

Modelado y control de redes inteligentes híbridas CC/CA

Dr. Milan Prodanovic

Webinar: Microrredes Urbanas Inteligentes 22/09/2021



Web: geiser.depeca.uah.es/promint



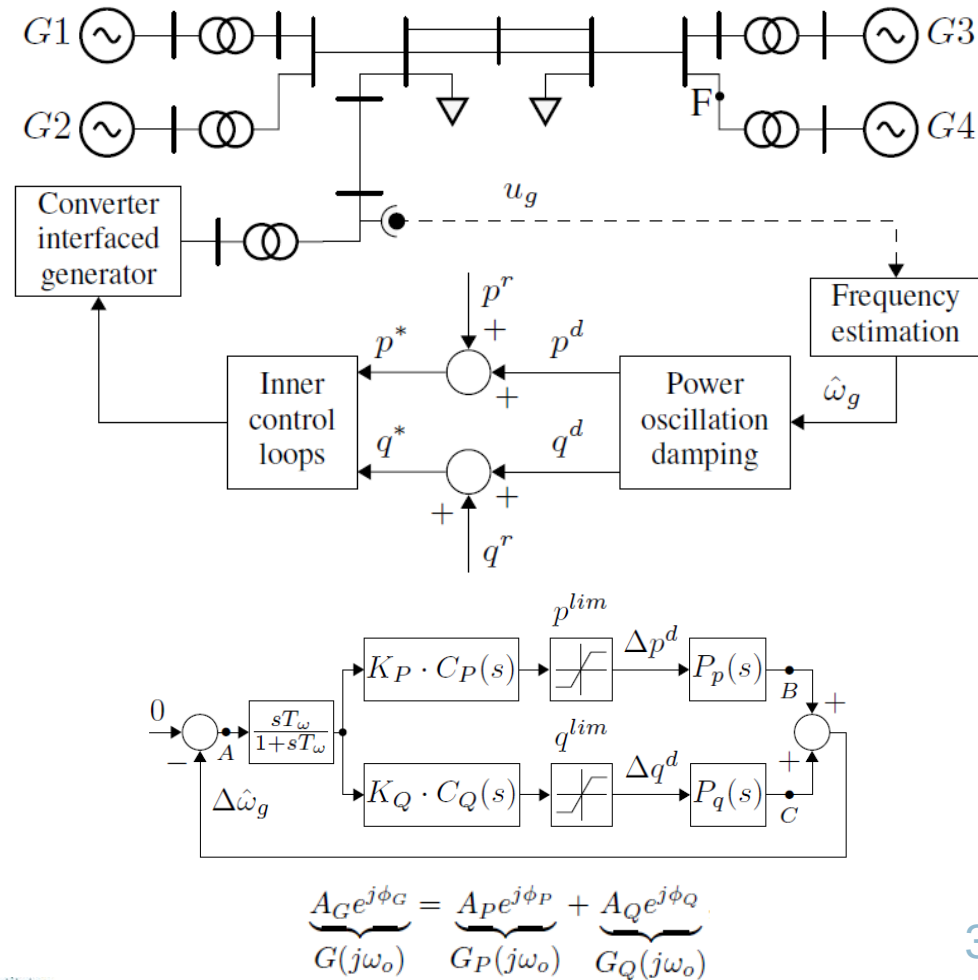
Modelado y control de redes inteligentes híbridas CC/CA

Índice:

- Amortiguamiento de oscilaciones en redes y microrredes
- Estabilidad de microrredes híbridas
- Análisis de bifurcación de redes eléctricas
- Control de enlaces de corriente continua

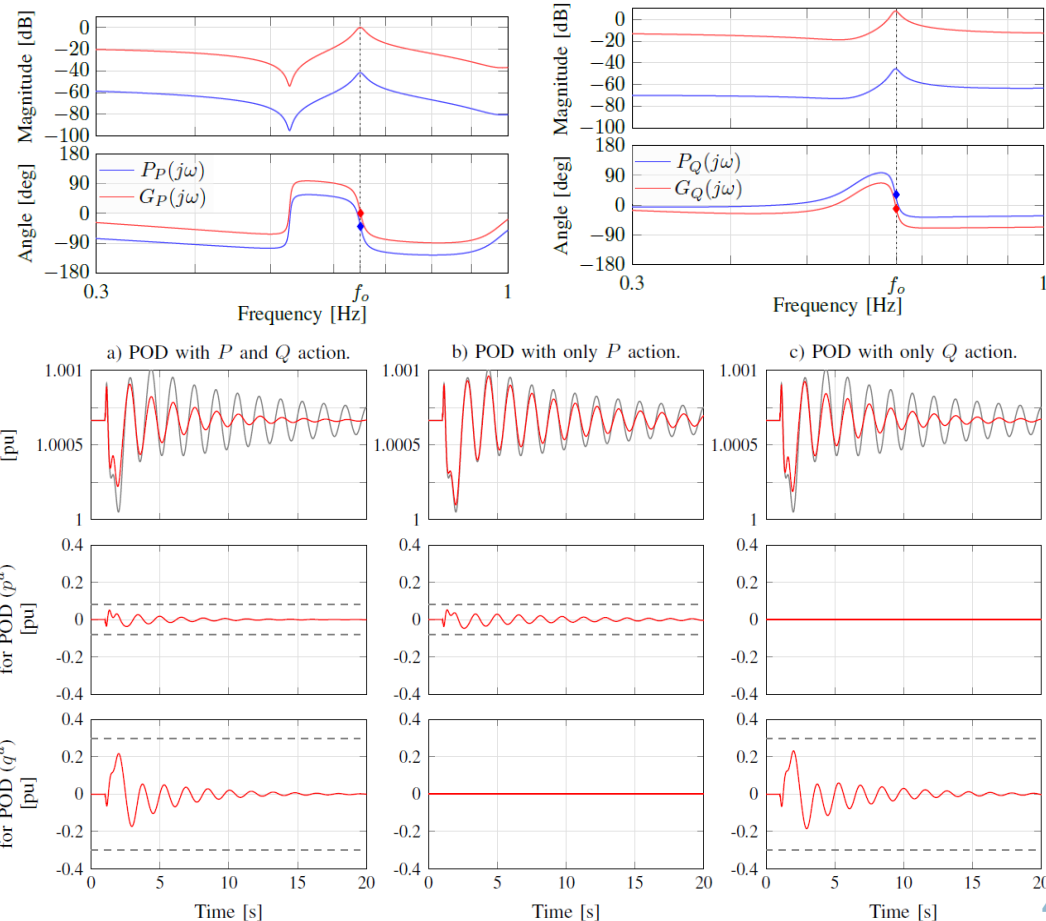
Amortiguamiento de oscilaciones de potencia

- Perturbaciones en redes eléctricas pueden producir oscilaciones de frecuencia.
- Frecuencia de estas oscilaciones depende de la interacción dinámica entre los generadores.
- Convertidores pueden utilizar su potencia activa y reactiva (disponible) para amortiguarlas.
- Se estiman funciones de transferencia entre los puntos relevantes y se calculan las referencias.



