

SSR Risk Review in Case of Wild Fires in Uljin and Samcheok Using PMU Data in the Eastern Coast Korea Power System

영동권 실 계통 PMU 측정정보를 활용한 울진, 삼척 산불 시 SSR 위험성 검토

Suchul Nam · Bongil Koo · Joon Han · Sungbum Kang · Seungtae Cha

남수철[†] · 구본길^{*} · 한준^{*} · 강성범^{*} · 차승태^{*}

Abstract

The role of the power grid in the power system is to transmit the power produced at the power generation sites to the demand sites without interruption. When a new power source plan is established, a new power grid plan is also established so that necessary power grid construction is carried out at an appropriate time. However, the construction of a new power grid is not easy due to the problem of location selection and economic reasons. For this reason, efforts have been made for a long time to find ways to increase the capacity of the grid to avoid the construction of the new grid. A typical one of them is a method of increasing power transmission capacity by compensating the series capacitive impedance of the power transmission network. Therefore, KEPCO, in response to the delay in the construction of a new power grid for the construction of a large-scale power generation complex in the Yeongdong area, it was decided to increase the power transmission capacity of the existing power grid through series capacitive impedance. However, there is a risk that such an increase in transmission capacity through impedance compensation may cause problems such as sub synchronous resonance (SSR). In case of SSR, occurred when the resonance frequency of the impedance-compensated power grid coincides with the mechanical resonance frequency of the nearby generator, and if a mechanical burden is accumulated on the generator shaft, the shaft may break. For this reason, the power authorities reviewed the risk of SSR and installed thyristor controlled series capacitor (TCSC) based on the results to avoid dangerous frequency bands by adjusting the apparent impedance of the impedance-compensated transmission line. In this way, the risk of SSR was responded to through sufficient preparation for impedance compensation. However, in the case of wild fires in Uljin and Samcheok, which occurred in March 2022, a number of transmission lines were opened, and the network topology between the compensation line and the nearby generator approached the condition of SSR, increasing the risk of resonance. This paper analyzes the risk of actual SSR based on the system configuration during wildfires in Uljin and Samcheok and the system operation information obtained through the Phase Measurement Unit (PMU) located nearby sites.

Key Words

SSR, Sub Synchronous Resonance, TCSC, Thyristor Control Series Capacitor, PMU, Synchrophasor

1. 서론

전력계통에서 송전망의 역할은 발전기에서 생산된 전력을 수요지까지 중단 없이 전송하는 것이다. 새로운 발전소의 건설 계획이 수립되면 적절한 시기에 발전소를 연계하여 생산된 전력의 수송을 위한 송전계획 역시 수립된다. 그러나 최근에는 경제적 이유와 함께 입지 선정의 어려움으로 새로운 송전선로 건설이 쉽지 않은 문제이다. 이러한 상황에서 기존 송전선을 개선하여 새로운 송전선 건설을 회피할 수 있다면 이보다 좋은

해결책이 없을 것이다. 따라서 전력 당국은 오래전부터 송전선의 용량 증대를 위한 여러 가지 방안을 찾기 위해 노력하였으며, 직렬 커패시터 보상방안 역시 이러한 노력 중 하나이다. 리액터 성분으로 대부분 구성된 송전선에 커패시터 성분을 보상 해주면 송전선의 임피던스가 감소하는 효과가 있어, 기존 송전선로의 송전용량을 증대할 수 있다. 하지만 이와 같은 송전선의 직렬 커패시터 보상방안은 전력계통 운영에 있어서 새로운 어려움을 가져온다. 바로 전력망 진동의 문제이다.

전력망 진동은 크게 지역모드 (Local Mode), 지역 간 모드 (Inter

[†] Corresponding Author : Technology Planning Department, Korea Electric Power Cooperation, Korea

E-mail : suchul.nam@kepco.co.kr

<https://orcid.org/0000-0003-0617-4493>

^{*} KEPCO Research Institute, Korea

Received: Nov. 08, 2022 Revised: Dec. 06, 2022 Accepted: Jan. 02, 2023

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits un-restricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

This paper is an extended version of the conference paper [8], presented in KIEE Summer Conference held on July 12-16, 2022 in Yeosu, Republic of Korea.

area Mode), 비틀림 모드 (Torsional Mode) 등으로 구분된다. 우리나라에서도 전력망 진동이 관심을 받은 바 있다. 대표적인 것이 동해안과 서해안 발전기 간의 상호 진동과 지역 발전기와 전력계통 간의 진동 현상이다. 이러한 문제로 인해 대규모 발전기들에 전력계통 안정화 장치 (PSS, Power System Stabilizer)의 설치를 의무화하는 등 전력망 안정화에 큰 노력을 기울이고 있다. 최근에는 영동권에 설치된 대규모 발전기들에서 생산된 전력을 수도권으로 전송하는 과정에서 우려되는 과도안정도 문제에 대응하기 위한 직렬 보상설비 도입과정에서 발생 가능한 차동기 공진에 대한 위험이 관심을 받고 있다.

2020년 IEEE는 전력망 안정도의 정의를 확장하고 재정의 후, 공표하였다[1]. 새로운 안정도 정의에 따르면 기존의 위상각 (Rotor Angle), 전압 (Voltage), 주파수 (Frequency) 안정도 구분에 더하여 전력망 공진과 전력전자 컨버터로부터 발생 되는 진동 문제가 새롭게 안정도 구분에 포함되었다. 새로운 안정도 정의에서와 같이 현재 전력망에서 다양한 원인으로 발생하는 비선형진동의 문제가 전력망 운영에 많은 어려움을 불러오는 것을 알 수 있다.

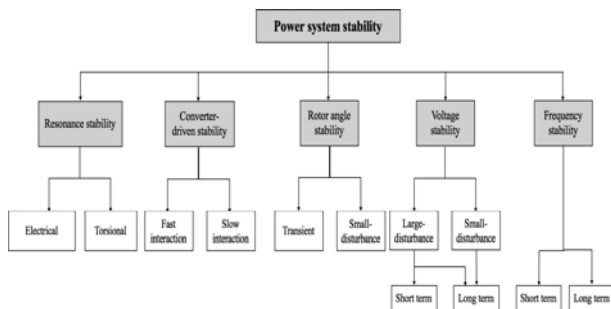


그림 1 IEEE 안정도 정의
Fig. 1 Stability definition of IEEE

국내외에서 전력망 진동의 위험성이 많은 관심을 받는 가운데 지난 2022년 3월 TCSC (Thyristor Control Series Capacitor)에 인접한 울진, 삼척 인근에서 발생한 산불로 TCSC 도입 당시 검토되었던 관심 발전기들에서 진동 발생위험이 보고된 바 있다. 따라서 본 논문에서는 울진, 삼척지역 산불 당시 계통구성과 인근에 있는 시각 동기 위상 측정 장치 (PMU, Phasor Measurement Unit)를 통해 취득된 계통 운영정보를 바탕으로 실제 차동기 공진 발생의 위험성을 분석하고 그 결과를 공유하고자 한다.

2. 본 론

2.1 차동기 공진

SSR은 다양한 전력망의 진동 현상 중 SSTI (Sub Synchronous Torsional Interaction), SSCI (Sub Synchronous Control Interaction) 등과 함께 비틀림 모드의 하나로 다시 비틀림 상호작용 (Torsional

Interaction Effect), 유도발전기 효과 (Induction Generator Effect), 과도 토크 (Transient Torque Effect)로 구분된다. 그림 2는 이와 같은 SSR의 분류를 보여주고 있다. SSR은 커패시터 성분으로 보상된 전력망에서 새롭게 생성된 전기적 진동 고유주파수 성분이 인근 발전기 축에서 갖는 기계적 진동 고유주파수와 상호작용을 통해 공진이 발생하여 지속되는 현상을 말한다. 이러한 SSR의 발생으로 인해 비틀림 진동이 지속되면 높은 축 토크로 인한 발전기 축의 수명 감소 또는 심할 경우 축이 파괴될 수 있다[2].

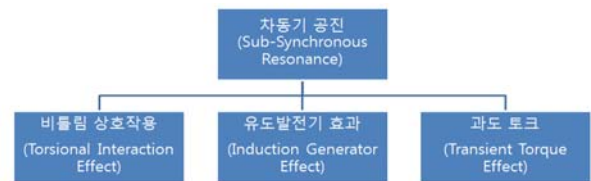


그림 2 SSR의 종류
Fig. 2 Sorts of SSR

이러한 SSR 문제를 해결하기 위해 운영자는 공진주파수를 제거하는 필터, 공진주파수 발생 시 문제 설비를 탈락하는 보호시스템, 계통에 추가적인 댐핑의 공급, 결보기 임피던스의 조절을 통해 공진주파수를 회피하는 TCSC의 적용 등을 고려한다.

