풍력발전기를 고려한 복합전력계통의 웹기반 온라인 실시간 신뢰도 정보 시스템의 개발

논 문

60-7-3

Web based Online Real-time Reliability Integrated Information System in Composite Power System Considering Wind Turbine Generators

조 경 희* · 최 재 석†

(Kyeonghee Cho · Jaeseok Choi)

Abstract - Web based online real-time reliability integrated information system is asked rapidly for more efficiency and demand response in recent. As the utilization of renewable resources has been receiving considerable attention in recent years, the information system requirement is increased. Specially, the reliability information system is more important for implementing the smart grid. This paper describes architecture of the WORRIS(Web based Online Real-time Reliability Integrated Information System) Version 7.0 system that simulates the reliability indices in composite power system considering wind turbine generators(WTG) developed successfully in this paper. And we had simulated the case study using Jeju island power system data.

Key Words : Web based online real-time reliability integrated information system, Smart grid, Renewable energy, Probabilistic reliability, Wind turbine generators, Composite power system, Multi state

1. 서 론

2011년 3월에 발생한 일본 동북부 대지진에 의한 원전붕괴와 같은 범지구적 피해가 발생함에 따라 세계적으로 친환경에너지원을 이용한 신재생발전기들의 건설이 더욱 급박하게 대두되고 있다. 우리나라도 제 3차 국가에너지기본계획(2008년~2030년)에서 2030년까지 신재생에너지 보급 비중을 5배로, 보급량을 6배 이상으로 증가시켜서 해외주요국의 신재생에너지 보급수준으로 확대하겠다는 장기적 계획을 가지고 있다. 특히, 풍력발전기는 신재생에너지발전원 중에서도 그 경제성의 경쟁력이 기존발전기와 비교하여 볼 때 과거보다 많이 좋아져서 가장 널리 상용화 되고 있으며 빠르게 성장해가고 있다. 그러나 자원에 해당하는 풍속의 불확실성이 매우 커서 풍속을 예측하는 연구가 이미 오래전부터 수행되어 왔음에도 불구하고 풍속을 정확하게 예측하기란 거의 불가능하며 따라서 확실한 발전계획을 세우기도 쉽지가 않다. 다행히 풍력발전원의 급격한 증가추세에 힘입어 최근에 다양한 통계적인 확률기법을 이용하여 장단기별로, 그 예측방법이 조금씩 다르지만 추정통계학적 및 확률론적인 분석방법을 기초로 한 수학적인 모형을 사용하여 적극적으로 개발되고 있어 풍속예측오차가 많이 감소되고 있음은 참으로 다행한 일이다. 그러나 기존의 2개상태 내지 3개상태 정도만으로 모형화한 기존의 발전기와는 달리 자원공급의 불확실성이 큰 풍력발전원의 운전상태를 확률모형을 이용하여 모

델링하면 그 운전상태는 풍력발전기의 정격용량에 따라 다소 다르지만 발전량예측의 수렴하는 허용오차범위내에서 5-10개 정도의 다개상태로 모델링된다[1]. 그러므로 풍력발전기를 포함한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 지수를 구하는 방법은 상대적으로 다소 복잡하다[2],[3]. 특히, 풍력발전기를 고려한 수년 또는 연간 정도의 장기발전계획 그리고 월간 및 주간단위의 중기발전운영계획을 위한 신뢰도기법은 많은 연구가 진행되어 이제 세계적으로 실용화되어가고 있으나 일간의 단기발전계획 및 실시간운영용 신뢰도정보시스템은 여전히 그 연구가 세계적으로 매우 초보적인 단계이다[4-6].

본 연구에서는 자원의 공급이 불확실한 풍력발전원을 고려한 전력계통의 전력공급의 신뢰도정보를 웹기반 온라인으로 모니터상에서 정보제공을 구현함으로써 이를 계통운영자가 쉽게 분석하여 계통을 운용함에 도움을 줄 수 있도록 한 소위, 웹기반 온라인 실시간 전력공급 신뢰도 종합정보시스템(WORRIS: Web based Online Real-time Reliability Integrated Information System)을 개발하는데 성공하였다[5-7]. 이는 기존의 발전기 및 근래 급격히 증가하는 풍력발전기를 포함한 발전계통, 송전선로 및 부하자료 그리고 풍속자료 등이 관련한 계통운영회사 및 민간기상청 등 관련기관의 서버시스템의 D/B로부터 자동으로 입력되어 사용자가 보다 용이하게 신뢰도 지수들을 스마트폰 등을 통한 웹상에서 그 정보를 실시간으로 살펴보고 분석할 수 있도록 구현한 차세대 전력공급 신뢰도 종합정보시스템이라고 할 수 있다[7]. 나아가 본 연구에서는 각 연계선로의 사고율을 고려할 수 있으며 연계하고자하는 계통에서 송전계통의 불확실성도 고려할 수 있도록 하였다. 이번에 개발한 웹기반온라인신뢰도 정보시스템의 편리성, 유효성 및 실용성을 살펴보기 위하여 실제 계통과 유사한 제주도모의계통의 사례연구

