creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

**저작자표시**. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

**비영리**. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

**변경금지**. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

碩士學位論文

# 제주 전력계통 외란 시 신재생 전원 추가 정지에 대한 주파수 변화 분석

濟州大學校 産業大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學科

李 相 澔

2022 年 7 月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 제주 전력계통 외란 시 신재생 전원 추가 정지에 대한 주파수 변화 분석

指導敎授 金 世 鎬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2022年 7月

李相澔의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 진 영 규 ㊞

委 員 최 영 준 ㊞

委 員 김 세 호 ㊞

濟州大學校 産業大學院

2022 年 7 月



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# An Analysis of Frequency Variation in Jeju Power Systems due to Trip of Renewables Following Disturbances

Sang-Ho Lee
(Supervised by professor Se-Ho Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2022. 7.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 목 차

LIST OF FIGURES ····· ii
LIST OF TABLES ····· iv
SUMMARY ····· V

1. 서 론 ····· 1

2. 전력계통과 주파수 ····· 2
2.1 개념 ····· 2
2.2 주파수에 대한 신재생 전원의 영향 ····· 4
2.3 제주 전력계통 현황 ····· 7

3. 신재생 계통연계유지(FRT) 규칙 ····· 12
3.1 해외 ····· 12
3.2 국내 ····· 14

4. 문제점 ····· 17
4.1 FRT 관련 규칙개정 반영 지연 ····· 17
4.2 국내 신재생 전원 추가탈락 사례 ····· 18

5. 컴퓨터 해석 ····· 22
5.1 1차 외란 시 주파수 변화 ····· 23
5.2 1차 외란 후 신재생 추가정지 시 주파수 변화 ····· 28
5.3 해석 결과 ····· 35

6. 결론 ····· 36

참 고 문 헌 ····· 37



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# LIST OF FIGURES

Fig. 1 The concept of frequency in power system ····· 2
Fig. 2 Power system reliability and electricity quality maintenance standards article 4 ···· 3
Fig. 3 System frequency adjustment and maintenance range in electricity market operation rules ····· 3
Fig. 4 A PV output by time located in Jeju ('20.03.30 11:00 ~19:00) ····· 5
Fig. 5 Renewable power generation prediction screen in KPX ····· 6
Fig. 6 California's electricity supply and demand situation ('16.10.22) ····· 10
Fig. 7 Renewable supply stage in each country and Korea according to the proportion of VRE power production (IEA) ····· 11
Fig. 8 NERC frequency ride-through curve ····· 12
Fig. 9 IEEE 1547-2018 frequency ride-through curve ····· 13
Fig. 10 Electricity market operation rules articles 5.11.2 and 5.11.3 ····· 15
Fig. 11 Electricity market operation rules attached Table 3, No. 11 ····· 15
Fig. 12 Regulations on the use of electrical equipment for transmission and distribution asterisk 6(subject of application) ····· 15
Fig. 13 Regulations on the use of electrical equipment for transmission and distribution asterisk 6(frequency characteristics) ····· 16
Fig. 14 Distributed power distribution system connection technical standards article 24 paragraph 1 ····· 16
Fig. 15 Distributed power distribution system connection technical standards table 28 ····· 16
Fig. 16 Frequency according to the trip of Shin-boryeong #1 and PV ····· 19
Fig. 17 Jeju system status in case of Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure ····· 21
Fig. 18 Wind farm's Output in case of Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure ·· 21
Fig. 19 Namjeju#2, #1·2HVDC each pole's output(Case ①) ····· 25
Fig. 20 System frequency(Case ①) ····· 26
Fig. 21 #1·2HVDC each pole's output(Case ②) ····· 26
Fig. 22 System frequency(Case ②) ····· 26
Fig. 23 #1·2HVDC each pole's output(Case ③) ····· 27



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 24 System frequency(Case ③) ····· 27
Fig. 25. System frequency against trip of Namjeju#2 and renewables ····· 29
Fig. 26 System frequency against trip of Namjeju#2 and renewables 10% ····· 30
Fig. 27 Amount of trip about Namjeju#2, renewables 10% ····· 30
Fig. 28 #1·2HVDC each pole's output against trip of Namjeju#2 and renewables 10% ··· 31
Fig. 29 System frequency against trip of #2HVDC and renewables ····· 32
Fig. 30 System frequency against trip of #2HVDC and renewables 50% ····· 32
Fig. 31 Amount of trip about #2HVDC, renewables 50% ····· 33
Fig. 32 #1·2HVDC each pole's output against trip of #2HVDC and renewables 50% ····· 33



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# LIST OF TABLES

Table 1 Frequency according to the correlation between power generation and load ····· 2
Table 2 UFR load blocking method for land and Jeju system ····· 4
Table 3 Jeju system's facility status ····· 7
Table 4 Issues at each stage of IEA renewable supply ····· 8
Table 5 Frequency ride-through requirements by organization ····· 14
Table 6 Renewable generator capacity in Jeju system ('20.04.30) ····· 17
Table 7 Ratio of renewable energy to Jeju average load in 2020 (utilization rate 60%) ···· 18
Table 8 System status against the trip of Shin-boryeong #1 ('20.03.28) ····· 19
Table 9 System supply and demand situation before and after Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure ····· 20
Table 10 Jeju power system status('20.04.13 11:00) ····· 22
Table 11 #1,2HVDC and central generator output('20.04.13 11:00) ····· 22
Table 12 Contingency case for simulation ····· 23
Table 13 Output, lowest frequency and possibility of trip of renewables for each contingency case ····· 28
Table 14 Renewables output and Amount of trip for dropout ratio ····· 28
Table 15 The lowest frequency and UFR operation according to renewables dropout ratio ····· 34
Table 16 UFR load blocking amount and operation time in Jeju ····· 34



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# SUMMARY

According to the policy of renewable energy for the past few years, the penetration rate of renewable energy in Jeju Island has been steadily increasing. Because of this, the frequency of generating more than 60% of real-time renewable power sources in the Jeju power system is gradually increasing. It is expected that this trend will continue in the future to curb climate change. However, the increase in renewable power in the system adversely affects the system frequency due to the characteristics of the power source. Since renewable energy is difficult to predict and considerably variable, it is difficult for system operators to respond to it. In particular, in recent years in Korea, due to the frequency drop due to grid disturbance, a renewable power source has been dropped, causing an additional frequency drop. This occurred because the solar inverter was not set for low frequency or low voltage. The ability of the power supply to maintain grid connection when an accident occurs in the grid is called FRT (Fault Ride Through). However, the mandatory function of the renewable FRT function was established in the electricity market operation rules in October 2020. So, The FRT function is no longer compulsory for renewable generators that have entered the system before that. In the past, this problem did not come up because renewable energy did not take up a lot of weight, but recently, the supply rate of renewable power has risen sharply. As the system is operating in an exposed state, countermeasures are necessary.

Therefore, in this paper, the concept of Power system frequency is presented and the effect on frequency variation according to the characteristics of renewable power sources is investigated. In addition, the current status of domestic and overseas FRT standards was investigated, and the proportion of renewable power sources lacking FRT function among the current power system in Jeju was investigated. In addition, we introduced the case of additional trip of renewable energy that occurred recently in Korea, and analyzed the frequency stability through PSS/E simulation. Three cases of disturbance were applied based on the power system situation with the highest proportion of actual renewables. Among these three disturbances, cases in which additional trip of renewable energy is expected were derived, and the frequency variation was analyzed by simulating the additional trip of renewable energy in the derived case.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 1. 서 론

최근 몇 년간 재생에너지 정책 기조에 따라 제주도의 신재생 보급률은 꾸준히 증가하고 있다. 이로 인해 제주도 전력 계통에서 실시간 신재생 전원의 발전비중이 60% 이상 차지하는 빈도가 점차적으로 증가하고 있다. 앞으로도 기후변화를 억제하기 위해 이러한 기조는 지속될 것으로 예상한다. 하지만 계통에서의 신재생 전원의 증가는 그 전원의 특성으로 인해 계통 주파수에 안좋은 영향을 끼친다[1]. 신재생은 출력 예측이 어렵고 변동성도 상당하기에 계통운영자는 이에 대응하기가 쉽지 않다[2]-[4].

특히, 최근 우리나라에서 계통외란에 따른 주파수 하락으로 인해 신재생 전원이 탈락하여 추가로 주파수 하락을 야기한 상황이 발생하였다. 이는 저주파수 혹은 저전압에 대한 태양광 인버터 설정이 되지 않았기 때문에 발생하였다. 이렇게 계통에서 사고가 발생하였을 때 전원이 계통연계를 유지하는 능력을 FRT(Fault Ride Through)라고 한다[5]. 하지만 전력시장운영규칙에 신재생 FRT 기능 의무화가 20년 10월이 되서야 정립이 되었고 이에 따라 그전에 계통에 들어온 신재생발전기에게는 FRT 기능이 의무가 아니게 되었다. 과거에는 신재생이 많은 비중을 차지하지 않았기에 이러한 문제가 대두되지 않았으나 최근 신재생 전원 보급률이 가파르게 상승하였고 특히 제주의 경우 신재생 설비용량이 전체의 36%를 차지하여 이에 대한 위험성이 높은 상황에 노출된 상태에서 계통운영 중에 있어 그 대책이 필요한 실정이다[6].

따라서 본 논문에서는 전력계통 주파수에 대한 개념을 설명하고 신재생 전원의 특징에 따른 주파수 변화에 대한 영향을 조사하였다. 또한, 국내 및 해외의 FRT 기준 현황을 알아보고 제주 전력계통 현황 중 FRT 기능이 미비된 신재생 전원의 비중에 대해 조사하였다[7]-[11]. 그리고 최근 국내에서 발생한 신재생 추가탈락 사례를 소개하고 PSS/E 시뮬레이션을 통해 주파수 변화를 분석하였다[12]. 실제 신재생 비중이 가장 높았던 계통실적을 기반으로 세 가지 케이스의 외란을 적용하였다. 이 세가지 외란 중 신재생 추가 정지가 예상되는 케이스를 도출하여 도출된 케이스에 대해 신재생 추가탈락을 모의하여 주파수 변화를 분석하였다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 2. 전력계통과 주파수

## 2.1 개념

전력시스템에서 부하는 지속적으로 변한다. 매시간 가정에서는 전기 드라이어를 사용하거나 공장에서는 물건을 생산하는데 전력을 사용하고 어느 순간에는 정지를 하기도 한다. 이렇게 부하는 변동하기 때문에 발전량이 부하에 맞추는 것은 어려운 일이다. Fig. 1은 전력계통에서 발전량과 부하의 관계를 주파수로 나타나낸 것이다. 공급이 많아지게 되면 60Hz를 기준으로 주파수가 증가하게 되고 수요가 많아지게 되면 60Hz보다 낮아지게 된다. Table 1은 발전량과 부하의 상관관계에 따른 주파수를 보여준다. 즉, 주파수 변화란 계통의 수요와 공급이 일치하는 지 않게 되면 나타나는 것이다[1].

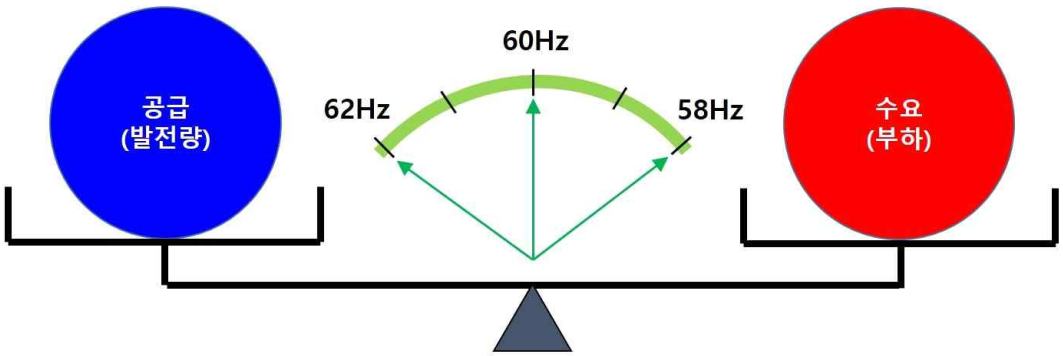


Fig. 1 The concept of frequency in power system

Table 1 Frequency according to the correlation between power generation and load

| 구분 | 상태 | 주파수(Hz) |
|---|---|---|
| 발전량 = 부하 | 균형 | 60 |
| 발전량 > 부하 | 공급과잉, 속도상승 | 60+ α (과주파수) |
| 발전량 < 부하 | 공급부족, 속도저하 | 60- α (저주파수) |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

전력계통에서 예기치 못한 발전기의 고장이나 부하탈락 등의 외란이 일어나면 전력수급에 불균형이 발생하고 이는 주파수의 불안을 초래한다.

우리나라 전력계통은 60Hz를 유지하고 있으며 이를 유지하지 못한다면 수용가 측 전력전자설비 등에 이상이 생기게 되고 심할 경우 전 계통 정전에 이르게 된다. 이를 방지하기 위해 Fig. 2에서 보듯이 우리나라에서는 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준에 따라 전력거래소가 계통 주파수를 60±0.2Hz의 범위 이내로 유지하여야 한다고 명시되어 있다. 이를 위해 수요에 따른 발전기 병입/병해에 관한 운영발전계획을 수립하며 실시간 운영에서 운영발전계획을 참고하여 발전기 급전지시를 내림으로써 수급안정에 지대한 역할을 하고 있다. Fig. 3은 전력시장운영규칙에서 계통 주파수 조정 및 유지범위에 관해 나타내고 있다. 계통에서 발전기 1기 고장 시 계통주파수를 최저 59.7Hz 이상으로 유지하여야 하고 발전기가 2기 고장 시 계통주파수를 59.2Hz 이상 유지하도록 계통 운영기준이 수립되어 있다. 이러한 주파수 유지기준에 맞춰서 계통 운영방안 또한 수립되고 있다[2],[3].

**제2장 전기품질**

**제4조(계통주파수 조정 및 유지범위)** 전기사업자는 전력거래소의 급전지시에 따라 발전력 및 전기저장장치의 유효전력 조정 등의 방법으로 계통주파수를 평상시 60±0.2Hz의 범위 이내로 유지하여야 한다. 다만, 비상상황의 경우에는 62Hz~57.5Hz 범위 내에서 유지할 수 있다.

