

수요와 공급의 불확실성을 고려한 시간대별 순동예비력 산정 방안

Dynamic Reserve Estimating Method with Consideration of Uncertainties in Supply and Demand

권 경 빈* · 박 현 곤* · 류 재 근** · 김 유 창* · 박 종 근†

(Kyung-Bin Kwon · Hyeon-Gon Park · Jae-Kun Lyu · Yu-Chang Kim · Jong-Keun Park)

Abstract - Renewable energy integration and increased system complexities make system operator maintain supply and demand balance harder than before. To keep the grid frequency in a stable range, an appropriate spinning reserve margin should be procured with consideration of ever-changing system situation, such as demand, wind power output and generator failure. This paper propose a novel concept of dynamic reserve, which arrange different spinning reserve margin depending on time. To investigate the effectiveness of the proposed dynamic reserve, we developed a new short-term reliability criterion that estimates the probability of a spinning reserve shortage events, thus indicating grid frequency stability. Uncertainties of demand forecast error, wind generation forecast error and generator failure have been modeled in probabilistic terms, and the proposed spinning reserve has been applied to generation scheduling. This approach has been tested on the modified IEEE 118-bus system with a wind farm. The results show that the required spinning reserve margin changes depending on the system situation of demand, wind generation and generator failure. Moreover the proposed approach could be utilized even in case of system configuration change, such as wind generation extension.

Key Words : Dynamic reserve, Reserve margin, Spinning reserve, Short-term reliability of balance, Forecasting error, Generator forced outage rate, Unit commitment

1. 서 론

전력계통 실시간 급전운영에 있어 수요와 공급의 균형을 맞춰 주파수를 적정 범위 내에 유지하는 것은 안정적인 계통운영을 위한 필수조건이다. 수급균형을 방해하는 불확실성의 요소로는 수요의 예측오차와 더불어 발전기 탈락 또는 송전선 사고와 같은 외란을 생각할 수 있는데, 계통운영자는 급전계획을 수립할 때 이러한 불확실성을 고려해서 수요를 초과하는 발전력, 즉 예비력 확보를 통해 수요 변화 및 불시의 고장 등에 대응해 왔다.

최근 화석연료의 고갈 및 환경문제 등으로 인해 신재생 전원의 계통 도입이 활발해지고 있고, 이들 전원의 대형화로 인해 계통에 미치는 영향을 간과할 수 없는 시점에 이르렀다. 신재생 전원의 출력 예측 및 제어의 어려움으로 인해 계통운영시의 수급균형을 유지하는데 불확실성이 증가되었는데, 특히 신재생 전원의 출력이 예측한 것보다 낮은 저출력시에 단기적인 공급력 부족을 초래할 수 있어 추가적인

수급조정 능력의 확보가 필요하다. 또한 신규 발전소 건설 입지의 부족으로 인해 기존 발전소를 확충하고 있어 발전단지가 대규모화 되고 있는데, 발전소 인입 송전선의 사고 또는 발전기의 탈락이 계통 신뢰도에 미치는 영향이 커져, 사고 시 수급균형이 더욱 어려워지고 있는 실정이다.

계통운영 단계에서 “수요의 변동 및 사고가 발생한 경우 적정 주파수를 유지하고 안정적인 전력공급을 수행하기 위한 발전력”을 포괄하여 운영예비력이라 하며, 계통에 투입되어 있는지 여부에 따라 순동예비력과 비순동예비력으로 나뉜다. 순동예비력은 계통운영자가 수요 변화, 신재생 전원의 출력 변동, 발전기 정지 등과 같은 불확실성 하에서 빠른 응답으로 주파수 유지를 수행한다. 순동예비력을 많이 확보하면 수급조정에 이용할 수 있는 공급 유연성이 늘어나 결과적으로 계통 운영단계에서의 공급 신뢰도를 향상시킬 수 있지만, 추가적인 발전기의 투입 및 발전량 배분으로 운영비용 상승을 초래하기 때문에 적절한 수준의 순동예비력 확보는 계통의 안정성과 경제성 측면에서 매우 중요한 문제이다.

순동예비력의 산정 방안에 대해서 많은 연구들이 수행되었는데, 문헌 [1-2]는 계통에서의 적정 예비력 기준을 제안하고, 과거 자료를 이용한 분석을 통해 이를 검토하였다. 최근에 수행된 연구는 신재생 전원의 출력 불확실성을 고려한 논문이 주를 이루는데, 문헌 [3]에서는 태양광발전의 예측오차와 수요 예측오차를 확률적으로 모델링하여 정전비용을 포함한 전체 비용을 최소화 하는 예비력을 결정하였으며, 문헌 [4-6]에서는 풍력발전단지의 발전량과 예측오차 및 수요 예측오차에 대한 확률적 모델링을 통해 풍력발전단지를 운

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea

** Wind-energy Grid Adaptive Technology Research Center, Researcher, Chonbuk National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea

E-mail : parkjk@snu.ac.kr

Received : July 5, 2013; Accepted : October 2, 2013

영할 때 필요한 적정 순동예비력을 구하였다. 문헌 [7-9]에서는 각각 확률적 최적조류계산, 확률적 발전기동정지계획을 이용하여 풍력발전의 도입으로 인해 발생하는 불확실성을 해결하기 위한 예비력을 산정하였다.

하지만 이들 연구에서는 신재생 전원의 대규모 계통 도입으로 인해 증가된 불확실성과 수요 예측오차 및 발전기 탈락 등 계통운영 시 발생할 수 있는 요소들을 종합적으로 고려해서 순동예비력을 산정하고 있지 않다. 이에 대해 문헌 [10-11]에서는 수요 예측오차와 풍력발전 예측오차를 확률적으로 모델링하여 운영예비력을 산정하였지만, 시간대별로 변하는 발전기 병입 상황을 고려하지 않았으며 산정된 예비력을 적용하여 시간대별 수요에 대한 발전기동정지계획을 수행하지 않았다. 특히 국내계통의 경우 수요의 급격한 증가로 예측오차가 커졌고, 발전단지의 대규모화로 인하여 발전기 탈락이 계통에 미치는 영향이 증가한 점을 감안하면, 계통의 수급균형을 안정적으로 유지하기 위해선 위의 세 가지 불확실성 요소, 즉 수요 및 신재생 전원의 예측 오차, 발전기 탈락사고를 종합적으로 고려하여 계통상황에 맞는 순동예비력 산정이 필요하다.

본 논문에서는 신재생 전원으로서 가장 대규모로 계통에 연계되고 있는 풍력발전을 고려하였다. 수요 및 풍력발전 예측오차, 발전기의 탈락사고를 확률적으로 모델링하고 일정 신뢰수준 하에서 수급균형을 만족하는 적정 순동예비력 산정 방안을 제안한다. 기존의 순동예비력은 발전기 단일 상정고장시의 최대 탈락량과 같이 시간에 관계없이 일정량을 확보하는데, 이는 수요 예측오차가 크거나 발전기 탈락사고가 미치는 영향이 큰 시간대에는 예비력이 부족하여 단기적인 공급력 부족을 초래할 수 있고, 반대로 수급불균형의 위험이 적은 시간대에는 예비력의 과도한 확보로 비용측면에서 효율적이지 못하다. 제안하는 방안은 수요 예측오차, 풍력발전 예측오차, 발전기의 탈락사고의 확률 및 그에 따른 여파가 발생시점에 따라 다르다는 점에 착안하여, 순동예비력을 시간대별로 정한다. 즉, 수요 및 풍력발전 출력의 예측오차, 발전력 탈락을 각 시간에 대해 확률적으로 모델링하고, 이들 불확실성 요소로 인해 단기적인 공급력 부족이 발생할 확률로부터 단기 수급균형 신뢰도를 정의하여 단기 수급균형 신뢰도를 일정 수준으로 유지하기 위한 순동예비력의 확보를 통해 불확실성 환경 하에서도 안정적인 계통운영을 가능하게 하는 순동예비력 산정방안이다.

이를 위해 2장에서는 순동예비력의 정의와 역할에 대해 설명한다. 3장에서는 제안하는 시간대별 순동예비력의 정식화와 불확실성 요소로 고려하고 있는 수요 예측오차, 풍력발전 예측오차, 발전력 탈락의 확률분포를 모델링한다. 4장에서는 사례연구를 통해 공급 신뢰도 측면에서 제안한 방법의 유효성을 입증한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 의의 및 결론을 내린다.

2. 순동예비력의 정의와 정식화

2.1 순동예비력의 정의

순동예비력은 비순동예비력과 함께 운영예비력에 포함되며, 운영예비력 중 즉시 투입이 가능한 예비력을 의미한다.

이에 대한 정확한 정의를 표 1에 정리하였다[2].

표 1 운영예비력의 정의

Table 1 Definition of Operating Reserve

	정의
운영예비력 (Operating Reserve)	모든 시간에 대해 전력공급과 수요 사이의 불균형에 사용되는 예비력.
순동예비력 (Spinning Reserve)	주파수 변동에 대한 반응이 가능하고, 즉시 투입이 가능한 예비력. 순동예비력을 보유한 발전기는 그 시간에 켜져 있어야 함.
비순동예비력 (Non-spinning Reserve)	순동예비력과 비슷하지만, 주파수에 자동 반응하거나 즉시 투입이 가능할 필요가 없음. 비순동예비력을 보유한 발전기는 그 시간에 켜져 있을 필요는 없음.

표 1에 보이는 바와 같이, 운영예비력은 수요 변동 또는 운전 중인 발전기들의 사고 발생 시 계통에 병입된 발전기 또는 순시병입이 가능한 발전기들의 출력 조절을 통해 속응성 있게 수요를 감당함으로써 주파수를 유지하여 계통의 안정성을 확보하는데 목적이 있으며, 이 중에서 순동예비력은 수요 변동, 사고 발생과 같은 계통 상황의 변화에 빠른 출력 조절로 대응하여, 수급 균형을 맞추어 주파수 유지를 수행한다[2]. 이를 위해 순동예비력은 운전 중인 발전기들 중에서, 특히 가스 터빈 발전기와 같이 증감발 능력이 우수한 발전기들의 GF(Governor Free), AGC(Automatic Generation Control)를 자원으로 사용한다. 수요와 공급에 차이가 발생하면 주파수는 GF에 의해 1차 지연계를 따라 변화한다. 이는 주파수 변화속도를 늦추기 위해 발전기가 자체적으로 축회전수의 변화량에 비례하여 발전량을 제어하는 것으로 응답속도가 빠르다. 하지만, 빠른 응답을 위해 비례제어만 수행하기 때문에 이미 벗어난 주파수를 기준 주파수로 복귀시키지는 못한다. 이를 위한 추가적인 제어를 수행하는 것이 AGC로써, 계통 주파수를 기준 주파수로 되돌리기 위해 필요한 제어량을 적분제어 형태로 구하고 이를 대상 발전기들에 적절히 분배하는 형태로 구현된다. 순동예비력은 발전기들의 출력제어, 즉 재급전(re-dispatch)을 통한 주파수 제어도 수행한다.

2.2 시간대별 순동예비력의 정식화

본 논문에서는 수요 및 풍력발전 예측오차, 발전기 탈락사고의 발생확률 및 심각도가 시간에 따라 다르다는 점에 착안하여 시시각각 변하는 계통상황을 고려하기 위한 시간대별 순동예비력 산정 방안을 다음과 같이 제안한다. 문헌 [10]에서는 수급균형을 이루는 확률을 이산확률분포로 모델링 하였다. 하지만 본 논문에서 고려하는 수요 예측오차와 풍력발전 예측오차의 연속확률분포로 표현되어야 하기 때문에, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

t 시간에서의 순동예비력을 $M(t)$ 만큼 확보한 경우, 수요

및 풍력발전의 예측 오차, 발전기 탈락사고를 고려해서 수요가 공급을 초과할 확률, 즉 수급불균형 발생확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(m > M(t)) = P(G^t + L^t + W^t > M(t)) \tag{1}$$

$$= \sum_{x=0}^{G_{total}} [P(G^t = x) \times P(m | L^t + W^t > m - x)]$$

여기서,

- Gt : 시간 t에서의 발전력 탈락 확률변수
- Lt : 시간 t에서의 수요 예측오차 확률변수
- Wt : 시간 t에서의 풍력발전 예측오차 확률변수
- Gtotal : 시간 t에서의 총 발전량, 즉 기동정지계획 결과 t시간에 투입되는 발전기들의 최대발전량의 합
- M(t) : 시간 t에서의 순동예비력 산정량

시간 t에서 수요가 공급을 초과할 확률은 본 논문에서 고려하는 세 가지 불확실성 요소들인 수요 예측오차, 풍력발전 예측오차, 발전기 탈락사고를 확률적으로 모델링하고 이들의 합성곱(Convolution)을 구한 값이 산정한 순동예비력 M(t)를 초과할 확률로 계산되며, 이는 세 가지의 불확실성 요소로 인해 수급균형을 이루지 못할 확률을 의미한다.

따라서 식 (1)을 바탕으로 순동예비력을 M(t)만큼 확보한 경우, 불확실성 환경 하에서의 수급균형 유지 확률을 나타내는 단기 수급균형 신뢰도 지수 N(%)을 식 (2)와 같이 정의한다.

$$N = [1 - P(m > M(t))] \times 100 (\%) \tag{2}$$

식 (2)에서 보이는 단기 수급균형 신뢰도 N은 순동예비력을 M(t)만큼 확보하면, 수요 및 풍력발전 예측오차, 발전기 탈락사고에 의한 공급 또는 수요 측에 변동이 생겨도 N(%) 확률로 수급균형을 유지할 수 있음을 의미한다. 즉, N이 높은 값일수록 신뢰도가 높은 것을 의미한다.

위에서 정의한 단기 수급균형 신뢰도를 사용하여 수급균형 유지 확률을 일정 신뢰수준 이상으로 유지하는 순동예비력을 확보하도록 발전계획을 수립하면 안정적인 계통운영이 가능하다. 단기 수급균형 신뢰도 N(%)을 만족하는 순동예비력 Mt는 식 (3)과 같다.

$$M^t = \min(M(t) : P(m > M(t)) < 1 - \frac{N}{100}) \tag{3}$$

식 (3)의 해를 구하기 위해서는 본 논문에서 다루고 있는 세 가지 불확실성 요소들에 대한 확률분포를 모델링 할 필요가 있다.

3. 불확실성 요소의 확률분포 모델링

3.1. 수요 예측오차의 시간대별 확률분포

그림 1은 2009년의 수요예측 데이터를 바탕으로 만든 각

계절의 시간별 평균수요 예측오차 그래프[12]이다. 그림에서 보이는 바와 같이 수요 예측오차는 계절별, 시간대별로 다르다. 시간대에 따라 수요 예측오차의 평균이 다르다는 것은 수요 예측오차 확률분포에서 표준편차가 시간에 따라 다른 것을 의미하는데, 이는 수요자의 전력 사용패턴에 따른 비선형성에 기인한다[13]. 이와 같은 이유로 시간에 따라 수요에 의한 불확실성 정도가 다르기 때문에, 모든 시간에 대해 일정한 신뢰도를 유지하면서 동시에 비용 효율적으로 순동예비력을 확보하기 위해서는 순동예비력 산정 또한 시간에 따라 다르게 해야 한다.

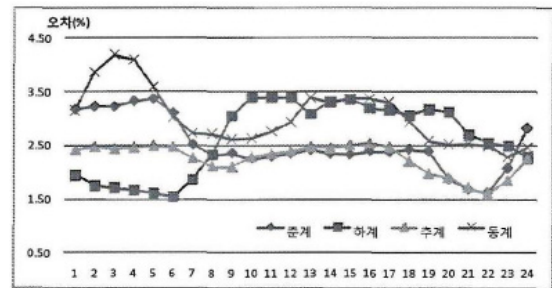


그림 1 2009년 각 계절의 시간별 수요 예측오차율 [12]
Fig. 1 Hourly Demand Forecasting Error Rate of Each Season in 2009

수요예측 오차의 시간별 확률분포는, 각 시간대별로 가지는 최대 수요에 대한 오차율의 통계로부터 만들 수 있다. 시간별 수요 오차율의 산정방법은 아래와 같다.

$$TE_i = \frac{1}{i} \sum_i \frac{|AD_i - ED_i|}{AD_i} \times 100 (\%) \tag{4}$$

여기서,

- TEt : 시간 t의 수요 예측오차율 (%)
- i : 분석 기간에서의 시간대 t
- ADi : 시간 t에서의 수요 실적(Actual Demand)
- EDi : 시간 t에서의 예측 수요(Expected Demand)

한편 수요의 확률분포는 예측수요를 평균으로 하는 정규분포를 따른다는 연구결과[14]로부터, 수요 예측오차인 $AD_i - ED_i$ 의 확률분포는 평균이 0인 정규분포를 가진다고 생각할 수 있다. 따라서 수요 예측오차의 절댓값인 $|AD_i - ED_i|$ 는 0 이상의 범위에서 반정규분포를 따르게 되며, AD_i 의 표본 값이 서로 큰 차이가 없으며 분석기간이 충분히 길어 i 값이 충분히 크다고 가정하면 반정규분포의 평균은 식 (5)와 같다[15].

$$E(|AD_i - ED_i|) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_i = \frac{1}{i} \sum_i |AD_i - ED_i| \tag{5}$$

$$= AD_i \times \frac{TE_i}{100}$$

이 때 $AD_i \approx ED_i$ 라고 가정하면

$$E(|AD_t - ED_t|) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_t \approx ED_t \times \frac{TE_t}{100} \quad (6)$$

따라서 시간 t에서의 오차율이 TEt 일 때, 수요 예측오차의 확률분포가 가지는 표준편차 σ_t 은 식 (7)과 같이 정리된다.

$$\sigma_t = ED_t \times \frac{TE_t}{100} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (7)$$

3.2 풍력발전 예측오차의 확률분포

풍속은 시시각각 변하기 때문에 풍력발전 예측 값은 시간에 따라 변한다. 또한 예측된 풍력발전량에 따라 오차가 다른 분포를 갖기 때문에[11], 풍력발전의 불확실성을 나타내는 예측오차도 시간에 따라 다르게 모델링 되어야 한다. 문헌 [11]에서는 풍력발전 예측오차의 확률분포가 풍력발전 예측 값을 Class 1부터 Class 5까지의 다섯 단계로 나누고, 이를 토대로 사례연구를 진행하였다. Class의 값이 커질수록 풍력발전 예측량이 크다는 것을 의미하며, 데이터는 총 용량이 470MW인 4개의 풍력발전단지에서 2006년부터 2011년까지 진행하여 구하였다. 그 결과를 토대로 풍력발전 예측오차에 대한 히스토그램을 그리고, 이를 확률분포로 모델링한 결과

각각의 Class에 대해 풍력발전 예측오차의 확률분포는 감마 분포로 모델링 되는데, 예측되는 풍력발전의 출력 수준에 따라 그림 2에 보이는 바와 같이 구분할 수 있다.

그림 2를 살펴보면 Class 3을 중심으로 Class 1, 2는 양의 방향으로 오차가 발생하기 쉽고, Class 4, 5는 음의 방향으로 오차가 발생하는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이는 풍력발전의 예측 출력이 Class 4, 5인 경우는 출력이 과대평가되어 예측오차가 음의 값을 가지는 방향으로 분포하기 쉽다는 것을 의미한다. 즉 예측된 출력보다 높은 쪽으로 오차가 발생하는 경우보다는 낮은 쪽으로 발생할 확률이 높으며, 반대로 예측 출력이 낮은 Class 1, 2인 경우는 대체로 발전량이 과소평가되어 예측오차가 양의 값을 가지는 방향으로 분포하기 쉽다.

그런데 기존의 감마분포는 $x > 0$, 즉 양수인 구간에서만 정의되기 때문에, 풍력발전 예측오차와 같이 양수값과 음수값을 동시에 가지기 위해선 감마분포의 확률밀도함수를 수정할 필요가 있다. 풍력발전 예측오차의 기대값을 0이라고 가정하면, 수정된 감마분포형태의 확률밀도함수는 기존의 감마분포 확률밀도함수에 대해 $-k\theta$ 만큼 x축 이동한 것과 같다. Class 1, 2, 3에 대한 감마분포 형태의 확률분포함수는 식 (9)와 같다.

$$f(x;k,\theta) = \frac{(x-k\theta)^{k-1} e^{-(x-k\theta)/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)} \text{ for } x > 0, k > 0, \theta > 0 \quad (9)$$

한편 Class 4와 Class 5의 경우, 확률밀도함수의 모양이 Class 1, 2와 다르게 오른쪽으로 치우쳐있다. 이를 감마분포 형태로 나타내기 위해선 각각 Class 2, 1의 확률밀도함수를 y축 기준으로 대칭이동 해야 한다. 따라서 Class 4, 5의 경우 확률밀도함수는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. Class 5가 Class 4보다 오른쪽으로 더 치우쳐 있으므로, k의 값은 Class 5가 더 작은 값을 가진다.

$$f(x;k,\theta) = \frac{(-x+k\theta)^{k-1} e^{-(x-k\theta)/\theta}}{\theta^k \Gamma(k)} \text{ for } x > 0, k > 0, \theta > 0 \quad (10)$$

본 논문에서는 위 식을 토대로 모델링 된 풍력발전 예측 오차를 발전계획 수립기간 동안의 예측 풍력발전량에 적용하여, 각 시간에서의 공급예측오차의 확률분포를 나타내었다. 예측된 풍력발전량이 그림 3과 같은 경우, 다음과 같이

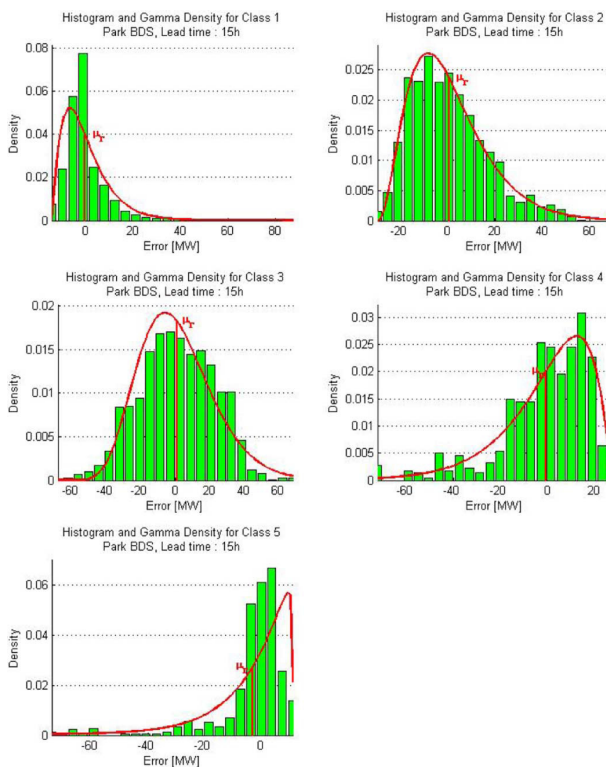


그림 2 풍력발전량의 수준(Class 1~5)에 따른 히스토그램 및 감마분포 형태로의 근사 [11]

Fig. 2 Histograms and Gamma-like Approximations of Forecast Errors of Each Wind Power Generation Level (Class 1~5)

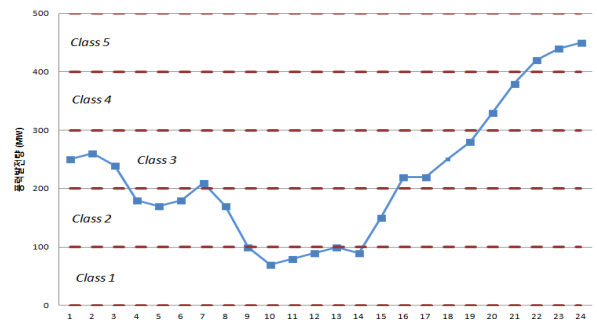


그림 3 하루의 시간대별 풍력발전량 예측치 및 Class 분류 Fig. 3 Hourly Forecasted Wind Generation in a Typical Day and Classification by 5 Classes (Class 1~5)

다섯 단계의 발전력 수준으로 나눈 뒤 각 시간대에 대해서 수준에 맞는 공급예측오차를 결정할 수 있다.

3.3 발전력 탈락의 확률분포

발전기 탈락사고의 시간대별 확률분포는 각 발전기의 발전량과 발전기의 사고정지율(FOR: Forced Outage Rate)을 이용하여 구할 수 있다. 발전기의 사고정지율이란 발전기가 운용 불가능한 상태에 있을 확률로, 고장 간 평균시간(MTTF: Mean Time To Failure)와 고장복구 간 수리시간(MTTR: Mean Time To Repair)을 이용해 그 값을 구할 수 있다[17].

본 논문에서는 1시간 단위로 발전력 탈락 확률분포를 구하기 때문에, 사고정지율은 1시간 이내에 발전기가 운용 불가능한 상태에 있을 확률로 정의한다. 즉 특정 시간에서 온라인 발전기가 탈락할 확률은 그 발전기의 FOR 값이 되며, 반대로 발전기가 탈락하지 않을 확률은 (1-FOR)의 값이 된다.

시간 t 에 대해 사고정지율이 일정하다고 가정한다면, 시간 t 에서 발전기가 발전하는 발전량과 사고정지율의 곱을 통해 발전기 탈락 용량에 대한 확률 분포를 구할 수 있다. 이 때 사고정지율이 일정하다고 가정하더라도 수요에 따라 발전기의 급전결과가 다르므로, 결과적으로 발전력 탈락의 확률분포는 시간에 따라 다르게 모델링해야 한다.

또한 발전력 탈락의 확률분포는 사고에 의해 탈락한 발전기의 총 발전용량이 아니고, 기동정지계획을 통해 정해진 해당 발전기의 급전결과만큼 발전력이 탈락 했다고 봐야 한다. 기동정지계획은 1시간 단위로 계통의 급전 계획을 수행하며 그 결과는 전력 수요 및 계통에 상황에 따라 시시각각 변하기 때문에, 발전기의 사고정지율이 일정하더라도 발전기의 탈락 사고에 의한 공급 용량 감소는 시간에 따라 다르다. 결론적으로, 각 발전기의 사고정지율이 일정하고 온라인 된 발전기 조합이 같을지라도 시간대별로 수요가 다르기 때문에 발전력 탈락 확률분포는 다르게 모델링이 된다.

표 2 발전기의 발전량과 사고정지율(FOR)의 예시
Table 2 Example of Generation Level and Forced Outage Rate of Each Generator (G1~G4)

	발전량 [MW]	사고정지율(FOR)
G1	100	0.02
G2	150	0.05
G3	150	0.01
G4	200	0.03

예로 임의의 시간에 대해 발전계획수립 결과가 표 2와 같은 경우, 발전기 사고에 의해 150MW 만큼의 공급력이 탈락할 확률은 4기의 발전기(G1~G4) 중에서 G2 또는 G3가 탈락하고 나머지 발전기는 정상동작할 확률이다. 따라서 시간 내에서 발전기 사고에 의해 150MW가 탈락할 확률은 식(11)과 같다.

$$P(150MW) = (1-0.02) \times (0.05) \times (1-0.01) \times (1-0.03) + (1-0.02) \times (1-0.05) \times 0.01 \times (1-0.03) = 0.056 \quad (11)$$

동일한 방법으로 시간 t 에서의 수요와 발전력이 탈락할 수 있는 모든 경우에 대해 확률분포를 구하면, 그림 4와 같다.

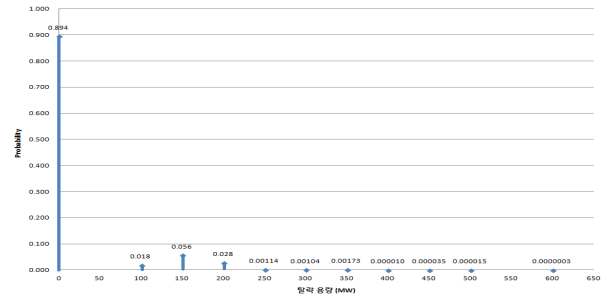


그림 4 발전기 발전량 및 FOR을 토대로 만든 발전력 탈락의 이산 확률분포

Fig. 4 Discrete Probability Distribution of Generation Rejection Based on Generator Output and FOR

발전력 탈락 확률분포는 수요 예측오차나 풍력발전 예측오차의 확률분포와는 다르게 그림 4에 보이는 것과 같이 0 MW 이상의 범위에서 이산 확률분포를 가진다. 이는 발전기 기동정지계획에서 각 발전기에 정해진 발전량의 조합으로 탈락용량이 결정되기 때문이다. 시간대별 순동예비력을 산정하기 위해 필요한 수급불균형 발생확률을 계산하기 위해서는 식 (1)에서처럼 먼저 이산적인 Gt의 값을 기준으로 하고 나머지 연속확률분포로부터 확률을 구하여 그 합을 통해 전체 확률을 구하는 과정을 거친다.

3.4 시간대별 순동예비력 산정 알고리즘

위에서 제시한 수요 및 풍력발전 예측오차, 발전기 탈락 사고에 대한 확률분포를 토대로 식 (3)을 풀면 각 시간에서의 신뢰도 기준을 만족하기 위한 순동예비력 용량을 결정할 수 있다. 이 중 발전력 탈락 확률분포는 발전계획이 수립된 이후, 즉 각 발전기의 급전량이 정해진 이후에 구할 수 있으며, 본 논문에서는 기동정지계획을 이용하여 한 시간 단위의 급전계획을 고려하였다. 따라서 각 시간별 적정 순동예비력 산정을 위해서는 기동정지계획 수립이 선행되어야 하며, 이 문제 해결을 위한 알고리즘을 그림 5에 보인다.

Step 1. 각 시간에서 확보해야 할 순동예비력을 0으로 두고 발전기의 기동정지계획을 수립한 후, 발전력 탈락의 확률분포를 구한다.

Step 2. 각 시간에서의 수요 예측오차와 풍력발전량의 Class를 토대로 수요 예측오차와 풍력발전 예측 오차의 확률분포를 구한다.

Step 3. 각 시간에 대해 식 (3)을 만족하는 순동예비력을 산정하고, 수립하면 그 값을 순동예비력으로 결정한다.

Step 4. 수립하지 않을 시에는 Step 3에서 산정된 순동예비력을 기준으로 Step 1부터 다시 수행한다.

여기서 주목해야 할 점은 수요 예측오차 및 풍력발전 예측오차의 확률분포는 이후에 수행할 발전기 기동정지계획과

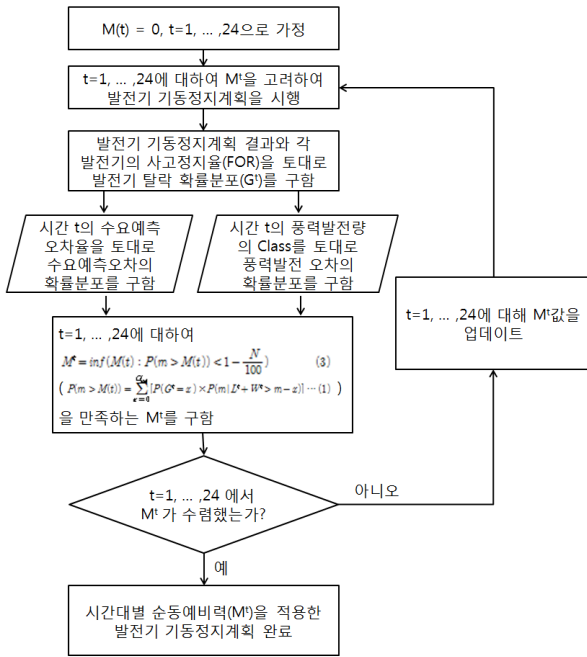


그림 5 시간대별 순동예비력 산정 알고리즘
Fig. 5 Solution Approach for Hourly Spinning Reserve Margin

관련이 없는데 반해, 발전력 탈락 확률분포는 전술한 바와 같이 발전기 기동정지계획의 결과에 영향을 받는다는 점이다. 수요 예측오차의 확률분포는 기존에 정해진 시간대별 수요 예측오차율을 토대로 만들어지며, 풍력발전 예측오차에 대한 확률분포는 풍력발전 예측량을 기준으로 5개의 Class로 나눠 각 Class에 대하여 각기 다른 풍력발전오차 확률분포를 적용하기 때문에 발전기 기동정지계획의 결과와는 관계가 없다. 하지만 발전력 탈락의 확률분포는 발전기가 탈락했을 때 발전기 용량 전체가 아니라 그 발전기의 급전량만큼 탈락한 것으로 모델링해야 하기 때문에, 확률분포를 만들기 위해선 먼저 발전기 기동정지계획의 결과가 필요하다. 동시에 발전기 기동정지계획에는 각 시간에 대한 예비력 산정량에 대한 조건도 같이 포함되기 때문에, 발전기 기동정지계획을 수행하기 위해선 반대로 시간대별 예비력 산정량의 결과가 필요하다. 따라서 시간대별 순동예비력 산정 알고리즘은 그림 5에서와 같이 회귀적인 형태로 나타내어진다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법의 유효성을 확인하기 위해 IEEE 118 모선 계통에 대해 사례연구를 수행하였다. 그림 6에 보이는 예측 수요 및 수요예측 오차율 데이터는 국내 전력계통의 2012년 7월 평일의 전형적인 수요데이터를 이용하였는데, IEEE 118 모선 계통과의 공급력을 고려하여 수요 데이터를 조정했다. 수요 예측오차율은 그림 1의 계절별 수요 예측오차율 중 하계 패턴을 선택하여 그림 6과 같이 나타내었다.

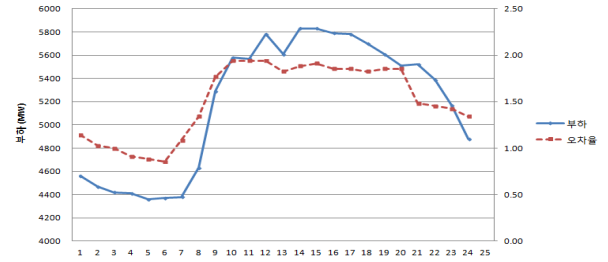


그림 6 사례연구의 수요예측치와 수요 예측오차율
Fig. 6 Forecasted Demand and Forecasting Error Rate of Case Study

한편 발전기 탈락과 관련된 사고정지율(FOR) 데이터는 문헌[18]을 참고하여 같은 비용함수를 가지는 발전기 별로 종류를 나누어 표 3과 같이 사고정지율을 설정하였다.

표 3 IEEE 118모선 발전기 54대의 FOR
Table 3 Forced Outage Rate(FOR) of 54 Generators in IEEE 118 Bus

Type	Unit 번호	FOR
1	4, 5, 10, 29, 36, 40, 43, 44, 45	0.00015
2	7, 14, 16, 19, 22, 23, 26, 34, 35, 37, 47, 48, 51, 52, 53	0.0003
3	33, 41, 46, 49	0.00025
4	20, 21	0.0001
5	1, 2, 3, 6, 8, 9, 12, 13, 15, 17, 18, 31, 32, 38	0.0002
6	11, 39	0.00025
7	59, 61	0.00025
8	42, 50, 54	0.0001
9	27, 28	0.0002
10	30	0.0001

풍력단지의 발전용량은 500MW로 설정하였으며, 각 시간별 예측 풍력발전량 및 예측오차율의 Class 분류는 그림 3과 같다. 이 때 Class별 감마분포의 k, θ 값 및 확률분포는 식 (9)와 식 (10)을 이용하였으며, 그 결과는 그림 7과 같다.

사례연구에서는 다음 두 경우에 대해 시뮬레이션을 진행하였다.

Case 1 - 순동예비력을 고정된 일정량만큼 확보하는 경우. 즉, 계통운영단계에서 발생할 수 있는 불확실성 요소들의 시간적 특성을 고려하지 않고, 모든 시간에 대해 동일한 수준의 순동예비력을 확보하는 경우로서, 기존의 순동예비력 산정 방안.

Case 2 - 수요 및 풍력발전의 예측 오차, 발전기 탈락사 고라는 시간에 따라 다른 확률분포를 갖는 불확실성 요소 고려한 순동예비력으로, 본 논문에서 제안하는 방법.

여기서 사례별 비교를 위해 발전계획수립기간인 24시간 동안의 총 순동예비력 양을 동일하게 하였다. 일정량의 순동예비력을 확보하는 Case 1은 Case 2에서 확보하는 24시간 동안의 총 순동예비력의 평균으로 설정하였다.

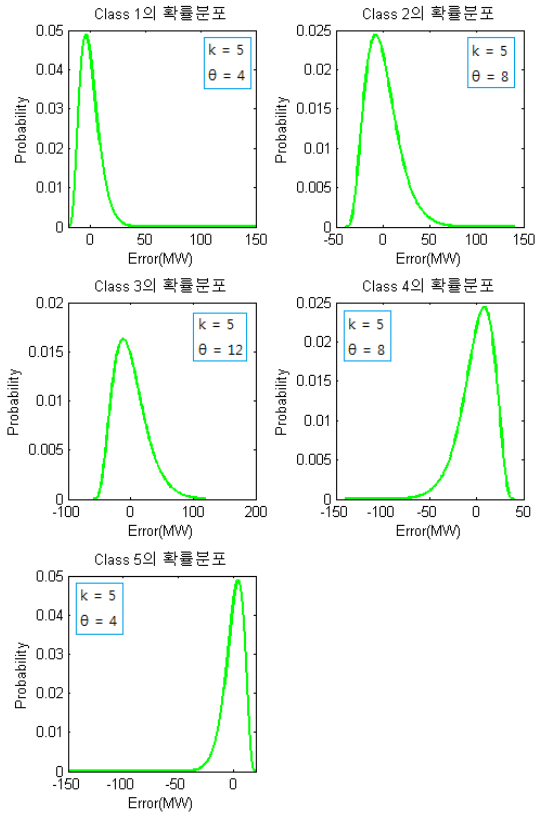


그림 7 Class별 출력예측오차 확률분포
 Fig. 7 Probability Distribution Function of Generation Forecasting Error of Each Class(1~5)

4.1 순동예비력 산정결과

그림 8은 Case 1과 Case 2의 순동예비력을 비교해서 나타내고 있다. Case 1의 경우 Case 2에서의 결과를 토대로 24시간 동안의 총 예비력 산정량의 평균인 288.3MW를 일정한 예비력 산정량으로 설정하였다. 그 결과 Case 1이 시간에 관계없이 288.3MW의 일정한 예비력을 가지는 것과 다르게, Case 2는 계통운영단계에서의 단기 수급균형에 영향을

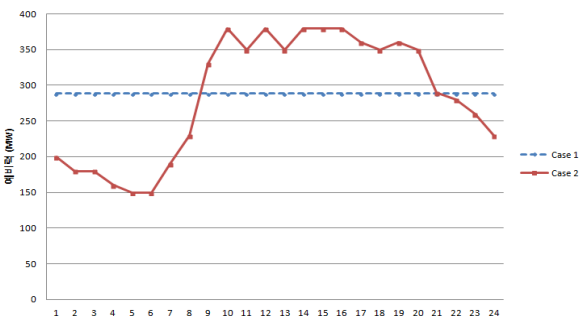


그림 8 Case 1(일정한 순동예비력 기준)과 Case 2(99.5% 단기 수급균형 신뢰도 유지)에 대한 시간대별 순동예비력 산정량
 Fig. 8 Hourly Spinning Reserve Margin of Case 1 (constant reserve margin in each hour) and Case 2 (based on 99.5% reliability)

주는 불확실성의 정도를 고려하기 때문에 시간에 따라 다른 순동예비력 산정을 보인다. 동일한 발전기 탈락사고 또는 수요 및 풍력발전의 변동이 발생하더라도 그 때의 계통 상황에 따라 수급균형에 미치는 영향이 다르기 때문에, 이를 고려해서 순동예비력을 고려해야 계통의 공급 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 그림 8에서, 1시~8시 및 21시~24시의 기간에는 불확실성이 작기 때문에 확보해야 하는 순동예비력이 적음을 알 수 있는데, 기존의 일정량만큼 확보하는 방법에 비해 비용 효율적이다.

표 4 순동예비력 산정량의 최대, 최소값 및 시간대 비교
 Table 4 Maximum, Minimum and Average of Spinning Reserve Margin

	최대값	시간대	최소값	시간대	예비력 평균
Case 1	288.3	-	288.3	-	288.3
Case 2	380	10,12, 14,15,16	150	5, 6	288.3

위 결과를 바탕으로 익일 발전계획의 수립기간인 24시간 동안의 순동예비력의 평균 및 최대, 최소값을 표 4에 정리하였다. 표 4의 결과처럼 Case 2에서는 예비력 산정량의 최대값은 수요와 수요 예측오차율이 상대적으로 큰 10시, 12시, 14시, 15시, 16시에 380MW로 가장 크게 나타났으며, 최소값은 수요가 적은 5시와 6시에 150MW로 산정된 것을 확인할 수 있다. 이는 수요 예측오차율이 커짐에 따라 수요 예측오차의 값이 증가하고, 동시에 수급균형을 맞추기 위해 발전기가 더 많이 들어오면서 발전력 탈락의 확률분포 또한 그 기댓값에 비례하여 증가했기 때문으로 해석할 수 있다.

또한 Case 1과 Case 2의 순동예비력 산정방법이 단기 공급 신뢰도에 미치는 영향을 분석하기 위해 수요 및 풍력발전 예측오차, 발전력 탈락을 고려한 불확실성 환경 하에서 수급균형을 유지할 확률을 구하였다. 그림 9에 순동예비력 산정방법에 따른 시간대별 단기 수급균형 신뢰도 결과를 보인다.

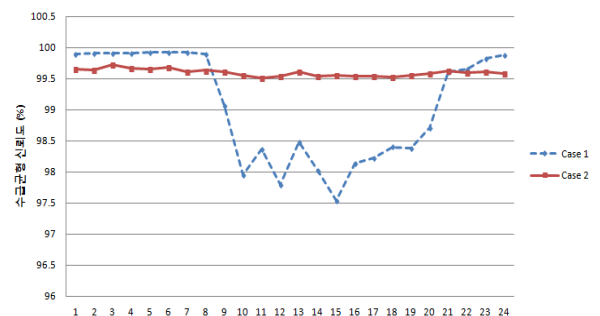


그림 9 단기 수급균형 신뢰도 분석
 Fig. 9 Hourly Reliability based on the Balance of Supply and Demand

그림 9에서 일정한 순동예비력을 확보하는 Case 1의 경우 계통상황에 따라 수급균형 유지확률이 변하며, 가장 낮은

15시에는 97.54%까지 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 수급균형 유지확률이 가장 낮은 15시는 최대수요시간(14시)이 아니며, 최대수요가 아니더라도 단기 수급균형 신뢰도가 최하일 수 있음을 의미한다. 이는 수요 예측오차 뿐 아니라 발전력 탈락 및 풍력 발전력의 예측오차가 복합적으로 작용하였기 때문이다.

반면, 제안한 순동예비력 산정방법은 수요변동에 의한 불확실성뿐만 아니라 풍력발전의 출력 불확실성, 발전력 탈락 불확실성과 같이 계통의 수급균형에서 생각할 수 있는 대표적인 불확실성요소에 대해 고려해서 순동예비력을 산정하기 때문에, 제안한 방법을 통해 순동예비력을 확보하면 결과적으로 계통의 공급 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

4.2 풍력단지의 발전용량을 1 GW로 증가시킨 경우의 순동예비력 산정 결과

본 논문에서 제안하는 순동예비력 산정방법은 추가적인 풍력단지의 도입과 같은 계통구성의 변화에도 적용 가능한 유연성을 가진다. 추가적인 풍력발전단지의 도입으로 인해 기존 발전기의 발전량을 줄어든게 되지만, 풍력발전단지의 발전량은 풍속에 따라 변하기 때문에 발전량에 대하여 불확실성을 가지게 된다. 따라서 추가적인 풍력발전단지의 도입은 수급균형의 불확실성을 증대시키며, 이로 인해 단기수급균형신뢰도가 감소하게 된다. 단기수급균형신뢰도를 일정하게 유지하기 위해선 새로운 풍력단지가 계통에 도입되었을 때 순동예비력 산정량 또한 증가시켜야 한다.

이를 비교하기 위해 풍력단지의 발전용량이 500MW인 경우(시나리오 1)와 추가건설을 통해 풍력단지용량이 1,000MW로 증가한 경우(시나리오 2)의 순동예비력 산정 결과를 비교하면 그림 10과 같다.

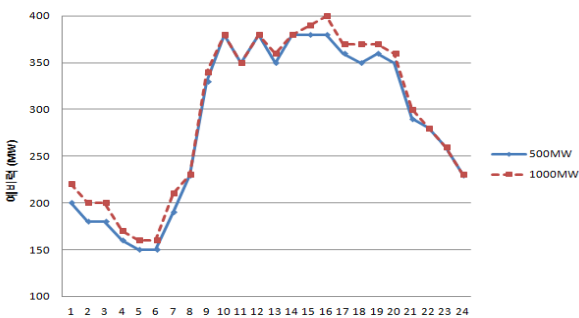


그림 10 풍력발전단지의 추가에 따른 시간대별 순동예비력 산정량의 비교 (시나리오1과 시나리오2)

Fig. 10 Spinning Reserve Margin of Each Hour (Scenario 1 and Scenario 2)

그림 10을 살펴보면 대부분의 시간에서 확보해야 하는 순동예비력 달라지는 것을 알 수 있다. 이를 보다 자세하기 보이기 위해 시나리오 1과 시나리오 2의 순동예비력 산정 결과 차이를 그래프로 나타내면 그림 11와 같다.

그림 11로부터 거의 모든 시간에 대해 약 10~20MW 정도의 순동예비력을 추가적으로 확보해야 하는데, 이는 수요와 발전기 사고 정지율이 동일한 경우라도, 풍력발전이 추가적

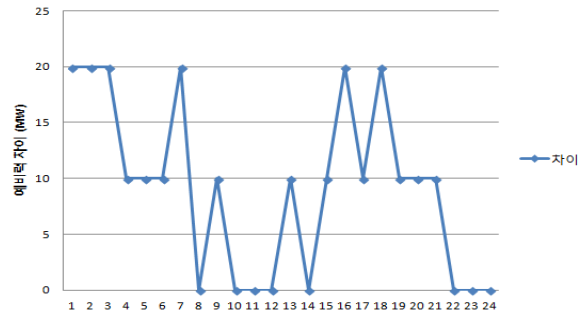


그림 11 풍력발전단지의 추가에 따른 시간대별 순동예비력 산정량 차이

Fig. 11 The Difference of Spinning Reserve Margin Between Scenario 1 and Scenario 2

으로 건설되면 수급균형에 미치는 불확실성이 증대되어 더 많은 순동예비력을 필요로 하기 때문이다. 이것은 향후 풍력발전과 같은 신재생 전원이 계속해서 계통에 연계되면 추가적인 단기 수급조정 능력이 필요함을 의미하는데, 제안하는 방법을 통해 추가확보 해야 할 순동예비력까지도 산정할 수 있다. 결론적으로 제안하는 시간대별 순동예비력 수급균형에서 발생할 수 있는 여러 계통 상황을 고려하기 때문에, 신재생 전원의 추가건설로 인한 계통변화에 대해 유연하게 대응할 수 있어 그 활용 가능성이 크다.

5. 결 론

본 논문에서는 순동예비력을 신뢰성 있고 효율적으로 산정하기 위해 기존의 일정한 순동예비력 기준이 아닌, 시시각각 변하는 계통상황을 고려한 순동예비력 산정방법을 제안하였다. 순동예비력은 공급측 또는 수요측의 불확실성 요인에 의해 수급불균형이 발생한 경우, 응동성이 우수한 발전기들의 출력조정을 통해 수급균형을 맞추어, 결과적으로 적정 주파수를 유지하고 안정적인 전력공급을 가능하게 한다. 수급불균형을 야기하는 불확실성 요인으로는 수요 예측오차, 풍력발전 예측오차, 발전기 탈락을 고려했는데 이는 시간에 따라 변하는 양상을 가진다. 따라서 본 논문에서는 이들 각각에 대한 시간대별 확률분포를 생성하고, 이를 바탕으로 단기 수급균형 신뢰도를 정의하였으며, 신뢰도를 일정 수준 이상으로 유지하기 위한 순동예비력을 산정하였다.

사례연구에서는 대규모 계통인 IEEE 118모선 계통에 적용하였으며, 결과를 수급균형 유지확률이라는 공급 신뢰도를 중심으로 고찰하였다. 제안한 방법은 각 시간대에서 수요예측오차가 높을수록, 예측 풍력발전량이 클수록 순동예비력을 많이 확보하는 등, 계통상황에 따라 확보하는 순동예비력이 시시각각 변한다. 수요 및 풍력발전, 발전기 탈락사고에 의한 불확실성을 고려하지 않고 일정량의 순동예비력을 확보하는 기존 방법보다 수급균형 유지확률을 높여 계통의 공급 신뢰도 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다. 풍력발전 단지 추가 건설 사례를 통해, 본 논문에서 제안하는 순동예비력 산정 방법은 일정 수급균형 신뢰도를 유지할 수 있게 해준다는 점에서, 향후 신재생 전원이 확대 도입되는 경우와

같이 계통구성이 변해도 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

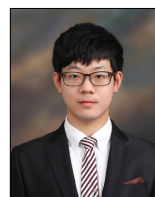
감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0028509).

References

- [1] Dae-Hoon Ahn, Seok-Kee Kwon, etc., "A research of optimum supply reserve levels for stability of power system", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No.9, pp.55-61, 2008.
- [2] Seong-Ho Ryu, etc. "A Study on Operation Standards for Optimal Operating Reserve in Electricity Market", The Transactions of Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.52A, No.5, pp.287-293, 2003.
- [3] Masaru Asada, Pyoichi Hara, Hiroyuki Kita, "A Study on Adequate Level of Generation Reserve Margin Based on Stochastic Evaluation of Operational Cost with Large Penetration of Photovoltaic Generations", The Journal of International Council on Electrical Engineering, pp.370-376, Vol.2 No.4, 2012.10
- [4] Erik Ela, Brendan Kirby, etc. "Evolution of Operating Reserve Determination in Wind Power Integration Studies", Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010.
- [5] Ronan Doherty, Mark O'Malley, "A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems with Significant Installed Wind Capacity", IEEE Transactions on Power Systems, pp.587-595, Vol.20 No.2, 2005
- [6] Miguel A. Ortega-Vazquez, Daniel S. Kirschen, "Estimating the Spinning Reserve Requirements in Systems With Significant Wind Power Generation Penetration", IEEE Transactions on Power Systems, pp.114-123, Vol.24 No.1, 2009
- [7] T. Yong, R. Enriken, P. Zhang, "Reserve Determination for System With Large Wind Generation", Proceedings of Power & Energy Society General Meeting, Canada, 2009
- [8] Francois Bouffard, Francisco D. Galiana, "Stochastic Security for Operations Planning with Significant Wind Power Generation", IEEE Transactions on Power Systems, pp.306-316, Vol. 23 No.2, 2008
- [9] Pablo A. Ruiz, C. Russ Philbrick, Peter W. Sauer, "Wind Power Day-ahead Uncertainty Management through Stochastic Unit Commitment Policies", Proceedings of Power Systems Conference and Exposition, Seattle, WA, 2009
- [10] Manuel A. Matos, R.J. Bessa, "Setting the Operation Reserve Using Probabilistic Wind Power Forecasts", IEEE Transactions on Power Systems, pp.594-603, Vol.26 No.2, 2011
- [11] Menemenlis, N., Huneault, M., Robitaille, A., "Computation of Dynamic Operating Balancing Reserve for Wind Power Integration for the Time-Horizon 1-48 Hours", Sustainable Energy, IEEE Transactions on Vol.3, Issue 4, pp.692-702, 2012.
- [12] Jong-Uk Lee, Young-Min Wi, etc, "Analysis of Load Forecasting Error for Improving the Accuracy of the Short-term Load Forecasting", KIEE Fall Conference for Electrical Installation Committee, pp.171-172, 2010.
- [13] Kyung-Bin Song, Seong-Kwan Ha, "An Algorithm of Short-Term Load Forecasting", The Transactions of Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.53A, No.10, pp.529-535, 2004.
- [14] Rui Bo, Fangxing Li, "Probabilistic LMP Forecasting Considering Load Uncertainty", Power Systems, IEEE Transactions on Vol.24, Issue 3, 2009.
- [15] J. Martin Bland, "The Half-Normal distribution method for measurement error: two case studies", 2004. Retrieved October. 9th, 2013, from <http://www-users.york.ac.uk/~mb55/talks/halfnor.pdf>
- [16] R. V. Hogg, A. T. Craig, "Introduction to Mathematical Statistics", 4th edition. New York: Macmillan, 1978
- [17] Roy Billinton, Ronald N. Allen, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1996
- [18] Patton, A.D., "Short-Term Reliability Calculation", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Vol.89, Issue 4, pp.509-513, 1970

저 자 소 개



권경빈 (權景彬)

1989년 6월 8일 생. 2012년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2012년~현재 동 대학원 전기공학부 석사과정

Tel : 02-880-7258

E-mail : kwon8906@naver.com



박 현 곤 (朴 洙 坤)

1986년 7월 25일 생. 2011년 연세대학교
전기전자공학부 졸업. 2011-현재 서울대
학교 전기공학부 석·박사 통합과정

Tel : 02-880-7258

E-mail : hyeongon@snu.ac.kr



류 재 근 (柳 在 根)

1982년 5월 6일 생. 2006년 일본 신슈대
학교 전기전자공학과 졸업. 2013년 서울
대학교 전기공학과 석박사통합과정 졸업
(공학박사). 2013년 8월~현재 전북대 풍
력에너지전력망적응기술연구센터 연구원

Tel : 02-880-7258

Fax : 02-878-1452

E-mail : handyjack@snu.ac.kr



김 유 창 (金 裕 昶)

1982년 9월 8일 생. 2005년 서울대학교 전
기공학부 졸업. 2005-현재 서울대학교 전
기공학부 석·박사 통합과정

Tel : 02-880-7258

E-mail : kycherol@snu.ac.kr



박 종 근 (朴 鍾 根)

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대학교
전기공학부 졸업. 1979년 일본 동경대학
교 공학계대학원 졸업(공학석사). 1982년
동대학원 졸업(공학박사). 1983년~현재
서울대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-880-7247

Fax : 02-878-1452

E-mail : parkjk@snu.ac.kr