C.C.[%] (X%=0.1[pu])
Table 9 Variation of LOLE C.C.[%] according to changing of ESS Capacity (X%=0.1[pu])

	Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
	WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Case 0	300	0	1.0	14.3 (43)	-	-
Case 19	300	100	0.1	13.3 (40)	72 (36)	21.71 (40+36=76)
Case 20	300	200	0.1	13.3 (40)	49 (49)	22.25* (40+49=89)
Case 21	300	300	0.1	13.3 (40)	38 (57)	21.6 (40+57=97)
Case 22	300	400	0.1	13.3 (40)	31 (62)	20.4 (40+62=102)
Case 23	300	500	0.1	13.3 (40)	26 (65)	19.09 (40+65=105)
Case 24	300	600	0.1	13.3 (40)	22.6 (68)	18 (40+68=108)

표 10 ESS 용량 변화에 따른 LOLE C.C.[%] (X%=0.2[pu])
Table 10 Variation of LOLE C.C.[%] according to changing of ESS Capacity (X%=0.2[pu])

	Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
	WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Case 25	300	100	0.2	14.3 (43)	50 (25)	19.43* (43+25=68)
Case 26	300	200	0.2	14.3 (43)	31 (31)	18.5 (43+31=74)
Case 27	300	300	0.2	14.3 (43)	22.8 (34)	17.1 (43+34=77)
Case 28	300	400	0.2	14.3 (43)	18.5 (37)	16 (43+37=80)
Case 29	300	500	0.2	14.3 (43)	15.6 (39)	14.91 (43+39=82)
Case 30	300	600	0.2	14.3 (43)	13.7 (41)	14 (43+41=84)

의 효과가 크지만 X%를 크게 하면 ESS의 효과가 둔하므로 어느 일정한 WTG 설비용량에서 WTG의 직접부하로 공급할 수 있는 허용출력한계인 X%를 좁혀도 ESS의 용량을 증설하면 원하는 C.C.를 얻을 수 있다. 즉, WTG를 ESS와 결합하면 C.C.를 증가시킬 수 있다는 결론을 얻는다. 가령 ESS=0[MWh], X%=1.0[pu]으로 준 Case 0은 풍력발전기의 부하공급을 100%로 허용한 경우인데 ESS를 설치하면 X%=0.1[pu]로 WTG의 부하에 대한 직접적인 공급에 제약을 주어도 ESS를 설치함으로 인하여 매우 큰 ELCC를 얻고 있음을 Case 19~Case 24의 결과와 비교하면 알 수 있다. 그러나 ESS의 설비가 200[MWh]를 증가할수록 C.C.는 다시 떨어짐을 알 수 있다. 이는 투자대비 효과가 감소한다는 뜻이며 본 모델계통의 경우에는 최대 C.C.를 갖는 ESS=200[MWh]이 가장 적정하다고 판단된다. 표 10은 X%=0.2[pu]인 경우에 대하여 보인 것이다. 이 경우에는 ESS=100[MWh]인 Case 25가 WTG+ESS의 최대 C.C.를 갖는 것으로 얻어졌다. 참고로, Case

20 및 Case 25에 대한 ELCC를 부록 II에 보인다.

5.2.4 WTG 및 ESS 최대용량을 변화시켰을 경우

WTG 및 ESS 최대용량 변화에 따른 ELCC와 C.C.를 다양하게 알아보기 위해서 크게 2개의 Group으로 나누어서 살펴보았다. 여기서 Group A는 WTG의 용량을 100, 300, 450, 600, 900, 1200[MW]로 하고, ESS 최대용량은 300[MWh]과 600[MWh]인 2가지 경우를 대상으로 하였으며, X%=0.1[pu]로 하였다. Group B는 Group A에서 X%를 0.2[pu]로 설정했을 경우이다. 표 11 및 표 12는 이를 보인 것이다.

표 11 X%=0.1일 때 Group A의 C.C.[%]
Table 11 C.C.[%] of Group A (X%=0.1)

		Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
		WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Group A	Case A1	100	300	0.1	18 (18)	10 (15)	13 (18+15=33)
	Case A2	100	600	0.1	18 (18)	7 (22)	10 (18+22=40)
	Case A3*	300	300	0.1	13.3 (40)	38 (57)	21.6 (40+57=97)
	Case A4	300	600	0.1	13.3 (40)	22.7 (68)	18 (40+68=108)
	Case A5	450	300	0.1	11.3 (51)	42.04 (63)	19 (51+63=114)
	Case A6	450	600	0.1	11.3 (51)	27 (81)	17.6 (51+81=132)
	Case A7	600	300	0.1	9.3 (56)	41.67 (63)	15.81 (56+63=119)
	Case A8	600	600	0.1	9.3 (56)	29.07 (88)	15.92 (56+88=144)
	Case A9	900	300	0.1	7.1 (64)	40 (60)	11.81 (64+60=124)
	Case A10	900	600	0.1	7.1 (64)	29.3 (88)	12.67 (64+88=152)
	Case A11	1200	300	0.1	5.67 (68)	39.3 (59)	9.41 (68+59=127)
	Case A12	1200	600	0.1	5.67 (68)	29 (87)	10.33 (68+87=155)

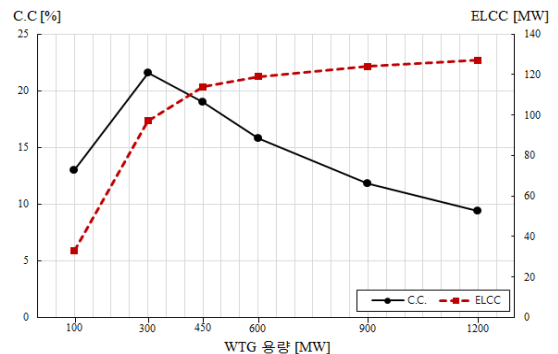


그림 10 X%=0.1, ESS=300[MWh] 조건하에서 WTG 용량의 변동에 대한 ELCC 및 C.C.[%]

Fig. 10 Comparison of ELCC and C.C.[%] according to changing of WTG capacity under condition of ESS=300[MWh] and X%=[0.1]

표 12 X%=0.2일 때 Group B의 C.C.[%]

Table 12 C.C.[%] of Group B (X%=0.2)

		Input Conditions			LOLE Capacity Credit Results [%] (ELCC [MW])		
		WTG [MW]	ESS [MWh]	X% [pu]	WTG C.C. (ELCC)	ESS C.C. (ELCC)	WTG+ESS C.C. (ELCC)
Group B	Case B1	100	300	0.2	18 (18)	0.2 (0.3)	7.3 (18+0.3=18.3)
	Case B2	100	600	0.2	18 (18)	0.1 (0.3)	4.6 (18+0.3=18.3)
	Case B3	300	300	0.2	14.3 (43)	22.7 (34)	17.1 (43+34=77)
	Case B4	300	600	0.2	14.3 (43)	13.7 (41)	14 (43+41=84)
	Case B5	450	300	0.2	13.3 (60)	41.97 (63)	20.5 (60+63=123)
	Case B6	450	600	0.2	13.3 (60)	24.7 (74)	17.9 (60+74=134)
	Case B7	600	300	0.2	11.7 (70)	58.7 (88)	21.1 (70+88=158)
	Case B8	600	600	0.2	11.7 (70)	36.7 (110)	20 (70+110=180)
	Case B9	900	300	0.2	9.3 (84)	70.67 (106)	18.1 (84+106=190)
	Case B10	900	600	0.2	9.3 (84)	44.67 (134)	18.17 (84+134=218)
	Case B11	1200	300	0.2	8 (96)	72.7 (109)	15.2 (96+109=205)
	Case B12	1200	600	0.2	8 (96)	45.33 (136)	15.47 (96+136=232)

지금까지의 계산결과를 토대로 WTG의 직접 부하공급 허용용량을 10%로 한정한다(X%=0.1[pu])는 가정 하에 300[MWh]의 ESS를 설치했을 경우에 이에 적합한 WTG의 적정용량을 추정함을 궁극적 목적으로 삼고 WTG 용량을 변화하면서 ELCC 및 C.C.를 비교하여 보았다. 그림 10은 이의 결과를 보인 것이다. 그림 10으로부터 ESS는 설치되지 않고 그러나 설치된 풍력발전기의 부하공급을 100%로 허용한 앞서의 이상적인 Case 0의 ELCC=43[MW], C.C.=14.3[%]보다 WTG=300[MW] 이상은 모두 높다. 그러나 C.C. 즉, 투자효율의 의미를 담고 있는 C.C.가 가장 높은 것은 WTG=300[MW]임을 알 수 있다. 즉, 이 계통에서는 WTG=300[MW]를 설치함이 유효공급능력 및 용량신용도 측면에서 적정하다고 사료된다.

표 11 및 표 12로 부터 그 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 동일한 WTG 용량 및 X%일 경우 ESS 용량이 증가하면 WTG+ESS의 ELCC는 지속적으로 증가하지만 WTG+ESS의 C.C.은 감소하다가 WTG의 용량이 상대적으로 클 때 ESS의 설비이용율이 상승하여 C.C.가 증가한다. 그리고 그 변환점은 X%가 낮을수록 ESS를 많이 활용하므로 빨리 발생한다.
2. 동일한 ESS 용량 및 X%에서 WTG 용량이 증가하면 WTG+ESS의 ELCC는 증가 후 포화하며, C.C.는 증가 후 감소한다.
3. 동일한 WTG와 ESS의 용량에서 X%가 상승할 경우 WTG와 ESS의 용량 비율에 따라 WTG+ESS 및 ESS의 C.C.는 감소 혹은 증가하는 특성을 지니는 알 수 있다. 이러한 현상은 WTG가 직접 공급하는 출력허용 비율인 X%가 높을 때는 WTG+ESS

및 ESS의 ELCC 모두가 커져서 WTG+ESS 및 ESS의 C.C.가 모두 증가하지만 X%가 낮으면 ESS의 설비이용이 증가하므로 ESS의 ELCC가 커져서 ESS의 C.C.가 커지지만 WTG+ESS의 ELCC는 X%가 높은 경우보다 상대적으로 작아져서 그의 C.C.는 감소하기 때문에 발생하는 것이라고 사료된다.

6. 결 론

최근 발전기의 사고율을 고려할 때 유효공급능력을 평가할 수 있는 기 개발된 ELCC를 이용하여 출력의 변동성(불확실성)이 큰 신재생에너지발전원의 유효공급능력 평가가 재조명받고 있다. 그러나 ESS를 고려한 ELCC의 평가는 아직 개발되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 불확실성을 갖는 전원의 실질적인 유효부하담당은 얼마인가를 평가할 수 있도록 1966년도 L.L.Garver에 의하여 기 개발된 ELCC(Effective Load Carrying Capability) 평가방법[1]을 이용하여 역시 기 개발된 모형인 WTG와 연계된 ESS의 신뢰도평가 모형[9]에 적용하여 간헐성의 출력을 갖는 WTG(Wind Turbine Generator)가 홀로 발전할 때와 여기에 ESS를 결합하여 운전할 때의 ELCC를 각각적으로 상호비교 분석함으로써 ESS가 전력공급에 가져다주는 영향력을 정량적으로 평가하는 방법들 중 ELCC 즉, 실질적인 유효발전량(혹은 실질적인 부하담당량) 알고리즘을 활용하여 ESS가 투입될 때의 그 가치를 평가할 수 있는 한 가지 방법론을 제안한다.

이러한 활용연구는 절대적으로 WTG와 결합한 상태에서의 ESS의 공급신뢰도를 평가할 수 있는 프로그램 없이는 할 수 없다. 따라서 본 연구에서 이미 개발하고 이를 업그레이드하면서 연구결과를 계속 발표하여 온 Monte Carlo Simulation을 이용하여 ESS와 결합한 풍력발전기가 설치될 때의 전력계통 신뢰도의 평가 프로그램을 활용하였다[13,19].

본 연구에서는 확률론적 신뢰도 측면에서 기존의 전력계통에 임의로 제어가 불가능한 자원공급의 변동성으로 인하여 출력의 불확실성이 매우 큰 신재생에너지발전원인 풍력발전기에 ESS를 결합할 경우에 ESS가 투입되기 전과 비교해서 ESS가 얼마만큼의 가치를 갖는가?를 평가하는 새로운 방안을 제안한다. 특히 설비용량을 증가 즉, 투자비의 증가에 따른 유효공급능력의 평가는 신재생에너지발전원의 적정규모를 결정함에 매우 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 ESS와 결합한 WTG를 갖는 전력계통의 ELCC를 산정할 수 있는 식을 새롭게 정식화하였으며 나아가 ELCC를 투입용량으로 나누어 백분율로 표현하면 이는 투자량에 대한 유효공급능력을 의미하므로 어느 정도 투자에 대한 실질적인 이득율(효과율)을 표시할 수 있다. 최근 이를 용량신용도(Capacity Credit: C.C.)라고 정의하고 변동성이 매우 큰 신재생에너지발전원의 가치평가의 지수로서 크게 활용하고 있는바 본 연구에서도 ESS를 고려한 용량신용도(Capacity Credit: C.C.)를 새롭게 제안하였다.

끝으로 제주도계통 규모의 모델계통을 대상으로 모의를 다각적으로 실행하여 임의의 조건하에서 적정 ESS의 용량결정 및 적정 WTG의 결정문제도 해석함을 보임으로써 제안하는 방법의 유용성을 검증하였다. 차후 이를 활용하여 실계통 규모에 적용하여

더욱 실용성 있는 방법으로 나아갈 예정이다. 나아가 차후 다수 개의 WTG에 각각 ESS를 설치할 경우에 대한 연구 및 이러한 모의한 결과와 실제와의 차이점 그리고 오차분석을 보다 심도 높게 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력연구원, 한국전기연구원 및 한국연구재단(과제번호 : 2012R1A2A2A0101)의 지원에 의하여 수행된 과제로서 관계기관에 감사드립니다.

부록 I. ESS의 운전모형

부 1.1 운전조건

$$SG_{wk} = TG_{wk} - X\% \times L_k \quad (부.1)$$

$$SG_{ck} = TG_{ck} - (1 - X\%) \times L_k \quad (부.2)$$

단,

SG_{wk} : #k상태에서의 WTG의 잉여출력 [MW]

SG_{ck} : #k상태에서의 CG의 잉여의무량 [MW]

TG_{wk} : #k상태에서의 풍력발전기의 총 출력량 [MW]

TG_{ck} : #k상태에서의 기존발전기의 총 출력량 [MW]

$X\% \times L_k$: #k 상태에서의 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력 [MW]

$(1 - X\%) \times L_k$: #k 상태에서의 기존발전기 출력의무량 [MW]

$X\%$: 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력의 비율 [pu]

L_k : #k상태에서의 부하 [MW]

WTG는 $X\% \times L_k$ 를 절대로 초과하여 부하에 공급을 할 수 없는 것으로 설정하였다. 따라서 풍력발전기의 여분의 출력을 의미하는 SG_{wk} 가 양수(+)이면 충전할 수 있다. 그러나 이때 SG_{ck} 가 음수(-)이면 공급지장이 발생하지 않도록 ESS가 방전을 하여야하므로 WTG의 초과 출력분이 존재하여도(SG_{wk} 가 양수(+)) 그 초과분을 동일한 ESS에 충전할 수 없는 것으로 한다.

부 1.2 ESS 에너지상태방정식(Energy State Equation)

$$ES_k = ES_{k-1} + EU_k \quad (부.3)$$

$$ES_{min} \leq ES_k \leq ES_{max} \quad (부.4)$$

단,

ES_k : #k상태의 ESS에 저장된 에너지 [MWh]

(=SOC(State of Charge))

EU_k : #k상태의 ESS의 에너지 변화량 [MWh](ESS 에너지 제어량)

ES_{max} : ESS의 최대 용량(SOC) [MWh]

ES_{min} : ESS의 최소 용량(SOC) [MWh]

부 1.3 ESS 제어량(EUk) 산정

$$ES_{k+1} = \begin{cases} ES_k + SG_{wk} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ ES_k + SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ ES_k & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ ES_k + (SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (부.5)$$

$$EU_k = \begin{cases} SG_{wk} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ 0 & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ (SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (부.6)$$

1) 충전전에너지 단위시간당 제어량 한계 제약

$$-EU_{max} \leq EU_k \leq EU_{max} \quad (부.7)$$

$$EU_{max} = [(ES_{max} - ES_{min}) / TM_{ESS}] \times \Delta t \quad (부.8)$$

단, TM_{ESS} : ESS의 전 충전(방전) 소요시간

2) ESS 최대용량제약에 따른 충/방전 허용에너지 제약

$$ES_{min} \leq ES_k + EU_k \leq ES_{max} \quad (부.9)$$

$$ES_{min} - ES_k \leq EU_k \leq ES_{max} - ES_k \quad (부.10)$$

제약조건을 고려한 EU_k 를 EU_k^* 라 하면 이는 식 (부.6) 보다 작을 수 있으며 EU_k^* 가 방전모드(-)이고 동시에 ESS의 의무방전에너지의 크기인 식 (부.11)처럼 정식화되는 TG_{Dk} 보다 작으면 공급지장이 발생한다. 이러한 상태집합을 Ω_D 로 표기하였다.

$$TG_{Dk} = \begin{cases} 0 & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ -SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ 0 & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ -(SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (부.11)$$

부 1.4 신뢰도 평가 및 ESS 신뢰도 가치 함수

$$LOLE = \frac{1}{NY} \sum_{k \in \Omega_D} \Delta t_k \quad [\text{Hours/year}] \quad (부.12)$$

$$EENS = \frac{1}{NY} \sum_{i \in \Omega_D} (TG_{Dk} + EU_k^*) \quad [\text{MWh/year}] \quad (부.13)$$

$$EIR = 1 - \frac{EENS}{TDE} \quad [\text{pu}] \quad (부.14)$$

단, Ω_D : 방전모드 중 공급지장 상태(시간대)의 집합

Δt_k : #k 상태의 시간 [hours] (=Δt)

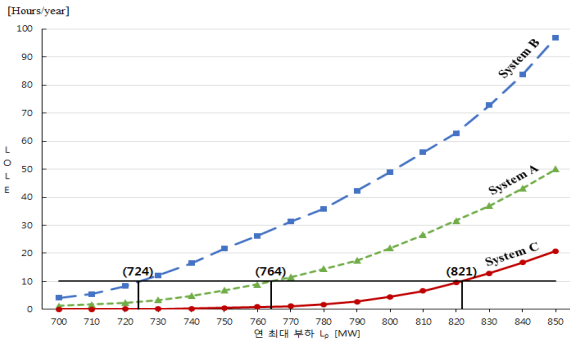
EU_k^* : ESS 실제 가능 제어에너지량 (ESS Control Energy)

(+'이면 충전이며 '-'이면 방전을 의미함.)

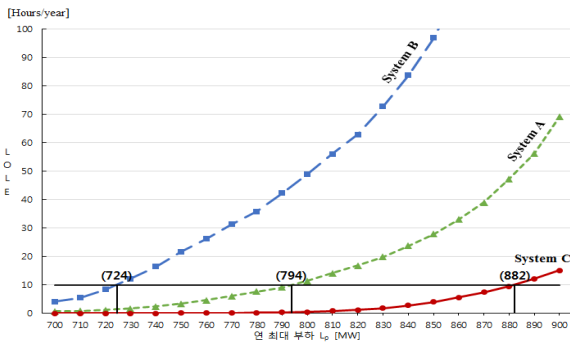
TG_{Dk} : 부하의 공급부족을 없애기 위한 꼭 필요한 의무 방전 에너지 [MWh]

TDE : 총 부하에너지(Total Demand Energy) [MWh]

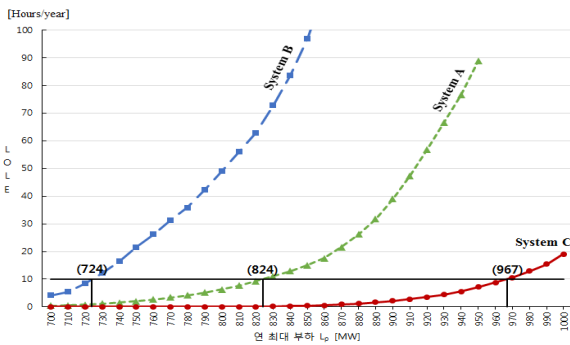
부록 II. 주요 Case들의 ELCC 그림



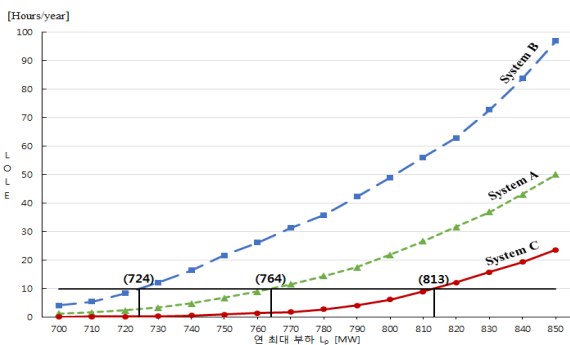
(a) Case 1: WTG=300[MW], ESS=300[MWh], X%=0.1



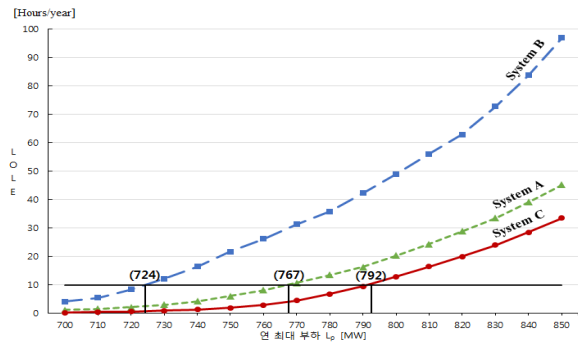
(b) Case 8: WTG=600[MW], ESS300[MWh], X%=0.2



(c) Case 15: WTG=1200[MW], ESS=300[MWh], X%=0.3



(d) Case 20: WTG=300[MW], ESS=200[MWh], X%=0.1



(e) Case 25: WTG=300[MW], ESS=100[MWh], X%=0.2

그림 부.1 주요 Case들의 유효부하전달용량(ELCC) 모습
Fig. A.1 ELCC Configuration of main five Cases

7. 참고문헌

- [1] L. L. Garver, "Effective Load Carrying Capability of Generating Units" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-85, no. 8, pp. 910~919, Aug. 1966.
- [2] Michael Milligan and Brian Parsons, "A Comparison and Case Study of Capacity Credit Algorithms for Intermittent Generators", NREL Report, NREL/CP-440 -22591, contract No. DE-AC36-83CH10093, March 1997.
- [3] Wijarn Wangdee and Roy Billinton, "Considering Load-Carrying Capability and Wind Speed Correlation of WECS in Generation Adequacy Assessment", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 3, Sep. 2006.
- [4] R. Billinton, D. Huang and B. Karki, "Wind Power Planning and Operating Capacity Credit Assessment", PMAPS 2010, Singapore, pp.814~819, June 2010.
- [5] Lingfeng Wang and Chanan Singh, "An Alternative Method for Estimating Wind-Power Capacity Credit based on Reliability Evaluation Using Intelligent Search", PMAPS 2008, Rincon, pp.1~6, May 2008.
- [6] A. Keane, M. Milligan, C. J. Dent, B. Hasche, C. D'Annunzio, K. Dagoon, H. Holttinen, N. Samaan, L. Soder and M. O'Malley, "Capacity Value of Wind Power", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.26, no. 2, pp.564~572, May 2011.
- [7] Ki-Seon Cho and Chang-Ho Rhee, "A Study on Methodologies of Feed-in Tariffs for Renewable Energy Generation", 2006 KIEE Summer Conference, pp.1175~1476, July 2006.
- [8] Jeongje Park and Jaeseok Choi, "Development of Methodology of New Effective Installed Reserve Rate considering Renewable Energy Generators", Journal of KIEE, Vol. 59, No. 1, pp.26~32, Jan. 2010.
- [9] P. Hu, R. Karki and Roy Billinton, "Reliability Evaluation

of Generating Systems Containing Wind Power and Energy Storage”, Journal of IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, no. 8, pp. 783-791, 2009.

[10] P. Hu, “Thesis: Reliability Evaluation of Electric Power Systems Including Wind Power and Energy Storage”, University of Saskatchewan, Oct. 2009.

[11] Z. Y. Gao and Peng Wang, “Reliability Evaluation of Power Systems with WTGs and Energy Storage”, IPEC, 2010 Conference Proceedings, Singapore, 2010. 10. pp. 27-29.

[12] Carmen L. T. Borges and Eduardo Cantarino, “Microgrids Reliability Evaluation with Renewable Distributed Generation and Storage Systems”, the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), pp. 11695-11700, 2011. 08. 28.~09. 02.

[13] Ungjin Oh, Yeonchan Lee, Jintaek Lim, Jaeseok Choi, Yongbeum Yoon, Byunghoon Chang and Sungmin Cho, “Reliability Evaluation with Wind Turbine Generators and an Energy Storage System for the Jeju Island Power System”, Journal of KIEE, Vol. 64, No. 1, pp. 1-7, Jan. 2015.

[14] Kyeonghee Cho, Jeongje Park, and Jaeseok Choi, “Probabilistic Reliability Based Grid Expansion Planning of Power System Including Wind Turbine Generators”, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 7, no. 5, pp. 698~704, 2012.

[15] Jaeseok Choi, Jintaek Lim and Kwang Y. Lee, “DSM Considered Probabilistic Reliability Evaluation and an Information System for Power Systems Including Wind Turbine Generators”, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, vol. 4, no. 1, pp. 425-432, 2013.

[16] R. Karki, P. Hu and R. Billinton, “A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 2, June 2006.

[17] Roy Billinton and Wenyuan Li, “Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods”, Plenum Press, 1994.

[18] Jaeseok Choi, “Power System Reliability Evaluation Engineering”, G&U Press, 2013, (written by Korean, ISBN 978-89-6257-060-1).

[19] Ungjin Oh, Yeonchan Lee, Jaeseok Choi, Yongbeum Yoon, Byunghoon Chang, Jun-Min Cha, “Development of Reliability Contribution Function of Power System including Wind Turbine Generators combined with Battery Energy Storage System”, Journal of KIEE, Vol. 65, No. 3, pp. 371~381, March 2016.

[20] Lennart Soder and Mikael Amelin, “A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit”, IEEE GM2008, Pittsburgh, PA, USA, July 2008.

[21] Cornel Ensslin, Michael Milligan, Hannele Holttinen, Mark O'Malley, and Andrew Keane, “Current Method to

Calculate Credit of Wind Power, IEA Collaboration” IEEE GM2008, Pittsburgh, PA, USA, July 2008.

[22] MISO, “Planning Year 2014-2015 Wind Capacity Credit”, MISO Report, December 2013.

저 자 소 개



오 응 진 (Ungjin Oh)

1985년 7월 6일생. 2013년 경상대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-772-1715

E-mail : vkdlskf@nate.com

ORCID ID : 0000-0001-9105-1791



이 연 찬 (Yeonchan Lee)

1987년 1월 5일생. 2013년 경상대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015~동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-772-1715

E-mail : hun22ya@gnu.ac.kr

ORCID ID : 0000-0002-4503-3696



최 재 석 (Jaeseok Choi)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년~현재 경상대 교수.

Tel : 055-772-1715

Fax : 055-772-1719

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

ORCID ID : 0000-0003-0867-6251



임 진 택 (Jintaek Lim)

1985년 8월 1일생. 2011년 경상대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2015년~현재 한국국제대 조교수.

Tel : 055-751-7905

E-mail : jt131223@naver.com

ORCID ID : 0000-0001-5192-0825