

Agenda

- Introducción
- Efectos del apoyo de BSS a la estabilidad
- Modelo de localización propuesto
- Resultados
- Conclusiones



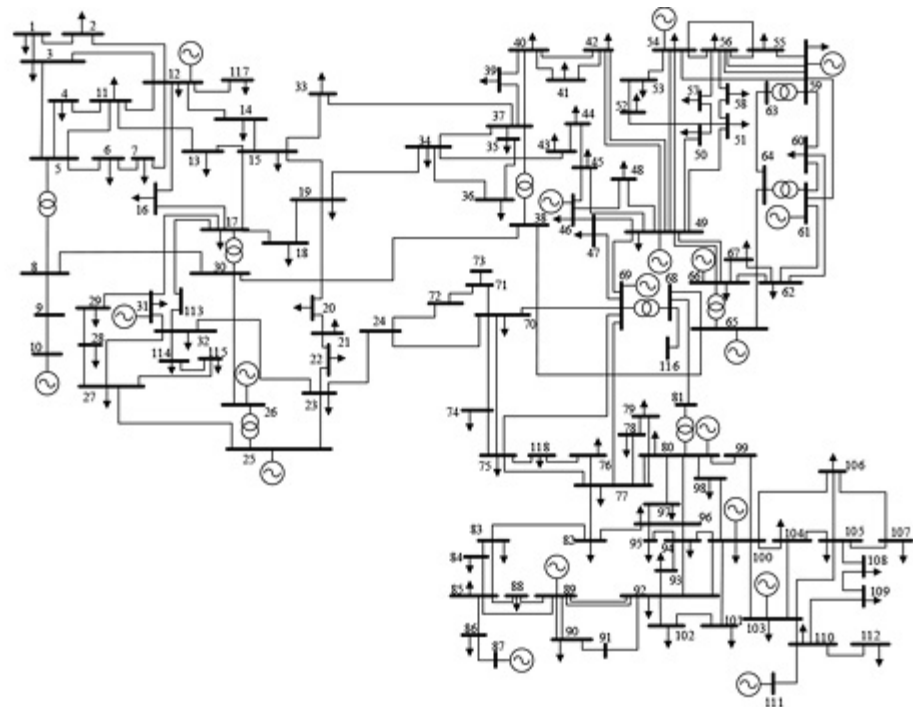
Motivación

- Tradicionalmente, la mantención de la estabilidad en los sistemas eléctricos de potencia (SEP) se ha logrado mediante los aportes de los generadores sincrónicos (GS) y diferentes acciones de control en la red
- Sin embargo, **un aumento masivo de energía renovables no convencionales con convertidor (ERNC-CC)**, como centrales eólicas y fotovoltaicas, **podría poner en peligro la mantención de la estabilidad en los SEP**
- **Razón:** Diferencias fundamentales entre los GS y ERNC-CC
 - ◆ ERNC-CC no aportan con respuesta inercial durante desbalances de potencia
 - ◆ Aportes de corrientes de cortocircuito de ERNC-CC son significativamente menor que los aportes que puede realizar un generador convencional
 - ◆ Respuesta dinámica de ERNC-CC así como su interacción con la red durante contingencias, dependen de las características de la estrategia de control usada y no por las propiedades físicas del convertidor
 - En los GS las propiedades físicas de la máquina determinan su desempeño dinámico



Robustez en SEP

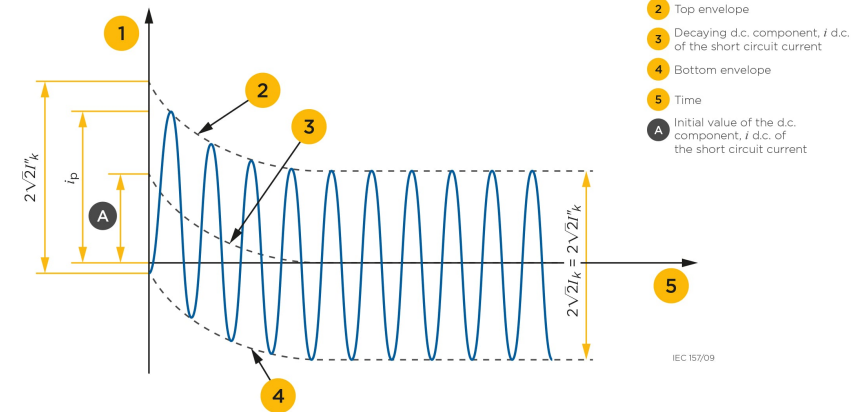
- El término “robustez” se utiliza para caracterizar de manera aproximada el desempeño dinámico de los SEP frente a diferentes condiciones de operación
 - ◆ Da una indicación de qué tan bien el sistema puede enfrentar diferentes contingencias manteniendo un comportamiento estable
- Entre los indicadores más usados para cuantificar la robustez de los SEP se encuentran los **niveles de cortocircuito** en las barras de la red y la **inercia del sistema**



Robustez en SEP – Nivel de cortocircuito (SCL)

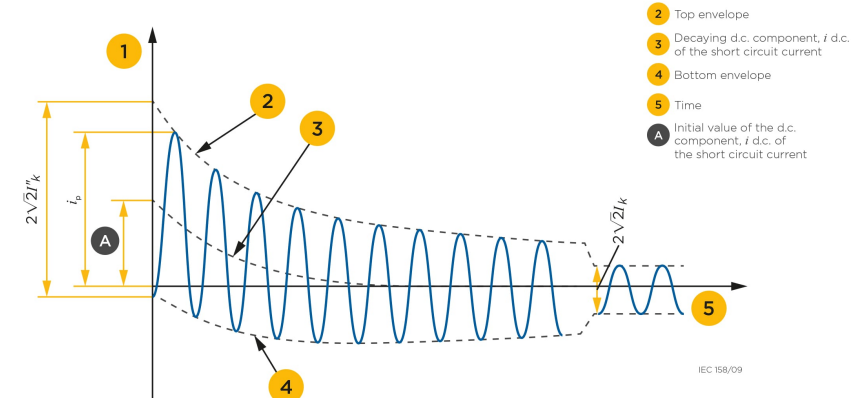
- El SCL es una medida de la “rigidez” del voltaje en una barra: SCL altos indican un sistema fuerte con voltajes rígidos, lo que implica que sus valores no se desviarán significativamente al ser sometidos a pequeñas perturbaciones
- Los GS son las principales fuentes de corrientes de cortocircuito en los SEP
- ➔ **Generalmente, las zonas robustas de los SEP (con altos SCL) se encuentran en áreas cercanas a los GS y las zonas alejadas de centros de generación son áreas débiles con bajos SCL**

SHORT CIRCUIT CURRENT OF A FAR-FROM-GENERATOR SHORT CIRCUIT WITH CONSTANT a.c. COMPONENT



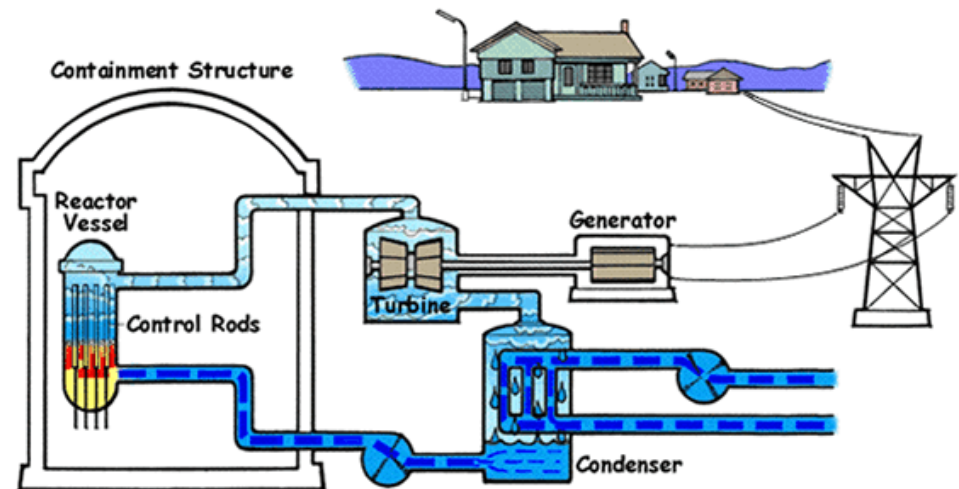
For near-to-generator short circuits, the a.c. component has a decaying amplitude ($I''_k > I_k$) and is also superimposed on a decaying d.c. component, i d.c. that falls from an initial value, A , to zero. The figure below shows a typical current vs. time characteristic for a near-to-generator short circuit.

SHORT CIRCUIT CURRENT OF A NEAR-TO-GENERATOR SHORT CIRCUIT WITH DECAYING a.c. COMPONENT

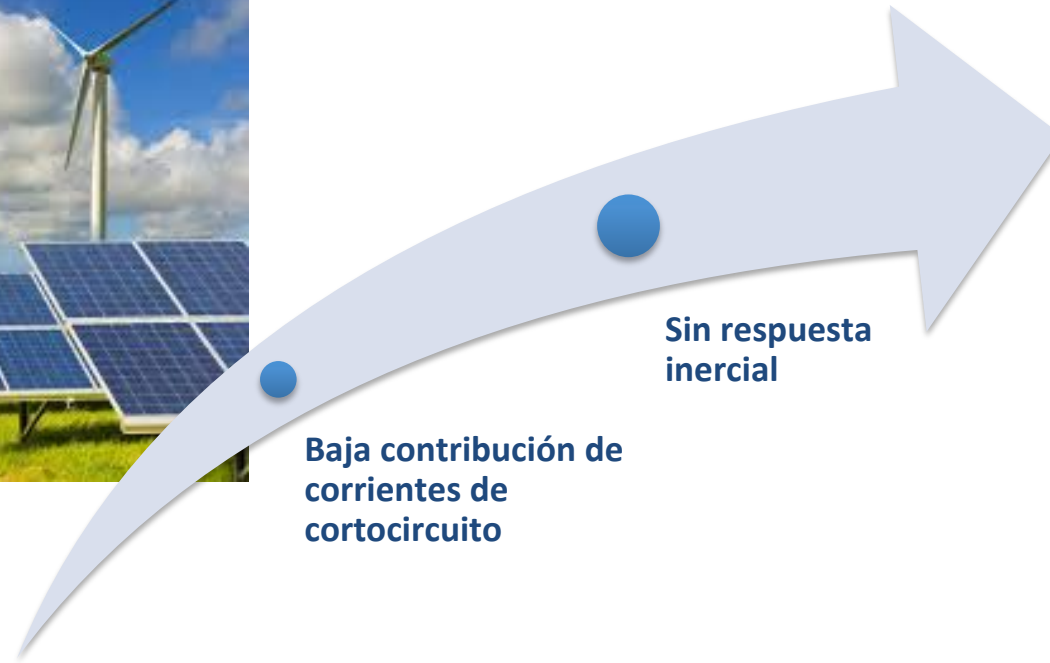


Robustez en SEP – Inercia

- Es una medida de qué tan bien puede un SEP enfrentar desbalances de potencia manteniendo una frecuencia estable
 - Durante los primeros segundos después de un desbalance de potencia, la frecuencia del sistema disminuirá a una tasa determinada principalmente por la inercia total del sistema: a menor inercia, más rápido variará la frecuencia del SEP
 - ◆ Influye tanto en la activación de los EDAC y EDAG durante contingencias como en el desempeño del control de frecuencia en régimen permanente
 - Los GS y motores entregan respuesta inercial de manera natural a los SEP debido a su acoplamiento electromecánico con la red
- **Los GS son las principales fuentes de inercia en los SEP**
- **SEP dominados por GS generalmente tienen altos niveles de inercia y por ende son más robustos frente a desbalances de potencia**



Efectos de las ERNC-CC en la robustez de los SEP



**Aumento de ERNC-CC
disminuye la robustez
de los SEP**

**Baja contribución de
corrientes de
cortocircuito**

**Sin respuesta
inercial**

- Disminución de los niveles de robustez de los SEP
- **Empeoramiento del desempeño dinámico durante contingencias**
- **SEP más propensos a inestabilidad**

Desafíos en SEP débiles (1)

- Entre los efectos que tiene una disminución de la robustez de los SEP están:
 - ◆ Mayores valores de sensibilidad dV/dP y dV/dQ → Pequeñas perturbaciones en los flujos de potencia pueden cambiar significativamente los voltajes de la red
 - ◆ Durante contingencias, los SEP con bajos SCL pueden experimentar voltajes extremadamente bajos en amplias zonas de la red, lo que puede dificultar la recuperación del SEP después del despeje de la falla
 - **SEP débiles son más propensos a inestabilidades de tensión o colapsos**
 - ◆ Caídas de voltaje severas pueden acelerar considerablemente a los GS cercanos → posible pérdida de sincronismo
 - ◆ Bajos niveles de inercia aumentan la frecuencia mínima después de desbalances de potencia y llevan a una tasa de cambio de frecuencia más pronunciada
 - **Excursiones de frecuencia más frecuentes y más grandes**
 - **Activación más frecuente de EDAC/EDAG, poniendo en peligro la estabilidad de frecuencia del sistema**
- **Empeoramiento general del desempeño dinámico de los SEP durante contingencias**
- **Mayor riesgo de inestabilidades**

Desafíos en SEP débiles (2)

- Por otra parte, la conexión de ERNC-CC en SEP débiles con bajos niveles de robustez impone grandes desafíos a la operación de este tipo de centrales
 - ◆ El sistema de control de las centrales ERNC-CC requiere de un voltaje de referencia estable para su correcto funcionamiento
 - A medida que el SCL en el punto de conexión disminuye, la referencia de voltaje se vuelve menos “estable” → Su valor se ve más afectado frente a cambios en los flujos de potencia
 - **Posible surgimiento de interacciones de control complejas**
 - **Mayor riesgo de inestabilidad de control (PLL, lazo de control de corriente, lazo de voltaje)**

- Desafortunadamente, muchas centrales ERNC-CC de gran escala a menudo están ubicadas en áreas débiles de la red donde los SCL son bajos
 - ◆ Los potenciales eólicos y solares más atractivos comúnmente se ubican en áreas remotas del sistema, lejos de los centros de generación y con poca capacidad de transmisión, es decir, en zonas débiles de la red

Objetivo (1)

- Para evitar futuros problemas de estabilidad en SEP con altos niveles de ERNC-CC, se deben explorar nuevas tecnologías y desarrollar estrategias de control novedosas capaces de contrarrestar los efectos negativos que estas centrales puedan tener
- **Tecnologías prometedoras:** sistemas de almacenamiento de energía. **Baterías (BESS)**
 - ◆ Pueden proporcionar flexibilidad para incorporar energía renovable a los SEP de manera eficiente
 - ◆ Son dispositivos de respuesta rápida que dan flexibilidad para la regulación de frecuencia y voltaje, y que además pueden brindar una amplia gama de beneficios desde la perspectiva de la estabilidad
- Durante los últimos años se han realizado grandes esfuerzos para evaluar los beneficios que los BESS pueden aportar a los SEP frente a altos niveles de ERNC-CC
 - ◆ Foco de la mayoría de los trabajos: Dimensionamiento y localización óptima de BESS en SEP considerando aspectos económicos
- **A la fecha no se han evaluado los beneficios que una localización estratégica de BESS pueden proporcionar a la estabilidad de los SEP**

Objetivo (2)

- Desarrollar un modelo de optimización para localizar BESS en SEP de forma de mejorar la estabilidad de voltaje y ángulo
 - ◆ El modelo mejora la estabilidad aumentando los niveles de cortocircuito de la red
 - ◆ **Para esto, se considera que los BESS apoyan la estabilidad del sistema mediante la inyección de corrientes de falla durante cortocircuitos usando una estrategia de control apropiada**

Agenda

- Introducción
- Efectos del apoyo de BSS a la estabilidad
- Modelo de localización propuesto
- Resultados
- Conclusiones



Modelo simple

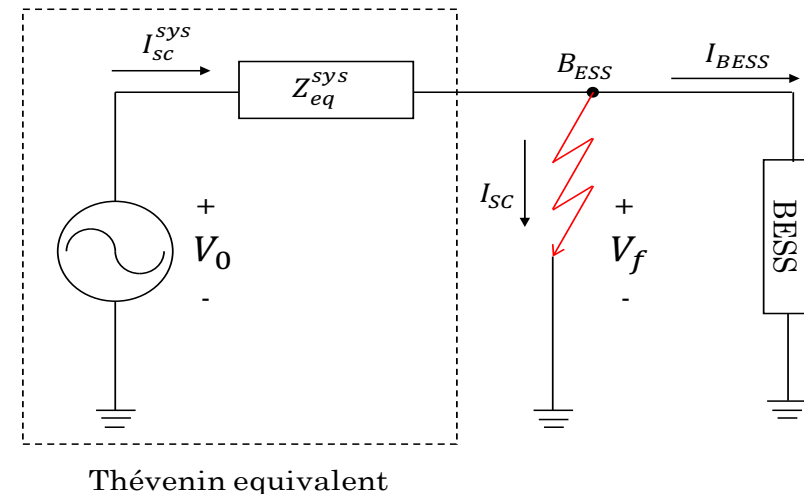
¿De qué manera pueden contribuir los BESS a la estabilidad?

- Para responder esto, se considera el siguiente circuito
- A partir del modelo se puede demostrar que el aumento en el voltaje $V \downarrow f$ debido al apoyo a la estabilidad por parte del BESS durante cortocircuitos se puede expresar en función de la potencia de cortocircuito del sistema, $S \downarrow sc \uparrow sys$ y la potencia nominal del BESS, $S \downarrow BESS$ según:

$$\eta = 1 - \frac{I \downarrow BESS S \downarrow BESS}{S \downarrow sc \uparrow sys} e^{j(\theta \downarrow BESS + \theta \downarrow sys)}$$

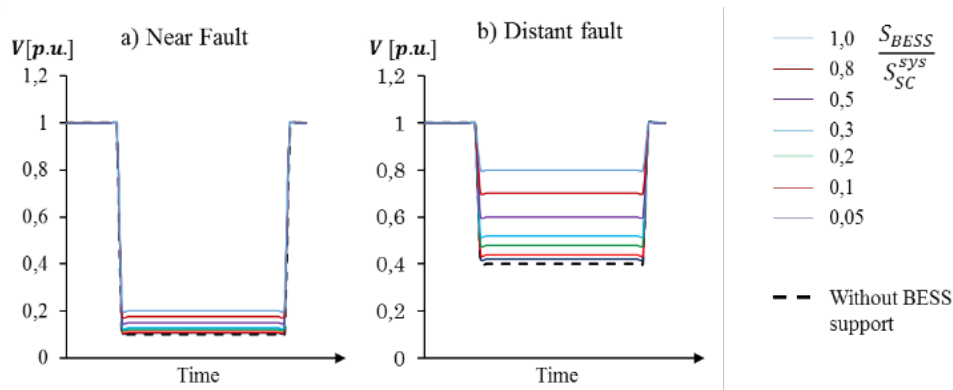
- Si se considera un SEP fuertemente inductivo, entonces el mejor ángulo para la inyección de corriente por parte del BESS cumple: $\theta \downarrow BESS = \pi - \theta \downarrow sys = \pi/2$

→ **Inyección de corriente reactiva (pura) durante la falla por parte del BESS**



Apoyo a la estabilidad de BESS durante cortocircuitos

- Figura: caída de voltaje en la barra para los casos con y sin apoyo a la estabilidad por parte del BESS asumiendo el mejor caso desde una perspectiva de estabilidad:
 $i \downarrow BESS = 1.0$ y $\vartheta \downarrow BESS = \pi/2$



→ Para fallas cercanas al punto de conexión del BESS (voltaje residual bajo), la mejora lograda en el voltaje debida al apoyo BESS es insignificante

- ◆ Independiente de $S \downarrow BESS / S \downarrow sc \uparrow sys$

→ En caso de fallas lejos del punto de conexión del BESS, la caída de voltaje durante la falla se puede mejorar considerablemente a través del apoyo del BESS

- ◆ Para una capacidad de BESS dada, la mejora aumenta a medida que disminuye el nivel de cortocircuito del sistema en el punto de conexión, es decir, a medida que el sistema es más débil

Conclusiones

- Para efectos de la localización de BESS para mejorar la estabilidad se concluye:
 - ◆ Para fallas cercanas al punto de conexión del BESS, su apoyo a la estabilidad se vuelve ineficiente
 - **El proceso de optimización debe considerar una amplia gama de contingencias. De lo contrario, barras relevantes desde una perspectiva de estabilidad podrían ser descartadas para localizar BESS**
 - ◆ En el caso de fallas lejos de los BESS, la caída de voltaje durante la falla se puede mejorar considerablemente a través del apoyo de los BESS, especialmente en áreas débiles del sistema
 - **Se espera que se localicen más módulos BESS en barras débiles del sistema, con niveles bajos de cortocircuito**
- **Los niveles de cortocircuito del sistema se pueden usar en el proceso de optimización para guiar la búsqueda y hacerla más eficiente**

Agenda

- Introducción
- Efectos del apoyo de BSS a la estabilidad
- Modelo de localización propuesto
- Resultados
- Conclusiones



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Aspectos generales del modelo de optimización propuesto

- El modelo mejora la estabilidad del SEP aumentando su robustez en un conjunto de escenarios críticos
- Para esto, los **BESS** se modelan con capacidad de apoyo a la estabilidad mediante la **inyección de corriente reactiva durante cortocircuitos**
- El apoyo de los BESS puede reducir las caídas de voltaje durante contingencias en la barra de conexión del BESS y cercanas
 - ◆ Esto se puede entender como una mejora local de la robustez en la barra pertinente
- **Si varios módulos BESS se localizan de manera estratégica en la red, se puede mejorar la robustez del SEP**
- Un aumento en la robustez de la red se traduce en menores caídas de voltaje durante cortocircuitos
- **Mejor recuperación de los voltajes después del despeje de fallas**
- **Mayor capacidad de transferencia de potencia de los GS cercanos a la falla, lo que mejora la estabilidad del ángulo de estos generadores**

Optimización (1)

- En términos generales, **la optimización localiza los módulos BESS de forma de aumentar los voltajes durante un conjunto de fallas críticas** con respecto a un escenario base sin BESS

- De esta forma la función objetivo de la optimización es:

$$\max_{\tau} \{n_{li} \}_{li \in B} \sum_{j=1}^{\uparrow N \downarrow C} \lambda_{lk} [\sum_{i=1}^{\uparrow N \downarrow K} (|U_{lik}| - |U_{lik}^0|)]$$

- Donde se tiene que:

- ◆ $|U_{lik}|$ voltaje transitorio en la i -ésima barra de la red durante la contingencia j con BESS
- ◆ $|U_{lik}^0|$ voltaje transitorio en la i -ésima barra de la red durante la contingencia j sin BESS
- ◆ $N \downarrow C$ número de contingencias críticas consideradas
- ◆ $N \downarrow K$ número de barras del SEP en las que se pueden localizar BESS
- ◆ n_{li} número de módulos BESS instalados en la i -ésima barra de la red
- ◆ λ_{lk} coeficiente de ponderación de la contingencia k -ésima

Optimización (2)

- Los módulos BESS se modelan como fuentes de corriente con una inyección de corriente reactiva (pura) de acuerdo con:

$$I_{ik} = n_i \cdot S_{mod} / S_{base} \cdot 2 \cdot (1 - |U_{ik}|) \cdot j, \forall k \in \mathcal{K}, \forall i \in \mathcal{B}$$

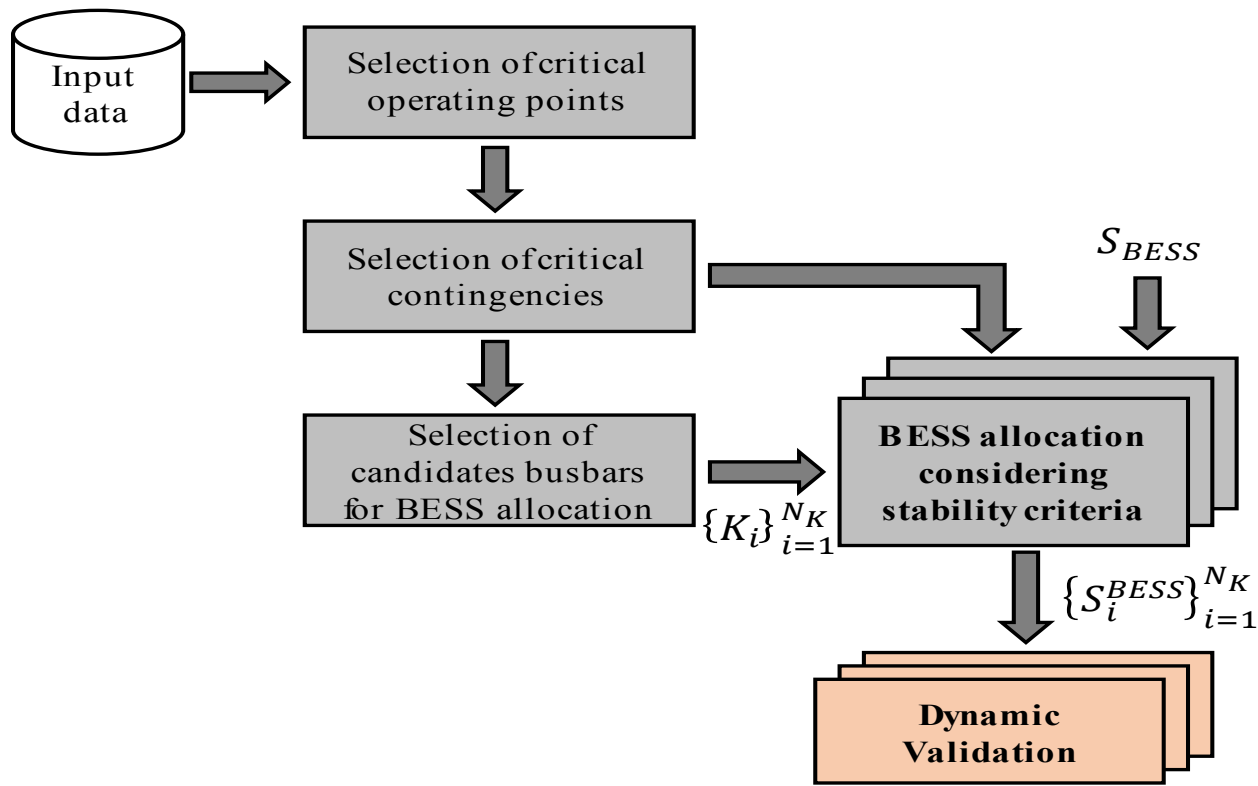
- ◆ Ecuación que modela los requisitos de FRT incluidos en una de las normas técnicas alemanas para centrales renovables
- En la ecuación se tiene que la cantidad total de módulos BESS a instalar N_{BESS} cumple:

$$\sum_{i=1}^{N_K} n_i = N_{BESS}$$

- **Dada la complejidad del problema de optimización propuesto, se resuelve mediante un método heurístico**

Metodología

- La siguiente figura ilustra la metodología usada



Selección de barras candidatas para instalar los BESS

- De forma de disminuir la carga computacional de la optimización, se selecciona un número acotado de barras candidatas para instalar módulos BESS
- En principio se deberían seleccionar las barras más débiles del SEP, pues ahí se espera un apoyo a la estabilidad más eficiente de parte de los BESS
- **Criterio: seleccionar barras débiles de la red con bajos niveles de cortocircuito**

Agenda

- Introducción
- Efectos del apoyo de BSS a la estabilidad
- Modelo de localización propuesto
- Resultados
- Conclusiones

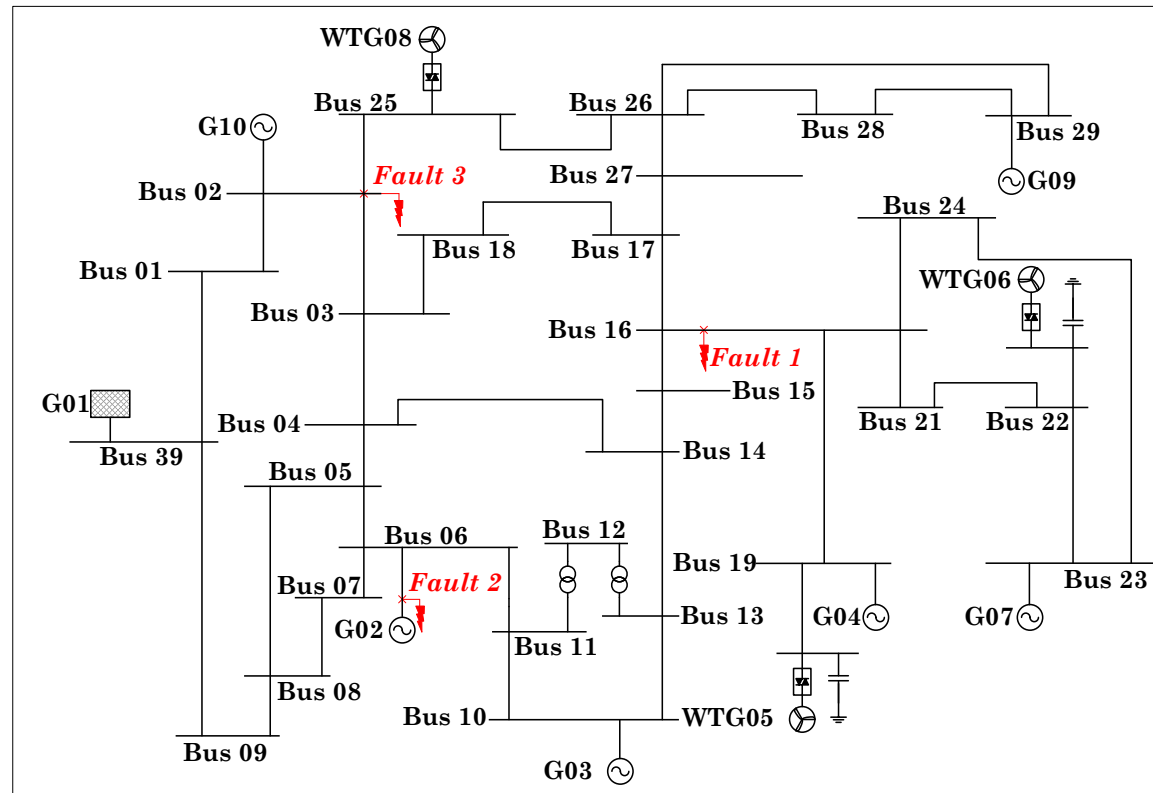


Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Red en estudio

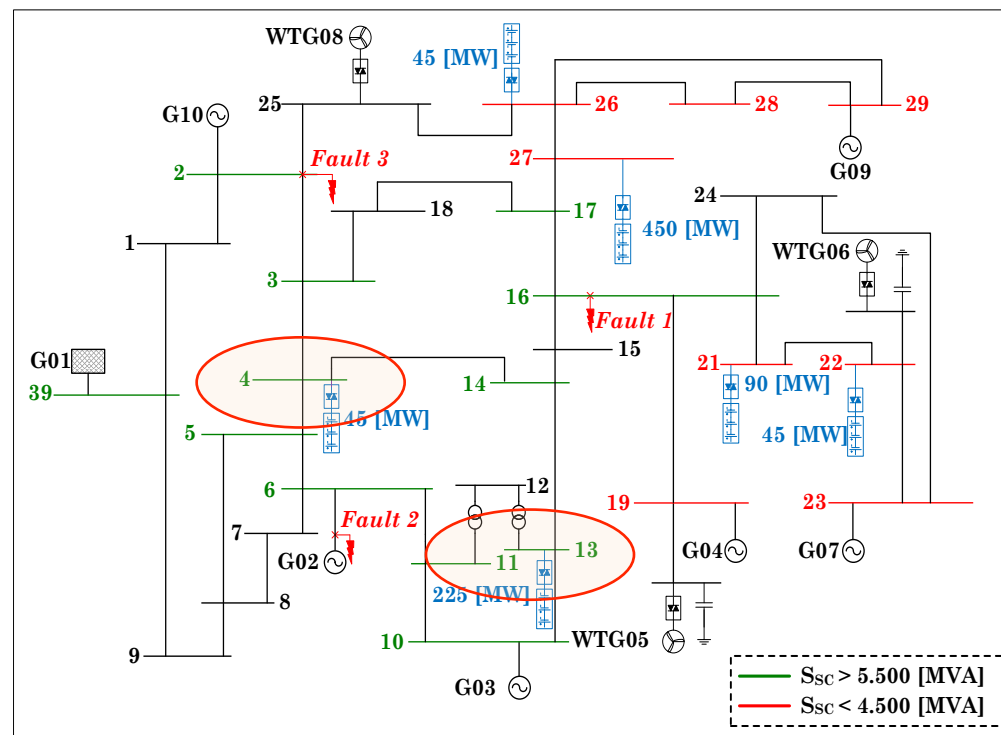
- Red de 39-barras de New England
- Punto de operación considerado: 2386 MW de energía eólica cubriendo el 39% de la demanda del sistema (6097 MW)
 - ◆ Peor escenario desde una perspectiva de estabilidad por el alto nivel de ERNC-CC
- La localización se realiza considerando tres contingencias críticas que conducen a inestabilidad
 - ◆ Capacidad total de BESS a instalar: 900 MVA (20 módulos de 45 MVA)
 - 30% de la capacidad de ERNC-CC



Resultados con 3 fallas

→ La optimización no solo localiza módulos BESS en áreas débiles de la red sino también en zonas robustas con altos niveles de cortocircuito

○ Este es el caso de las barras 4 y 13, donde se ubican 1 y 5 módulos BESS respectivamente



○ La localización de BESS en barras fuertes se relaciona con su cercanía a fallas críticas

○ Este es el caso de la falla 2

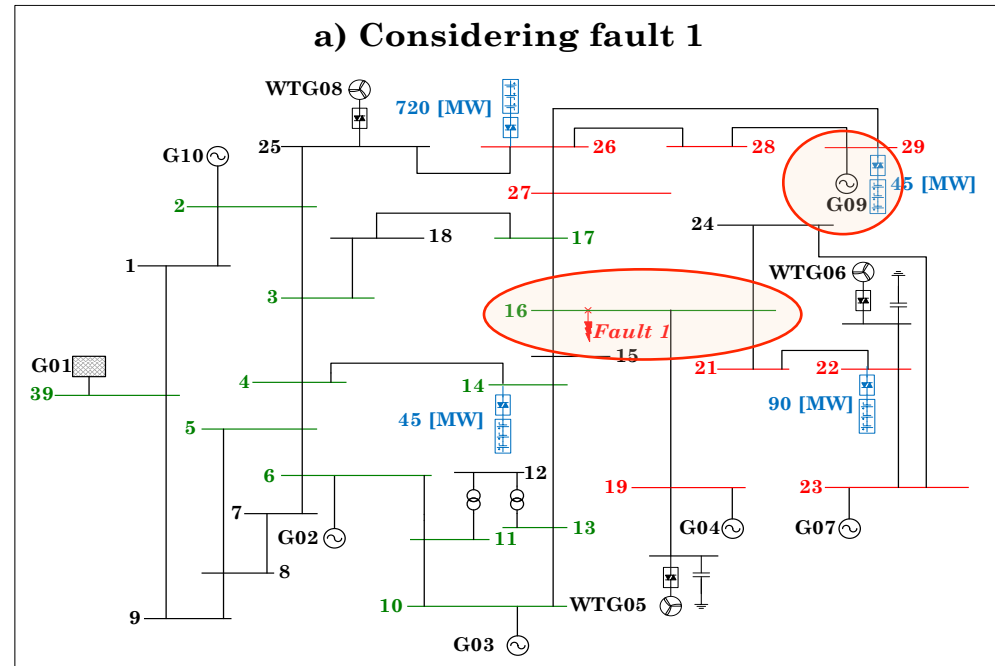
- ◆ Esta falla es un cortocircuito en bornes del generador G02 que hace que este pierda sincronismo después de 212 ms en el caso sin BESS
- ◆ Como el BESS en la barra 4 no está conectado directamente a la barra donde ocurre la falla 2, puede mejorar considerablemente las caídas de voltaje en las barras colindantes durante esta falla y por ende la estabilidad G02

Importancia de las fallas consideradas

- La decisión de reforzar barras con altos SCL está influenciada por la distribución de los otros módulos BESS y por la ubicación de las fallas consideradas en la optimización
- Para comprender la relación entre los resultados de la localización y las fallas seleccionadas, la optimización se realiza para dos casos más:
 - ◆ Solo considerando la falla 1
 - ◆ Solo considerando las fallas 1 y 3

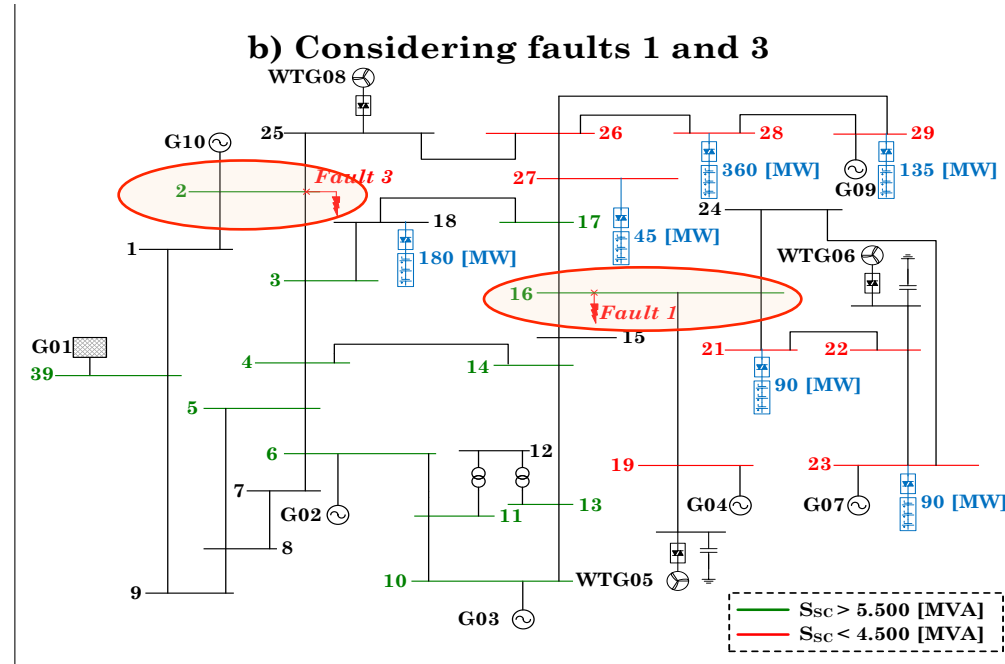
Resultados con 1 falla

- La falla 1 es un cortocircuito en la barra 16 (robusta) cuya área vecina se caracteriza por barras débiles con SCL bajos (19, 21, 22, 23, 26, 27, 28 y 29)
- **Rendimiento dinámico deficiente en el área cercana durante y después de la falla**
- De hecho, sin BESS, esta falla conduce a la pérdida de sincronismo de G09 después de 160 ms
- **Cuando la optimización solo considera la falla 1, varios módulos BESS se localizan en barras débiles cerca de donde ocurre la falla**



Resultados con 2 fallas

- La falla 3 es un cortocircuito en la barra 2 que conduce a caídas de voltaje significativas en las barras débiles 26, 28 y 29
 - ◆ Estas forman un anillo aislado que se conecta al resto del SEP solo a través de la barra 26
 - ◆ Área extremadamente débil



- Esta área presenta un mal desempeño dinámico después de la falla 3, lo que conduce a la pérdida de sincronismo del generador G09 en el caso sin BESS
- Para evitar esto, la optimización localiza algunos módulos BESS en barras débiles cerca de la falla 3

Observaciones

- Como se esperaba, los resultados anteriores muestran:
 - ◆ Una gran dependencia entre la localización de los BESS y las fallas consideradas en la optimización
 - **Algunos módulos BESS se ubican en barras cercanas a contingencias críticas que conducen a inestabilidad, sin importar el nivel de robustez de las barras**
 - ◆ Algunos módulos BESS siempre se ubican en barras débiles de la red

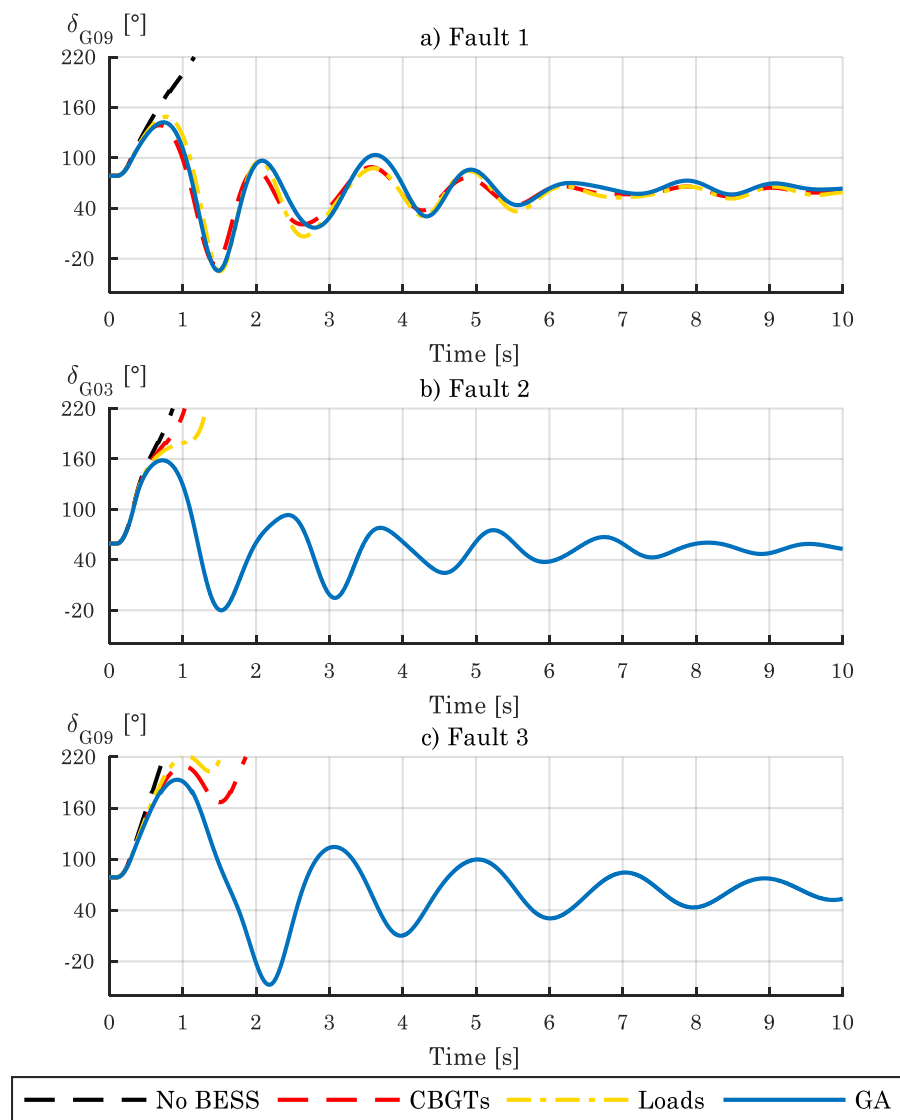
Resultados dinámicos – Validación (1)

- La validación se realiza mediante simulaciones dinámicas en el dominio de tiempo para verificar el desempeño dinámico del SEP durante cada falla considerada en la optimización

- Se consideran tres escenarios, todos con un 39% de penetración de ERNC-CC y considerando 900 MVA de BESS (20 módulos de 45 MVA cada uno):
 - ◆ Escenario 1: escenario sin BESS
 - ◆ Escenario 2: módulos BESS distribuidos en las barras con ERNC-CC conectadas
 - Esta es una de las soluciones habituales de localización de BESS usadas en el marco de planificación y estudios de operación económica de SEP
 - ◆ Escenario 3: módulos BESS distribuidos en las barras de carga del SEP
 - Esta es otra solución habitual de localización de BESS usada en el marco de planificación y estudios de operación económica de SEP
 - ◆ Escenario 4: módulos BESS se localizan a través de la optimización propuesta

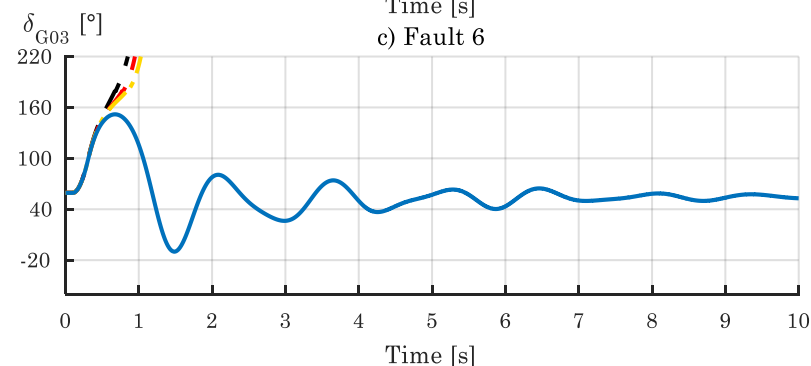
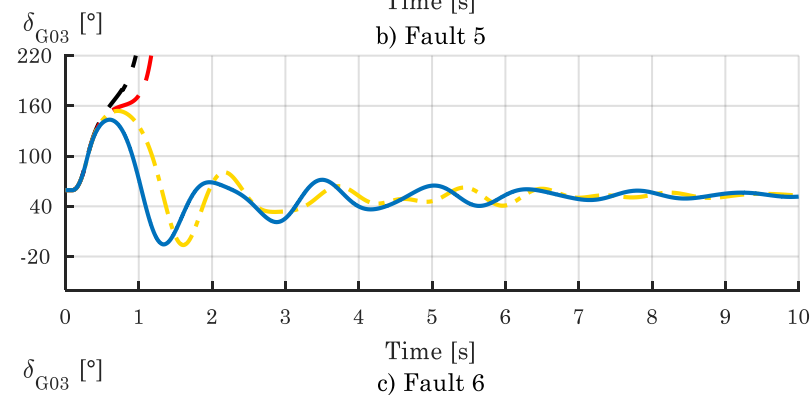
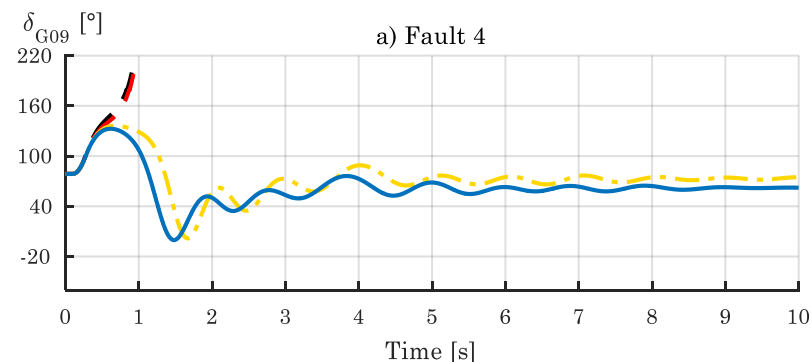
Resultados dinámicos – Validación (2)

- Figura muestra la evolución del ángulo de los GS críticos para cada contingencia considerada
- Se ve que la localización de BESS obtenida por medio de la optimización propuesta garantiza la estabilidad del SEP durante todas las contingencias consideradas en la optimización
- Cuando los módulos BESS se distribuyen en las barras carga o de conexión ERNC-CC, no se puede mantener la estabilidad durante las fallas 2 y 3
 - ◆ Solo durante la falla 1 la estabilidad se mantiene, independiente de la localización de los BESS utilizada



Resultados dinámicos – Validación (3)

- También se verificó el desempeño dinámico del método propuesto en caso de la ocurrencia de fallas no consideradas en la optimización
 - ◆ Falla 4: cortocircuito trifásico en la barra 26
 - ◆ Falla 5: cortocircuito trifásico en la barra 10
 - ◆ Falla 6: cortocircuito trifásico en la barra 11
- **La localización de BESS obtenida mediante la optimización lleva a un buen desempeño dinámico del SEP incluso durante fallas que no fueron consideradas en la optimización**



Resultados dinámicos – Validación (3)

- El hecho de que el sistema sea estable en todos los casos destaca la robustez de la solución obtenida
- Esto se debe al enfoque del peor escenario adoptado en la optimización
- Por otro lado, cuando los BESS se conectan en barras con ERNC-CC, el SEP es inestable en cuatro de las seis fallas estudiadas
- La localización de módulos BESS en las barras de carga lleva a resultados similares: el SEP es inestable en tres de las seis fallas consideradas
- Si bien se encontraron resultados similares para otras contingencias, debido a las limitaciones de tiempo, estos resultados no se muestran aquí

Agenda

- Introducción
- Efectos del apoyo de BSS a la estabilidad
- Modelo de localización propuesto
- Resultados
- Conclusiones



Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Conclusiones (1)

- La metodología propuesta para localizar BESS de forma de mejorar la estabilidad de los SEP explota el hecho de que la inyección de corriente reactiva por parte de BESS durante fallas permite mejorar la estabilidad de voltaje y ángulo de los SEP
- Las localizaciones de BESS obtenidas con la optimización propuesta, pudieron garantizar la estabilidad del sistema durante todas las contingencias consideradas en la optimización
 - ◆ Adicionalmente, se logró un buen desempeño dinámico del SEP incluso durante fallas que no se consideraron en la optimización
- Las simulaciones dinámicas mostraron que la localización de BESS en barras ERNC-CC o de carga no siempre permite mantener la estabilidad del sistema durante las contingencias
- ➔ **Localizaciones típicas de BESS que solo consideran criterios económicos podrían comprometer la estabilidad de los SEP**

Conclusiones (2)

- Los resultados obtenidos muestran que una localización eficiente de BESS debe considerar las barras más débiles de la red y las áreas propensas a enfrentar problemas de estabilidad (incluso si estas áreas están fuertemente conectadas)
 - ◆ Selección de contingencias críticas es clave
- A la fecha, no existen servicios complementarios que permitan remunerar este tipo de servicios
- **En el futuro, la capacidad de apoyo a la estabilidad debería ser remunerada en el marco de los servicios complementarios, de forma de ser una opción atractiva para los inversionistas de BESS**
- **Esto permitirá lograr una inserción masiva de ERNC-CC sin comprometer la estabilidad de los SEP**