

# 풍력발전기와 BESS를 결합한 전력계통의 공급신뢰도 기여함수

## Development of Reliability Contribution Function of Power System including Wind Turbine Generators combined with Battery Energy Storage System

오 응 진\* · 이 연 찬\* · 최 재 석\* · 윤 용 범\*\* · 장 병 훈\*\* · 차 준 민\*\*\*

(Ungjin Oh · Yeonchan Lee · Jaeseok Choi · Yongbeum Yoon · Byunghoon Chang · Jun-Min Cha)

**Abstract** - This paper presents a study on reliability assessment and new contribution function development of power system including Wind Turbine Generator(WTG) combined with Battery Energy Storage System(BESS). This paper develops and proposes new reliability contribution function of BESS installed at wind farms. The methodology of reliability assessment, using Monte Carlo Simulation(MCS) method to simulate sample state duration, is proposed in detail. Forced Outage Rate(FOR) considered probabilistic approach for conventional generators is modelled in this paper. The penetration of large wind power can make risk to power system adequacy, quality and stability. Although the fluctuation of wind power, BESS installed at wind farms may smooth the wind power fluctuation. Using small size system as similar as Jeju island power system, a case study of reliability evaluation and new proposed contribution function of power system containing WTG combined with BESS is demonstrated in this paper, which would contribute to BESS reliability contribution and assessment tools of actual power system in future.

**Key Words** : Wind turbine generator (WTG), Battery energy storage system (BESS), Monte carlo simulation (MCS), Reliability evaluation, ESS reliability contribution

### 1. 서 론

최근 국내외적으로 우리사회는 초-정보화 사회 시스템으로 급변하고 있으며 높은 공급신뢰도를 갖는 전기에너지의 공급은 국민의 삶의 존폐여부를 가져올 만큼 매우 중요하게 되었다[1-3]. 특히, 근래 국내외적으로 발생한 몇 건의 대 정전사고로 인하여 과거에는 수 시간 이상의 장기정전 발생 시에만 그로 인한 재정적인 손해에 주로 관심을 가졌지만 이제는 수 분단위의 단기정전 및 수초단위의 초단기형 정전발생에도 경제적인 손실은 물론이고 사회적인 질서, 나아가 국가안보체제에까지 타격이 올 수 있음을 깨닫게 되었다[1-3]. 이는 우리사회가 고도산업화 문명단계를 지나 이미 지식기반의 극정보화 문명단계로 진입하였음을 의미한다. 그러므로 최근 국내외적으로 온라인 실시간 정보망 구축에 대한 중요성이 부각되고 있으며 더불어 마이크로 그리드 및 스마트 그리드와 같은 미래형 전력계통망에 대한 연구가 더욱 중요해

지고 있다[1-3].

한편, 2015년 12월 12일 파리 신기후협약체제 이후에 세계적으로 신재생에너지 발전원이 더욱 급격히 계통에 투입될 것으로 예상된다. 그러나 이들 신재생에너지 발전원은 출력의 변동성이 매우 크므로 이를 완화시켜주는 기술의 개발이 절대적으로 필요하다. 현재 주목받는 기술 중 하나가 출력의 변동성이 큰 신재생에너지 발전원에 배터리를 에너지저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)(여기서는 편의상 ESS라고 부르기로 한다.)를 설치하여 적절히 충방전을 실시함으로써 변동성을 완화시켜주는 결합기술이다. 그러나 신재생에너지 발전원과 에너지저장장치를 결합한 전력계통의 확률론적인 신뢰도 평가 연구는 국내외적으로 다른 분야에 비하여 상대적으로 많지 않다. 현재까지의 관련 연구로는 2009년도에 캐나다 Saskatchewan 대학교의 Po Hu, Rajesh Karki 교수 및 Roy Billinton 교수팀이 Monte Carlo Simulation(MCS) 방법을 이용하여 단일 풍력발전단지에 ESS가 설치될 때 공급적정도 측면에서 신뢰도 평가를 수행한 연구[4, 5] 및 2010년도에 중국의 Z. Y. Gao 박사과 싱가포르의 Peng Wang 교수팀이 해석적론적 방법을 이용하여 신뢰도 평가를 수행한 연구[6], 그리고 2011년도에 브라질의 Carmen L. T. Borges 교수팀이 마이크로그리드에 ESS가 설치된 경우에 신뢰도 평가 연구[7] 등이 있을 뿐이다. 국내적으로는 최근 본 저자들에게 의한 풍력발전단지에 ESS가 설치된 경우에 대하여 공급신뢰도 평가의 기초연구를 수행한 것 등이 거의 유일하다[8].

본 논문에서는 출력변동성이 큰 풍력발전기가 증가함에 따라

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

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

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

\*\* KEPRI, KEPSCO

\*\*\* Dept. of Electrical Engineering, Daejin University, Korea

Received : September 9, 2015; Accepted : February 19, 2016

그 변동성을 감소하기 위한 에너지저장장치의 계통투입이 요구되고 있으며 이의 공급신뢰도 측면에서의 효과에 대한 기술개발이 중요시 되고 있는바 이러한 풍력발전기의 급속한 변동을 완화하여 공급신뢰도 측면에서 수요충족의 불안함을 해소하고자 다수의 풍력발전단지에서 에너지저장장치를 설치하여 기존의 전력계통에 연계할 경우 몬테카를로 모의 방법(MCS)을 이용한 전력계통의 신뢰도 평가 모형 및 방법을 보다 상세히 제안하며 공급신뢰도 측면에서 ESS의 가치를 의미하는 기여도 평가함수를 개발한다. 나아가 본 연구에서 개발한 ESS 기여도 평가함수를 제주도 계통 크기와 유사한 모델계통(이하 제주도 유사 모델계통이라 한다.)을 대상으로 적용하여 그 유용성을 살펴보았다. 참고로 본 연구에서는 기존 발전기는 그 사고율을 고려한 확률론적인 모형을 사용하고 풍력발전기는 풍속의 불확실성을 Weibull 분포로 모델링하여 처리하는 등 가능한 현실과 가까운 운전모형을 사용하였다 [9-11].

## 2. 몬테카를로 모의 방법(MCS)에 의한 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가

### 2.1 고장율과 복구율을 갖는 발전기의 가상적인 발전 운전계획 작성식 및 출력

#### 2.1.1 발전기의 가상운전역사 작성

기존의 화력발전기(CG: Conventional Generator)에 대하여 2개 상태 확률론적 운전 모형에 의한 사고율(FOR: Forced Outage Rate)을 산정하는 개념은 매우 오랜 역사성을 갖는다. 이를 부록에 간단히 보인다[12, 13]. 그러나 MCS를 이용하여 공급신뢰도를 평가하기 위해서는 식 (부3)에서 얻어진 FOR를 사용하여 식 (1) 및 식 (2)와 같이 난수(Random number)를 발생하고 2개 상태 운전모형의 FOR를 구성하는 두 개의 변수인 MTTF 및 MTTR을 다시 풀어헤쳐 긴 역사를 갖는 발전기들의 가상적 운전역사(Artificial operation history)를 재구성하여야 한다[12]. 이때 TTF 다음에는 TTR이 순차적으로 재구성되어야 한다.

$$TTF_{i,k} = -MTTF_i \ln U_k = -\frac{1}{\lambda_i} \ln U_k \quad (1)$$

$$TTR_{i,k} = -MTTR_i \ln U'_k = -\frac{1}{\mu_i} \ln U'_k \quad (2)$$

단,

$U_k, U'_k$  : #k 상태(시간대)일 경우 0~1사이의 값을 갖는 Two uniformly distributed random number

#### 2.1.2 기존 발전기의 총 발전량 정식화

그러므로 MCS를 위한 #k 상태(시간대) CG의 총 발전출력  $TG_k$ [MW]는 식 (3)처럼 계산된다.

$$TG_k = \sum_{i \in \Omega_{NG}} G_i \times ISK_{i,k} \quad (3)$$

$$ISK_{i,k} = \begin{cases} 1 & k \in \Omega_{TTF_i} \\ 0 & k \in \Omega_{TTR_i} \end{cases} \quad (4)$$

단,

$\Omega_{NG}$  : 기존 발전기의 집합

NG : 기존 발전기의 대수

$TG_k$  : #k 상태의 총 발전 용량 [MW]

$G_i$  : #i 발전기 용량 [MW]

$ISK_{i,k}$  : #k 상태의 #i 발전기 운전 가능 여부

$\Omega_{TTF_i}$  : #i 발전기의 TTF의 집합

$\Omega_{TTR_i}$  : #i 발전기의 TTR의 집합

## 2.2 풍력발전기(WTG)의 출력의 정식화

전 세계적으로 풍속은 정규확률분포에 가까운 Weibull 확률분포로 나타나는 것으로 조사되고 있다[8-11]. 실제로 우리나라 제주도의 경우도 1998년에서 2007도까지의 풍속의 분포를 조사한 결과 scale 변수( $\alpha$ )=3.42, shape 변수( $\beta$ )=1.85로 얻어졌다[13]. 따라서 본 연구에서는 풍력단지별로 풍속을 Weibull 확률분포로 가정하고 scale 변수 및 shape 변수인  $\alpha$ 와  $\beta$ 값들을 데이터베이스한다. 그리고 이에 대하여 MCS를 이용하여 장기간의 가상의 풍속역사를 작성하고 WTG의 출력특성곡선과 결합하여 #k상태에서의 각 풍력발전기의 출력을 계산하고 이들을 합하여 총 출력  $TW_k$ [MW]를 산정하도록 하였다. 이를 정식화하면 식 (5)와 같다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 풍력발전 출력산정방법을 보인다

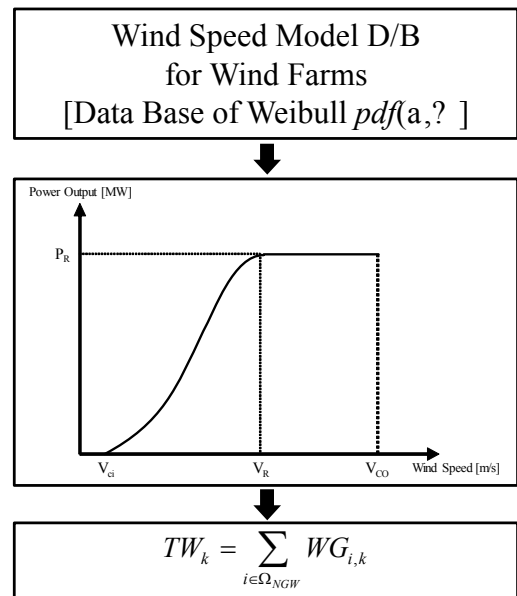


그림 1 MCS 방법을 위한 본 연구에서 제안된 풍력발전기의 총 출력산정모형

Fig 1 Total generation model of WTG proposed in this paper for MCS

것이다. 참고로 본 연구에서는 단지별로 하나의 등가풍력발전기 로 모델링하였다.

$$TW_k = \sum_{i \in \Omega_{NGW}} WG_{i,k} \quad [\text{MW}] \quad (5)$$

단,

$\Omega_{NGW}$  : 풍력발전기 집합

$NGW$  : 풍력발전기 대수

$WG_{i,k}$  : #k 상태에서의 #i 풍력발전기의 출력 [MW]

### 2.3 몬테카를로 모의 방법에 의한 신뢰도 지수 산정

MCS를 이용하기 위하여 CG와 WTG들의 사고율과 풍속의 불확실성을 고려하여 재작성한 가상운영으로부터 출력(공급)을 상태별로 모두 합한 것( $TCAP_k = TG_k + TW_k$ )과 주어진 부하( $PD_k$ )를 상태별로 결합하여 보이면 그림 2와 같다. 한편, 그 차이를 정식화 하면 식 (6)과 같다.

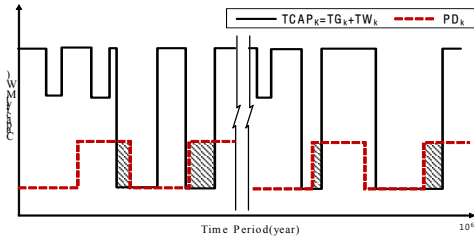


그림 2 상태별로 모든 CG와 WTG의 확률론적인 출력( $TG_k + TW_k$ )과 결합한 부하의 예

Fig 2 An example of load combined with CG and WTG probabilistic power ( $TG_k + TW_k$ ) for states

그림 2에서 부하보다 발전공급이 부족하여 겹치는 부분은 공급지장을 나타낸다. 그러므로 #k상태에서의 공급지장에너지( $ENS_k$ )는 식 (7)처럼 정식화되며 공급신뢰도 지수들 중 대표적 지수인 공급지장에너지( $EENS$ )및 공급지장시간기대치( $LOLE$ )는 각각 식 (8) 및 식 (9)처럼 얻어진다[12, 13].

$$SRP_k = TG_k + TW_k - PD_k \quad (6)$$

$$ENS_k = \begin{cases} SRP_k \Delta t & SRP_k < 0 \\ 0 & SRP_k \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$EENS = \sum_{k=1}^{NSS} ENS_k / NY \quad [\text{MWh/year}] \quad (8)$$

$$LOLE = \sum_{k \in \Omega} \Delta t / NY \quad [\text{hours/year}] \quad (9)$$

단,

$SRP_k$  : #k상태의 공급예비력 [MW]

(음수(-)이면 전력부족(공급지장)을 의미함)

$TG_k$  : #k상태의 기존 발전기 총 출력(=  $TG_{ck}$ ) [MW]

$TW_k$  : #k상태의 풍력 발전기 총 출력(=  $TG_{wk}$ ) [MW]

$\Delta t$  : 상태시간 [hours]

$NSS$  : 총 상태 수 혹은 시간대수 (=  $NY \times NS$ )

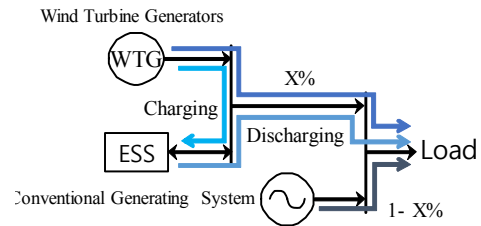
$NY$  : MCS(Monte Carlo Simulation)에서의 연도 수

$NS$  : 몬테카를로 모의를 위한 1년 동안의 상태 수

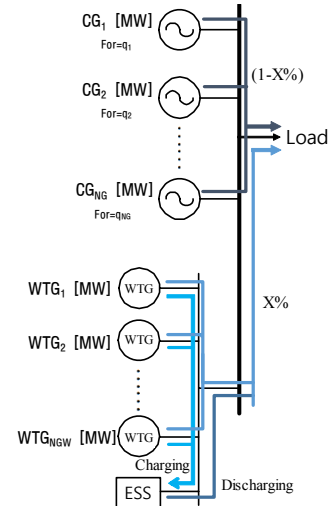
$\Omega$  : SRP가 음수인 상태들의 집합

### 3. 전력계통의 ESS를 고려한 신뢰도 평가

본 연구에서는 HLI(Hierarchical Level I)[4-13]를 대상으로 하되 풍력발전단지가 여러 군데 존재하고 ESS는 한군데 설치하며 적절한 제어방식을 도입하여서 ESS의 충방전을 수행하는 것으로 한다. 그림 3은 본 연구에서 사용한 모형과 기 개발된 모형을 비교하여 보인 것이다[4].



(a) 기 개발된 모형(Developed Model)



(b) 본 연구에서 제안하여 사용한 모형(Proposed Model)

그림 3 기 개발된 모형과 본 논문에서 사용한 모형

Fig 3 Comparison of Developed and Proposed Models of CG and WTG combined with ESS

이때, WTG 운전제약조건으로 임의의 상태(시간대)에서 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력 비율을  $X\%[pu]$ 라 하면 이는 각 상태 부하의 특정 비율로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 공급신뢰도를 최대화함에 목적을 두고 아래와 같은 세 가지 운전조건을 풍력발전기와 결합한 ESS의 충방전 운전원칙으로 정하였다[4-8].

**운전원칙 1** : 부하의 X%로 미리 한정된 량을 초과하는 과잉 풍력에너지는 에너지저장장치에 최대한 저장한다.

**운전원칙 2** : 기존발전기와 풍력발전기의 총 출력이 부하 공급에 충분치 않을 때는 에너지저장장치에 충전한 에너지를 보충으로 사용하여 공급지장이 가능한 한 발생하지 않도록 한다.

**운전원칙 3** : CG의 의무출력이 모자라서 ESS가 방전하고 있을 경우에는 풍속이 좋아서 WTG의 출력이 최대허용출력을 능가하여도 동일한 ESS에 충전할 수 없다.

### 3.1 ESS와 결합한 WTG(Wind Turbine Generator) 및 CG(Conventional Generator) 운전조건

부하에 직접 공급할 수 있는 풍력발전량 및 에너지 저장장치에 저장 가능한 풍력발전량을 각각 산정한다. 풍속의 Weibull 분포로부터 MCS를 이용하여 #k상태에서의 WTG의 총 출력량  $TG_{wk}$ [MW]을 구하고, 이 상태의 부하에 대한 WTG의 최대허용출력  $X\% \times L_k$ 과 비교하면 ESS에 충전할 수 있는 WTG의 잉여출력( $SG_{wk}$ )을 식 (10)처럼 얻는다. 역시 MCS를 이용하여 #k상태에서의 CG의 총 출력량  $TG_{ck}$ [MW]을 구하고 이 상태의 부하에 대한 CG의 출력의무량  $(1-X\%) \times L_k$ 과 비교하면 ESS에게 방전을 요청해야할 CG의 잉여의무량( $SG_{ck}$ )을 식 (11)처럼 얻을 수 있다. 이들은 각각 (+) 또는 (-)값 중 하나가 된다.

$$SG_{wk} = TG_{wk} - X\% \times L_k \quad (10)$$

$$SG_{ck} = TG_{ck} - (1-X\%) \times L_k \quad (11)$$

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]

$X\% \times L_k$  : #k상태에서의 풍력발전기의 부하대비 최대 허용출력 [MW]

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

$X\%$  : 풍력발전기의 부하대비 최대허용출력의 비율 [pu]

$L_k$  : #k상태에서의 부하 [MW]

이에 따른 전제조건으로는 전술한 바와 같이 WTG는  $X\% \times L_k$ 을 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 초과출력분이 존재하여도( $SG_{wk}$ 가 양수(+)) 그 초과분을 동일한 ESS에 충전할 수 없는 것으로 한다.

### 3.2 ESS 에너지상태방정식(Energy State Equation)

전술한 ESS 운전조건에서 ESS의 에너지상태방정식을 정식화하면 식 (12)와 같으며 충전상태(SOC)는 식 (13)과 같은 최대 및

최소에너지 제약을 만족해야하는 것으로 설정하였다. 그림 4는 ESS의 SOC의 변화를 시간대(상태)별로 예를 들어 보인 것이다.

$$ES_k = ES_{k-1} + EU_k \quad (12)$$

$$ES_{min} \leq ES_k \leq ES_{max} \quad (13)$$

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]

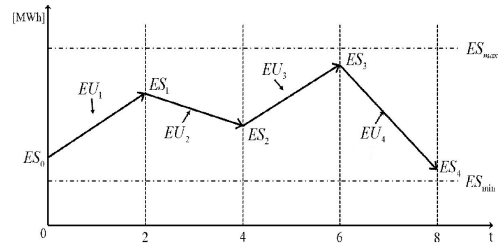


그림 4 ESS의 충/방전 시 에너지 상태 변화 예

Fig 4 Example of ESS charge/discharge state(SOC) transition

### 3.3 ESS 제어량(EUk) 산정

그러므로 ESS의 에너지상태(SOC)  $ES_k$ [MWh] 및 에너지 제어량  $EU_k$ [MWh]는 각각 식 (14) 및 식 (15)처럼 계산된다[4,5]. 한편, 실제  $EU_k$ 는 식 (16), 식 (17), 식 (18) 및 식 (19)와 같은 제약조건에 따라야 한다.

$$ES_{k+1} = \begin{cases} ES_k + SG_{wk} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ ES_k + SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ ES_k & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ ES_k + (SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$EU_k = \begin{cases} SG_{wk} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ 0 & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ (SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

#### 1) 충방전에너지 단위시간당 제어량 한계 제약

$$-EU_{max} \leq EU_k \leq EU_{max} \quad (16)$$

$$EU_{max} = [(ES_{max} - ES_{min}) / TM_{ESS}] \times \Delta t \quad (17)$$

단,

$TM_{ESS}$  : ESS의 전 충전(방전) 소요시간

#### 2) ESS 최대용량제약에 따른 충/방전 허용에너지 제약

$$ES_{min} \leq ES_k + EU_k \leq ES_{max} \quad (18)$$

$$ES_{\min} - ES_k \leq EU_k \leq ES_{\max} - ES_k \quad (19)$$

따라서 제약조건을 고려한  $EU_k$ 를  $EU_k^*$ 라 하면 이는 식 (15) 보다 작을 수 있으며  $EU_k^*$ 가 방전모드(-)이고 동시에 ESS의 의무방전에너지의 크기인 식 (20)처럼 정식화되는  $TG_{Dk}$ 보다 작으면 공급지장이 발생한다. 이러한 상태집합을  $\Omega_D^-$ 로 표기하였다.

$$TG_{Dk} = \begin{cases} 0 & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} \geq 0 \\ -SG_{ck} \times \Delta t & SG_{wk} \geq 0 \text{ and } SG_{ck} < 0 \\ 0 & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) \geq 0 \\ -(SG_{wk} + SG_{ck}) \times \Delta t & SG_{wk} < 0 \text{ and } (SG_{wk} + SG_{ck}) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

#### 4. 신뢰도 평가 및 ESS 신뢰도 가치 함수

본 논문에서는 공급신뢰도 지수를 산정하기 위하여 Monte Carlo Simulation(MCS)방법을 이용하였다. ESS를 고려한 전력계통에서 MCS를 이용한 대표적인 공급신뢰도 지수를 정식화하면 식 (21), 식 (22) 및 식 (23)과 같다. 참고로 EENS로부터 정의되는 EIR(Energy Index of Reliability)은 그 값이 클수록 신뢰도가 높음을 의미한다[4, 5].

$$LOLE = \frac{1}{NY} \sum_{k \in \Omega_D^-} \Delta t_k \quad [\text{Hours/year}] \quad (21)$$

$$EENS = \frac{1}{NY} \sum_{i \in \Omega_D^-} (TG_{Dk} + EU_k^*) \quad [\text{MWh/year}] \quad (22)$$

$$EIR = 1 - \frac{EENS}{TDE} \quad [\text{pu}] \quad (23)$$

단,

$\Omega_D^-$  : 방전모드 중 공급지장 상태(시간대)의 집합

$\Delta t_k$  : #k상태의 시간 [hours] ( $=\Delta t$ )

$EU_k^*$  : ESS 실제 가능 제어에너지량 (ESS Control Energy) ('+'이면 충전이며 '-'이면 방전을 의미함.)

$TG_{Dk}$  : 부하의 공급부족을 없애기 위한 꼭 필요한 의무방전 에너지 [MWh]

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

본 논문에서는 ESS의 공급신뢰도 가치를 표현할 수 있는 식 (24) 및 식 (25)를 새롭게 제안한다. 또한, ESS가 풍력발전단지에 설치될 경우 공급지장비 측면에서의 기여도를 의미하는 식 (26)을 제안한다. 식 (26)은 공급신뢰도 가치성인 공급지장비라는 경제적 측면에서 ESS의 가치를 평가하는 의미를 갖는다.

$$\Delta LOLE_{ESS,X\%} = LOLE_{WTG,X\%} - LOLE_{WTG+ESS,X\%} \quad (24)$$

$$\Delta EENS_{ESS,X\%} = EENS_{WTG,X\%} - EENS_{WTG+ESS,X\%} \quad (25)$$

$$EVU_{ESS,X\%} = \Delta EENS_{ESS,X\%} \times IEAR \quad (26)$$

단,

$LOLE_{WTG,X\%}$  : 풍력발전기만 있을 경우의 LOLE

$LOLE_{WTG+ESS,X\%}$  : 풍력발전기에 ESS가 설치되었을 경우의 LOLE

$EENS_{WTG,X\%}$  : 풍력발전기만 있을 경우의 EENS

$EENS_{WTG+ESS,X\%}$  : 풍력발전기에 ESS가 설치되었을 경우의 EENS

$IEAR$  : 공급지장비단가(Interrupted Energy Assessment Rate; [원/kWh])

본 연구에서 제안하는 방법의 전체적인 계산 흐름도를 보이면 그림 5와 같다.

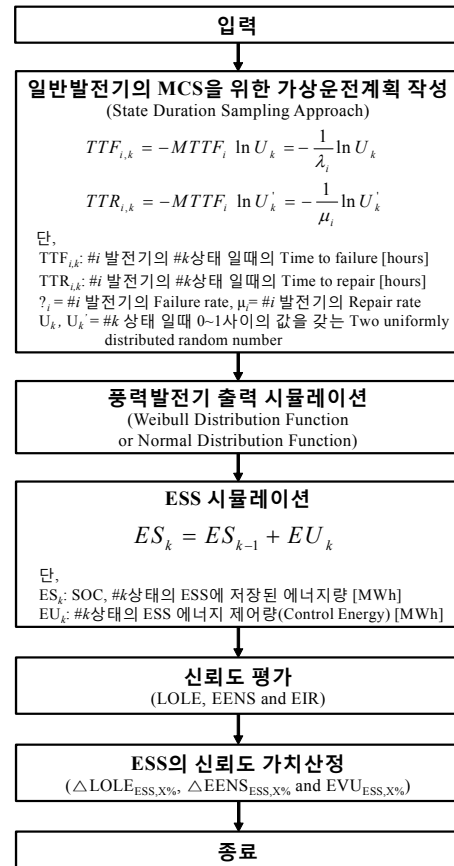


그림 5 신뢰도 평가 흐름도

Fig 5 Flow chart for ESS reliability contribution evaluation

## 5. 사례 연구

### 5.1 사례연구 모델계통

본 논문에서는 그림 6과 같은 제주도 전력계통과 유사한 모델 계통에 적절히 풍력발전단지와 에너지저장장치(ESS)를 포함시킨 모델계통을 상정하고 이를 대상으로 사례연구를 수행하였다[8].

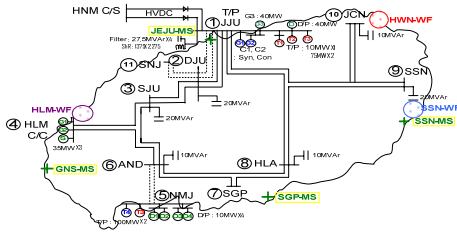


그림 6 사례연구의 모델계통도  
Fig 6 Model power system for case study

5.1.1 입력자료

표 1은 모델계통의 발전기 특성 데이터이다. 풍력발전기의 경우 제주도 계통의 풍력발전단지(성산, 한림, 행원)와 유사하게 3

표 1 사례연구 모델계통의 발전기 특성 데이터

Table 1 The generators data of case study power system

	Name	Type	Capacity [MW]	Num.	$\alpha$ [Gcal/MW <sup>3</sup> h]	$\beta$ [Gcal/MWh]	$\gamma$ [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
$\alpha$ (scale 변수)	3.42 m/s	3.42 m/s	3.42 m/s
$\beta$ (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
A[pu]	-0.375	-0.375	-0.375
B[m/sec] <sup>-1</sup>	0.0125	0.0125	0.0125
C[m/sec] <sup>-2</sup>	0.0125	0.0125	0.0125

개의 단지(HWN, SSN and HLM)로 나누었으며 표 2는 이들 풍력발전단지의 풍속 및 단지별로 하나로 등가화한 등가풍력발전기의 출력특성곡선 자료이다[9, 10].

여기서  $\alpha$  및  $\beta$ 는 풍속의 Weibull 확률분포함수에서 각각 스케일 변수(Scale parameter) 및 모양 변수(Shape parameter)이다. 그림 7은 사례연구 모델계통의 부하 변동 곡선(pattern)을 나타낸 것이며 그림 8은 제주도에서의 1998~2007년도의 평균 풍속 변동곡선을 참고로 보인 것이다. 한편, 본 연구에서 설치하여 사용하는 ESS 사양은 표 3과 같다고 가정하였다. 또한, 연 최대부하  $L_p=781$ [MW]로 하였다.

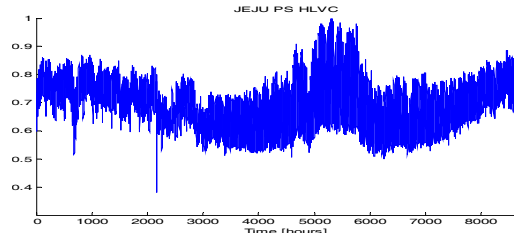


그림 7 사례연구 전력계통의 부하 변동 곡선  
Fig 7 The load variation curve (pattern) of power system

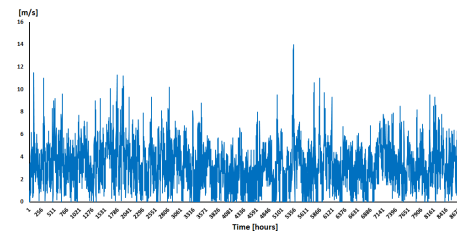


그림 8 사례연구 모델계통의 풍속 변동 곡선( $\alpha=3.42, \beta=1.85$ ) (1998~2007)  
Fig 8 The wind speed variation curve (pattern) of power system ( $\alpha=3.42, \beta=1.85$ ) (1998~2007)

표 3 ESS 사양

Table 3 ESS Specification

최대용량 (ES <sub>max</sub> ) [MWh]	최소용량 (ES <sub>min</sub> ) [MWh]	전 충/방전 소요시간 [hours]	X% [pu]	ESS의 초기용량 [MWh]
300	10	2	0.2	15

5.1.2 ESS설치여부에 대한 신뢰도 기본분석

먼저, ESS의 설치효과를 신뢰도측면에서 다양하게 살펴보기 위하여 그림 9와 같은 4개의 가상모델계통을 상정하였다. 여기서 System A는 WTG는 설치되어 있으나 ESS가 없는 모델계통이며, System B는 System A에서 풍력발전기를 제외한 모델계통을, System C는 System B에서 기존 발전기 100[MW]를 추가로 설치한 경우의 가상적인 모델계통이다. 마지막으로 System D는

System A에 ESS가 설치된 것으로 하였다. 표 4는 Systems A, B, C 그리고 D에 대한 LOLE, EENS 및 EIR의 신뢰도 지수 계산결과이다. 여기서 WTG가 설치된 System A는 설치되지 않는 System B 보다 공급정적도 측면에서의 신뢰도가 좋으며, ESS가 설치된 System D는 설치되어있지 않는 System A보다 공급신뢰도가 좋음을 알 수 있다. 참고로 공급신뢰도 측면에서는 CG=100[MW]가 설치된 System C가 제일 높은 신뢰도를 가짐을 알 수 있다.

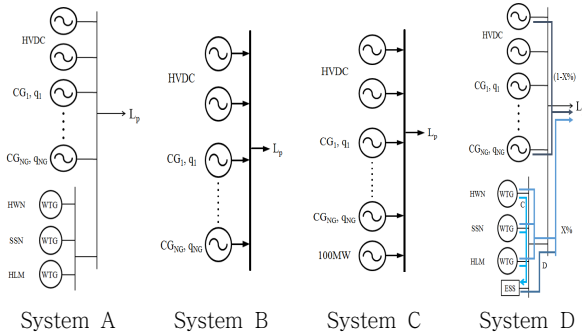


그림 9 사례연구를 위한 4개의 모델계통들  
 Fig 9 Four model systems for case study

표 4 모델계통별 신뢰도 지수

Table 4 Reliability evaluation result of model systems

	System A	System B	System C	System D
	ESS 없음 WTG 있음	ESS 없음 WTG 없음	ESS 없음 CG=100MW	ESS 있음 WTG 있음
Total Capacity [MW]	1145	845	945	1145
LOLE [Hours/year]	13.793	36.471	1.71	4.184
EENS [MWh/year]	417.5	1383.9	36.9	173.1
EIR	0.9999127	0.99971	0.999992	0.999964
Frequency of Outage	1200	3173	149	364

( $L_p=781$ [MW])

### 5.2 ESS의 신뢰도의 기여도 평가

본 연구에서 새롭게 제안하는 ESS의 신뢰도 기여도 평가함수인 식 (24) 및 식 (25)를 적용하기 위하여 ESS가 설치되지 않는 System A와 설치된 System D에 대하여 신뢰도를 평가하였다. 특히 여기서는 X%(등가풍력발전기의 부하대비 최대허용출력 비율) 및 ESS 최대용량( $ES_{max}$ ) 변화에 따른 신뢰도 지수의 변화를 살펴보고 이의 변동에 따른 신뢰도 기여정도의 변화모습도 살펴 보았다. 그림 10 및 그림 11은 풍력발전기의 부하대비

출력 비율을 의미하는 X[pu] 및 ESS의 용량의 변화에 따른 공급신뢰도 지수의 변동 모습을 각각 보인 것이다.

#### 5.2.1 X% 및 ESS용량을 변화에 따른 기본 분석

이들 그림에서 보다시피 ESS가 없고 풍력 발전기만 있을 경우(System A)에는 X%의 비율을 증가시키면 신뢰도가 좋아지다가 0.2[pu]에서 포화가 되고 있음을 알 수 있다. 이때, ESS를 설치하면 풍력발전원에서 발전하는 에너지를 ESS를 활용하여 부하로 보내기 때문에 신뢰도가 확연하게 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 X%의 비율을 증가시키면 신뢰도 지수가 급격하게 높아져서 신뢰도가 나빠지는 것을 알 수 있으며, X%=0.6[pu]일 경우에는 ESS가 설치되지 않은 경우인 System A와 신뢰도가 동일함으로서 ESS의 설치 의미가 전혀 없다고 사료된다. 그림 10 및 그림 11에서 ESS가 설치된 System D에서 X%=0.0[pu]일 때가 0.1[pu]일 때 보다 LOLE등의 신뢰도 지수가 높아져서 신뢰도가 나빠지고 있음은 전술한 운전원칙 3의 제약 때문에서 비롯된다고 사료된다. 따라서 설치되는 ESS의 용량이 클수록 X%=0.0[pu]일 때 신뢰도 지수는 0으로 수렴할 것으로 추측된다.

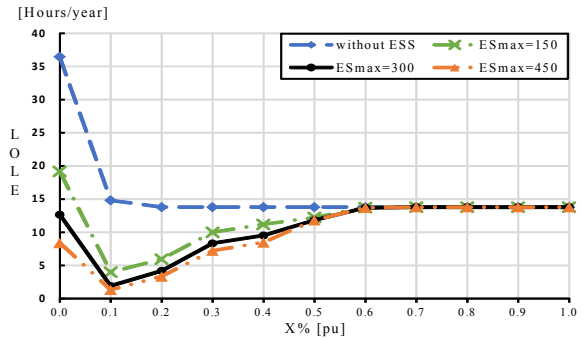


그림 10 X%를 변화시켰을 경우 ESS의 최대용량에 따른 LOLE의 변동  
 Fig 10 Variation of LOLE according to changing of X% and ESS Capacity

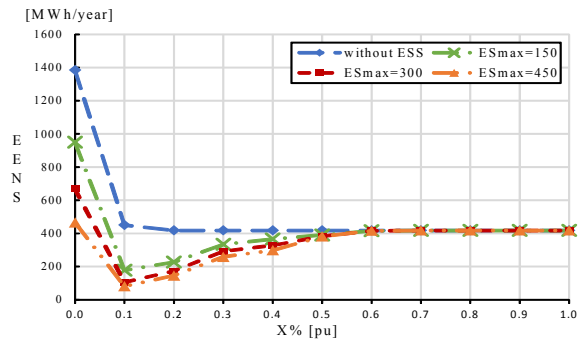


그림 11 X%를 변화시켰을 경우 ESS 최대용량에 따른 EENS의 변동  
 Fig 11 Variation of EENS according to changing of X% and ESS Capacity

### 5.2.2 X% 및 ESS용량을 변화에 따른 신뢰도 기여도 평가

그림 10 및 그림 11에서 각각의 지수를 기여도 평가식인 식 (24) 및 식 (25)에 대입하여 ESS의 신뢰도 가치 함수로 나타내면 그림 12 및 그림 13과 같았다. 가령,  $\Delta LOLE_{ESS,X\%}$  및  $\Delta EENS_{ESS,X\%}$ 는  $X\%=0.2[pu]$ 에서 각각 ESS의 LOLE 및 EENS 기여도를 의미한다. 특히, 그림 10 및 그림 11과는 달리 그림 12 및 그림 13의 신뢰도 기여도 가치함수(즉, 차이의 폭)가 단조함수로 보이는 주목할 만하다.

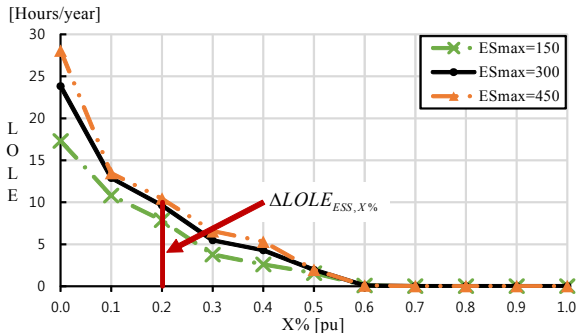


그림 12 X%를 변화시켰을 경우 ESS 최대용량에 따른  $\Delta LOLE_{ESS,X\%}$ 의 변동

Fig 12 Variation of  $\Delta LOLE_{ESS,X\%}$  according to changing of X% and ESS Capacity

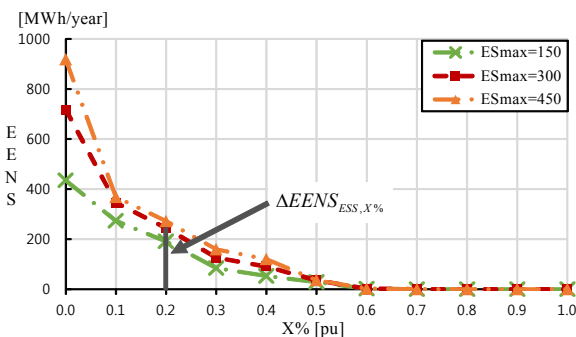


그림 13 X%를 변화시켰을 경우 ESS 최대용량에 따른  $\Delta EENS_{ESS,X\%}$ 의 변동

Fig 13 Change of  $\Delta EENS_{ESS,X\%}$  with the change of X% & ESS Capacity

## 5.3 System D에 대한 두 가지 감도 해석

### 5.3.1 충/방전 소요시간을 변화시켰을 경우

그림 14는 앞서의 충방전에너지 제어량 최대치 제약 중 충방전 속도 제약식을 의미하는 식 (17)에서 충/방전 소요시간( $TM_{ESS}$ )을 변화시켰을 경우이다.  $TM_{ESS}$ 에 변화에 대하여는 신뢰도가 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

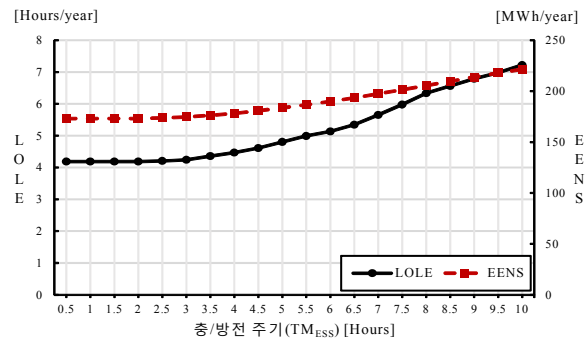


그림 14 충/방전 소요시간( $TM_{ESS}$ )의 변화와 신뢰도 변동

Fig 14 Variation of LOLE according to increasing of ESS cycle time( $TM_{ESS}$ )

### 5.3.2 ESS 최대용량( $ES_{max}$ )을 변화시켰을 경우

그림 15는  $X\%=0.2[pu]$ 로 설정한 System D(Case D1이라함)를 대상으로 ESS 최대용량을 증가하면서 얻은 신뢰도 변화를 보인 것으로 최대용량이 50~300[MWh]에서 신뢰도가 큰 폭으로 좋아짐을 알 수 있다. 또한 System D에서 ESS 최대용량이 1,100~1,150[MWh]일 때 풍력발전단지를 제외하고 일반 발전기를 추가하였을 경우인 System C와 동일한 신뢰도(그림 15에서 수평선)가 얻어짐을 알 수 있다.

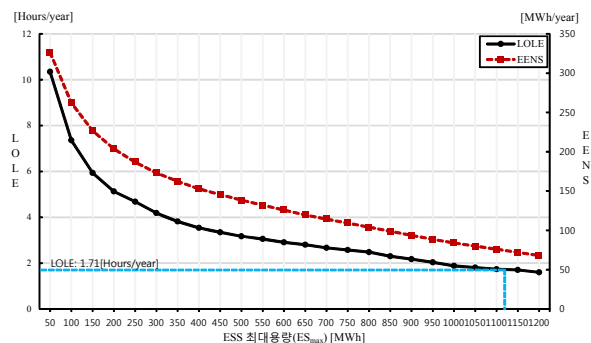


그림 15 ESS 최대용량을 증가하였을 경우의 신뢰도 변화

Fig 15 Reliability variation in case of increasing the maximum capacity of ESS

한편, 그림 16은  $X\%=0.1[pu]$ 로 변경한 System D(Case D2라고 함)에 대하여 ESS의 최대용량( $ES_{max}$ )을 변화시켰을 경우의 신뢰도 변동을 Case D1과 비교한 것이다. 전술한 바와 같이 Case D1에서는 WTG 및 ESS는 없고 일반발전기를 하나 추가하였을 경우인 System C와 동일한 신뢰도 효과를 얻기 위해서는  $ES_{max}$ 가 1,100~1,150[MWh]일 때였지만 Case D2에서는  $ES_{max}$ 가 300~350[MWh]일 때임을(그림 16에서 수평선) 알 수 있다. 따라서 Case D1( $X\%=0.2[pu]$ )보다 Case D2( $X\%=0.1[pu]$ )의 신뢰도가 더 양호함을 알 수 있다. 이는 풍력발전기의 부하에 대한 공급허용비율인 X%를 감소함에 따라 오히려 ESS의 설비이용이 적극



증가함에 따라 비뚤어진 것으로 사료된다.

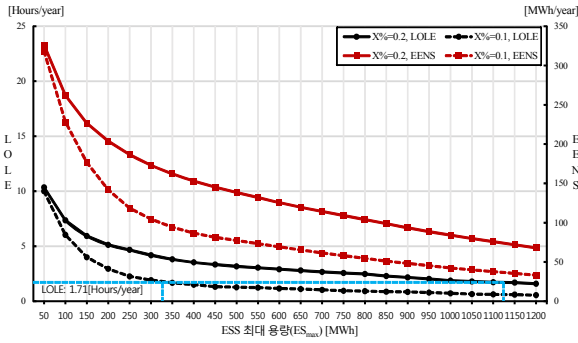


그림 16 Case D1(X% = 0.2)과 Case D2(X% = 0.1)의 ESS 최대용량( $ES_{max}$ ) 변화에 따른 신뢰도 변동 비교

Fig 16 Comparison between Case D1(X% = 0.2) and Case D2(X% = 0.1) of reliability variation according to changing ESS maximum capacity( $ES_{max}$ )

### 6. 결 론

본 논문은 출력변동성이 높은 풍력발전기와 같은 신재생에너지 발전원의 계통투입의 증가가 예상되는바 그 변동성을 완화시킬 수 있는 ESS를 풍력발전단지에 설치할 경우에 그 ESS가 공급신뢰도 측면에서 가져다 줄 효과를 예측할 수 있는 공급신뢰도 기여도 평가기술의 개발이다. 본 연구의 핵심을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 공급신뢰도측면에서 풍력발전단지에 설치한 ESS의 공급신뢰도 가치를 평가 할 수 있는 ESS 공급신뢰도 기여도 평가함수를 개발하고 이를 처음으로 제안하였다.

둘째로 신재생에너지 발전원의 변동성을 완화하여 공급신뢰도 측면에서 수요충족의 불안함을 해소하고자 다수(Multi)의 풍력발전단지에 에너지저장장치를 설치하여 기존의 전력계통에 연계할 경우 몬테카를로 모의 방법(MCS; Monte Carlo Simulation)을 이용한 전력계통의 신뢰도 평가 모형 및 방법을 보다 상세히 기술함으로써 국내외적으로 여전히 초기단계인 이 분야의 기술개발의 초석을 마련하였다.

셋째로 개발한 ESS 공급신뢰도 기여도 평가함수를 제주도 계통크기와 유사한 모델계통을 대상으로 적용하고 사례연구를 통하여 그 유용성을 제시하였다.

넷째로 기존의 화력발전기의 사고율을 고려한 확률론적인 모형을 사용하고 풍력발전기는 풍속의 불확실성을 Weibull 분포로 모델링한 뒤 MCS를 이용하여 WTG의 출력을 발생하는 방법을 사용하는 등 가능한 현실과 가까운 운전모형을 사용하도록 하였다.

다섯째로 출력의 변동성이 큰 신재생에너지 발전원의 변동성을 완화시킬 수 있는 배터리 에너지저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)와의 결합모형으로부터 공급신뢰도평가를 위한 흐름도를 제시하였으며 이를 정식화한 뒤 비주얼 포트란

으로 프로그래밍하여 제주도 계통규모의 모델계통에 대한 사례연구를 실시하고 감도해석의 결과를 통하여 구체적으로 제안한 방법의 실효성을 검토하였다.

이번 연구에서 개발한 모형 및 방법은 그동안 출력의 변동성이 매우 커서 신재생에너지 발전원의 계통투입에 따른 불안감 및 제한을 갖고 있는 현 실정을 크게 완화시켜주는 기술개발의 토대가 되리라 기대되며 특히 2015년 12월 12일 파리 신기후협약체제에 따라 세계적으로 신재생에너지 발전원이 더욱 급격히 계통에 투입될 것으로 예상되는바 이에 대한 다각적인 연구의 출발점이 될 것으로 사료된다. 한편, ESS에 따른 공급지장비의 감소평가와 같은 경제성 평가는 차후 과제로 남긴다.

### 감사의 글

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

### 부록 1. 기존의 화력발전기의 확률론적 운전 모형

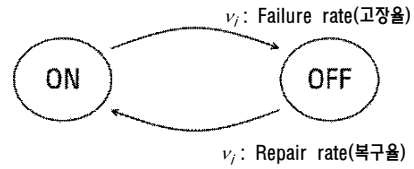


그림 부1 2개 상태(Two-state) 모델

Fig A1 Two-state model

본 논문에서는 그림 부1과 같이 발전기의 확률론적 운전모형을 운전(On) 및 정지(Off)상태인 2개 상태(Two-state) 모델로 가정하였다[12]. 또한 그림 부2는 임의의 발전기의 실제 2개 상태 모형으로 본 운전 역사이다. 이로부터 식 (부1)과 식 (부2)처럼 평균한 값을 각각 MTTF(Mean Time To Failure) 및 MTTR (Mean Time To Repair)이라 한다. 그림 부3은 이를 보인 것이다[12, 13].

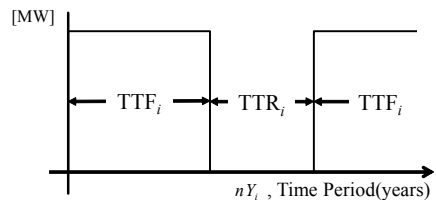


그림 부2 #i 발전기의 2개 상태 운전 역사

Fig A2 Up-down-up cycle history of #i generator with two states

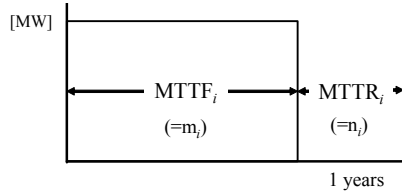


그림 부3 #i 발전기의 2개 상태 평균 운전 모델링  
**Fig A3** Mean modeling of up-down-up cycle of #i generator with two states

$$MTTF_i = \sum_{k=1}^{nY_i} TTF_{i,k} / nY_i \quad (\text{부1})$$

$$MTTR_i = \sum_{k=1}^{nY_i} TTR_{i,k} / nY_i \quad (\text{부2})$$

- 단,  
 MTTFi : #i 발전기의 Mean time to failure [hours]  
 MTTRi : #i 발전기의 Mean time to repair [hours]  
 TTF<sub>i,k</sub> : #i 발전기의 #k상태의 Time to failure [hours]  
 TTR<sub>i,k</sub> : #i 발전기의 #k상태의 Time to repair [hours]  
 nY<sub>i</sub> : #i 발전기의 실제운전년도 수 [years]

그러므로 정지상태(OFF)에 머물 확률을 의미하는 #i 발전기의 사고율(FOR)은 식 (부3)과 같이 정식화 된다. 앞서의 그림 부2에서 nY는 통상 몇 년 되지 않는다. 실제로 이를 이용하여 사고율(FOR)을 데이터베이스(D/B)하여 사용한다[13].

$$FOR_i = \frac{n_i}{m_i + n_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \quad (\text{부3})$$

- 여기서,  
 $m_i = MTTF_i = \sum_{k=1}^{nY_i} TTF_{i,k} / nY_i$   
 $n_i = MTTR_i = \sum_{k=1}^{nY_i} TTR_{i,k} / nY_i$   
 $\lambda_i = \frac{1}{MTTF_i} = \frac{1}{m_i}$   
 $\mu_i = \frac{1}{MTTR_i} = \frac{1}{n_i}$   
 $\lambda_i$  : #i 발전기의 고장율 (Failure rate)  
 $\mu_i$  : #i 발전기의 복구율 (Repair rate)

**References**

[1] Tina Comes and Bartel Van de Walle, “Measuring Disaster Resiliency: The Impact of Hurricane Sandy on Critical Infrastructure Systems”, Proceedings of the 11th International ISCRAM Conference- University Park, Pennsylvania, USA, May 2014.

[2] Sayonsom Chanda, “Quantification of Power Distribution System Resiliency against Weather-Based Outages or Targeted Attacks”, IEEE PES GM1015, Denver, USA, July 2015.  
 [3] Jaeseok Choi, “A Basic Study on Resiliency Evaluation Method for Future National Grid”, KERI Report, 2015.  
 [4] 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.  
 [5] P. Hu, “Thesis: Reliability Evaluation of Electric Power Systems Including Wind Power and Energy Storage”, University of Saskatchewan, Oct. 2009.  
 [6] 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.  
 [7] 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.  
 [8] 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.  
 [9] 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.  
 [10] 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.  
 [11] 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.  
 [12] Roy Billinton and Wenyan Li, “Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods”, Plenum Press, 1994.  
 [13] Jaeseok Choi, “Power System Reliability Evaluation Engineering”, G&U Press, 2013, (written by Korean, ISBN 978-89-6257-060-1).

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



**윤 용 범 (Yongbeum Yoon)**

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 차세대 송변전 연구소장.

E-mail : yunybon@kepco.co.kr  
ORCID ID : 0000-0002-3287-9342



**장 병 훈 (Byunghoon Chang)**

1964년 3월 21일생. 1989년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원전기 공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 ESS 연구사업단 책임연구원.

Tel : 042-865-5820  
E-mail : jang7@kepco.co.kr  
ORCID ID : 0000-0003-0687-0624



**차 준 민 (Jun-Min Cha)**

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 대전대 전기공학과 교수.

Tel : 031-539-1915  
Fax : 031-539-1910  
E-mail : chamin@daejin.ac.kr  
ORCID ID : 0000-0002-8000-7194