

## 원자력 발전기 확대에 따른 계통 안정 운영 방안에 관한 연구

이하림\*, 전영환\*, 한태경\*\*  
홍익대학교\*, 경원대학교\*\*

### A Study on a Safe Power System Operation Despite to an Increase of Nuclear Plants

Ha-Lim Lee\*, Young-Hwan Chun\*, Tae-Kyung Han\*  
Hongik University\*, Kyungwon University\*

**Abstract** - 제 4차 전력 수급 기본 계획에 의하면 2022년 계통에는 총 32기의 원자력 설비와 신재생 설비 용량의 약38%를 차지하는 풍력 설비가 신규 도입 된다는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 원자력과 신재생 에너지원은 화력 설비에 비해서 부하추종 능력이 저조하여 이 두 설비의 비율을 높이면 계통 운영에 심각한 문제를 발생 시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 2022년 off-peak 계통 상황에서의 원자력 설비 32기가 모두 연계되었을 때, 계통 주파수의 안정도를 분석하고자 하였다. 이를 위해 계통에서 사용하는 각종 정수를 추정하고 이것을 이용하여 주파수 분석 시뮬레이션 tool을 통해 주파수 변화를 모의 하였다. 최종적으로 2022년 계통에서의 최적 전원 설비 구성을 제안하고자 한다.

#### 1. 서 론

최근 이어지는 화석 연료 에너지 가격의 급등 문제, 환경 문제, 그리고 범국가적인 차원에서 진행되고 있는 국가 에너지 기본 계획 및 전력 수급 기본 계획으로 인하여 미래 계통에서는 화석 연료 발전 설비 보다는 원자력 발전기 및 신재생 설비가 증가 할 것이라고 전망 할 수 있다. 원자력 설비의 경우 부하추종이 어렵고 갑작스러운 기동에는 많은 시간이 걸린다는 단점이 있다. 그렇기 때문에 수요의 변화에 유연한 대처가 어렵고 이로 인해 계통의 안정적인 운영에 많은 문제가 발생 할 수 있다. 현재 세워진 제 4차 전력 수급 기본 계획을 바탕으로 2022년 계통의 off-peak 상황에서 수요에 대한 예측이 가능하다. 시뮬레이션 tool을 이용하여 원자력 설비가 계통 주파수에 영향을 미치지 않고 예측 수요를 충분히 공급 할 수 있는가를 연구하였다. 그 연구 결과를 바탕으로 미래에 일어날 사고를 방지할 수 있고 또한 신속한 대처가 가능하다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 2022년 계통에서 각 정수의 추정

본 논문에서 사용한 계통 정수는 크게 4 가지이다. 주파수 응답의 1차 응답과 관련된 발전기 정수  $KG$ , damping과 관련된 관성 계수  $H$ 와 부하 정수  $KL$  그리고 계통 정수  $KS$ 를 추정하는 방법에 대해 살펴 보겠다.

- $C$  = Unit capacity (base)
- $G$  = Unit 발전량
- $N$  = Nuclear generator
- $NN$  = Non-nuclear generator
- $i$  = Total generator

##### 2.1.1 발전기 정수

원자력 설비에는 부하 추종 능력이 없다고 가정했기 때문에 원자력 설비의 발전기 정수는 0이다.

$$KG_{NN} = \frac{\sum_{NN} (KG_{NN} \times C_{NN})}{\sum_{NN} C_{NN}} \quad (1)$$

원자력 설비들을 제외한 다른 설비들의 발전기 정수는 식 (1)을 통해 구한다. 설비 고유의 발전기 정수와 해당 설비의 용량을 곱하여 모두 더한 후 총 설비 용량으로 나눈다.

##### 2.1.2 원자력 설비의 관성

$$H_N = \frac{\sum_N (H_N \times C_N)}{\sum_N C_N} \quad (2)$$

원자력 설비의 관성은 해당 원자력 설비의 관성에 해당 원자력 설비의 용량을 곱한 후 총 원자력 설비 용량으로 나눈다.

##### 2.1.3 기타 설비의 관성

$$H_{NN} = \frac{\sum_{NN} (H_{NN} \times C_{NN})}{\sum_{NN} C_{NN}} \quad (3)$$

원자력 설비가 아닌 설비의 관성에 해당 설비의 용량을 곱한 후 원자력 설비를 제외한 총 설비 용량으로 나눈다.

##### 2.1.4 부하 정수

$$KL = \sum_i G_i \text{의 } 1 \sim 2 \% \quad (4)$$

In-service 된 모든 설비들의 발전량 총합의 1~2%로 산정한다. 본 연구에서는 편의상 3이라 정하였다.

##### 2.1.5 계통 정수

$$KS = KG_{NN} + KL \quad (5)$$

전체 계통의 정수는 발전기 정수와 부하정수의 합으로 표현된다. 원자력 설비들은 부하추종을 하지 않는다고 가정했기 때문에 발전기 정수는 원자력을 제외한 설비들을 이용하여 구한 값을 사용한다.

#### 2.2 주파수 모의 Simulation

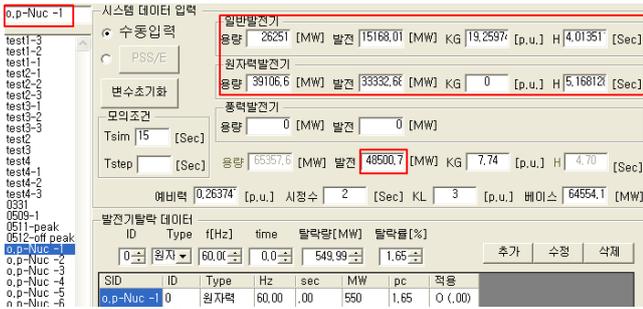
##### 2.2.1 Simulation 개요

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 tool은 자체 개발 프로그램으로써 발전 설비 출력에 따른 주파수의 변화에 대한 모의가 가능하다. 기존의 PSS/E tool은 시간이 오래 걸리고 프로그램의 수정이 불가능하다는 단점이 있다. 또한 조작 편의성에서도 기존 tool에 비해 뛰어난다는 장점이 있다.

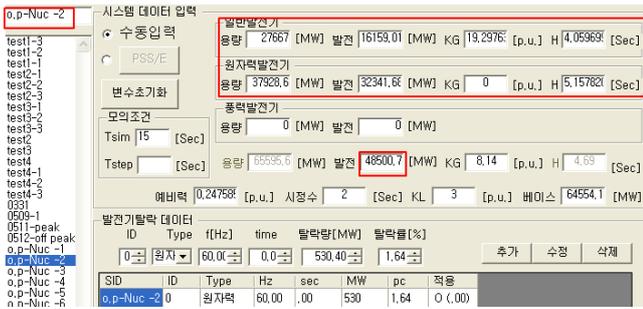
한국 전력 거래소에서 제공받은 2022년 off-peak data 파일을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. Off-peak data는 peak data의 부하량이 60%라고 가정하여 생성하였다. Peak 상황에서는 예비력이 많고 다수의 발전 설비들이 기동되고 있기 때문에 주파수 안정에 문제를 일으키지 않을 것이라 볼 수 있다. 그래서 본 논문에서는 최소의 설비만이 online 되어있는 off-peak 부하를 고려하였다. 또한 제 4차 수급 기본 계획에 따르면 2022년 까지 계통에 연계되는 원자력 설비는 총 32기 40320MW로써 시뮬레이션에 이를 반영하여 실증적인 결과가 되도록 하였다. 현재 까지 개발된 프로그램은 풍력의 용량 및 발전량에 대한 입력은 가능하지만 그 외에 풍력의 복잡하고 다양한 변화에 대한 구현은 차후 프로그램 업데이트를 통해 실현하고자 한다. 그래서 본 논문에서는 원자력만을 고려하여 시뮬레이션을 실시하였다.

2022년 off-peak 상황에서 원자력 32기가 모두 online 일 때 원자력 설비의 1기 탈락 사고에도 안정적으로 계통이 운영될 수 있는 설비 구성을 구하고자 한다. 시뮬레이션에서 정의한 안정적인 계통은 주파수가 59.8Hz 미만으로 내려가지 않는 계통이라 가정하였다.

##### 2.2.2 최대 원자력 투입 simulation 실행



〈그림 1〉 2022년 off-peak에서 원자력 31기에 대한 주파수 모의



〈그림 2〉 2022년 off-peak에서 원자력 30기에 대한 주파수 모의

〈그림 1〉과 〈그림 2〉는 원자력이 각각 31기와 30기인 경우 원자력 설비가 한 기 탈락했을 때의 계통 주파수를 살펴보기 위한 시뮬레이션 화면이다. 총 발전량은 48500MW로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 또한 〈그림 1〉에서는 원자력 용량이 39105MW이었는데 〈그림 2〉에서는 약 1178MW가 감소한 37928MW로써 원자력 설비를 한 기 제외했다는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2.3 최대 원자력 투입 Simulation 정리

〈표 1〉 시뮬레이션 결과

| 원자력 설비 수 | 원자력 용량(MW) | 원자력 용량(%) | 원자력 발전량(MW) | 원자력 발전량 (%) | KG    | 최저 주파수(Hz) |
|----------|------------|-----------|-------------|-------------|-------|------------|
| 32       | 40320      | 62.46     | 34375       | 70.87       | 19.20 | 59.849     |
| 31       | 39107      | 59.83     | 33333       | 68.73       | 19.26 | 59.854     |
| 30       | 37929      | 57.82     | 32342       | 66.68       | 19.30 | 59.858     |
| 29       | 36707      | 55.67     | 31340       | 64.62       | 18.98 | 59.86      |
| 28       | 35489      | 53.15     | 30228       | 62.32       | 19.20 | 59.865     |
| 27       | 34311      | 51.19     | 29230       | 60.27       | 19.24 | 59.867     |

〈표 1〉에서 보듯이 원자력 설비가 한 기 씩 줄어들 때 마다 원자력 용량과 발전량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 원자력 설비 한 기를 탈락 시켜보는 주파수 모의 결과, 최저 주파수도 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

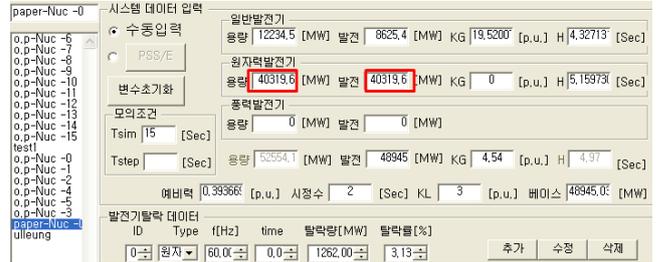
〈표 2〉 현실성을 고려하여 발전기 정수를 수정 한 시뮬레이션 결과

| 원자력 설비 수 | 원자력 용량(MW) | 원자력 용량(%) | 원자력 발전량(MW) | 원자력 발전량 (%) | KG/2 | 최저 주파수(Hz) |
|----------|------------|-----------|-------------|-------------|------|------------|
| 32       | 40320      | 62.46     | 34375       | 70.87       | 9.60 | 59.800     |
| 31       | 39107      | 59.83     | 33333       | 68.73       | 9.63 | 59.806     |
| 30       | 37929      | 57.82     | 32342       | 66.68       | 9.65 | 59.810     |
| 29       | 36707      | 55.67     | 31340       | 64.62       | 9.49 | 59.810     |
| 28       | 35489      | 53.15     | 30228       | 62.32       | 9.60 | 59.819     |
| 27       | 34311      | 51.19     | 29230       | 60.27       | 9.62 | 59.822     |

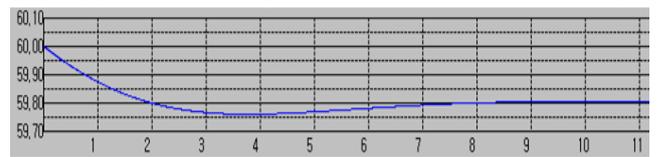
발전기 정수의 실측값은 본 연구에서 구한 값에 비해 크기가 절반 수준에 미친다. 그렇기 때문에 현실성을 고려하고자 앞서 구한 발전기 정수 KG의 1/2에 해당 하는 값을 이용하여 동일한 시뮬레이션을 실행해보았다. 〈표 1〉에 비해 발전기 정수와 최저 주파수만 달라졌다. 최저 주파수는 〈표 1〉에 비해 더욱 낮게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 최저 주파수가 59.8Hz 미만으로 떨어지는 것은 아니기 때문에 본 논문에서 정의한 안정적인 계통 운영에는 이상이 없다고 할 수 있다.

### 2.2.4 원자력 감발 simulation 실행

앞서 실시한 시뮬레이션을 통해 2022년 off-peak 상황에서 원자력이 32기 모두 연계 되더라도 계통 주파수에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인 하였다. 하지만 off-peak 상황을 고려하여 원자력이 감발 운전하는 상황이었기 때문에 모든 원자력 설비들이 최대 출력을 내더라도 계통에 이상이 없는데에 대한 비교 연구가 필요하다. 그래서 동일한 방법으로 32기의 원자력 설비들이 최대 출력을 낼 경우의 주파수 변화를 살펴보았다.



〈그림 3〉 원자력 32기 최대 출력에 대한 주파수 모의



〈그림 4〉 원자력 32기 최대 출력에 대한 주파수 모의 결과

〈그림 3〉은 원자력 발전기가 최대 출력을 내고 있는 상태에서 원자력 설비가 한 기 탈락한 경우의 주파수 모의를 살펴보기 위한 시뮬레이션 화면이다. 〈그림 4〉를 통해 시뮬레이션 실행 결과 나타난 주파수의 변화를 보여준다. 약 3.5 ~ 4.1초 사이에서 최저 주파수 59.761까지 주파수가 떨어진다. 시뮬레이션을 통해 원자력이 감발 운전을 하지 않고 최대 출력을 모두 발전하는 경우 원자력이 한 기 탈락하게 되면 계통 주파수가 59.8Hz 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2.5 향후 연구 방향

제 4차 전력 수급 기본 계획에 따르면 2022년 까지 국내 계통에는 현재에 비해 약 15배 많은 용량의 풍력 설비가 연계된다. 이 경우 연계 가능한 최대 원자력과 일반 설비들의 용량 및 발전량을 정확히 산정하기 위해서는 본 논문에서 사용된 시뮬레이션 tool에서 풍력의 도입을 현실적으로 고려할 수 있도록 해야 한다.

## 3. 결 론

시뮬레이션 결과 원자력의 발전량이 전체 발전량의 70.87%가 되도록 모든 원자력 설비들을 in-service 시킨 상태에서 원자력이 한 기 탈락하더라도 최저 주파수 margin 59.8Hz 미만으로 떨어지는 위험한 상황이 발생하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 2022년 off-peak 수요가 48500MW가 되더라도 안정적인 계통 운영에는 문제가 없다고 판단 할 수 있다. 또한 원자력 설비를 모두 in-service로 계통에 연계하여 안정적인 계통 운영을 하기 위해서는 최대 출력이 아닌 감발 운전을 해야 한다는 것을 확인할 수 있다. 더욱 실증적인 결과를 얻기 위하여 시뮬레이션 tool에 풍력을 포함한 다양한 신재생 설비들을 고려하는 기능이 추가되어야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "POWER GENERATION, OPERATION, AND CONTROL", John Wiley & Sons INC, Second Edition, 1996
- [2] P. Kundur "Power System Stability and Control", The EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [3] "제 5차 전력수급기본계획", 지식경제부, 2010.12