



# 인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개선방안

2024. 04. 25

동서울대학교 김지훈



# 목차

01

**전력계통 안정도의 정의 및 분류**  
- IEEE PES 안정도 개념 분석

02

**인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개선 방안**  
- 안정도 관련 사례 분석 및 연계 규정 개정

03

**인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개선 방안**  
- 감시시스템 고도화 및 해석 모델 정밀화

04

**붙임**

인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개  
선방안

## 전력계통 안정도의 정의 및 분류 - IEEE PES 안정도 개념 분석

01

# Power System Stability

## ■ IEEE PES 안정도 정의의 변화

Transactions on Power Systems

IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 19, NO. 2, MAY 2004

1507

### Definition and Classification of Power System Stability

IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions

Prabha Kundur (Canada, *Convener*), John Paserba (USA, *Secretary*), Venkat Ajjarapu (USA), Gábor Andersson (Switzerland), Anjan Bose (USA), Claudio Canizares (Canada), Nikos Hatziargyriou (Greece), David Hill (Australia), Alex Stankovic (USA), Carlos Taylor (USA), Thierry Van Cutsem (Belgium), and Vijay Vittal (USA)

**Abstract**—The problem of defining and classifying power system stability has been addressed by several previous CIGRE and IEEE Task Force reports. Their earlier efforts, however, do not completely reflect current industry needs, experiences and understanding. In particular, the definitions are too precise and the classifications do not encompass all practical stability scenarios.

This report developed by a Task Force, set up jointly by the CIGRE Study Committee 38 and the IEEE Power System Dynamic Performance Committee, addresses the issue of stability definition and classification in power systems from a fundamental viewpoint and clearly examines the practical ramifications. The report aims to define power system stability more precisely, provide a systematic basis for its classification, and discuss linkages to related issues such as power system reliability and security.

**Index Terms**—Frequency stability, Lagrange stability, military stability, power system stability, small-signal stability, terms and definitions, transient stability, voltage stability.

#### I. INTRODUCTION

POWER system stability has been recognized as an important problem for secure system operation since the 1920s [1], [2]. Many major blackouts caused by power system instability have illustrated the importance of this phenomenon [3]. Historically, transient instability has been the dominant stability problem on most systems, and has been the focus of much of the industry's attention concerning system stability. As power systems have evolved through continuing growth in interconnections, use of new technologies and controls, and the increased operation in highly stressed conditions, different forms of system instability have emerged. For example, voltage stability, frequency stability and incoherent oscillations have become greater concerns than in the past. This has created a need to review the definitions and classification of power system stability. A clear understanding of different types of instability and how they are interrelated is essential for the satisfactory design and operation of power systems. As well, consistent use of terminology is required for developing system design and operating criteria, standard analytical tools, and study procedures.

The problem of defining and classifying power system stability is an old one, and there have been several previous reports

on the subject by CIGRE and IEEE Task Forces [4]–[7]. These, however, do not completely reflect current industry needs, experiences, and understanding. In particular, definitions are not precise and the classifications do not encompass all practical stability scenarios.

This report is the result of long deliberations of the Task Force set up jointly by the CIGRE Study Committee 38 and the IEEE Power System Dynamic Performance Committee. Our objectives are to:

- Define power system stability more precisely, providing a systematic basis for classification, identifying and defining clearly, providing a broad picture of the phenomena.
- Discuss linkages to related issues such as power system reliability and security.

Power system stability is similar to the stability of any dynamic system, and has fundamental mathematical underpinnings. Precise definitions of stability can be found in the literature dealing with the rigorous mathematical theory of stability of dynamic systems. Our intent here is to provide a physically motivated definition of power system stability which in broad terms conforms to precise mathematical definitions. The report is organized as follows. In Section II the definition of Power System Stability is provided. A detailed discussion and elaboration of the definition are presented. The conformance of this definition with the system theoretic definitions is established. Section III provides a detailed classification of power system stability. In Section IV of the report the relationship between the concepts of power system reliability, security, and stability is discussed. A description of how these terms have been defined and used in practice is also provided. Finally, in Section V definitions and concepts of stability from mathematics and control theory are reviewed to provide background information concerning stability of dynamic systems in general and to establish theoretical connections.

The analytical definitions presented in Section V constitute a key aspect of the report. They provide the mathematical underpinnings and bases for the definitions provided in the earlier sections. These details are provided at the end of the report so that interested readers can examine the finer points and assimilate the mathematical rigor.

### Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended

Chairman: N. Hatziargyriou Co-Chairman: J. V. Milanović Secretary: C. Rahmann

Contributors: N. Hatziargyriou, Fellow, IEEE, J. V. Milanović, Fellow, IEEE, C. Rahmann, Senior Member, IEEE, V. Ajjarapu, Fellow, IEEE, C. Canizares, Fellow, IEEE, I. Erlich, Senior Member, IEEE, D. Hill, Fellow, IEEE, I. Hiskens, Fellow, IEEE, I. Karam, Fellow, IEEE, B. Pal, Fellow, IEEE, P. Pourbeik, Fellow, IEEE, J. J. Sanchez-Gasca, Fellow, IEEE, A. Stankovic, Fellow, IEEE, T. Van Cutsem, Fellow, IEEE, V. Vittal, Fellow, IEEE, C. Vournas, Fellow, IEEE.

**Abstract**—Since the publication of the original paper on power system stability definitions in 2004, the dynamic behavior of power systems has gradually changed due to the increasing penetration of converter interfaced generation technologies, loads, and transmission devices. In recognition of this change, a Task Force was established in 2014 to re-examine and extend, where appropriate, the classic definitions and classifications of the basic stability terms to incorporate the effects of fast-response power electronic devices. This paper based on an IEEE PES report summarizes the major results of the work of the Task Force and presents extended definitions and classification of power system stability.

**Index Terms**—Converter-driven stability, electric resonance stability, frequency stability, power system stability, small-signal stability, transient stability, voltage stability.

#### LIST OF ACRONYMS:

BESS Battery energy storage systems  
CIGRÉ Converter interfaced generation  
DSSO Device-dependent subsynchronous oscillations  
DFIG Doubly-fed induction generators  
FACTS Flexible AC transmission systems  
HVDC High Voltage Direct Current  
IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor  
LCC Line commutated converters  
PLL Phase-locked loop  
PMG Direct-drive permanent-magnet generator  
PSS Power system stabilizer  
PV Photovoltaic  
SCR Short circuit ratios  
SSCI Subsynchronous control inductor  
SSR Subsynchronous resonance  
STATCOM Static synchronous compensator  
SVCS Static Var compensators  
VSC Voltage source converters

#### I. INTRODUCTION

##### A. Background

A task force set up jointly by the IEEE Power System Dynamic Performance Committee and the CIGRE Study Committee (SC) 38, currently SC C4 – System Technical Performance, had addressed in [1] the issue of stability definition and classification in power systems from a

fundamental viewpoint and had closely examined the practical ramifications. This joint effort involving IEEE PES and CIGRÉ was comprehensive and clearly contrasted the electromechanical phenomena associated with various classes of power system stability behavior in comparison to earlier efforts and limited definitions and classifications provided in various textbooks and papers. At the time this document was published in 2004, the dynamic behavior of power systems was predominantly determined by the dynamic performance of synchronous generators and their controls and the performance of the loads. Consequently, [1] primarily dealt with fairly slow, electromechanical phenomena, typically present in power systems dominated by synchronous machines, while fast transients related to the network and other fast-response devices were considered out of scope and thus neglected, as they typically decay rapidly [2].

Since the publication of [1], however, electric power systems worldwide have experienced a significant transformation, which has been predominantly characterized by an increased penetration of power electronic converter interfaced technologies. Among these new technologies are wind and photovoltaic generation, various storage technologies, flexible AC transmission systems (FACTS), High Voltage Direct Current (HVDC), lines, and power electronic interfaced loads. With significant integration of converter interfaced generation technologies (CIGs), loads, and transmission devices, the dynamic response of power systems has progressively become more dependent on (complex) fast-response power electronic devices, thus, altering the power system dynamic behavior. Accordingly, the report [3] comprehensively addresses the new stability concerns arising, which need to be appropriately characterized, classified, and defined.

This paper focuses on classifying and defining power system stability phenomena based on [3], including additional considerations due to the penetration of CIG in bulk power systems. The effects of converter connected loads on stability are also briefly discussed, where relevant.

##### B. Time Scales of Power System Dynamic Phenomena

Fig. 1 depicts the time scales for various classes of dynamic phenomena in power systems. It can be seen that the time scale related to the controls of CIGs ranges from a few microseconds to several milliseconds, thus encompassing wave and electromagnetic phenomena. Considering the

IEEE Power & Energy Society

April 2020

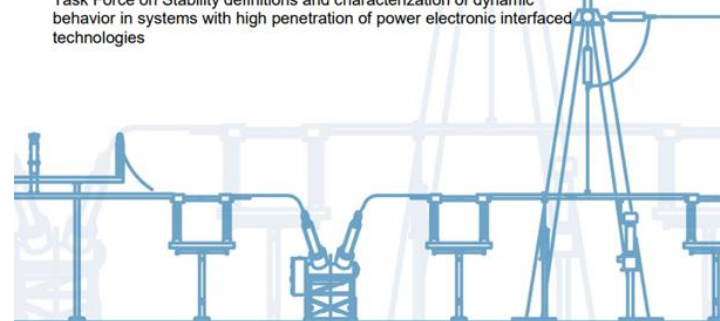
TECHNICAL REPORT

PES-TR77



## Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies

PREPARED BY THE  
Power System Dynamic Performance Committee  
Task Force on Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies



© IEEE 2020 The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

계통 내 IBR 기기의 증가로  
안정도 개념 재정의 및 신설

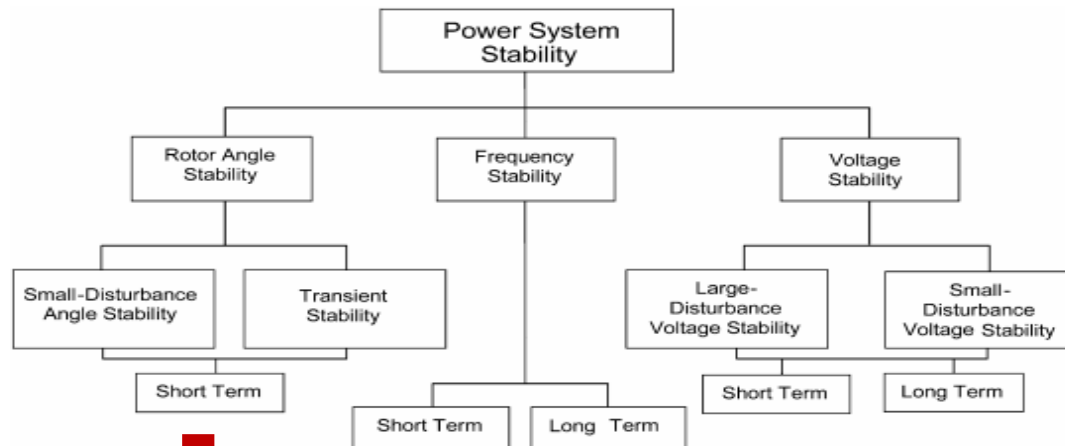
# Power System Stability

## ■ IEEE 안정도 정의의 변화

- IBR 증가에 따른 기준

전력계통 안정도 **재정의** 및

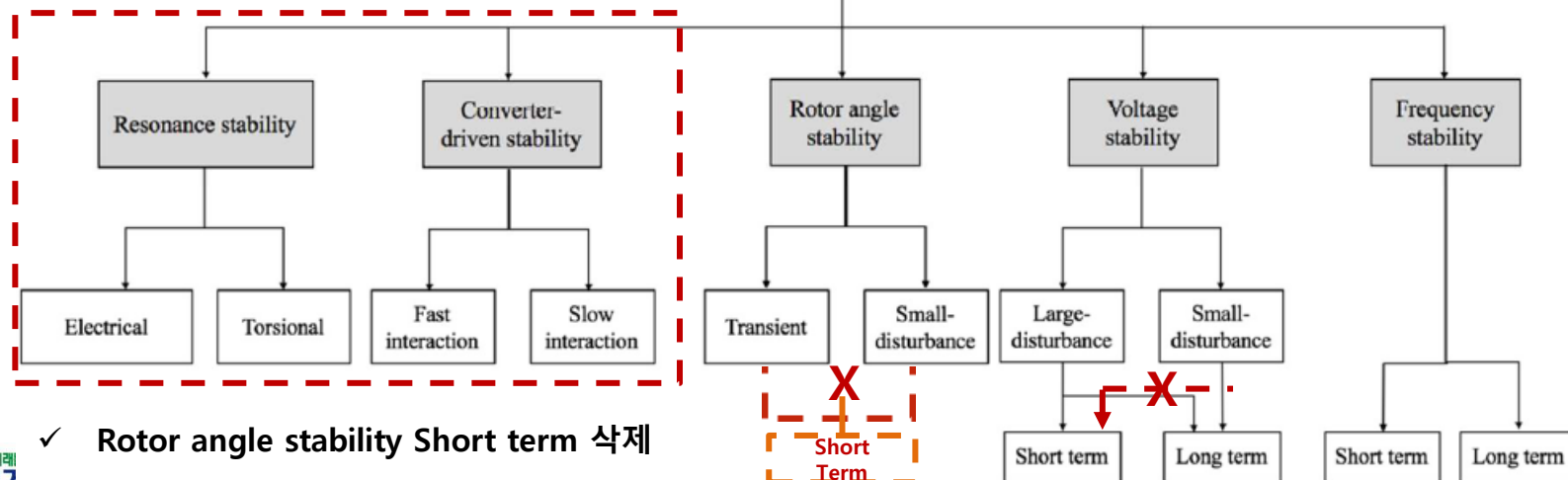
**신설 안정도** 분류체계 도입



- ✓ Resonance stability
- ✓ Converter-driven stability 추가

**Power system stability**

- ✓ Small-disturbance – short term 연결 삭제



- ✓ Rotor angle stability Short term 삭제

# Power System Stability

- 전력계통 안정도 평가의 환경 변화

## 전력계통 안정도 핵심 Issue

기존 AC  
기반  
안정도

전압안정도

주파수안정도

과도안정도

환경  
변화

인버터 기반 재생 설비 증가  
DC 기반 전력기기 및 전력전자 설비 증가



계통 관성 감소  
강건성 저하

새로운계통 안정도검증 기반구축

신규  
안정도

전압  
안정도

주파수  
안정도

과도  
안정도

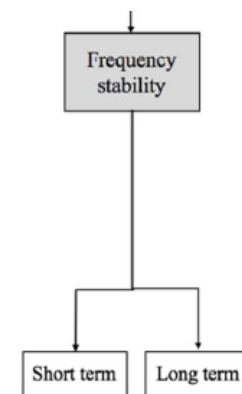
진동  
안정도

컨버터 기반  
안정도

# 주파수 안정도

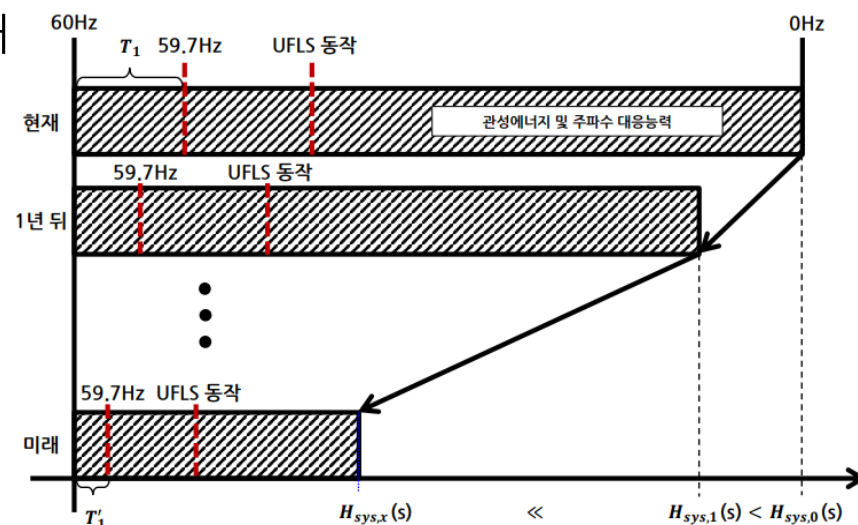
## 정의 및 변화사항

- 전력계통에서 외란시에 **계통의 주파수를 유지**하는 능력
- 주파수를 유지, 회복하는 Frequency Stability의 **정의에는 변화가 없음**



## IBR 증가에 따른 주파수 안정도의 영향

- IBR 증가에 따라 가장 빠른 영역인 **관성 변화**로 Frequency Stability 변화
  - IBR 증가로 동기발전기를 대체하여 관성에너지 및 주파수 대응자원 감소
  - 계통 관성에너지 감소는 외란이 발생하였을 때 짧은 시간에 더 많은 주파수 변동을 야기함
  - 짧은 시간 안에 큰 주파수 변동은 예상치 못한 설비 보호시스템 및 UFLS 동작 가능성을 증가시킴



# 주파수 안정도

## ■ 저관성 계통의 안정도 대응 방안

- ▣ 미래 계통의 관성저하에 대비하여 계통운영에 활용 가능한 **계통관성 감시 지표** 필요
  - 관성저하 시 고장 발생으로 인한 급격한 주파수 변동 문제에 대비하여 조치가 필요

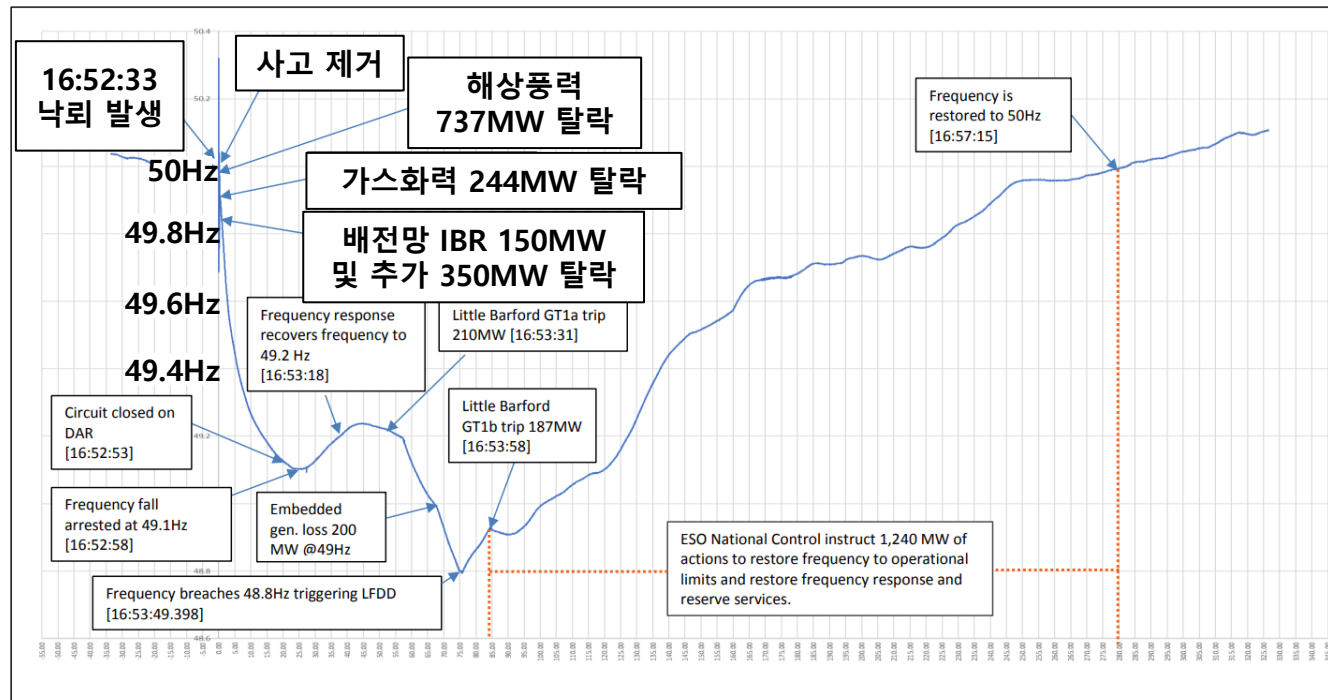
## ■ 계통관성 추정방안

- ▣ **SCADA system 기반**의 발전기 정보를 이용한 계통 관성 추정 방안
  - 발전기 관성상수, 설비용량을 이용한 관성에너지 합으로 계산(On-line 동기발전기 기준)
  - Nordic, ERCOT, NG ESO 사례
- ▣ **측정데이터 기반**의 계통 관성 추정 방안
  - 측정 기반의 주파수데이터 등을 이용한 계통 관성 추정 방안
  - 측정된 주파수는 발전기의 관성에너지(Kinetic Energy), 속응성자원(조속기, ESS), 부하의 관성 기여분 등을 포함 => SCADA system 기반의 추정방안 보다 현실적인 계통 관성값 도출
  - Nordic, Reactive Technology 사례

# 해외 주파수 불안정 사례 – 영국 NG

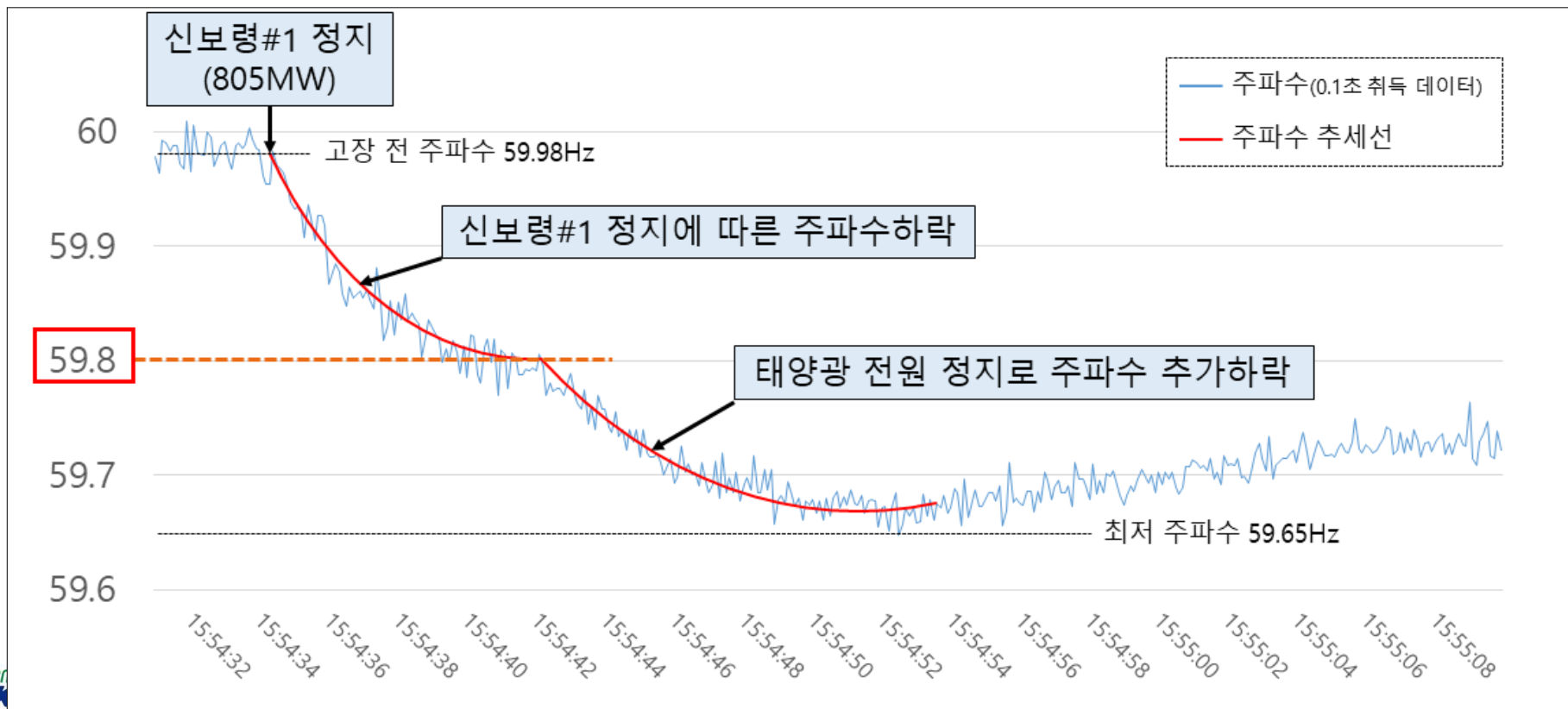
## ■ 영국 National Grid (2019.08.09) 정전으로 인한 주파수 불안정 사례

- 원인 : 계통 초기 RoCoF 크기 증가 → IBR의 RoCoF 보호장치 동작
- 400kV 급 송전선로에 낙뢰 발생으로 인해 약 **1.2GW** 탈락  
(해상풍력 737MW, 가스화력 244MW, 배전망 IBR 150MW)  
→ RoCoF 보호장치 **기준 위반**(0.125Hz/s) → **추가 350MW IBR 탈락** → **주파수 추가하락**



# 국내 주파수 불안정 사례 – 신보령 탈락

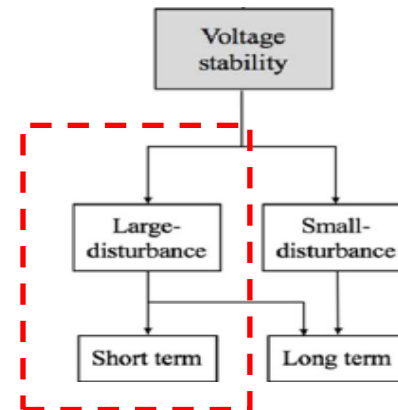
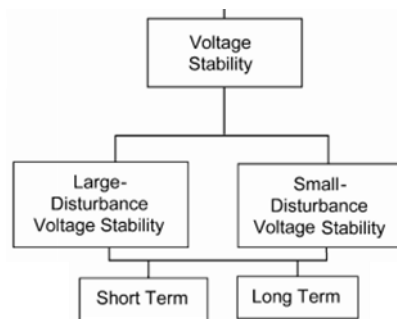
- 2020.03.28 신보령 1호기 탈락 후 태양광 추가 정지 → 최저 주파수 59.65Hz
  - 신보령 1호기(고장 전 출력 805MW) 탈락 후 **계통 주파수가 59.8Hz로 하락**
  - 태양광 **보호기준인 59.98Hz 위반** → **태양광 추가정지**(450MW 추정) 후 주파수 59.65Hz로 하락



# 전압 안정도

## 정의 및 변화사항

- ▣ 전력계통에서 외란시에 **모선의 전압을 유지**하는 능력
- ▣ 분류는 Small-disturbance가 Long-term으로만 연결
- Small-Disturbance 전압 안정도 관련 선형화 해석 방법(Eigen value 해석)에 관한 부분이 축소되고 계통 요소의 **비선형적 특성을 고려한 Long-term 모의의 중요성**이 강조됨



# 전압 안정도

## ■ IBR 증가에 따른 전압 안정도의 영향

- ▣ Short-term 전압 안정도
  - FIDVR과 IBR의 FRT Capability
    - Large Disturbance에 의해 평형점을 잃은 이후, 유도전동기들의 FIDVR 현상으로 전압불안정
    - FIDVR로 IBR의 FRT Capability에 따라 탈락 원인이 될 수 있으며 이로 인해 대규모 전압 불안정으로 파급될 수 있음
  - IBR 증가로 배전단에 접속하는 발전력이 증가
    - 배전 계통과 송전 계통의 상호 동특성(Combined dynamics) 영향이 커지고 있음
    - 부하 응답(Load response)에 영향
    - 배전 계통을 적절하게 모델링하고 특성을 이해하는 것이 중요

# 전압 안정도

## ■ IBR 증가에 따른 전압 안정도의 영향

- ▣ Long-term 전압 안정도
  - IBR을 포함한 LTC, OEL 등 비선형 동특성을 갖는 계통 요소 검토에 대한 필요성 강조
    - 선형 해석(Eigen value analysis)에 대한 비중이 줄고, 비선형 동특성을 반영한 time-domain simulation 필요성 강조
  - IBR 증가로 배전단에 접속하는 발전력이 증가
    - 무효 전력원의 분산에 따라 계통 영향성 검토 필요
    - 동특성뿐만 아니라, 분산 연계 되는 IBR 기반 발전원에 대한 계통 영향 평가 또한 매우 중요함

# 전압 안정도

## ■ IBR 증가에 따른 전압 안정도의 영향

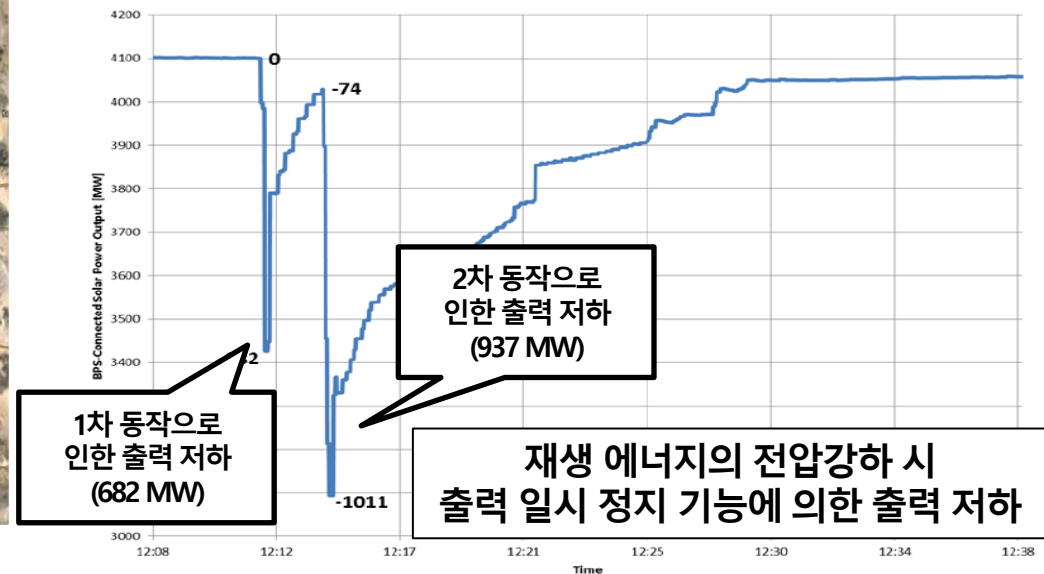
### ▣ Overvoltage 전압 안정도

- SIL 이하의 부하 수준, HVDC 필터 및 Sh.C, UEL에 의한 무효전력 흡수(absorb) 한계 등에 의해 과전압 문제 발생
- Transformer Tap changer 동작 야기, Long-term voltage Instability로 이어질 수 있음
- 배전단에 연계된 IBR의 역조류로 부하단의 과전압 발생(지중 케이블의 정전용량 특성)
- 충분한 양의 무효전력을 공급할 수 있는 IBR(Smart inverters)이 부하 근처에 연계됨에 따라 송전계통은 과전압 현상이 발생되고 있음

# 해외 전압 불안정 사례 – 미국 CA 산불

## ■ 미국 California 2017년 10월 9일 산불에 의한 계통불안정 사례

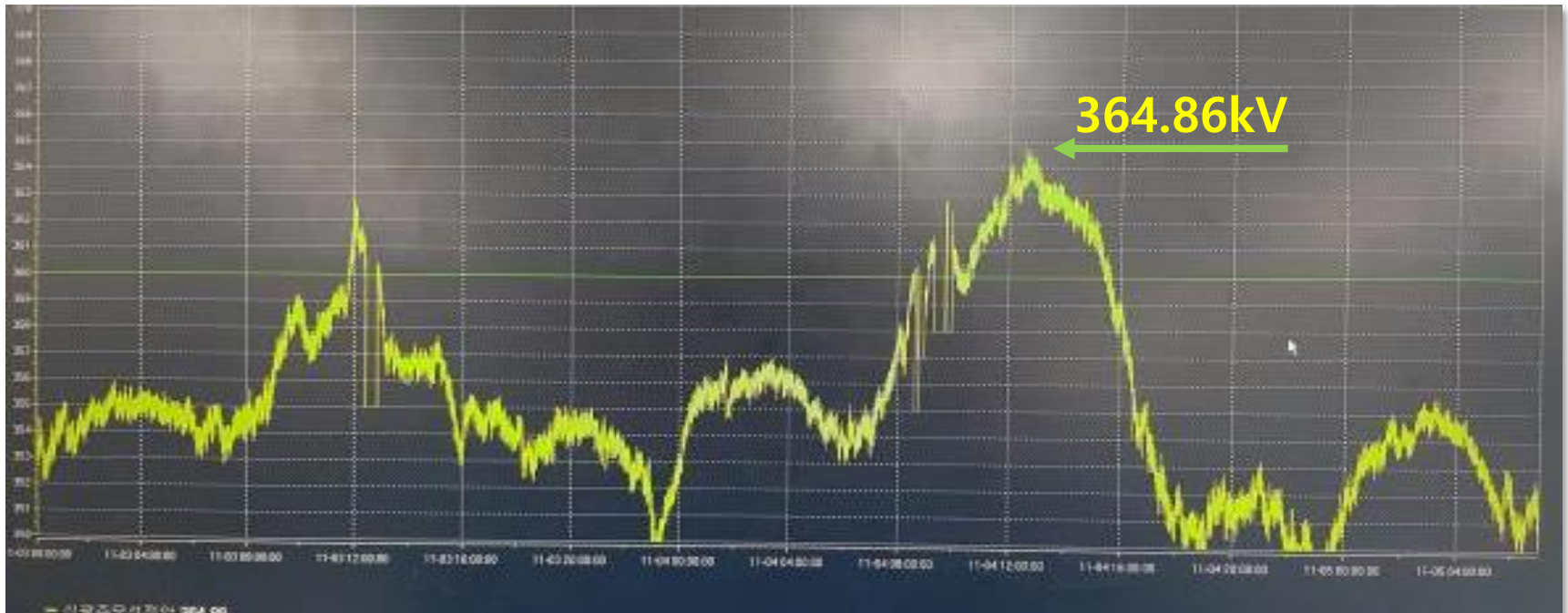
- 원인 : 산불로 인한 외란 이후 **컨버터 보호 동작으로 IBR의 추가 탈락**이 발생
  - 당시 출력 감발(MC) 허용 전압 기준 : 0.9pu
- 약 20분에 걸친 인근 대규모 태양광 발전 단지의 연쇄적인 탈락으로 인한 **전압 불안정 초래**
- 태양광 발전 인버터의 전압강하 시 **출력 일시 정지 동작**에 의한 출력 저하 발생
  - 일시 정지(Momentary Cessation, MC) : CIG 보호를 위해 일시적으로 출력을 중지하는 기능
  - 계통 회복에 악영향 초래 (1차 동작 : 682 MW, 2차 동작 : 937 MW)



# 국내 전압 불안정 사례 – 호남 전압 불안정

## ■ 2018.11.04 신광주 과전압 발생

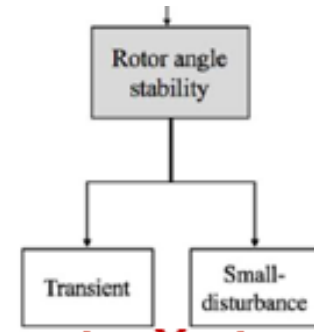
- 2018년 기준, 누적 태양광 설치량(약 7800MW)의 약 3분의 1(33.2%)이 전라지역에 집중
- 발전량 증가로 **순부하(Net Load) 감소** 및 리액터 **무효전력 흡수 불가** → 과전압 발생 빈도 과도
- 한빛원전 5GW 정지에 따라 무효전력 제어 능력 부족 → 345kV 유지 범위 초과



# 위상각 안정도

## ■ 정의 및 변화사항

- 전력계통에서 외란시에 연계되어 있는 동기기가 계통과의 동기를 유지하는 능력
- 동기를 유지, 회복하는 Rotor angle Stability의 정의에는 변화가 없음



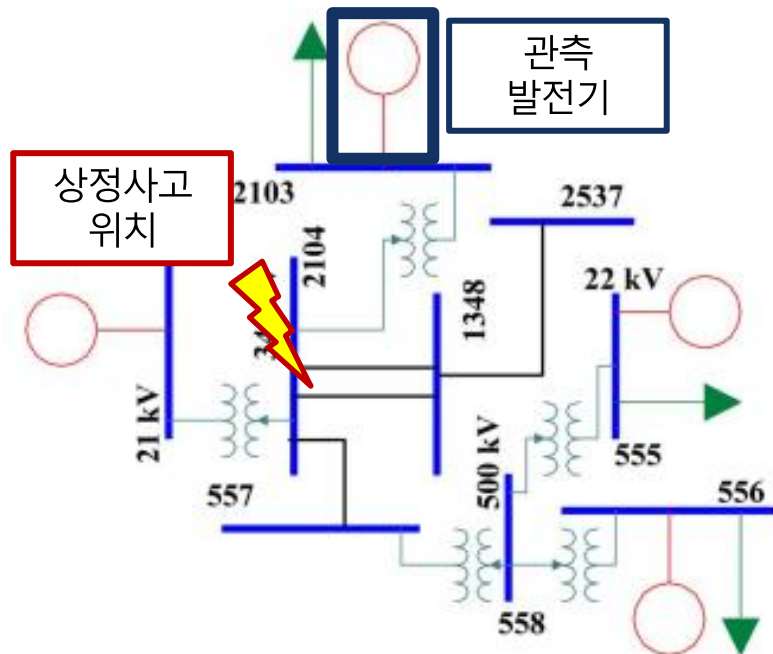
## ■ IBR 증가에 따른 Rotor angle Stability의 영향

- IBR 증가에 따라 계통 특성 또는 topology 변화로 Rotor angle Stability 변화
  - IBR 증가로 계통의 전체 관성 감소
    - 그로 인해 발전기가 주파수 변화에 더 민감하게 반응 → 동기 탈조가 더 빠르게 일어날 수 있음
    - IBR 증가로 인해 관성이 감소하면서 크고 빠른 swing의 가능성 증대
  - 계통 topology 변화로 인근 동기 발전기의 damping torque에 영향을 줌
- 기존의 Small Disturbance는 운전점에서의 rotor angle 변형이 작기 때문에, 큰 오차없이 운전점 근처에서 선형화 가능
- 기존의 Transient 는 rotor angle 변형이 크기 때문에 선형화 불가능
  - IBR의 동특성을 송전/배전에 따라 분석
  - 컨버터의 제어 동작으로 인한 추가적인 영향 분석

# 해외 위상각 불안정 모의 결과 – WECC

## ■ IBR의 위상각 안정도 영향성 분석을 위해 WECC test bed 기반 모의 진행

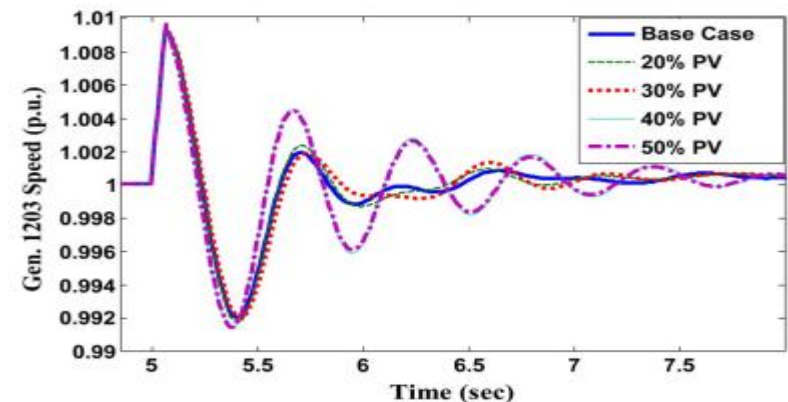
- IBR 증가로 인한 계통의 **damping ratio 변화**가 위상각 안정도에 영향
  - 본 모의에서는 태양광 증가(2.1GW → 10.8GW)에 따른 Damping ratio 및 위상각 안정도 검토
  - 모의 결과 IBR 증가로 인한 **동기기 수 감소** → 계통 **damping ratio 감소** 및 위상각 불안정 야기



<WECC test bed (일부)>

| 태양광 비율 [%]        | 0    | 20   | 30   | 40  | 50   |
|-------------------|------|------|------|-----|------|
| Damping ratio [%] | 9.69 | 8.14 | 8.43 | 4.7 | 4.43 |

<태양광 증가에 따라 Damping ratio 감소>



<상정 사고 후 발전기 축 속도>

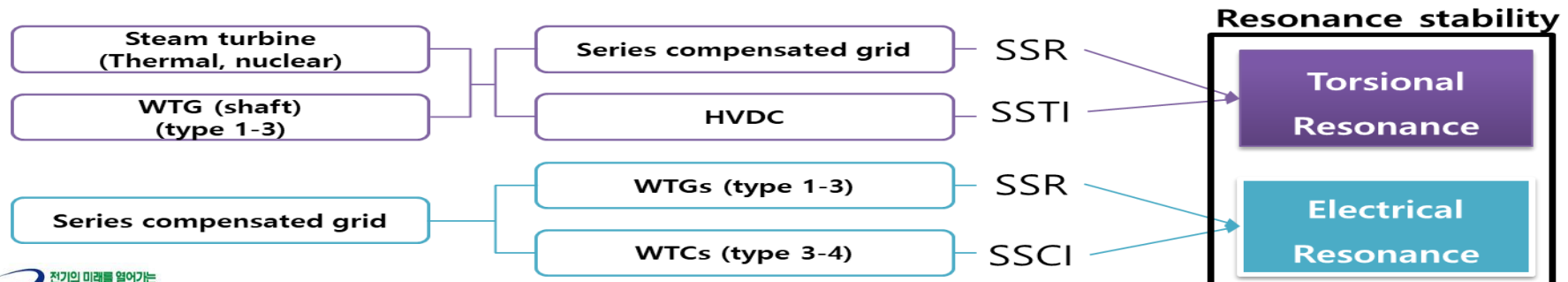
# IBR의 기존 안정도 불안정 요소

| 기존 안정도  | 세부 분류        | 정의                                                                                             | IBR 계통 불안정 요소                                                                                                        |
|---------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 주파수 안정도 | Short        | <ul style="list-style-type: none"> <li>외란 후 일정한 주파수를 유지할 수 있는 계통의 능력</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>계통 회전 관성 감소</li> <li>사고 시 초기 RoCoF 크기 증가</li> </ul>                           |
|         | Long         |                                                                                                |                                                                                                                      |
| 전압 안정도  | Short        | <ul style="list-style-type: none"> <li>조류 변화에 대응하여 전압을 유지하고, 외란 이후 전압을 범위내로 유지하는 능력</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>전압 회복 지연 → IBR의 FRT 동작으로 인한 추가탈락</li> <li>급격한 출력 증가로 인한 과전압 가능성 증대</li> </ul> |
|         | Long         |                                                                                                |                                                                                                                      |
| 위상각 안정도 | Small Signal | <ul style="list-style-type: none"> <li>동기를 유지하고, 외란 후 동기를 회복하는 연계된 동기 발전기들의 능력</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>계통 damping torque 감소</li> </ul>                                               |
|         | Transient    |                                                                                                |                                                                                                                      |

# Resonance Stability(공진 안정도)

## ■ SSO(Sub-Synchronous Oscillation, Resonance)

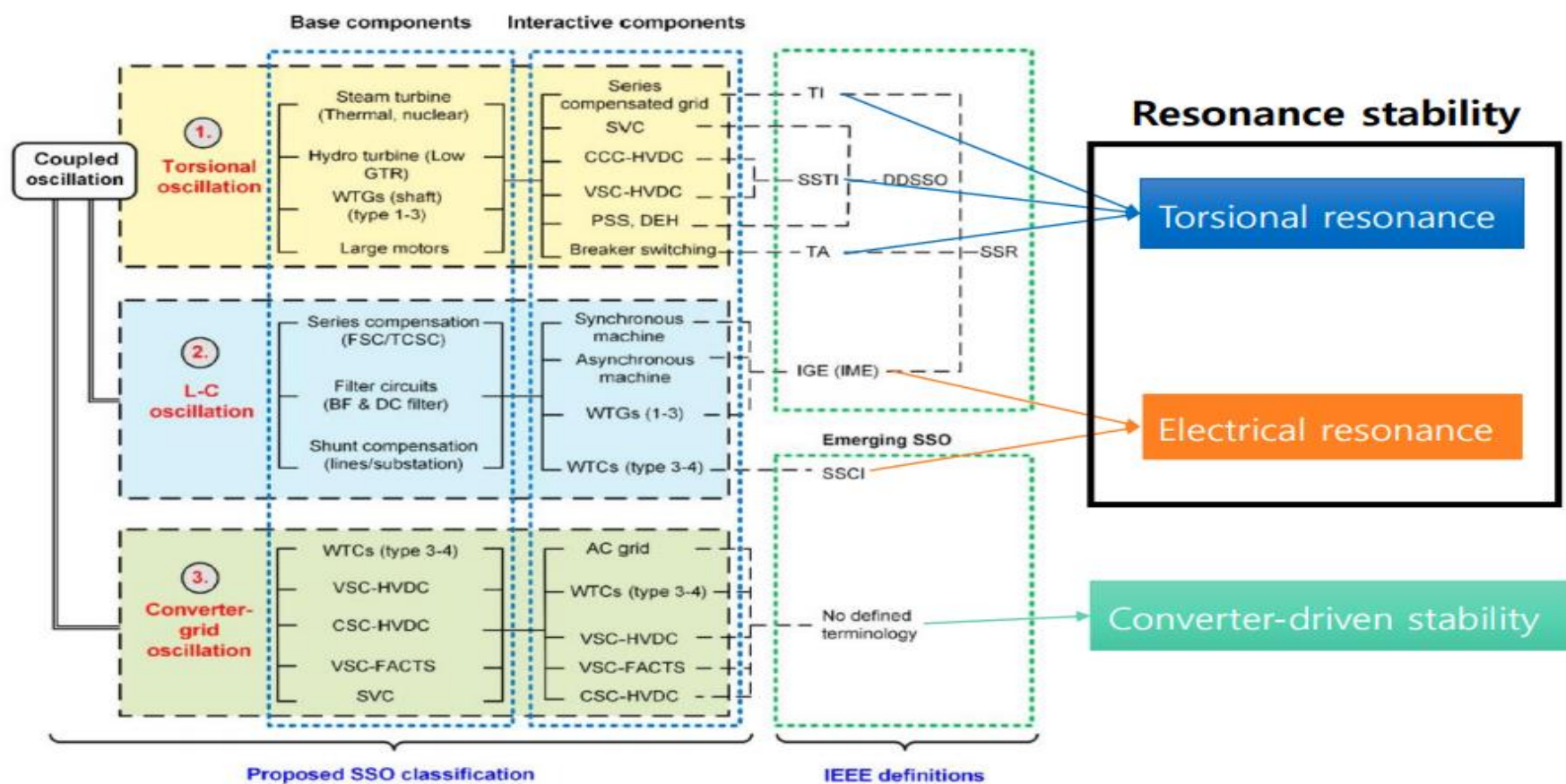
- ▣ SSO, 차동기 진동 : 다양한 원인으로 인해 **차동기주파수 대역**에서 발생하는 진동
  - SSR : 발전기 축  $\leftrightarrow$  직렬보상커패시터
  - SSTI : 발전기 축  $\leftrightarrow$  HVDC or STATCOM 등
  - SSCI : 풍력발전기 등 Power Electronics  $\leftrightarrow$  직렬보상커패시터
- ▣ Resonance, 공진 : **특정 주파수 대역**에서 일어나는 **진동** (예: 전기 및 전자회로에서는 RLC 소자에 의해 발생)
  - Electrical : 전력계통의 직렬보상에 따른 전기적 주파수와 터빈-발전기의 기계적 주파수의 조건에 의해, 터빈-발전기 축의 진동이 지속 및 증폭되는 현상
  - Torsional : 전력계통의 직렬보상에 따른 전기적 주파수와 발전기의 전기적 주파수의 조건에 의해, 발전기 전기적 출력의 진동이 지속 및 증폭되는 현상



# Resonance Stability(공진 안정도)

## ■ 기존 SSO와 Resonance Stability 관계[1]

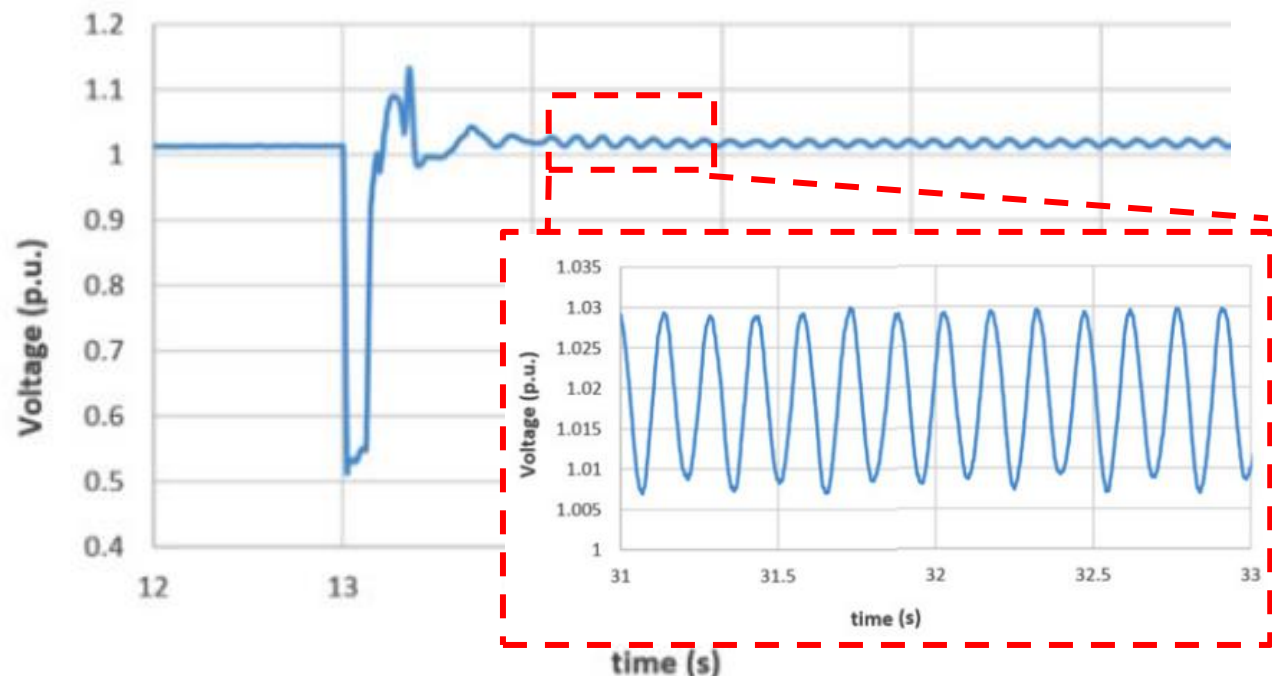
- 동특성이 매우 빠른 IBR 기기가 다수가 되면서 전력 계통 내에 공진 문제가 대두됨



[1] J. Shair, X. Xie, L. Wang, W. Liu, J. He, and H. Liu, "Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 99, pp. 159–168, Jan. 2019

# 공진 안정도 불안정 사례 – 호주 AEMO

- 2015년 계통 전압 저하가 발생 후 7Hz의 지속적인 전압 진동 관측
  - 진동이 발생한 West Murray 지역은 풍력발전기, HVDC, SVC와 같은 CIG가 다수 연계
  - 계통의 직렬보상 설비와 발전기의 전기적 특성에 의해 발생한 SSO
    - Resonance stability (Electrical resonance, SSCI)



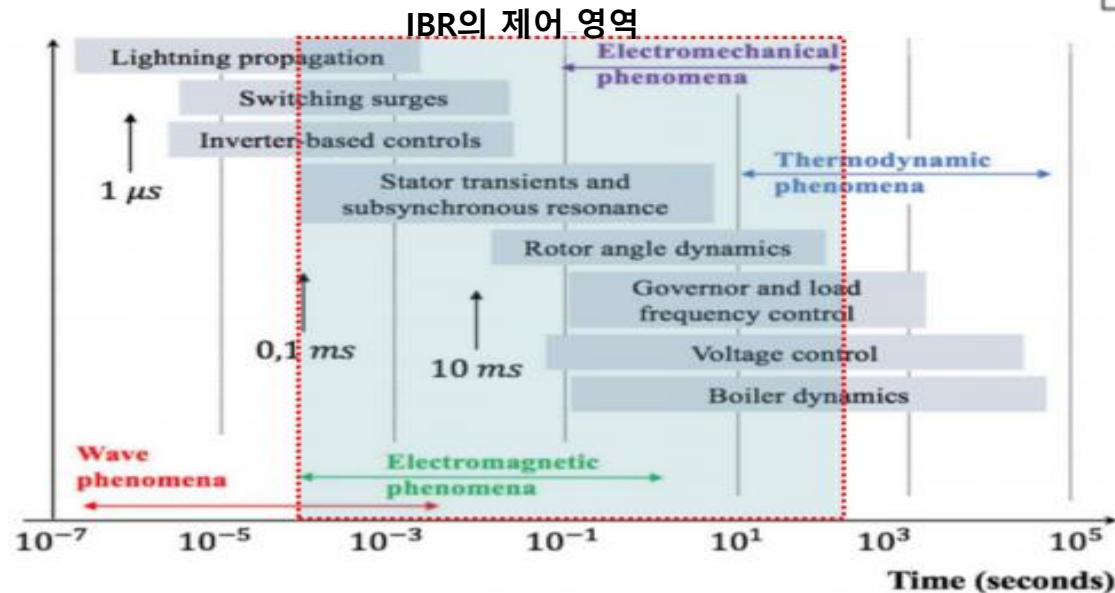
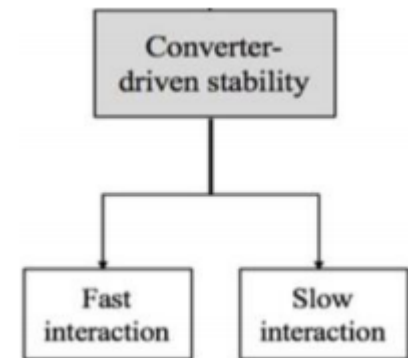
<West Murray 계통>

<2015년 당시 전압진동>

# Converter-driven Stability

## ■ 정의

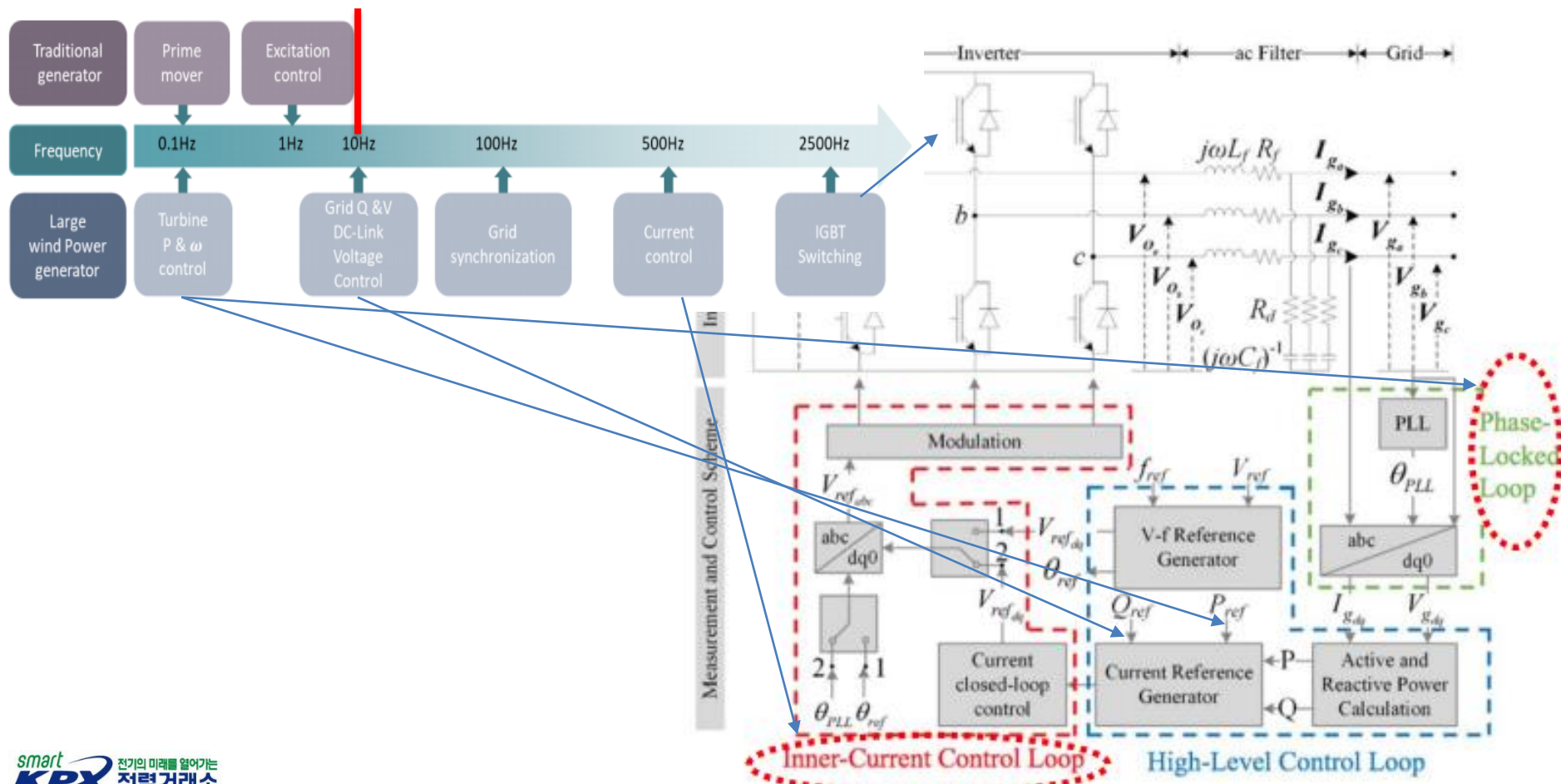
- ▣ IBR의 빠른 동특성 및 **기존 기기**의 특성과의 **상호 영향성**을 반영하기 위해 도입
- ▣ **넓은 주파수 영역**에서 현상이 발생
- ▣ 계통 진동 현상 주파수에 따라 Slow / Fast 구분
  - Fast : 고주파수의 불안정 진동현상 (약  $10\text{Hz} < f < 0.1\text{kHz}$  or  $1\text{kHz}$  영역)
  - Slow : 저주파수의 불안정 진동현상 (전형적으로 약  $10\text{Hz}$  미만 영역)



# Converter-driven Stability

## ■ Converter의 제어 영역

### ▣ IBR의 제어 로직과 주파수 비교



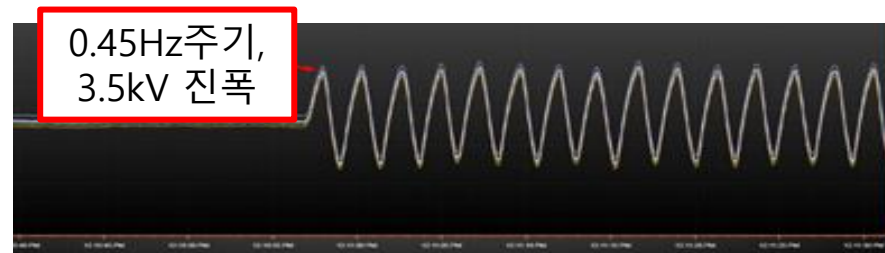
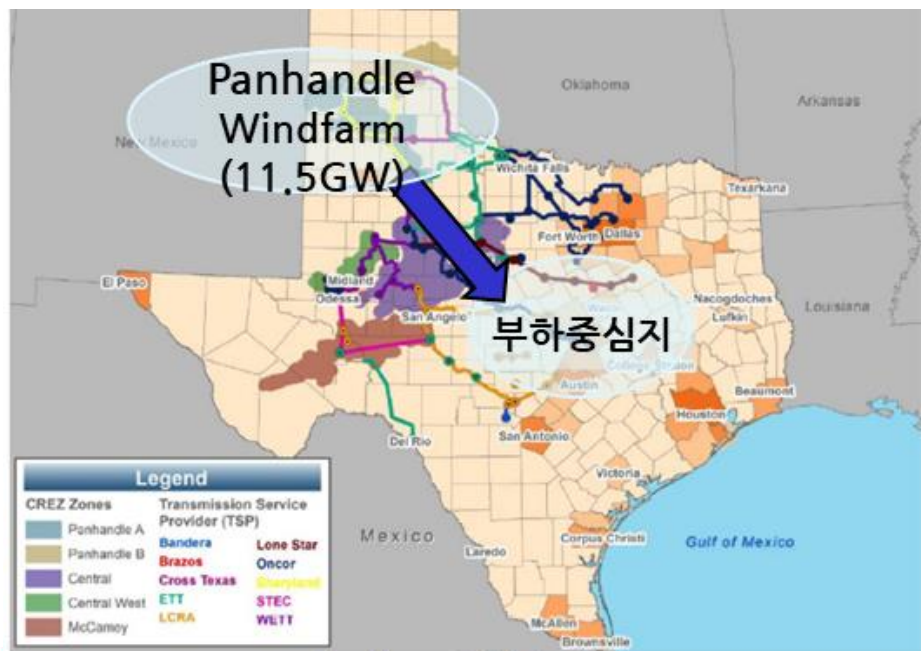
# Converter-driven Stability

## ■ Converter-driven Stability의 상호 관계

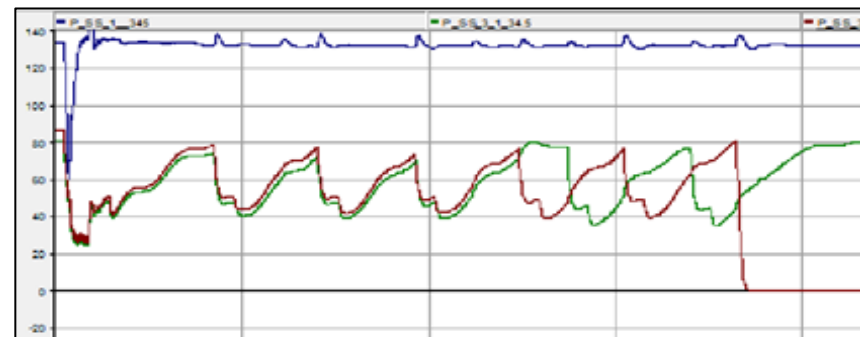
| 분 류                                         | 전력전자설비                       | 응답 요소                                    | 현 상                                                                                                                     |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fast interaction converter-driven stability | Large scale wind power       | VSC-HVDC                                 | • High oscillations at 500Hz to 2kHz                                                                                    |
|                                             | Synthetic inertia controller | Converter control                        | • Under high frequencies, inertia response may trigger super-synchronous stability problems                             |
|                                             | A poorly tuned virtual SM    | Control interaction                      | • Less likely to induce these type of fast oscillations due to their slower control response                            |
|                                             | STACOMs                      | Weak AC/DC grids in China Southern grids | • Observed oscillations at 2.6Hz and 97.5Hz                                                                             |
| Slow interaction converter-driven stability | Converter controller(PLL)    | Other system components                  | • Unstable low-frequency oscillation in VSC-HVDC systems with weak grid connection have also been observed              |
|                                             | Wind plant Type 4            | Weak AC Grid                             | • Observed oscillations at 20Hz and 40Hz in real events in Xinjiang<br>• $SCR < 2$ , leading low frequency oscillations |

# 신설 안정도 불안정 사례 – 미국 ERCOT

- 미 Texas Panhandle 지역의 풍력발전단지 전압진동 사례(총 4회, 2017.07~11)
  - ▣ Panhandle지역 내 동기발전기 전무한 상황에서 대규모 풍력단지(11.5GW) 조성
  - ▣ 대규모 풍력단지 접속에 따른 단락비 감소로 강건성 악화
  - ▣ **IBR**과 낮은 강건성을 보유한 **계통의 상호 영향**으로 인해 전압 및 출력의 **저주파수** 진동발생  
→ **Converter-driven stability (Slow interaction)**



<2017.7 발생한 전압진동 파형>

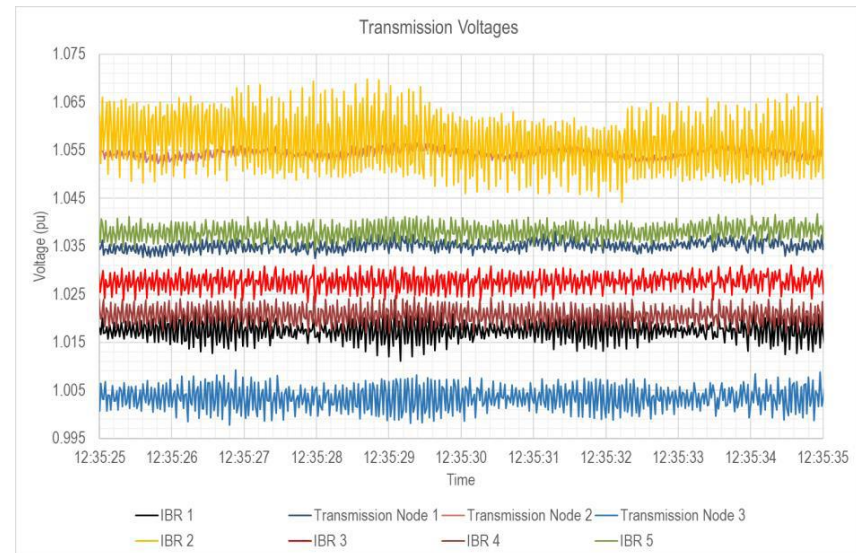
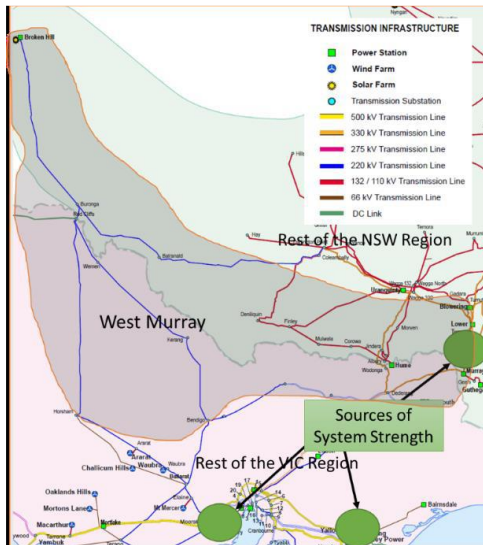


<상정 고장 시 Panhandle 풍력 단지출력>

# 신설 안정도 불안정 사례 – 호주

## ■ 연구 배경

- ▣ IBR이 많이 투입된 계통의 경우 IBR간의 교란이나 상호작용으로 IBR 트립 발생 가능
- ▣ 'West Murray' 지역 내 태양열, 풍력, 배터리, SVC, HVDC 등 IBR 다수 존재
- ▣ 연구 모의
  - 전송선이 트립된 후 West Murray 지역에서 전압 진동 관찰(7Hz, 19Hz)
  - 동기기나 직렬 C가 없음에도 진동이 발생 → IBR 상호작용이 원인으로 추정



인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개  
선방안

## 인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개선 방안

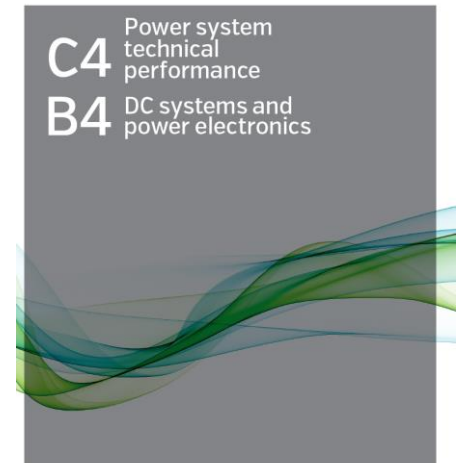
- 안정도 관련 사례 분석 및 연계 규정 개정

02

# 안정도 관련 사례 분석 및 연구 진행

## ■ IEEE IBR SSO Taskforce

- ▣ 2017년 IEEE내에 Wind SSO로 발족하여 풍력발전기가 야기하는 SSO 현상에 대한 모델링, 해석방법 등을 정의하고 연구
- ▣ 2021년 IBR SSO로 변경하여, IBR이 야기하는 SSO 현상 분석으로 확대
- ▣ 매년, TF Meeting 및 패널 세션을 통하여 보고서 및 가이드라인 발표
  - 최신 산업계 가이드라인 : Guidelines for Subsynchronous Oscillation Studies in Power Electronics Dominated Power Systems, CIGRE C4/B4 Technical Brochures, 2023
    - SSO의 스크리닝 방법, SSO 평가방안 등 제시



**Guidelines for Subsynchronous Oscillation Studies in Power Electronics Dominated Power Systems**

# 안정도 관련 사례 분석 및 연구 진행

## ■ IEEE IBR SSO Taskforce

- 최신 Panel Session Report : Inverter-based Resource Oscillations: Real-World Events and Root Cause Analysis, IEEE PES GM, 2023

| 사례 발생<br>위치 및 날짜                       | 원인                                  | 해석기법                                                        | 위반 안정도                        |
|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 미 AEP<br>2023.01.24                    | 풍력 발전기, 직렬 보상<br>설비의 상호영향           | 풍력 발전기의 phase<br>current에서 21Hz의<br>차동기 주파수 확인              | Resonance stability<br>(SSCI) |
| 미 ERCOT<br>2017.08.24, 09.27,<br>10.27 | 풍력 발전기, 직렬 보상<br>설비의 상호영향           | Fast Fourier<br>Transform 분석                                |                               |
| 스코틀랜드 Moray East<br>2021.08.24         | 낮은 강건도 계통에서<br>풍력 발전기와 HVDC<br>상호영향 | EMT 모의                                                      | Converter-driven<br>stability |
| 미 Dominion Energy<br>2021.07.01        | 낮은 강건도 계통에서<br>태양광 발전기와 계통<br>상호영향  | PMU, Point-on-<br>Wave(PoW), power<br>spectral density(PSD) |                               |

# IBR 연계 규정 개정 – IEEE 1547-2018

## ■ 북미 신재생 전원 송배전 연계 기준

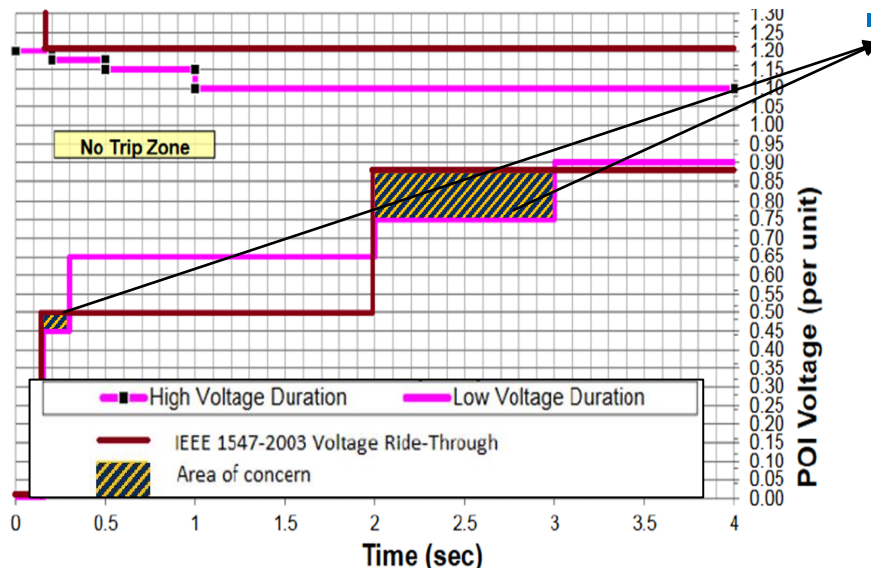
- ▣ 북미 계통은 현재 배전 계통과 송전 계통을 구분하여 신재생 전원의 연계 기술 기준을 규정
- ▣ 두 연계 기준 간의 정합성 문제가 California 사례의 원인으로 지목 → 배전 계통 연계 기술 개정
  - **배전 계통 연계 규정 : IEEE 1547-2018**(국내 배전계통연계기술기준에 해당)
    - IEEE 1547(2003년 수립된 분산형전원 연계규정 )을 California event 이후 개정(2018년)
    - 출력감발 허용전압 기준을 낮춰(0.9pu → 0.5pu) 발전기로서의 책무 강화
  - **송전 계통 연계 규정 : NERC PRC-024-2**(국내 송전용전기설비 접속기준에 해당)
    - 송전계통 연계설비 중 해당기능 탑재비율 조사 및 제거 권고
    - 제거가 불가능할 경우 개정된 배전계통기준 반영

# IBR 연계 규정 개정 – IEEE 1547-2018

## ■ 배전 계통 연계 기준(IEEE 1547)의 개정 배경

- 고장 이후 배전 계통 재생E의 탈락 → 송전 계통에 추가적인 외란으로 동작, 계통 악영향
  - 배전 계통 연계 재생E는 송전 계통 연계 재생E보다 발전기로서의 책무가 약함
  - 송전 계통 기준을 벗어나는 부분을 '**Area of Concern**'으로 정의

### <PRC-024-2와 IEEE 1547 2013의 비교>



### 'Area of concern'

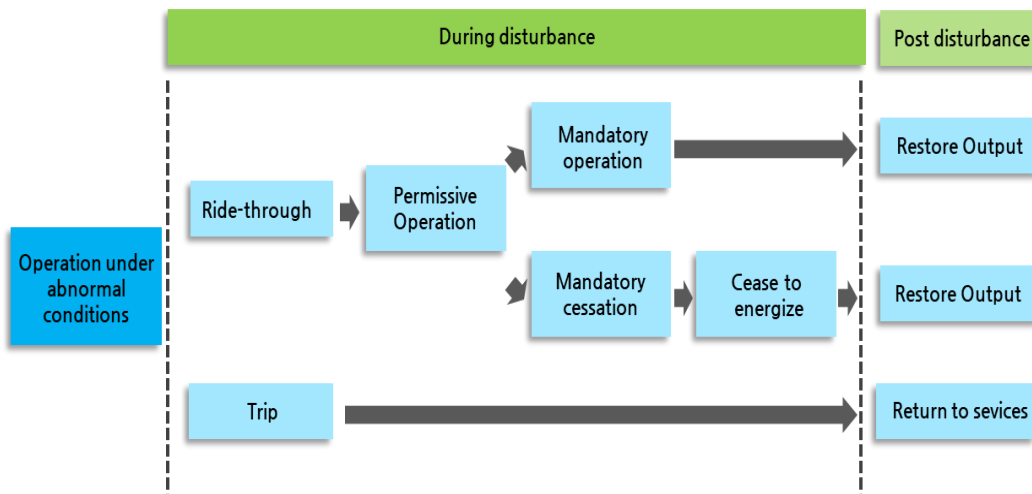
- 배전 계통 재생E의 앞선 Trip이 송전 계통 안정도에 악영향을 야기할 수 있음
- 2018년도 개정 시 이를 고려하여 DER이 더 넓은 영역에서 운전을 지속 하도록 개정

# IBR 연계 규정 개정 – IEEE 1547-2018

## ■ 배전 계통 연계 기준(IEEE 1547)의 개정 배경

- 고장 이후 배전 계통 재생E의 탈락 → 송전 계통에 추가적인 외란으로 동작, 계통 악영향
- 배전 연계 재생E는 비정상 전압 시 출력을 일시적으로 중단(Momentary Cessation)함
- 많은 양의 재생E가 규정의 부재로 인하여 해당 기능을 가지고 송전 계통에 연계

### <Momentary Cessation>



- 비정상적인 전압 혹은 주파수에 대하여 **배전 계통 및 설비 보호를 목적으로 일시적으로 출력을 중단**하는 기능
- 전압 및 주파수 회복 시 출력을 회복**하는 기능으로, 발전기 탈락(Trip)과는 다름

California 사례 이후 IEEE 1547-2018 개정을 통해

1) Area of Concern 영역 제거 및 2) Momentary Cessation 운전 가능 영역 규정

# IBR 연계 규정 개정 – IEEE 1547-2018

## ■ IEEE 1547 - 2018 개정 사항

- ▣ 송전계통 연계규정과의 정합성을 고려하여 각 카테고리 별 비정상 전압에 대한 운전 유지 및 출력 유지 영역 규정
- ▣ 재생 E의 계통 영향성에 따라 **Category 1~3으로 분류**
  - 재생E의 비중이 증가할 수록 **발전기로서의 책무 강화**

| 분류           | 목적                                                                                                                                                                           | 기준 근거                                                                                                       |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Category I   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Essential BPS reliability needs</b></li> <li>• reasonably achievable by all current state-of-the-art DER technologies</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Based on <b>German grid code</b> for synchronous DER</li> </ul>    |
| Category II  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Full coordination</b> with BPS needs</li> </ul>                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Based on NERC Reliability Standard <b>PRC-024-2</b></li> </ul>     |
| Category III | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ride-through designed for <b>distribution support as well as BPS needs</b></li> </ul>                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Based on <b>California Rule 21 and Hawai'i Rule 14H</b></li> </ul> |

**BPS Needs 충족 (의무 강화)**

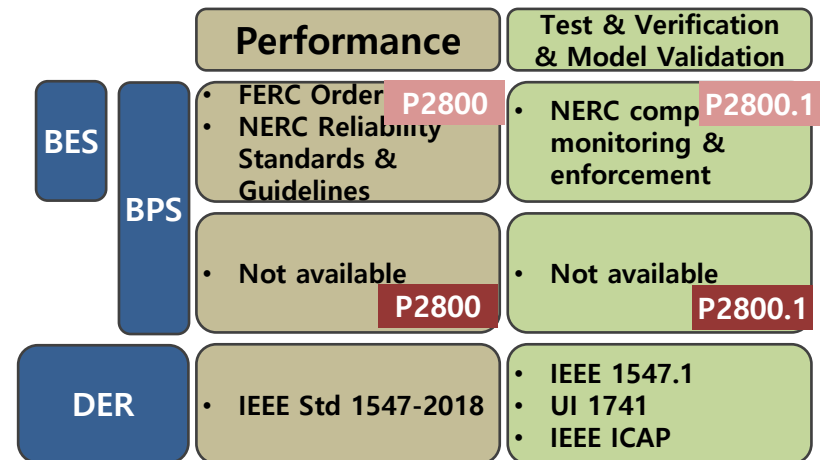
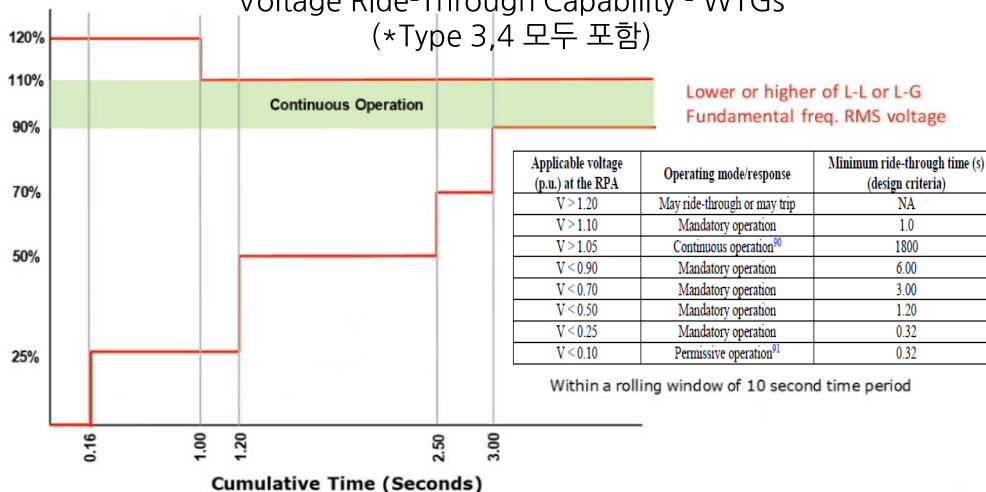


# IBR 연계 규정 개정 – P2800

## ■ 송전 계통을 포함한 BPS 연계 IBR에 대한 연계 규정 또한 개정 진행 (P2800)

- BES와 DER 기준 사이 연계 되는 재생E에 대한 규정 부재
  - BES :  $\geq 100$  kV with 20MVA(individual) or 75MVA(Aggregated)
  - DER : connected at typical(radial) primary and secondary voltage levels
  - BES를 포함한 BPS 연계 IBR 규정 필요(P2800), 기존 BES 연계 기준 반영
- P2800-2022, 7. Response to TS abnormal conditions
  - 7.2.2 Voltage disturbance ride-through requirements

Voltage Ride-Through Capability - WTGs  
(\*Type 3,4 모두 포함)



\*BES : Bulk Electric System

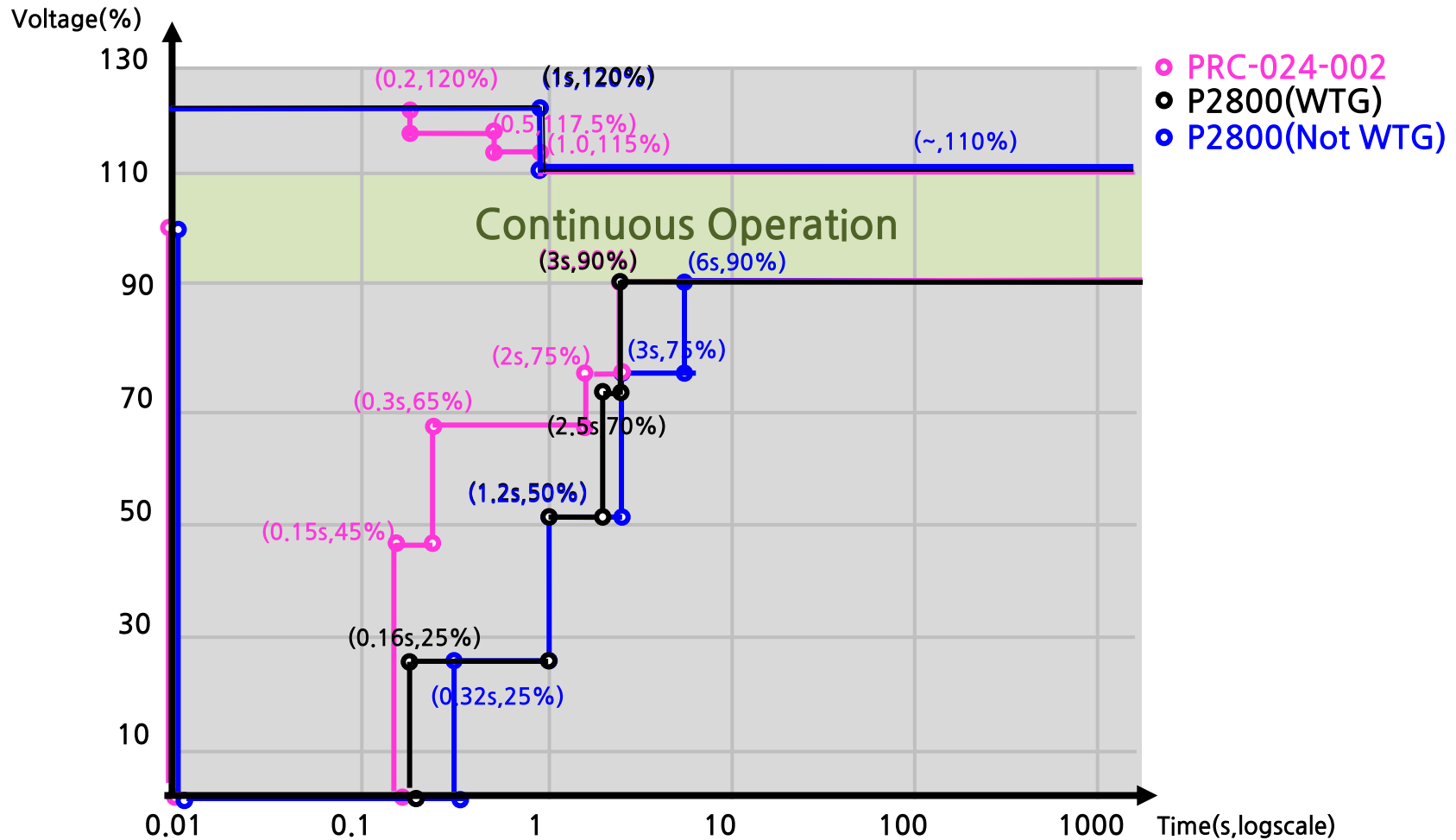
\*BPS : Bulk Power System

\*DER : Distributed Energy Resources

# IBR 연계 규정 개정 – P2800

## ■ PRC-024-2 와 P2800의 비교

- PRC-024-02(기존 송전계통 연계기준)에 비해 더 강화된 의무 규정



# IBR 연계 규정 개정 – P2800

## ■ 계통 강건성(C.2 System strength and select metrics)

- 외란 발생 시, 전압의 크기 및 파형 변화에 대응하는 계통의 능력

## ■ 계통 강건성의 필요성

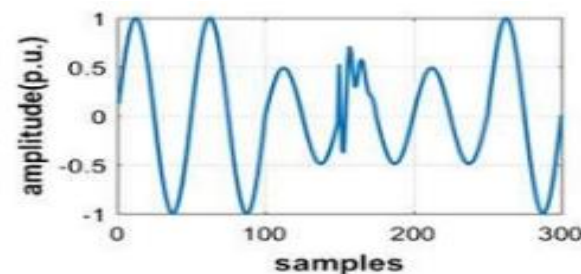
- 강건성이 낮은 계통에서는 외란 후 정상 상태 복구에 어려움 존재
- 안정적인 계통 운영을 위해 강건성 분석 → **지수 기반 강건성 해석 방안** (SCR, WSCR, CSCR, SCRIF 등)

## ■ 지수 기반 강건성 해석 방안의 한계

- 지수의 경우 적용 위치, 사용 장비, 측정/지연 시간 등에 따라 변동 가능
  - 지수를 활용한 계통 강건도 해석에는 위의 모든 조건 고려 필요
- 지수 기반 강건도 해석은 조건 및 적용 위치에 따라 결과 상이 → **EMT 해석 필요**



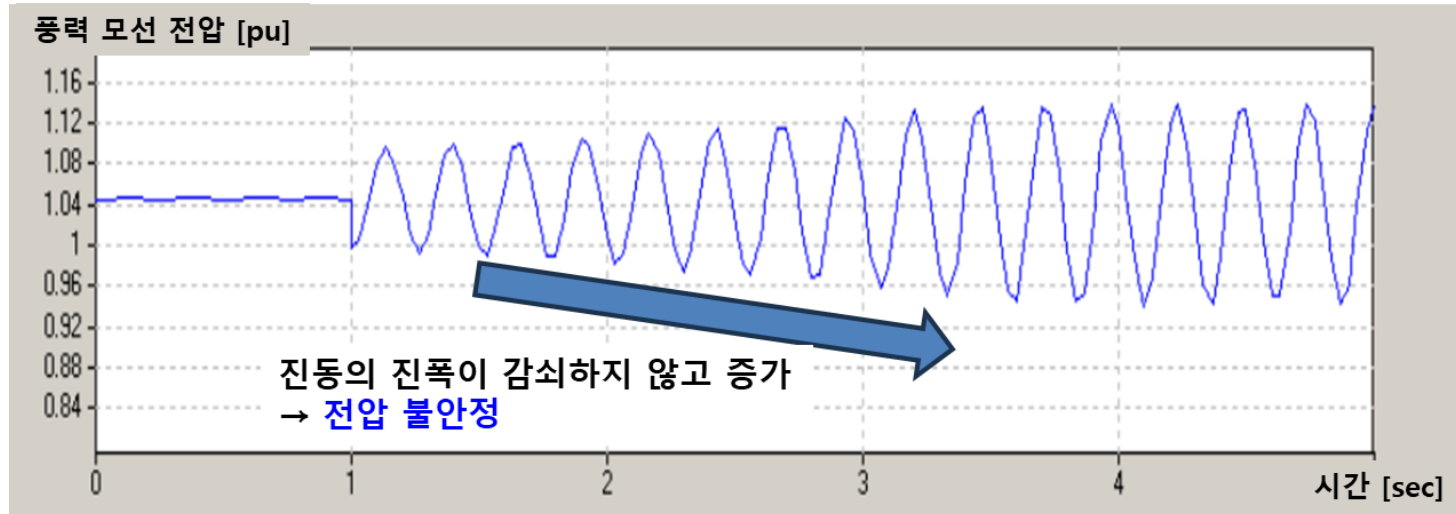
<정상 동작 상태에서의 3상 전압 파형(예시)>



<외란 후 불안정한 전압 파형(예시)>

# IBR 연계 규정 개정 – P2800

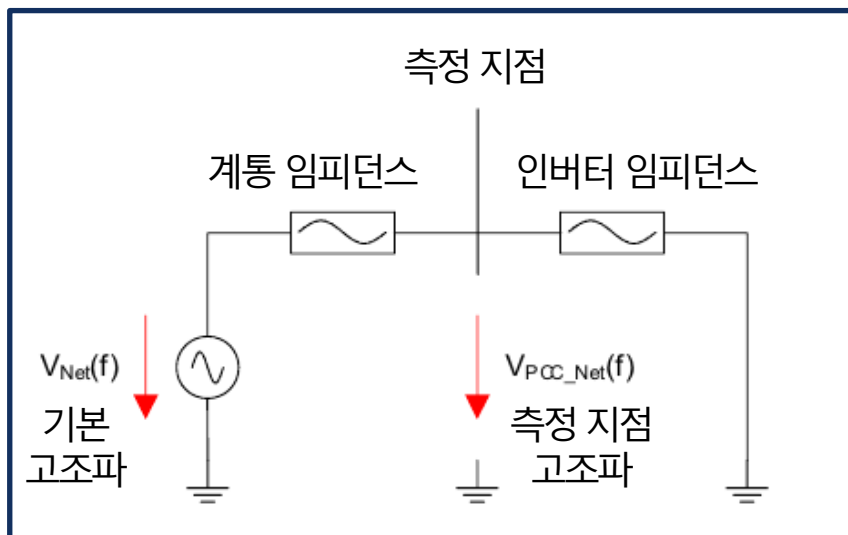
- (C.3 Inverter-based resource stability)
- IBR에 의해 강건성이 낮아진 계통에서는 전압 붕괴 위험도 증가
  - 해당 계통에 IBR 추가 투입 시 전압 진동 가능 → EMT를 통해 진동 파악 가능
  - 전압 불안정을 유발할 수 있는 잠재적인 문제 파악 및 완화 필요
    - 무효전력 공급 장치를 통해 완화 가능 → 정지형 무효전력 보상장치 (예시 : SVC, STATCOM)



<강건성이 낮은 계통에 연결된 풍력 발전기의 전압 진동>

# IBR 연계 규정 개정 – P2800

- (E. Recommended practices for voltage harmonics of inverter-based resources (IBRs))
- IBR의 Harmonic 왜곡 발생 시 대응 방안
  - ▣ 고조파 왜곡(Harmonic Distortion): 계통의 비선형 요소에 의해 전류/전압이 왜곡되는 현상
  - ▣ 정격 주파수(60Hz)의 정수배 성분으로 표현 가능 → 최대 50배(3000Hz)까지를 고조파로 분류
  - ▣ VSC : 고조파 발생 / IBR : 고조파 증폭 가능
  - ▣ 고조파를 억제하기 위해 IBR 조치 필요 → **인버터 임피던스 조정**을 통해 증폭 계수(Amp. factor) 조절



<고조파 영향 분석을 위한 계통 개략도>

$$AF(f) = \left| \frac{Z_{plant}(f)}{Z_{plant}(f) + Z_{net}(f)} \right|$$

- ▣  $Z_{plant}(f)$  : 발전기 임피던스
- ▣  $Z_{net}(f)$  : 계통 임피던스
- ▣ P2800 : AF 1~1.5 이하 추천

# 감시시스템 고도화 – 관성 추정

## ■ PMU 데이터 기반 계통관성 추정방안

- 오프라인 PMU 데이터 기반 계통 관성 추정방안
  - 사고 당시 PMU에서 측정된 **주파수 데이터 및 발전기 정보를 활용**하여 계통 관성 추정
- 온라인 PMU 데이터 기반 계통 관성 추정방안
  - 정상 시 지역간 또는 Modulator P 변동에 따른 **주파수 변동 상관관계 분석**을 통한 계통 관성 추정

**[오프라인] National Grid**

- 동요방정식 기반 Approach
  - 발전기 정보를 알고 있다고 가정하고, 측정된 **주파수 변화율**을 이용하여 P imbalance 추정
  - 실제 P imbalance와 추정된 P imbalance 비례를 통해 계통 관성에너지 추정
  - 필요데이터 : SE / PMU 데이터

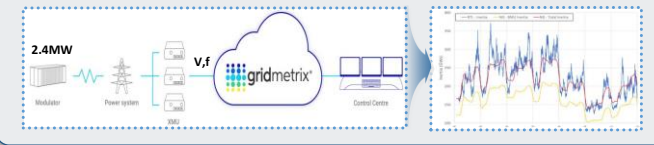
$$\Delta P_i = \frac{2H_i}{f_0} \frac{df_i}{dt} \xrightarrow{\text{P imbalance 추정}} \Delta \hat{P} = \sum_{i=1}^N \Delta P_i$$

계통관성에너지 추정

$$H_{sys} S_{sys} = \frac{\Delta P}{\Delta \hat{P}} \times H_{Gen} S_{gen}$$

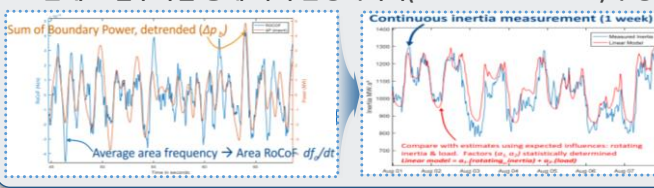
**[온라인] Reactive technology**

- Direct Inertia Measurement 기반 Approach
  - Modulator(<10MW)로 인한 주파수 변화를 측정하여 **통신/신호 처리기법**을 통해 계통 관성에너지 추정



**[온라인] General Electric**

- System identification 기반 Approach
  - 측정 데이터로부터 지역 RoCoF와 지역 경계의 전송전력과의 상관관계 모델구축을 통해 지역 관성에너지(Effective area inertia) 추정



인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개  
선방안

## 인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개선 현황

- 감시시스템 고도화 및 해석 모델 정밀화

03

# 감시시스템 고도화 – 관성 추정

## ■ ERCOT 계통 관성 온라인 모니터링 시스템 운영

- SCADA system을 기반으로 현 계통에 **접속되어 있는 발전기 기준**으로 관성에너지를 감시



< ERCOT'S inertia monitoring system >

On/Off 판별 후 사전에 파악된 발전기  
관성정수를 이용하여 **관성에너지 계산 및  
감시(EMS 기반)**

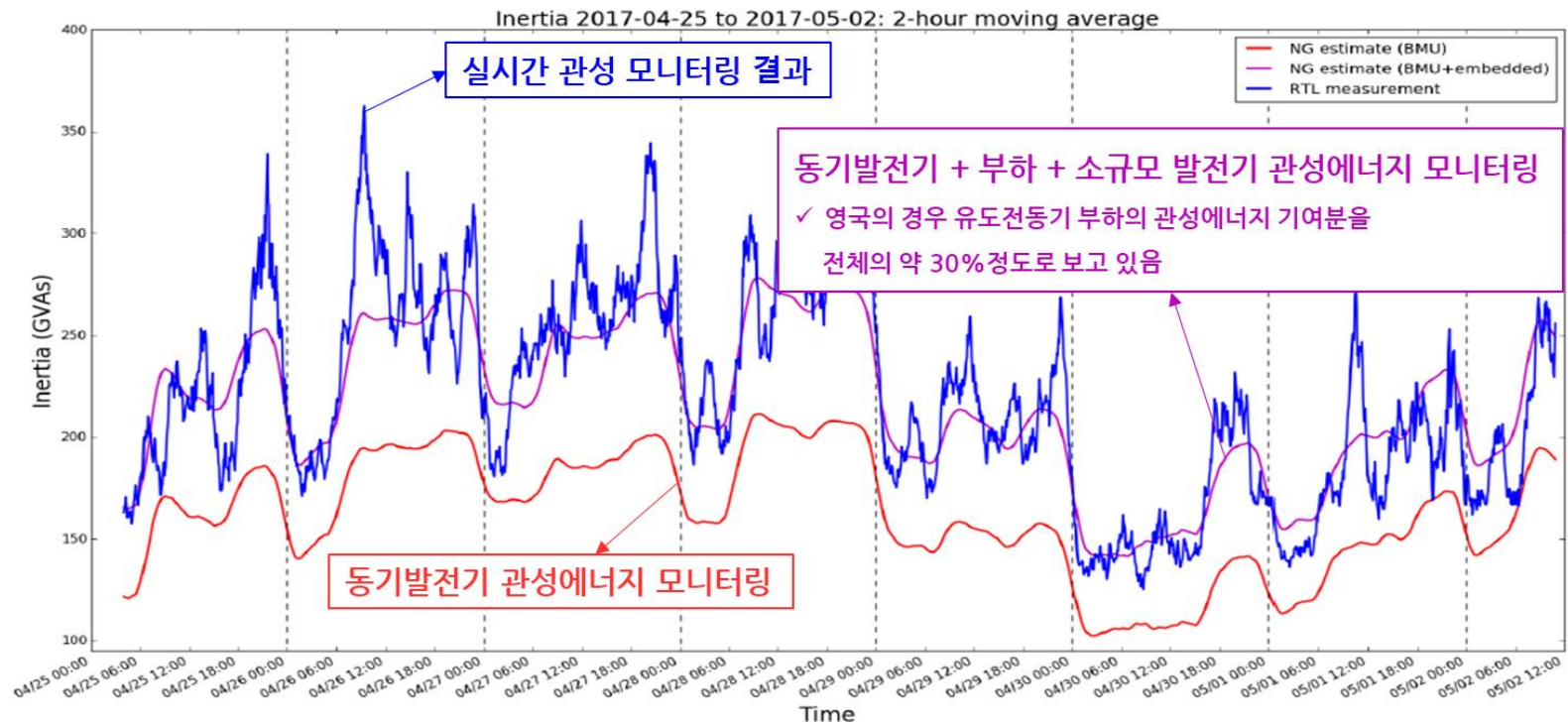
발전기 기동/정지 계획에 따른  
**미래 관성에너지 계산(7일)**

계통 내 **발전기 type 별 비율 명시**  
(계통 관성에너지에 기여하고 있는 발전기)

# 감시시스템 고도화 – 관성 추정

## ■ 영국 계통 관성 실시간 모니터링 시스템 운영

- 빠른 데이터 수집 BMU장비와 GridMetrix의 독자적인 자체 운영시스템 보유
- 통신 신호처리 기법을 이용한 실시간 관성 모니터링 시스템 운영
- 미소변동의 주파수와 전력변화 ( $0.0005\text{Hz} \Rightarrow 10\text{MW}$  로 가정) 를 이용하여 정상상태에서도 관성에너지 추정

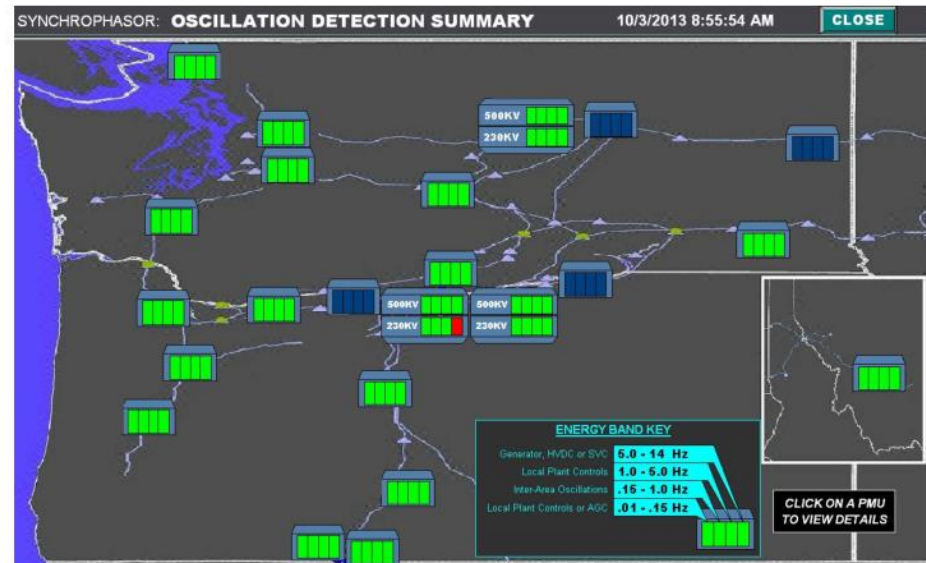
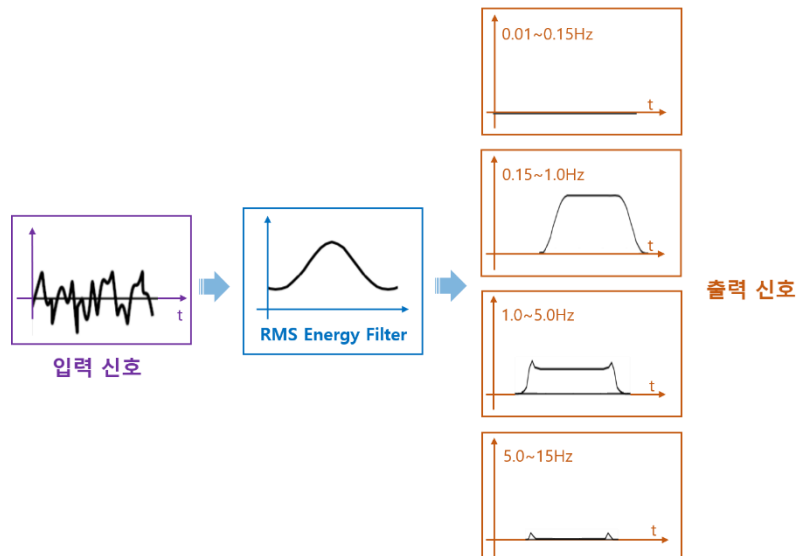


# 감시시스템 고도화 – 진동 추정

## ■ BPA(Bonneville Power Administration) 사례

### □ RMS 에너지 필터 기반 진동감시시스템 운영

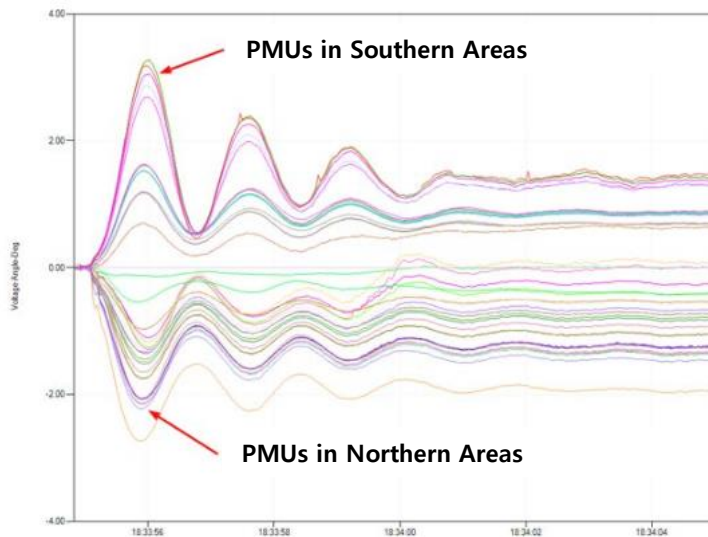
- PMU 측정데이터를 진동원인에 따라 대역폭이 설정된 대역 통과 필터를 통과 후 RMS 에너지 산출
- 진동 원인에 따른 사용 목적에 따라 4가지 주파수 대역으로 나누어 감시
  - ① 0.01 Hz~0.15 Hz (발전기 조속기 속도제어기 관련 진동) ② 0.15 Hz~1 Hz (지역간 진동)
  - ③ 1 Hz~5 Hz (발전기 여자 제어, Pacific HVDC Intertie 제어) ④ 5 Hz~15 Hz (발전기의 축 비틀림 모드, 전력전자설비의 고속 스위칭 문제)



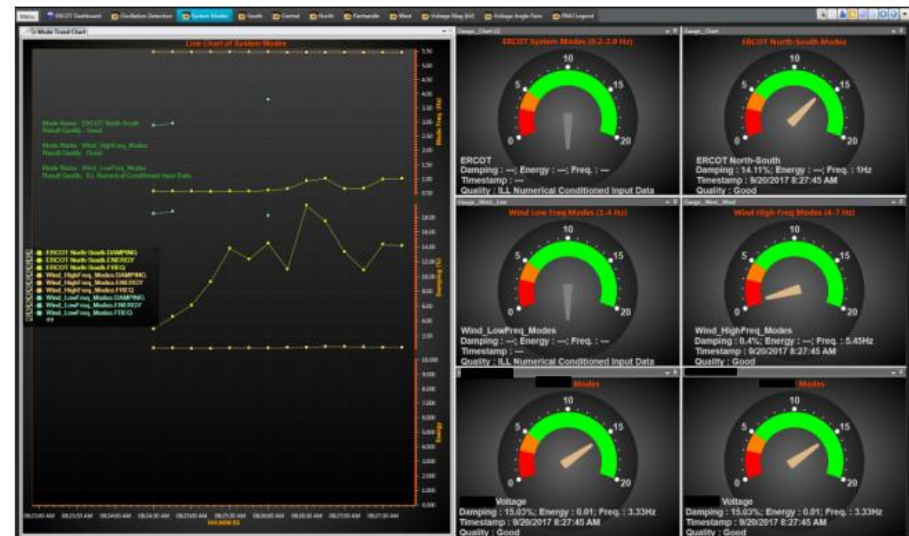
# 감시시스템 고도화 – 진동 추정

## ■ ERCOT 사례 – 진동 감시 계통 운영에 적용

- RTDMS(Real-Time Dynamics Monitoring System) 진동감시시스템 운영
  - Grid Application Support 팀의 진동전담 운영기술자(Operation Engineer)
  - RTDMS에서 진동관련 경계(Alert) 또는 경보(Alarm) 신호를 관제센터에 전달
  - 실시간 관측 결과 남북 방향으로 규모가 큰 자연진동(0.6~0.7Hz) 존재



<텍사스 주 남북 간 진동 모드 (0.6~0.7 Hz)>



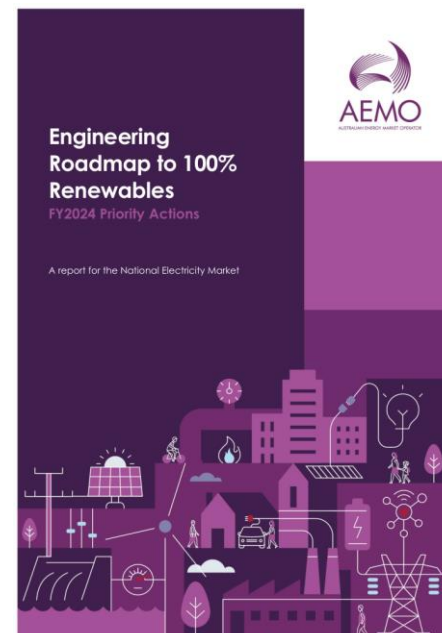
<RTDMS 운영화면>

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Engineering Roadmap to 100% Renewables

- 2023~2024년, 전력계통내 순간 재생에너지 100%를 운영할 수 있도록 계획 및 운영 측면에서 준비
- 기존에 계획 및 운영 상에서 진행되었던 다양한 프로젝트, 연구, 분석 등을 종합적인 차원에서 검토하여 하나의 로드맵으로 작성

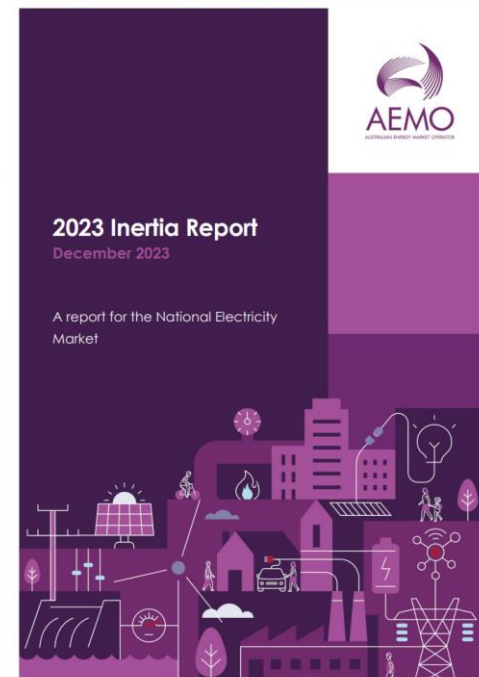
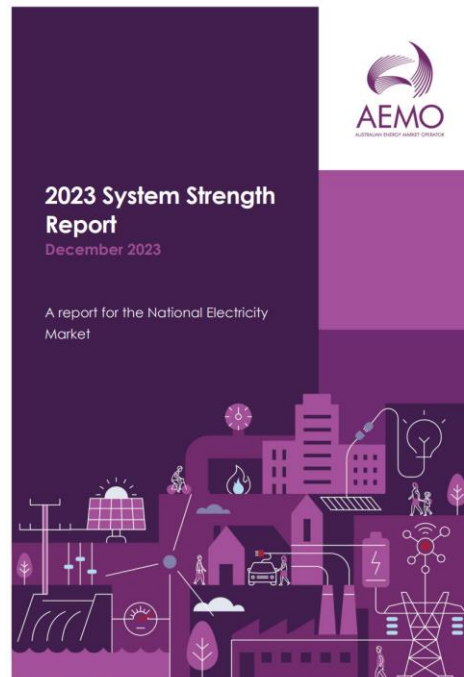
- ① **Power system security** : 재생에너지 증가에 따라, 전력계통 운영상의 안전도를 유지해야 함
- ② **System operability** : 복잡한 운영 조건 내에서, 전력계통을 안전하고 신뢰성 있게 운영하는 능력
- ③ **Resource adequacy and capability** : 다양한 시간대에서 재생에너지의 변동성을 제어하여, 재생 에너지의 가용성을 최대한으로 투입하도록 에너지 자원과 전력망을 구성



# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Power System Security

- ▣ 재생에너지 보급률 증가에 따라 전력 계통의 안정적인 운영범위를 유지하는 능력
  - 전력시스템의 한계를 더 잘 이해하고 기술범위를 확장하기 위한 조치 제시
  - 시스템이 확장된 기술범위 내에서 운영상 유지 관리될 수 있도록 하는 능력확보를 위한 조치
    - Frequency and inertia
    - Transient and oscillatory stability
    - System strength and converter driven stability
    - Voltage Control
    - System restoration



# 해석 모델 정밀화

## ■ Power system modelling의 어려움

- ▣ 시스템 운영 및 계통검토의 신뢰성에 큰 영향
  - 재생에너지, ESS, HVDC 등 컨버터 기반설비의 연계로 계통 복잡성(complexity)은 증가하고 있으나 모델링의 정합성(quality)은 저하되는 것으로 분석(AEMO)
  - 사용가능한 모델의 부정확성을 고려하기 위해 더 큰 운영상의 불확실성 마진 필요
- ▣ 다양한 현상과 시나리오를 분석·연구하기 위해 모델링의 확보속도 와 정확성 향상 필요

## ■ AEMO의 Modelling 능력 향상을 위한 단계적 계획

- ▣ 프로세스 및 관리체계(governance) 향상
  - AEMO와 NSPs(Network Service Provider)간의 협의를 통해 데이터 모델 품질 및 성능 요구사항 및 기준 설정
  - 데이터 추출, 데이터 변환, 분석, PMU 데이터를 사용한 모델검증 등을 위한 향상된 내부 프로세스 확립
- ▣ 절차 간소화 및 자동화 툴 개발
  - 발전기 급전 패턴, 수요예측을 빠르고 정확하게 반영할 수 있는 프로세스 및 자동화 툴 개발
  - 실시간 및 look-ahead 안정도 평가를 위해 EMS 와 pre-dispatch 정보를 활용한 평가방법 및 툴 개발

## ■ EMT 모델링의 필요수준

- 컨버터 기반 설비의 빠른 응답특성, 제어특성 등의 반영을 위해서는 EMT수준 분석 필요

### ❖ 검토 목적과 전압레벨에 따른 모델링 수준

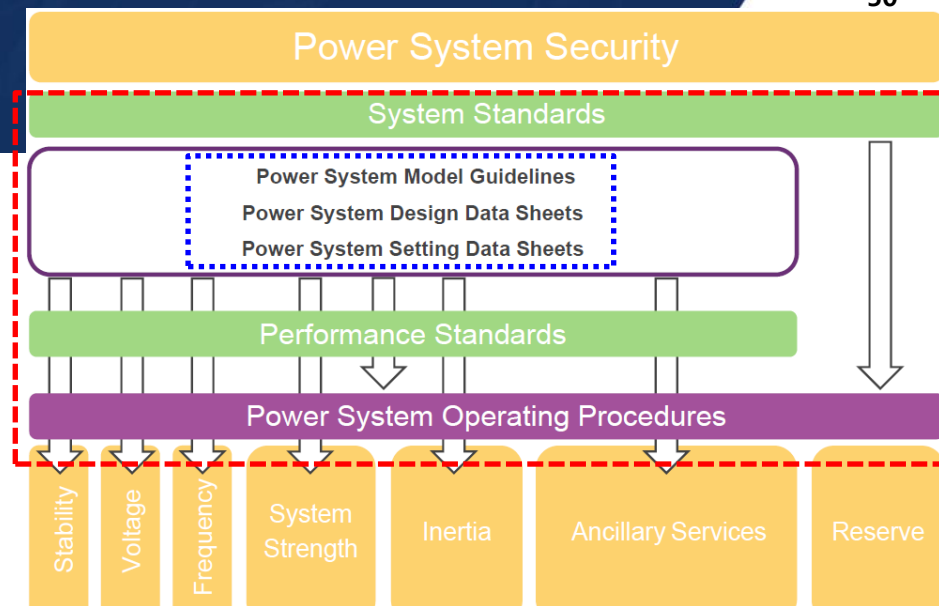
| Deppnss   | Converter                      |               |                    |                    |                  |                  |                   | Power System               |
|-----------|--------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------------|
|           | Power converter representation | Thernal Model | Inner control loop | Outer control loop | PLL              | Filter           | DC link capacitor |                            |
| <b>A+</b> | Switching Model                | Included      | Detailed model     | Detailed model     | Detailed model   | Included         | Included          | Physics component modeling |
| <b>A</b>  | Switching Model                | Not included  | Detailed model     | Detailed model     | Detailed model   | Included         | Included          | Physics component modeling |
| <b>A-</b> | Average Model                  | Not included  | Detailed model     | Detailed model     | Detailed model   | Included         | Included          | Multi-machine              |
| <b>B</b>  | Average Model                  | Not included  | Detailed model     | Detailed model     | Simplified model | Simplified model | Included          | Multi-machine              |
| <b>C</b>  | Average Model                  | Not included  | Simplified model   | Detailed model     | Simplified model | Not included     | Included          | Multi-machine              |
| <b>D</b>  | Average Model                  | Not included  | Simplified model   | Detailed model     | Simplified model | Not included     | Not included      | Multi-machine              |
| <b>D-</b> | Phasor Model                   | Not included  | Simplified model   | Detailed model     | Simplified model | Simplified model | Simplified model  | Multi-machine              |
| <b>E</b>  | Phasor Model                   | Not included  | Simplified model   | Detailed model     | Not included     | Not included     | Not included      | Multi-machine              |
| <b>F</b>  | Phasor Model                   | Not included  | Not included       | Simplified model   | Not included     | Not included     | Not included      | Infinite bus               |

| Problem                              | Sub-Problem                         | Voltage range |           |           | Frequency range |             |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|-------------|
|                                      |                                     | HV            | MV        | LV        | From            | to          |
| <b>Elecmagnetic Transient (EMT)</b>  | High frequency harmonics/resonances | <b>A+</b>     | <b>A+</b> | <b>A+</b> | DC              | kHz         |
|                                      | Harmonic stability                  | <b>A</b>      | <b>A</b>  | <b>A</b>  | 55Hz            | kHz         |
| <b>Small-signal stability</b>        | Syb-synchronous resonances          | <b>B</b>      | <b>B</b>  | NA        | 5Hz             | 55Hz        |
|                                      | Inter-area oscillations             | <b>C</b>      | NA        | NA        | 0,1Hz           | 5Hz         |
|                                      | DC Voltage stability                | <b>C</b>      | <b>C</b>  | <b>C</b>  | DC              | Hundreds Hz |
|                                      | Angle and voltage stability         | <b>E</b>      | <b>D</b>  | <b>C</b>  | 0,2Hz           | 1,2Hz       |
| <b>Frequency stability</b>           | Primary frequency control           | <b>E</b>      | <b>D</b>  | <b>C</b>  | DC              | 1,2Hz       |
| <b>Scheduling &amp; Optimization</b> | Load flow                           | <b>F</b>      | <b>F</b>  | <b>F</b>  | DC              | DC          |

# 해석 모델 정밀화

## ■ AEMO의 Model Guideline과 Data sheet

- National Electricity Rule(NER) 내 모델지침 제공명시
- Data sheet은 발전설비의 계통연계를 위해 반드시 준비해야하는 문서
- Power system model guidelines내의 Appendix C. Modelling component requirements에는 사용하는 틀에 기반하여 필요로 하는 구성요소를 제시



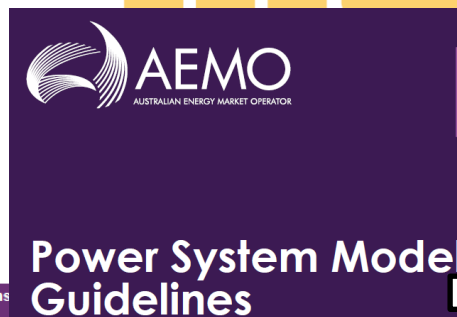
## C.3 Photovoltaic generation

### C.3.1 Inverter model components

| Component                    | Solar Cells | DC-DC converter | DC link  | IGBT switches | PWM switching | Unit trans |
|------------------------------|-------------|-----------------|----------|---------------|---------------|------------|
| <b>Study</b>                 |             |                 |          |               |               |            |
| Transient Stability          | EMT*        | RMS, EMT        | RMS, EMT | -             | -             | RMS, EMT   |
| Sub-synchronous interactions | -           | EMT             | EMT      | -             | -             | EMT        |
| High-frequency transient     | -           | EMT*            | EMT*     | EMT           | EMT           | EMT        |
| Harmonics                    | -           | EMT             | EMT      | EMT           | EMT           | EMT        |

A. Including saturation for EMT models.

| Component                    | Inner loop converter control | Outer loop converter control | Phase locked loop <sup>A</sup> | Frequency control <sup>B</sup> | High voltage ride-through | Low voltage ride-through |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>Study</b>                 |                              |                              |                                |                                |                           |                          |
| Transient Stability          | EMT                          | RMS, EMT                     | EMT                            | RMS, EMT                       | RMS, EMT                  | RMS, EMT                 |
| Sub-synchronous interactions | EMT                          | EMT                          | EMT                            | EMT                            | EMT                       | EMT                      |
| High-frequency transient     | EMT*                         | EMT*                         | EMT*                           | -                              | EMT                       | -                        |
| Harmonics                    | EMT                          | EMT                          | EMT                            | EMT                            | -                         | -                        |



| Power System Design Data Sheets<br>and<br>Power System Setting Data Sheets             |
|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Prepared by: AEMO Operational Analysis and Engineering<br>Version 1.2<br>24-April-2023 |

| Section | Data Sheet                                                                                                                     | (Hybrid generating system) |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 6       | Generating System                                                                                                              |                            |
| 6.1.1   | Design Data Sheet                                                                                                              |                            |
| Symbol  | Data Description                                                                                                               | Units                      |
| VCON    | Connection point to network                                                                                                    | Text                       |
| NMC     | Nominal voltage at connection to network                                                                                       | kV                         |
| PSO     | Total station net maximum capacity (NMC)                                                                                       | MW (sent out)              |
| PMIN    | Rated active power (Sent Out)                                                                                                  | MW (sent out)              |
| Qmax    | Minimum Load (ML)                                                                                                              | MW (sent out)              |
| Qmin    | Rated reactive power injection at NMC (i.e. lagging)                                                                           | MVar (sent out)            |
| GCD     | Rated reactive power absorption at NMC (i.e. leading)                                                                          | MVar (sent out)            |
|         | Capability chart at the proposed point of connection. (Include corresponding transformer tap(s) for which this curve applies). | Graphical data             |
|         | The lowest short circuit ratio at the connection point for which the                                                           | D, R1, R2                  |

인버터 설비 증가에 따른 안정도 평가 개  
선방안

**붙임**

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Frequency and inertia

- ▣ 사전조건(1) : 상정사고 발생 후에 일정 영역안으로 주파수를 유지해야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - IBR이 증가하고, 동기 발전기가 감소하면서 계통 관성 저하 → RoCoF 증가
  - 낮 시간 동안 태양광 발전 증가에 따른 net 부하 감소로 UFLS 효과가 감소
- ▣ 조치
  - (현재) 계통이 견딜수 있는 RoCoF 한계 기준 검토
  - (현재) 동기기의 기계적 관성이 계통 안정도에 미치는 역할 및 동기기 설치의 적절한 위치 분석 → (미래) 관성 제공 능력과 RoCoF 간의 상관 관계 분석
  - (현재) IBR이 발생하는 합성관성과 기계적 관성과의 차이점을 분석하고, 합성 관성의 한계점을 분석 : IBR의 합성관성은 운영조건과 연관되어 있기 때문에, 합성관성은 시장의 보상과 연관
    - (미래) 합성관성 능력을 표준화하고, 관성서비스 시장에 포함. IBR의 주파수 응답 효과를 모델링하고, 계통 기여 효과를 고려 : Grid-Forming 인버터
    - (미래) 운영 측면에서 관성 가용성을 보장하는 메커니즘을 설계하고 구현

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Frequency and inertia

- ▣ 사전조건(1) : 상정사고 발생 후에 일정 영역안으로 주파수를 유지해야 함
- ▣ 조치
  - (현재) 계통의 관성 요구 조건을 5년 계획으로 매년 산정
  - (현재) 경제성이 있는 경우, 계통 강건도와 관성을 동시에 충족시키기 위하여 동기조상기와 플라이휠을 결합한 해법을 검토 및 적용
  - (현재) 비상 주파수 제어 및 관리 전략을 수립하고 적용 : OFGS/UFLS
  - (현재) 태양광 증가에 따른 비상 주파수 제어 전략의 적절성 검토 : 태양광 변화에 따라 UFLS 전략을 수정하고 태양광 차단 고려
- (미래) 태양광 발전이 높은 경우, 비상 주파수 제어 체계를 개선하고 재설계

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Frequency and inertia

- ▣ 사전조건(2) : VRE, 저장장치, DR등으로 주파수 응답 및 주파수 제어 보조 서비스(FCAS)를 완전하게 구현할 수 있음
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 주파수 제어 보조 서비스와 연관된 상정고장이 변화
  - 전력수급 불균형 증가로 주파수 제어 보조 서비스 용량이 증가
  - 동기기 감소로 주파수 응답 능력 및 마진 감소
- ▣ 조치
  - (현재) 동기기가 최소인 조건에서 주파수 제어 요구 조건을 평가하고, 이를 만족하는 실현 가능한 운영 조건 (재생에너지의)을 수립
    - (미래) 태양광발전량이 높은 상태에서 주파수 응답 자원을 온라인 상태로 유지하는 조치 수립
  - (현재) FFCAS 시장 실시하고, FFCAS 요구사항 수립 및 용량 산정

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Frequency and inertia

### ▣ 조치

- **(현재)** 변화된 계통 조건에서 주파수 제어 수단의 다양한 조합 및 FCAS 체계의 적절성 평가
  - 주파수 제어 조치와 관성 수준 간의 연관 관계를 고려하여 검토
  - FFCAS는 관성과 연관되기 때문에, 이와 연관된 제약 조건 수립
  - 지역별 FCAS 및 주파수 응답 요구 사항 검토
- **(현재)** 비정기적, 비계획적인 가격 반응의 변동성을 정량화하기 위한 운영 예측 프로세스를 도입하여 FCAS 용량을 산정
- **(현재)** 군집된 DER과 부하로부터 주파수 제어 서비스를 위한 기술 사양 수립
  - (미래) 군집된 DER 자원이 계획된 자원으로 참여하여 FCAS를 제공할 수 있도록 허용

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Frequency and inertia

- ▣ 사전조건(3) : 현재 계통의 관성을 정확하게 감시하고, 수급 측면에서 필요로 하는 계통 관성 예측 능력을 갖추어야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 현재의 관성 추정은 동기기 기반으로, 부하 측면의 관성 기여를 고려하지 않음
- ▣ 조치
  - (현재) PMU를 통하여 동적 관성 평가(ex. Reactive Technology)  
→ (미래) 동적 관성 감시 및 평가를 계통 운영에 반영

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Transient and oscillatory stability

- ▣ 사전조건(1) : 동기기 감소에 따른 적절한 안정도 한계를 설정
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 동기기 감소로 동기 토크 및 관성 감소
    - 관성 감소가 과도 안정도 한계에 미치는 불확실한 영향
    - 100% 재생에너지에서 송전 한계를 알 수 없음
- ▣ 조치
  - (현재) 동기기 폐지에 따른 관성 감소 시나리오에 대한 안정도 제약 조건을 검증하고, 새로운 안정도 한계를 수립
    - (미래) 새로운 안정도 문제가 발견되었을 때, 검토할 수 있는 프로세스 수립

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Transient and oscillatory stability

- ▣ 사전조건(2) : 적절하게 지역 및 지역간 진동 감쇠
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 동기기 감소로 댐핑 토크 감소 및 VRE 증가로 계통 구성 변경
    - 계통 구성, 관성 및 제어 시스템 변화로 미소신호 진동 변화. 대규모 사고 발생 시, 진동이 제거되지 못함
  - 신규로 발생하는 진동 모드의 원인 파악이 힘 듬
- ▣ 조치
  - (현재) 미래 계통 구성에서 지역간 진동을 관리하고 조치하는 현재의 방법이 적절한지 평가  
→ (미래) 지역간 진동이 발견되었을 때, 조치하는 프로세스 수립
  - (현재) 다수의 IBR 계통에서 적용하는 미소 신호 안정도 평가 툴을 개발하여, 문제를 인식하고 완화
  - (현재) 고주파 현상을 모델링할 수 있는 요구 조건을 수립  
→ (미래) 미소 신호 안정도를 인식하고 해결하는 프로세스를 수립

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ System strength and converter driven stability

- ▣ 사전조건(1) : 최소 Must-Run 동기기에 해당하는 계통 강건성 능력을 갖춰야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 동기기 감소와 IBR 기기 증가로 계통 강건성 감소
    - 상정사고 발생 시, 전압파형의 불안정성 증대, 보호 시스템의 오/부동작, 전력 품질 저하, 전류형 HVDC의 전류실패 가능성 증대
- ▣ 조치
  - (현재) 10년 후를 목표로 100% 재생에너지로 전환과정에서 계통 강건성의 요구량을 산정. IBR이 연계되는 지점의 최소 단락용량 설정. 유틸리티는 이 요구량을 만족하기 위한 설비 계획을 수립하여야 함
    - IBR에 의해 새로운 형태의 현상(ex. 진동)이 동기조상기에 의한 계통 강건성 확보 설계에 포함되어야 함
  - (현재) 계획 정전 및 계통 복구 상황에서 계통 강건성의 요구량이 적절한지를 평가하여야 함
  - (현재) 계통 강건성을 제공하는 발전기나 동기조상기가 정상적으로 작동하는지 모니터링
  - (현재) 기존의 동기발전기가 동기조상기 기능 겸용으로 전환 가능한지 검토
  - (현재) 계통 강건성을 공급할 수 있는 Grid-Forming 인버터 검토 및 시험

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ System strength and converter driven stability

- ▣ 사전조건(1) : 최소 Must-Run 동기기에 해당하는 계통 강건성 능력을 갖춰야 함,
- ▣ 조치
  - (현재) Grid-Forming 인버터의 접속 규정을 간소화
  - (현재) Grid-Forming 인버터의 계통 안정화 능력에 대한 가이드라인을 제작사에게 제시
    - 제작사와 협력 필요
  - (현재) 계통 강건성을 확보하는 운영방안에 Grid-Forming 인버터와 같은 신기기의 동작을 포함

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ System strength and converter driven stability

- ▣ 사전조건(2) : 컨버터 상호작용으로 인한 진동을 판단하고 관리하는 능력을 갖춰야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - IBR 제어와 계통구성 요소 상호간에 발생하는 불안정성이 증가함에 따라, 약한 계통에서 IBR 제어의 불확실성이 증가
  - 새로운 진동 모드 감시 및 원인 분석의 한계가 존재
- ▣ 조치
  - (현재) 미소신호 안정도 및 Converter driven 안정도를 지속적으로 관찰하고 분석하기 위하여 고속 감시 시스템 적용  
→ (미래) 진동 감지 시, 분석 및 제어하는 프로세스 수립
  - (현재) Converter driven 안정도를 감시 및 평가하고, 계통 운영에 적용하는 툴을 개발. 실시간 평가 기능이 필요됨

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Voltage control

- ▣ 사전조건(1) : 계통의 무효전력 요구조건을 비동기기가 완벽하게 공급할 수 있어야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 정적 동적 무효전력을 공급하는 동기기의 감소, 시스템 강건도 감소
  - 새로운 진동 모드 감시 및 원인 분석의 한계가 존재
- ▣ 조치
  - (현재) 동기기 감소 및 원격지에 접속된 VRE가 무효전력을 공급하게 되면서 기존의 무효전력 공급 요구량을 새롭게 계획하고 관리
  - (현재) 동기기 감소에 따른 전압안정도 영향성 검토  
→ (미래) 계통 토폴로지 변화에 따른 전압 안정도 한계량을 지속적으로 관찰 및 업데이트
  - (현재) 태양광 증가로 Net 부하가 감소함에 따라, 과전압을 관리하기 위한 유도성 무효전력 마진을 충분히 확보하여야 함 : 현재 운영 기준에는 중부하에 따른 용량성 무효전력 마진만 제시
  - (현재) 상정사고시, 충분한 무효전력을 공급하는 절차를 수립

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Voltage control

- ▣ 사전조건(1) : 계통의 무효전력 요구조건을 비동기기가 완벽하게 공급할 수 있어야 함
- ▣ 조치
  - (현재) 재생에너지의 발전량이 적은 시간동안, 인버터가 무효전력 공급을 유지해야 하는 요구조건을 검토
  - (현재) IBR을 포함하는 운영 절차를 수립 : VRE의 공급능력 곡선에는 무효전력을 공급하게 되어 있지만, 운영 상에는 포함되어 있지 않음
    - (미래) 무효전력을 공급하는 자원을 확대
  - (현재) 상정사고 시, IBR이 공급하는 무효전류의 요구 조건을 명시
  - (현재) 분산자원의 FRT 기능을 구현하고 의무 규정을 수립
  - (현재) 모든 가용한 무효전력 장치와 상정고장을 고려한 전압 안정도 분석 툴 개발 및 시스템 업데이트
    - (미래) 전압 관리 시스템을 통하여 자동 전압 제어 구현
  - (현재) 무효전력 자원의 탈락으로 인한 과도한 전압 변화를 방지하기 위한 단락 용량 및 무효전력 마진을 분석

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Voltage control

- ▣ 사전조건(2) : 분산자원의 발전량이 많은 경우, 송배전 계통 간 협조제어 능력을 갖추
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - 주간에 태양광 증가로 계통 부하 감소함에 따라, 전압 제어를 위한 무효전력 공급 증가. 빈번하게 배전 계통 전압 설정점을 조정
- ▣ 조치
  - (현재) 분산자원, VRE의 증가로 배전 계통에서 무효전력 공급 및 전압 제어를 위해 송전사업자와 배전사업자 간의 협조 운전이 필요함

# 계통 계획 및 운영 로드맵 수립 – AEMO

## ■ Voltage control

- ▣ 사전조건(3) : 안정적인 부하 전력 공급을 위한 충분한 무효전력 흡수 능력을 갖춰야 함
- ▣ 현재/미래의 도전과제
  - VRE 증가로 수요측에 용량성 부하 패턴이 증가
  - 새로운 전압 패턴은 지역의 전압 특성 및 부하 특성에 영향을 줄 수 있음
- ▣ 조치
  - (현재) 계통 계획을 위해, 송전점에서의 무효전력 수요 예측이 필요
    - 수요 예측이 어려울 경우, 보수적으로 부하 역률을 가정하는 합의가 필요
  - (미래) 전력시장과 다양한 제어 시스템을 통합한 무효전력 예측 및 전압 제약이 가능한 계통 계획 능력을 갖춰야 함



Do you have any Questions?