Amortiguamiento de oscilaciones de potencia

- Se puede utilizar potencia activa o potencia reactiva o ambas para el amortiguamiento.
- Amortiguamiento máximo se consigue cuando la fase de la función de transferencia es cero utilizando la máxima ganancia de acción proporcional.
- Se pueden restringir las capacidades de las potencias para utilizar solo la capacidad disponible.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

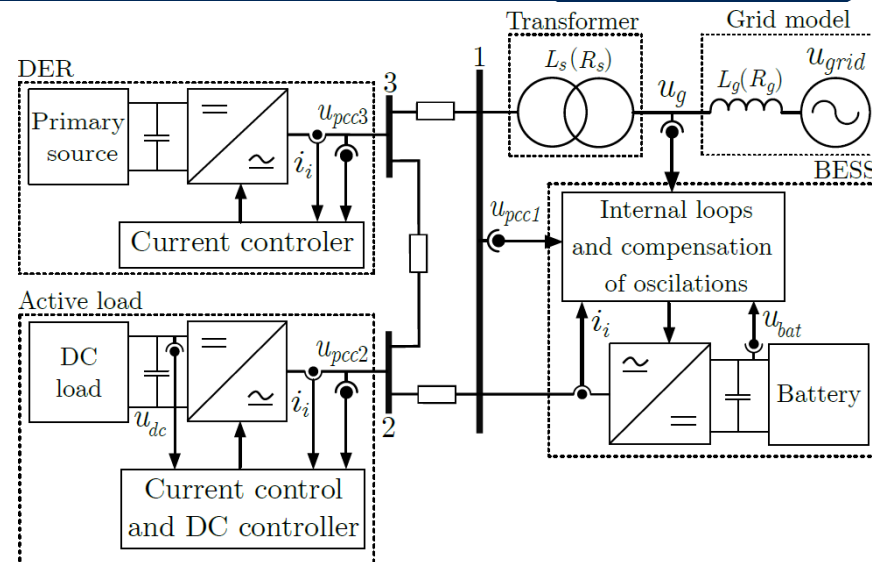


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Amortiguamiento de oscilaciones

Cancelación de oscilaciones en microrredes



Red local (microrred):

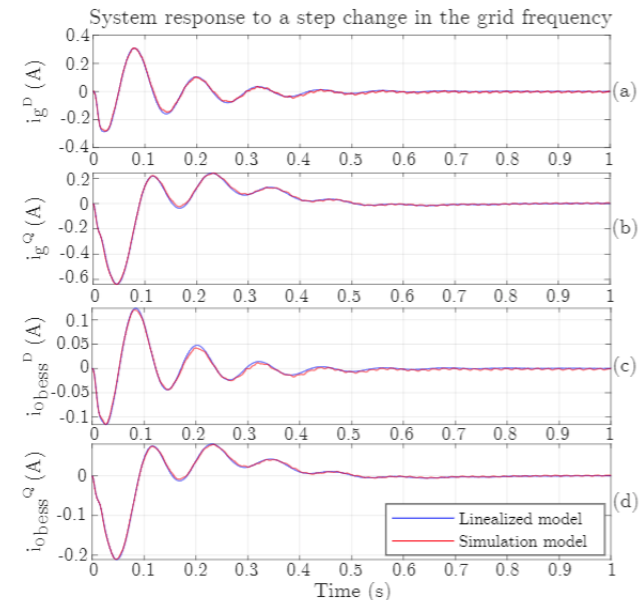
- Fuente renovable, carga activa y almacenamiento de energía.
- Todos elementos activos se conectan a la red usando VSCs y filtros LCL.

Objetivo: usar almacenamiento para cancelar el impacto de oscilaciones subsíncronas en la red local.

Modelo de pequeña señal:

$$\begin{aligned} \dot{[\Delta x_g]} &= A_g [\Delta x_g] + B_g [\Delta u_g] \\ [\Delta y_g] &= C_g [\Delta x_g], \end{aligned}$$

Se validó el modelo usando la comparación con el modelo no-lineal en MATLAB/Simulink.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Iniciativa de Empleo Juvenil
Iniciativa de Empleo Juvenil



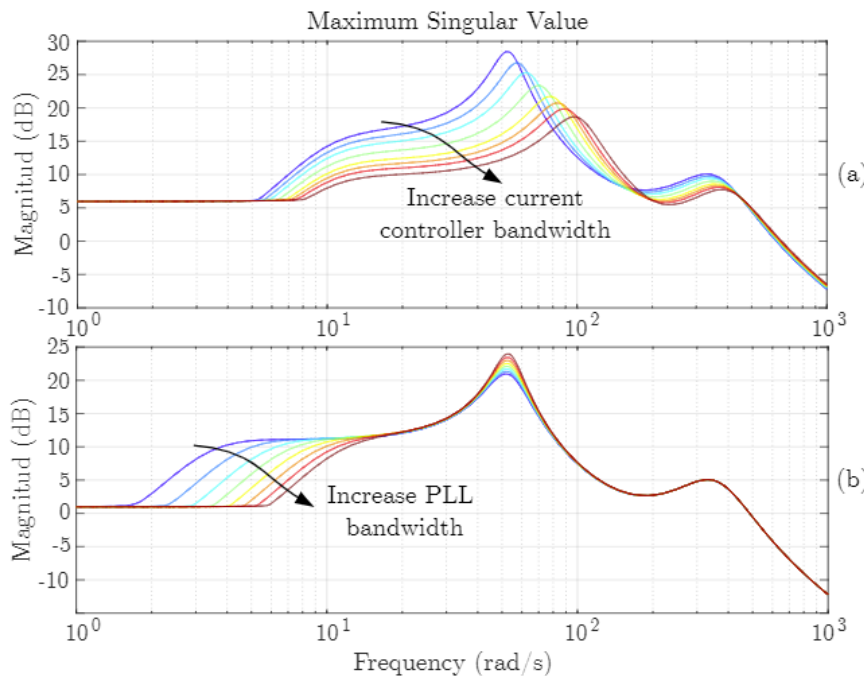
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Amortiguamiento de oscilaciones

Cancelación de oscilaciones en microrredes

Análisis de sistema usando la descomposición en valores singulares



Impacto del ancho banda de control de corriente:

- Ganancia baja con la subida del ancho de banda.
- Frecuencia del valor máximo asciende.
- El peor caso se obtiene para controladores lentos de corriente.

Impacto del ancho de banda de PLL:

- PLL no afecta la frecuencia resonante.
- PLLs rápidos disminuyen el amortiguamiento del sistema.

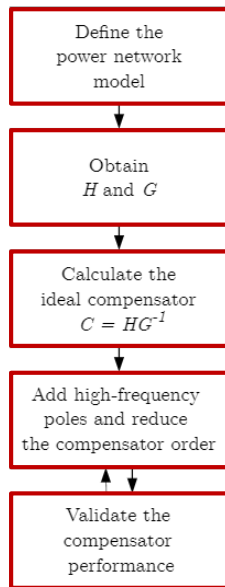
Amortiguamiento de oscilaciones Cancelación de oscilaciones en microrredes

Diseño del compensador

La cancelación del corriente se desarrolla a partir del modelo de espacio de estado:

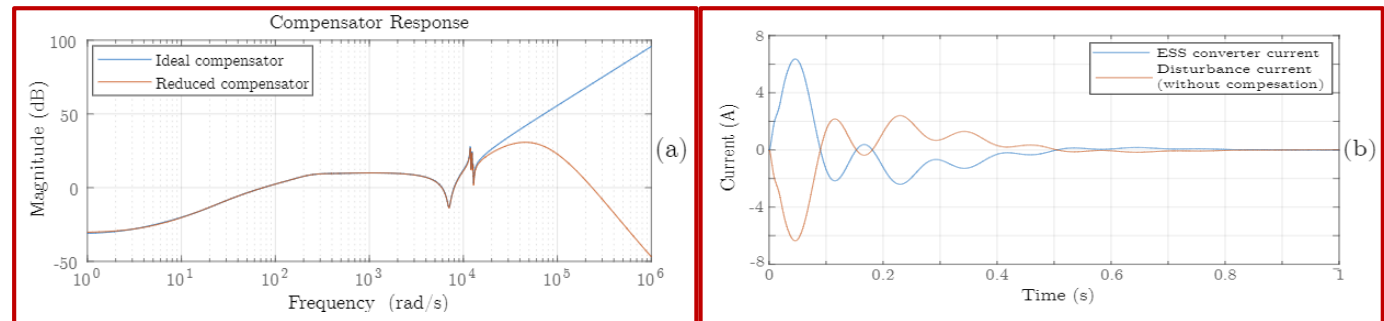
$$\Delta I_g^{DQ} = H \begin{bmatrix} \Delta U_g^{DQ} \\ \Delta \Omega_g \end{bmatrix} + G [\Delta I_{ess}^{*dq}] \quad \Delta I_g^{DQ} = 0 \quad \Delta I_{ess}^{*dq} = \underbrace{-HG^{-1}}_{C^I} \begin{bmatrix} \Delta U_g^D \\ \Delta \Omega_g \end{bmatrix}$$

Donde H y G son las matrices de funciones de transferencias correspondientes y C^I representa el compensador ideal.



El compensador ideal no se puede usar en aplicaciones reales:

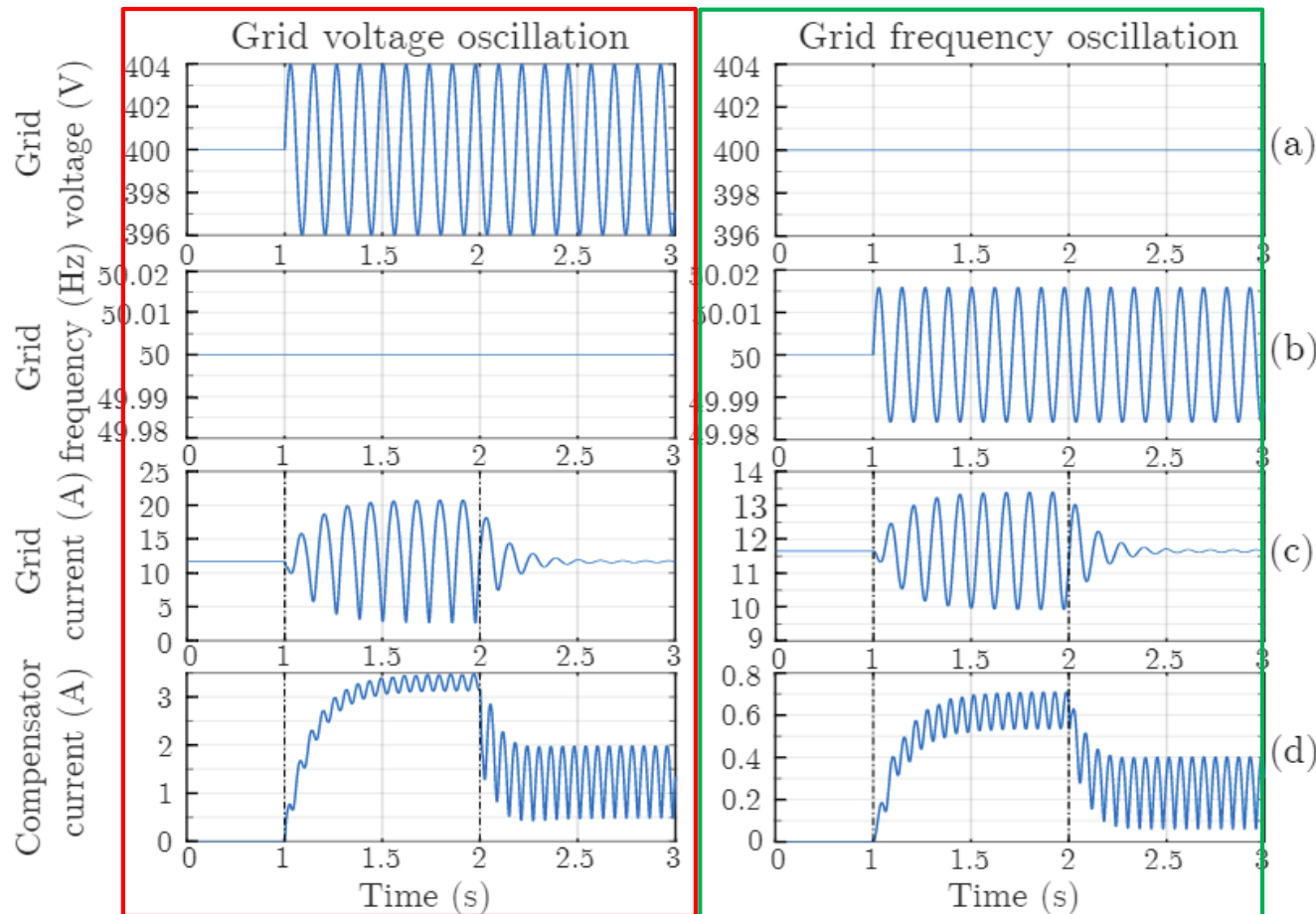
1. C^I es un sistema no-causal y amplificará altas frecuencias.
2. La implementación en controladores industriales requiere la reducción del orden del sistema.



Amortiguamiento de oscilaciones

Cancelación de oscilaciones en microrredes

Resultados de simulación



■ 1° Escenario:
Oscilación subsíncrona de
tensión.

■ 2° Escenario:
Oscilación subsíncrona de
frecuencia.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

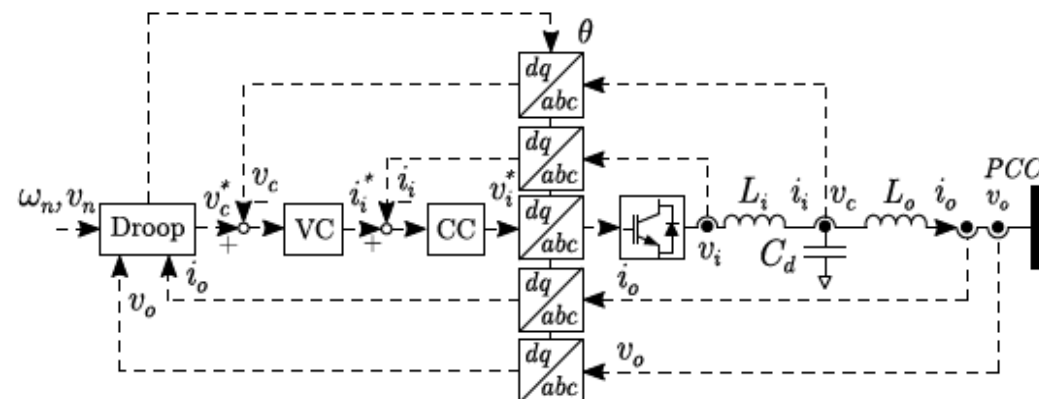


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Estabilidad de microrredes híbridas

Convertidor-Formador

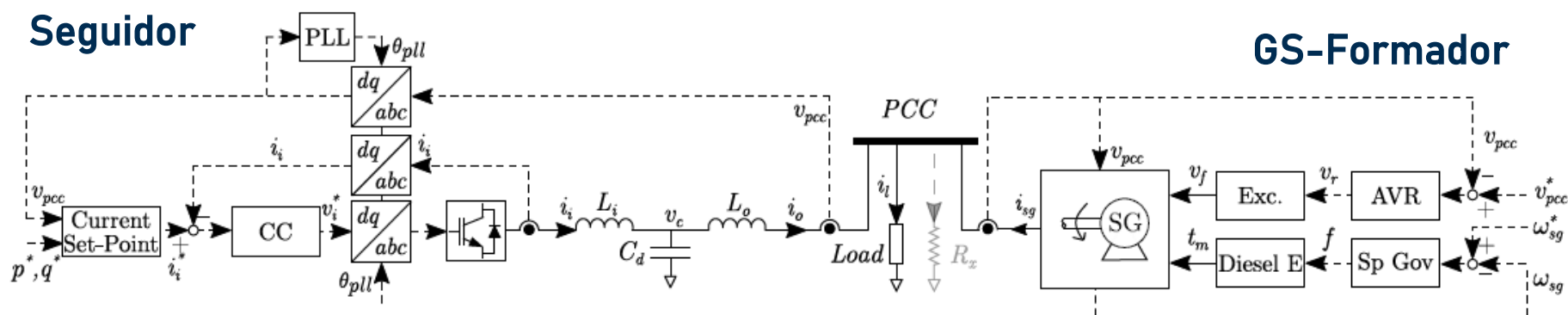


Integrar energía renovables en redes eléctricas:

- Formadores de red (GS o inversores de droop).
- Seguidores de red (fuentes renovables).

Reto - cómo operarlos juntos en una manera segura.

Seguidor



GS-Formador

Estabilidad de microrredes híbridas

Desarrollar modelos de pequeña señal para dos tipos de microrred:

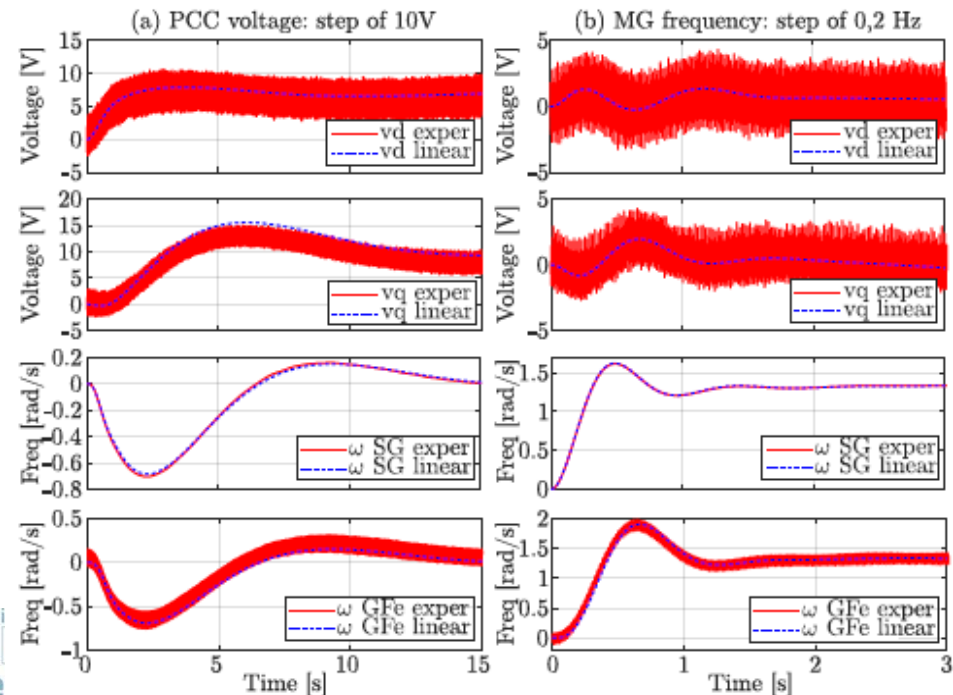
- GS-Formador con un Seguidor
- Convertidor-Formador con un Seguidor

Validación de modelos usando la comparación entre las respuestas temporales de:

- Modelo de pequeña señal
- Dispositivo real

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{SG} \\ \Delta \dot{x}_{inv} \\ \Delta \dot{x}_L \end{bmatrix} = A^{MG1} \begin{bmatrix} \Delta x_{SG} \\ \Delta x_{inv} \\ \Delta x_L \end{bmatrix} + B_v^{MG1} [\Delta v_{sg}^*] + B_\omega^{MG1} [\Delta \omega_{sg}^*] + B_{PQ}^{MG1} \begin{bmatrix} \Delta p^* \\ \Delta q^* \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{invGFe} \\ \Delta \dot{x}_{invGFo} \\ \Delta \dot{x}_L \end{bmatrix} = A^{MG2} \begin{bmatrix} \Delta x_{invGFe} \\ \Delta x_{invGFo} \\ \Delta x_L \end{bmatrix} + B_{\omega v}^{MG2} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{nd} \\ \Delta v_{nd} \end{bmatrix} + B_{PQ}^{MG2} \begin{bmatrix} \Delta p^* \\ \Delta q^* \end{bmatrix},$$



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

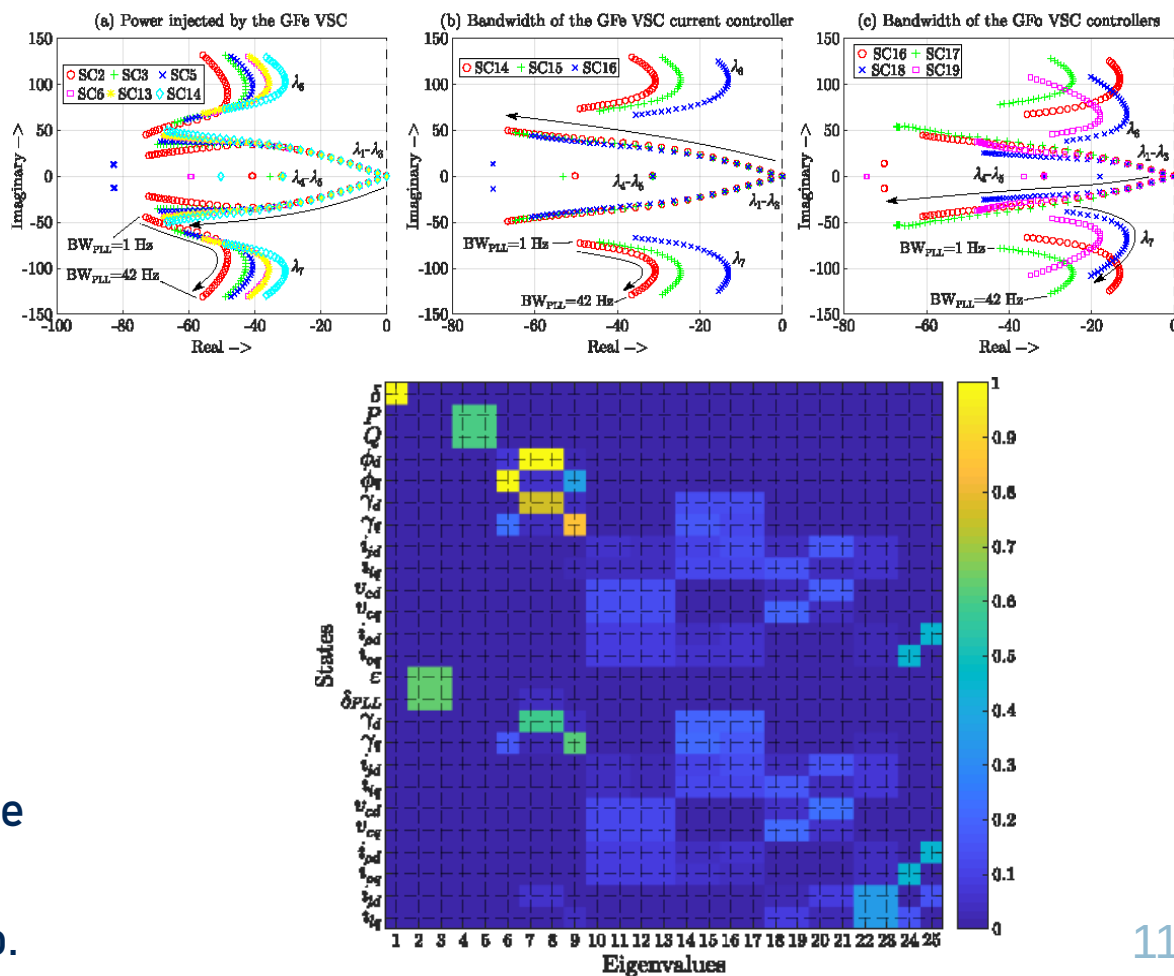


EXCELENCIA
MARIA
DE MAEZTU

de Madrid

Estabilidad de microrredes híbridas

- Se analiza la interacción dinámica entre los enlaces de control de formadores y seguidores.
- Análisis de autovalores.
- Análisis de factores de participación.
- Ancho de banda de PLL es el parámetro más crítico.
- Ancho de banda de controladores de corriente y de tensión tiene impacto.
- Se propuso una guía de diseño.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



instituto
idea
energía

EXCELENCIA
MARIA
DE MAEZTU

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Iniciativa de Empleo Juvenil



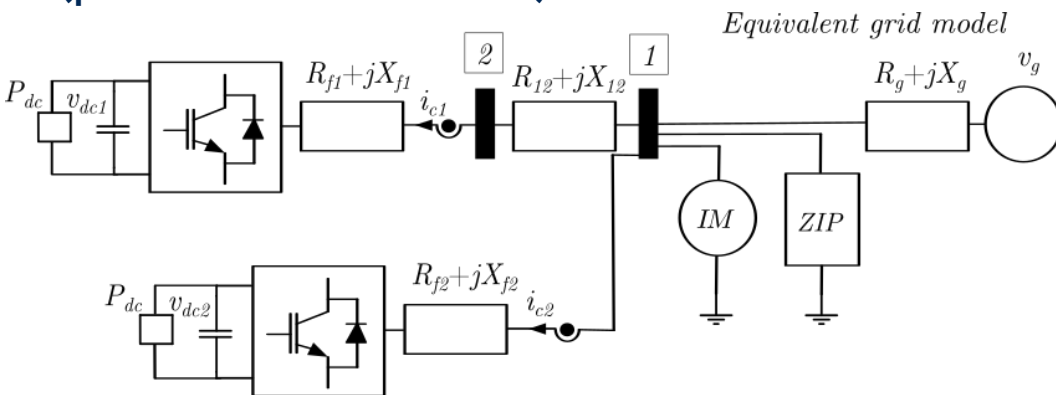
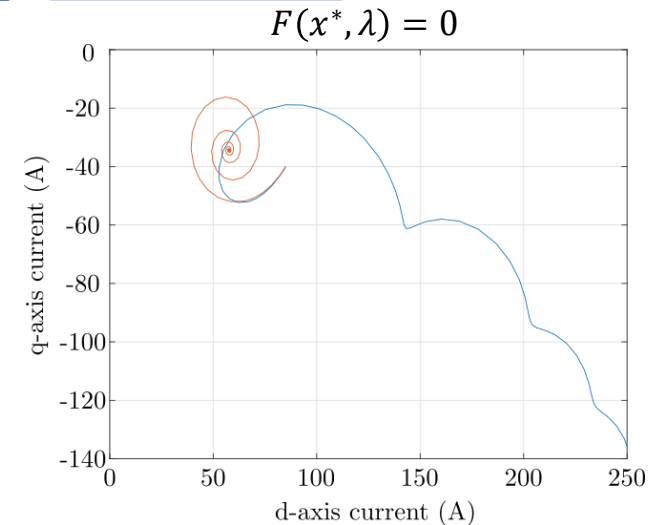
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Análisis de bifurcación de redes eléctricas

- Modelos linealizados de pequeña señal no pueden predecir los cambios en la red con perturbaciones grandes.
- Modelo detallado no-lineal es necesario.
- Se calcula el punto de equilibrio.
- Se aplican cambios suaves de parámetros.
- Definición de estabilidad paramétrica se define calculando los puntos de colapso de sistema (puntos de bifurcación).



- Carga ZIP
- Motor de inducción
- Despliegue masiva de cargas con interfaces de electrónica de potencia.
- Líneas de red
- Modelo equivalente Thevenin de red

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



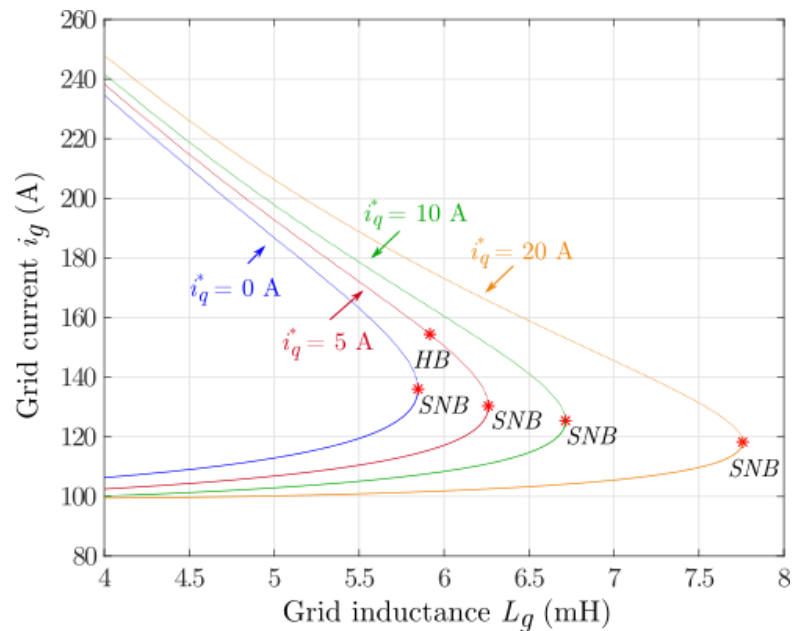
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Análisis de bifurcación de redes eléctricas

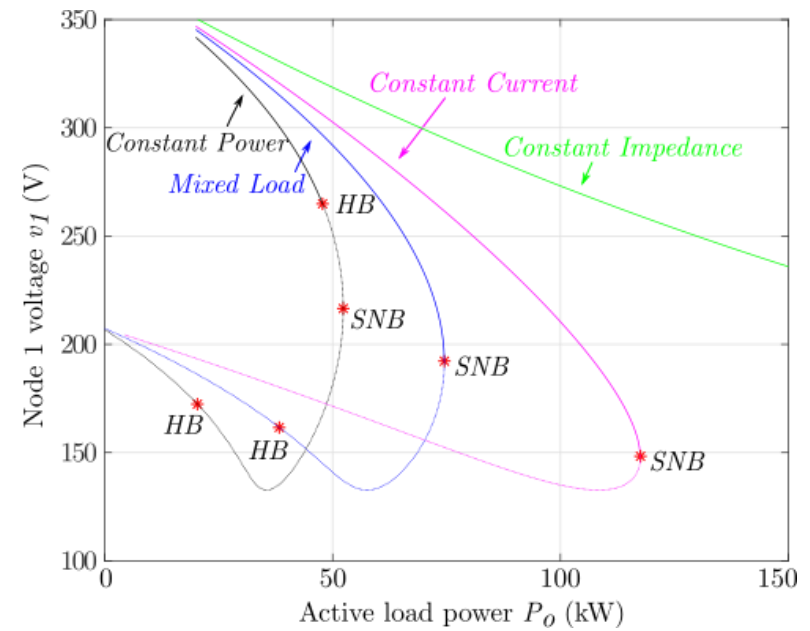
Caso 1: Variación de la inductancia de red

- Definición de región de estabilidad de parámetros.
- Se calculan puntos de bifurcación.
- Mejoras márgenes de estabilidad con la absorción de corriente reactiva.



Caso 2: Variación de carga

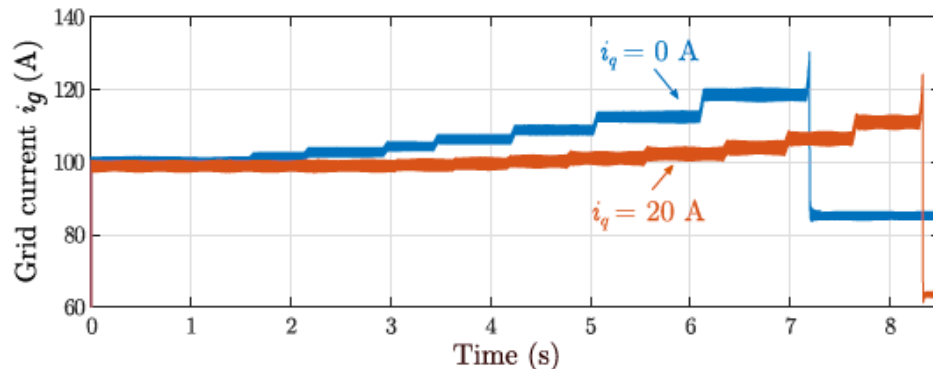
- Se dibujan curvas P-V
- Composición de cargas tiene papel importante para márgenes de estabilidad.
- El caso peor son las cargas de potencia constante.



Análisis de bifurcación de redes eléctricas

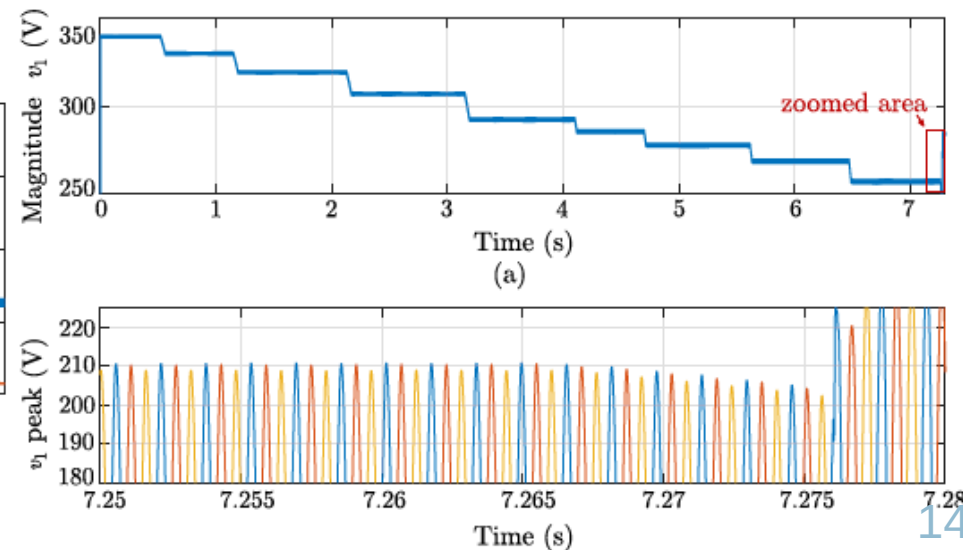
Caso 1: Variación de la inductancia de red

- Se fijan las corrientes.
- Se incrementa la inductancia de la red hasta el punto de bifurcación.
- Protecciones de los convertidores actúan.



Caso 2: Variación de carga

- Se fija la tensión.
- Se incrementa la carga hasta el punto de bifurcación.
- Por la inestabilidad de sistema los convertidores se desconectan.



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

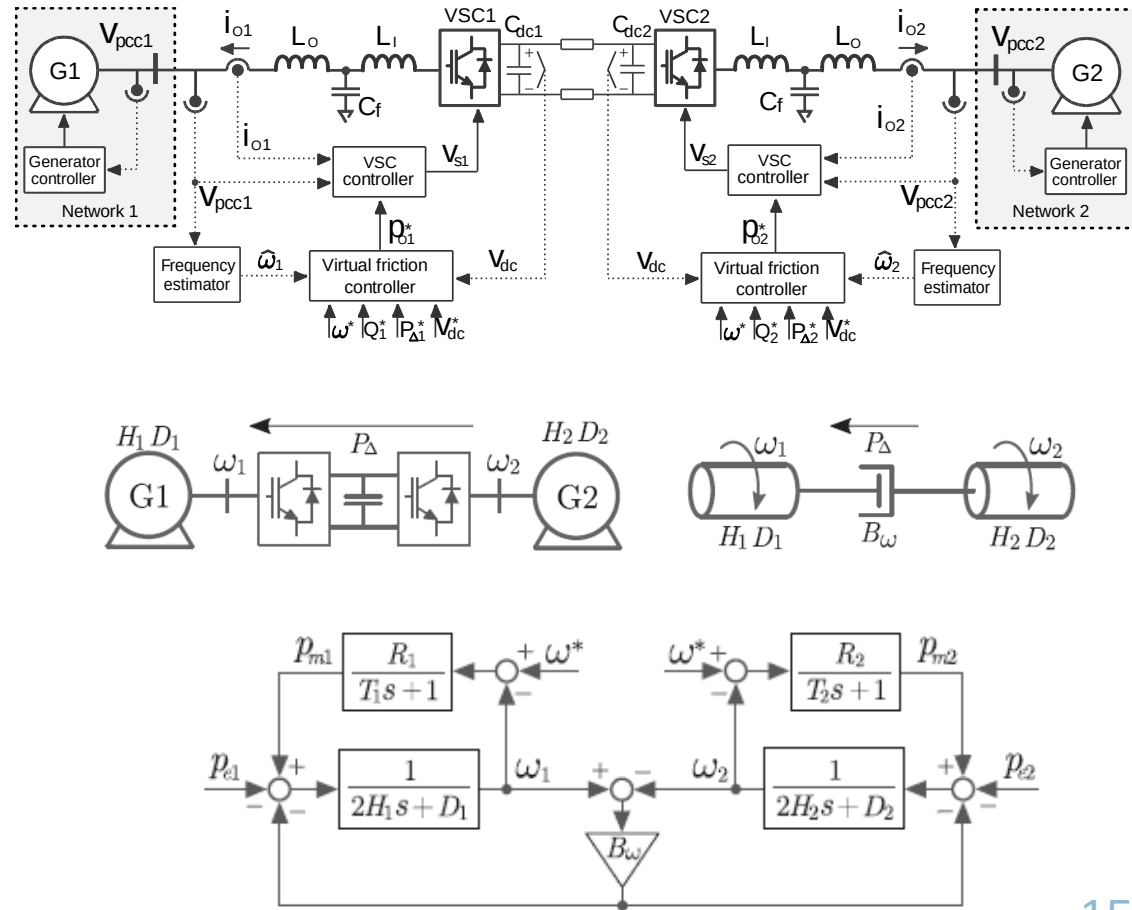


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Control de enlaces de corriente continua

- Enlaces de CC se usan para intercambiar energía entre dos redes de CA.
- En la mayoría de casos hoy en día solo potencia constante se pasa de un nodo a otro.
- Se propone control de enlace utilizando “fricción virtual”.
- Tiene efecto de fricción entre dos masas rotantes.
- Permite el uso de ambas redes para amortiguar oscilaciones.



15

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



instituto
idea
energía

EXCELENCIA
MARIA
DE MAEZTU

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



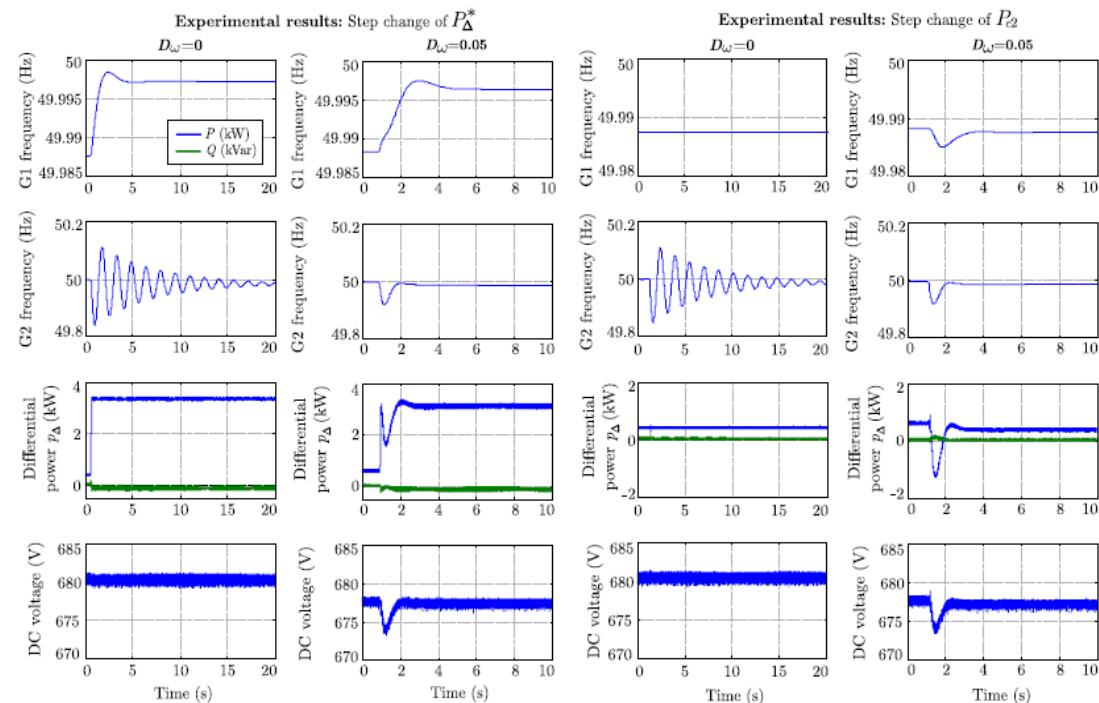
Comunidad
de Madrid

Control de enlaces de corriente continua

Caso de estudio de dos redes acopladas con una de ellas menos amortiguada:

- Transferencia de potencia sin fricción: frecuencia de G2 oscila.
- Transferencia de potencia con fricción: frecuencia de G2 amortiguada.
- Perturbación de potencia local sin fricción: frecuencia de G2 oscila.
- Perturbación de potencia local con fricción: frecuencia de G2 amortiguada.

Resultados experimentales



16

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid



instituto
idea
energía

EXCELENCIA
MARIA
DE MAEZTU

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Iniciamos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Conclusiones

- Casos relevantes: redes de baja inercia y de bajo amortiguamiento.
- Habilitar flexibilidad: facilitar conexión de diferentes recursos a redes CC y CA.
- Importancia de modelado adecuado: lineal o no-lineal.
- Importancia de herramientas de análisis: Nyquist, autovalores, DVS, etc.
- Importancia de configurar los controladores: PLL, corriente, tensión, droop etc.
- Importancia de validar los modelos: simulación o experimento.

¿Preguntas?

¿Ahora mismo? Lanza la pregunta en el chat!

¿Más tarde? Por correo electrónico:

aurelio@comillas.edu
milan.prodanovic@imdea.org

18