2.1.1 SSR 회피를 위한 TCSC 적용

우리나라에서도 7차 전력수급기본계획 당시 영동지역에 약 7GW 이상의 신규 발전설비가 추가되고, 이를 수송하기 위한 새로운 전력망이 필요한 상황에서 발전기 준공 시점까지 신규 송전망 건설이 어려워 단기 대책으로 송전망의 직렬보상을 통하여 전력량 수송의 확대를 계획하였다[3].

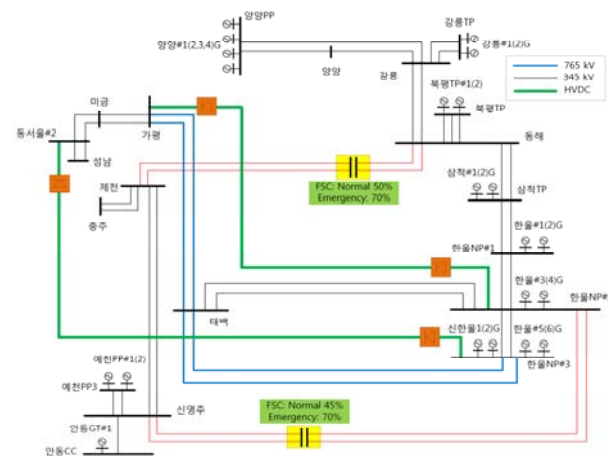


그림 3 동해안 인근 전력계통 (2024)
Fig. 3 Power System Diagram of East side of Korea (2024)

이를 위해 동해-신제천, 한울-영주 2개 루트의 345kV 선로를

대상으로 직렬보상을 결정하였다. 그림 3은 직렬보상이 결정된 당시 검토된 2024년 동해안 인근 전력계통 구성을 보여주고 있다. 그러나 당시, 임피던스 보상으로 전력망과 인근 발전기 간의 SSR 위험성이 언급되었다. 이러한 이유로 전력 당국은 사전 연구를 시행하여 도입 예정인 직렬보상에 따른 SSR의 위험성에 대하여 검토를 하고 인근 발전기 일부에서 SSR 발생의 위험성을 확인하였다. 그리고 검토 결과 확인된 SSR 위험성을 회피하기 위하여 TCSC를 적용하여 위험 구간에서의 공진주파수 회피를 통해 안정적인 계통 운영을 계획하게 되었다.

TCSC는 고정된 직렬 커패시터와 사이리스터로 제어되는 리액터로 구성된 직렬 임피던스 보상설비로 사전연구로 검토된 공진 위험 주파수를 TCSC 특유의 제어 효과를 통해 회피할 수 있는 특성이 있다[4].

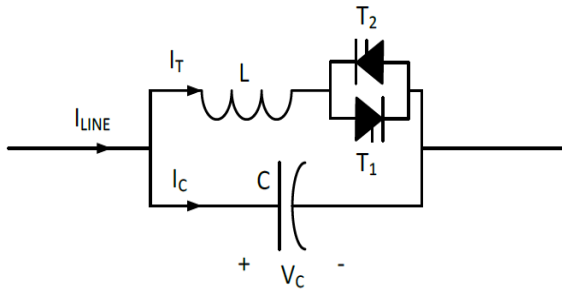


그림 4 TCSC 기본 구성
Fig. 4 Basic TCSC Topology

2.1.2 한전 계통에서의 SSR 위험성

이번 올진, 삼척 인근 산불 시 SSR 위험성이 보고된 발전기는 삼척 GP이었다. TCSC 적용 당시 시행하였던 사전 연구에서도 해당 발전기에 대한 SSR 위험성이 보고되었고, 당시 확인된 삼척 GP의 기계적 진동 고유주파수는 표 1과 같다.

이렇게 확인된 관심 발전기의 기계적 진동 고유주파수와 연계된 전력망의 전기적 진동 고유주파수를 비교하고, 일치되는 영역에서 발전기와 전력망이 보유하고 있는 댐핑 (Damping)이 얼마인지를 확인하여 최종적으로 SSR 위험성 여부를 확인하게 된다. 발전기의 기계적 댐핑 D_m 은 보통 표 1과 같이 제작사에 제공된 정보로 확인되며, 계통의 전기적 댐핑 D_e 는 계통 데이터를 바탕으로 그림 5와 같이 주파수 스캔을 통해서 구해진다 [5].

표 1 삼척 GP의 기계적 진동 고유주파수(Hz)와 기계적 댐핑

Table 1 Samcheok GP's Mechanical Oscillation Natural frequency(Hz) and Mechanical Damping

Mode	f_n [Hz]	H_m [s]	σ_m [1/s]	D_m [pu]
1	14.21	0.69	0.17	0.46
2	26	2.54	0.47	4.73
3	30.25	0.6	0.06	0.14
4	64.62	2.6 e6	0.74	7.12 e6

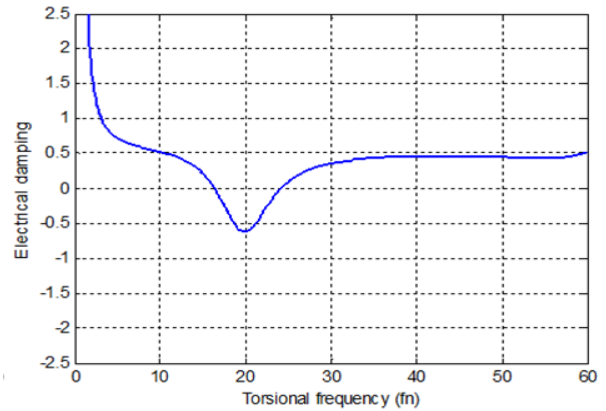


그림 5 주파수 스캔을 통한 전기적 댐핑 검토 사례(IEEE 1st benchmark model Case 2)

Fig. 5 Study Case of Electrical Damping by Frequency Scan (IEEE 1st benchmark model Case 2)

이렇게 구해진 기계적 댐핑 D_m 과 전기적 댐핑 D_e 을 비교하여 D_e 가 D_m 에 비해 더 작으면 SSR 위험성이 있는 것으로 판단한다. 예를 들어 그림 5에서 주파수 20Hz의 D_e 가 -0.6일 때, D_m 이 -0.6보다 크면 SSR 위험이 크고 D_m 이 -0.6보다 작으면 SSR 위험성이 작은 것으로 판단할 수 있다.

이와 같은 방법으로 SSR 검토를 위해서는 먼저 관심 발전기와 전력망 사이에 연계 계통구성이 필요하다. 일반적으로 직렬보상이 이루어진 전력망과 인근 발전기들 사이가 방사상으로 직접 연결될 때 위험성이 가장 크다. 따라서 사전 연구에서는 해당 발전기와 영동권에 설치된 2개의 TCSC 사이 연계 계통을 다양한 조건을 고려하여 구성하고, 이러한 조건에 대하여 인근 발전기들에 대한 차동기 공진의 위험성을 검토하였다.

그림 6, 7은 TCSC #1과 TCSC #2와 관심 발전기인 삼척 GP가 각각 연결되는 계통구성을 검토한 내용이다. 그림 6, 7과 같이 SSR 발생이 의심되는 가장 심각한 계통 상황을 가정하기 위해 최대 13개 설비가 고장 또는 조작을 통해 계통구성이 변경되는 상황을 가정하였다[5][6][7].

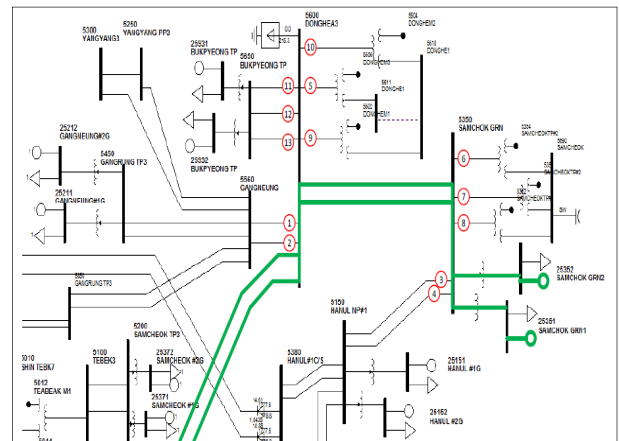


그림 6 삼척 GP와 TCSC#1 SSR 검토를 위한 선로구성

Fig. 6 System Configuration for SSR Study between Samcheok GP and TCSC #1

된 계전기를 통하여 표 3과 같은 위험 주파수 정보가 발생하였다. 표 1에서 확인한 삼척 GP 발전기의 기계적 진동 고유주파수 대역과 매우 인접한 것을 알 수 있다.

표 3 2022년 3월 4일 18시 11분 고장 시 주파수 정보 결과

Table 3 Frequency Alarm at March 4, 2022 18:11 time zone Contingency

발생 시간	주파수(유지 시간)	
2022.3.4. 18:11	34.4Hz(1.224s)	85.6Hz(1.224s)
	30.9Hz(1.223s)	89.1Hz(1.223s)

2.2.2 PMU 정보 활용 SSR 위험성 검토 결과

계전기를 통해 산발 당시 발전기의 기계적 진동 고유주파수 대역에 인접한 위험 주파수 발생을 확인하였으나, 실제 공진의 위험성을 확인하기 위해서는 당시 발생한 진동과 관련하여 진폭의 크기와 계통이 충분한 댐핑을 보유하고 있는지를 확인하는 과정이 필요하다.

이를 위해 동해변전소에 설치된 PMU 취득정보를 활용하여 주파수 분석과 고유치 해석을 통해 실제 SSR 발생의 위험성 여부를 확인하기로 하였다.

그림 11은 SSR 위험성이 보고된 3월 4일 18시 11분 25초 인근에서 태백 - 삼척 GP 154kV 고장 시 동해-삼척 GP 154 선로에서의 시간에 따른 유효전력 조류를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 선로 탈락 이후 정규 주파수 외에 다양한 대역의 주파수 성분이 중첩되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 일부 주파수 성분은 감쇄되어 사라지고 일부는 고장 이후 계속 유지되는 것으로 보이지만 정확한 진동 주파수 대역과 댐핑 보유 여부를 확인할 수 없으므로 주파수 분석을 시행하였다[8].

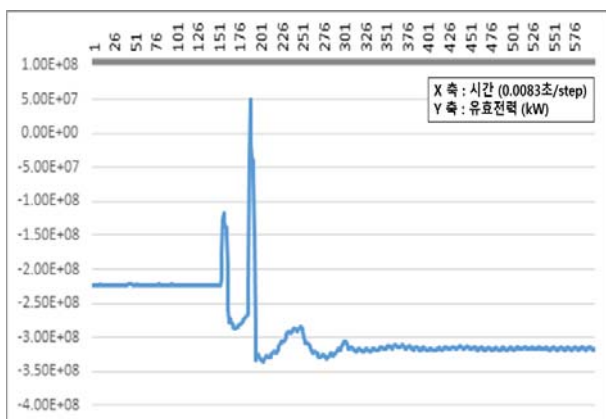


그림 11 PMU에서 측정된 '동해-삼척 GP' 선로의 유효전력 조류

Fig. 11 Active Power flow of 'Donghae - Samcheok GP' T/L measured by PMU

그림 12는 주파수 분석 결과이다. 분석 결과에서 13.9Hz와 15.03Hz, 28.5Hz 대역의 주파수가 검출되었으며, 진폭의 크기 역시 위 순서와 같았다.

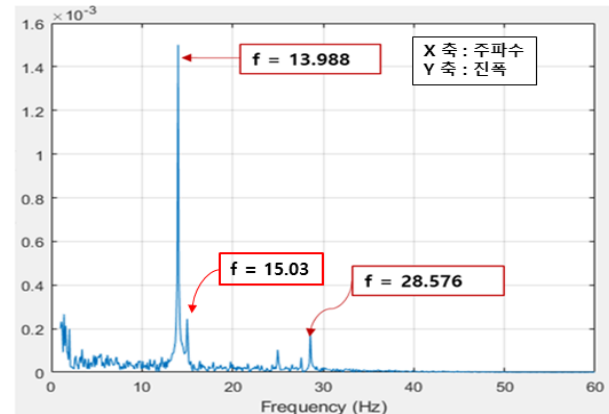


그림 12 고장 시 주파수 분석 결과

Fig. 12 Frequency analysis result at Contingency

주파수 분석만으로는 전력계통이 발생한 진동에 대하여 충분한 댐핑을 보유하고 고장 이후 발생한 진동이 소멸하여 위험성이 없거나 댐핑이 충분하지 않아 발생한 진동이 소멸하지 않고 전력계통에 위험으로 작용하는지를 알 수 없으므로 고유치 해석을 통하여 발생한 진동에 대한 댐핑 보유 여부를 확인하였다.

표 4는 올진, 삼척 산발 당시 취득된 PMU 정보를 활용한 고유치 해석 결과이다.

표 4 고장 시 고유치 해석 결과

Table 4 Eigenvalue analysis result at Contingency

Mode	Damping	Freq.(Hz)	Amp.	Phase.
1	-6.57	0.616	0.182	-116.268
2	-1.2	0.815	0.043	96.211
3	0.6	28.584	0.391	97.478
4	0.96	15.03	0.537	-171.935
5	1.18	13.973	3.515	54.365

고유치 해석 결과 5개 주파수 모드를 확인하였다. 각각 0.61 Hz, 0.81Hz, 28.58Hz, 15.03Hz, 13.97Hz 대역의 진동이 확인되었으며, 1Hz 미만의 2개 진동은 음의 댐핑을, 나머지 3개 진동은 양의 댐핑을 갖고 있었다. 진폭의 경우 그림 12에서 13.97Hz 외 4개 진동은 e^{-3} 이하의 매우 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 고장 이후 발생한 진동을 고유치 해석 결과 드러난 개별 주파수 대역으로 분해하여 시간에 따라 변화하는 모습을 확인해 보았다. 그림 13부터 그림 17은 각 주파수 대역별 시계열 변화를 나타내고 있다. 고유치 해석 결과에서 확인한 바와 같이 0.61Hz, 0.81Hz 대역의 진동은 댐핑이 충분하지 않아 고장 이후 빠르게 소멸하지 않고 유지되는 것을 확인할 수 있다. 반면 28.58Hz, 15.03Hz, 13.97Hz 대역의 진동은 댐핑이 충분하여 빠르게 진동이 소멸하는 것을 확인할 수 있다.

이중 표 3에서 확인한 주파수 정보와 관련된 진동은 28.58Hz 대역으로 발생한 진동이 관심 발전기의 고유주파수에 근접하였으나, 진폭이 작고 진동을 억제하는 충분한 댐핑을 보유하고 있어 심각한 고장으로 발전할 위험성은 적었던 것으로 판단할 수 있다.

반면 비록 진폭이 작고 관심 발전기의 고유주파수 대역에 인접하지 않은 0.61Hz와 0.81Hz 주파수 대역의 진동은, 진동을 억제할 수 있는 댐핑이 부족한 것으로 확인되어 추가 검토가 필요할 것으로 보인다. 발생한 주파수 대역으로 볼 때, 해당 진동은 동해안 지역 내 발전기군 간의 상호 진동으로 추정된다. 다른 시간대에서 확인한 주파수 분석 결과에서는 관찰되지 않은 것으로 보아 해당 시간대에서 확인하지 못한 특정한 조건에서 미확인된 발전기군 사이에 발생하는 진동으로 사료 된다. 타 시간대에서 소멸하여 당장에는 큰 문제가 없겠지만 향후 확인되지 않은 특정 조건에서 다시 발생하면 큰 문제가 발생할 수 있으므로 근처에 설치된 PMU를 통하여 추적 관찰할 필요가 있다.

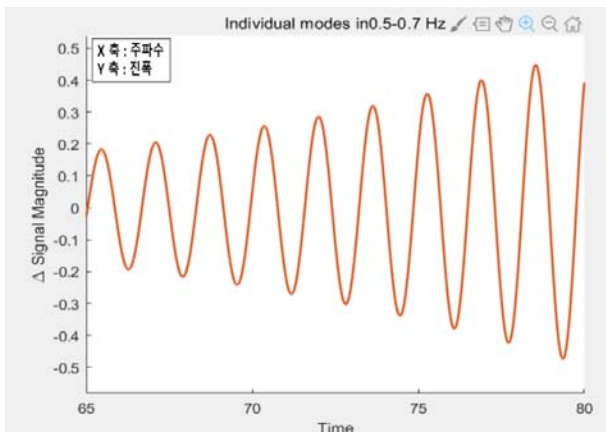


그림 13 고장 시 주파수 (0.61Hz) 시계열 파형

Fig. 13 Time series frequency (0.61Hz) waveform at Contingency

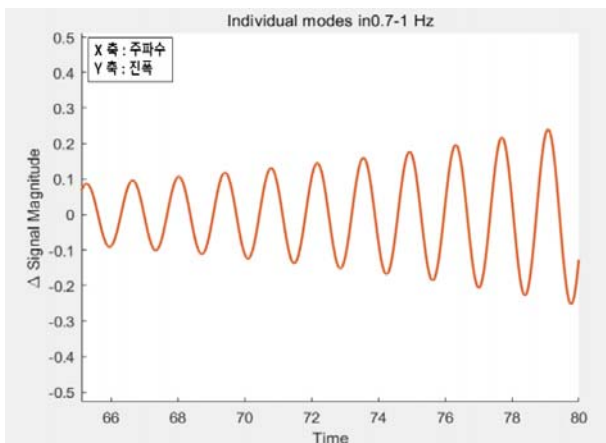


그림 14 고장 시 주파수 (0.81Hz) 시계열 파형

Fig. 14 Time series frequency (0.81Hz) waveform at Contingency

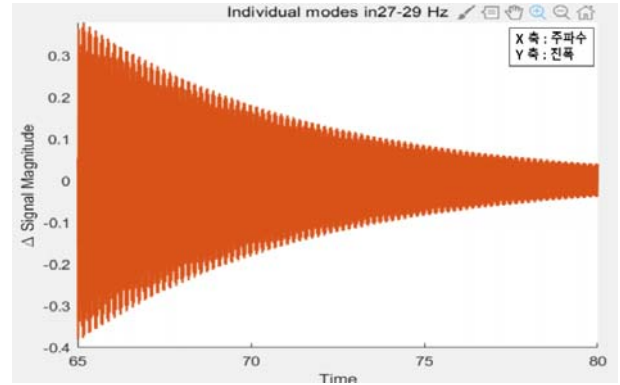


그림 15 고장 시 주파수 (28.58Hz) 시계열 파형

Fig. 15 Time series frequency (28.58Hz) waveform at Contingency

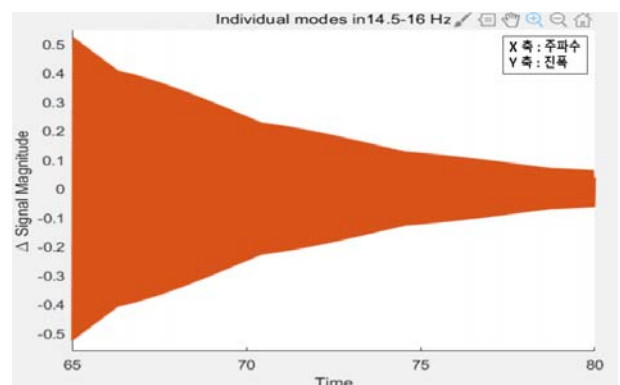


그림 16 고장 시 주파수 (15.03Hz) 시계열 파형

Fig. 16 Time series frequency (15.03Hz) waveform at Contingency

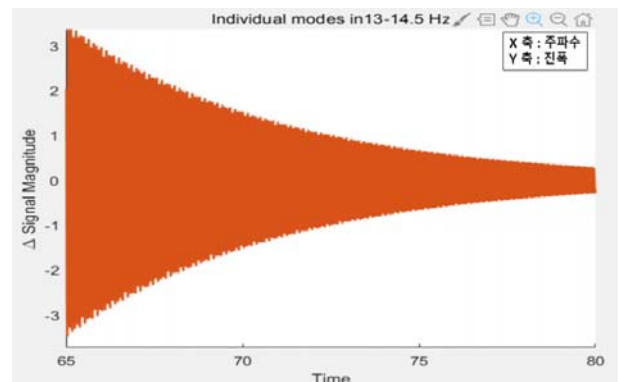


그림 17 고장 시 주파수 (13.97Hz) 시계열 파형

Fig. 17 Time series frequency (13.97Hz) waveform at Contingency

3. 결 론

이상기후의 여파로 근래에 들어 전 세계적으로 대규모 자연 재해가 끊이지 않고 있다. 우리나라도 봄철 가뭄이 심각해 대규모 산불이 매해 반복되는 상황이며, 2022년 3월 발생한 울진, 삼척 산불의 경우 산불에 의한 직접적인 피해에 더해 인근 전력계통이 영향을 받아 대규모 정전으로 발전될 수 있는 상황까지 이어졌다. 765kV 선로의 탈락으로 인한 위험 상황에 가려졌지만, 직렬 보상선로 인근의 계통구성이 변경되면서 다수의 선

로고장이 동반되어야만 해 발생 확률이 매우 낮아 보이던 SSR 발생 경보가 발생하는 상황이 벌어졌다. 더구나 재생 에너지 FACTS 등 신 전력 설비들의 증가로 안정도 한계에서 운전 중인 최근의 계통 여건에서 과거에 경험하지 못한 새로운 문제가 보고되고 상황에서 미래 전력계통의 안정적 운영이 쉽지 않다는 사실을 확인한 사례이다.

안정적인 계통 운영을 위해서는 현 계통 상황을 정확히 인지하고 대응하는 것이 중요하지만 기존의 SCADA 설비로는 이번의 진동 문제를 포함한 새로운 전력계통 운영의 문제들을 정확히 파악하고 대응하기에 한계가 있다. 이에 한전에서는 고정밀 감시가 가능한 PMU를 설치하고 진동 문제에 대응하기 위한 신기술을 개발해 나가고 있다. 이러한 가운데 산불 당시 예상치 못한 대규모 송전망의 고장으로 SSR 위험 발생 가능성이 커졌고, 때마침 인근 계통에서 운영 중인 PMU를 통해 당시 상황에 대한 정확한 정보를 취득하여 그 위험성을 더 정확히 확인할 수 있었다. 다행히 지난 올진, 삼척 산불 간 발생한 고장들은 큰 위험 없이 넘어갔지만, 미래 계통은 더욱 불확실성이 커질 것으로 예상되는 만큼 사전에 PMU 등의 감시 기반을 확충하고 대응 기술의 개발이 필요할 것이다.

References

- [1] IEEE Power and Energy Society, "Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies," Tech. Rep. PES-TR77, May 2020.
- [2] P.M.Anderson, "Series Compensation of Power Systems," PBLSH, pp. 230-231, 1996.
- [3] KEPCO, "Long-term Power Transmission facility Plan," KEPCO, 2017.
- [4] J. Choi, "Power System Optimization through Application of New Power System Technology (TCSC)," Electric Journal, 465, pp. 24-29, September 2015.
- [5] S. Nam, "Development of TCSC models and its impact on power system of KEPCO," TR, 2017.
- [6] ABB, "KEPCO TCSC Feasibility: Category C - Phase 1 SSR study," Feasibility Study Report, 2016.
- [7] ABB, "KEPCO TCSC Feasibility study final report," Feasibility Study Report, 2016.
- [8] S. Nam, S. Cha, B. Koo, J. Han, S. Kang, C. Park, "Study about SSR risk using Real time measurement DATA during Uljin Wild Fire," in KIEE Summer Conference 2022, July 2022.

저자소개

남수철 (Suchul Nam)



He received the M.S degree in electrical engineering from Korea Univ., Rep. of Korea. Since 2006, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute Rep. of Korea

구본길 (Bongil Koo)



He received the M.S degree in electrical engineering from Pusan National Univ., Rep. of Korea. Since 2015, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute Rep. of Korea

한준 (Jun Han)



He received the M.S degree in electrical engineering from Sungkyunkwan Univ., Rep. of Korea. Since 2016, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute Rep. of Korea

강성범 (Sungbum Kang)



He received the M.S degree in electrical engineering from Sungkyunkwan Univ., Rep. of Korea. Since 2016, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute Rep. of Korea

차승태 (Seungtae Cha)



He received the Ph.D degree in electrical engineering from Technical University of Denmark. Since 1997, he has been with Korea Electric Power Corporation Research Institute Rep. of Korea