Fig. 2 Power system reliability and electricity quality maintenance standards article 4

| | |
|---|---|
| 10.1.2 | 최대 용량의 발전기 1기 고장 시 계통주파수를 최저 59.7Hz 이상으로 유지하여야 하고, 1분 이내에 59.8Hz로 회복시켜야 한다. [신설 2019.12.13.] |
| 10.1.3 | 발전기 2기 고장이 발생하거나 고장파급방지장치에 의하여 발전기가 탈락 시 계통주파수를 최저 59.2Hz 이상 유지하여야 하고, 1분 이내에 59.5Hz로, 10분 이내에 59.8Hz로 회복시켜야 한다. [신설 2019.12.13.] |

Fig. 3 System frequency adjustment and maintenance range in electricity market operation rules



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2는 육지 및 제주계통에서 UFR 단계별 동작주파수, 동작시간 및 차단부하를 보여준다. 만약 발전기 연쇄고장이 일어나서 대규모 공급부족으로 인한 급격한 주파수 저하시 UFR(Under Frequency Relay)을 통해 부하를 자동으로 차단하여 전계통 정전을 사전 예방한다.

Table 2 UFR load blocking method for land and Jeju system

| 육지계통 | | | | 제주계통 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 단계 | 동작주파수 [Hz] | 동작시간 [sec] | 차단부하 [%] | 단계 | 동작주파수 [Hz] | 동작시간 [sec] | 차단부하 [%] |
| 1단계 | 59.0 | 0.1 | 6 | 1단계 | 59.0 | 0.167 | 10 |
| 2단계 | 58.8 | 0.1 | 6 | 2단계 | 58.8 | 0.167 | 9 |
| 3단계 | 58.6 | 0.1 | 6 | 3단계 | 58.6 | 0.167 | 9 |
| 4단계 | 58.4 | 0.1 | 6 | 4단계 | 58.4 | 0.167 | 8 |
| 5단계 | 58.2 | 0.1 | 6 | 5단계 | 58.2 | 0.167 | 6 |
| 6단계 | 58.0 | 0.1 | 5 | 6단계 | 58.0 | 0.167 | 5 |
| 후비 | 59.0 | 12.0 | 4 | 후비 | 59.0 | 12.0 | 5 |
| 계 | | | 39 | 계 | | | 52 |

※ 차단부하[%] : 계통수요 대비 차단 비율, 동작시간 : 저주파수 검출 시간(차단기 동작시간 제외)

## 2.2 주파수에 대한 신재생 전원의 영향

최근 세계적으로 기후변화에 대응하기 위해 탄소중립을 위한 신재생 보급이 활발해지고 있다. 하지만 전력계통에서 신재생 전원이 많아질수록 전원이 가진 특징 때문에 주파수에 큰 위협이 되고 있다. 특히, 태양광, 풍력 등의 신재생 전원은 일조량, 바람 등 날씨나 위치에 큰 영향을 받는 변동적 신재생 에너지(Variable Renewable Energy)로 분류되는데 계통측면에서는 크게 2가지의 큰 단점이 있다. 첫째, 변동적 신재생에너지의 출력은 예측이 쉽지 않다는 점(불확실성), 출력 자체가 변동폭이 크다는 점(변동성)이다[4].



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1) 불확실성

태양광은 일사량에 따라 발전하는 주기적인 패턴을 갖고 있어 구름의 변화가 심한 날씨의 경우를 제외하고는 풍력보다 예측이 용이한 면이 있다. 이에 반해 풍력발전은 풍속 및 풍향에 따라 발전한다. 기상여건을 정밀하게 예측한다 해도 풍속 및 풍향은 정확히 예측하기가 매우 어렵기 때문에 풍력발전의 경우 불확실성이 큰 편이다[4].

2) 변동성

변동적 신재생에너지를 완벽하게 예측한다고 하더라도 태양광 및 풍력발전의 변동성은 다른 전통전원에 비해 매우 크다. 태양광은 구름에 의한 영향을 많이 받는다. Fig 4는 제주도에 소재한 설비용량 13.78MW인 태양광 발전소의 2019년 3월 6일 11시~19시 발전량 그래프이다. 그래프에서 13:48에 약 6.5MW를 발전하고 있었지만 1분후인 13:49에는 13.78MW로 1분만에 약 100%의 출력변화를 보여준다. 즉, 단일 태양광 발전량은 상당한 변동성을 가지고 있다. 또한, 제주도의 경우 한라산이 중간에 위치한 지리적 특성으로 인해 구름이 국지적인 특성을 가지고 있어서 집합 태양광 자원의 변화량도 상당한 수준이다. 풍력 발전의 경우도 바람조건에 따라서 그 변동성이 매우 큰 편이다. 스무딩 효과 (Smoothing effect)로 계통측면에서 바라봤을때는 그 변동성이 단일 발전기의 변동성보단 훨씬 작은 편이지만 무시할 수 없는 수준에 이르렀다[4].

Fig. 4 A PV output by time located in Jeju ('19.03.06 11:00 ~19:00)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

이러한 단점으로 인해 전력계통에서 다른 발전기 등의 설비들이 이에 대응하지 못할 경우 수요와 공급이 일치하지 않아 주파수가 흔들리는 현상이 발생하게 될 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 Fig. 5에서 보듯이 제주계통에서는 실시간 관제부서에서 신재생예측시스템을 활용하여 실시간으로 시간대별 신재생예측량을 확인하고 이에 대한 대응을 하고 있다.

하지만 대응하지 못했던 부분이 있었는데 그것은 계통사고 시에도 연계를 유지할 수 있는 계통연계능력(FRT)이다[5]. 과거에는 신재생 발전기의 비중이 작았기 때문에 영향이 적어 이러한 부분을 크게 여기지 않았지만 제주의 경우 이미 실시간 계통에서 신재생이 차지하는 비중이 60%를 넘어서는 경우가 빈번해졌고 이에 따라 계통 사고시 저전압 혹은 저주파수에 따라 연계를 유지하지 못할 경우 신재생 전원 대규모 탈락으로 인해 추가적인 주파수 하락 및 부분정전이 예상된다.

또한, 전통적인 발전기들은 무거운 매스가 회전하는 형태를 띄기 때문에 관성이 커서 계통에서의 주파수 변화를 최소화 시키려는 경향이 있었다. 하지만, 전력전자기반의 신재생 전원의 경우 이렇게 운동에너지가 전기에너지로 변화되는 형태가 아니기 때문에 관성이 없고 이로 인해 계통에서 사고 발생 시 주파수 하락폭이 더 커지며 그 유지시간 또한 더 길어질 것으로 예상된다.

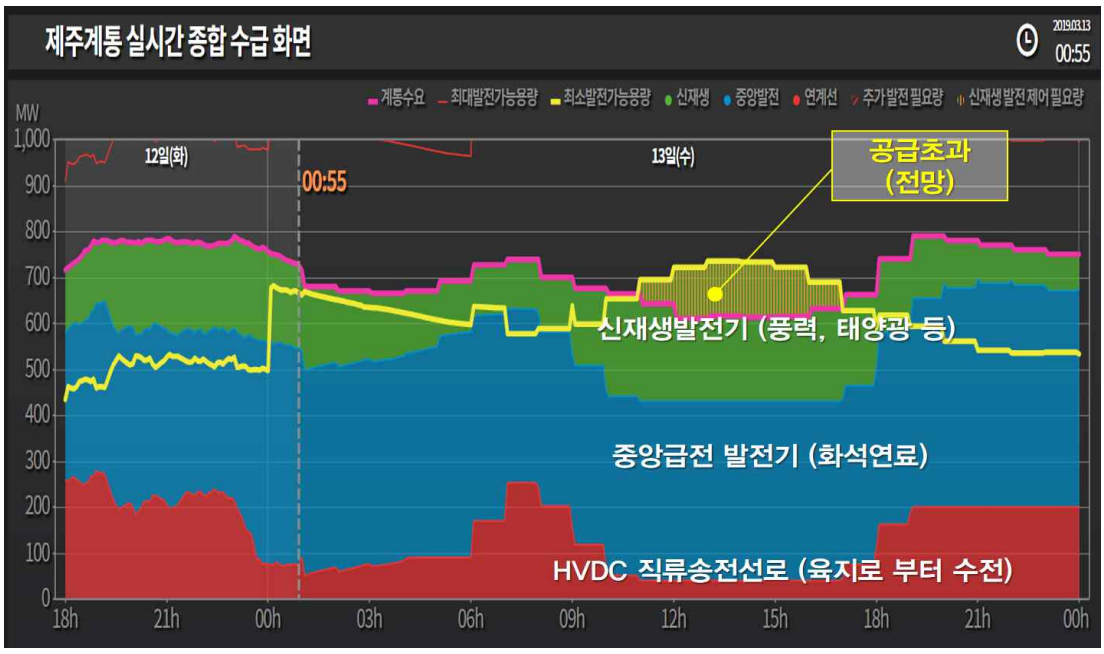


Fig. 5 Renewable power generation prediction screen in KPX



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

## 2.3 제주 전력계통 현황

제주계통에 미치는 신재생의 영향을 알아보기 위해 제주 전력계통 현황에 대해 조사하였다. Table 3은 제주 전력계통 설비현황을 보여준다. 제주도 내 전력설비를 중앙급전발전기와 비중앙급전발전기, 그리고 육지와 제주를 연결하는 HVDC로 구분할 수 있다.

중앙급전발전기란 전력거래소의 급전지시에 따라 운전하는 설비용량 20MW 초과 발전기를 의미한다. '20년 12월 기준으로 제주계통의 중앙급전발전기는 남제주기력 1·2호기, 제주기력2·3호기, 제주내연1·2호기 등의 전원이 있으며 설비용량의 합계는 910MW로 전체 설비용량의 44%를 차지한다.

비중앙발전기는 20MW이하의 발전기로 전력거래소의 중앙전력관제센터의 급전지시를 받지 않는 발전기를 의미한다. 제주도 비중앙발전기는 신재생발전기와 폐기물발전기로 구분될 수 있으며 설비용량 합계는 743MW로 전체 설비용량의 36%를 차지한다. 신재생발전기 중 풍력 설비용량은 295MW, 태양광 설비용량은 420MW로 비중앙발전기의 대부분을 차지하고 있다.

Table 3 Jeju system's facility status

| 구 분 | | | 설비용량 | 소 계 |
|---|---|---|---|---|
| 중앙급전발전기 | 남제주기력#1,2 | | 20.0 | 91.0 (44%) |
| | 제주기력#2,3 | | 15.0 | |
| | 제주내연#1,2 | | 8.0 | |
| | 한림복합 | | 10.5 | |
| | 제주LNG복합#1,2 | | 22.9 | |
| | 남제주복합 | | 14.6 | |
| 비중앙발전기 | 신재생발전기 | 풍력 | 29.5 | 74.3 (36%) |
| | | 태양광 | 42.0 | |
| | | 기타 | 0.9 | |
| | 기타(폐기물) | | 1.9 | |
| 연계선 | #1HVDC | | 15.0 | 40.0 (19%) |
| | #2HVDC | | 25.0 | |
| 전력설비 합계 | | | | 205.3 |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

신재생 보급수준에 따라 어떠한 이슈가 있으며 제주는 어느 단계에 해당되는지를 확인해보기 위해 IEA(International Energy Agency)의 신재생 보급 단계별 이슈사항을 조사하였다. 신재생 보급 단계에 따른 특징 및 이슈는 Table 4에서 보듯이 네 가지 Phase로 구분한다[6].

Phase Ⅰ의 경우, VRE용량이 전력계통에 거의 영향이 없을정도의 수준으로 보급되어 있는 단계이다. 이 단계에서는 풍력 혹은 태양광 발전소가 설치되어 출력의 변동이 있더라도 영향이 느껴지지 않는 단계이다. Phase Ⅰ로 간주될 수 있는 국가들로는 인도네시아, 남아프리카 및 멕시코가 있다.

Phase Ⅱ의 경우, 계통운영자가 VRE의 영향을 인지하는 단계로 VRE의 발전이 현저히 드러나게 되면서 시작된다. VRE 발전량이 명확하게 계량되지 않는다면 이러한 변화는 예상수요보다 실제수요가 낮아지는 형태로 나타난다. 이렇게 낮아진 전력수요를 “순수요”라고 한다. 순 부하의 불확실성과 변동성이 크게 증가하지는 않지만 VRE를 수용하기 위해 기존 발전기의 운영패턴에 변화가 있을 수 있는 단계이다. Phase Ⅱ로 간주될 수 있는 국가들로는 칠레, 캐나다, 브라질, 인도, 뉴질랜드, 호주, 네덜란드, 스웨덴, 오스트리아, 벨기에가 있다.

Phase Ⅲ의 경우, 수급균형의 변동폭이 커짐에 따라 유연성 확보의 중요성이 증가되는 단계로 순부하의 변동성이 큰 단계이다. 이에 따라 기존 발전기의 운전이 감소하며 운영패턴에도 큰 차이가 발생하게 된다.

Fig. 6은 2016년 10월 22일 토요일 미국 캘리포니아 주의 전력수급상황을 나타내는데 그래프를 보면 순수요가 어떤 형태인지 알 수 있다. 파랑 곡선은 전체 로드, 주황 곡선은 ‘전체로드 - 태양광 - 풍력’, 회색 곡선은 태양광 이다. 당시에는 바람이 거의 불지 않았기 때문에 주황 곡선은 태양광의 영향을 받아 나타난 부하형태이다. 즉, 당시의 순수요이며 이를 오리 모양과 닮았다하여 Duck curve라고도 한다[7]. 수급변동이 이정도로 크다면 이에 대응하기 위해 증감발속도가 빠른 유연성자원이 필요한 시기로 볼 수 있다. Phase Ⅲ에 해당되는 국가들로는 이탈리아, 영국, 그리스, 스페인, 포르투갈, 독일이 있다.

Phase Ⅳ의 경우, 안정도가 중요해지는 단계로 특정 시점에서 VRE용량이 전력수요의 거의 100%를 차지하는 단계이다. 이러한 현상은 주말과 같이 수요가 낮은 기간 동안 VRE 출력이 최대치에 있을 때 일반적으로 발생한다. 이 단계에서는 계통에 외란이 발생한 직후 안정적인 운영 조건을 유지하는



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

전력계통 능력이 주목받게 된다. 최근에는 관성문제가 주목받았다. 관성이란 대형 화력발전소 발전기에 연결된 회전체에 저장된 운동에너지를 말한다. 이 회전체는 단기 에너지 저장장치와 같이 동작한다. 전력이 순간적으로 부족할 경우, 발전기들은 회전에 반대로 작용하는 힘으로 이를 경험하게 된다. 전력계통에 연계되어 있는 발전기들의 결합된 관성은 순간적인 전력부족에 저항하여 작용하면서 전력망을 안정적으로 유지한다. VRE자원이 많아질 경우 관성이 부족하므로 외란 발생 시 주파수하락폭이 커지거나 그 지속시간이 길어지는 경우가 발생하여 계통에 불안정성을 초래하게 된다. Phase Ⅳ로 간주되는 국가들의 예로는 아일랜드와 덴마크가 있다[6].

Table 4 Issues at each stage of IEA renewable supply [6]

| 단 계 | 특 징 | 이 슈 |
|---|---|---|
| Phase Ⅰ | VRE가 계통에 미치는 영향이 없음 | - |
| Phase Ⅱ | VRE에 의한 영향이 인지되는 수준 | 가시성 (visibility) |
| Phase Ⅲ | VRE에 의한 영향이 커서 유연한 설비가 필요한 수준 | 유연성 (flexibility) |
| Phase Ⅳ | VRE로 특정 상황에서 모든 전력수요 충당이 가능해서 동기발전기처럼 관성을 유지할 수 있는지가 대두되는 수준 | 안정도 (stability) |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

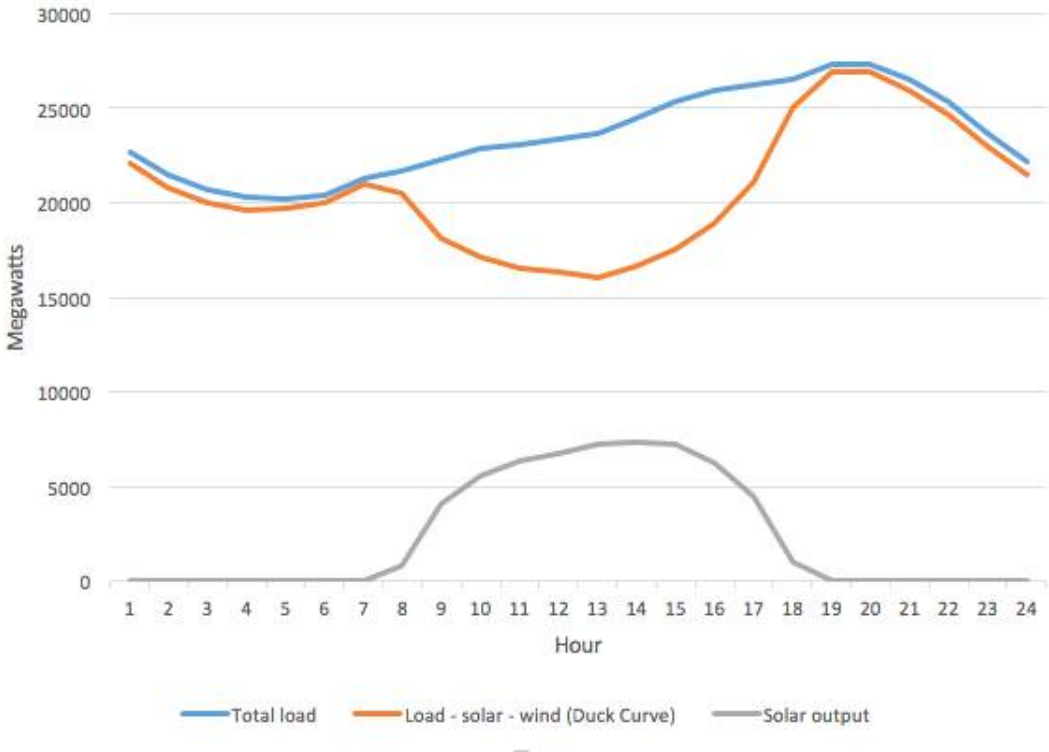


Fig. 6 California's electricity supply and demand situation ('16.10.22) [7]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 7은 각 국의 VRE 전원 연간 발전량 점유율에 따른 신재생 보급단계를 나타낸다. 보급단계는 전체 전력생산량 대비 VRE 전력생산량 비율로 결정된다. 우리나라의 경우 육지는 2.7%(19년 기준)로 Phase Ⅰ단계에 해당되지만 제주는 16.2%(20년 기준)로 Phase Ⅲ단계에 해당된다. 즉, 이미 제주는 신재생 보급이 상당한 수준에 이르렀으며 이에 따라 계통운영이 상당히 어려워지고 유연성 자원이 필요한 단계라는 것을 의미한다. 또한, 관성이 부족한 상황에서 운전되는 환경이므로 외란 발생 시 주파수 변화에 위협이 있을 수 있는 수준인 것이다.

제주 전력계통의 경우 주파수 응답이 상당히 빠른 #1HVDC, #2HVDC가 존재하여 수급에 대한 유연성이 확보가 되고 외란 발생 시 주파수 하락에 대한 저지능력 또한 갖춘 상태이다. 하지만 대규모 신재생 전원이 탈락하게 된다면 응답특성이 좋은 설비를 갖추더라도 주파수 변화에 위협을 끼칠 수 있으므로 이에 대한 분석이 필요한 실정이다.

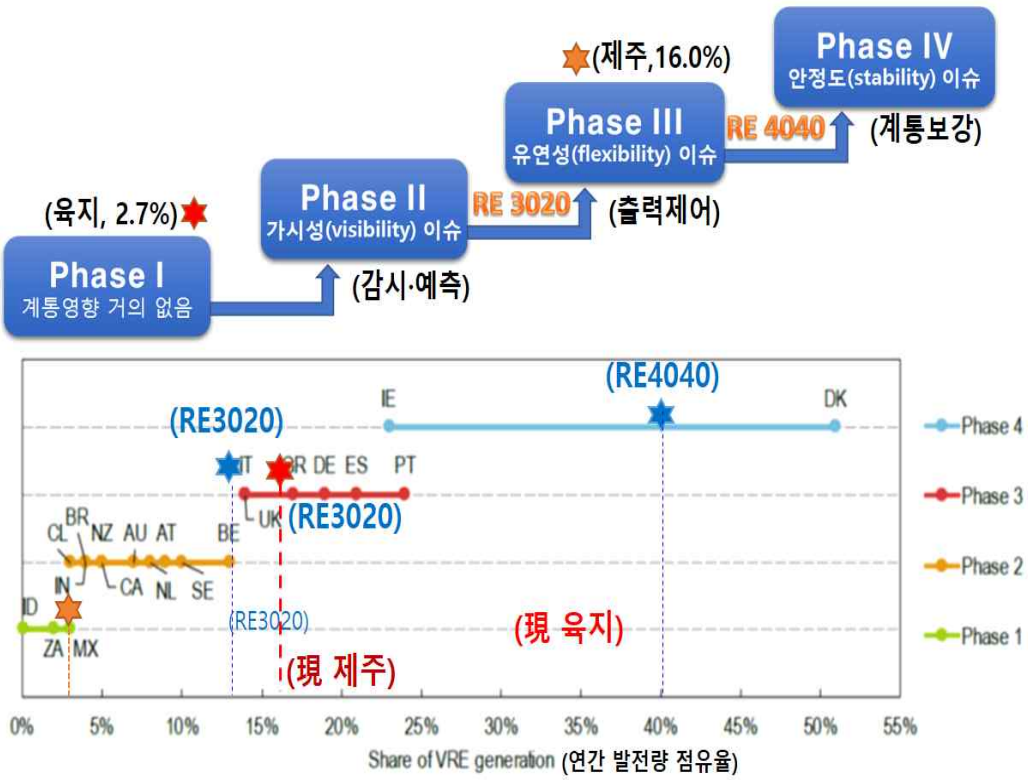


Fig. 7 Renewable supply stage in each country and Korea according to the proportion of VRE power production (IEA) [6]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 3. 신재생 계통연계유지(FRT) 규칙

신재생 전원이 급속도로 증가하면서 전력계통에 대한 신재생의 영향이 두드러지기 시작했다. 특히, 외란 발생 시 저주파수 혹은 저전압에 의해 신재생이 대규모로 탈락할 위험성이 있어 수급불안정을 초래하여 주파수에 위협을 끼칠 수 있다. 이에 따라 계통연계유지(FRT)에 관한 규칙을 해외 ISO 및 TSO 등 에서 마련하였으며 우리나라도 해당 기준을 마련하였다.

## 3.1 해외

해외의 많은 나라에서 신재생 전원의 가변성을 일반 발전기와 동등하게 제어하기 위해 출력변화율 제한을 요구하며, 계통 주파수 변화에 대응하기 위해 주파수 응답 및 FRT 기준을 요구한다. Fig. 8은 NERC의 PRC-024 FRT Curve이며, 4개 지역의 주파수에 따른 유지시간이 나타나 있다. 예를 들어 ERCOT의 경우 주파수가 59.4Hz ~ 60.6Hz이면 지속적으로 운전해야 한다. 만약 59.4Hz이하이면 540초동안 연계유지, 58.4Hz이하이면 30초동안 연계유지, 58.0Hz이하이면 2초동안 연계유지, 57.5Hz이하이면 즉시 Trip되야 한다[8].

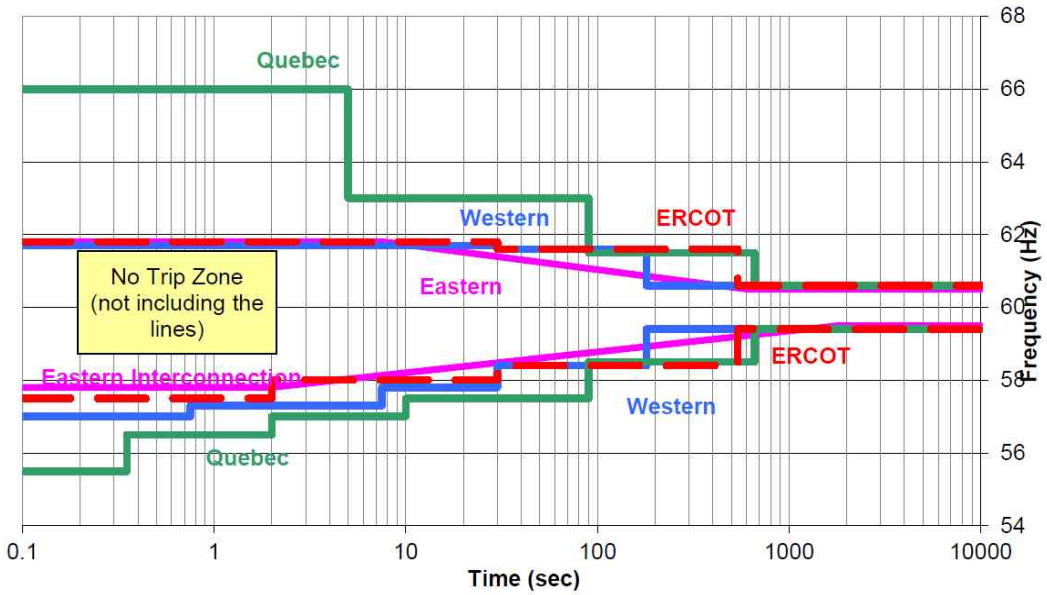


Fig. 8 NERC frequency ride-through curve [8]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 9는 IEEE 1547-2018의 FRT 커브를 나타낸다. PJM, MISO는 IEEE 1547-2018을 준용해서 운영하고 있다. 기본적으로 58.8Hz ~ 61.2Hz를 유지해야 하며 만약 주파수가 57.0Hz ~ 58.8Hz 이면 적어도 299초는 계통연계를 유지해야 한다. 또한, 61.2Hz ~ 61.8Hz일 경우에도 299초는 계통연계를 유지하여야 한다. 만약 주파수가 57.0Hz 미만이거나 61.8Hz를 초과하게 된다면 0.16초 이내에 분리가능하다[9].

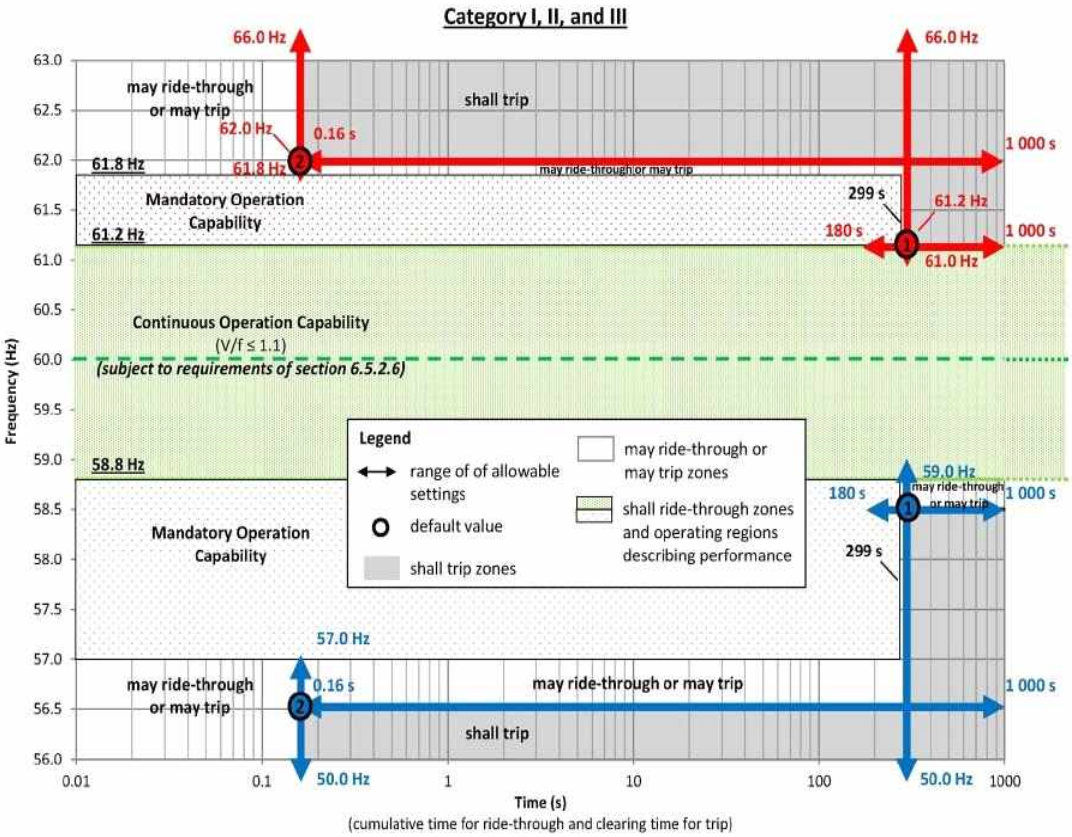


Fig. 9 IEEE 1547-2018 frequency ride-through curve [9]

이외에도 PERPA, EIRGRID, ENTSO-E의 경우는 각 기관이 가지는 FRT 요구조건이 있는데 이는 Table 5에 나타내었다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5 Frequency ride-through requirements by organization [8]

| 기관 | Frequency Ride-Through |
|---|---|
| PREPA | - 57.5Hz<f<61.5Hz : 발전기 유지<br>- 61.5Hz<f<62.5Hz : 30초<br>- 56.5Hz<f<57.5Hz : 10초<br>- f<56.5Hz 또는 62.5Hz<f : 즉시 트립 |
| PJM, MISO | - IEEE 1547-2018을 따름 |
| CAISO | - NERC PRC-024를 따름 |
| ERCOT | |
| EIRGRID | - 49.5Hz≤f≤50.5Hz : 발전기 유지<br>- 47.5Hz≤f≤52.0Hz : 최대 60분까지 지속<br>- 47.0Hz≤f≤47.5Hz : 최대 20초까지 지속 |
| ENTSO-E | - 기준 주파수의 ±2% 범위 초과 시 즉시 트립 |

## 3.2. 국내

현재 국내의 경우도 FRT에 관한 규칙이 만들어져 있다. Fig. 10에서 보듯이 전력시장운영규칙 제11절 신재생발전기에 관한 계통운영에서 제5.11.2조(신재생발전기의 계통연계 운전) 및 제5.11.3조(신재생발전기의 주파수 운전 기준)에 따르면 신재생발전사업자는 계통에 접속하려면 주파수 운전 기준을 만족해야 한다. Fig. 11은 전력시장운영규칙에 명시된 발전기 주파수 운전 기준을 나타낸다. 발전기 주파수 운전 기준을 보면 ① 60±1.5Hz에서 연속운전이 가능하여야 하며 ② 주파수 강하로 인하여 계통주파수가 58.5 ~ 57.5Hz범위에서 최소한 20초 이상 운전상태를 유지하여야 한다. 다만, 배전연계 신재생발전기의 주파수 운전기준에 관한 사항은 송·배전용 전기설비이용규정 및 분산형전원 배전계통 연계 기술기준을 따라야 한다[3],[10]-[11].



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 12는 송·배전용 전기설비 이용규정 별표 6 신재생발전기 계통연계기준을 나타낸다. 별표 6에 따르면 적용대상은 22.9kV 전용, 70kV ~ 765kV에 신규로 연계되는 신재생발전기이다. 주파수 강하시 주파수 유지범위는 Fig. 13에서 보듯이 58.5 ~ 57.5Hz로 전력시장 운영규칙 별표3 전력계통 운영 기준 제 11호와 동일하다[10].

**제5.11.2조(신재생발전기의 계통연계 운전)** [신설 2020.4.29.]
① 신재생발전사업자는 신재생발전기의 계통연계 또는 운전 시 전력계통의 신뢰도 및 전기품질 유지에 협조하여야 한다.
② 송·배전사업자는 신재생발전기의 적정 계통연계기준을 마련·운영하여야 한다.

**제5.11.3조(신재생발전기의 주파수 운전 기준)** 22.9kV 이상 송전연계 신재생발전기의 주파수 운전기준은 별표3의 11.0 따른다. 배전연계 신재생발전기의 주파수 운전 기준에 관한 사항은 송·배전용전기설비이용규정 및 분산형전원 배전계통연계 기술 기준을 따른다. [신설 2020.4.29.] <개정 2021.7.1.>

Fig. 10 Electricity market operation rules articles 5.11.2 and 5.11.3 [3]

| | |
|---|---|
| **11.0** | **발전기 주파수 운전 기준** |
| | 전력거래에 참여하는 모든 발전기는 다음 각호와 같은 주파수 변동 범위에서 운전이 가능하여야 한다. |
| 11.1 | 60±1.5Hz 연속 운전 |
| 11.2 | 주파수 강하로 인하여 계통주파수가 58.5 ~ 57.5Hz 범위에서 최소한 20초 이상 운전상태 유지 |

Fig. 11 Electricity market operation rules attached Table 3, No. 11 [3]

**4. 송전용전기설비 접속기준**

가. 일반사항

1) 적용대상 : 송전계통(22.9kV 전용, 70kV ~ 765kV )에 신규로 연계되는 신재생발전기

Fig. 12 Regulations on the use of electrical equipment for transmission and distribution asterisk 6(subject of application) [10]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

22.9kV 공용의 경우에는 분산형전원 배전계통 연계 기술기준을 따른다. Fig. 14는 분산형전원 배전계통 연계 기술기준 제24조를 나타낸다. 그림에 따르면 f > 61.5 Hz 혹은 f < 57.0 Hz 이면 운전지속시간이 없으며 f < 57.5Hz 이면 299초동안 운전을 지속해야 한다. 여기서 말하는 운전지속시간 이란 비정상 상태의 시작부터 분산형전원의 계통가압 중지 전까지 운전을 유지해야 하는 최소한의 시간을 말한다[11].

7) 주파수 특성
주파수 조정 및 유지범위는 58.5Hz ~ 61.5Hz 범위 내에서 연속 운전 가능 (다만, 계통주파수가 58.5Hz ~ 57.5Hz 범위에서 최소한 20초 이상 운전 가능)

Fig. 13 Regulations on the use of electrical equipment for transmission and distribution asterisk 6(frequency characteristics) [10]

**제24조(계통연계 유지)**

① 역송병렬 형태로 연계하는 분산형전원은 한전이 계통운영상 필요에 따라 요구하는 한전계통 고장 등으로 인한 전압 및 주파수 이상 시 계통연계를 유지(Fault Ride-Through)할 수 있어야 한다.

Fig. 14 Distributed power distribution system connection technical standards article 24 paragraph 1 [11]

<표 3.2> 비정상 주파수에 대한 운전지속시간

| 주파수 범위주 [Hz] | 운전지속시간주 [초] |
|---|---|
| f > 61.5 | - |
| f < 57.5 | 299 |
| f < 57.0 | - |

Fig. 15 Distributed power distribution system connection technical standards table 2.8 [11]



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 4. 문제점

## 4.1 FRT 관련 규칙개정 반영 지연

신재생발전기 FRT 관련 규칙이 제정되었으나 그 시기가 매우 지연된 시점이라는 것에 문제가 있다. 전력시장운영규칙에 20년 4월 29일에 신재생발전기 관련 계통연계 의무운전 조항이 신설되었고 송·배전용 전기설비 이용규정에는 대상이 22.9kV 전용, 70~765kV로 정해졌고 FRT 요건도 마련되었다. 22.9kV 공용은 분산형전원 배전계통 연계 기술기준에 마련되어야 하는데 20년 6월 29일에 돼서야 FRT 기준이 마련되었다. 이러한 현실 속에서 이미 제주 전력계통에는 신재생 전원이 많이 보급된 상태였다. Table 6는 20년 4월 30일 기준 제주 전력계통 내 신재생발전기 설비용량을 나타낸다. 계통에 연계되어 운전되고 있는 풍력 및 태양광 발전기의 설비용량은 약 599.3MW이며 이는 제주도 전체 설비용량의 36.6%를 차지하는 양으로 그 비중이 상당하다.

Table 6 Renewable generator capacity in Jeju system ('20.04.30)

| 구 분 | 풍력 | 태양광 | 합계(비중) | 제주도 총 설비용량 |
|---|---|---|---|---|
| 설비용량[MW] | 290.2 | 309.1 | 599.3(36.6%) | 1,537 |

* HVDC 설비용량은 제외

만약 풍력 및 태양광의 이용률을 설비용량 대비 약 60%로만 가정하더라도 풍력·태양광 발전량은 359MW 이다. Table 7은 2020년 기준 제주 평균부하 대비 신재생발전량의 비중을 나타낸다. '20년 제주 평균부하는 648MW이고 신재생발전량은 이용률을 60%로 가정시 369MW이다. 신재생발전량의 비중을 계산해보면 약 56% 수준으로 상당 비중을 차지하게 된다. 평균전력 기준으로 56%의 비중이라면 주간 경부하일때의 신재생 비중은 훨씬 클 것이다. 따라서



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주 계통에서의 외란에 따른 신재생 추가 탈락 시 주파수 측면에서 계통에 미치는 영향은 치명적일 것으로 예상된다.

Table 7 Ratio of renewable energy to Jeju average load in 2020 (utilization rate 60%)

| | 신재생발전량 (이용률 60%) | '20년 제주 평균부하 | 신재생 발전비중 |
|---|---|---|---|
| 설비용량 | 359 | 648 | 55.9% |

## 4.2 국내 신재생 전원 추가탈락 사례

신재생 전원의 추가탈락 가능성 및 파급효과를 확인해보기 위해 육지와 제주 두가지 사례를 조사하였다.

1) 육지

20년 3월 28일 토요일 13:54에 신보령#1(805MW)가 탈락하여 주파수가 하락하였다. Fig. 16은 신보령#1 및 태양광발전기 탈락에 따른 주파수트렌드를 보여준다다. 신보령#1가 탈락하면서 주파수가 약 59.8Hz 수준까지 하락하였는데 이때 태양광 인버터가 저주파수를 인지하여 추가탈락하게 되면서 10초 뒤 최저주파수는 59.67Hz를 기록하였다. Table 8은 신보령#1 탈락 당시 태양광 탈락량 및 계통상황을 보여준다. 당시 전체 태양광 설비용량은 11,445MW, 태양광 발전량은 4,061MW이였으며 태양광 탈략량은 약 450MW였다. 즉, 태양광 발전의 이용률은 약 35.5%이며 탈락비율은 11%였다. 만약 태양광 이용률이 높아서 저주파수 설정기준인 59.3Hz(당시 기존 KS규격 및 계통연계기술기준에 명시) 아래로 주파수가 하락했다면 전체 태양광 설비가 정지했을 수 있다. 당시 고장 전 계통부하는 50,447MW였고 당시 태양광 발전량인 4061MW이 추가탈락하게 됐었다면 신보령#1을 포함해 전체 탈락량이 4866MW로 계통에서 발전력의 약 9.64%이 탈락하는 수준인 것이다. 이는 원전 3대 이상 탈락하는 양으로 주파수 하락에 따른 대규모 정전이 우려되는 수준이다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 8 System status following the trip of shin-boryeong #1 ('20.03.28)

| 수요 | 신보령#1 탈락량 | 태양광 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | A : 설비용량 | B : 발전량 (비중 : B/A) | C : 탈락량 (비중 : C/B) |
| 50,447 | 805 | 11,445 | 4,061 (35.5%) | 450 (11%) |

Fig. 16 Frequency according to the trip of Shin-boryeong #1 and PV



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2) 제주

20년 1월 30일 목요일 06:39에 서제주-한림복합T/L 낙뢰에 의한 아킹링 섬락으로 지락고장이 발생하였다. 이에 따른 순시 저전압 발생으로 인해 운전중이던 풍력발전기 중 일부가 정지하였다. 당시 제주 전력계통 상황을 Fig. 17에 나타내었다. 풍력발전기가 정지하면서 #1,2HVDC 및 중앙급전발전기의 출력이 증가하는 모습을 보여준다. Table 9는 서제주-한림복합T/L 지락고장 전후의 계통의 수급상황을 나타낸다. 당시 고장 전 계통수요는 695MW, 중앙급전발전기는 317MW, #1HVDC 40MW, #2HVDC 155MW, 풍력 160MW. 기타 23MW 였다. Fig. 18은 서제주-한림복합T/L 지락고장 시 풍력단지의 출력을 보여준다. 당시 사고에 의해 성산풍력 등 8개소에서 발전기가 탈락하였다. 풍력발전량 약 74MW가 탈락하여 순간적으로 풍력발전량은 86MW가 되었고, 이에 대해 #1HVDC가 10MW, #2HVDC가 60MW를 바로 추종하여 주파수 하락은 없었다. 하지만 만약 탈락규모가 크고 HVDC의 운전한계량을 넘었을 경우엔 불가피하게 주파수 하락이 발생할 수 있을 것으로 추정된다.

Table 9 System supply and demand situation before and after Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure

| 상황 | 수요 | #1HVDC | #2HVDC | 중앙급전 발전기 | 풍력 | 기타 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 사고 전 | 695 | 40 | 155 | 317 | 160 | 23 |
| 사고 후 | 695 | 50 | 215 | 321 | 86 | 23 |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

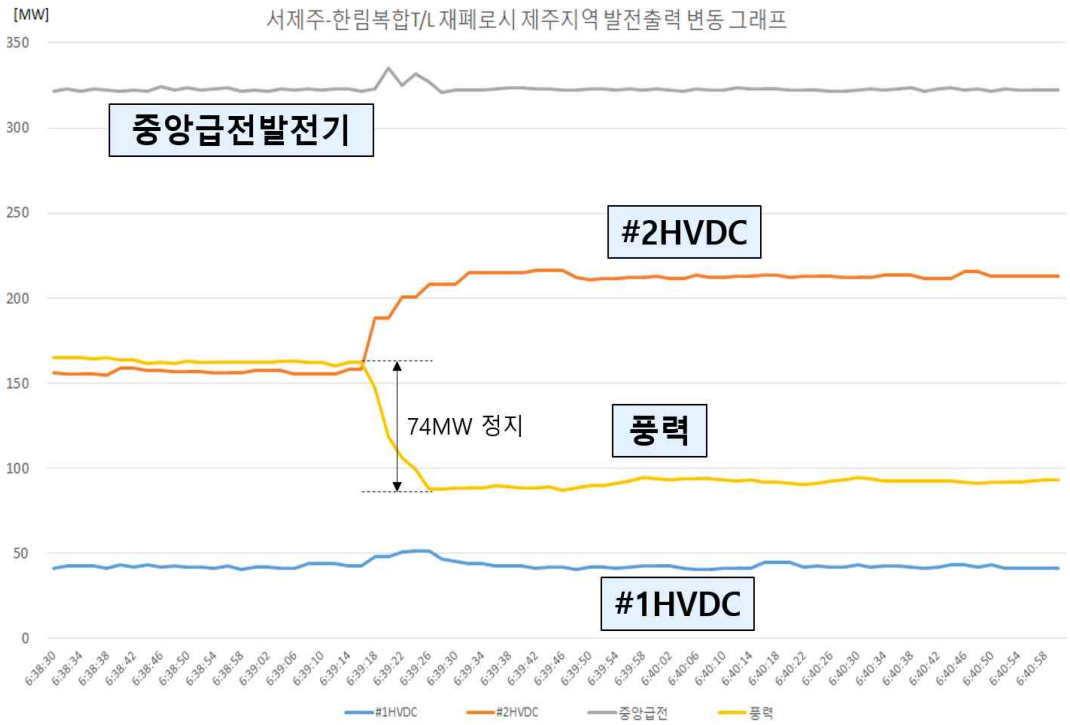


Fig. 17 Jeju system status in case of Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure

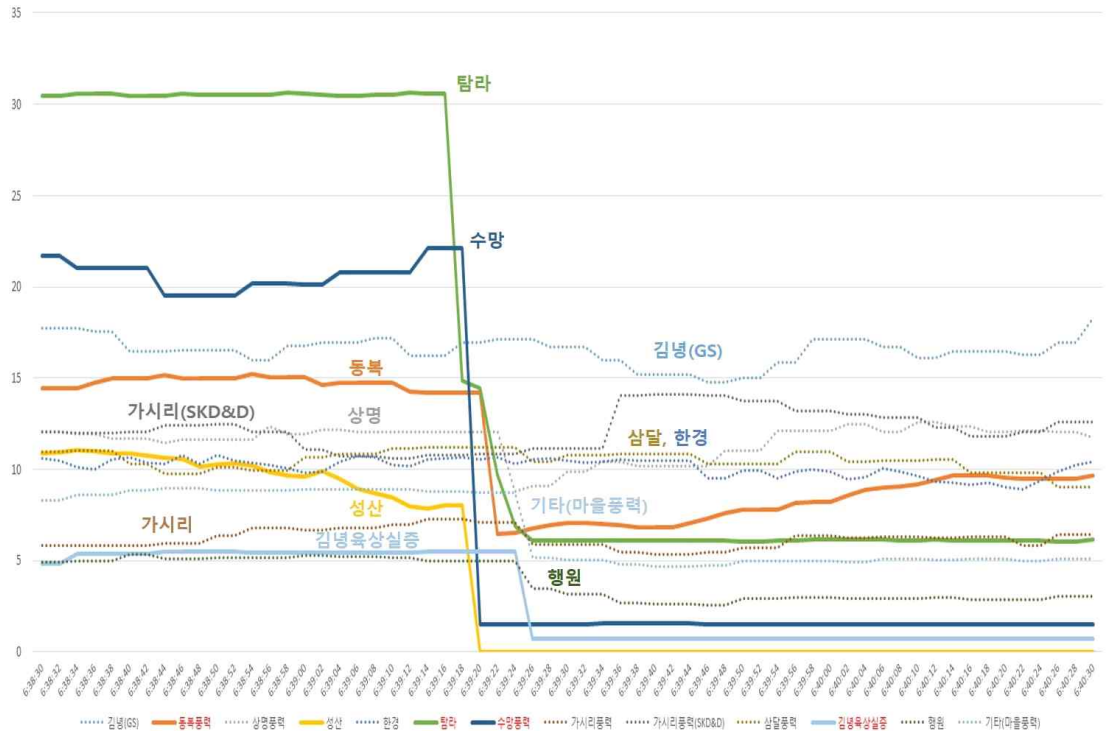


Fig. 18 Wind farm's Output in case of Seojeju-Hanlim T/L ground fault failure



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 5. 컴퓨터 해석

실제 제주 전력계통에서 있었던 상황 중 가장 가혹했던 상황을 검토하기 위해 Table 10에서 보듯이 20년 제주 계통실적 중 신재생 비중(61.96%)이 가장 컸었던 20년 4월 13일 11시 기준으로 검토를 진행하였다. Table 11은 당시 #1,2HVDC 및 중앙급전발전기 출력을 보여준다. 당시 신재생을 최대로 수용하기 위해 연계선은 최소 수전량으로 수전받고 있었으며 중앙급전발전기는 입찰된 최소출력 기준보다도 감발해서 운전중이었다. 또한, #1HVDC는 slope 1%, #2HVDC는 slope 0%로 운전중이었다. 해당 제주계통을 모의하기 위해 PSS/E 33ver을 사용하였으며 부하모델은 전력시장운영규칙에서 권고하고 있는 정전력, 정임피던스 모델값을 사용하였다. 주파수 변화 분석을 위해 발전기 및 HVDC 다이나믹 모델은 전력거래소에서 관리하고 있는 파일을 사용하였다[11].

Table 10 Jeju power system status('20.04.13 11:00)

| 일 시 | 전력수요 | HVDC | 중앙급전 | 신재생 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 태양광 + 풍력 | 기타 비중앙 |
| 20.04.13. 11:00 | 602 (100%) | 90 (15%) | 139 (23%) | 368 (61%) | 5 (1%) |

Table 11 #1,2HVDC and central generator output('20.04.13 11:00)

| #1HVDC | #2HVDC | 중앙급전발전기 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 제주기력#2 | 제주기력#3 | 남제주기력#2 | 한림복합 |
| 36 | 54 | 32 | 31 | 48 | 28 |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

## 5.1 1차 외란 시 주파수 변화

1차 외란은 Table 12에서 보듯이 크게 3가지 case로 나누었는데 당시 계통 상황에서 운전되는 발전기들 중 발전비중이 컸던 ① 남제주기력#2 Trip, 그리고 주파수 하락에 대해 응동속도가 빠른 ② #1HVDC Trip, ③ #2HVDC Trip 상황을 선정하였다. 이를 PSS/E를 통해 상정사고를 모의하였다. 주파수 변화 검토 시 #2HVDC 2개 Pole 동시고장은 상정하지 않고 있으나, 어느 정도의 주파수 하락폭이 있는지를 확인하기 위해 본 논문에서 모의를 진행하였다. 육지계통에서는 59.8Hz이하에서 신재생이 Trip되었었기 때문에 각 케이스별로 최저주파수가 59.8Hz이하이면 신재생 추가정지 가능성이 있는 것으로 가정하였다.

Table 12 Contingency case for simulation

| 상정사고 | | |
|---|---|---|
| Case ① | Case ② | Case ③ |
| 남제주기력#2 Trip | #1HVDC Trip | #2HVDC Trip |

### < Case ① >

Case ①에서 남제주기력#2는 5초에 Trip하도록 모의하였고 당시 출력은 48MW였다. Fig. 19는 남제주기력#2, #1·2HVDC 각 폴의 출력을 보여준다. 빨간색 선은 남제주기력#2, 초록색 선은 #2HVDC 한 폴(pole), 파란색 선은 #1HVDC 한 폴(pole)의 출력이다. Fig. 20에서 보듯이 남제주기력#2가 탈락하면서 주파수가 하락한다. 이를 저지하기 위해 #1,2HVDC가 빠른 속도로 응동하는 것을 확인할 수 있다. #2HVDC 한 폴과 #1HVDC의 한폴의 순시 응답량은 각각 '44-27=17MW', '29-18=11MW'이므로 #1,2HVDC 각 양 폴의 총 응답량은 '(17+11)*2=56MW'로 남제주기력의 탈락량을 다 받고도 초과해서 받는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 주파수가 하락한 이후에 다시 상승하지만 연계선 출력이 조정되면서 주파수가 안정한 모습을 보이는 것을 확인할 수 있다. 최저주파수는 59.766Hz를 기록하면서 신재생 추가정지 가능성이 있는 것으로 분석된다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

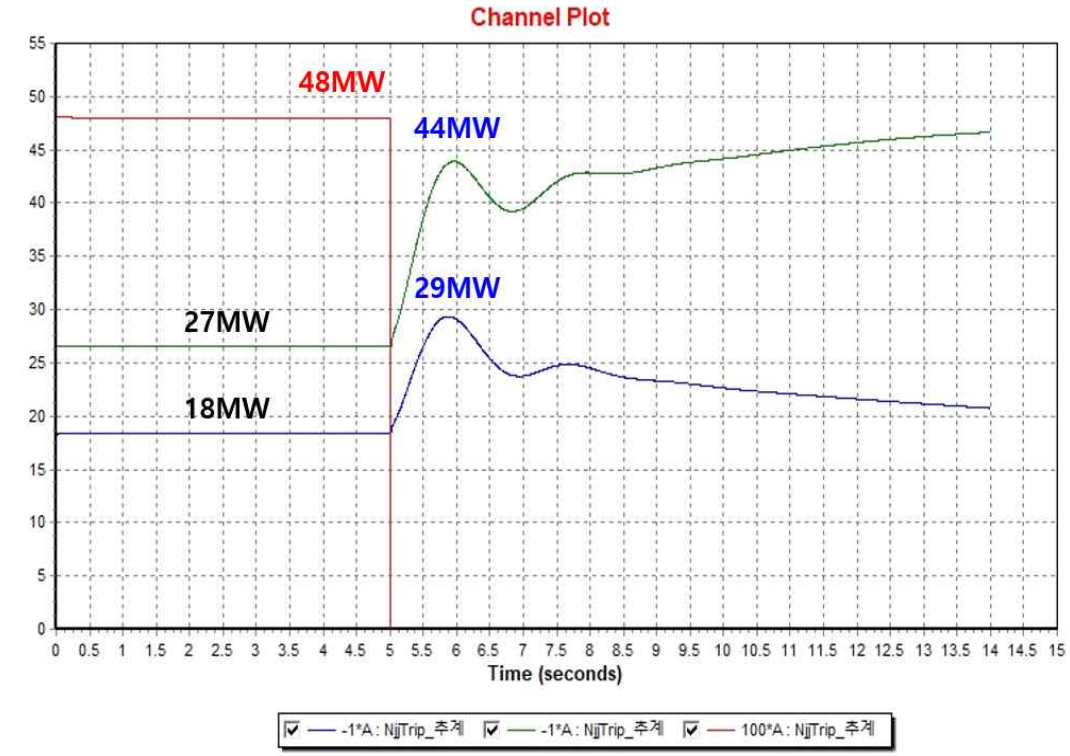


Fig. 19 Namjeju#2, #1·2HVDC each pole's output(Case ①)

Fig. 20 System frequency(Case ①)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

< Case ② >

Case ②에서는 #1HVDC 1,2pole과 제주C/S 및 해남C/S 필터가 5초에 Trip되도록 모의하였다. 당시 1pole의 출력은 18MW였다. Fig. 21은 Case②에서 #1·2HVDC 각 폴의 출력을 보여준다. 파란색 선은 #1HVDC 1pole의 출력, 초록색선은 #2HVDC 1pole의 출력이다. #1HVDC 양 pole이 탈락하면서 주파수 하락을 저지하기 위해 #2HVDC가 바로 응동하는 모습을 확인할 수 있다. 특히, #2HVDC는 slope이 0%이기 때문에 주파수 변화에 따른 응답특성이 우수하다. 최저주파수는 59.832Hz를 기록하면서 59.8Hz보다 크기 때문에 신재생 추가정지 가능성이 없는 것으로 분석된다.

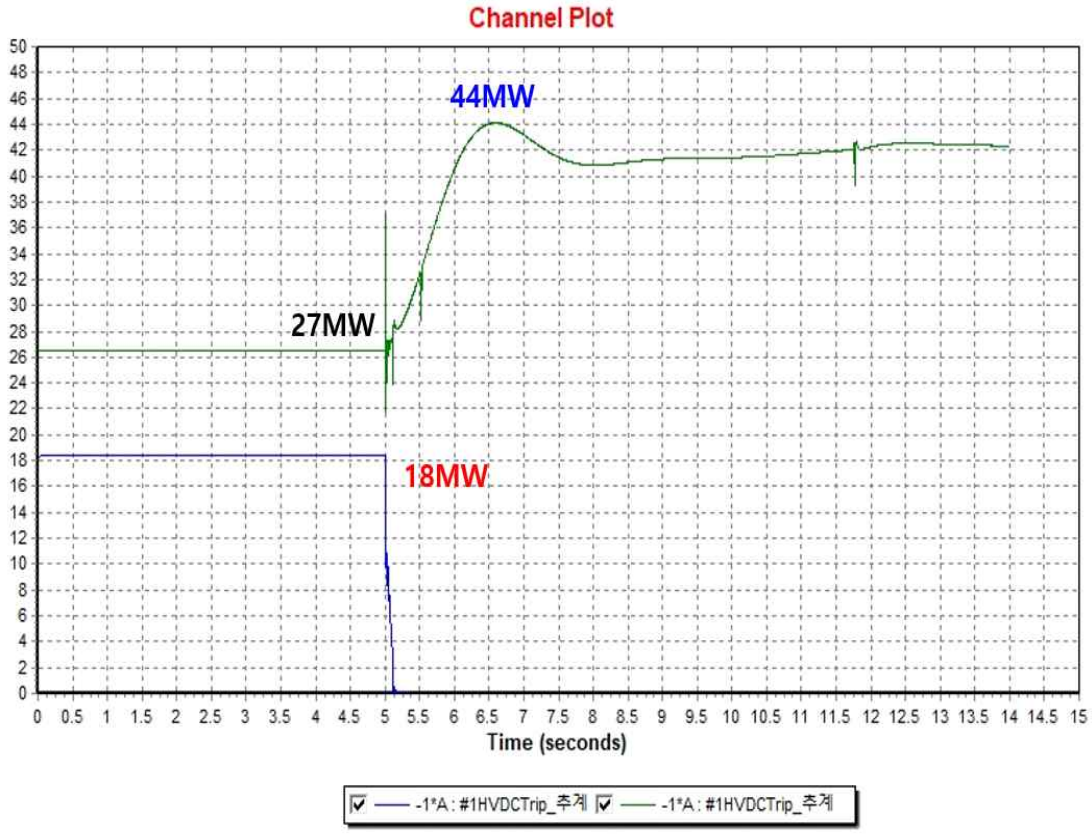


Fig. 21 #1·2HVDC each pole's output(Case ②)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

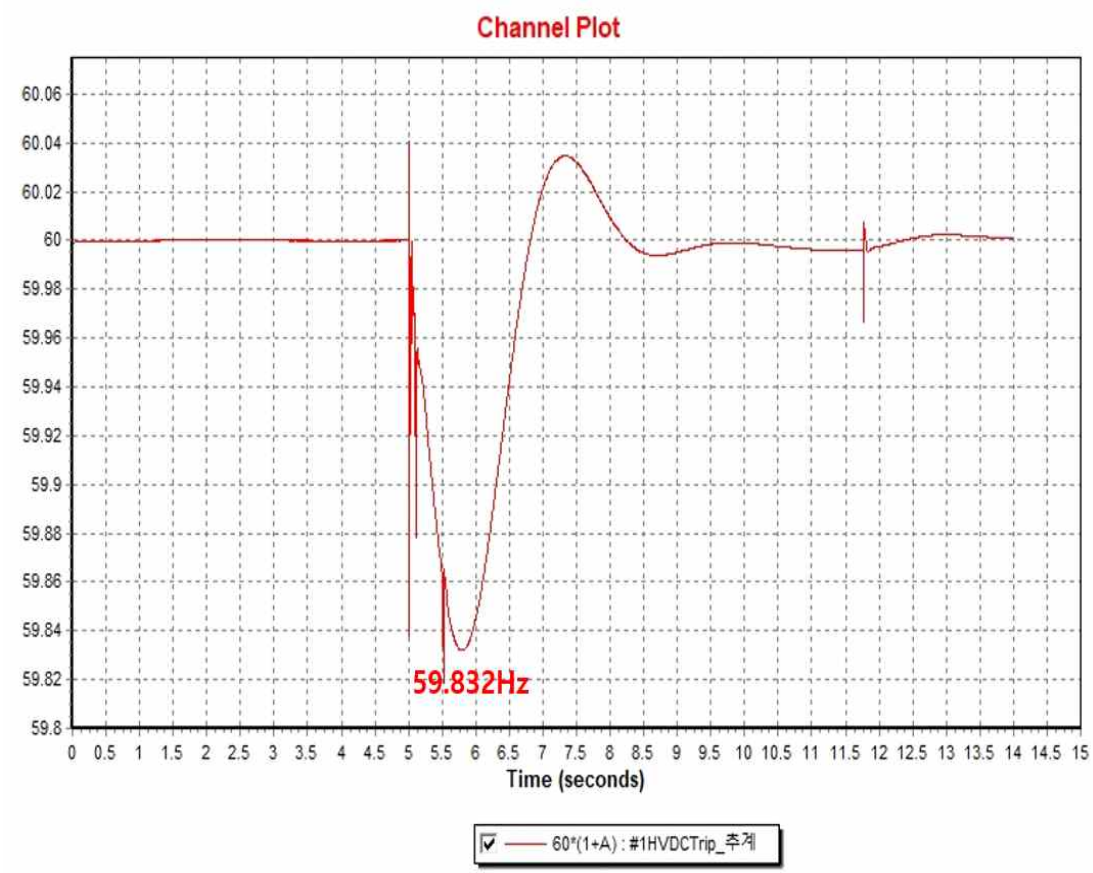


Fig. 22 System frequency(Case ②)

< Case ③ >

Case ③에서는 #2HVDC 1,2pole과 서제주C/S 및 진도C/S 필터가 5초에 Trip 되도록 모의하였다. 당시 #2HVDC 1pole의 출력은 27MW였다. Fig. 23은 Case ③에서 #1·2HVDC 각 폴의 출력을 보여준다. 파란색 선은 #1HVDC 1pole의 출력, 초록색선은 #2HVDC 1pole의 출력이다. #2HVDC 양 pole이 탈락하면서 주파수 하락을 저지하기 위해 #1HVDC가 바로 응동하는 모습을 확인할 수 있다. 최저주파수는 59.695Hz를 기록하였는데 이는 세 가지 케이스 중 가장 낮은 최저주파수이다. 가장 낮은 주파수를 보인 이유는 세 가지 케이스중 탈락량이 가장 크며(54MW) Droop 특성이 가장 좋은 설비가 탈락하였기 때문으로 추정된다. 해당 주파수는 59.8Hz보다 작기 때문에 신재생 추가정지 가능성이 있는 것으로 분석된다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

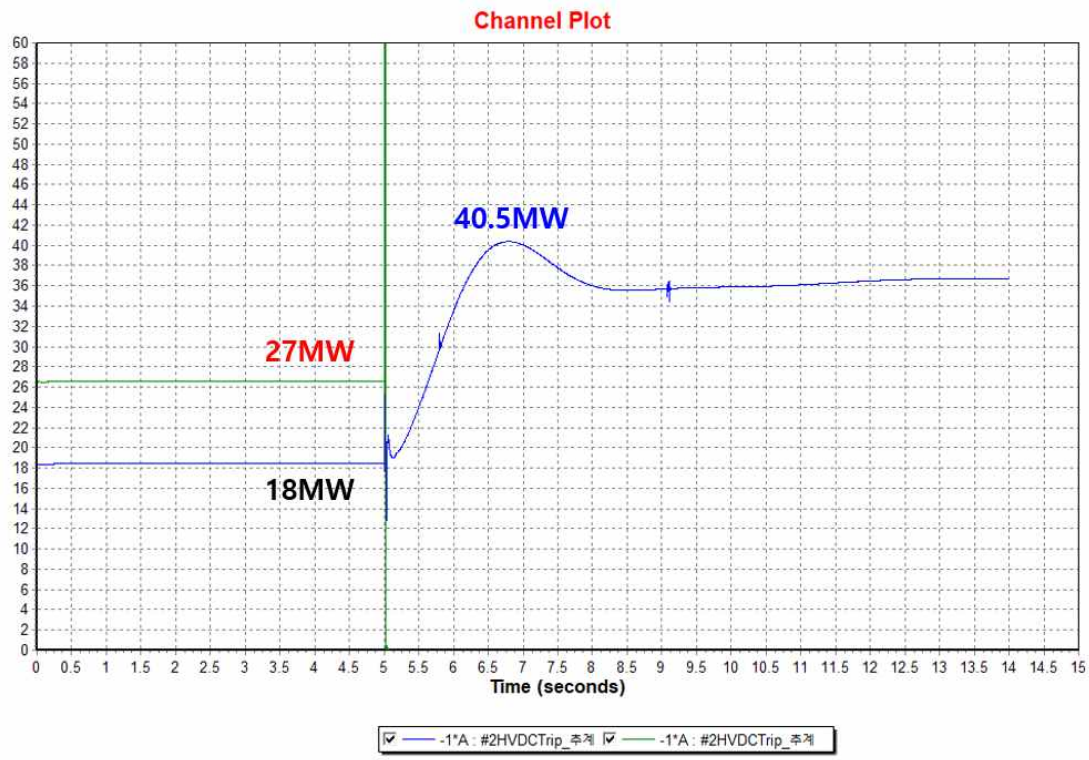


Fig. 23 #1·2HVDC each pole's output(Case ③)

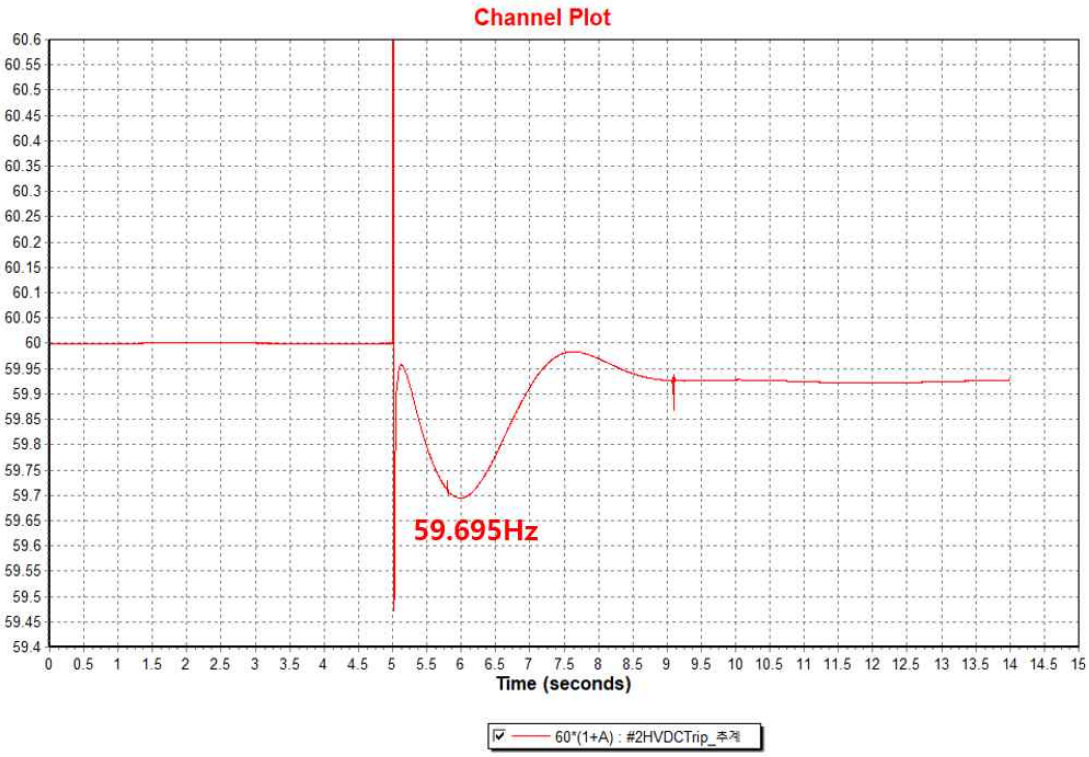


Fig. 24 System frequency(Case ③)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주계통에서 1차 외란 시 각 상정사고별 출력, 최저주파수 및 신재생 추가정지 가능성을 Table 13에 정리하였다. 세가지 케이스 중 Case ①, ③이 최저주파수가 59.8Hz이하로 떨어졌기 때문에 신재생 추가정지 가능성이 있는 것으로 분석했다.

Table 13 Output, lowest frequency and possibility of trip of renewables for each contingency case

| Case | 상 정 사 고 | 출력 (MW) | 최저 주파수 (Hz) | 비고 | 신재생 추가정지 가능성 |
|---|---|---|---|---|---|
| ① | 남제주기력#2 Trip | 48 | 59.766 | - | O |
| ② | #1HVDC Trip | 37 | 59.832 | slope 1% | X |
| ③ | #2HVDC Trip | 53 | 59.695 | slope 0% | O |

## 5.2 1차 외란 후 신재생 추가정지 시 주파수 변화

신재생 추가 정지 가능성이 있는 ① 남제주기력#2 Trip case, ③ #2HVDC Trip case에 대해서 Table 14에서 보듯이 신재생 탈락 비중을 10%, 30%, 50%로 가정하고 Dynamic Simulation을 진행하였다. 또한, 신재생 탈락 가능성이 있는 59.8Hz에 도달하는 시점에 신재생이 탈락한다고 가정하고 주파수 변화를 분석하였다.

Table 14 Renewables output and amount of trip for dropout ratio

| 신재생 발전량 | 탈락비중 | | |
|---|---|---|---|
| | 10% | 30% | 50% |
| 373 MW | 38 MW | 108 MW | 182 MW |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

< Case ① >

Fig 25에서 보듯이 Case ① 남제주기력#2 Trip시 신재생 탈락비중이 10%이면 59.624Hz, 30%면 59.280Hz, 50%이면 58.893Hz로 도출된다. 신재생 탈락비중 50%일때의 주파수는 59.0Hz 미만, 58.8Hz 초과이므로 UFR 1단계가 동작하게 된다.

신재생 탈락비중 10%일때의 그래프를 Fig 26~28에 나타내었다. Fig 27에서는 남제주기력#2가 Trip된 이후에 신재생발전기 또한 Trip되는 것을 확인할 수 있다. Fig 28에서는 남제주기력#2 Trip 및 신재생발전기 추가 Trip이 발생했을 때 #1,2HVDC 한 pole의 출력을 보여주고 있다. 5초에 남제주기력#2가 탈락하면서 HVDC가 응동하다가 약 5.3초에 신재생발전기가 추가 탈락하게 되면서 좀더 급격하게 응동하는 모습을 확인할 수 있다.

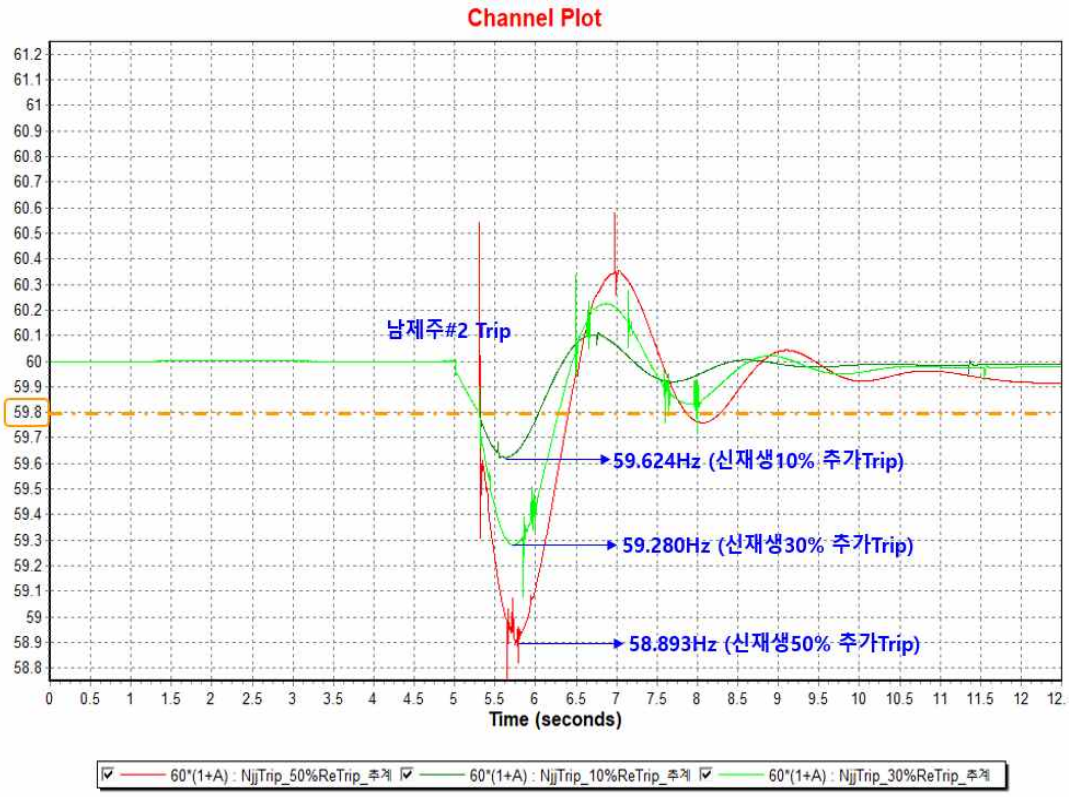


Fig. 25 System frequency against trip of Namjeju#2 and renewables



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

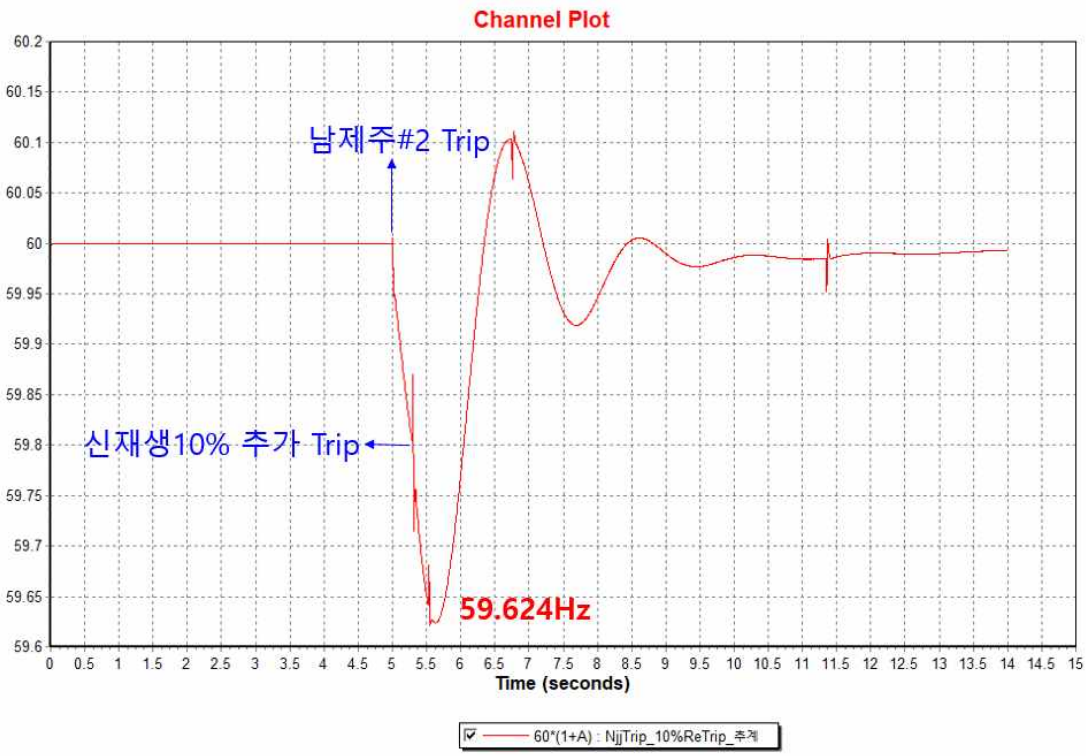


Fig. 26 System frequency against trip of Namjeju#2 and renewables 10%

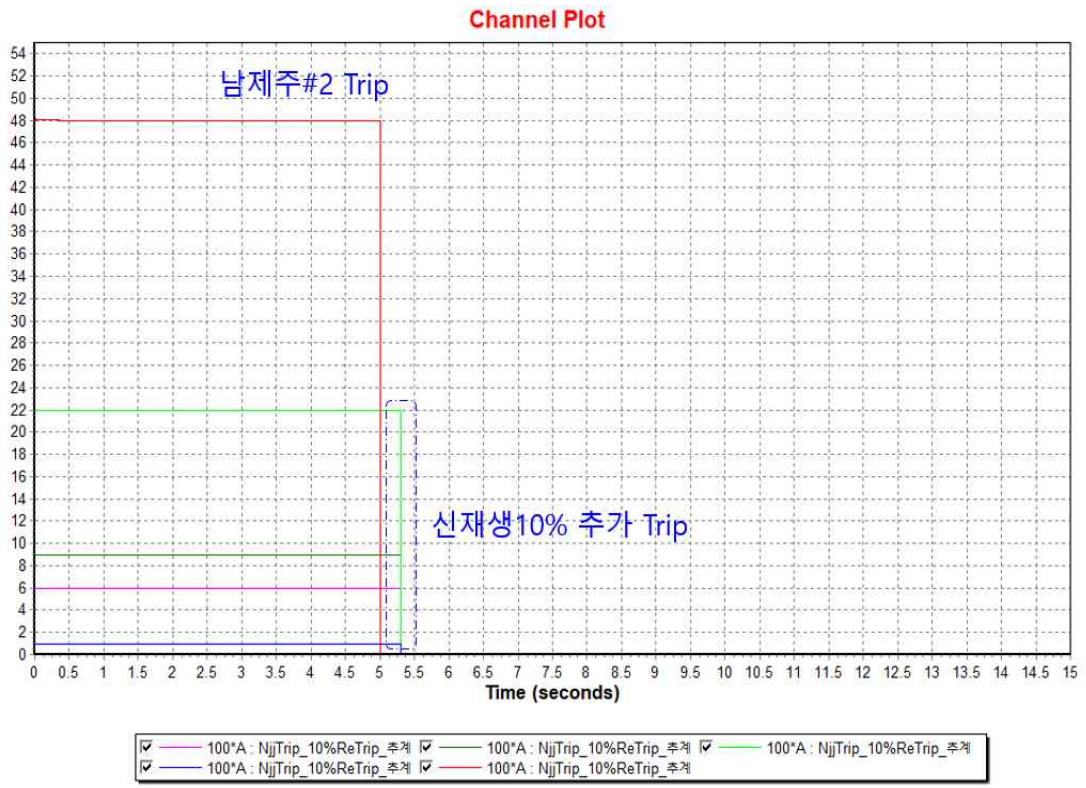


Fig. 27 Amount of trip about Namjeju#2, renewables 10%



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

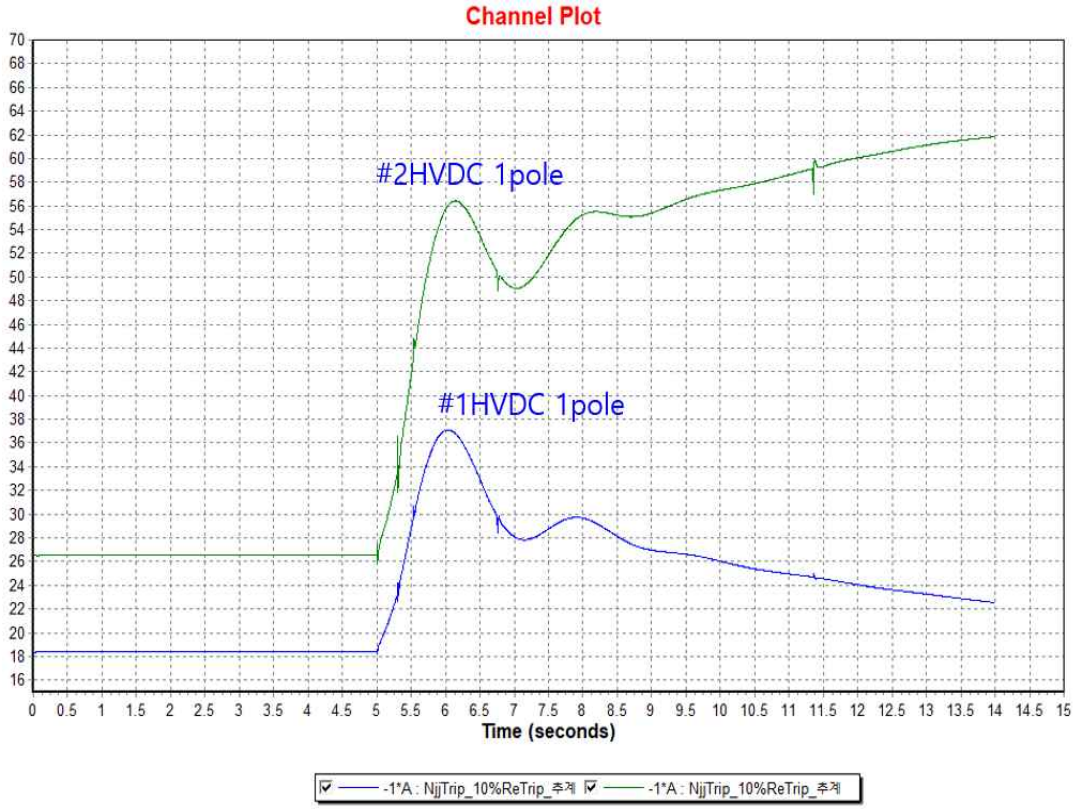


Fig. 28 #1·2HVDC each pole's output against trip of Namjeju#2 and renewables 10%

< Case ③ >

Fig 29에서 보듯이 Case ③ #2HVDC Trip에 따라 주파수가 하락하면서 신재생이 추가 탈락할 경우 그 비중이 10%이면 59.474Hz, 30%면 58.981Hz, 50%면 58.458Hz가 된다. 특히, 30% 탈락시엔 UFR 1단계가 동작하고 50% 탈락시엔 무려 UFR 3단계가 동작하게 된다.

신재생 탈락비중 50%일때의 그래프를 Fig 30~32에 나타내었다. Fig 30에서는 #2HVDC가 Trip된 이후에 신재생발전기 또한 Trip되는 것을 확인할 수 있다. Fig 32에서는 #2HVDC Trip 및 신재생발전기 추가 Trip이 발생했을 때 #1,2HVDC 한 pole의 출력을 보여주고 있다. 5초에 #2HVDC가 탈락하면서 #1HVDC가 응동하다가 약 5.5초에 신재생발전기가 추가 탈락하게 되면서 좀더 급격하게 응동하는 모습을 확인할 수 있다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

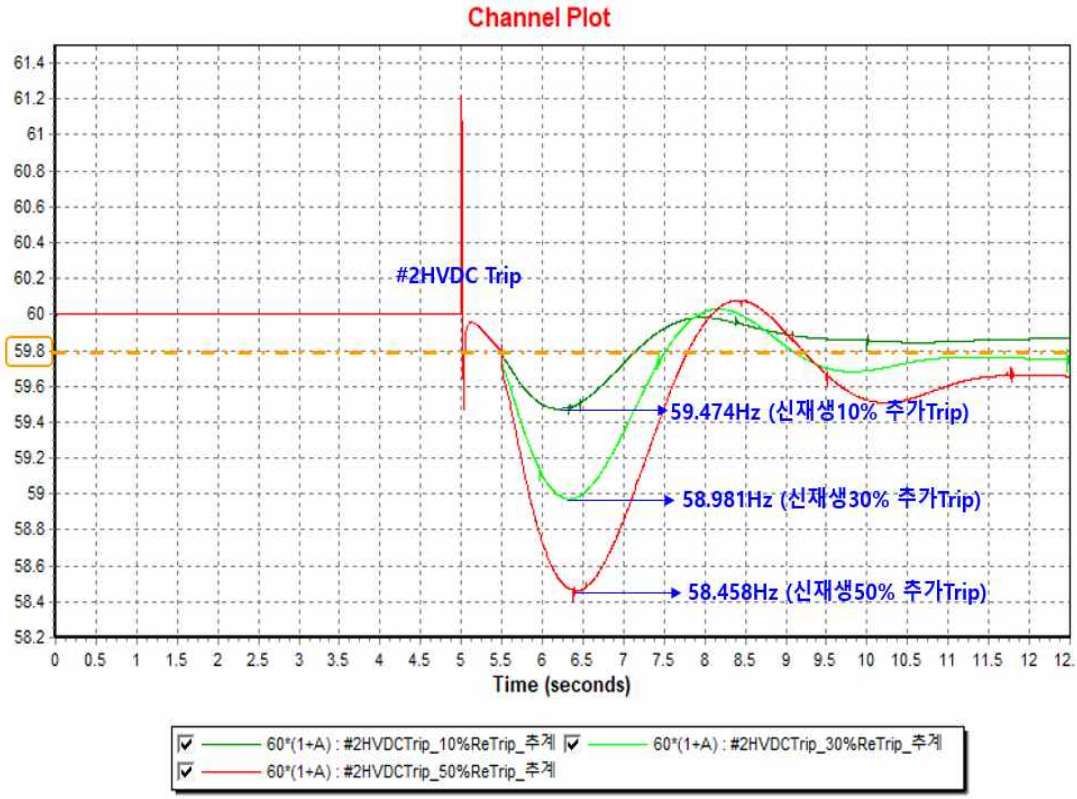


Fig. 29 System frequency against trip of #2HVDC and renewables

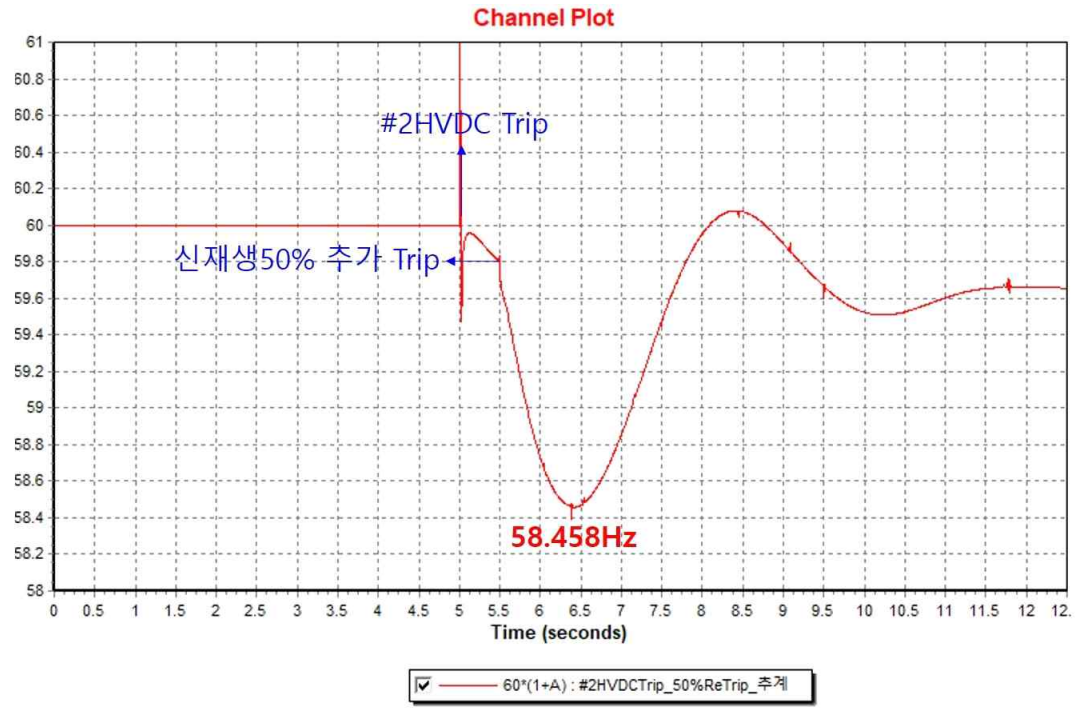


Fig. 30 System frequency against trip of #2HVDC and renewables 50%



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

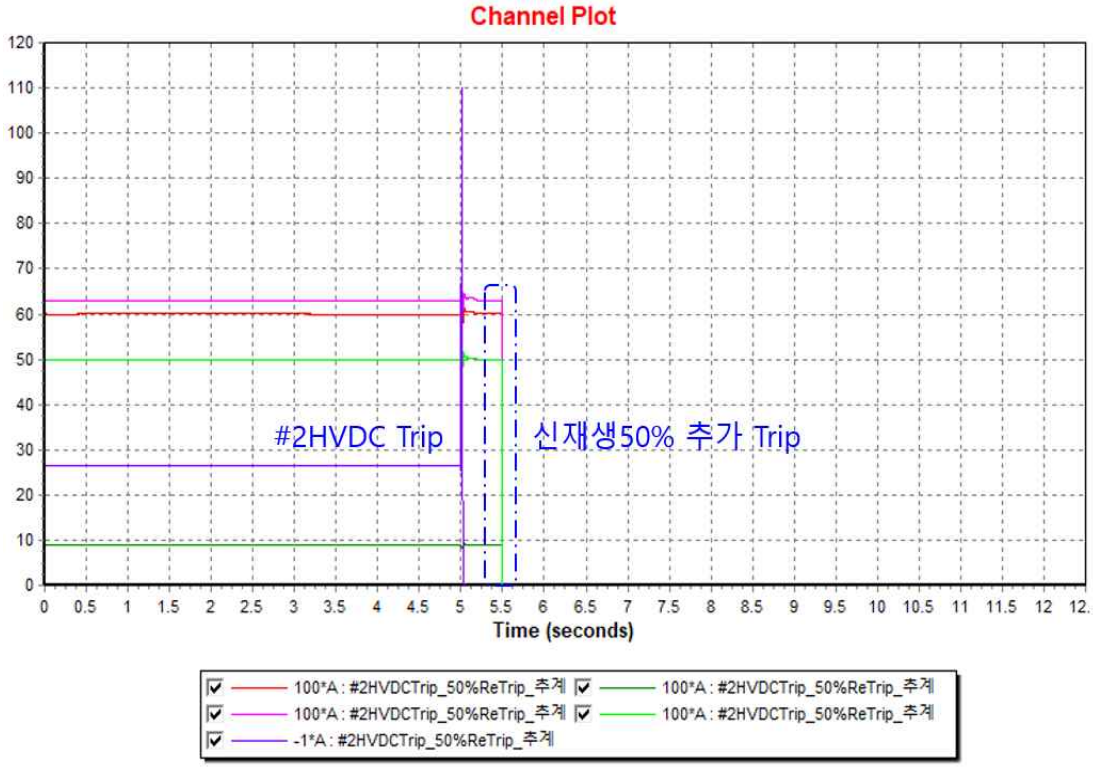


Fig. 31 Amount of trip about #2HVDC, renewables 50%

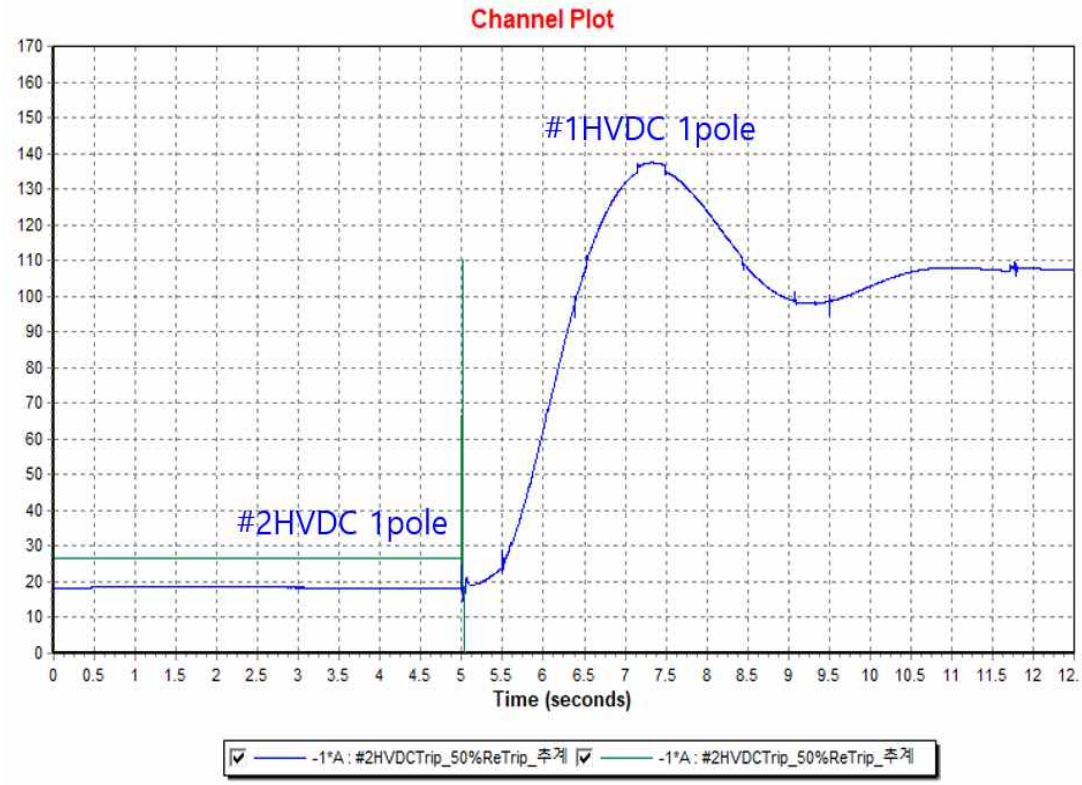


Fig. 32 #1·2HVDC each pole's output against trip of #2HVDC and renewables 50%



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

신재생 탈락비중에 따른 최저주파수 및 UFR 동작여부를 Table 15에 정리하였다. 신재생 탈락 비중이 클수록 주파수 하락은 커지게 되는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 계통에 수요에 비해 발전력이 부족하게 되면 주파수가 하락하게 되는데 하락폭이 클 경우 이를 저지하기 위해 부하를 탈락시켜 수요 자체를 저감시키는 UFR(Under Frequency Relay)이 동작하게 된다.

특히 Case ③의 경우 신재생 탈락비중이 50%일 때 UFR 3단계가 동작하게 된다. UFR 3단계일 경우 차단부하는 총 28%이다. 즉, 제주계통에서 전력을 공급받고 있는 지역 중 1/4의 지역이 정전이 발생할 수 있다는 의미이다. 실제 이런 상황이 발생하게 된다면 이로 인해 교통마비, 공장 정지 등 대규모 사회적·경제적 피해가 발생할 수 있으므로 저주파수에 대한 인버터 설정치 변경, 대규모 FR ESS 설치 등 이에 대한 대책이 최대한 빨리 강구되야 한다.

Table 15 The lowest frequency and UFR operation according to renewables dropout ratio

| Case | 상 정 사 고 | 신재생 탈락비중 (%) | 최저 주파수 (Hz) | UFR 동작여부 |
|---|---|---|---|---|
| ① | 남제주기력#2 Trip | 10 | 59.624 | - |
| | | 30 | 59.280 | - |
| | | 50 | 58.893 | 1단계 |
| ③ | #2HVDC Trip | 10 | 59.474 | - |
| | | 30 | 58.971 | 1단계 |
| | | 50 | 58.458 | 3단계 |

Table 16 UFR load blocking amount and operation time in Jeju

| 단계 | 주파수(Hz) | 차단부하(%) | 동작시간(cycle) |
|---|---|---|---|
| 1단계 | 59.0 | 10 | 15 |
| 2단계 | 58.8 | 9 | 15 |
| 3단계 | 58.6 | 9 | 15 |
| 4단계 | 58.4 | 8 | 15 |
| 5단계 | 58.2 | 6 | 15 |
| 6단계 | 58.0 | 5 | 15 |
| 후비 1단계 | 59.0 | 5 | 12sec |
| 계 | | 52 | |



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

## 5.3 해석 결과

제주 전력계통의 실적 및 육지계통에서 주파수 하락에 따른 신재생 추가탈락 주파수를 기준으로 외란에 따른 신재생 추가 정지시 주파수 변화를 분석하였다. 상정사고 케이스를 세 가지(남제주기력#2 Trip, #1HVDC Trip, #2HVDC Trip)로 나눠 주파수 변화를 시뮬레이션한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 1차 외란

남제주기력#2의 발전출력은 48MW였으며 #1HVDC의 수전량은 37MW, #2HVDC의 수전량은 53MW였다. 해당 설비들에 대해 상정사고를 모의한 결과 주파수 변화는 #1HVDC Trip > 남제주기력#2 Trip > #2HVDC Trip 로 분석되었다. 즉, 출력이 컸었던 설비가 탈락할 경우 주파수 불안정을 야기한다는 것을 확인할 수 있다. 또한, #1HVDC Trip 케이스가 남제주기력#2 Trip케이스보다 주파수 변화 측면에서 우수한 것으로 보아 #1HVDC의 출력이 낮았고 운전되고 있는 남제주기력#2의 관성 및 거버너 응답효과가 #1HVDC의 주파수 응답특성보다 우수한 것으로 추정된다.

2. 1차 외란 이후 주파수 하락에 따른 신재생 추가정지

#2HVDC Trip + 신재생 50% 탈락 시 가장 낮은 최저주파수(58.458Hz)를 기록하였다. 이는 #2HVDC의 수전량이 남제주기력#2의 발전량보다 크고 #2HVDC의 slope이 0%로 주파수 응답특성이 우수했기 때문으로 추정된다. 신재생 탈락비중이 50%일때는 남제주기력#2 Trip, #2HVDC Trip 케이스 모두 UFR 동작을 하였기 때문에 해당 수준에서도 충분히 부분정전이 일어날 수 있다는 가능성을 확인하였다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 6. 결 론

본 논문에서는 전력계통 주파수의 개념을 설명하고 최근 신재생 전원 증가에 따른 주파수 변화에 대한 영향을 보여주었다. 신재생 전원의 불확실성과 변동성으로 인해 수급불안정을 야기할 수 있고 이로 인해 주파수가 불안정해질 수 있다.

IEA의 신재생 보급단계별 이슈사항에 따르면 제주계통은 연간 신재생 발전비중이 약 16%로 유연성 이슈가 발생하는 Phase Ⅲ 단계에 해당된다. 다행히 제주 계통은 주파수 응답이 빠른 #1,2HVDC가 있고 신재생 예측시스템 등이 구축되어 있어 유연성 이슈에 잘 대응하고 있다. 하지만 FRT 관련 규정제정 지연으로 인해 Phase Ⅲ 단계임에도 불구하고 주파수 변화에 문제가 발생할 수 있는 현실에 이르렀다. FRT 규정에 의무적으로 따르지 않아도 되는 발전기들은 제주도 전체 설비용량 중 무려 36.6%이다. 해당 발전기들의 이용률이 높을 때 계통에서 탈락될 가능성이 있다면 상당히 낮은 최저주파수를 기록할 수 있다는 문제점이 있다.

이에 따라 PSS/E 프로그램을 활용하여 최근 실적을 기준으로 1차 외란 시 주파수 하락에 따른 신재생 추가정지에 대한 주파수 변화를 분석하였다. 그 결과 가장 심각한 케이스에서는 UFR 3단계까지 동작할 수 있을 정도로 주파수가 하락할 수 있다는 것을 확인하였다. 그러나 9차 전력수급계획에 명시되어 있는 것처럼 신재생 보급이 꾸준히 현속도로 이뤄진다면 주파수 불안정 문제는 점차 심각해질 것으로 예상되며 이제 문제인식을 하였으니 해결방안이 필요한 시점이라고 생각된다.

이러한 문제를 막기 위해 다각도로 접근할 필요가 있다. 우선 기설치된 신재생 전원에 대해 FRT 기능을 확보하도록 독려할 필요가 있다. 또한, 설비측면에서는 주파수조정용 ESS를 대규모로 설치하여 실제 사고 발생 시 주파수 하락에 대한 대응이 필요하다. 전력시장에서도 FRT 기능 제공 시 이에 대한 인센티브 등의 확실한 signal을 주어 사업자들이 자발적으로 계통에 도움되는 신재생 전원을 갖추도록 해야할 필요가 있다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

본 논문에서는 국내 사례를 참고하여 신재생 추가 탈락 가능성에 대해 문제를 제기하였고 제주계통에 대해 주파수 변화를 분석하였다. 그 결과, 현 제주계통은 부분정전이 발생 할 수 있는 상황임을 입증한 부분에 의의가 있다. 추후, 이러한 상황을 해결하기 위한 방안들을 실제 적용하기 위해선 FR ESS 모델링, 적정 설치개소 및 용량에 관한 선정, FRT 인센티브에 따른 신재생 수익성 분석 등에 관한 연구가 필요할 것이다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 참 고 문 헌


[1] EPRI, ERPI Power System Dynamics Tutorial, 2009.

[2] 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준, 산업통상자원부, 2015

[3] 전력시장운영규칙, 전력거래소, 2021

[4] 안재균, 신재생에너지 보급 확산을 대비한 전력계통 유연성 강화방안 연구, 에너지경제연구원, 2017

[5] Nationalgrid, GC0062-Fault ride through, 2015

[6] IEEE, getting wind and sun onto the grid a manual for policy makers, 2017

[7] California ISO, Caiso historical data in website, 2016

[8] 신재생 전원 확대에 따른 계통운영 신뢰도 확보 기준개선에 관한 연구, 전력거래소, 2019

[9] IEEE, IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces(1547-2018), 2018

[10] 송배전용 전기설비 접속규정, 한국전력공사, 2020

[11] 분산형전원 배전계통 연계 기술기준, 한국전력공사, 2020

[12] 강지윤, 제주지역 풍력발전시스템 분석 및 전력계통 해석, 제주대학교, 2009




제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

# 감사의 글

대학원에서 배움을 시작한지 어느덧 2년하고도 6개월이라는 시간이 흘렀습니다. 사실 시작하기 전에는 자비를 쓰는만큼 나에게 도움이 될까, 회사를 다니면서 학교수업을 수강할 수 있을까, 결혼준비와 병행해서 할 수 있을까, 논문은 통과할 수 있을까 등 많은 고민이 있었습니다. 이러한 고민이 무색하게 시간은 흐르고 흘러 어느새 2년 6개월이 지났고 제가 감사의 글을 쓰고 있는 이 순간이 감개무량할 따름입니다. 대학원 생활을 하면서 그동안 놓쳤던 전공지식도 습득하고 학문에 접근하는 방법 또한 조금이나마 경험할 수 있었습니다. 또한, 졸업자격 요건을 맞추기 위해 학회에서 구두발표를 처음으로 해보고 수상도 하는 쾌거를 이룰 수 있었습니다. 이 모든 것들은 제 인생에 있어 너무나도 큰 도움이 되었습니다.

이러한 석사과정동안 성심어린 지도, 따뜻한 격려와 부족한 저를 믿고 많은 가르침을 주신 김세호 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 대학원 생활에 있어 전공 지식들과 많은 관심과 사랑을 주신 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님, 진영규 교수님, 최영준 교수님께도 감사드립니다.

전력거래소에 입사하면서 첫 발령이 제주였지만 많은 도움을 주시고 대학원에 도전할 수 있게 도와주신 김영환 본부장님, 장시호 실장님, 조성빈 실장님께 감사드립니다. 또한, 제주본부에 지내면서 따뜻한 애정, 업무적으로도 많은 도움을 주신 강남호 차장님을 비롯한 관제차장님들과 관제직원분들, 운영실, 기획실 부서원분들께도 정말 감사드립니다. 그리고 현재 본사 계통기술팀에서 전문성 향상에 많은 도움을 주시고 격려해주시는 송태용 팀장님 그리고 계통기술팀 부서원분들께도 감사의 말씀을 드립니다. 많이 부족하지만 앞으로도 더 나은 모습 보여드리겠습니다.

자주 찾아뵙지 못하였지만 많은 도움을 주신 전력계통 연구실 김영민님, 전기공학과 과사무실 정재홍 조교님 감사드립니다.

그리고 매일 저를 위해 기도해주시는 어머니, 하늘에서 응원해주시는 아버지, 그리고 항상 응원해주시는 누나, 매형 정말 감사드립니다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

마지막으로 사랑하는 아내 승은아, 나를 항상 사랑해주고 믿고 응원해준 덕분에 이 과정도 무사히 마칠 수 있었던 것 같아. 정말 고마워. 여보를 만난 건 내 인생에 가장 큰 행운이고 행복이야. 사랑해.

2022년 07월

이상호 드림

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY