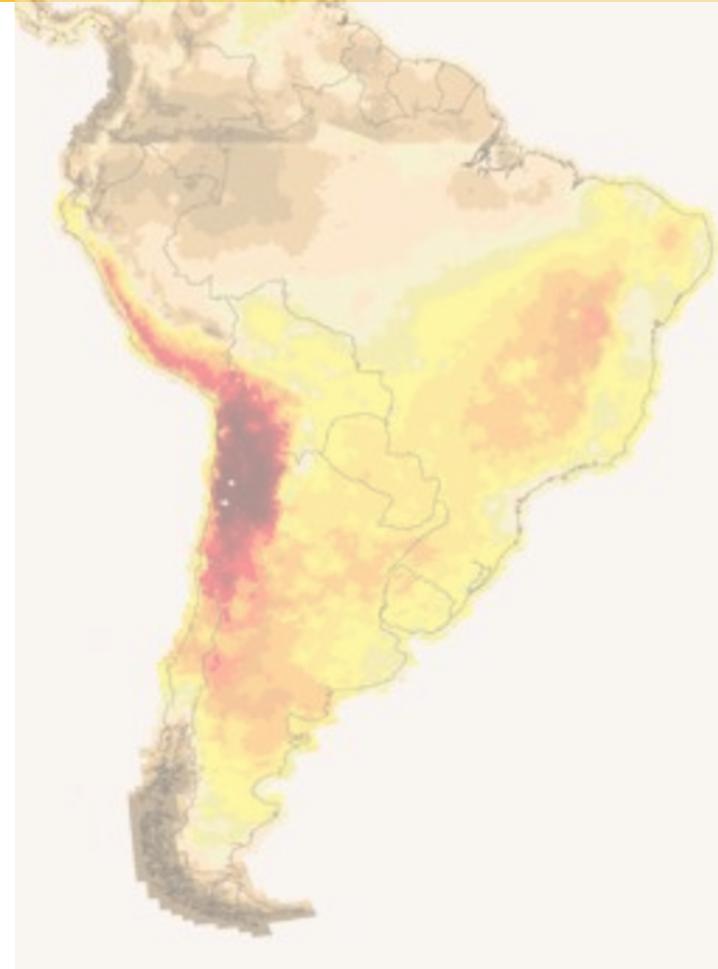


Convertidores Grid-Forming: necesidad y desafíos

Prof. Claudia Rahmann
Chile, 29 de Septiembre del 2022

Agenda

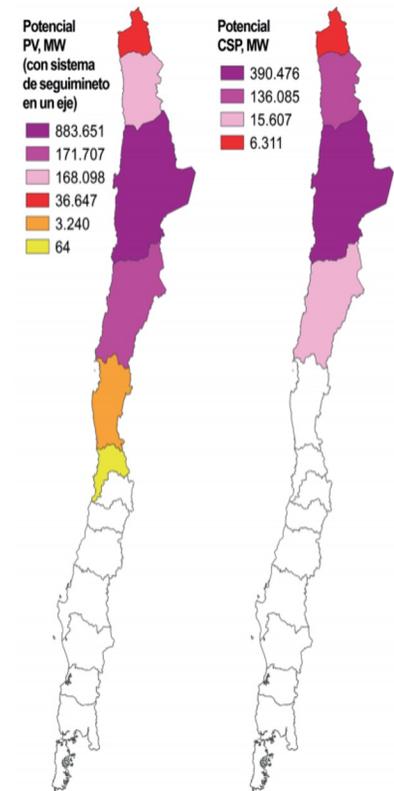
- **Introducción**
- Efectos de las ERNC-CC en los SEP
- Tipos de convertidores
- Estabilidad en SEP con ERNC-CC
- Desafíos en SEP con ERNC-CC
- Conclusiones



Potencial renovable en Chile

- El norte grande de Chile es la zona que recibe la mayor cantidad de radiación solar en el mundo
 - ◆ Radiación global horizontal de 2.700 kWh/(m² año)
 - ◆ Con más de 4.200 horas promedio de Sol
- El norte tiene un potencial solar disponible de más de **1800 GW**
 - ◆ Aproximadamente 60 veces la capacidad instalada del país
 - ➔ Suficiente para abastecer mas de 4 veces la energía que consume toda América Latina, el 18% del consumo mundial, o 60 veces el consumo total del país
- Adicionalmente, el potencial eólico del país también es importante

➔ El potencial de ERNC con convertidor (ERNC-CC) existente a nivel nacional es grande



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

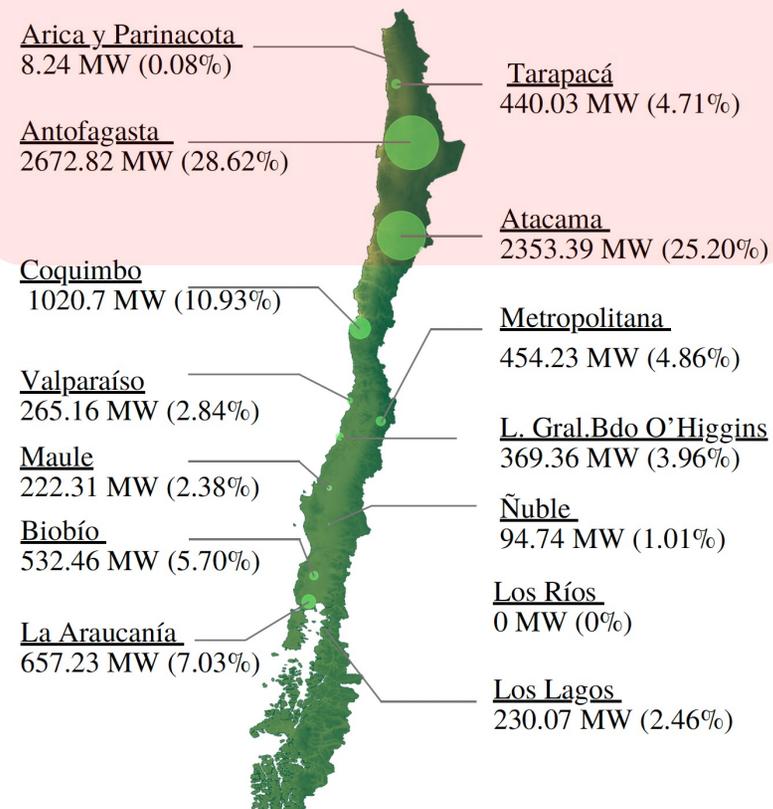
Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Desarrollo de ERNC-CC en Chile

- Capacidad total instalada en Chile: 29700 MW
- Del total de la capacidad instalada, las ERNC-CC tienen un total de 9100 MW (aproximadamente 30%)
 - ◆ 5300 MW en generación solar
 - ◆ 3800 MW en generación eólica
- De esta capacidad, 58.6% se ubica desde la región de Atacama al norte

→ **Alta concentración de ERNC-CC en la zona norte del país**



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Sistema eléctrico chileno a futuro

1. Metas de penetración de ERNC
2. Gran potencial renovable a lo largo del país
3. Condiciones favorables para **ERNC con convertidor (ERNC-CC)**, en particular para la energía solar fotovoltaica en el norte

➔ **ERNC-CC tendrán un rol importante en el sistema eléctrico chileno a futuro**

- La transición de los SEP hacia sistemas renovables con bajas emisiones de carbono ya está en marcha

○ **Sin embargo**, el uso masivo de ERNC-CC puede conducir a problemas en los SEP

- ◆ Entre los mayores desafíos están los asociados a la **estabilidad y control** de los SEP



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

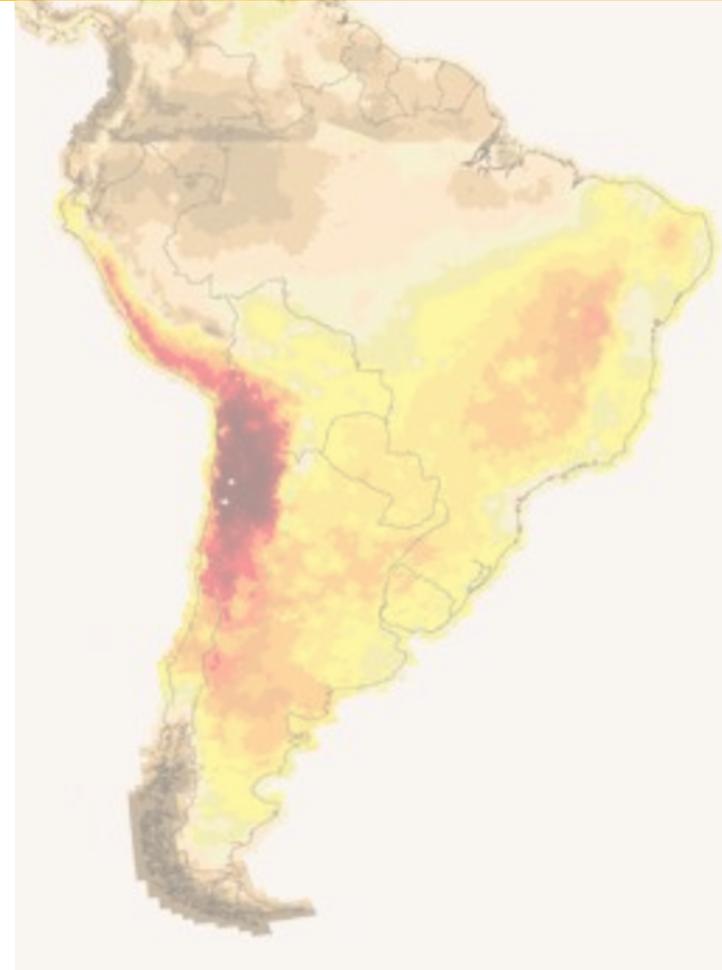
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

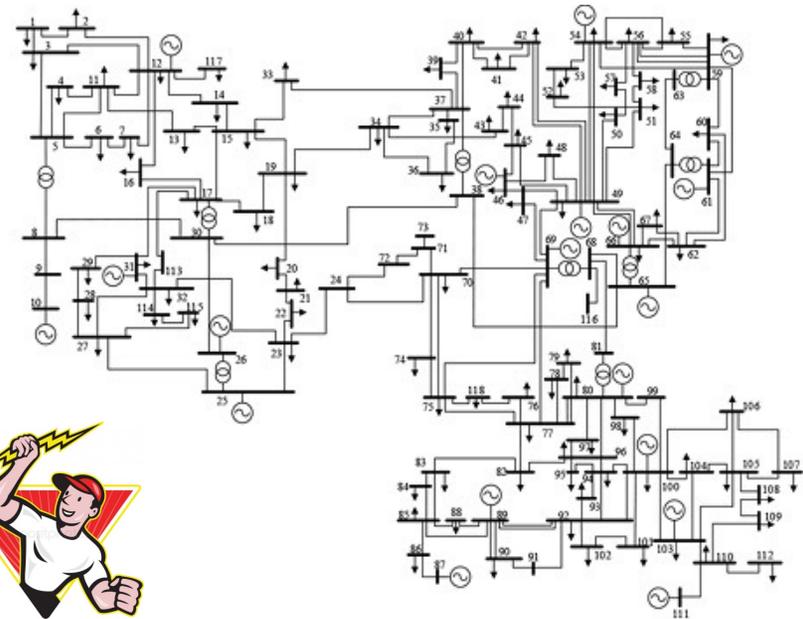
Agenda

- Introducción
- **Efectos de las ERNC-CC en los SEP**
- Tipos de convertidores
- Estabilidad en SEP con ERNC-CC
- Desafíos en SEP con ERNC-CC
- Conclusiones



Concepto de robustez en SEP

- El término “**robustez**” se utiliza para caracterizar de manera aproximada el desempeño dinámico de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) frente a diferentes condiciones de operación
 - ◆ Da una indicación de qué tan bien el sistema puede enfrentar diferentes contingencias manteniendo un comportamiento estable
- **Sistemas robustos** tienen menor riesgo de inestabilidad frente a contingencias y “buena” regulación de tensión y frecuencia en operación normal
- Entre los indicadores más usados para cuantificar la robustez de los SEP se encuentran:
 1. **Niveles de cortocircuito (SCL)** en las barras de la red
 2. **Inercia del sistema**



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Niveles de cortocircuito

- El **nivel de cortocircuito (SCL)** en una barra es un indicador local de robustez:

“Mientras mayor el valor del SCL en una barra, mayor será la robustez del sistema en dicha barra”

- El **SCL** representa la “rigidez” del voltaje de una barra: **niveles de cortocircuito altos** indican un sistema fuerte, con voltajes “rígidos”, cuyos valores no se desviarán de forma significativa ante perturbaciones

➔ Baja sensibilidad de los voltajes frente a cambios en los flujos de potencia

➔ **En áreas débiles con SCL bajos, la regulación de tensión es complicada**

- Los **SCL** también son un buen indicador del desempeño dinámico de los SEP durante contingencias
 - ◆ Generalmente, los SEP con **SCL** altos se caracterizan por tener un gran número de generadores sincrónicos (GS) que aportan con altas corrientes de falla durante perturbaciones
 - ◆ Altas **corrientes de cortocircuito** fluyendo hacia la red durante una falla se pueden ver como una respuesta "fuerte" de los SG, apoyando la estabilidad del SEP y su recuperación después del despeje de la falla

➔ **Redes robustas con SCL altos, son menos propensas a inestabilidad de tensión**

Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Inercia

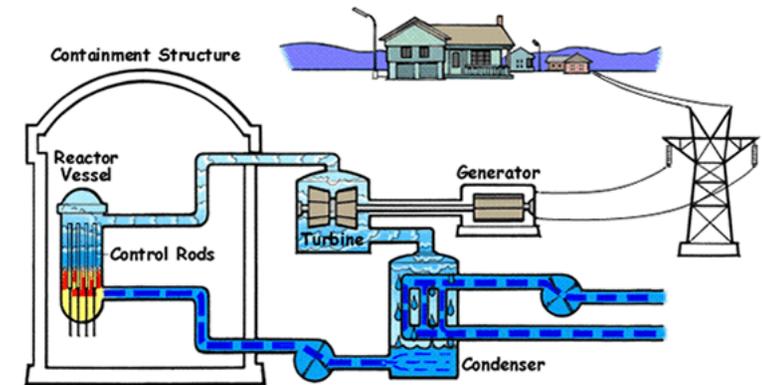
- La **inercia** es una medida de qué tan bien un SEP puede enfrentar desbalances de potencia manteniendo una frecuencia estable
- Durante los primeros segundos después de un desbalance de potencia, la frecuencia variará a una tasa determinada principalmente por la **inercia** total del sistema $H_{sys} \Rightarrow \Delta f \approx -\frac{f_0}{2 \cdot H_{sys}} \Delta P$

*“A mayor **inercia**, más lento variará la frecuencia del sistema frente a un desbalance”*

➔ Sus valores no se desviarán significativamente frente a perturbaciones

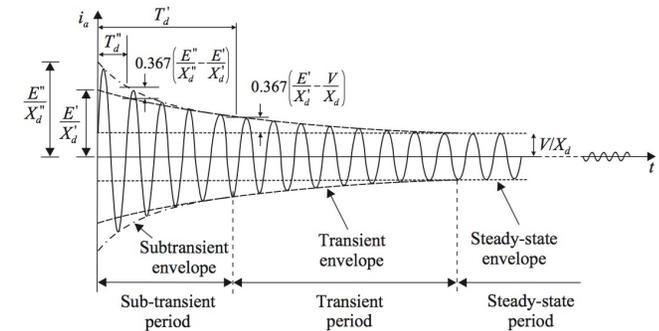
- Esta acción de los generadores sincrónicos (GS) vuelve la dinámica de la frecuencia más lenta ➔ Más fácil de regular

➔ SEP con **alta inercia** son **sistemas robustos**, menos propensos a experimentar grandes desviaciones de frecuencia durante desbalances de potencia y por ende son menos propensos a inestabilidad de frecuencia



SEP robustos y rol de los GS

- Los GS se encuentran entre las principales fuentes de **corrientes de cortocircuito** en los SEP
 - ◆ Pueden entregar entre 6 y 9 veces su corriente nominal durante varios ciclos durante fallas
- Los GS son las principales fuentes de **respuesta inercial** en los SEP
- ➔ Generalmente, las **zonas robustas** de los sistemas con altos SCL, se encuentran en áreas cercanas a los GS y con alta capacidad de transmisión
- ➔ Las **áreas débiles** con bajos SCL, están alejadas de los centros de generación, son poco enmalladas y tienen **gran cantidad de ERNC-CC**



- **Sistemas eléctricos con gran cantidad de generadores sincrónicos y alta capacidad de transmisión tienden a ser sistemas robustos capaces de soportar diferentes fallas de manera estable**



SEP robustos versus débiles

○ SEP robustos

- ◆ Muchos GS convencionales
- ◆ Red enmallada con gran capacidad de transmisión

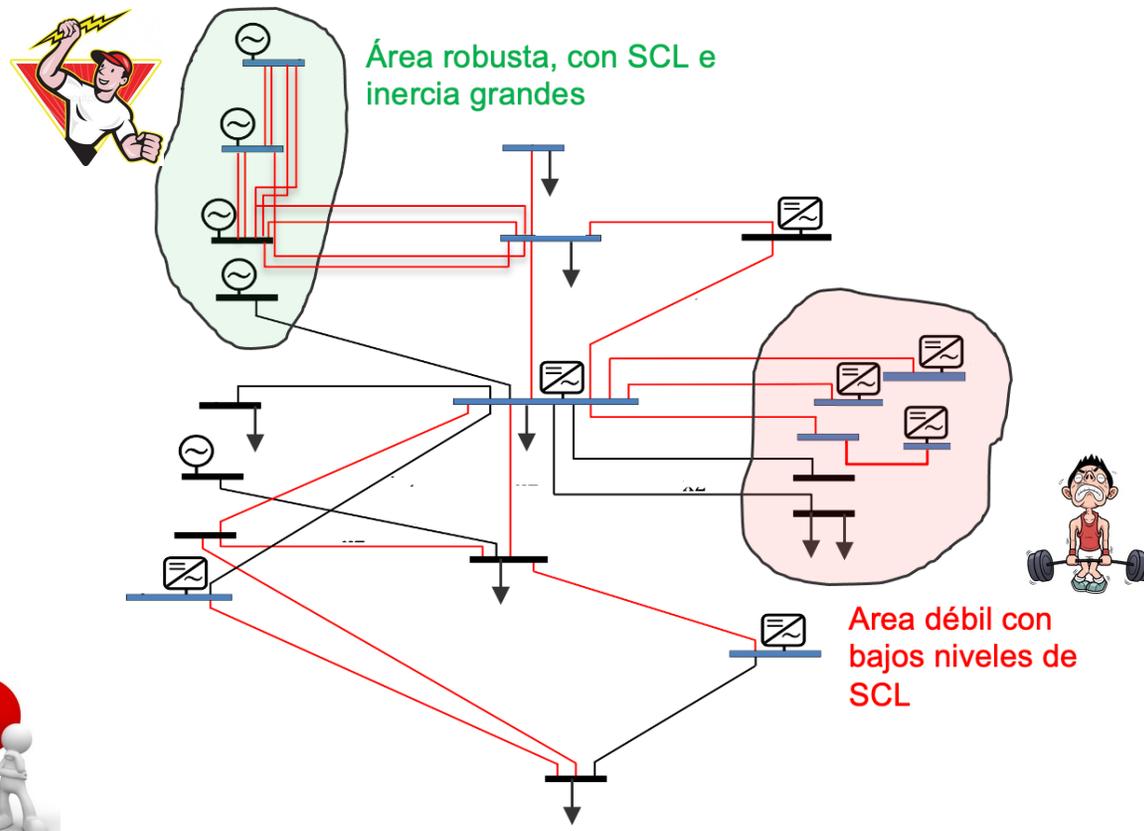
➔ Altos valores de SCL e inercia

○ SEP débiles

- ◆ Pocos GS
- ◆ Red poco enmallada
- ◆ Gran cantidad de ERNC-CC

➔ Bajos valores de SCL e inercia

○ ¿Por qué altos niveles de ERNC-CC implican sistemas débiles?



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

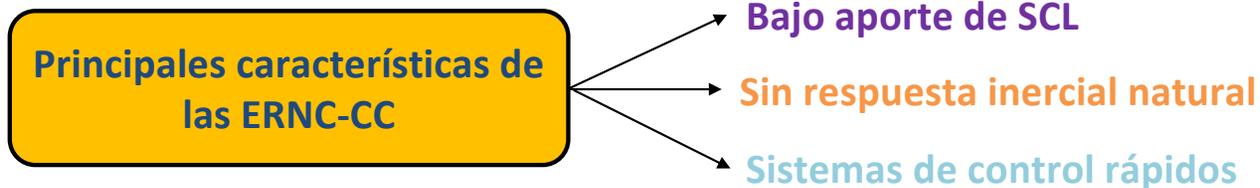
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Características clave de las ERNC-CC

- Las ERNC-CC presentan un comportamiento dinámico fundamentalmente diferente al comportamiento que tienen los generadores sincrónicos convencionales



➔ **Diferencias fundamentales entre ERNC-CC y los GS convencionales tienen un impacto directo en el comportamiento dinámico y estabilidad de los SEP**

Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

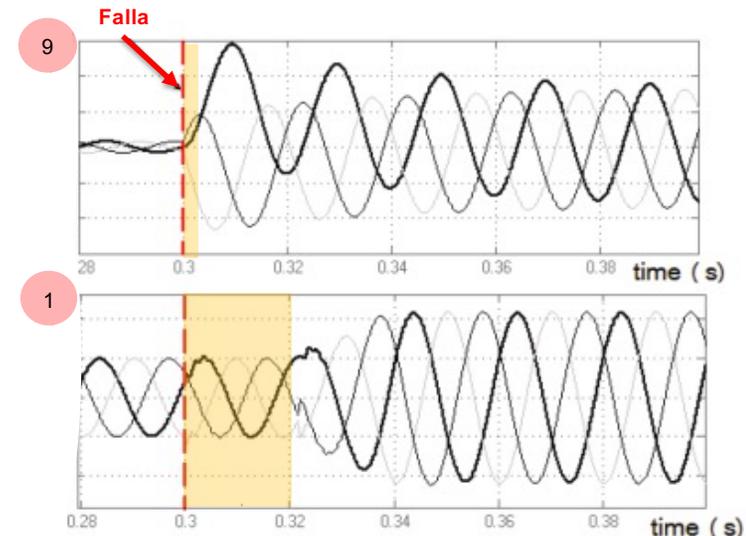
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Características de las ERNC-CC: Bajo aporte de corrientes de cortocircuito

- A diferencia de los GS, la **corrientes de cortocircuito** de las ERNC-CC usualmente se limita a valores entre 1.0 y 1.2 veces su corriente nominal debido a los límites térmicos de los convertidores
 - ◆ Estos valores son considerablemente menores a las **corrientes de falla** que una máquina sincrónica puede entregar
 - Incluso si las ERNC-CC aportan con **corrientes de cortocircuito** durante contingencias, la contribución que pueden hacer varía fuertemente dependiendo de:
 - ◆ La falla, su duración y la condición de operación pre-falla
 - ◆ La estrategia de control implementada en el conversor
- ➔ **Retardos, inestabilidades de control, operaciones erradas, entre otros**
- ◆ En el caso de los GS, la **corriente de falla** depende casi únicamente de las características eléctricas y físicas de la máquina



Características de las ERNC-CC: Sin respuesta inercial natural

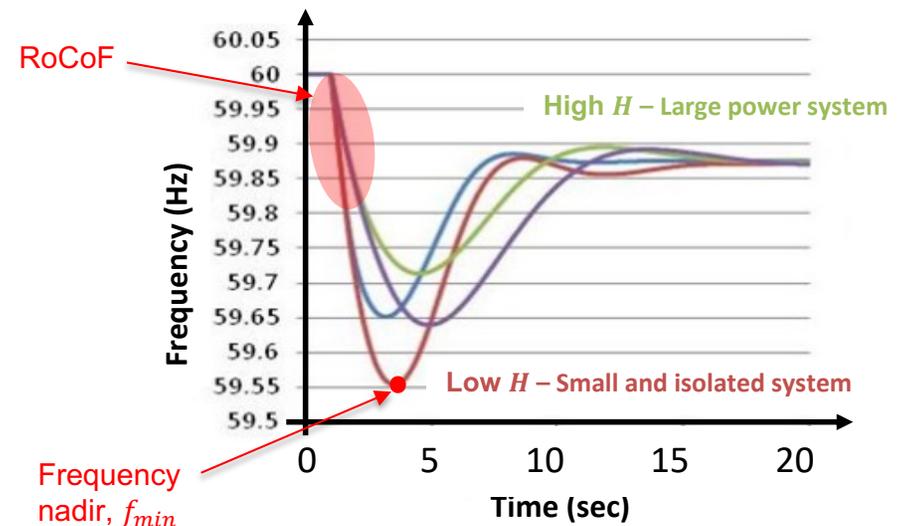
- Las ERNC-CC generalmente no contribuyen a la **respuesta inercial** de los SEP durante desbalances de potencia como lo hacen los GS convencionales
 - ◆ El conversor de las turbinas eólicas de velocidad variable desacopla parcial (o totalmente) al generador de la red
 - ◆ Los paneles fotovoltaicos no tienen partes giratorias

➔ **No aportan con inercia al sistema** ⚠

- Incluso si las ERNC-CC aportan con **respuesta inercial** virtual o respuesta rápida de frecuencia, la respuesta depende de un controlador

➔ Retardos, inestabilidades de control, operaciones erradas, entre otros ⚠

➔ **La respuesta rápida de frecuencia en ERNC-CC es distinta a la respuesta inercial natural de los GS**

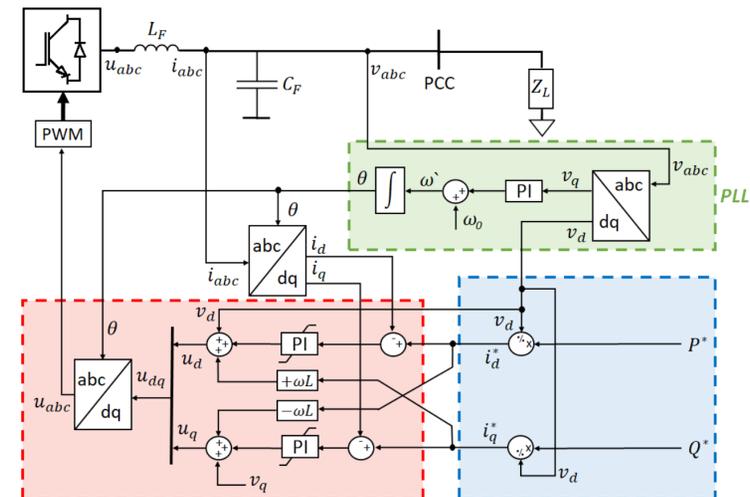


Características de las ERNC-CC: Sistemas de control rápidos (1)

- Una diferencia clave entre ERNC-CC y los GS convencionales es que la respuesta dinámica de las ERNC-CC, así como su interacción con la red durante contingencias, está dictada por las características de la **estrategia de control** elegida y en menor medida por las propiedades físicas del convertidor
 - ◆ **Esto contrasta con los GS**, en cuyo caso las propiedades físicas de la máquina, como su inercia y parámetros eléctricos son los que juegan el papel más importante en su comportamiento transitorio



- Esta dependencia del **sistema de control** impone desafíos importantes para la operación de los SEP con altos niveles de ERNC-CC
- ➔ **Desempeño dinámico del SEP puede variar mucho dependiendo de la estrategia de control elegida, los parámetros y el proveedor de los equipos**



Características de las ERNC-CC: Sistemas de control rápidos (2)

- La dinámica de las ERNC-CC y sus controles es significativamente **más rápida** que la dinámica electromecánica "lenta" de los SG y sus sistemas de control
 - ◆ Los rápidos tiempos de respuesta de los convertidores amplían el ancho de banda de los transitorios relevantes hacia la escala de tiempo electromagnética

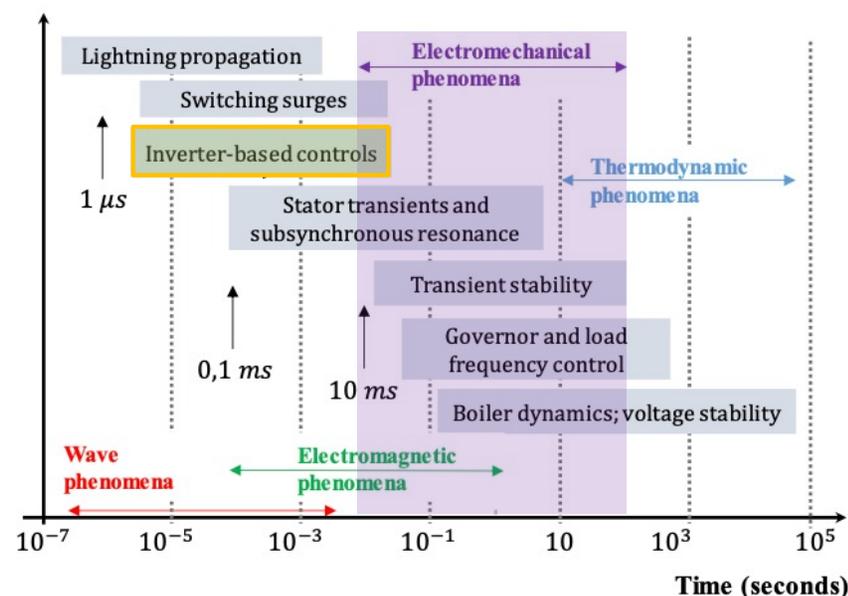


➔ A medida que aumentan los niveles de ERNC-CC, la respuesta dinámica de los SEP se vuelve más rápida

- **Dinámicas más rápidas** pueden conducir a situaciones en las que los esquemas de protección tradicionales se vuelvan demasiado lentos para evitar inestabilidades

- **SEP más rápidos** son mas complejos y difíciles de controlar que los sistemas convencionales con GS

➔ **SEP dominados por ERNC-CC son más rápidos, complejos y difíciles de controlar**



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

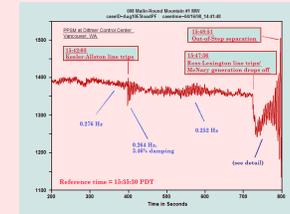
Conclusiones

Sistemas eléctricos con altos niveles de ERNC-CC

- El reemplazo de GS por ERNC-CC conduce a una reducción de los **niveles de SCL** del sistema en el área donde se reemplaza generación sincrónica y a una disminución de los niveles de **inercia** del sistema

→ Sistemas eléctricos con altos niveles de ERNC-CC tienden a ser **sistemas débiles** con bajos niveles de **SCL** e **inercia**

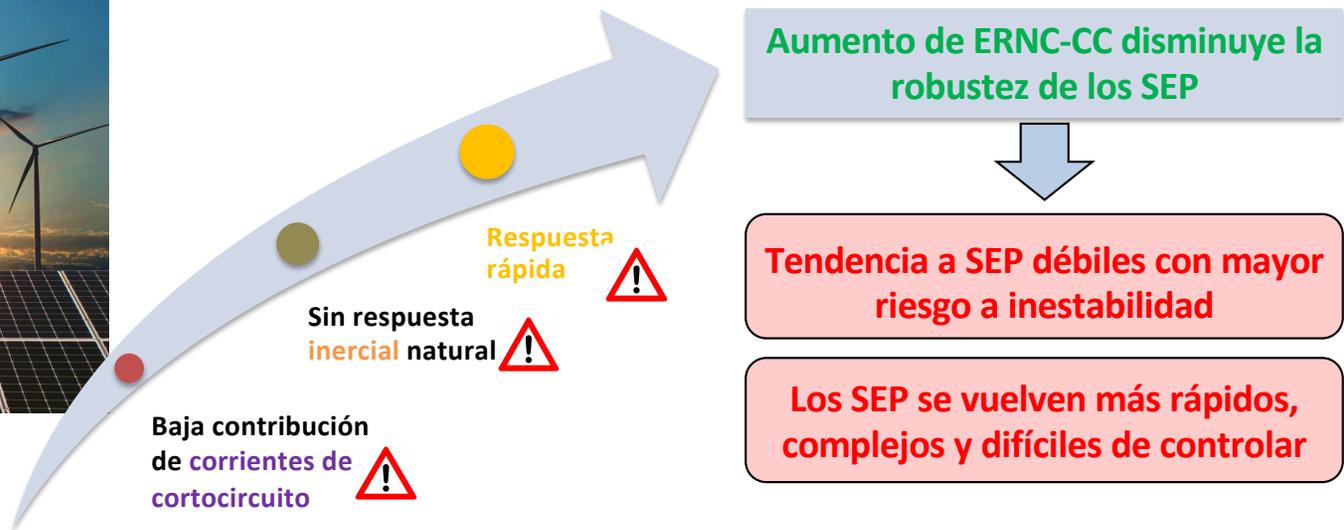
→ **Mayor riesgo de inestabilidad**



- A medida que las ERNC-CC reemplazan a GS convencionales la dinámica de los SEP se vuelve más rápida

→ Sistemas eléctricos con altos niveles de ERNC-CC tienden a ser **más rápidos, complejos y difíciles de controlar** que los SEP convencionales

Sistemas eléctricos con altos niveles de ERNC-CC

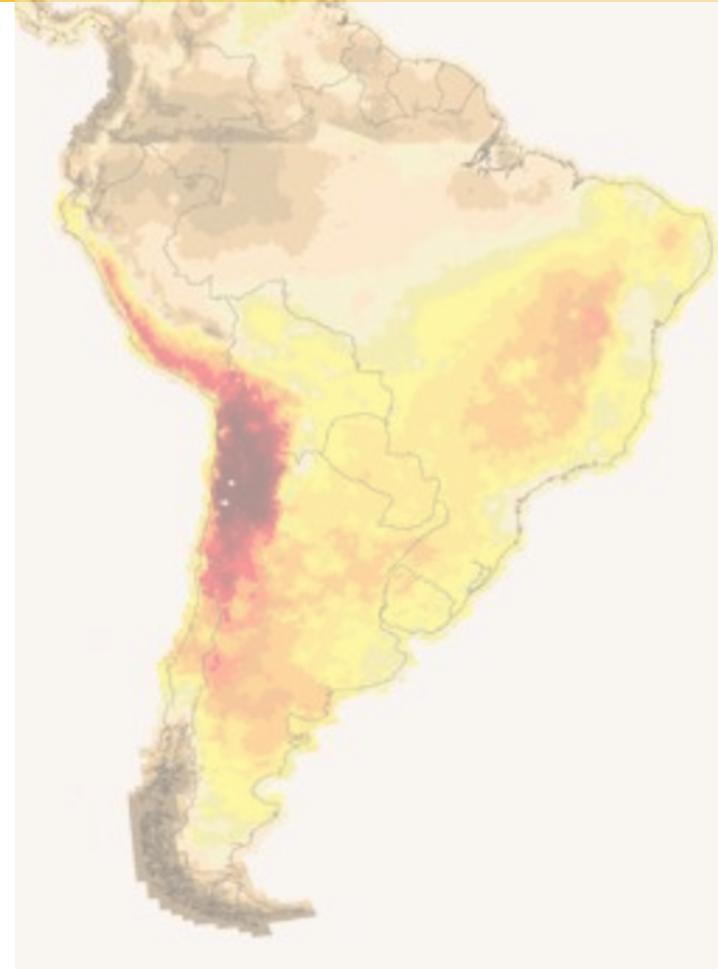


¿Cómo es la estabilidad de estos SEP?



Agenda

- Introducción
- Efectos de las ERNC-CC en los SEP
- **Tipos de convertidores**
- Estabilidad en SEP con ERNC-CC
- Desafíos en SEP con ERNC-CC
- Conclusiones



Introducción

- Los convertidores de potencia usados en las ERNC-CC son flexibles y modulares por lo que se pueden aplicar diferentes estrategias de control
- La estrategia de control implementada en el convertidor define su modo de operación
- ➔ **En las ERNC-CC pueden definirse diferentes modos de operación según la estrategia de control utilizada**
- En la actualidad, aún **no existe una clasificación** universalmente aceptada para clasificar los distintos modos de operación
- Sin embargo, existen dos modos de operación ampliamente usados: **grid-following** y **grid-forming**
- Otro modo de operación es el **grid-supporting**: se incorporan lazos de control *droop* para que el conversor participe en la regulación de voltaje y frecuencia del sistema
 - ◆ Se puede usar en convertidores operados como fuentes de corriente o como fuentes de tensión

Introducción

Efectos de ERNC-CC
en los SEP

Tipos de
convertidores

Estabilidad en SEP
con ERNC-CC

Desafíos en SEP con
ERNC-CC

Conclusiones

Esquema de control general de un convertidor

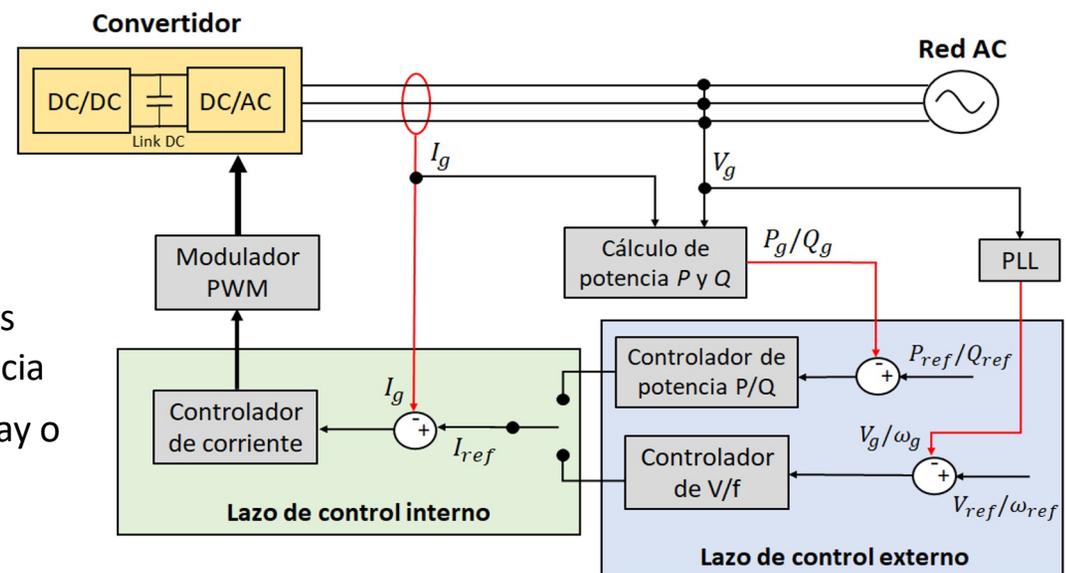
- El esquema de control típico de las variables de salida de un convertidor (en el modo de operación grid-following) es:

El PLL se usa en convertidores grid-following

1. Un lazo de control interno que se encarga de controlar la corriente inyectada por el conversor

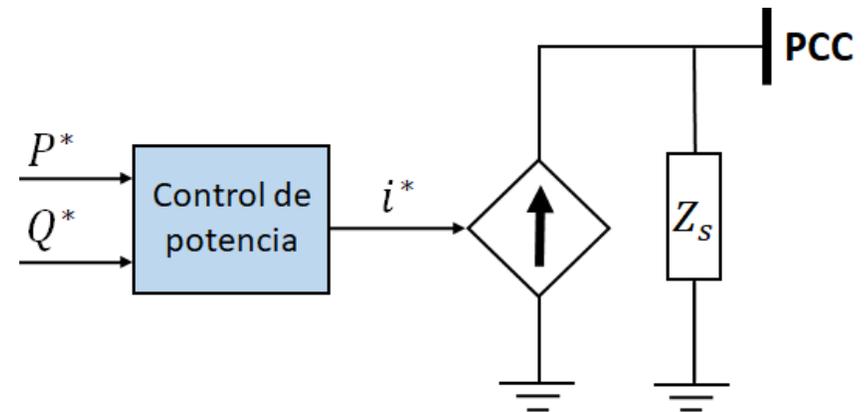
2. Un lazo de control externo que regula la potencia activa/reactiva inyectada, o bien regula el voltaje/frecuencia de salida del conversor, dependiendo del modo de operación del conversor

- ◆ La estructura del **lazo interno** es siempre la misma, independiente de si hay o no GS u otros convertidores que impongan tensión y frecuencia
- ◆ La estructura del **lazo externo** depende de si hay o no GS u otros convertidores que impongan tensión y frecuencia en el SEP



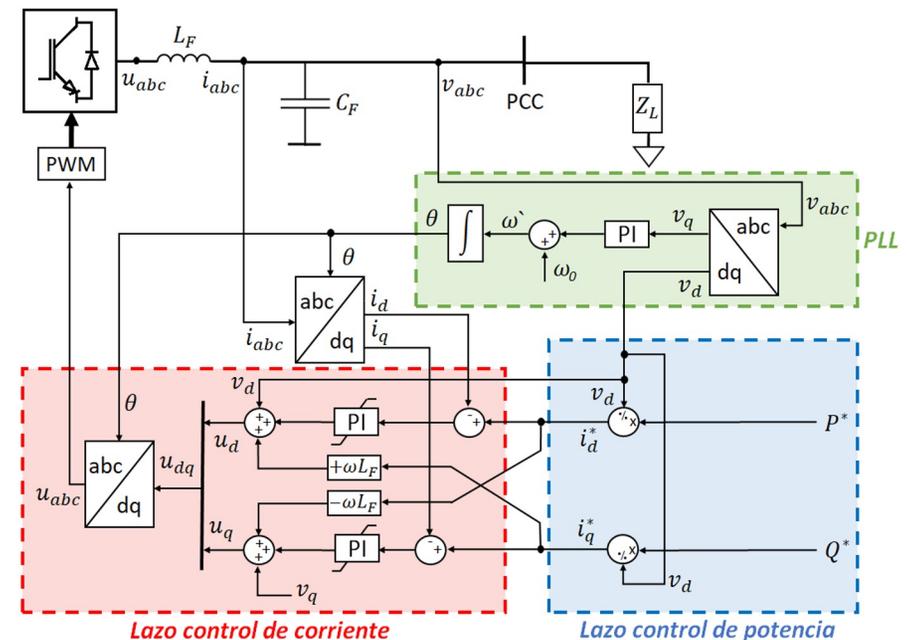
Convertidores grid-following (1)

- En este modo de operación, el conversor inyecta una cantidad fija de potencia activa y reactiva al sistema, **siguiendo** el voltaje y frecuencia que impone la red en el punto de conexión (PCC)
 - ◆ Es el modo de operación implementado en la mayoría de los conversores de centrales fotovoltaicas y eólicas que se encuentran operando en SEP reales
- Un **convertidor grid-following** se puede representar como una fuente de corriente controlada, que inyecta a la red una potencia activa P^* y una potencia reactiva Q^*
- **Convertidor grid-following** controlado en modo PQ
 - ◆ Dado que estas ERNC-CC generalmente no participan en la regulación de frecuencia del SEP, se suelen controlar para inyectar la máxima potencia activa disponible a la red (operación en el MPP)



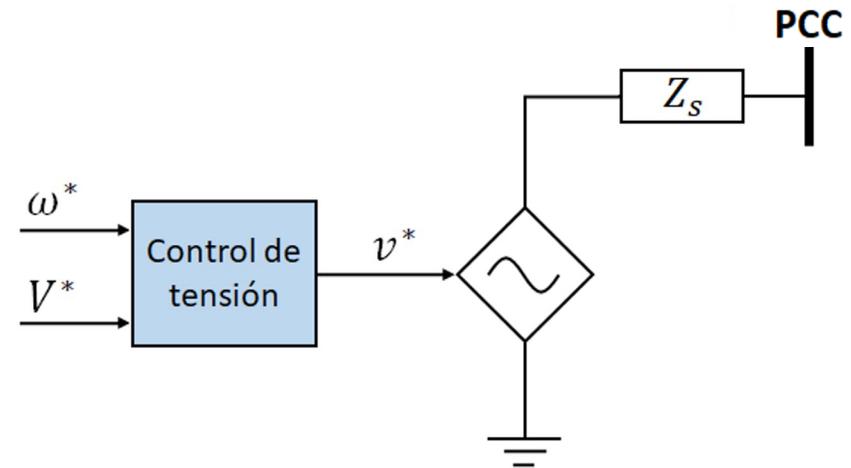
Convertidores grid-following (2)

- En este modo se mide la corriente de salida del convertidor (i_{abc}) y el voltaje en el PCC (v_{abc})
- El voltaje en el PCC entra a un **PLL**, cuya función es permitir la **sincronización del convertidor** con la red
 - ◆ Para ello, el **PLL** extrae el ángulo de fase de la tensión en el PCC (θ) integrando la frecuencia estimada de la red (ω')
- El **lazo externo** regula la potencia activa y reactiva inyectadas a la red, entregando los valores de referencia de la corriente de i_q^*, i_d^* al **lazo de control interno**
- Al **lazo interno** entran las señales de error de la corriente en ejes dq
 - ◆ A partir de esas señales se determina el vector u_{abc} que es la tensión en bornes que debe tener el convertidor para inyectar los valores de potencia deseados en el PCC



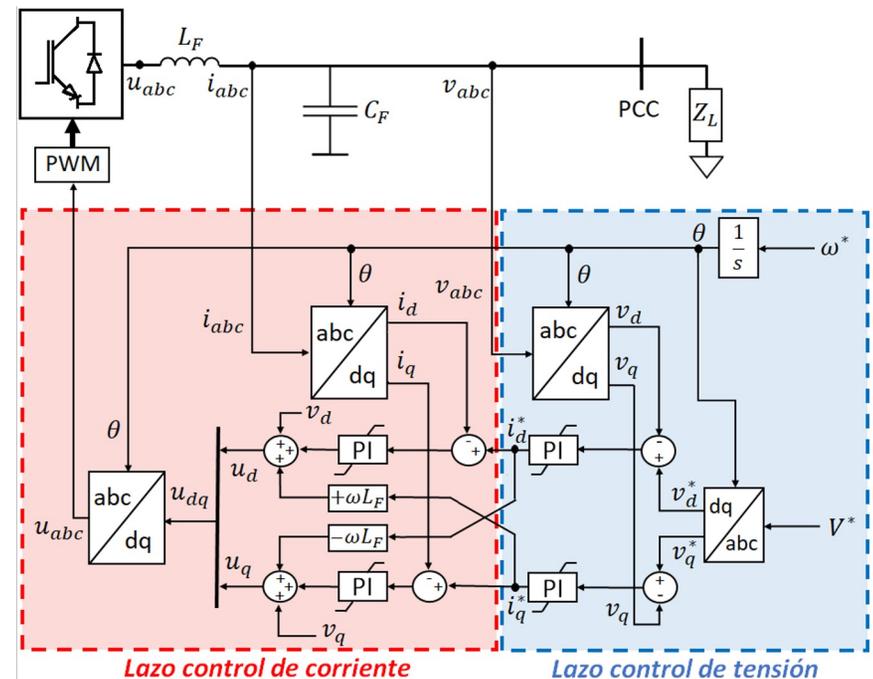
Convertidores grid-forming (1)

- En este modo de operación, el conversor es responsable de establecer y mantener el voltaje y la frecuencia en el punto de conexión
 - ◆ En el caso de un SEP sin máquinas sincrónicas, se requiere la presencia de **convertidores grid-forming** que impongan valores de tensión y frecuencia que puedan ser *seguidos* por otros convertidores conectados al sistema
- Un **convertidor grid-forming** se puede representar como una fuente de tensión alterna ideal con una impedancia de salida baja, que impone la magnitud (V^*) y la frecuencia (ω^*) de la tensión en el PCC



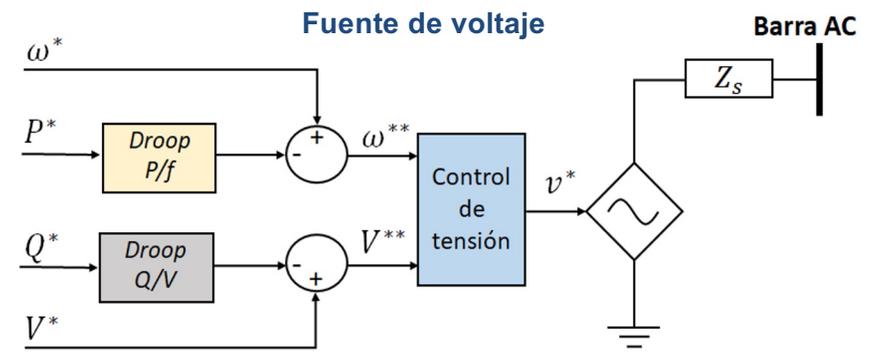
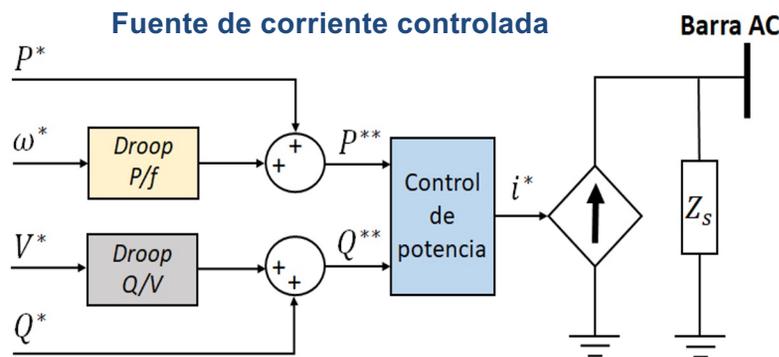
Convertidores grid-forming (2)

- En este modo de operación se mide la corriente de salida del convertidor (i_{abc}) y el voltaje en el punto de conexión o PCC (v_{abc})
- El **lazo externo** regula la magnitud y frecuencia de la tensión de salida
- El **lazo interno** regula la corriente inyectada por el convertidor, siguiendo las referencias entregadas por el **lazo externo** (i_q^*, i_d^*)
 - ◆ La salida u_{abc} del sistema de control es la tensión en bornes que debe tener el convertidor para mantener el voltaje v_{abc} en el PCC con la magnitud V^* y frecuencia ω^* deseadas
- Los términos de acoplamiento $\pm\omega L_F$ se incluyen para considerar el efecto del filtro de salida del convertidor



Convertidores grid-supporting

- Los convertidores grid-supporting participan en la regulación de voltaje y frecuencia de la red, usando lazos droop que controlan la potencia activa y reactiva entregadas al sistema
- Los convertidores grid-supporting se pueden operar como fuentes de corriente controladas o como fuentes de voltaje
 - ◆ En caso de operarse como fuentes de corriente, necesitan que hayan conversores o máquinas sincrónicas que impongan la frecuencia y voltaje en el sistema
 - ◆ En caso de operarse como fuentes de tensión, puede establecer la frecuencia y voltaje en el sistema, por lo que no requiere de otras unidades grid-forming para operar



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

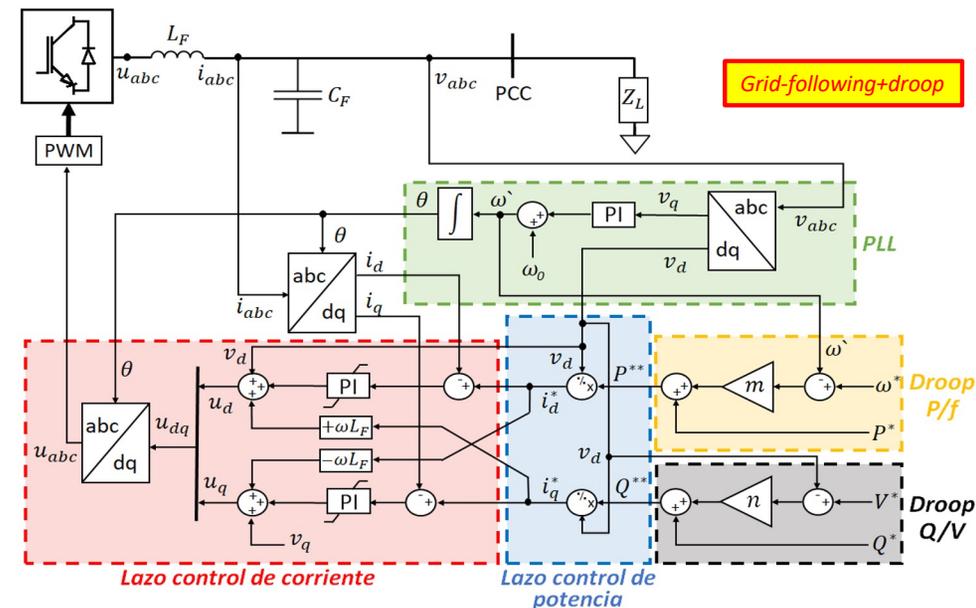
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

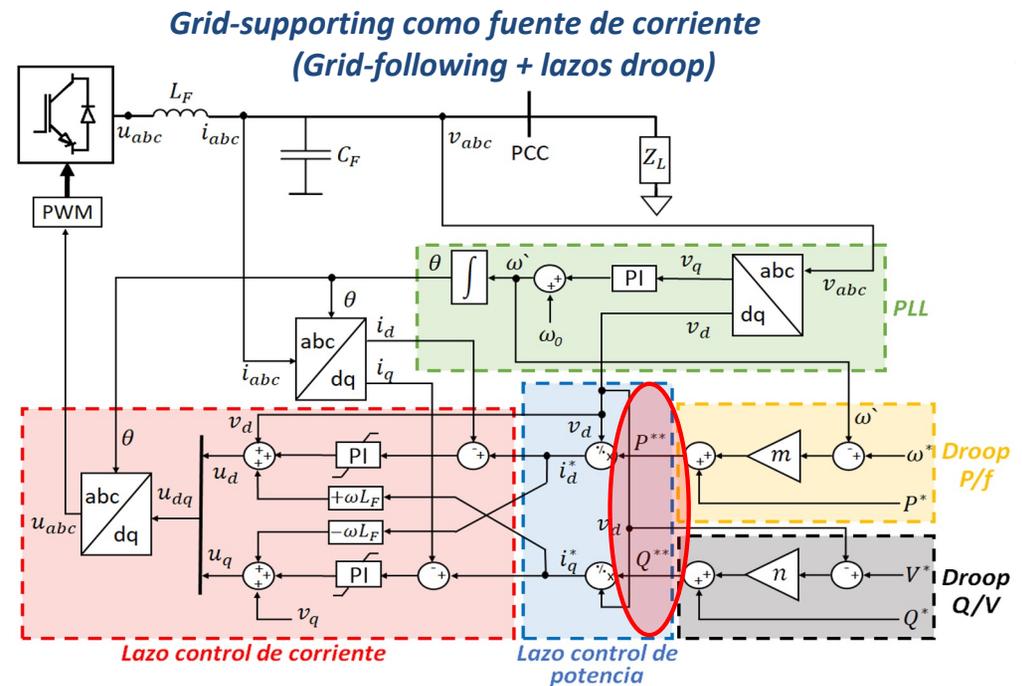
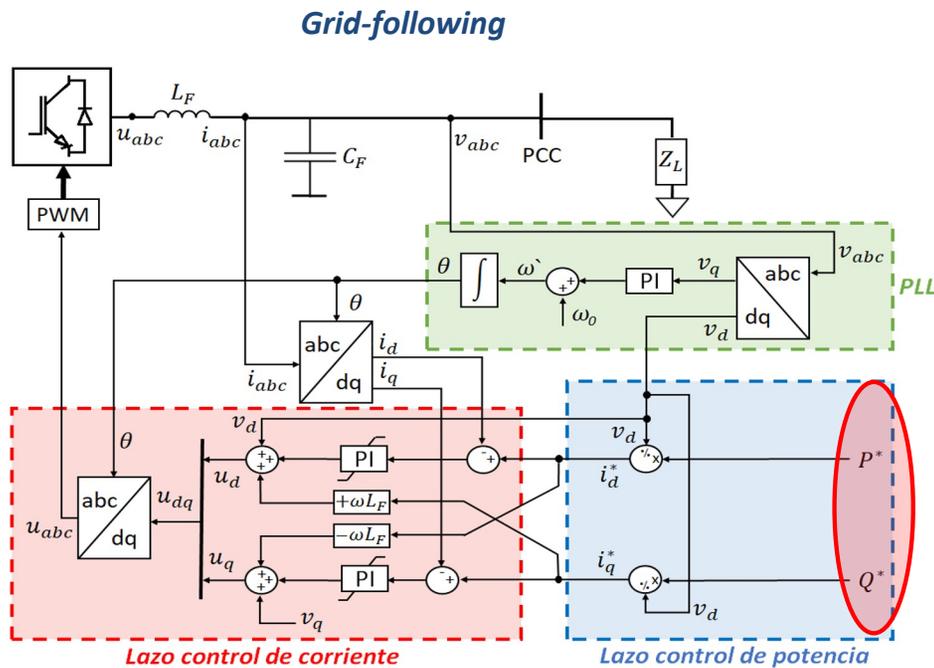
Convertidores grid-supporting operados como fuente de corriente

- Este esquema es similar al visto para convertidores grid-following, salvo que ahora se incluyen dos lazos de control droop adicionales: uno para la frecuencia y otro para el voltaje
- El **droop P/f** entrega una nueva referencia para la potencia activa a inyectar (P^{**}), en caso de que la frecuencia estimada por el PLL (ω') sea diferente a la frecuencia de referencia (ω^*) del convertidor
 - ◆ El principio de funcionamiento es análogo al de los reguladores de velocidad de los GS
 - ◆ La central ERNC-CC participa en la regulación de frecuencia del SEP usando un coeficiente droop m
- El **droop Q/V** entrega una nueva referencia para la potencia reactiva a inyectar (Q^{**}), en caso de que el voltaje medido en el PCC sea distinto al voltaje de referencia (V^*)
 - ◆ La central ERNC-CC participa en la regulación de tensión del SEP usando un coeficiente droop n



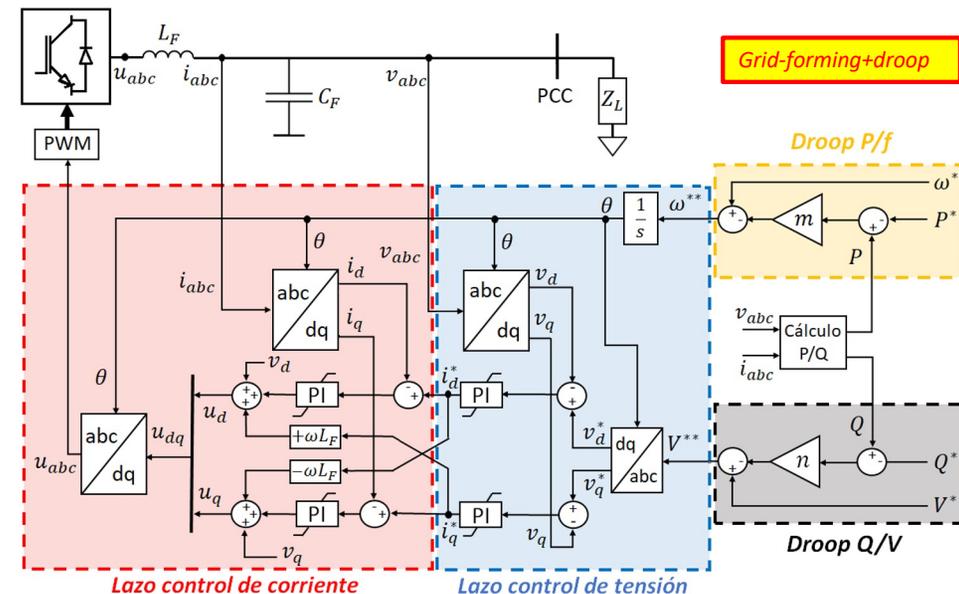
Comparación entre grid-following y grid-supporting como fuente de corriente

- El esquema de control del grid-supporting como fuente de corriente es similar al del grid-following, salvo que el grid-supporting incluye **dos lazos droop**: uno para la frecuencia y otro para el voltaje



Convertidores grid-supporting operados como fuente de tensión

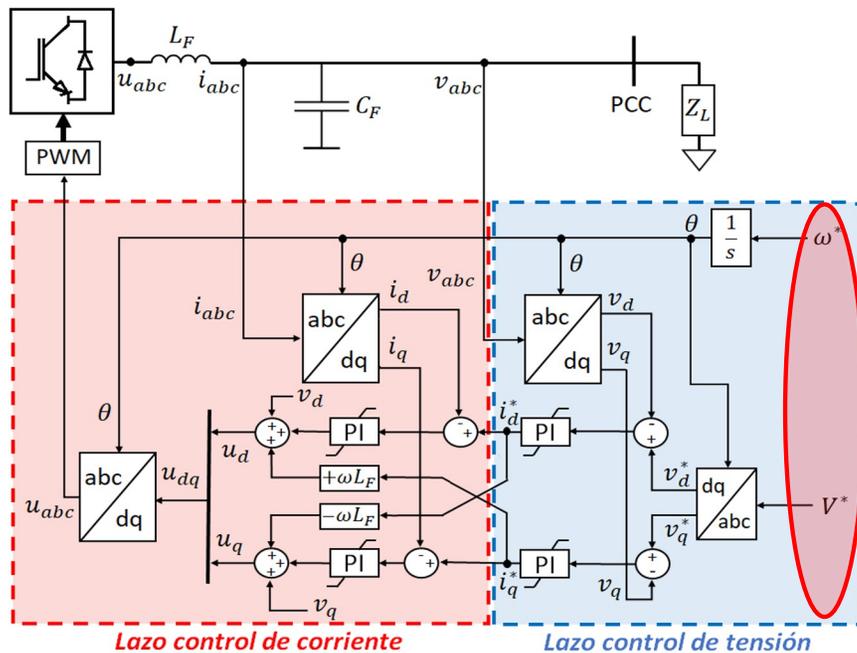
- Este esquema es similar al visto para convertidores grid-forming, salvo que ahora se incluyen dos lazos de control droop adicionales
- El **droop P/f** modifica el valor de la frecuencia de salida del convertidor respecto a su valor nominal (ω^*) cuando surge un desbalance de potencia en el SEP
 - ◆ Esto permite que los convertidores se repartan la carga de acuerdo a las pendientes de sus curvas droop
 - ◆ El lazo se suele llamar **droop inverso**, pues la frecuencia se obtiene a partir de un desbalance entre la potencia activa de referencia y la inyectada por la unidad
- El **droop Q/V** modifica la referencia V^* de la magnitud del voltaje a partir de un desbalance de potencia reactiva



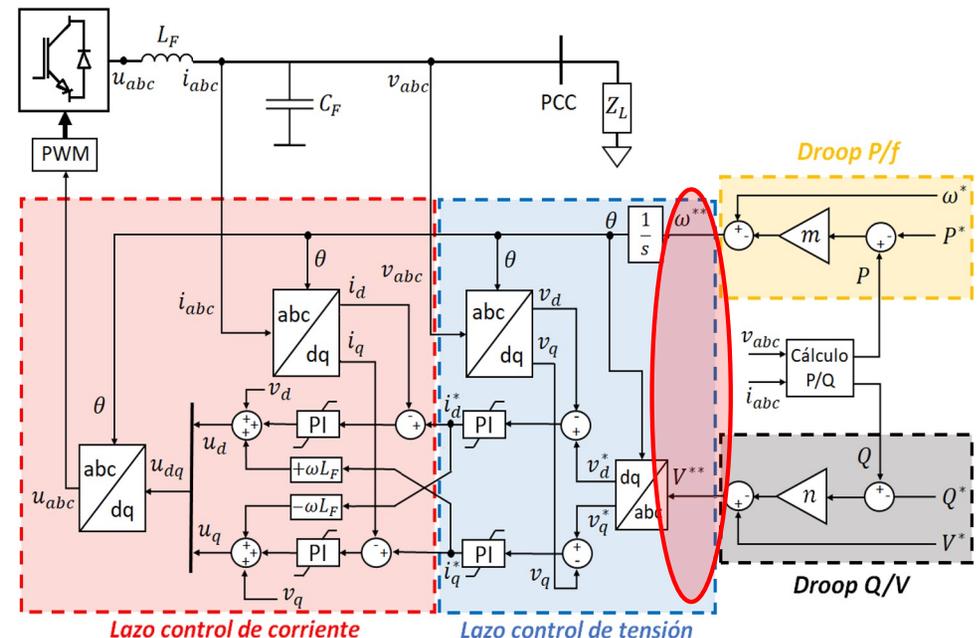
Comparación entre grid-forming y grid-supporting como fuente de voltaje

- El esquema de control del grid-supporting como fuente de voltaje es similar al grid-forming, salvo que el grid-supporting incluye dos lazos droop: uno para la frecuencia y otro para el voltaje

Grid-forming

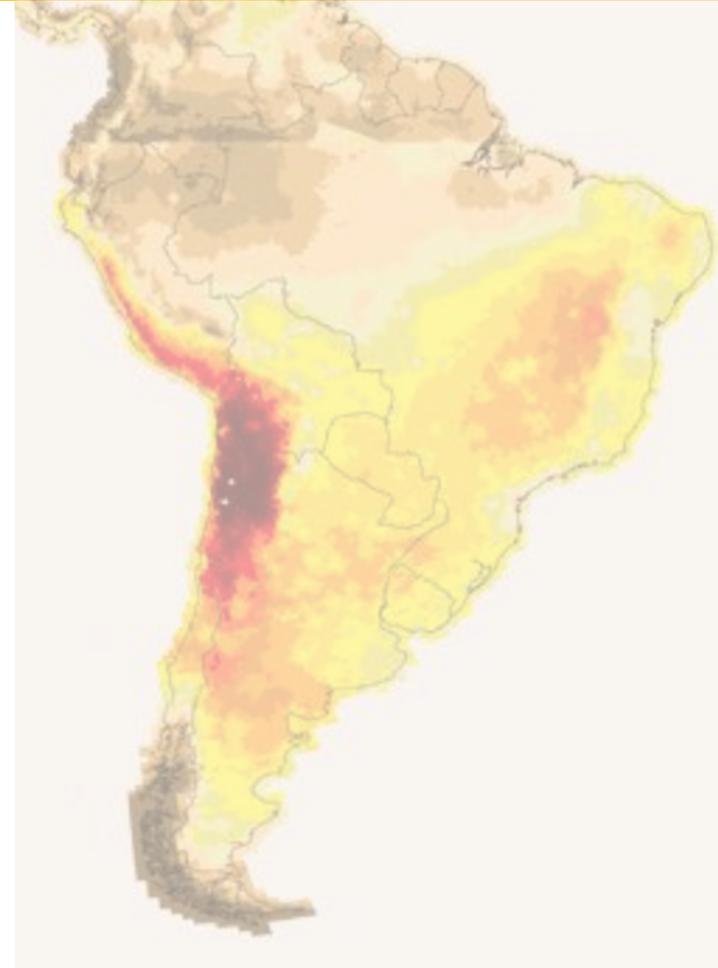


Grid-supporting como fuente de tensión



Agenda

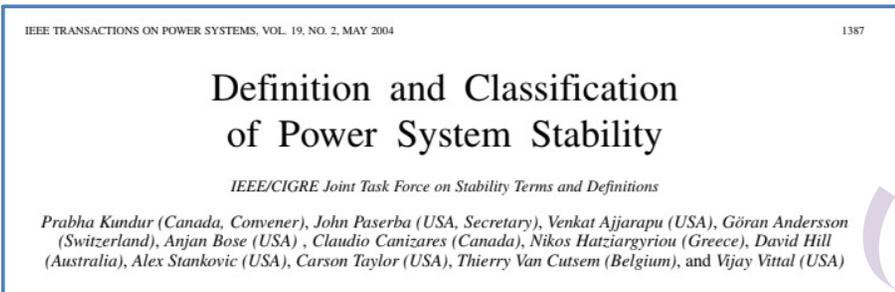
- Introducción
- Efectos de las ERNC-CC en los SEP
- Tipos de convertidores
- **Estabilidad en SEP con ERNC-CC**
- Desafíos en SEP con ERNC-CC
- Conclusiones



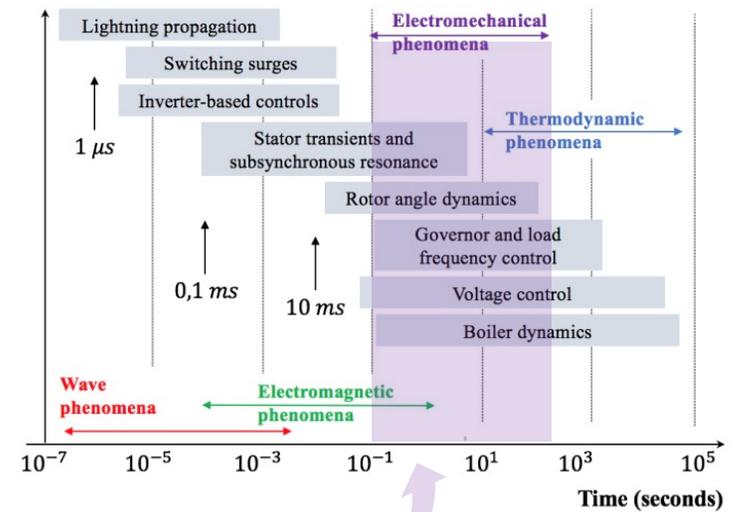
Estabilidad en SEP – Task Force 2004

- El 2004, un Task Force de la IEEE y CIGRE abordaron la definición y clasificación de estabilidad en sistemas de potencia
 - ◆ En ese tiempo, el comportamiento dinámico de los SEP estaba determinado principalmente por el desempeño dinámico de los GS y sus controles

➔ La clasificación se enfoca en **fenómenos electromecánicos lentos**, típicos de SEP dominados por máquinas síncronas. Los **transitorios rápidos** de la red y otros dispositivos de respuesta rápida se desprecian



Task Force 2004

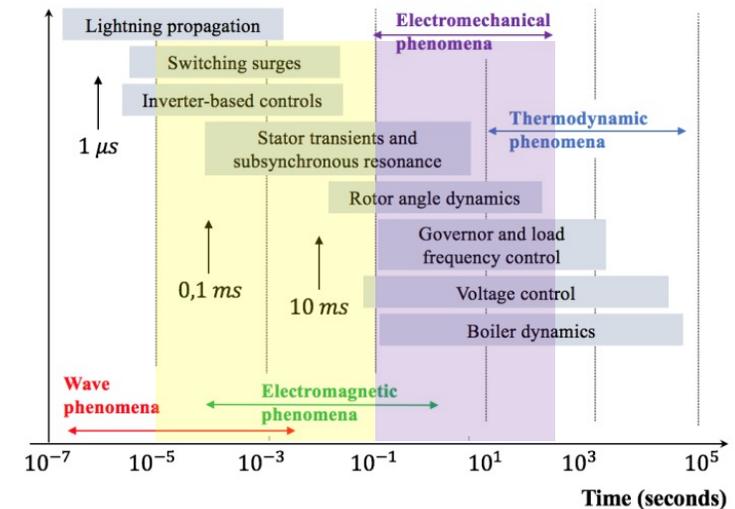
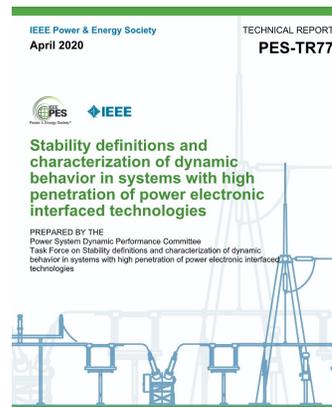


Estabilidad en SEP con ERNC-CC – Task Force 2020

- La ventana de tiempo asociadas a los controladores de las ERNC-CC es muy rápida
 - ◆ De pocos microsegundos hasta varios milisegundos, abarcando así **fenómenos electromagnéticos rápidos**
- A medida que aumentan las ERNC-CC, la respuesta dinámica del sistema comienza a depender más de dispositivos de respuesta rápida
- Los **transitorios rápidos** comienzan a desempeñar un rol clave en el comportamiento dinámico del sistema

➔ La respuesta del sistema se vuelve más rápida

- El 2016 la IEEE crea un nuevo Task Force para redefinir y clasificar la estabilidad en SEP con altos niveles de ERNC-CC



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

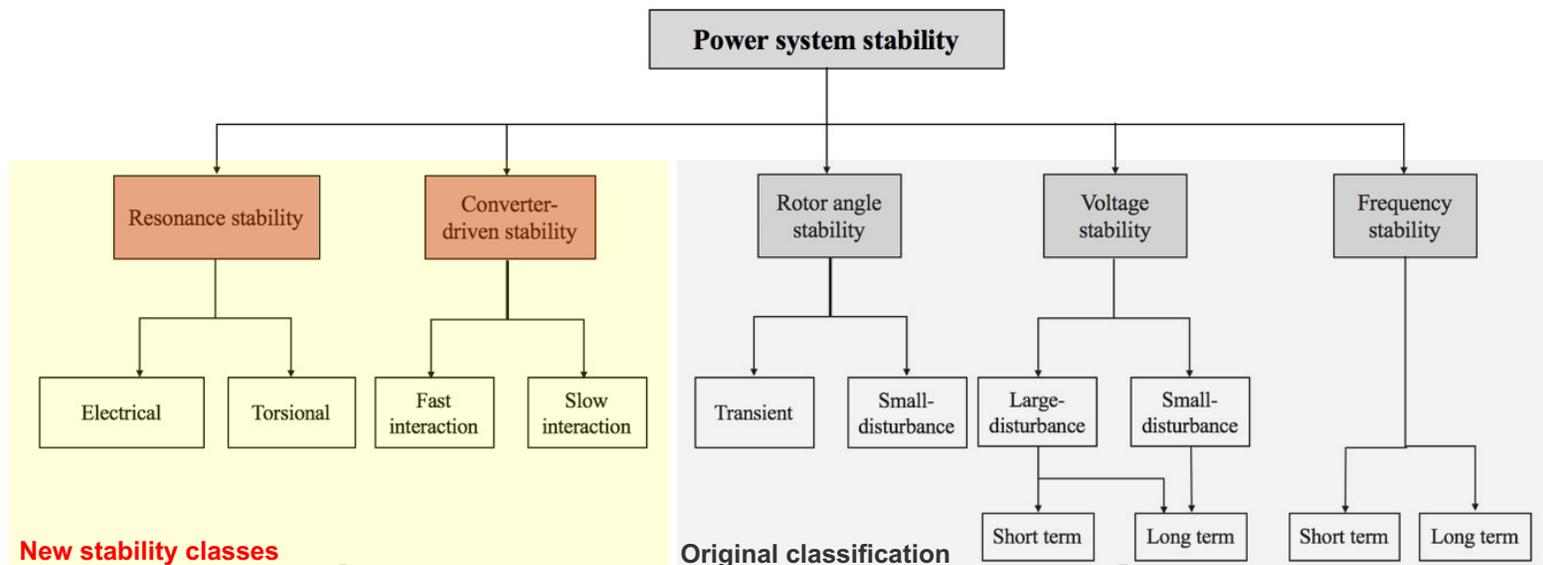
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Nueva clasificación de estabilidad en SEP con ERNC-CC

- La figura muestra la nueva clasificación propuesta por el Task Force del 2016
- Con respecto a la clasificación original, se agregan **dos nuevas clases de estabilidad** por el uso de ERNC-CC
 - ◆ Nuevos tipos de estabilidad asociadas a fenómenos rápidos



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

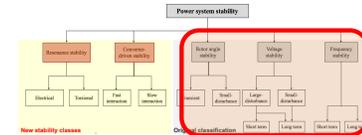
Estabilidad “clásica” en SEP con ERNC-CC

- Las definiciones de estabilidad no cambian con respecto al reporte del 2004

- ◆ Sin embargo, las ERNC-CC afectan de manera importante la estabilidad

- Disminución de los SCL en SEP aumenta la sensibilidad de la tensión en las barras → **SEP débiles**

- ◆ Durante contingencias, los SEP débiles pueden experimentar voltajes extremadamente bajos en amplias zonas de la red dificultando la recuperación del SEP después del despeje de la falla
- ◆ Caídas de voltaje severas pueden acelerar considerablemente a los GS cercanos



→ **SEP débiles son más propensos a inestabilidades de tensión y pérdida de sincronismo de GS**

- Bajos niveles de **inercia** aumentan la frecuencia mínima después de desbalances de carga y llevan a tasas de cambio de la frecuencia más pronunciadas

- La dinámica de la frecuencia del SEP se vuelve más rápida
- Activación más frecuente de EDAC/EDAG

→ **SEP débiles de baja inercia son más propensos a pérdida de carga e inestabilidad de frecuencia**

Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Nuevos tipos de estabilidad en SEP (1)

○ Estabilidad de resonancia

- ◆ En general, el fenómeno de resonancia surge cuando se produce periódicamente un intercambio de energía de forma oscilatoria

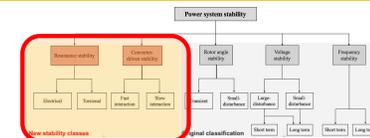
- La estabilidad de resonancia abarca lo que se conoce como **resonancia subsincrónica (SSR)**, ya sea asociada con una resonancia electromecánica o una resonancia puramente eléctrica

- La **resonancia subsincrónica** se puede manifestar de 2 maneras:

- ◆ Debido a una resonancia entre una **compensación en serie** y los **modos oscilatorios mecánicos torsionales** en el eje de una turbina-generador
- ◆ Debido a una resonancia entre una **compensación en serie** y las **características eléctricas de un generador**

→ La **estabilidad de resonancia** se subdivide en 2 ramas en el diagrama de clasificación

- ◆ Estabilidad de resonancia torsional
- ◆ Estabilidad de resonancia eléctrica (también conocida como *Induction Generator Effect – IGE*)



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

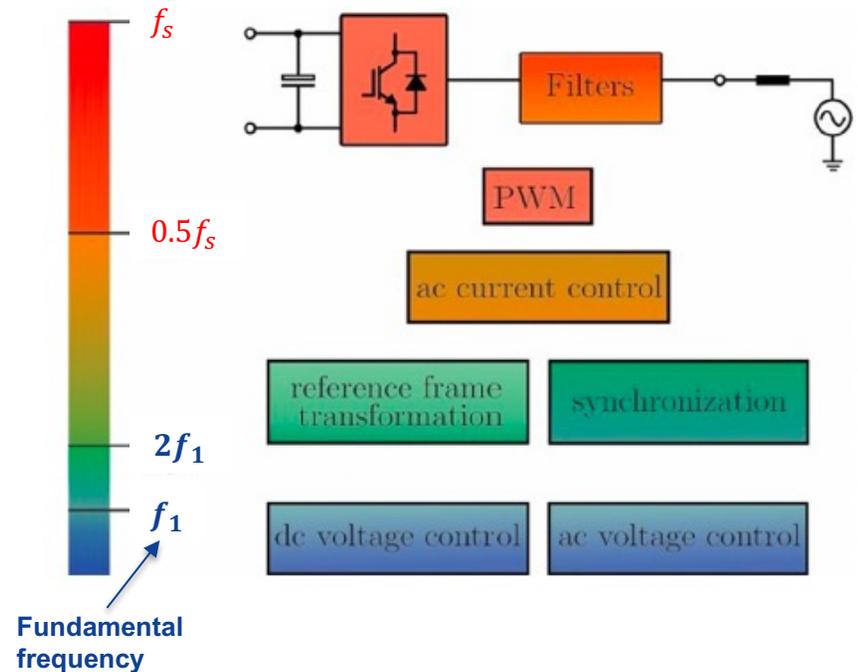
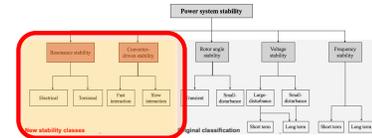
Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

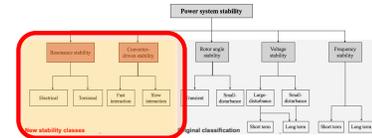
Nuevos tipos de estabilidad en SEP (2)

- Estabilidad debida a convertidores
- El sistema de control de las ERNC-CC incluye varios lazos de control con diferentes tiempos de respuesta
 - ◆ Control interno de corriente
 - ◆ Control externo
 - ◆ PLL*
- La figura muestra las capas de control de las ERNC-CC y el rango de la frecuencia de operación asociado
- ➔ **La escala de tiempo asociada a los sistemas de control de las ERNC-CC es amplia**

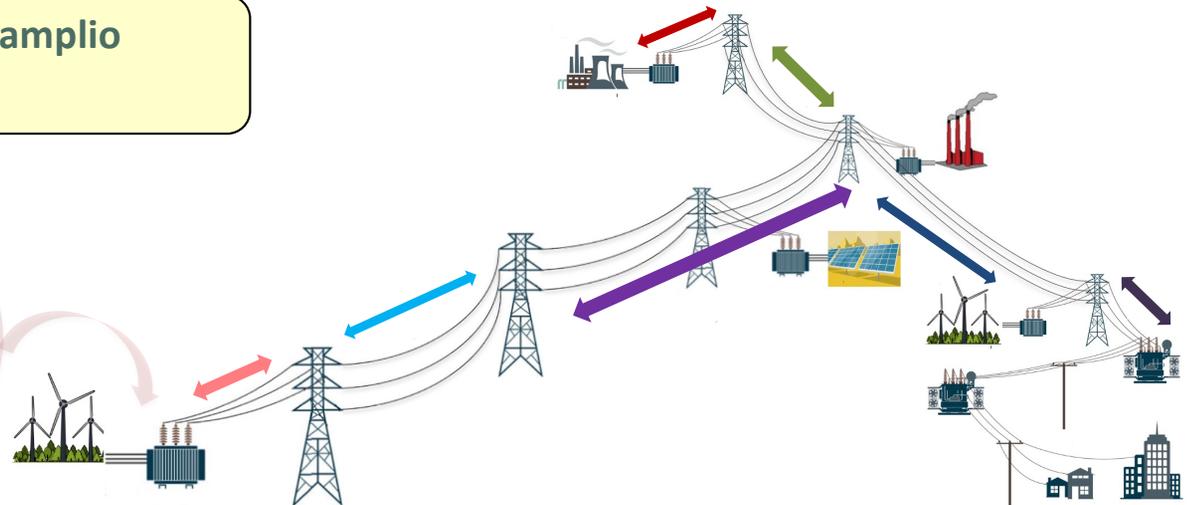
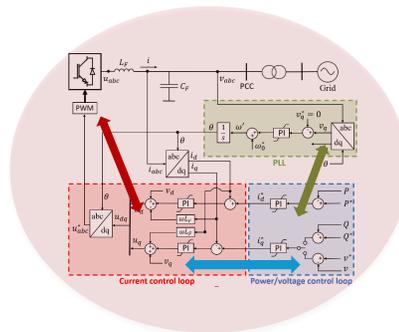


Nuevos tipos de estabilidad en SEP (3)

- Estabilidad debida a convertidores
- Amplia escala de tiempo asociada al control de las ERNC-CC puede llevar a acoplamientos cruzados e interacciones con varios componentes del SEP
 - ◆ Dinámicas electromecánicas de los GS
 - ◆ Transitorios electromagnéticos de la red



➔ Posibles oscilaciones **inestables** en un amplio rango de frecuencias



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

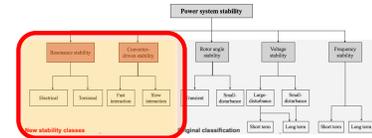
Conclusiones

Nuevos tipos de estabilidad en SEP (4)

○ Estabilidad debida a convertidores

○ Debido al amplio rango de frecuencias de los fenómenos observados, la estabilidad debida a convertidores se subdivide en 2 ramas:

- ◆ **Interacciones rápidas:** fenómenos con frecuencias altas, por lo general, decenas a cientos de Hz, e incluso kHz
 - Implican problemas de estabilidad de todo el sistema impulsadas por interacciones dinámicas rápidas de los **sistemas de control de dispositivos en base a electrónica de potencia**, como FACTS, ERNC-CC, HVDC con otros **componentes de respuesta rápida** como la red de transmisión, la dinámica del estator de los GS u otros dispositivos basados en electrónica de potencia
 - Interacciones del lazo interno de corriente con componentes pasivas del SEP, interacciones entre varias ERNC-CC eléctricamente cercanas, o entre convertidores y la red
- ◆ **Interacciones lentas:** fenómenos con frecuencias relativamente bajas, típicamente menos de 10 Hz
 - Involucran inestabilidades en todo el sistema debido a interacciones dinámicas lentas de los **sistemas de control de dispositivos en base a electrónica de potencia** con **componentes de respuesta lenta** como SG y controladores
 - Lazos externos y PLL pueden llevar a oscilaciones inestables de baja frecuencia



Clave: Robustez en el PCC y control de la ERNC-CC



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

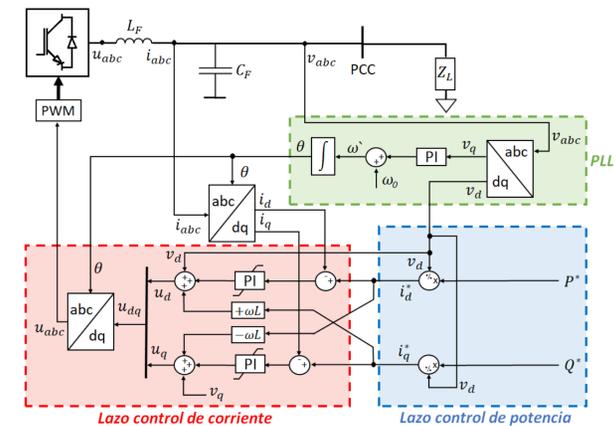
Estabilidad debida a convertidores – Interacciones lentas

- Los convertidores **grid-following** de las centrales ERNC-CC incluyen lazos de control y algoritmos con tiempos de respuesta rápidos como el PLL y los lazos de control internos de corriente
 - ◆ La experiencia ha mostrado que **estos lazos de control generalmente son los que llevan a inestabilidad en las centrales ERNC-CC operando en modo grid-following**



➔ Posibles inestabilidades

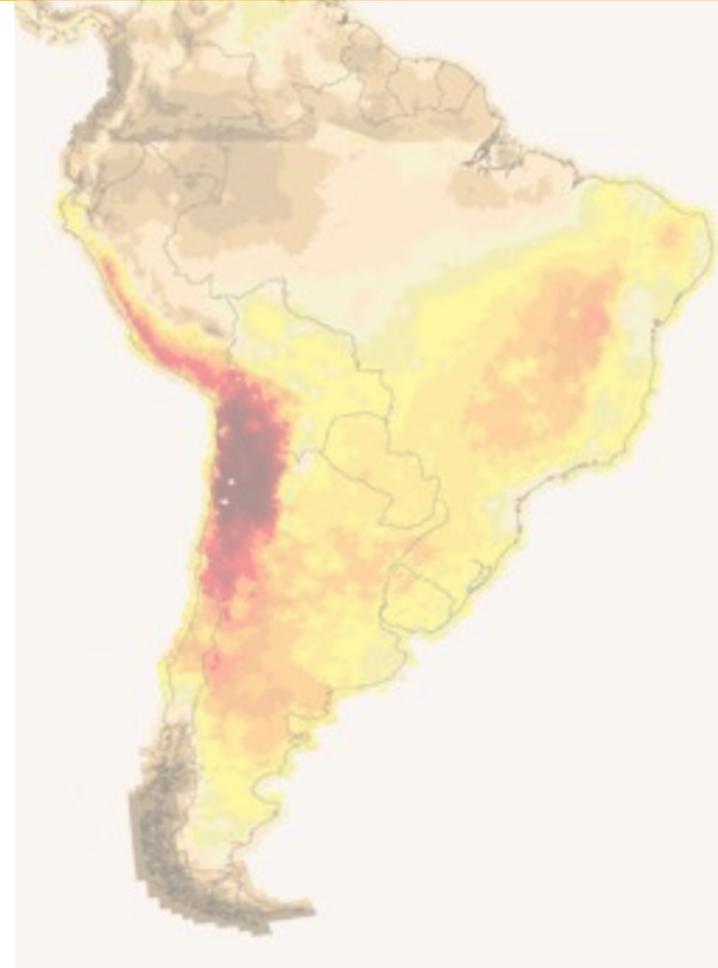
- El buen desempeño dinámico de **ERNC-CC en grid-following** depende de la existencia de un voltaje de referencia “estable” en bornes
 - ◆ A medida que el **SCL** en el punto de conexión disminuye (**sistema débil**), la referencia de voltaje se vuelve menos “estable” pues las sensibilidades de la tensión aumentan
- ➔ Su valor se ve más afectado frente a cambios en los flujos de potencia



➔ Al conectarse a **redes débiles**, las ERNC-CC operando en modo **grid-following** tienen un mayor riesgo de inestabilidad del PLL, del lazo interno de corriente

Agenda

- Introducción
- Efectos de las ERNC-CC en los SEP
- Tipos de convertidores
- Estabilidad en SEP con ERNC-CC
- **Desafíos en SEP con ERNC-CC**
- Conclusiones



Rol de los GS en los SEP

- Durante la operación normal, el **control de frecuencia y voltaje** de los SEP ha recaído principalmente en los GS convencionales
 - ◆ Una máquina síncrona regula el voltaje en bornes y responde a cambios en la frecuencia del sistema cambiando su potencia de salida
- Adicionalmente, en los SEP convencionales, la **robustez frente a contingencias** se asegura en gran medida teniendo gran cantidad de GS distribuidos por toda la red
 - ◆ Estas máquinas rotativas proporcionan naturalmente altas corrientes de falla durante contingencias, apoyando fuertemente la estabilidad del sistema y su recuperación después de las falla
 - ◆ Después de un apagón, tienen la capacidad de partida en negro

→ Los GS son fuentes **grid-forming** que aportan con funciones clave para garantizar el correcto funcionamiento en operación normal y un buen desempeño dinámico durante contingencias (estabilidad)



Introducción

Efectos de ERNC-CC
en los SEP

Tipos de
convertidores

Estabilidad en SEP
con ERNC-CC

Desafíos en SEP con
ERNC-CC

Conclusiones

De convertidores grid-following a grid-forming (1)

- Hoy en día, casi todas las centrales **ERNC-CC** conectadas a la red se controlan en lo que se conoce como **modo grid-following**
 - ◆ Sin embargo, para su correcto funcionamiento necesitan una **tensión en bornes bien definida** 
- Las centrales **ERNC-CC en modo grid-following** requieren que otros generadores participen en el proceso de formación de frecuencia y voltaje de la red

➔ **A medida que aumenta la penetración de ERNC-CC en modo grid-following, al menos algunas de estas unidades deberán operar en modo grid-forming**

- Convertidores en **modo grid-forming**:
 - ◆ Pueden regular el voltaje en bornes
 - ◆ No requieren un PLL
 - ◆ Pueden coexistir con otros convertidores grid-following y grid-forming , así como con GS en el mismo sistema de potencia

Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

De convertidores grid-following a grid-forming (2)

○ Sin embargo, existen otros motivos que justifican la necesidad de ERNC-CC en **modo grid-forming**:

- ◆ Proporcionar capacidades de arranque en negro
- ◆ Apoyar la estabilidad del sistema durante y después de una falla
- ◆ Entre otros

○ Si bien las centrales ERNC-CC en modo grid-following modernas pueden tener:

- ◆ Capacidad de apoyo a la estabilidad y restauración del sistema durante y después de una falla
- ◆ Regulación de voltaje y frecuencia

○ **Aún así, necesitan un voltaje en bornes bien definido para funcionar correctamente**



Grid-Following Control	Grid-Forming Control
Assumes grid already formed in normal operation	Assumes it has responsibility to form and maintain healthy grid
Control of current injected into the grid	Control of voltage magnitude and f /phase
Decoupled control of P and Q	Slight coupling between P and Q
Needs PLL	PLL not necessary
Without black-start capability	With black-start capability
Cannot operate at 100% IBR	Can theoretically operate at 100% IBR

De convertidores grid-following a grid-forming (3)

- El desempeño dinámico de centrales ERNC-CC en **modo grid-following** depende significativamente de un voltaje de referencia “estable” para su correcto funcionamiento
 - ◆ A medida que el SCL en el punto de conexión disminuye (sistema débil), la referencia de voltaje se vuelve menos “estable”
- ➔ Especialmente en caso de conexión en redes débiles, las centrales **ERNC-CC modo grid-following tienen un mayor riesgo de inestabilidad** de los lazos de control como el PLL, el lazo de interno de corriente, y el lazo de control de voltaje
- El reemplazo de GS por ERNC-CC conduce a una reducción de los **niveles de SCL** del sistema, llevando a SEP inherentemente débiles
- ➔ A medida que el nivel de ERNC-CC, las centrales ERNC-CC en modo grid-following tendrán mayor riesgo de **inestabilidad**



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Distribución de inercia

○ Distribución espacial de la inercia:

- ◆ Varios estudios han mostrado que la distribución espacial de la inercia influye en la dinámica de la frecuencia post falla y no solo en la inercia total de los sistemas eléctricos
- ➔ **Para una contingencia, la estabilidad de frecuencia no solo dependerá de la inercia total sino también de su distribución espacial en la red; que esencialmente depende del despacho de los generadores**
- ◆ Asumiendo que las centrales hidroeléctricas siempre usarán GS, los sistemas futuros con baja inercia deberán mostrar una distribución desigual de inercia en base a la ubicación de los recursos hídricos existentes
 - Este podría ser el escenario esperado para el sistema chileno a futuro: el norte del país dominado por ERNC-CC, y centrales hidroeléctricas concentradas en el sur

○ **A la fecha, no existen soluciones de control propuestas para abordar este desafío**



Introducción

Efectos de ERNC-CC
en los SEP

Tipos de
convertidores

Estabilidad en SEP
con ERNC-CC

Desafíos en SEP con
ERNC-CC

Conclusiones

Desafíos de control en sistemas eléctricos futuros

- Integración masiva de ERNC-CC en los SEP:

Grandes centrales eléctricas conectadas en alta tensión

+

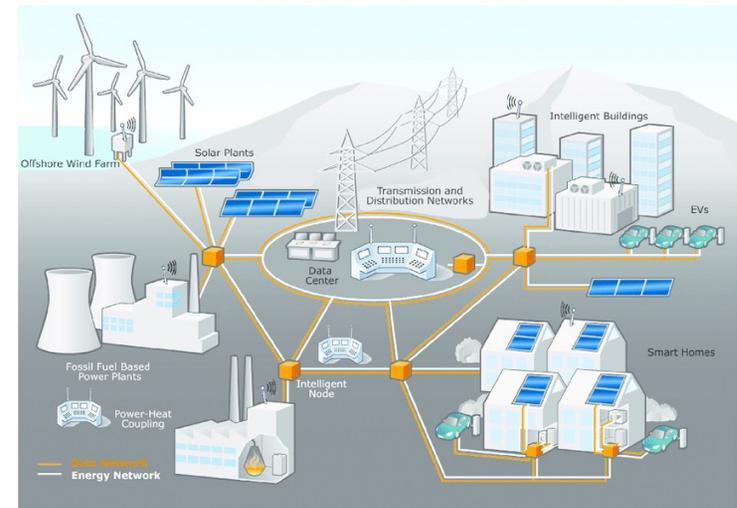
Miles de pequeños generadores distribuidos conectados a las redes de distribución

➔ **Integración de miles de convertidores en diferentes niveles de tensión**

- Se crean miles de nuevos **puntos de control** en la red

➔ **Grandes desafíos de control, coordinación y sintonización**

- ◆ La respuesta dinámica del sistema se vuelve mucho más rápida producto del uso masivo de conversores



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Control de SEP con ERNC-CC (1)

- El diseño de estrategias de control para mantener la seguridad y estabilidad en sistemas débiles con baja inercia durante fallas debe considerar varios aspectos clave que diferencian estos sistemas de los convencionales
- Diferencias entre ERNC-CC y SG:
 - ◆ GS tienen dinámicas lentas, en la ventana electromecánica
 - Las ERNC-CC tienen dinámicas rápidas, en la ventana electromagnética
 - ◆ Respuesta de los GS durante transitorios depende fuertemente de los parámetros técnicos de máquina
 - El aporte de corrientes de cortocircuito de las ERNC es bajo y depende fuertemente del sistema de control
 - ◆ Respuesta inercial y aportes de corrientes de cortocircuito de los GS se proporciona naturalmente debido al acoplamiento del generador con la red
 - En las ERNC-CC la respuesta rápida de frecuencia se implementa a través de un lazo de control adicional

➔ **La interacción de las centrales ERNC-CC con la red durante fallas queda determinada por la estrategia de control usada y sus parámetros → Complejo**



Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Control de SEP con ERNC-CC (2)

- Si bien los convertidores de las centrales ERNC-CC permiten una amplia variedad de estrategias de control (flexibles y muy rápidas), también agregan una capa adicional de complejidad
 1. **Retardos** en la actuación debido al procesamiento de señales (ejemplo PLL)
 2. Posibles **inestabilidades** debido a limitaciones de corriente de los convertidores durante fallas (proceso de FRT y requerimientos exigentes de inyección de corrientes reactivas durante cortocircuitos)
 3. **Interacciones dinámicas** rápidas inducidas por el acoplamiento entre los convertidores y la red o entre convertidores de diferentes centrales ERNC-CC, que pueden conducir a comportamientos inestables
 4. **Desempeño dinámico de las ERNC-CC en modo grid-following** fuertemente influenciado por la robustez del sistema en bornes y la estrategia de control usada (incluyendo estructura de control y parámetros)

Introducción

Efectos de ERNC-CC
en los SEP

Tipos de
convertidores

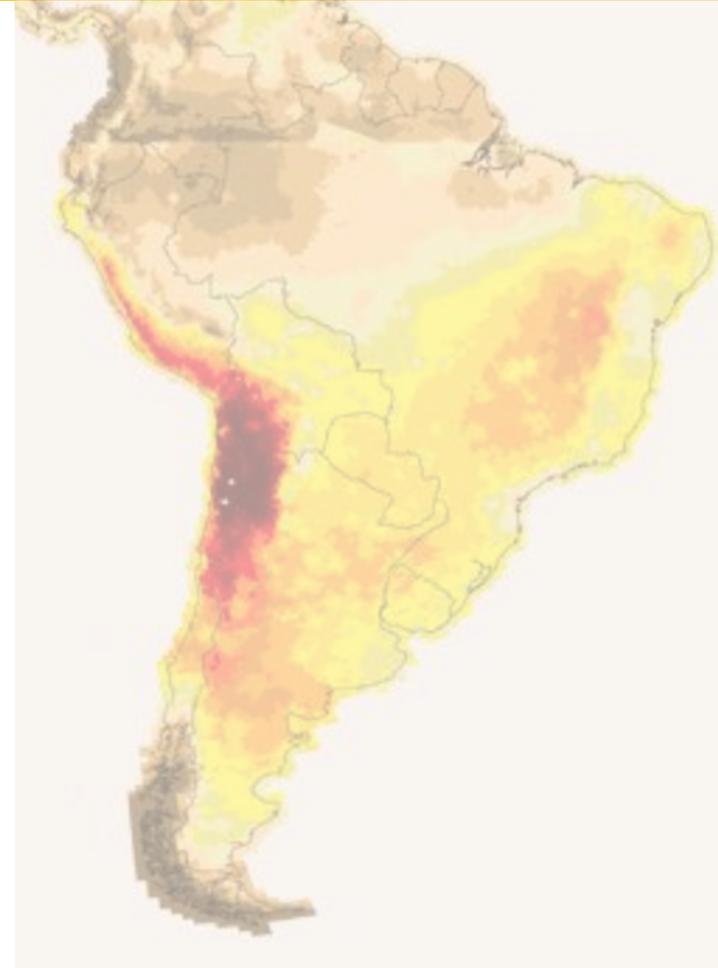
Estabilidad en SEP
con ERNC-CC

Desafíos en SEP con
ERNC-CC

Conclusiones

Agenda

- Introducción
- Efectos de las ERNC-CC en los SEP
- Tipos de convertidores
- Estabilidad en SEP con ERNC-CC
- Desafíos en SEP con ERNC-CC
- **Conclusiones**



Conclusiones

- Los SEP del futuro con altos niveles de ERNC-CC se caracterizarán por:
 - ◆ Bajos niveles de cortocircuito e inercia. Pocos centros de inercia concentrados en algunas zonas de la red
 - ◆ Gran cantidad de convertidores distribuidos en la red con estructuras de control complejas y dinámicas rápidas
 - ◆ Interacciones dinámicas rápidas entre componentes del SEP y controladores de las ERNC-CC
- ➔ **Sistemas de potencia débiles, con grandes desafíos de estabilidad y control**
- Para asegurar la estabilidad de los SEP con altos niveles de ERNC-CC se requiere responder:
 - ◆ ¿Qué porcentajes de GS y ERNC-CC en modo grid-following y grid-forming pueden garantizar la estabilidad del sistema eléctrico?
 - ◆ ¿Cuáles son los requisitos a exigir a las centrales ERNC-CC durante contingencias para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico y evitar inestabilidades de control?
 - ◆ ¿A partir de qué punto se debe exigir a las ERNC-CC que ingresen al sistema que se conecten en modo grid-forming?, ¿Cuáles son los incentivos que el regulador debe generar para que esto ocurra?
 - ◆ ¿Cuál es la mejor forma de repartición de carga en un SEP dominado por ERNC-CC?, ¿Es relevante la regulación de frecuencia en un SEP dominado por ERNC-CC?

Introducción

Efectos de ERNC-CC en los SEP

Tipos de convertidores

Estabilidad en SEP con ERNC-CC

Desafíos en SEP con ERNC-CC

Conclusiones

Cierre

¡Gracias por su atención!