* 준 회원 : 경상대 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 경상대 전기공학과 정교수 · 공박

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

접수일자 : 2011년 5월 9일

최종완료 : 2011년 6월 14일

를 실시하였다. 다만, 이번에는 직접 관련기관의 서버와의 연결은 실현상 불가능하므로 본 연구실의 서버에 과거의 관련 자료를 D/B화하고 사례연구를 실시하였다.

2. 풍력발전기의 다개상태 출력모델

2.1 풍력발전기의 출력모델

풍력발전원의 출력은 풍속에 크게 의존한다. 전형적으로 풍력발전원의 실제 출력은 어느 이상의 풍속에서 출력을 내기 시작하여 정규풍속에 도달하면 그때부터 정격출력을 발생하며, 또한 어느 이상의 풍속에서는 자체기기보호를 위하여 전력을 발생하지 않는다. 그림 1은 이의 특성곡선을 보인 것이며, 출력은 식 (1)처럼 산정된다.[2-3]

그림 1 풍력발전기의 전형적인 출력특성곡선

Fig. 1 A typical power output model of wind turbine generators(WTG)

$$P_i = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_i \leq V_{ci} \\ P_R(A + B \times V_i + C \times V_i^2), & V_{ci} \leq V_i \leq V_R \\ P_R, & V_R \leq V_i \leq V_{co} \\ 0, & V_{co} \leq V_i \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

P_i : 풍속 i 의 대표 풍속 V_i 에 해당하는 풍력발전원의 출력[kW]

V_{ci} : 출력시작점 풍속(The cut-in speed) [m/sec]

V_R : 정격출력 풍속(The rated speed) [m/sec]

V_{co} : 출력종단점 풍속(The cut-out speed) [m/sec]

P_R : 정격출력 [kW]

2.2 풍속모델

실제 풍속의 확률분포는 정규확률분포에 가까운 Weibull 확률분포로 나타나는 것으로 알려져 있으며 그 모형은 이미 개발되어져 있다. 본 논문에서는 공통풍속모델(Common wind speed model)을 사용하기로 한다. 이는 실용적이며 합리적이라고 이미 알려져 있다. 그림 2는 공통풍속모형의 확률밀도함수이다. 풍속의 평균 μ 와 표준편차 σ 를 갖는 정규확률분포로 가정하였다. 여기서 빗금으로 나타낸 음의 부분

은 측정하는 지점의 기준한 방향의 풍속의 반대방향을 의미한다.

그림 2 풍속모델의 확률분포함수

Fig. 2 The common wind speed model

2.3 풍력발전기의 다개상태 출력모델

그림 3은 풍력발전기의 전형적인 출력특성곡선과 풍속모델의 확률분포함수를 결합하여 그림 4와 같은 풍력발전기의 출력에 따른 확률의 선형그래프를 그릴 수 있다.

그림 3 풍력발전기의 출력특성곡선과 풍속모델의 결합모습

Fig. 3 Components of a model describing the power output states of a WTG and the corresponding probabilities

여기서,

P_M : 풍속 M [m/sec]에 대한 풍력발전기의 출력

PB_M : 풍속 M [m/sec]에 대한 풍속 모델의 확률

μ : 풍속의 평균 [m/sec]

σ : 풍속의 표준편차 [m/sec]

그림 4 풍력발전기 출력과 확률의 선형그래프

Fig. 4 Linear graph of power and probability of WTG

그림 4에서 보이는 것처럼 출력에 따른 확률을 얻을 수 있으며 이를 그림 5 및 식 (2~3)과 같이 선형보간법을 이용하여 동일 출력간격으로 재작성 한다.

그림 5 풍력발전기의 출력에 따른 확률을 등간격으로 조정하기 위한 선형 보간법의 도식화

Fig. 5 Graph using linear interpolation according to Fig. 4 for same interval

$$PB_k = \left(\frac{P_{k+1} - P_i}{\Delta P} \right) \times PB_i \quad (2)$$

$$PB_{k+1} = \left(\frac{P_i - P_k}{\Delta P} \right) \times PB_i \quad (3)$$

그림 6은 이와 같이 하여 얻어진 전형적인 풍력발전기의 다개상태 확률분포함수를 보인 것이고 식 (4)를 만족한다. 여기서 NS를 풍력발전기의 운전상태의 수라고 하면 정격출력 P_R 은 P_{NS-1} 이다.

그림 6 등간격으로 조정한 전형적인 풍력발전기 출력의 다개상태 확률분포 함수

Fig. 6 The typical multi states probability distribution function of WTG output using Fig. 5

$$\Delta P = P_i - P_{i-1} = P_{i+1} - P_i \quad (\text{단, } i = 1, 2, \dots, NS-2) \quad (4)$$

그림 6과 같은 풍력발전기의 다개상태 모델을 가용용량 확률분포함수라 한다. 이를 이용하여 풍력발전기의 사고용

량 확률분포함수(f_{osi})를 얻을 수 있으며 그림 7의 유효부하 지속곡선(Φ_i)을 구하는 식 (5)에 의해 신뢰도 평가를 할 수 있다.

그림 7 전형적인 유효부하지속곡선

Fig. 7 A typical Effective load duration curve

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \Phi_{i-1} \otimes f_{osi} \\ &= (1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij}) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$\otimes$: 상승적분을 의미하는 연산자

Φ_0 : 원래의 부하지속곡선(LDC)

Φ_{i-1} : #1에서 #i-1 발전기까지 고려한 유효부하지속곡선

f_{osi} : #i 발전기의 사고용량확률분포 함수

NS : 발전기의 상태의 수

C_{ij} : #i 발전기의 #j 상태의 사고용량 [MW]

q_{ij} : #i 발전기의 #j 상태의 사고확률

3. 풍력발전기를 포함하는 전력계통의 신뢰도 평가모델

3.1 발전계통에서의 확률론적 신뢰도 평가

그림 7에서처럼 얻어진 유효부하확률분포함수($\Phi_{NG}(x)$)를 이용하여 발전계통에서의 신뢰도 지수들인 $LOLE_{HLI}$ (Loss of Load Expectation) 및 $EENS_{HLI}$ (Expected Energy Not Served)는 식 (6) 및 (7)처럼 각각 정식화 된다. 그리고 상대적 신뢰도 지수인 EIR(Energy Index of Reliability)을 식 (8)처럼 구할 수 있다.

$$LOLE_{HLI} = HLI \Phi(x)|_{x=IC} \quad [\text{hours/yr}] \quad (6)$$

$$EENS_{HLI} = \int_{IC}^{IC+L_p} HLI \Phi(x) dx \quad [\text{MWh/yr}] \quad (7)$$

$$EIR = 1 - EENS/DENG \quad [\text{PU}] \quad (8)$$

여기서,

L_p : 최대부하량 [MW]

IC : 총설비용량 [MW]

C_i : #i 발전기의 용량 [MW]

$DENG$: 총수요에너지 [MW]

3.2 복합전력계통에서의 확률론적 신뢰도 평가

송전계통까지 고려한 복합계통의 신뢰도 평가방법으로는 크게 상태누적법(enumeration methods) 및 몬테카를로법(Monte Carlo methods)로 나누어진다. 본 논문에서는 상태누적법을 사용하되 송전계통을 포함한 신뢰도평가를 위하여 이미 저자들이 기개발한 복합계통의 유효부하지속곡선모형을 풍력발전기까지 확장한 모형을 이용하기로 한다[5],[8]. 신재생에너지를 고려하고 송전계통까지 감안한 복합전력계통의 신뢰도 평가 시스템을 위해 개발된 신뢰도 평가 기법은 아래와 같다. 그러므로 풍력발전기를 고려한 발전계통의 사고율 그리고 송전선로의 용량, 사고율 및 topology를 고려한 계통전체의 신뢰도지수뿐만 아니라 부하지점별 혹은 각 영역별로 다양하게 정보를 산정할 수 있다.

3.2.1 풍력발전기를 고려한 HLII에서의 유효부하모델

그림 8은 기존의 2개 상태 발전기, 다개 상태를 갖는 풍력발전기 및 송전선로까지 감안한 복합전력계통의 각 부하지점별 유효부하지속곡선을 작성하는 방법을 그림으로 보인 것이다. 본 연구에서는 이를 이용하여 연계계통의 신뢰도지수를 산정하기로 하였다. 그러므로 여기서의 각 부하지점은 연계할 계통을 의미하게 된다[7-8].

(a) 풍력발전기를 포함한 실제 계통의 모델
(a) Actual system model

(b) 풍력발전기를 고려한 계통의 가상 등가 발전기
(b) Synthesized fictitious equivalent generator

(c) 유효부하모델로 등가화 된 계통
(c) Equivalent system

그림 8 풍력발전기를 고려한 HLII에서의 복합 전력계통의 유효부하모델

Fig. 8 Composite power system effective load model at HLII

이러한 유효부하모델을 이용하여 발전기 #1부터 #번째 발전기까지 투입된 후의 k 부하지점에서의 유효부하지속 곡선의 확률분포함수 ${}_k\Phi_i(x_e)$ 를 다음과 같은 식(9)로 정의될 수 있다.

$${}_k\Phi_i(x_e) = {}_k\Phi_o(x_e) \otimes {}_kf_{osi}(x_{oi}) \quad (9)$$

$$= \int {}_k\Phi_o(x_e - x_{oi}) {}_kf_{osi}(x_{oi}) dx_{oi}$$

여기서,

$\otimes$: 상승적분을 나타내는 연산자

${}_k\Phi_o$: k 부하지점에서의 부하변동곡선

${}_kf_{osi}(x_{oi})$: k 부하지점에 발전기 1부터 i 까지 발생된 가상발전기의 출력용량확률분포함수

3.2.2 부하지점별 확률론적 신뢰도 지수

송전계통까지 감안한 소위 HLII에서의 신뢰도 지수는 계통전체 및 각 모선별 신뢰도 지수들을 산출할 수 있어야 한다. 먼저 k 부하지점에서의 모선별 신뢰도 지수를 다음과 같이 유효부하지속 곡선을 이용하여 식(10)~(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$LOLE_k = {}_k\Phi_{NG}(x)|_{x=AP_k} \quad [\text{hours/yr}] \quad (10)$$

$$EENS_k = \int_{AP_k}^{AP_k + L_R} {}_k\Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/yr}] \quad (11)$$

여기서,

L_{pk} : 부하지점 k 에서의 최대부하치 [MW]

AP_k : 부하지점 k 에서의 최고도달전력 [MW]

3.2.3 전체계통의 확률론적 신뢰도 평가

송전계통을 감안한 전체전력계통의 신뢰도 지수 중 $EENS_{HLII}$ 는 각 부하지점별 $EENS_k$ 를 합하여 구할 수 있다. 신뢰도 지수 $LOLE_{HLII}$ 는 새로운 신뢰도 지수 ELC_k 를 정의하고, 이를 각 모선별로 더하여 구한 ELC_{HLII} 로 $EENS_{HLII}$ 를 나누어서 구할 수 있다. 이를 식(12~15)로 나타내었다. 그림 7에서는 전체계통의 확률론적 신뢰도 평가 방안을 간단히 요약하였다.

$$EENS_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} EENS_k \quad [\text{MWh/yr}] \quad (12)$$

$$ELC_{HLII} = \sum_{k=1}^{NL} ELC_k \quad [\text{MW/cur.yr}] \quad (13)$$

$$LOLE_{HLII} = EENS_{HLII} / ELC_{HLII} \quad [\text{hours/yr}] \quad (14)$$

$$EIR_k = 1 - EENS_k / DENG_k \quad [\text{PU}] \quad (15)$$

여기서,

NL : 부하지점의 수

$ELC_k = EENS_k / LOLE_k$

$DENG_k$: 부하지점 k 의 수요에너지

그림 9 제안된 방법의 순서도

Fig. 9 Flow chart of proposed method

3.3 결정론적 신뢰도 평가

자원공급의 불확실성이 매우 큰 풍력발전기를 고려한 전력계통의 예비율 평가는 기존의 발전기의 사고가 0이라고 가정한 결정론적인 예비율의 정의는 그 가용율을 100%라고 가정하고 있으므로 오차가 너무 커서 더 이상 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 풍력발전기의 가용율을 고려한 새로운 실질적인 유효예비율에 토대한 정의식을 제안한다. 본 연구에서는 이러한 유효예비율을 해당연구기간의 정도에 따라 유효설비예비율($EIRR$: Effective Install Reserve Rate), 유효공급예비율($ESRR$: Effective Supply Reserve

Rate), 유효운용예비율($EORR$: Effective Operating Reserve Rate)을 식 (16~18)과 같이 새로이 정의하였다. 또한, 이를 구하기 위한 부가적인 식을 (19)~(22)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$EIRR = \frac{ETIC_y - L_{Py}}{L_{Py}} \times 100 [\%] \quad (16)$$

$$ESRR = \frac{ESC_d - L_{Pl}}{L_{Pl}} \times 100 [\%] \quad (17)$$

$$EORR = \frac{EOP(t) - L_{Pt}}{L_{Pt}} \times 100 [\%] \quad (18)$$

$$ETIC_y = \sum_{i \in \rho 1} CG_i + \sum_{k \in \rho 2} WTG_k \times AVR_{ky} \quad (19)$$

$$ESC_d = \sum_{i \in \rho 1, MS} CG_i + \sum_{k \in \rho 2, MS} WTG_k \times AVR_{kd} \quad (20)$$

$$EOP(t) = \sum_{i \in \xi 1} CG_i(t) + \sum_{k \in \xi 2} WTG_k(t) \times AVR_k(t) \quad (21)$$

$$AVR_k = 1 - EFOR_k \quad (22)$$

여기서,

$ETIC_y$: 연간 유효 설비용량 [MW]

ESC_d : 일별 유효 공급용량 [MW]

$EOP(t)$: 시간별 유효 운용용량 [MW]

L_{Py} : 연간 최대부하 [MW]

L_{Pl} : 일별 최대부하 [MW]

L_{Pt} : 시간별 최대부하 [MW]

CG_i : #i 발전기의 용량 [MW]

WTG_k : #k 풍력발전기의 용량 [MW]

$EFOR_k$: #k 발전기의 유효고장확률

단, $EIRR$ 은 연도별 신뢰도 지수를, $ESRR$ 은 일별 신뢰도 지수를 그리고 $EORR$ 은 시간당 신뢰도 지수의 평가지표로 이용하였다. 그 이유는 $ESRR$ 은 발전기 보수유지계획 일수를 고려한 공급 가능한 출력의 유효예비율을 나타내기 때문이며 $EORR$ 은 기동정지계획까지 포함한 운용가능 출력의 유효예비율을 의미하기 때문이다. 여기서, AVR_k 는 식(2)에서 2개상태로 증가하였을 경우(즉, $\Delta P=PR$) k 번째 풍력발전기의 유효가용율이며 따라서 $EFOR_k$ 는 2개상태로 증가하였을 경우의 유효사고율이다. 한편, $ETIC$, ESC 및 EOP 는 각각 불확실성이 큰 풍력 발전원의 출력기대치를 고려한 유효총설비력, 유효공급력 및 유효운용출력을 의미한다.

4. WORRIS의 전체적인 개요

본 연구에서는 전술한 바와 같이 스마트그리드 및 마이크로그리드와 같은 곧 다가올 미래형전력계통망에 대비하여, 이미 개발한 초보적인 웹기반 온라인 실시간 신뢰도 정보시스템(Web Based Online Real-time Reliability Integrated Information System: WORRIS) V1.0을 보다 실제통용에 적합하도록 주요 송전선로 혹은 연계선로를 고려하는 등 더욱 수정 보완하여 V7.0을 개발하였다. 특히, WORRIS V7.0은 우리나라 제주도스마트그리드 실증단지 적용 및 전력계통 발전사업자들이 발전기들을 신뢰도 평가하고 이를 웹상으로

소비자들에게 정보를 제공하고 소비자들의 수요반응을 직접 얻을 수 있도록 함에 그 궁극적인 연구목표의 초점을 맞추고 있다. 그림 10은 이를 보인 것이다. 본 연구에서 개발한 WORRIS V7.0의 전체적인 구성 및 개념도를 그림 11에 보인다.[5-7]

WORRIS에서 송전계통까지 감안하여 개발한 신뢰도 평가 시스템 CmRelWin V7.0은 <http://worris.gsnu.ac.kr> 사이트에서 CmRelWin V7을 클릭하거나 http://worris.gsnu.ac.kr/CmRel_v7/에 바로 접속하여 이용할 수 있다.

그림 10 WORRIS의 궁극적인 목적 다이어그램
Fig. 10 Eventual purpose diagram of WORRIS of power system and demand response

그림 11 WORRIS V7.0의 전체적인 외형
Fig. 11 A flow chart describing the proposed method

그러나 본 연구에서는 물리적인 한계로 실계통하에서 실질적인 자료와 연계하여 사례연구를 실시하기가 불가능하므로 PSS/E, EMS 자료 및 SCADA System에서 들어오는 자료는 미리 서버에 구축되어 있다고 가정하였다. 차후 이는 실 계통 적용 시 WAN을 통하여 이루어 질 것으로 기대된다.

5. 사례연구

5.1 사례연구를 위한 입력자료

WORRIS의 실용성을 검증하기 위해서 그림 12와 같이 제주도계통을 2010년도 제주도 스마트그리드 실증단지(영역 2)와 그 외 제주도 계통(영역1)등 2개 영역으로 나누고 제주계통전체 및 영역별 신뢰도지수의 정보를 제공함을 목적으로 하고 시스템의 입력자료를 구성하여보았다. 모델계통의 총 발전용량은 945MW이고 최대부하는 555MW로 가정하였다.

그림 12 두 개의 영역으로 본 제주도의 모의 전력계통
Fig. 12 Power system of Jeju power system model of two bus

그림 13은 제주도 2개영역 모델계통의 일별 최대부하변동곡선 패턴을 나타내었다.

그림 13 제주도 2개영역 모델계통의 날짜별 최대부하변동곡선 패턴
Fig. 13 The load variation curve pattern daily of Jeju power system model of two bus

발전기, 송전선로, 부하의 입력 자료를 표 1~3에 간단히 나타내었다. 한편, 표 1에서 발전기 중 기존 화력 및 원자력 발전기인 5번~11번 발전기는 고장과 운전이라는 2개의 상태모형으로, *로 표시된 본토와의 연계선인 HVDC는 등가발전기로 취급하여 모델링하였으며 운전상태모형도 타 기존발전기와는 달리 보다 상세한 운전상태로 모델링하기 위하여 3개 상태모형으로 모델링하였다.

표 1 모델계통의 발전기 데이터

Table 1 Generators data of Jeju power system model

번호	이름	종류	연결 모선	대 수	정격용량 [MW]	고장 확률	상태 개수	지역
1	HWN1	WTG	2	1	50	0	11	Area 2
2	SSN2	WTG	2	1	30	0	7	Area 2
3	HLM3	WTG	1	1	20	0	5	Area 1
4	HVDC*	HVDC	1	2	150	0	3	Area 1
5	NMJ3	T/P	1	2	100	0.012	2	Area 1
6	JJU1	T/P	1	1	10	0.015	2	Area 1
7	JJU2	T/P	1	2	75	0.012	2	Area 1
8	HLM1	G/T	1	2	35	0.013	2	Area 1
9	HLM1	S/T	1	1	35	0.013	2	Area 1
10	JJU3	D/P	1	1	40	0.018	2	Area 1
11	NMJ1	D/P	1	4	10	0.018	2	Area 1
최대 용량 [MW]					945			

표 2 모델계통의 송전선로 데이터

Table 2 Transmissions data of Jeju power system model

번호	이름	선로 종류	시작 모선	도착 모선	용량 [MW]	고장확률	상태 개수
1	HGWN	T/L	1	2	200	0.004568	2
2	HASG	T/L	2	1	200	0.004568	2

표 3 모델계통의 부하 데이터

Table 3 Loads data of Jeju power system model

번호	부하 이름	연결 모선	용량[MW]	지역
1	제주(JEJU)	1	481	Area 1
2	성산(SUSN)	2	74	Area 2

모델계통에서 풍력발전기는 한림(HLM), 행원(HWN), 성산(SSN)의 세 개의 풍력발전단지가 있다. 본 연구에서는 이들 각각의 풍력단지의 모든 발전기들은 그 해당 풍력발전단지에서 하나의 등가풍력발전기로 가정하였다. 표 4는 이러한 세 풍력단지의 풍력특성곡선의 값과 풍속범위를 나타낸 표이다. 이를 이용하여 그림 3과 같이 세 풍력단지의 다개상태를 구하고 그림 14~16으로 나타내었다. 풍력발전기의 상태개수의 결정은 선형보간법을 이용하여 등가화 할 때 여러 가지 간격으로 모의하여본 결과 가장 적절하다고 판단되는 5[MW]간격으로 다개상태 모델을 정의하였다.

표 4 풍력발전단지의 데이터

Table 4 Data of three wind farms

풍력발전단지 이름	한림 (HLM)	성산 (SSN)	행원 (HWN)
풍력발전기 용량 [MW]	20	30	50
시작 풍속(V_{ci}) [m/sec]	5	5	5
정격 풍속(V_R) [m/sec]	14	15	16
차단 풍속(V_{co}) [m/sec]	25	25	25
풍속 범위 [MW]	0~35	0~45	0~45
풍속의 평균 [MW]	6.4	8.5	8.5
풍속의 표준편차 [MW]	9	11	11

그림 14 행원(HWN) 풍력단지의 출력용량 확률분포함수(11개 상태)

Fig. 14 The outage capacity probability distribution function of Hangwon(HWN) wind farm

그림 15 성산(SSN) 풍력단지의 출력용량 확률분포함수(7개 상태)

Fig. 15 The outage capacity probability distribution function of Sungsan(SSN) wind farm

그림 16 한림(HLM) 풍력단지의 출력용량 확률분포함수(5개 상태)

Fig. 16 The outage capacity probability distribution function of Hanlim(HLM) wind farm

5.2 복합계통에서의 웹기반 실시간 온라인 신뢰도 정보시스템(CmRelWin)의 구동방법

그림 17에서 보이듯이 왼쪽 박스 1은 CmRelWin V7의 전체 입력 창으로 모델계통의 제어변수를 입력하는 창이다. 중심부에 박스 4~6은 발전기, 모선, 부하의 데이터가 표로 업로드된 것이다. 그림 17의 2번은 년도와 날짜를 선택하면 그 날짜에 해당하는 입력파일과 결과파일을 볼 수 있다. 이에 따른 결과 그래프는 박스 3에서 선택할 수 있다. 전체계통의 결정론적 신뢰도 지수버튼(System DRI)과 전체계통의 확률론적 신뢰도 지수버튼(System PRI)과 부하별 확률론적 신뢰도 지수버튼(Node PRI)을 선택하여 볼 수 있다.

그림 17 제주도 2계 모델계통을 입력한 WORRIS의 전체작업창
Fig. 17 Worriss's whole control panel for Jeju power system model of two bus

그림 18은 그림 17의 박스 3에서 System DRI를 클릭한 결과이며 제주전계통의 결정론적 신뢰도 지수들(EOP, LP, EIRR, EORR)을 그래프를 통하여 쉽게 그 추이를 파악하고 분석 및 비교하여 볼 수 있다.

그림 18 제주도 2계 영역 모델계통의 결정론적 신뢰도 평가 지수
Fig. 18 Deterministic reliability Indices results of Worriss for Jeju power system model of two bus

그림 19는 그림 17의 박스 3에서 System PRI를 클릭한 결과이며 제주계통의 확률론적 신뢰도 평가지수들(LOLE, EENS, EIR, EORR)을 나타낸 것이다. 역시 제주전계통의 확률론적 신뢰도 지수들(LOLE, EENS, EIR)을 그래프를 통하여 쉽게 그 추이를 파악하여 볼 수 있다. 또한 부하별 확률론적 신뢰도를 클릭하면 제주시를 중심으로 한 영역1과 성산을 중심으로한 영역2의 각각의 신뢰도정보 그래프가 그림 20 및 그림 21처럼 나타난다. 여기서 전체계통이든 영역 각각의 계통이든 큰 값일수록 신뢰도가 낮음을 의미하는 음의 신뢰도 지수인 LOLE와 EENS는 서로 그 상관계수가 1에 가까우며 큰 값일수록 신뢰도가 높음을 의미하는 양의 신뢰도지수인 EIR은 앞서의 음의 신뢰도지수들과는 상관계수가 거의 -1에 가까움을 알 수 있다. 한편, 2010년도 8월은 주중에서 월요일, 화요일, 수요일은 부하가 높아서 신뢰도가 낮으나 주말인 토요일 및 일요일보다 금요일이 오히려 신뢰

도가 높게 나타나고 있음은 흥미롭다고 사료된다. 이는 냉방부하의 크기 및 제주도의 휴양지 특성 및 풍속 등 다양한 원인에서 비롯된 것이라고 사료되므로 차후에 보다 자세한 연구를 통하여 그 원인분석이 기대된다.

그림 19 제주도 2계 모델계통의 확률론적 신뢰도 평가 지수
Fig. 19 Probabilistic reliability Indices results of Worriss for Jeju power system model of two bus

그림 20 영역1의 확률론적 신뢰도 평가 지수
Fig. 20 Probabilistic reliability indices at area 1

그림 21 영역 2의 확률론적 신뢰도 평가 지수
Fig. 21 Probabilistic reliability indices at area 2

6. 결 론

본 논문은 급격히 증가하고 있는 풍력발전기의 불확실한 공급자원과 송전계통을 감안한 확률론적 신뢰도평가 모델을 제안하고, 온라인상에서 확률론적, 결정론적 신뢰도 지수를 산정하고 그래프를 출력하도록 개발한 시스템을 소개하였다. 입력 자료만 있다면 어느 곳에서든 온라인상으로 신뢰도 평가를 할 수 있고 계산된 신뢰도 지수들을 바탕으로 작성된 그래프를 통하여 쉽게 그 정보를 파악할 수 있다. 나아가 자원공급의 불확실성이 매우 큰 풍력발전기를 고려한 전력계통의 예비율 평가를 새롭게 정의하였다. 기존의 발전기의 사고가 0이라고 가정한 결정론적인 예비율 정의는 그 오차가 커서 더 이상 사용할 수 없으므로, 본 연구에서는 풍력발전기의 유효가용율을 고려한 새로운 실질적인 유효예비율에 토대로한 정의를 제안한다. 이는 차후에 풍력발전원이 계통에서 그 비중이 높아질 경우에 실질적으로 계통운용 계획수립에 큰 도움을 주리라 기대된다.

사례연구에서는 제주도계통과 유사한 2개영역 계통 모델을 이용하여 확률론적 신뢰도 지수와 결정론적 신뢰도 지수를 구하고 이들 정보를 시각적으로 보여줌으로써 계통운용자가 보다 신뢰성 있게 운용함에 도움을 줄 수 있음을 보였다. 나아가 차후 2012년에 신재생에너지 의무할당제도(RPS)가 시행되면 더 많은 신재생발전기의 건설이 요구될 것이므로 발전사업자가 단지별 적정용량결정이나 공급에너지평가 및 그 출력에 따른 경제성평가를 정량적으로 추정하고자할 경우에도 본 연구에서 개발한 WORRIS을 이용하여 복잡한 신뢰도 평가를 보다 용이하게 추정하고 비교 분석함으로써 합리적인 건설을 할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서 개발한 시스템의 사례연구는 실질적인 EMS등의 계통운용 D/B와의 연계가 물리적으로 불가능하였으므로 모든 입력자료를 서버에 D/B로 저장하고 모의를 한 것이다. 따라서 어디까지나 모의시험용이며 차후 실질적인 EMS등의 계통운용 D/B와의 연계를 실시한 검증 및 그 실용화를 통하여 실제통계용까지 이루어지기를 기대한다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비의 지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Rajesh Karki, Po Hu, Roy Billinton "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, No.2, June 2006.
- [2] 우량, 박정제, 최재석, A. A. El-Keib, Mohammad Shahidehpour and Roy Billinton, "Probabilistic Reliability Evaluation of Power Systems Including Wind Turbine Generators Using a Simplified Multi-State Model: A Case Study", IEEE PES General Meeting 논문집, Calgary, 2009. 7.
- [3] Roy Billinton, Dange Huang "Aleatory and Epistemic Uncertainty Considerations in Power System Reliability Evaluation" Proceedings on PMAPS2008, Puerto Rico, May 25-29, 2008.
- [4] Ramadoss Ramesh, Velimuthu Ramachandran "On-Line Monitoring of Multi-Area Power Systems in Distributed Environment" SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING Vol. 3, No. 1, 89-101, June 2006.
- [5] Jaeseok Choi, Jeongje Park, Taegon Oh, Kyeonghee Cho, Joydeep Mitra and Mohammad Shahidehpour, "Web Based Online Realtime Information System for Reliability of Electrical Energy Supply including WTG", ICEE논문집, July 2010.
- [6] 조경희, 박정제, 오태곤, 최재석, "웹기반 온라인 실시간 신뢰도정보시스템을 이용하여 송전계통 및 풍력발전기를 고려한 복합전력계통의 확률론적 신뢰도 평가", 대한전기학회 하계학술대회, 2010. 7.
- [7] 최재석, 조경희, 박정제, 오태곤, 장평밍, 송태호, "풍력발전기를 고려한 전력계통의 신뢰도평가방안 및 정보시스템 개발", 한국풍력에너지학회 추계학술대회 논문집, pp. 229-232, 2010. 11.
- [8] 최재석, R. Billinton, M. Futuhi-Firuzabad "Development of a New Nodal Effective Load Model Considering Transmission System Element Unavailabilities" IEE proceedings on GTD, 2005.

저 자 소 개

조 경 희 (趙京姬)

1987년 10월 9일생. 2010년 경상대 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-772-1715

Fax : 055-772-1719

E-mail : kx1004xh@hanmail.net

최 재 석 (崔在錫)

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

Tel : 055-772-1715

Fax : 055-772-1719

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr