Fortaleza y Flexibilidad para el desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional

Del cortocircuito a la estabilidad de los controles

Rodrigo Espinoza V. – Gerente de Operación del Coordinador Eléctrico Nacional

24 de noviembre de 2026

Agenda

01 Transformación del sistema eléctrico y nuevos desafíos operacionales

02 Evolución de criterios y medidas para la seguridad del SEN

03 Preparación para las nuevas condiciones de operación

COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL

Transformación del sistema eléctrico, nuevos desafíos operacionales

La transformación del sistema está aumentando la complejidad operacional

CAPACIDAD INSTALADA DEL SEN

51%

de la capacidad instalada corresponde a generación solar y eólica

5,1 GW

Corresponde a la capacidad instalada en sistemas de almacenamiento en base a baterías a septiembre 2026

41.315 MW de capacidad total instalada

Septiembre de 2026 · potencia máxima bruta



Solar 34,1% | Eólica 16,9% | Otras 49,0%

Fuente: Coordinador Eléctrico Nacional, Informe Mensual SEN, octubre 2026.

Mayor penetración renovable

Variabilidad e incertidumbre de generación.

Nuevos recursos Energéticos y tecnologías

BESS, convertidores y generación distribuida.

Nuevas demandas

Electromovilidad, H2V y data centers.

Digitalización

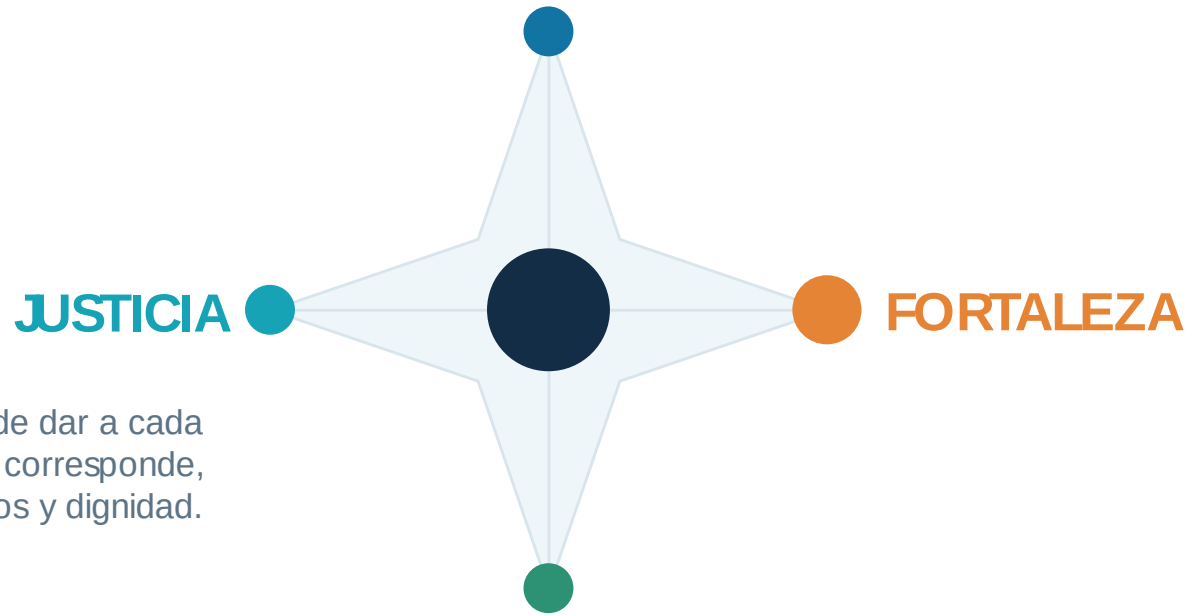
Mayor necesidad de información, modelos y coordinación.

La evolución tecnológica exige adaptar las capacidades de operación y control del SEN.

Las cuatro virtudes Cardinales:

PRUDENCIA

Capacidad de reflexionar y discernir lo correcto antes de actuar, eligiendo los medios adecuados para hacer el bien.



JUSTICIA

Voluntad constante de dar a cada persona lo que le corresponde, respetando sus derechos y dignidad.

FORTALEZA

FORTALEZA DE RED

Capacidad de la red para mantener y controlar la forma de onda de la tensión en cada punto, en operación normal y ante perturbaciones.

Firmeza para resistir perturbaciones y mantenerse estable, incluso cuando cuesta.

TEMPLANZA

Moderación y autocontrol frente a los placeres, impulsos y deseos para mantener el equilibrio.

COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL

Evolución de criterios y medidas para la seguridad del SEN

Una evolución de criterios para un sistema con más IBR

1

2018–2024

¿Hay fortaleza suficiente?

ESCR y condensadores síncronos

2

2024 · ERST

¿Se sostiene la tensión?

Generación síncrona mínima

3

2025

¿Qué exige la operación?

ESCR operativo y verificación EMT

4

Hoy

¿Interactúan los controles?

Estudios EMT paramétricos

Cada fenómeno nuevo planteó una pregunta distinta y exigió una herramienta de análisis nueva.

De indicadores estáticos a verificar el desempeño dinámico real de las instalaciones.

El Coordinador ha impulsado infraestructura y nuevas capacidades para fortalecer la red

CONDENSADORES SÍNCRONOS

≈ 1.000
MVA adjudicados

5
proyectos

3
empresas

Inicio de servicio previsto desde fines de 2027

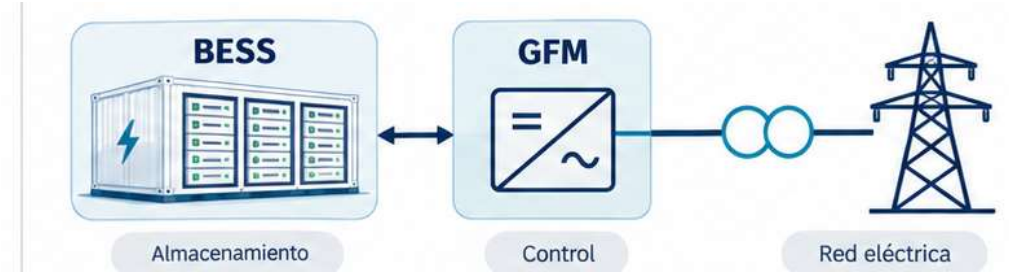
DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

2018–2020	2021–2022	2023–2024	2027
Diagnóstico de fortaleza	Cuantificación de requerimientos	Licitación y adjudicación	Servicio previsto

Aporte técnico Potencia de cortocircuito · inercia síncrona · soporte dinámico de tensión

GRID FORMING

BESS con control Grid Forming: capacidades sujetas a requisitos y verificación



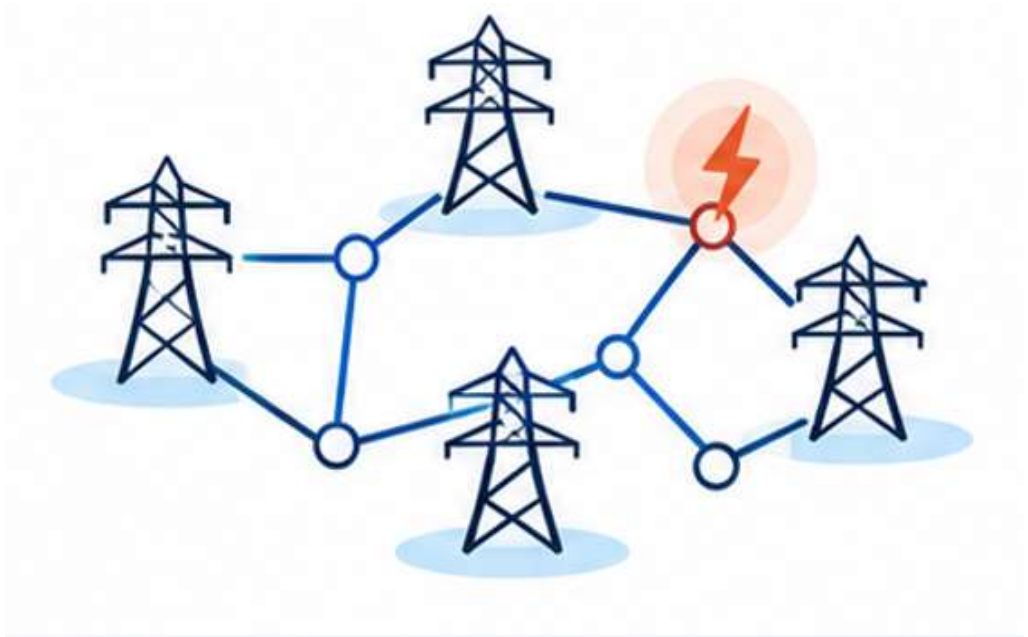
- **Soporte dinámico de tensión**
- **Respuesta rápida de frecuencia**
- Capacidades adicionales sujetas a verificación

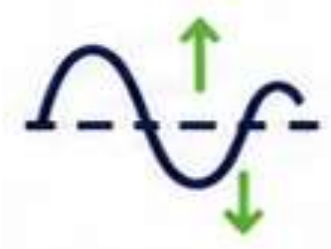
Normativa IBR actualizada en 2026: aplicación según régimen transitorio y exenciones.

El fortalecimiento de la red combina infraestructura, medidas operacionales y recursos con desempeño técnico verificable

Una red débil expone a los IBR a pérdida de sincronismo

Ante perturbaciones, la deformación de tensión puede afectar el PLL de los inversores.





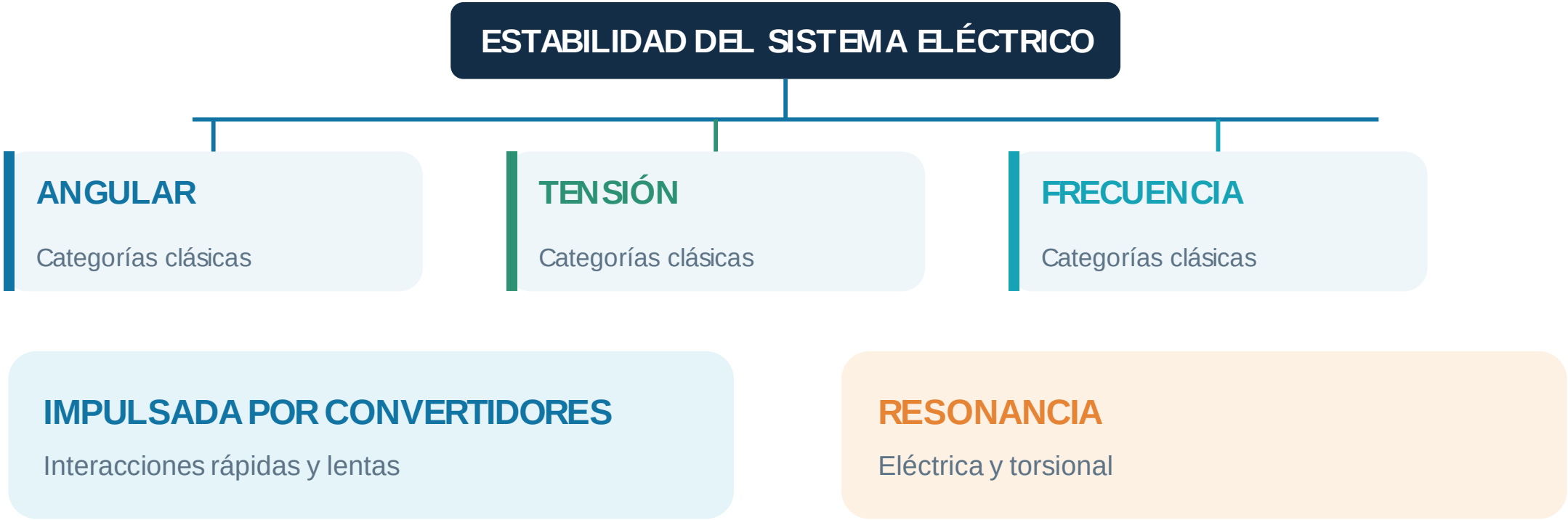
PERTURBACIÓN EN RED DÉBIL

La deformación de tensión puede comprometer la referencia del PLL y la sincronización de recursos IBR-GFL.

El riesgo depende de la red y del comportamiento dinámico de los controles.

La estabilidad incorpora nuevos mecanismos dinámicos

Las categorías clásicas siguen vigentes; la electrónica de potencia amplía el análisis.



Clasificación ampliada (IEEE, 2021)

Minuta DAOP N°04/2025: criterio operacional y evidencia dinámica

El ESCR permite definir condiciones operativas; las simulaciones EMT revelan riesgos dinámicos que requieren verificación.

0 a 2 unidades en servicio

14,9 GVAs

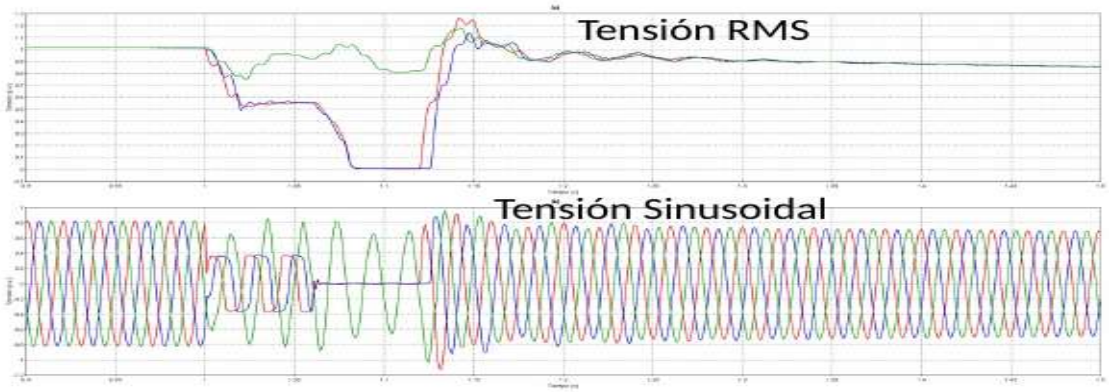
4 unidades en servicio

12 GVAs

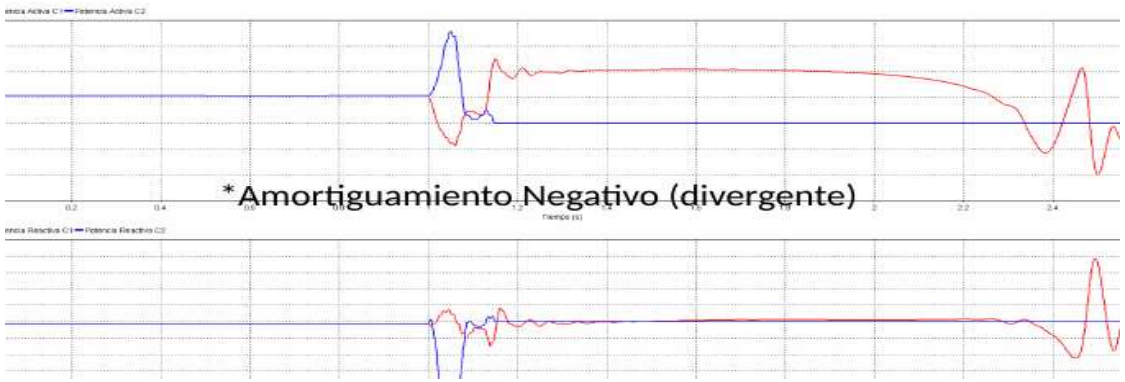
ESCR ≥ 1,5

Barra limitante: Parinacota 220 kV

EVIDENCIA EMT · Mayor exigencia de red → menor amortiguamiento → posible respuesta divergente



A2 · oscilaciones y menor amortiguamiento

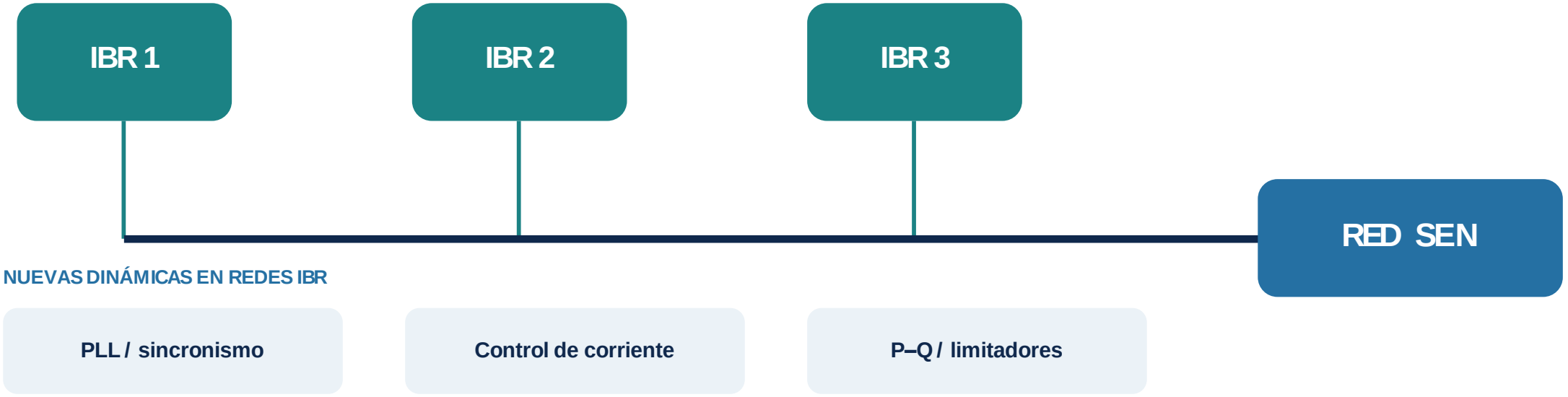


B2 · respuesta divergente

Las curvas RMS de las figuras son salidas de simulación EMT; no representan simulaciones fasoriales independientes.

La red y los convertidores forman un sistema de control acoplado

La estabilidad depende de la impedancia eléctrica, la sincronización y la parametrización de los controles.



Un cambio de topología, fortaleza de red o ajuste de control puede modificar el amortiguamiento y la estabilidad.

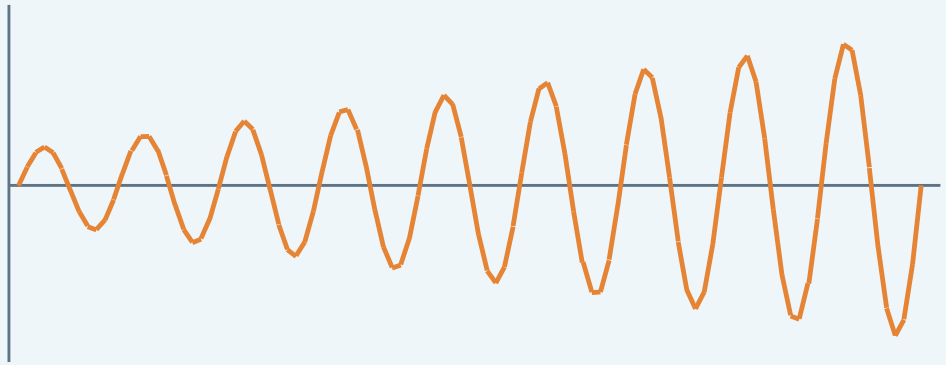
Interacciones resonantes y estabilidad de controladores

Ejemplos conceptuales: monitoreo de oscilaciones y evaluación de la respuesta ante perturbaciones.

DOS MANIFESTACIONES DEL DESAFÍO

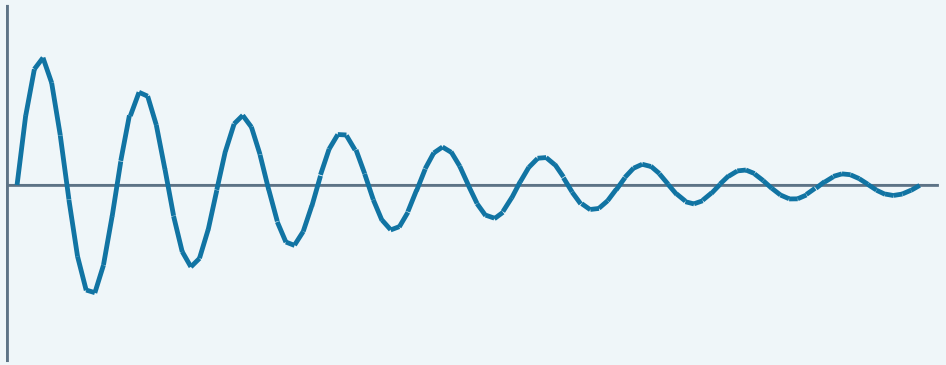
INTERACCIONES RESONANTES

Modo oscilatorio asociado a la interacción red–convertidor



ESTABILIDAD DE CONTROLES

Respuesta sensible a la parametrización de los lazos de control



Esquemas conceptuales; no representan resultados de eventos o estudios.

De verificar una condición a demostrar márgenes de estabilidad

El desafío es caracterizar el dominio de validez de los modelos y de las soluciones propuestas.

1

IDENTIFICAR

Condiciones vulnerables

2

CARACTERIZAR

Mecanismos dinámicos

3

VERIFICAR

Modelos y parámetros reales

4

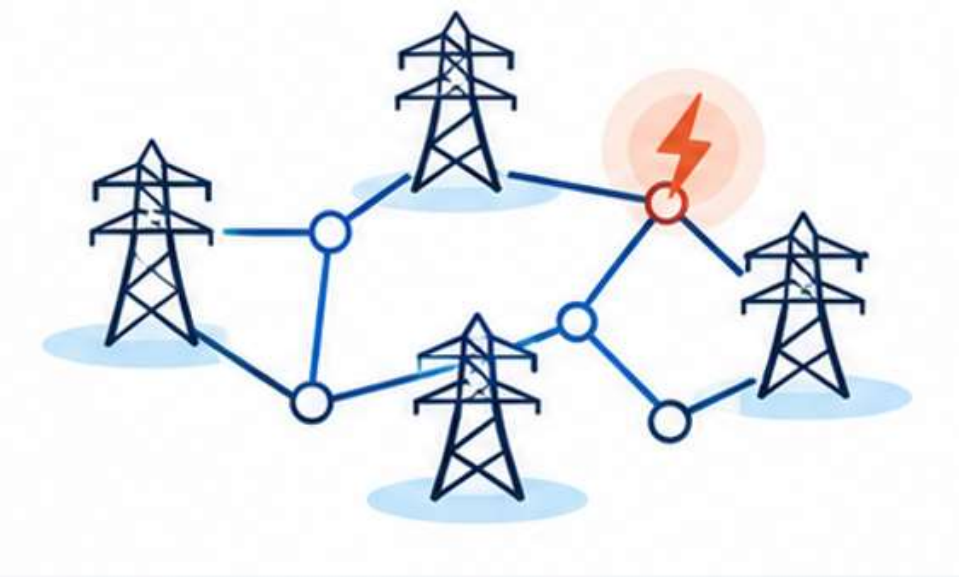
DECIDIR

Medidas y márgenes

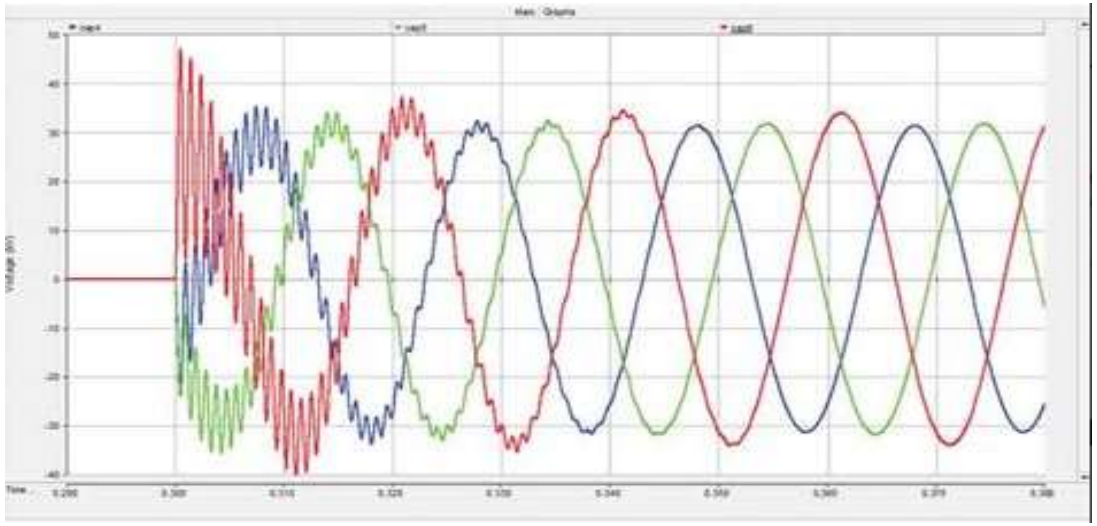
La robustez exige evaluar un rango de condiciones, no solo un caso base

La interacción de los PLL puede determinar la estabilidad

Dos barras con SCR similar pueden responder distinto según parámetros de control.



Red con múltiples recursos IBR



Barrido EMT: frecuencia natural, amortiguamiento y combinaciones de parámetros PLL (figura ilustrativa)

Dos condiciones con SCR similar pueden presentar respuestas dinámicas distintas.

COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL

Preparación para las nuevas condiciones de operación

Evaluar la fortaleza exige varias herramientas y modelos validados

El cortocircuito detecta debilidad; RMS y EMT evalúan los riesgos que el SCR no captura.

TRES HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN Y UNA CONDICIÓN ESENCIAL

01 CORTOCIRCUITO

SCR / ESCR
Nivel de falla

02 RMS

Simulación fasorial
Dinámica electromecánica

03 EMT

Transitorios rápidos
Controles de inversores

04 MODELOS VALIDADOS

Parámetros reales
Controles representativos

EN CURSO · ESTUDIO EMT DE INTERACCIÓN PLL: RESULTADOS EN REVISIÓN Y ANÁLISIS

MODELOS
Parámetros reales de IBR

›

SIMULACIONES
Condiciones y contingencias

›

REVISIÓN
Resultados y conclusiones

No extrapolar resultados preliminares antes de validar modelos y escenarios.

Los indicadores identifican condiciones de atención; RMS y EMT verifican la respuesta con modelos y parámetros representativos.

Evaluación escalonada: concentrar el EMT donde hay riesgo

Un filtro amplio identifica casos que justifican estudios dinámicos más detallados.

1 · SCREENING

SCR / ESCR o EqSCR

2 · ANÁLISIS DINÁMICO

RMS y respuesta ante contingencias

3 · VERIFICACIÓN FOCALIZADA

EMT con modelos validados

Priorizar los casos de riesgo sin perder la representatividad de los modelos

EqSCR: la fortaleza depende también de la interacción entre IBR

El indicador pondera la potencia de los convertidores según su acoplamiento eléctrico.

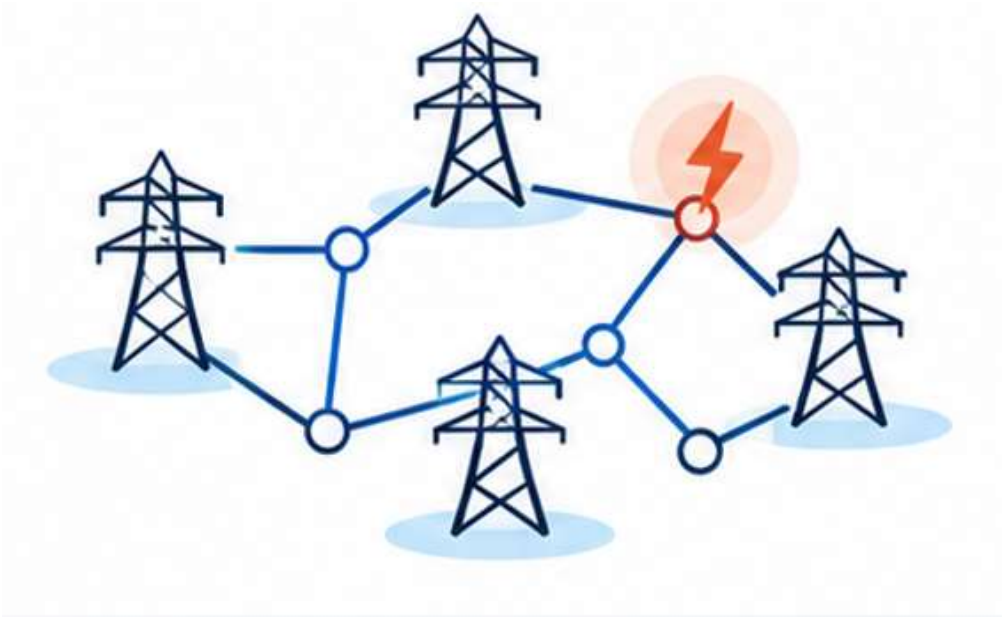
$$ESCR_i = Scc_i / \Sigma [IF(j,i) \cdot P(j)]$$



El acoplamiento eléctrico modifica el aporte de cada IBR al indicador

Mejorar el indicador no siempre fortalece la red

Distinguir entre reducir la potencia IBR y mejorar las propiedades eléctricas del sistema.



DOS TIPOS DE MEDIDAS

Reducen la exigencia sobre la red:
- Recorte de generación IBR y gestión de carga BESS

Aumentan el nivel de cortocircuito (fortalecen la red):
- Generación y compensación sincrónica
- Topología y GFM verificado

Reducir el denominador no equivale a aumentar la capacidad de cortocircuito.

Operar con indicadores y verificar desempeño a continuación

Una propuesta operacional en discusión y un segundo tramo de recursos que deberán acreditar capacidades verificables.

EN LA OPERACIÓN · PROPUESTA EN DISCUSIÓN

1. **MONITOREAR**
   Indicadores y condiciones operativas
2. **REVISAR**
   Despacho, gestión de carga BESS y topología
3. **VALIDAR**
   EMT, modelos y mediciones

No constituye un umbral operativo aprobado.

EN LOS RECURSOS · SEGUNDO TRAMO

- **HOY**
  Generación sincrónica
- **2027–2028**
  Condensadores sincrónicos
- **EN VERIFICACIÓN**
  Recursos grid-forming

Infraestructura sincrónica y GFM compiten por desempeño verificado.

La contribución a la fortaleza debe acreditarse mediante desempeño.

Anticipar, verificar y coordinar

Sin referentes que seguir: cada criterio nuevo nació de un fenómeno observado en el SEN.

TRES PRINCIPIOS

1. ANTICIPAR
2. VERIFICAR
3. COORDINAR

CINCO LÍNEAS DE TRABAJO CONJUNTO

- Indicadores
- Modelos y parámetros
- Simulaciones EMT
- Monitoreo
- Medidas y verificación

Los nuevos indicadores deben contrastarse con resultados de EMT y evidencia de operación.

De la fortaleza estática al desempeño dinámico de los controles.

COORDINADOR
ELÉCTRICO NACIONAL

GRACIAS