

풍력발전기를 고려한 전력계통의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 연구

論 文

57-9-2

A Study on Probabilistic Reliability Evaluation of Power System Considering Wind Turbine Generators

朴正濟* · 吳量** · 崔在錫[†] · 文承逸***
(Jeongje Park · Wu Liang · Jaeseok Choi · Seungil Moon)

Abstract - This paper presents a study on reliability evaluation of a power system considering wind turbine generators (WTG) with multi-state. Renewable energy resources such as wind, wave, solar, micro hydro, tidal and biomass etc. are becoming importance stage by stage because of considering effect of the environment. Wind energy is one of the most successful sources of renewable energy for the production of electrical energy. But, reliability evaluation of generating system with wind energy resources is a complex process. While the wind turbine generators can not modelled as two-state model as like as conventional generators, they should be modelled as multi-state model due to wind speed random variation. The methodology for obtaining reliability evaluation index of wind turbine generators is different from it of the conventional generators. A method for making outage capacity probability table of WTG for reliability is proposed in this paper. The detail process is presented using case study of simple system

Key Words : Reliability evaluation, Wind turbine generator, Wind resource, Renewable energy, Distributed generator

1. 서 론

최근 세계적으로 친환경에너지원의 개발, CO₂ 배출의 감소의무 그리고 고유가시대와 맞물려서 풍력, 태양력, 연료전지 및 조력발전등과 같은 신재생에너지원이 크게 증대되고 있다[1,2]. 풍력발전원은 이들 중에서 가장 급성장하고 있는 신재생에너지원을 이용한 발전원이다. 유럽에서는 이미 2006년 기준으로 48,027MW의 풍력발전이 보급되고 있으며 이는 우리나라의 총 발전설비용량에도 비견될 수 있는 규모이다. 국내에서도 풍력자원이 우수한 강원도 및 제주도에 국내발전회사가 2008년도에 2MW급 2기를 건설할 의향을 나타내는 등 제주도에만 2012년까지 총 2,250MW의 풍력발전사업자들이 건설신청을 제출한 상태이다[3,5]. 또한, 서해안에는 대단위 조력발전소가 이미 건설 중에 있거나 천수만에 500MW급의 조력발전 건설을 위한 계획을 수립하는 등 조력발전원의 개발도 국내에 급속히 증가할 전망이다. 더불어 각 지방자치단체에서도 아직은 소규모이지만 태양력발전원 및 연료전지발전원을 건설할 의향 및 의욕을 적극적으로 나타내고 있다. 이처럼 환경친화적인 신재생에너지원들이 전력계통에 급속히 증가할 전망이다. 나아가 환경친화적인

Power)의 병입도 신도시 인근에 증가할 추세이다[5]. 그러나 연료전지와 마이크로 열병합가스터빈발전을 제외한 대부분의 신재생에너지원을 이용한 전원들의 특징은

- 1) 그 자원의 공급이 지정확인 위치에 종속되므로 분산형 전원 형태로 계통에 투입된다는 점과,
- 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 등이다.

그러므로 그 특성상 기존의 원자력, 석탄화력, LNG화력 등과는 달리 그 자원에 종속되어 분산형 전원의 형태를 나타내며 신뢰도측면에서 이들의 평가방법은 필연적으로 매우 복잡한 형태를 갖게 된다. 예로써, 2개의 운전상태로 나타낼 수 있는 기존의 발전기와는 달리 에너지원의 공급불확실성에 따른 다개상태(multi-state)를 가지며 계통연계도 부하와 근접거리 존재하여 배전계통의 신뢰도평가기술과 그 관계성이 매우 깊어진다. 그러므로 분산형신재생에너지원의 확률론적인 신뢰도평가 기술은 기존의 신뢰도 평가 방법에 비하여 상대적으로 어렵고 발전계통이나 송전계통처럼 일률(Routine)적인 진단알고리즘도 개발되어 있지 않은 실정에서 선진국에서도 최근의 분산형전원의 급속한 증가에도 불구하고 신뢰도평가기술은 개발단계에 머물고 있다. 특히, 국내에서는 풍력발전기를 비롯한 공급에너지원의 불확실성이 강한 신재생분산형 발전원을 고려한 확률론적인 신뢰도 평가기술 연구가 현재 거의 전무하다[6,7].

본 연구에서는 신재생에너지를 이용한 전원들 중 최근 급

* 學生會員 : 慶尙大學校 工大 電氣工學科 博士課程

** 學生會員 : 慶尙大學校 工大 電氣工學科 碩士課程

[†] 교신저자, 先任會員 : 慶尙大 電氣工學科 正教授 · 工博

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr

*** 正會員 : 서울大 電氣工學部 正教授 · 工博

接受日字 : 2008年 5月 23日

最終完了 : 2008年 8月 19日

격히 증가하고 있는 풍력에너지를 이용한 풍력발전기(WTG: Wind Turbine Generator)의 계통투입에 따른 확률론적인 공급적정도 측면에서의 신뢰도 평가를 실시할 수 있는 기초 기술을 개발한다. 이를 위하여 기존의 전원과는 달리 에너지원의 공급의 불확실성이 매우 큰 풍력발전원의 운전모형을 다개상태 운전모형으로 모델링한다. 이의 다개상태의 상태확률과 각 상태의 공급가능용량(AP: Available Power)을 구하기 위하여 풍력발전기 출력모형과 풍속모형을 결합하는 방법을 제안하며 이를 바탕으로 확률론적인 신뢰도 평가 알고리즘을 개발한다. 끝으로 간단한 모델계통을 통하여 제안하는 방법의 절차를 상세히 기술하고 나아가 우리나라 제주도계통공기의 모델계통에 적용하여 그 활용성을 살펴보았다[6,7].

2. 풍력발전기의 출력모형

현재 널리 사용되고 있는 전형적인 풍력발전기의 모습을 그림 1에 보인다. 풍력발전기의 이론출력은 식 (1)과 같다 [1,2]. 풍력발전기의 구조 및 이론출력식에서 보는 것처럼 풍력발전기의 출력은 풍속에 크게 의존한다. 그러나 풍력발전기의 실제출력은 식 (1)에 따라 무한히 전력을 생산하지 못하며 일반적으로 어느 이상의 풍속에서 출력을 내기 시작하여(이때의 풍속을 V_{ci} 라고 한다.) 정규풍속에 도달하면 그때부터 정격출력을 발생하며(이때의 풍속을 V_R 이라고 한다.) 또한 어느 이상의 풍속에서는 자체기보호를 위하여 전력을 발생하지 않는다.(이때의 속도를 V_{co} 라고 한다.) 그림 2는 이의 특성곡선을 그림으로 보인 것이다.

한편, 실제 풍속은 연속적이다. 이를 어느 임의의 속도밴드의 크기에 따라 분류하여 그 밴드에 해당하는 대표풍속의 크기에 따른 출력을 계산하는 식을 정식화하면 식 (2)와 같다[8]. 즉, 풍속밴드 #i에 해당하는 대표풍속 $SW_{bi}(i=1, 2, \dots, N_b)$ 에 해당하는 풍력발전기의 출력 $P_{SW_{bi}}(i=1, \dots, N_b)$ 는 식 (2)처럼 산정된다.

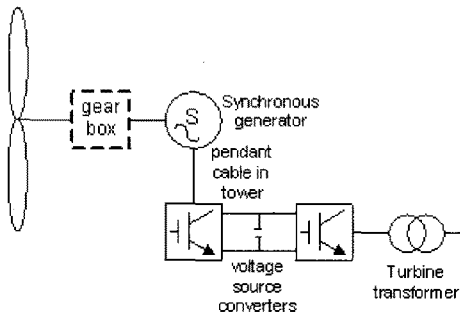


그림 1 풍력발전기의 전형적인 구조도
Fig. 1 The typical structure of WTG

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad (1)$$

여기서,
P = 출력[kW]

- C_p = 출력계수
- ρ = 공기밀도(1.225 kg/m³)
- V = 풍속(m/sec)
- A = 날개의 회전면적(m²)

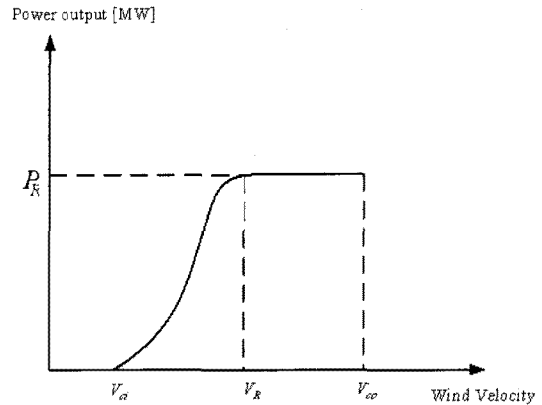


그림 2 풍력발전기의 전형적인 출력특성곡선
Fig. 2 The typical power curve of WTG

$$\begin{aligned} P_{SW_{bi}} &= 0, & 0 \leq SW_{bi} < V_{ci} \\ &= PR(A+B*SW_{bi}+C*SW_{bi}^2), & V_{ci} \leq SW_{bi} < V_R \\ &= PR, & V_R \leq SW_{bi} \leq V_{co} \\ &= 0, & V_{co} < SW_{bi} \end{aligned} \quad (2)$$

- 여기서,
- V_{ci} : 출력시작점 풍속(The cut-in speed) [m/sec]
- V_R : 정격출력풍속(The rated speed) [m/sec]
- V_{co} : 출력종단점 풍속(The cut-out speed) [m/sec]
- PR : 정격출력[kW]
- $P_{SW_{bi}}$: 풍속밴드 #i의 대표풍속 SW_{bi} 에 해당하는 풍력발전기의 출력[kW]
- N_b : 풍속밴드(band)의 총 갯수

식 (2)에서 출력시작점풍속과 정격출력풍속 사이의 곡선의 계수인 A, B, 및 C는 다음의 식 (3), (4) 및 (5)처럼 계산된다[8-10].

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_R)^2} \left[V_{ci}(V_{ci} + V_R) - 4(V_{ci}V_R) \left(\frac{V_{ci} + V_R}{2V_R} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_R)^2} \left[4(V_{ci} + V_R) \left(\frac{V_{ci} + V_R}{2V_R} \right)^3 - (3V_{ci} + V_R) \right] \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_R)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_R}{2V_R} \right)^3 \right] \quad (5)$$

3. 풍속모형

일반적으로 풍속은 공간과 시간에 따라 크게 변화한다.

현재까지 풍속의 분포는 정규확률분포에 가까운 Weibull 확률분포로 나타나는 것으로 알려져 있으며 그 모형은 이미 개발되어져있다[1-4],[8-10]. 본 논문에서는 근래 개발된 공통풍속모델(common wind speed model)을 사용하기로 한다 [3]. 이의 장점은 통상 풍력발전기는 풍속을 얻기가 좋은 위치에 수많은 풍력발전기가 동시에 설치되어 운영되는 경우가 대부분이다. 즉, 풍력발전단지로 불리우는 동일한 위치에 많은 발전기가 설치되어 운영된다. 그러므로 동일한 단지라면 풍력에너지의 공급도 동일하게 이루어져서 그 단지에 속하는 풍력발전기들은 출력특성이 동일하게 나타난다. 그러므로 그 단지에 속하는 풍력발전기에는 동일한 풍속특성모델을 사용할 수 있다. 공통풍속모델은 이때 유리하다. 공통풍속모델은 실용적이며 실용상 합리적이라고 연구되어 보고되고 있다[8]. 본 연구에서도 이를 이용하여 평균풍속(μ) 및 표준편차(σ)를 갖는 정규확률분포로 가정한다. 그리고 풍속 분포는 최저풍속에서 최대풍속까지 10σ 내에 모두 포함되는 것으로 한다. 그림 3은 $+5\sigma$ 에서 -5σ 내에 들어오는 풍속의 정규확률분포를 보인 것이다. 그림 3에서 바람의 역방향을 의미하는 마이너스부분은 실용상 의미가 없다 그러므로 이 부분은 풍속이 0과 같은 값으로 취급한다.

이와 같은 풍속분포에 대하여 N_b 개의 풍속밴드로 나누면 그 밴드의 크기(ΔSW)는 $10\sigma/N_b$ 가 되며 각 풍속밴드의 중앙점인 대표풍속(SW_{bi}) 및 그때의 확률($PB_{SW_{bi}}$)은 식 (6) 및 식 (7)처럼 각각 정식화된다. 이때 대표풍속인 당초의 평균 풍속(μ)이 항상 중앙밴드에 위치하도록 홀짝으로 나누어 정식화하였다. 여기서, $i=1,2,\dots,N_b$ 이다.

$$SW_{bi} = \mu + \Delta SW(i - 0.5N_b) \text{ for 짝수 } N_b, \\ = \mu + \Delta SW(i - 0.5(N_b + 1)) \text{ for 홀수 } N_b \quad (6)$$

$$PB_{SW_{bi}} = ND(\mu, \sigma, SW_{bi}) \Delta SW \quad (7)$$

단, $\Delta SW = 10\sigma/N_b$
 ND: 정규확률분포함수

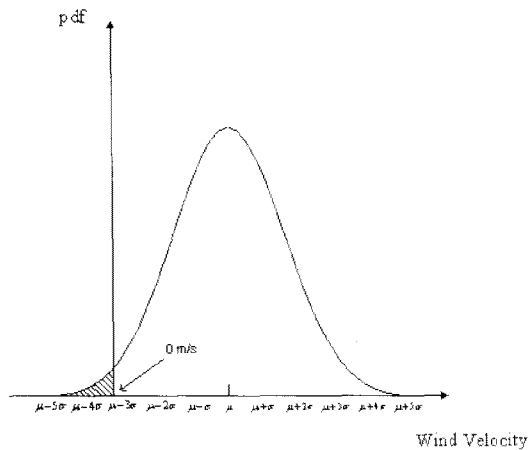


그림 3 공통풍속모형의 확률밀도함수(pdf)
 Fig. 3 The pdf(probability density function) of the common wind speed model

4. 풍력발전기를 고려한 전력계통의 신뢰도 평가

4.1 풍력발전기의 다개상태공간모형

전력계통의 신뢰도평가에서 불확실성은 고장에 의한 불확실성((aleatory uncertainty)과 정보의 불확실성(epistemic uncertainty)등 크게 두 가지로 나누어 질수 있다. 발전기의 고장에 의한 불확실성은 전자에, 부하 및 에너지자원의 공급의 불확실성등은 후자에 속한다. 그러므로 후자는 정보가 정확할수록 불확실성의 정도가 줄어든다[11,12].

통상 기존의 발전기는 정상운전과 운전 중 고장이라는 2개상태 공간모형으로 모델이 가능하지만 풍력발전기는 공급에너지원인 바람의 속도의 크기가 시공간적으로 매우 크게 변화하므로 그 자체의 고장에 의한 것보다 에너지원의 공급에 의한 운전의 불확실성이 상대적으로 크다. 그러므로 풍력발전기의 상태공간모형에서는 에너지원의 공급에 의한 운전상태의 불확실성에 토대한 다개상태로 모형화하여야 한다 [8-10]. 실제로 다개상태의 공간모형은 기존의 발전기의 운전모형을 보다 자세히 표현하고자 할 경우에도 많이 사용하고 있다. 그러나 바람은 그 특성상 중간상태(derated state)를 거쳐서 또 다른 중간상태로 진행되는 연속성을 갖는다는 점이 기존의 일반적인 다개상태 공간모형과 다르다. 그러므로 이러한 연속적인 풍력에너지원을 공급받아 발전하는 풍력발전원은 연속적인 다개상태 공간모형으로 모델링이 되어야 한다[11]. 이와 같은 특성을 바탕으로 모델링한 풍력발전원의 다개상태 공간모형을 보이면 그림 4와 같다. 본 그림에서 보는 것처럼 임의의 한 상태(#i)에서 중간상태(#(i+1))를 거치지 않고 다른 중간상태(#(i+2))로 진행되는 경우가 있을 수 없다. 여기서, λ_{ij} 및 μ_{ij} 는 i상태에서 j상태로의 전이율을 나타낸다.

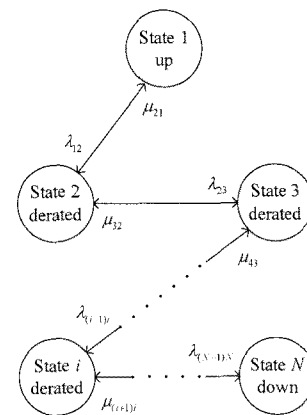


그림 4 풍력발전기의 다개상태공간모형
 Fig. 4 Multi-state model of WTG

본 논문에서는 풍력발전기가 고려된 계통의 신뢰도 지수를 얻기 위하여 풍력에너지원의 공급의 불확실성을 고려한 풍력모델과 풍력발전기의 출력특성모델을 결합하여 얻어진 다개상태로된 풍력발전기의 사고용량확률분포함수를 구한 후 이를 이용하여 주어진 부하지속곡선과 상승적분하여 유효부하지속곡선을 구하고 이로부터 신뢰도지수를 얻기로 한

다. 그림 5는 풍속확률밀도함수와 풍력발전기의 출력특성곡선을 결합하여 풍력발전기의 다개상태로된 가용용량확률분포함수(Available capacity probability distribution function)를 얻는 모습을 보인 것이다. 여기서, $(P_{SW_{bi}}, PB_{SW_{bi}})$ 는 i 번째 풍속밴드의 풍속인 SW_{bi} 일 때의 풍력발전기의 출력 및 풍속을 의미한다. 이로부터 풍력발전기 사고용량확률분포함수를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 후술하는 바와 같이 기존의 신뢰도평가방법을 그대로 이용하여 풍력발전기를 고려한 전력계통의 신뢰도평가를 실시할 수 있다.

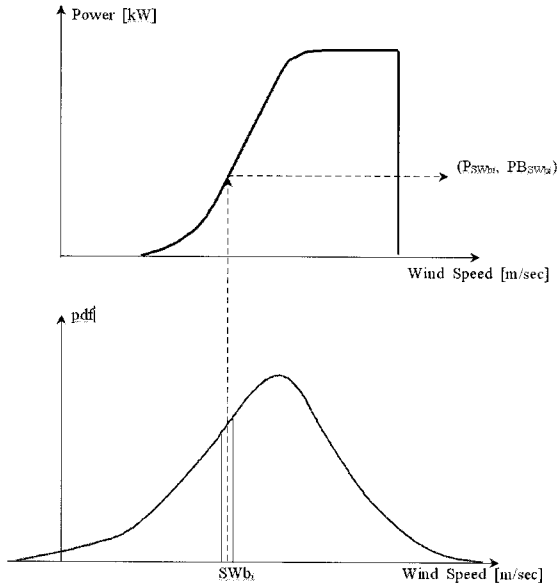


그림 5 풍력발전기의 가용용량확률분포함수를 얻기 위한 풍속모형과 출력특성곡선과의 결합모습

Fig. 5 The combination of wind speed model and WTG power output model to obtain the available capacity PDF(probabilistic distribution function) of WTG

한편, 풍속모형과 풍력발전기의 발전출력특성곡선을 결합하여 얻어진 가용용량확률분포함수는 소수점이하의 용량을 갖는 상태가 얻어지는 등 일관성이 없다. 그러므로 실용성을 미리 지정한 상태들에 대한 상태확률값을 얻기 위하여 다음과 같은 선형분할방법(linear rounding)을 사용하기로 한다. 그림 6은 이를 보인 것이다.

$$PB_k = \left(\frac{P_{k+1} - P_{SW_{bi}}}{\Delta P} \right) \times PB_{SW_{bi}} \quad (8)$$

$$PB_{k+1} = \left(\frac{P_{SW_{bi}} - P_k}{\Delta P} \right) \times PB_{SW_{bi}} \quad (9)$$

단, $\Delta P = P_{k+1} - P_k$ [kW]

k : 미리 설정한 상태공간모형의 상태번호

4.2 신뢰도평가

한편, 확률론적 신뢰도 평가를 위한 기법은 몬테카를로 모의(Monte Carlo simulation)방법과 해석적상태누적

(Analytical enumeration)방법 등 크게 두 가지로 나뉜다. 본 연구에서는 상대적으로 계산과정의 절차를 직접 수작업(handled work)한 것과 쉽게 파악하여 작성한 프로그램의 결과의 신빙성을 보다 용이하게 검증할 수 있는 후자의 방법을 토대로 한 유효부하지속곡선을 이용한 방법을 사용하기로 한다[6]. 상승적분식을 이용하여 다개상태를 갖는 $\#i$ 풍력발전기의 사고용량확률분포함수를 고려한 새로운 유효부하지속곡선인 Φ_i (ELDC: Effective Load Duration Curve)를 구하는 점화식은 식 (10)과 같다[11,12].

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \Phi_{i-1} \otimes f_{oi} \\ &= \left(1 - \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \right) \Phi_{i-1}(x) + \sum_{j=1}^{NS} q_{ij} \Phi_{i-1}(x - C_{ij}) \end{aligned} \quad (10)$$

단,

Φ_0 : 원래의 부하지속곡선(LDC)

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

f_{oi} : $\#i$ 풍력발전기의 사고용량확률분포함수

NS_i : $\#i$ 풍력발전기의 상태의 수

C_{ij} : $\#i$ 풍력발전기의 $\#j$ 상태의 사고용량[MW]

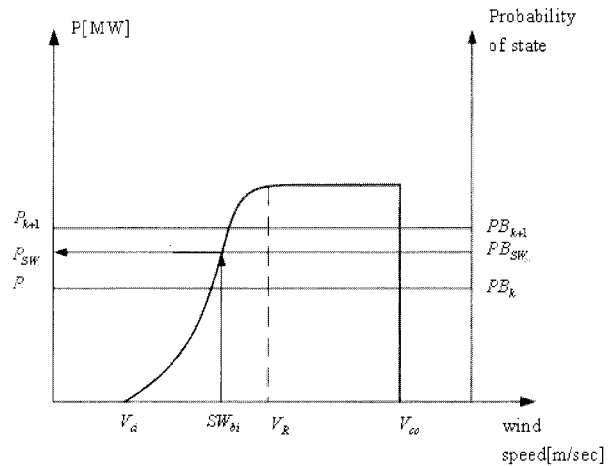


그림 6 풍력발전기의 가용용량확률분포함수의 선형분할방법
Fig. 6 Rounding method of the available capacity PDF of WTG

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)를 각각 식 (11), 식 (12) 및 식(13)처럼 구할 수 있다.

$$LOLE = \Phi_{NG}(x) \Big|_{x=IC} \quad [\text{hours/year}] \quad (11)$$

$$EENS = \int_{IC}^{IC+Lp} \Phi_{NG}(x) dx \quad [\text{MWh/year}] \quad (12)$$

$$EIR = 1 - EENS/ED \quad (13)$$

여기서,

L_p : 최대부하[MW]

IC: 총설비용량 ($=\sum C_i$) [MW]

C_i : #i 발전기의 용량[MW]

ED: 총부하에너지[MWh]

그림 7은 본 연구에서 제안하는 다개상태를 갖는 풍력발전기를 고려한 신뢰도평가 방법의 흐름도를 보인 것이다.

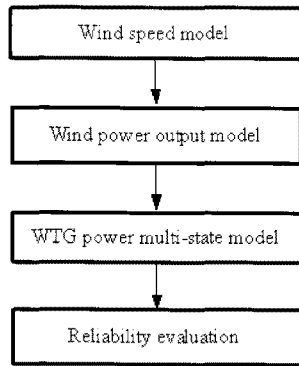


그림 7 풍력발전기의 신뢰도 평가를 위한 흐름도

Fig. 7 Flow chart for evaluating reliability of power system considering the WTG

5. 사례 연구

5.1 2개 발전기모델계통(모델계통 I)

본 연구에서 제안하는 방법을 기존발전기와 풍력발전기를 각각 1대씩 갖는 그림 8과 같은 2개 발전기모델계통에 적용하여 보았다. 본 모델계통의 부하는 그림 9와 같은 최대부하가 20MW인 일부하지속곡선을 갖는다고 가정하였으며 기존발전기는 사고율이 0.1인 2개상태를 가지며 풍력발전기는 풍속모델과 풍력발전기의 출력모형에서 산정되어 5개의 사고상태 공간모형을 갖는다고 가정하였다. 본 모델계통의 풍속과 풍력발전기의 특성자료는 표 1과 같다고 가정하였다.

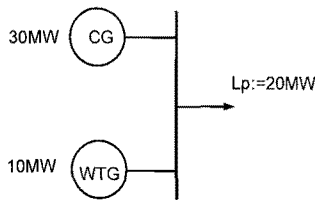


그림 8 모델계통 I

Fig. 8 The simple model system I

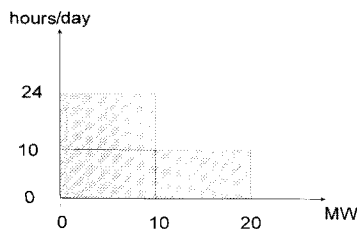


그림 9 모델계통 I의 부하지속곡선

Fig. 9 Load duration curve of model system I

표 1 모델계통 I의 풍속과 풍력발전기의 특성자료

Table 1 Data of wind speed and WTG of model system I

풍속		풍력발전기(WTG)	
Wind speed range	0~35m/sec	WTG capacity	10MW
Mean wind speed(μ)	10m/sec	Cut-in speed(V_{ci})	5 m/sec
Standard deviation(σ)	8m/sec	Rated speed(V_R)	15 m/sec
		Cut-out speed(V_{co})	25 m/sec

그러므로 풍력발전기의 출력특성함수의 계수들은 식 (2)를 이용하면 표 2처럼 산정된다.

표 2 풍력발전기의 출력특성곡선의 계수 A, B 및 C

Table 2 The parameters of power curve of WTG

A	0.1111
B	$-0.063 [m/sec]^{-1}$
C	$0.0081 [m/sec]^{-2}$

이제 풍속밴드크기의 계산식인 $\Delta SW=10\sigma/N_b$ 에서 밴드의 개수(step)를 $N_b=81$ 로 설정하면 $\Delta SW=1[MW]$ 가 된다. 이때의 풍속모형과 풍력발전기의 출력모형을 결합하여 가용용량(AP)별 확률분포함수를 구하면 표 3과 같다.

표 3 풍력발전기의 가용용량별 확률분포

Table 3 AP(Available power) and probability of WTG

풍속밴드의 번호	WTG Available power (P_{SWbi}) [MW]	Probability ($P_{B_{SWbi}}$)
1,...,36 and 57,..., 81	0	0.3131
37	0.2667	0.0440
38	0.6963	0.0465
39	1.2889	0.0483
40	2.0444	0.0495
41	2.9630	0.0499
42	4.0444	0.0495
43	5.2889	0.0483
44	6.6963	0.0465
45	8.2667	0.0440
46,...,56	10	0.2604
	Total	1.000

다음으로 미리 상정한 0MW, 3MW, 5MW, 7MW 그리고 10MW라는 5개의 가용용량별 운전상태 공간으로 확률분포 값을 선형분할분배하는 모습을 보이면 표 4와 같다. 여기서는 편이상 5개의 상태공간모형으로 가정하였지만 더욱 많은 상태로 모형화하면 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 그러나 상정하는 상태수가 어느 값 이상이 되면 그 효과는 없다고 알려져 있다[5]. 표 5는 표 4에서 얻어진 가용용량상태확률분포를 사고용량상태확률분포로 재정리하여 보인 것이며 그림 10은 이를 알기 쉽도록 그림으로 나타낸 것이다. 참고로 사고용량이 0MW일때의 확률값은 가용용량이 10MW일때의

확률값과 동일하며 본 모델계통의 풍력발전기의 최대가용용량의 확률은 0.2790이다.

표 4 풍력발전기의 가용용량확률분포의 선형분할배분
Table 4 Rounding of the WTG power and corresponding probability

AP [MW]	AC Prob.	0 MW	3 MW	5 MW	7 MW	10 MW
0.0	0.3131	0.3131	-	-	-	-
0.2667	0.0440	0.0401	0.0039	-	-	-
0.6963	0.0465	0.0357	0.0108	-	-	-
1.2889	0.0483	0.0275	0.0208	-	-	-
2.0444	0.0495	0.0158	0.0337	-	-	-
2.9630	0.0499	0.0006	0.0493	-	-	-
4.0444	0.0495	-	0.0237	0.0258	-	-
5.2889	0.0483	-	-	0.0413	0.0070	-
6.6963	0.0465	-	-	0.0071	0.0394	-
8.2667	0.044	-	-	-	0.0254	0.0186
10.0	0.2604	-	-	-	-	0.2604
Total	1.000	0.4328	0.1422	0.0742	0.0718	0.2790

(단, AP: 그림 5를 사용하여 실제 얻어진 가용용량(P_{swb}), AC: 미리 설정한 가용용량)

표 5 풍력발전기의 사고용량확률함수값
Table 5 The outage capacity and corresponding probability of WTG

OC[MW]	0	3	5	7	10
FOR	0.2790	0.0718	0.0742	0.1422	0.4328

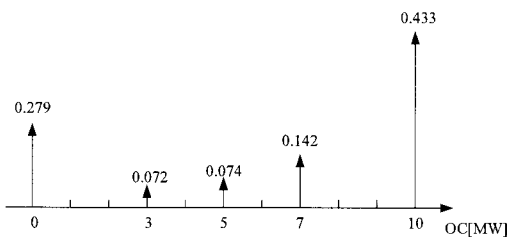


그림 10 풍력발전기의 사고용량 확률분포함수
Fig. 10 Outage capacity PDF(f_{oWTG}) of WTG

유효부하지속곡선을 작성하는 식 (10)을 이용하여 식 (11), 식 (12) 및 식 (13)에 따라 신뢰도를 평가하면 표 6과 같다. 여기서는 다개상태를 갖는 풍력발전기가 투입될 경우에 공급신뢰도측면에서의 신뢰도지수에 얼마나 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 (1) 풍력발전기가 없는 30MW인 기존의 발전기 한 대가 있는 경우(case 1), (2) 풍력발전기가 투입된 경우(case 2) 그리고 (3) 다개상태를 갖는 풍력발전기 대신에 사고율(FOR)이 0.1인 2개상태로 된 10MW인 기존의 발전기 1대가 투입되는 경우(case 3) 등 세가지에 대하여 신뢰도 평가를 실시한 결과를 비교하여 보인 것이다. 예상되는 것처럼 기존의 발전기들이 통상적으로 가용용량

확률이 0.9이상을 갖는 것에 비하여 주어진 풍력발전기는 가용용량 확률이 0.279로써 매우 낮다. 그러므로 풍력발전기가 전혀 없는 경우보다는 계통신뢰도에 기여를 하고 있지만 가용용량 확률이 높은 기존의 발전기가 투입되는 것에 비하면 매우 작음을 알 수 있다. 참고로 풍력발전기를 고려한 case 2의 각 발전기의 확률론적인 발전량 및 설비이용율을 보이면 표 7과 같다.

표 6 신뢰도평가 결과
Table 6 Indices of three kinds of systems

	Without WTG (case 1)	With WTG (case 2)	All Conventional Generators (case 3)
LOLE [hours/day]	2.4	2.01	1.14
EENS [MWh/day]	34	24.18	12.4
EIR	0.9	0.9289	0.9635

표 7 각 발전기의 확률론적인 발전량 및 설비이용율 (case 2)

Table 7 Probabilistic production energies and capacity factors of generators (case 2)

	총발전량[MWh]	설비이용율[%]
CG1	217.6	30.2
WTG	98.1	40.9
Total	315.82	

5.2 제주도 계통크기의 모델계통(모델계통 II)

두 번째 사례연구로서 우리나라의 제주도 전력계통 크기의 모델계통(모델계통 II)을 상정한다. 표 8은 이의 발전계통의 입력자료를 보인 것이다[5-7],[13]. 더불어 모델계통에서는 풍력단지가 세 군데 있다고 가정하고 본문에서 언급한 바와 같이 이들 각각의 풍력단지에 속하는 풍력발전기들은 하나의 등가발전기로 등가화하였다. 이들을 표 8에서 풍력발전기(WTG)로 나타내었다. 그리고 HVDC는 3개 상태를 갖는 하나의 등가발전기로 가정하였다. 한편, 부하지속곡선은 그림 11과 같은 년부하지속곡선을 갖는다고 가정하였다.

표 9는 본 모델계통 II의 가정한 풍력단지(WF: Wind Farm)의 바람의 특성을 보인 것이며 표 10은 풍력발전기의 출력특성함수를 보인 것이다. 그러므로 식 (2)를 이용하여 각 풍력단지별 출력특성함수의 계수를 구하면 표 11과 같다. 그림 12는 세 개의 풍력단지별 등가발전기의 사고용량 확률분포함수(f_{oWTG})를 보인 것이다. 이들 함수를 이용하여 식 (10)을 사용하여 발전기를 부하담당 시키면서 유효부하지속곡선을 작성하고 식 (11), (12) 및 (13)에 따라 신뢰도를 구하면 표 12와 같다. 본 표에서 풍력발전기가 있는 경우와 없는 경우의 신뢰도지수를 비교하였다. 본 계통은 당초에 이미 총공급용량(945MW)이 최대부하(681MW)를 크게 상회하는 바 높은 공급신뢰도를 유지한다고 판단되며 풍력발전기의 투입으로 더욱 신뢰도가 높아졌다.

표 8 모델계통 II의 발전기 입력자료

Table 8 Generators data of model system II

번호	이름	형식	용량 [MW]	발전기 대수	사고율
1	NMJ3	T/P	100	2	0.012
2	JJU1	T/P	10	1	0.015
3	JJU2	T/P	75	2	0.012
4	HNM1	G/T	35	2	0.013
5	HNM1	S/T	35	1	0.013
6	JJU3	D/P	40	1	0.018
7	NMJ1	D/P	10	4	0.018
8*	HVDC	DC	75/150*	2	0.010/ 0.028*
9	JCN1	WTG	20	1	-
10	SSN2	WTG	30	1	-
11	HWN3	WTG	50	1	-
Total			945	18	

(*, HVDC는 3개 상태공간모형으로 모의함.)

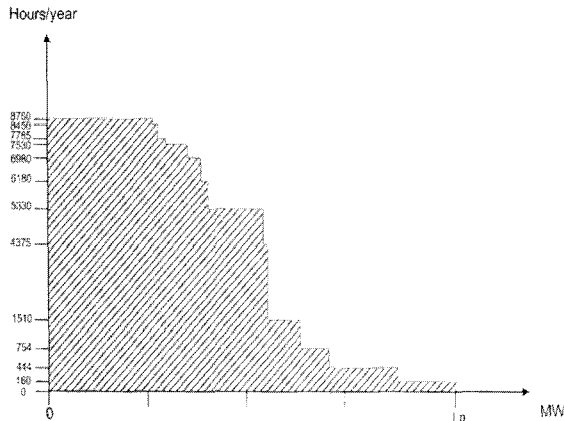


그림 11 모델계통 II의 부하지속곡선

Fig. 11 Load duration curve of model system II

표 9 모델계통 II의 풍력단지별 풍속

Table 9 Wind speed of wind farm in model system II

WF Name	Wind speed[m/sec]		
	JCN-WF	SSN-WF	HWN-WF
Wind speed range	0~35	0~40	0~45
Mean wind speed	10	12	13
Standard deviation	8	8	8

표 10 모델계통 II의 풍력발전기의 출력특성입력자료

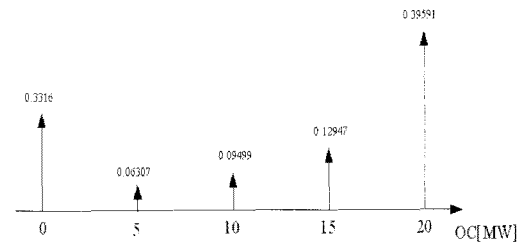
Table 10 WTG power function in model system II

WTG capacity	10MW	30MW	50MW
Cut-in speed(Vci)	5m/sec	5m/sec	5m/sec
Rated speed(VR)	14m/sec	15m/sec	16m/sec
Cut-out speed(Vco)	25m/sec	25m/sec	25m/sec

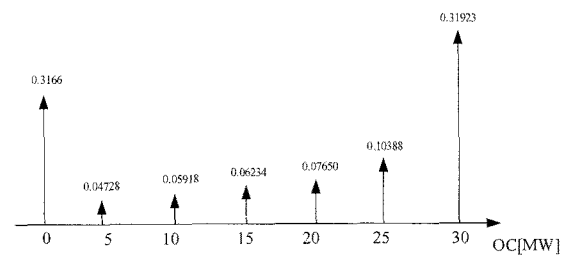
표 11 모델계통 II에서의 풍력발전기의 출력특성곡선의 계수

Table 11 The coefficients of WTG power function of model system II

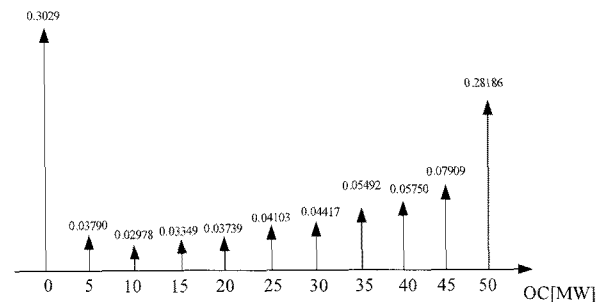
	JCN-WF	SSN-WF	HWN-WF
A	0.09275	0.1111	0.12034
B [m/sec]-1	-0.06486	-0.06296	-0.06
C [m/sec]-2	0.00926	0.00815	0.00719



(a) JCN1 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o9})



(b) SSN2 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o10})



(c) HWN3 풍력발전기의 사고용량확률분포함수(f_{o11})

그림 12 모델계통 II의 풍력단지별 등가발전기의 사고용량 확률분포함수

Fig. 12 Outage capacity PDF(f_{oWTG}) of equivalent WTGs of wind farms in model system II

표 12 모델계통 II의 신뢰도 평가결과

Table 12 Reliability indices of model system II

	With WTG	Without WTG
LOLE [hours/year]	0.81	1.63
EENS [MWh/year]	33.66	84.51
EIR	0.99999	0.99997

표 13 풍력발전기와 동일한 용량을 갖는 2개상태 발전기의 투입시와의 신뢰도 비교

Table 13 Comparison of reliability (LOLE) between WTG system and conventional generators system of same capacity with the WTG.

L_p	WTG	CG	IRR	Remarks
681	0.81	0.19	38.77	Base
691	1.02	0.22	36.76	
701	1.72	0.49	34.81	
711	2.45	0.52	32.91	
721	3.50	0.79	31.07	
731	4.75	0.80	29.27	
741	5.78	0.83	27.53	
751	7.42	1.11	25.83	
761	8.66	1.55	24.18	
771	10.26	1.77	22.57	

LOLE[hours/year]

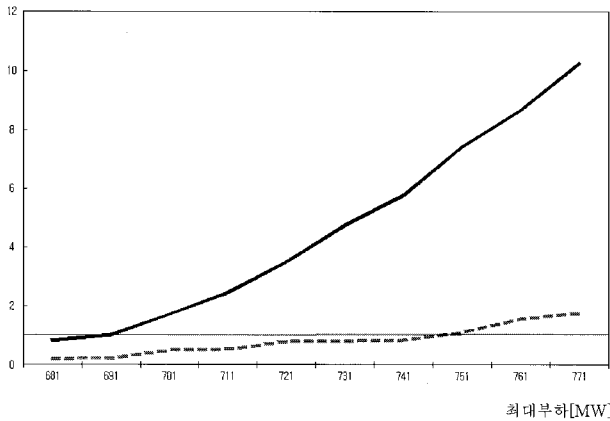


그림 13 최대부하의 변동에 따른 풍력발전기(실선)를 갖는 계통과 동일한 용량의 2개상태로 된 기존의 발전기를 갖는다고 가정한 경우(점선)의 신뢰도비교평가

Fig. 13 Reliability comparison between WTG system (line) and conventional generators system (dotted line) of same capacity with WTG.

끝으로 풍력발전기를 갖는 계통과 이와 동일한 용량으로 된 기존의 발전기가 건설될 계통에 대하여 최대부하를 변화시키면서 신뢰도를 평가하여 보았다. 표 13은 이를 보인 것이며 그림 13을 이를 파악하기 쉽게 보인 것이다. 풍력발전기가 갖고 있는 풍력에너지의 공급의 불확실성으로 말미암아 동일한 용량을 갖는 기존의 발전기를 건설할 때보다 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 풍력발전기가 건설될 경우에 설비에비율면에서는 동일하지만 계통의

확률론적인 공급신뢰도측면에서는 매우 큰 차이를 나타낼 수 있다. 또한, 신뢰도측면에서 풍력발전기와 등가적인 기존의 발전기를 건설한다면 설비에비율 측면에서 얼마나 기여할 것인가를 추량할 수 있다. 가령, 신뢰도 기준을 $LOLE=1.0$ [hours/year]이라고 가정한다면 동일한 신뢰도 기준까지 최대부하의 차이는 약 60MW이다. 이는 본 풍력발전기가 총용량은 100MW이지만 실제로는 대략 40MW정도로 계통의 신뢰도에 기여함을 의미한다. 그러므로 풍력발전기가 계통에 투입될 경우에 결정론적인 신뢰도수준을 의미하는 설비에비율의 증가로 단순히 판단할 수 없으며 이의 등가적인 설비에비율을 이와 같이 추정하여 계통의 신뢰도에 실제로 얼마나 기여하는지를 평가해야 될 것으로 사료된다. 신뢰도측면에서 풍력발전기의 등가용량을 얼마나 보아야 할 것인가에 대한 보다 자세하고도 정확한 평가연구는 차후에 실시할 계획이다.

본 모델계통 II는 실제 본 계통이 갖고 있는 HVDC를 하나의 등가발전기로 모델링한 것이므로 실제와는 거리가 있으며 편이상 단지 제주도계통 크기와 비슷한 모델계통을 상정하고 본 연구가 추구하고자하는 풍력발전기의 공급신뢰도측면에서의 신뢰도평가에 중점을 두고 있음을 밝히고 싶다.

6. 결 론

본 연구에서는 최근 전 세계적으로 급격히 증가하고 있는 신재생에너지원을 이용한 발전기들 중 하나인 풍력발전기가 전력계통에 투입될 경우의 확률론적인 신뢰도 평가에 관한 기초연구이다. 풍력발전기는 그 에너지원(풍력)의 공급이 언제 어떻게 변화할지 모르는 확률론적인 특성(Epistemic)을 가진다. 그러므로 풍력발전기의 출력변동의 불확실성은 기존의 발전기의 운전고장모형처럼 모델화된다. 본 연구에서는 이를 다개상태를 유도하였으며 본 유도과정을 상세히 기술하였다. 또한 이미 개발된 공통풍속모형 및 풍력발전기 출력모형을 결합하여 풍력발전기의 운전상태공간모형을 유도하였다. 나아가 본 연구에서 제안하는 모델을 이용하여 2기 모델계통에 적용하여 그 절차를 명확하게 보였으며 나아가 제주도계통크기의 모델계통에 적용하여 개발한 평가프로그램의 활용성을 살펴보았다.

한편, 본 연구에서는 응용연구의 한 예로 풍력발전기가 공급적정성의 측면에서 계통 신뢰도에 얼마나 기여하는지를 산정하는 방법을 제시하였다. 여기서 제안하는 방법을 이용한다면 풍력발전사업자가 건설하고자하는 풍력발전기가 투입될 경우에 미리 계통신뢰도에 얼마나 기여하는가를 간편하고도 대략적인 정보를 얻을 수 있으리라 판단된다. 더불어 이를 이용한 신뢰도평가모형은 차후 적정공급신뢰도측면에서의 풍력발전기의 단지별 적정용량결정이나 공급에너지평가 및 그 출력에 따른 경제성평가 등에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서는 단지 이의 가능성만을 보인 것이며 더욱 상세한 연구가 차후과제로 요청된다. 끝으로, 본 연구에서 제시하는 풍력발전기의 신뢰도평가모형은 기초모형으로써 차후 풍력발전기의 기동정지실패율에 따른 신뢰도평가, 주간별 및 단지별 신뢰도 평가 그리고 송전계통을 감안한 풍력발전기의 신뢰도 평가 등을 실시할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-10567-0)

참 고 문 헌

- [1] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen and Goran Strbac: EMBEDDED GENERATION, IEE, 2000.
- [2] Mukund R. Patel: Wind and Solar Power Systems, CRC, 1999.
- [3] 김수덕, "신재생에너지의 최근동향과 이슈" 2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력경제연구회 춘계학술대회논문집 2006년5월.
- [4] 주성수, "강원풍력단지현황" 2006년도 대한전기학회 전력기술부문회 전력경제연구회 춘계학술대회논문집, 2007년5월.
- [5] 제3차 전력수급기본계획, 산업자원부, 2006년12월.
- [6] 배인수, 김진오, "Load Duration Curve를 이용한 분산전원과 배전계통의 신뢰도 산출", Trans. KIEE. Vol. 54A, No. 11, NOV, pp. 518-524, 2005.
- [7] 권영진, 강상희, "A Protection Algorithm Discriminating Between Internal and External Faults for Wind Farms", Trans. KIEE. Vol. 56, No. 5, MAY, pp. 854-859, 2007.
- [8] Rajesh Karki, Po Hu, and Roy Billinton, "A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 21, No.2, June 2006.
- [9] M. R. Bhuiyan and R. N. Allan, "Modeling multistate problems in sequential simulation of power system reliability studies", IEE Proc. - Gener. Transm. Dsitrib., Vol. 142, No. 4, July 1995.
- [10] Roy Billinton and L. Gan, "Wind Power Modeling and Application in Generating Adequacy Assessment", 14th Power Systems Computation Conference, Sevilla, Spain, June 24-28, 2000.
- [11] Roy Billinton, Wenyuan Li: Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, PP. 24-30, 1994.
- [12] Roy Billinton and Dange Huang, "Aleatory and Epistemic Uncertainty Considerations in Power System Reliability Evaluation" PMAPS2008, Puerto Rico, May 25-29, 2008.
- [13] 송길영, 최재석, 김용하, "고속 Hartley 변환을 이용한 확률론적 발전시뮬레이션에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 39-42-2, pp.341-348, 1990년4월.
- [14] 황교익, 전영환, "제주계통 단독운전시 주파수 안정도 유지를 위한 풍력발전 운전용량 산정 방법에 관한 연구", Trans. KIEE. Vol. 56, No. 2, FEB, pp. 233-239, 2007.

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



오량 (吳量)

1984년 8월 29일생. 2007년 University of Science and Technology, Liao Ning 졸업. 2007년~현재 경상대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-751-5347

Fax : 055-759-2723

E-mail : astdwxg@gmail.com



최재석 (崔在錫)

1958년 4월 29일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 경상대 교수

Tel : 055-751-5347

Fax : 055-759-2723

E-mail : jschoi@gnu.ac.kr



문승일 (文承逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 미국 The Ohio State University 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1993~1997년 전북대 전기공학과 교수. 1997~2001년 서울대 전기공학부 조교수. 2001년~현재 서울대 전기공학부 정교수.

Tel : 02-880-1821

Fax : 02-878-1452

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr