

Plataforma Española de Redes Eléctricas

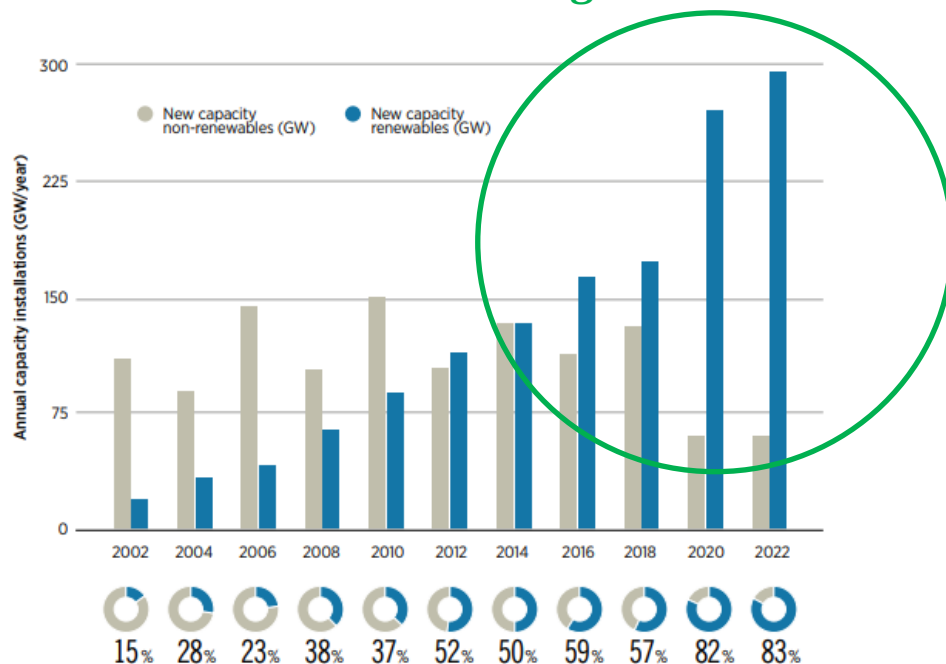
Grupo de trabajo: Electrónica de potencia -Sistemas grid-forming Mayo 2024



- Introducción
- Evolución de servicios y requisitos técnicos de los sistemas eléctricos
- Introducción al concepto Grid-Forming y proyectos demostradores
- Esquemas de protección



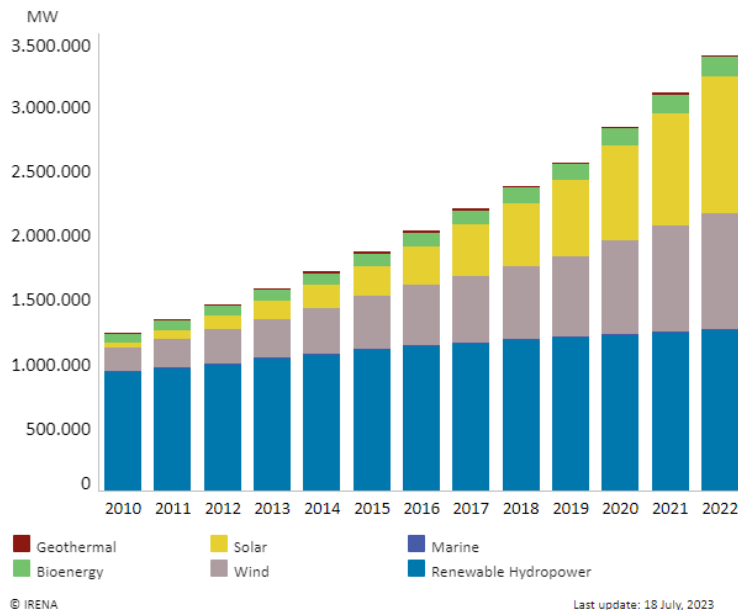
Capacidad anual instalada mundial de la generación renovable vs no renovable



Desplazamiento de la generación síncrona

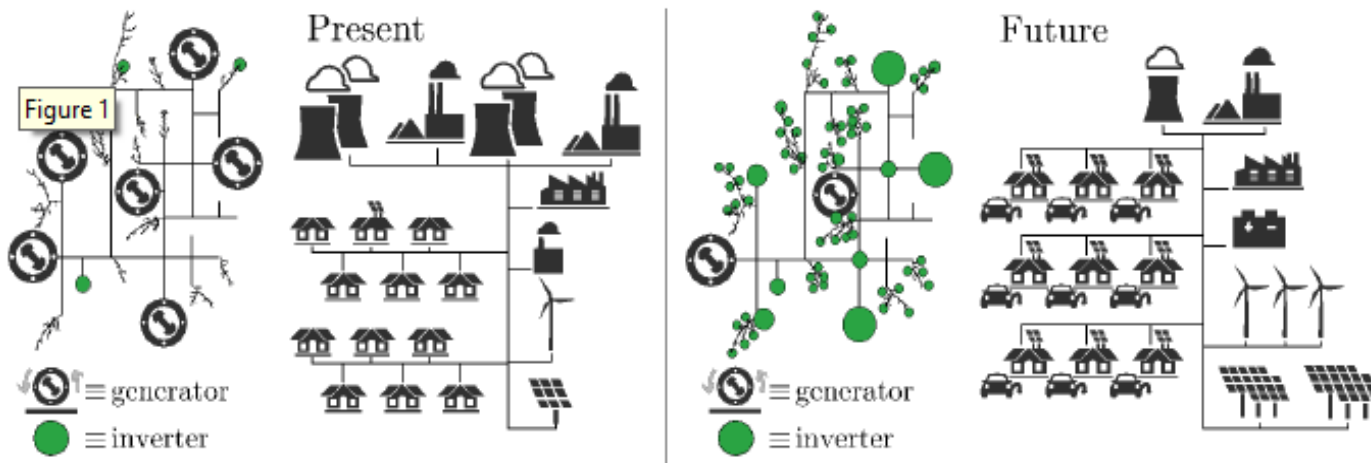
IRENA. Renewable capacity highlights 2023 (Agencia Internacional de Energías Renovables)

Capacidad de la generación renovable en el mundo 2022



IRENA. Renewable capacity highlights 2023

Modelo de generación concentrado distribuido

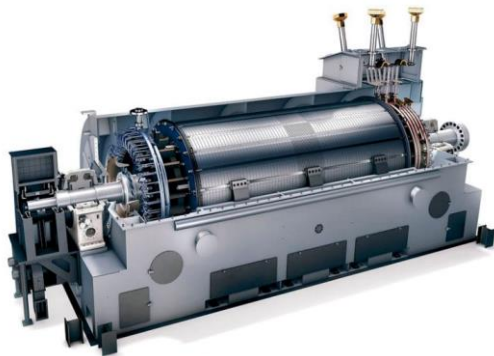


Operación de redes con menor INERCIA y POTENCIA DE CORTOCIRCUITO

Fuente: Research Road Map on Grid Forming Converters. NREL (2021)

GENERACIÓN SÍNCRONA VS GENERACIÓN RENOVABLE

Generadores Síncronos



Máquina eléctrica rotativa

- Provee servicios de control de tensión y frecuencia, respuesta inercial, reposición del servicio, etc..
- Aporta corriente de cortocircuito ante falta

Generación renovable

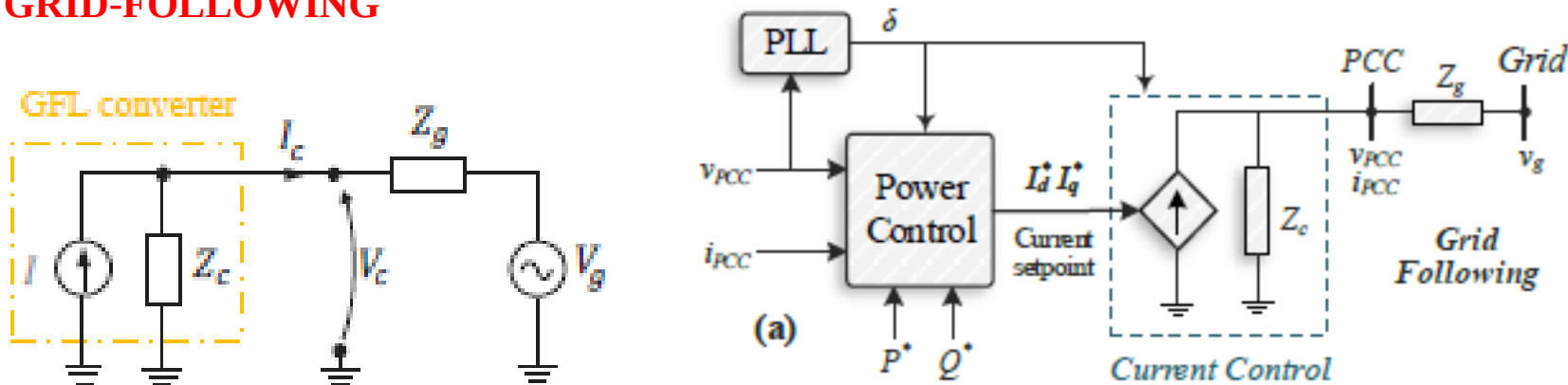


Convertidores electrónicos

- Contribuye al control de tensión y frecuencia.
- No tiene respuesta inercia y no contribuye a la reposición del servicio..
- No aporta corriente de cortocircuito ante falta

TECNOLOGÍA DE CONVERTIDORES

GRID-FOLLOWING



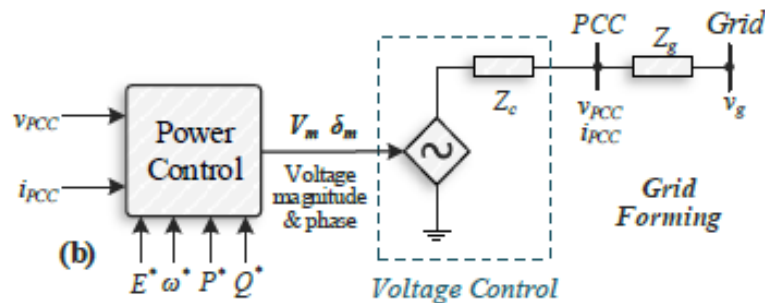
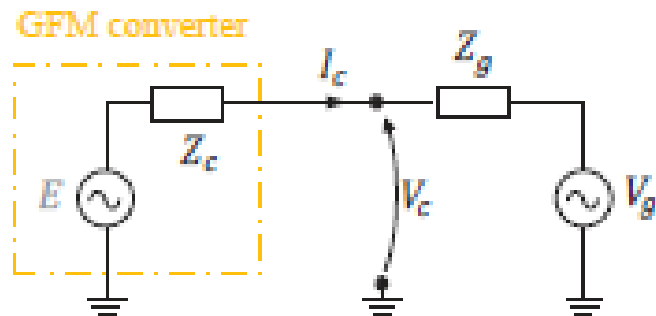
Actúan como **fuentes de corriente** y emplean un seguidor de fase en lazo cerrado PLL

Precisan de una tensión estable en sus terminales para su correcto funcionamiento

Carecen de respuesta inercial y no pueden funcionar en modo aislado

TECNOLOGÍA DE CONVERTIDORES

GRID-FORMING

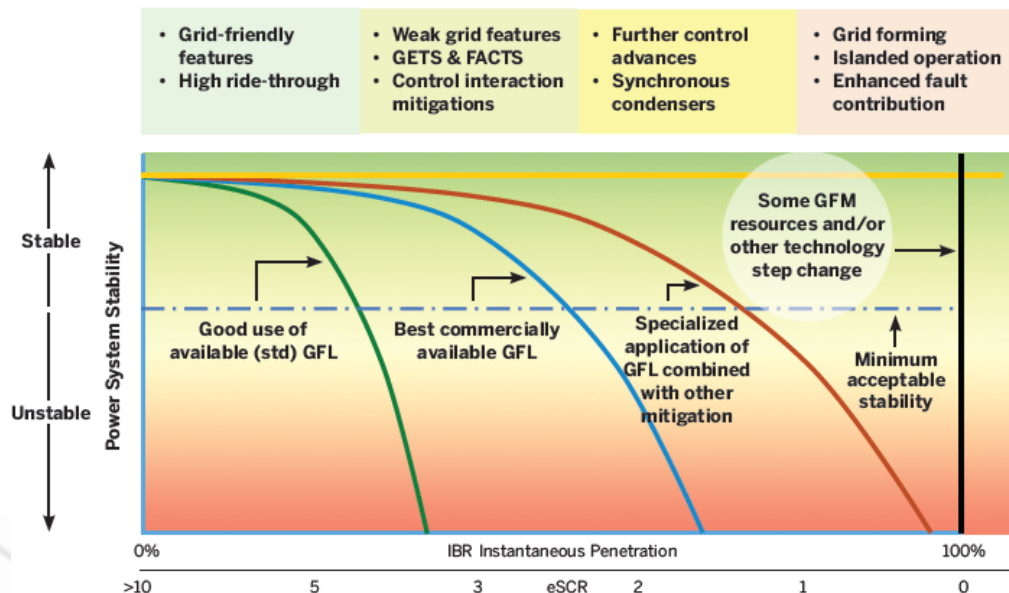


Actúan como **fuentes de tensión** similar a un generador síncrono

No requieren de la estimación de la tensión en sus terminales mediante un PLL

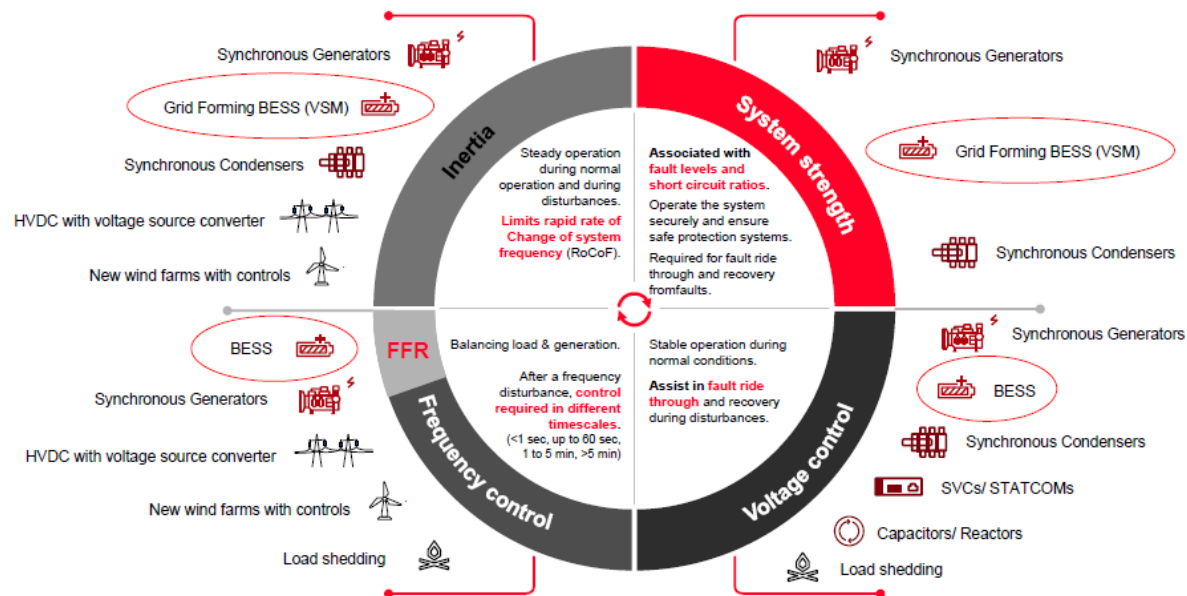
Presentan respuesta inercial y pueden funcionar en modo aislado

EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA HACIA SISTEMAS 100% RENOVABLES



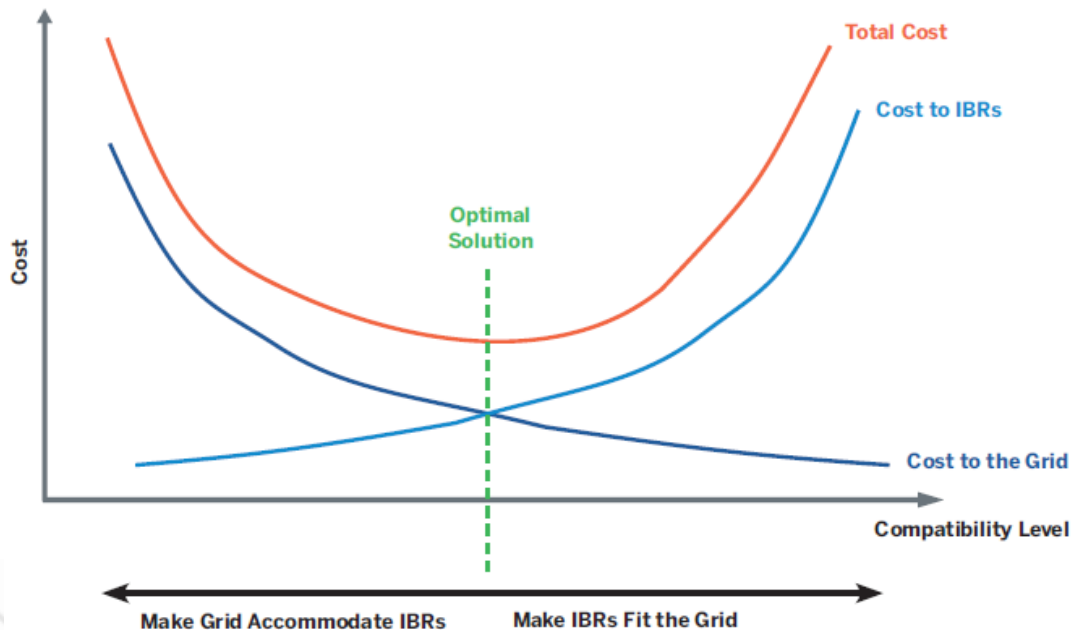
Fuente: GE and HickoryLedge

REQUISITOS DE OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS



La generación renovable deberá tener capacidades similares a la generación síncrona

COSTE DE LA INTEGRACIÓN DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS EN SS.EE.



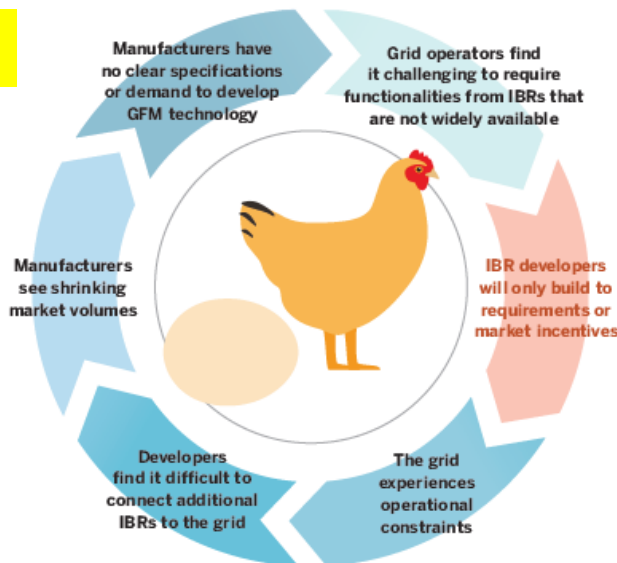
Fuente: Julia Matevosyan et al. Grid-Forming Technology in Energy System Integration. ESIG (March 2022)

CAPACIDADES Y REQUISITOS DE LOS GFM

Capacidades de los GFM



Visión del Fabricante



Requisitos a los GFM

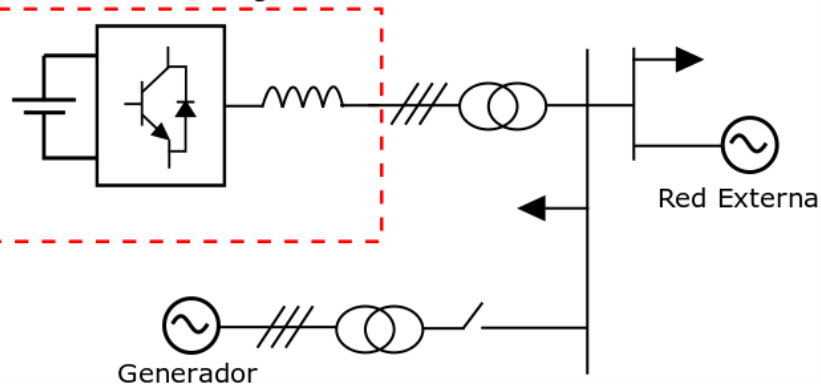


Visión del Operador

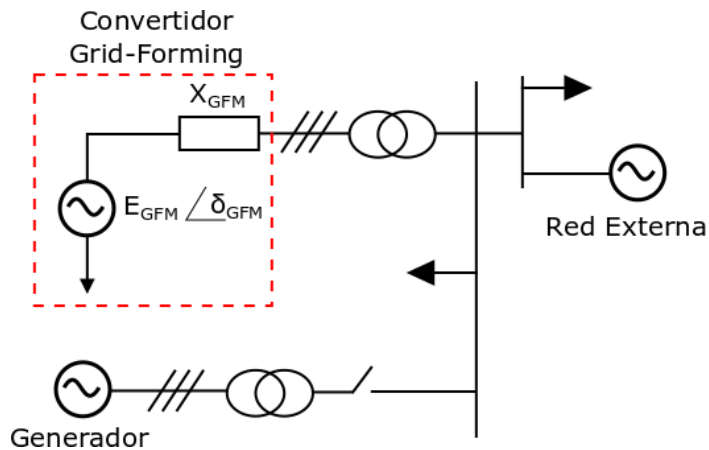
Fuente: Julia Matevosyan et al. Grid-Forming Technology in Energy System Integration. ESIG (March 2022)

Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.

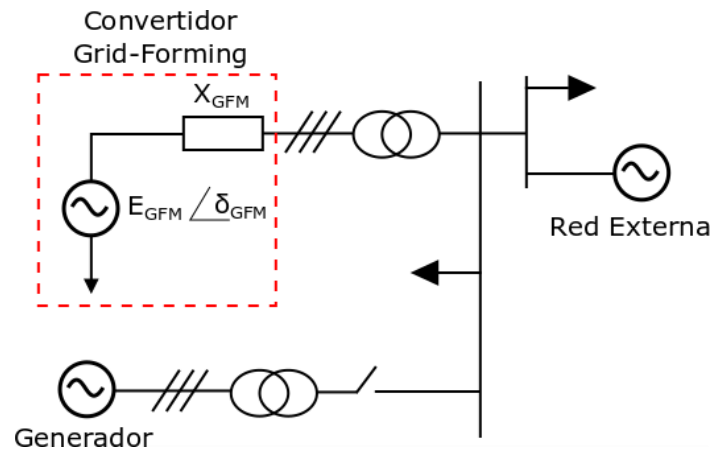
Convertidor
Grid-Forming



Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



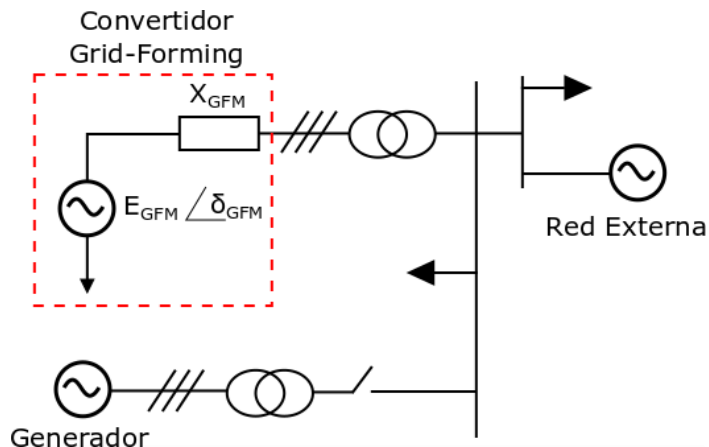
Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



Funcionalidades básicas

Auto-sincronización con la red

Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.

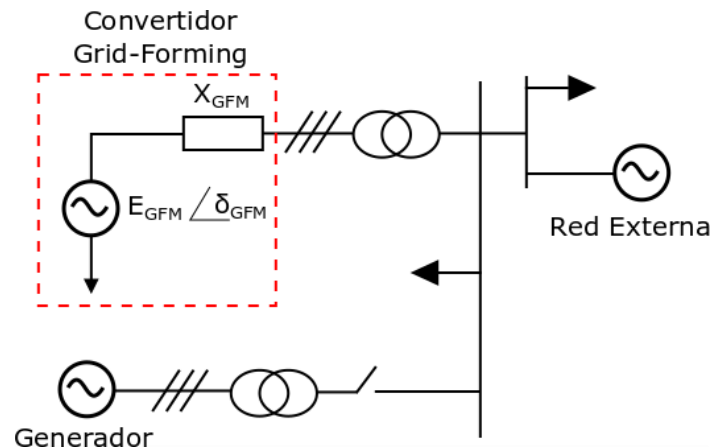


Funcionalidades básicas

Auto-sincronización con la red

Regulación de la potencia activa y reactiva en el estado estacionario

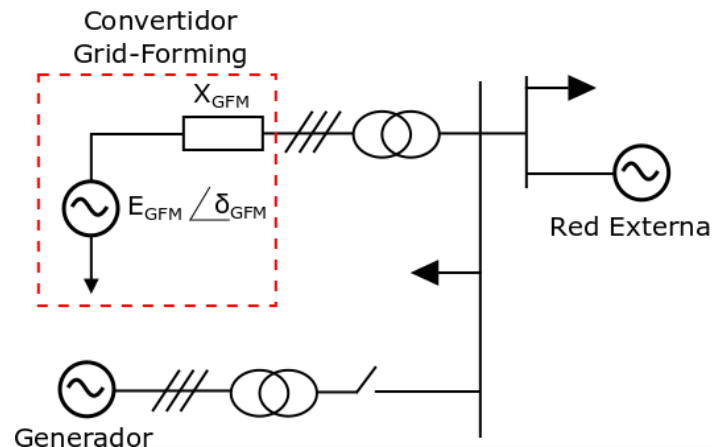
Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



Funcionalidades básicas

- Auto-sincronización con la red
- Regulación de la potencia activa y reactiva en el estado estacionario
- Capacidad de soportar saltos de fase y proporcionar potencia activa

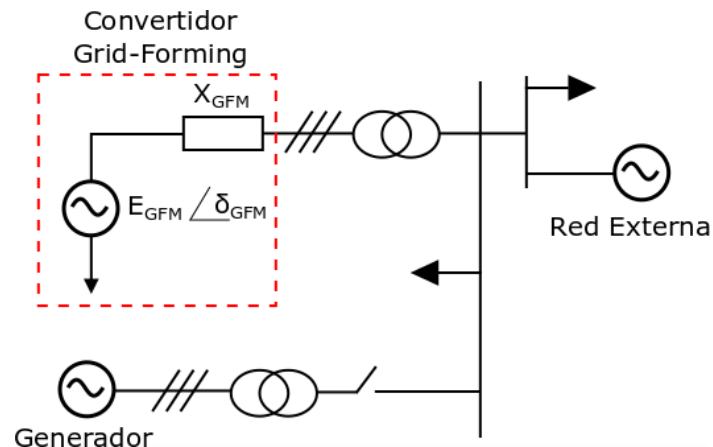
Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



Funcionalidades básicas

- Auto-sincronización con la red
- Regulación de la potencia activa y reactiva en el estado estacionario
- Capacidad de soportar saltos de fase y proporcionar potencia activa
- Capacidad de soportar variaciones de frecuencia (RoCoF) y proporcionar respuesta inercial

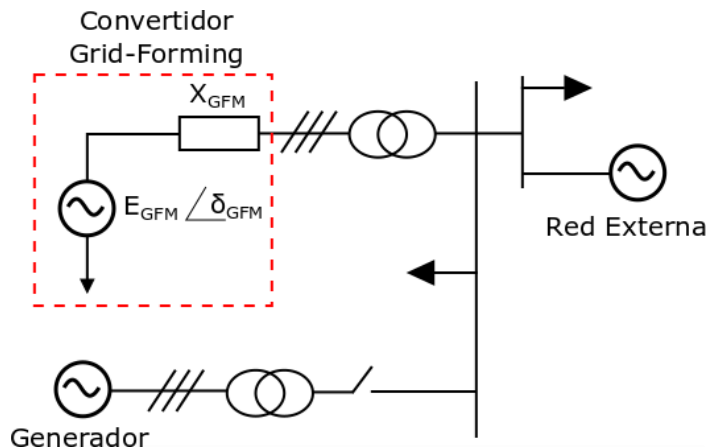
Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



Funcionalidades básicas

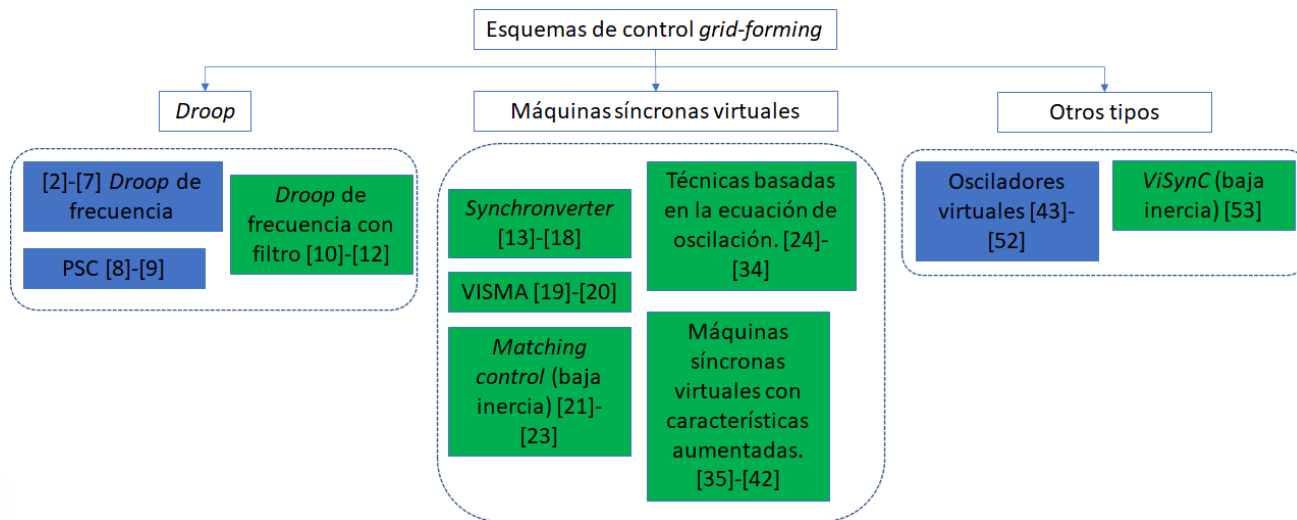
- Auto-sincronización con la red
- Regulación de la potencia activa y reactiva en el estado estacionario
- Capacidad de soportar saltos de fase y proporcionar potencia activa
- Capacidad de soportar variaciones de frecuencia (RoCoF) y proporcionar respuesta inercial
- Damping positivo

Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



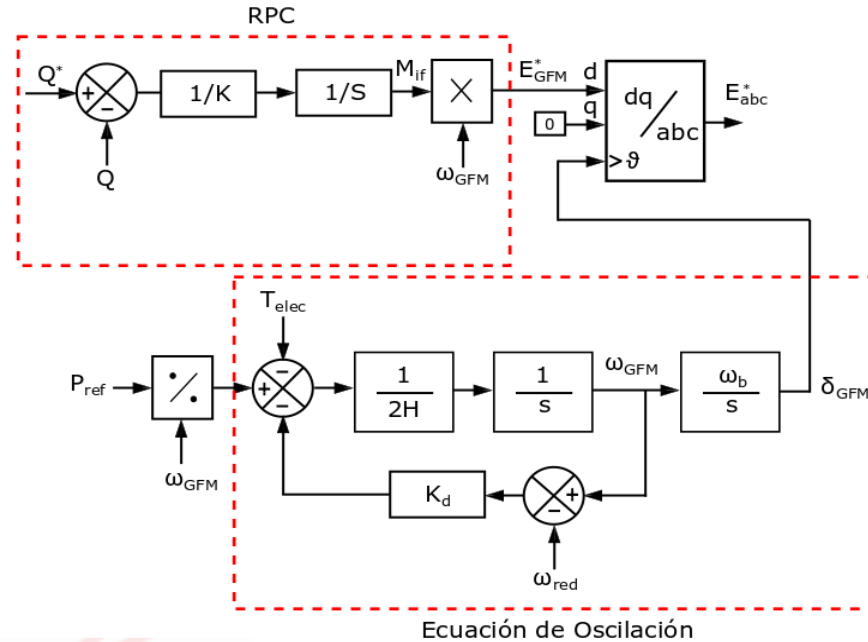
Funcionalidades básicas	Auto-sincronización con la red
	Regulación de la potencia activa y reactiva en el estado estacionario
	Capacidad de soportar saltos de fase y proporcionar potencia activa
	Capacidad de soportar variaciones de frecuencia (RoCoF) y proporcionar respuesta inercial
	Damping positivo
Servicios auxiliares	Black-start
	Funcionamiento en isla
	Control primario de tensión y frecuencia
	Amortiguamiento oscilaciones inter-área (POD)
	Sumidero para componentes de secuencia negativa y componentes armónicas

Grid-forming: Capacidad de un recurso distribuido para comportarse en el punto de conexión como una fuente de tensión ideal detrás de una impedancia.



GTEP. Sistemas Grid-Forming. Concepto

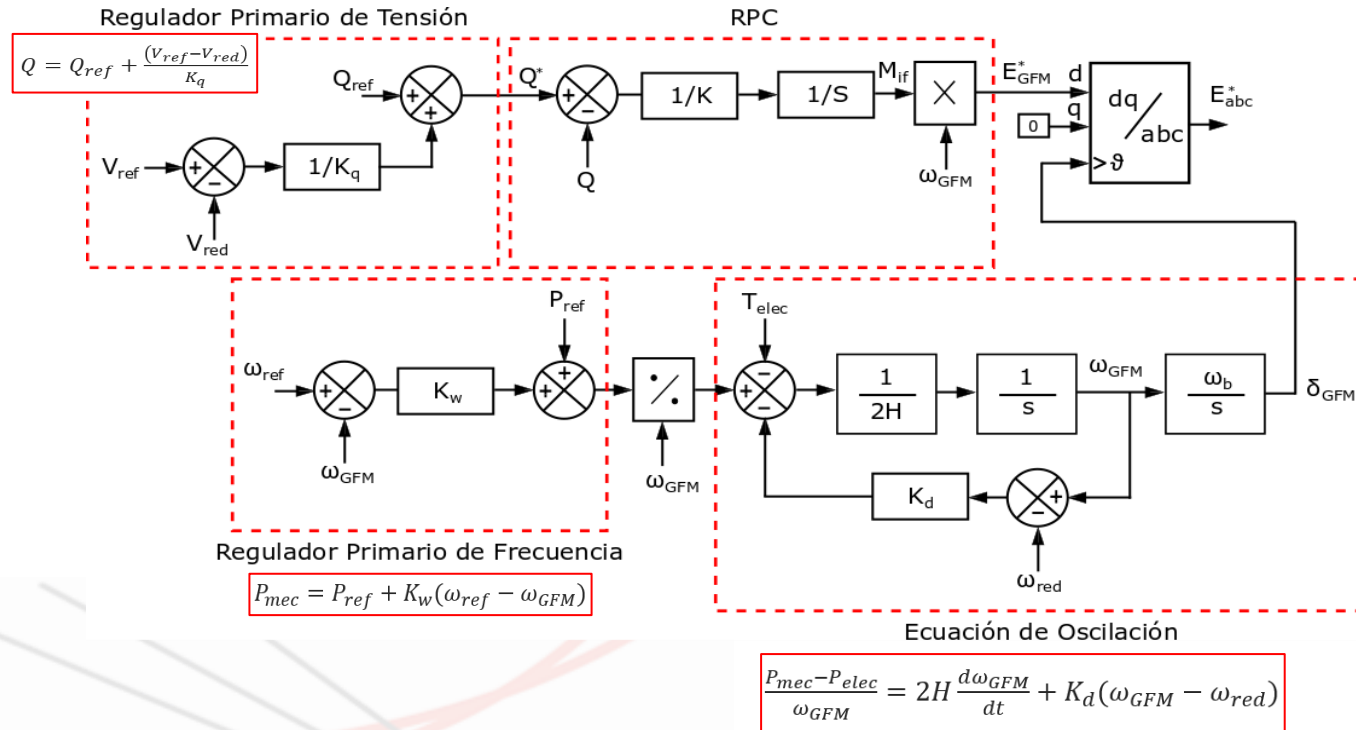
Implementación de un esquema grid-forming del tipo Synchroverter



$$\frac{P_{mec} - P_{elec}}{\omega_{GFM}} = 2H \frac{d\omega_{GFM}}{dt} + K_d(\omega_{GFM} - \omega_{red})$$

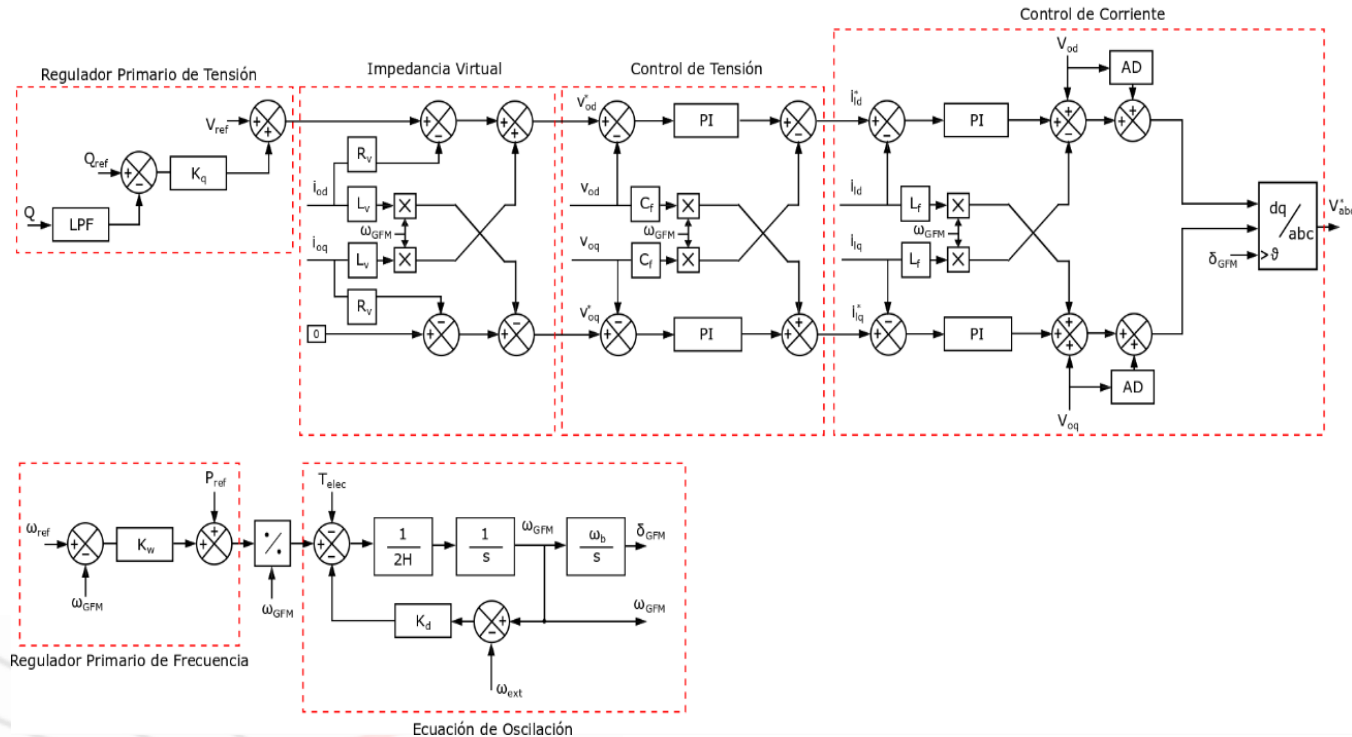
GTEP. Sistemas Grid-Forming. Concepto

Implementación de un esquema grid-forming del tipo Synchroverter

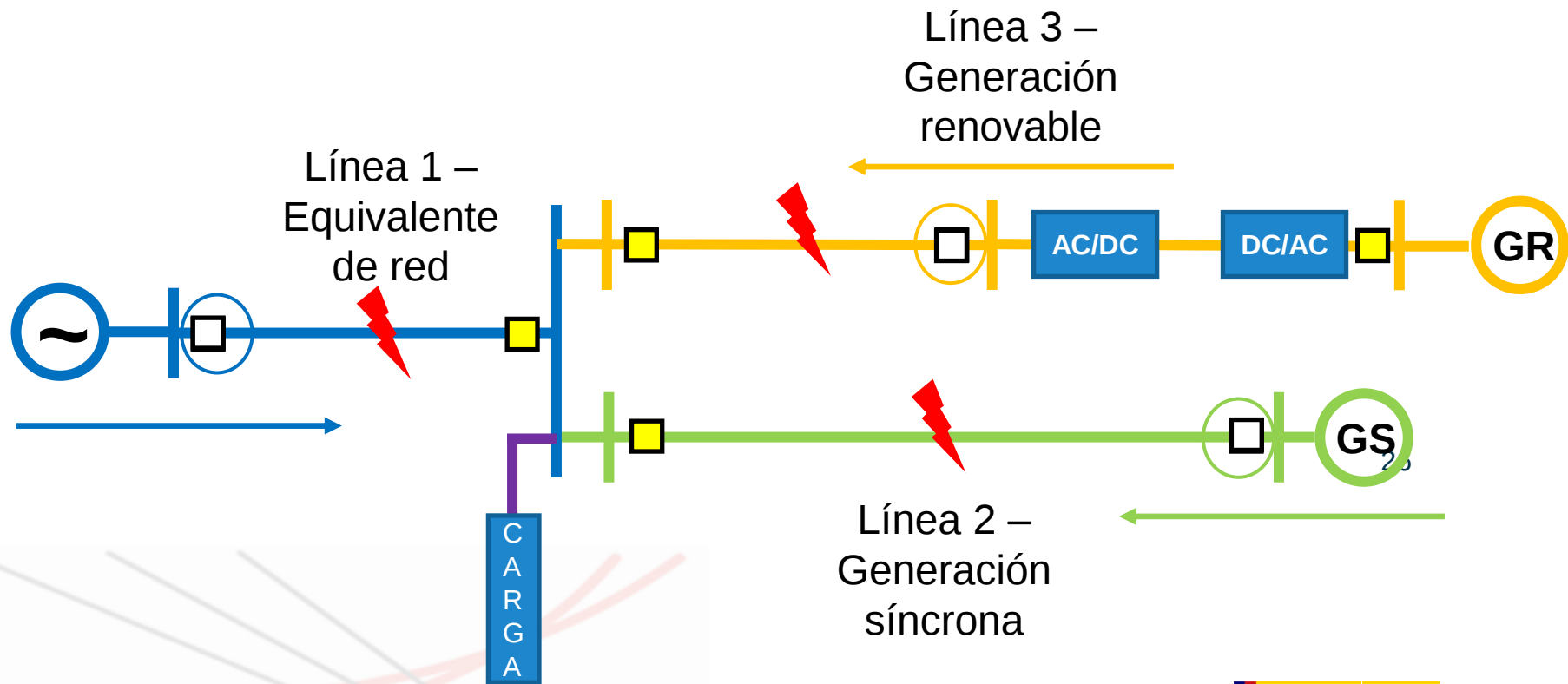


GTEP. Sistemas Grid-Forming. Concepto

Implementación de un esquema grid-forming VC-VSM.

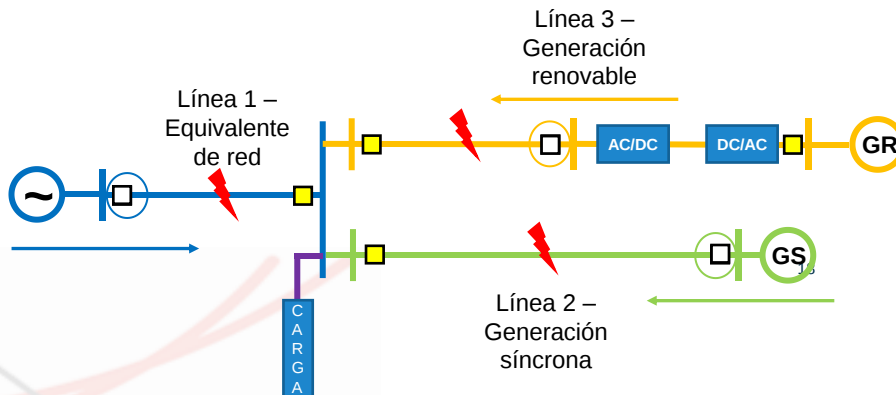


Referencia	Año	Potencia (MW)	Nivel de tensión	Aplicación
Zurich BESS (Suiza)	2012	1	LV-MV	BESS
AusNet GESS (Australia)	2012	1	MV	BESS
Proyectos de SMA	2017-2019	0.8-15	LV-MV	BESS
Hornsedale (Australia)	2017-2020	150	HV	BESS
ESCRI-SA (Australia)	2018-2020	30	HV	BESS
Central La Plana (España)	2018	-	MV	BESS
DEMOCRAT (Portugal)	2018	0.25	LV	BESS
NREL Campus (USA)	2019	1.25	MV	BESS
OSMOSE (Europa)	2018	0.72-1	LV-MV	BESS
Fluence-Siemens-Litgrid (Lituania)	2021	1	HV	BESS
Dersalloch Wind Farm (UK)	2019	69	MV	Aerogeneradores
Mackinac HVDC (USA)	2012	200	HV	HVDC
GE (USA)	2020	-	-	Inversores PV
ABB	2020	20	MV	Emulador de red



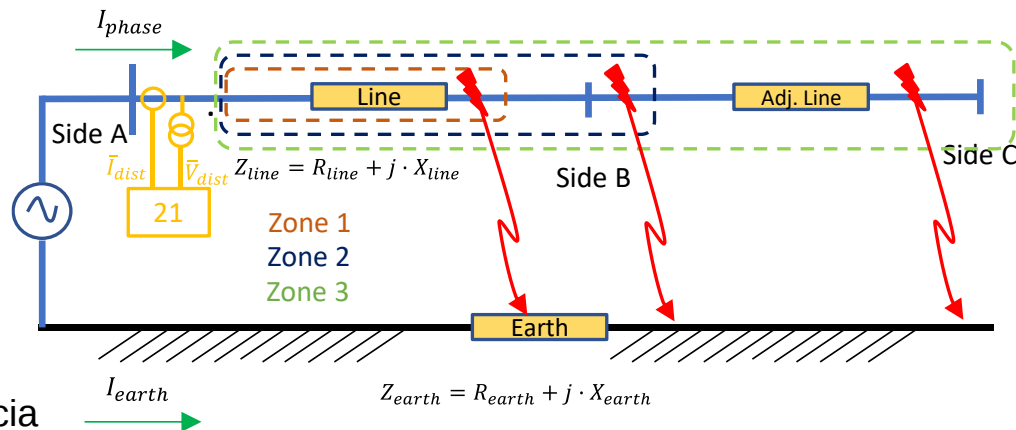
Principales retos para los sistemas de protección

- Redes más débiles, con intensidad de cortocircuito reducida.
- Combinación de generación síncrona y renovable.
- Combinación de algoritmos de control *grid forming* y *grid following*
- Diferentes fabricantes de equipos con controles implementados de forma distinta
- Flujos de potencia bidireccionales en redes donde anteriormente no lo eran



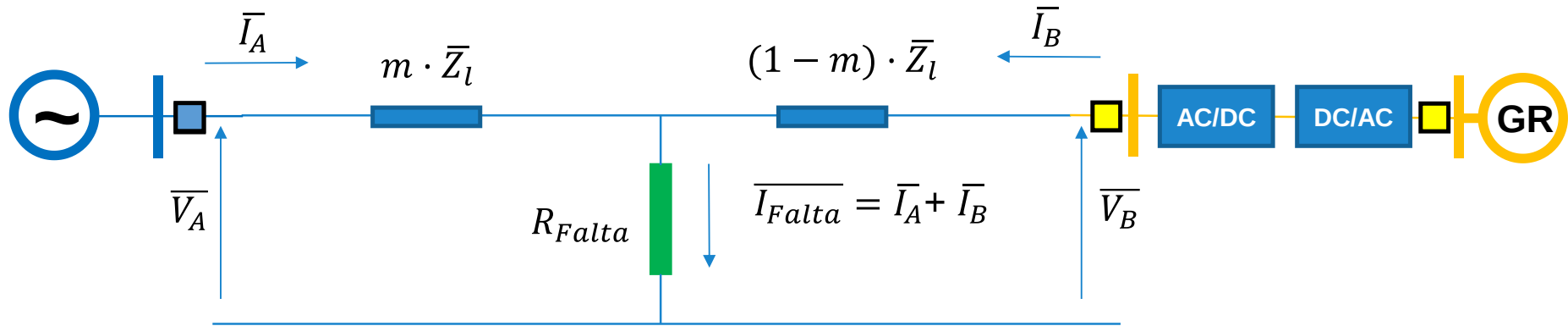
Algoritmos de protección más afectados

- Funciones de sobreintensidad
- Función de distancia (medición de impedancia), con sus algoritmos adicionales:
 - o Detección de falta, selección de fase en falta, direccionalidad.
 - o Bloqueo por oscilación de potencia
 - o Esquemas de comunicación (permisivos, extremo débil)



$$\bar{Z}_A = \frac{\bar{U}_{phA}}{\bar{I}_{phA} - k_0 \cdot \bar{I}_{earth}} \quad \bar{k}_0 = \frac{\bar{Z}_{Earth}}{\bar{Z}_{line}} \quad \bar{Z}_{AB} = \frac{\bar{U}_{phA} - \bar{U}_{phB}}{\bar{I}_{phA} - \bar{I}_{phB}}$$

Medición de impedancia – Condición de extremo débil y no homogeneidad de la red



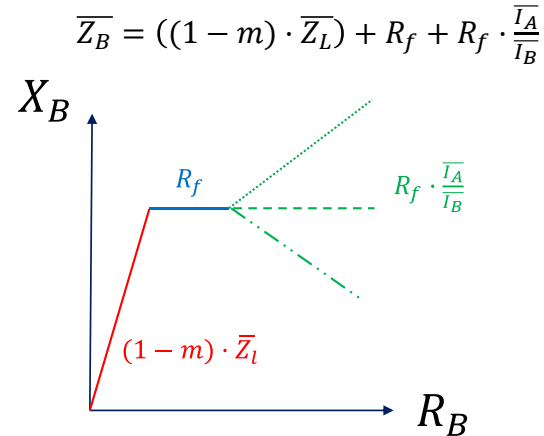
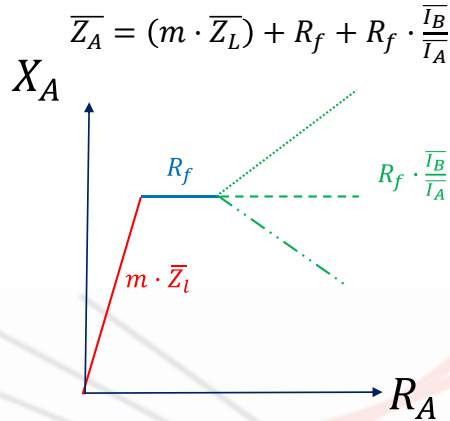
Medición de impedancia – Condición de extremo débil y no homogeneidad de la red

$$\overline{V}_A = (m \cdot \overline{Z}_L) \cdot \overline{I}_A + R_f \cdot (\overline{I}_A + \overline{I}_B)$$

$$\overline{V}_B = ((1 - m) \cdot \overline{Z}_L) \cdot \overline{I}_B + R_f \cdot (\overline{I}_A + \overline{I}_B)$$

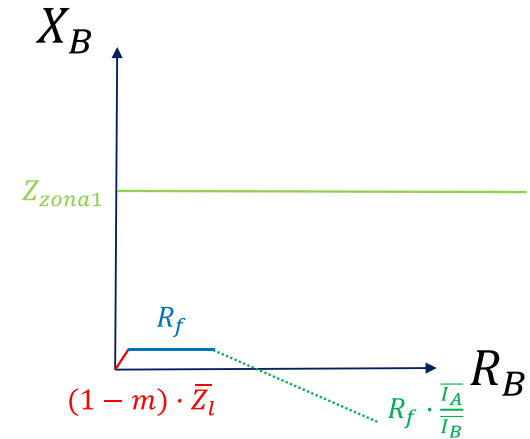
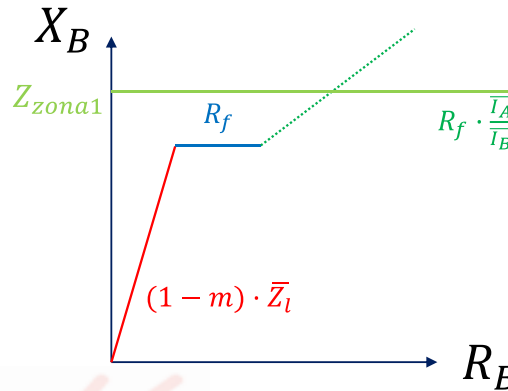
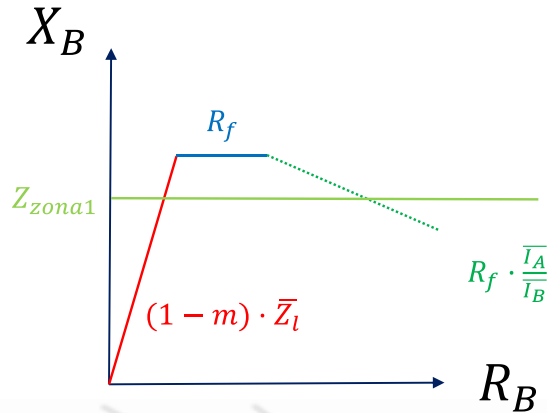
$$\overline{Z}_A = \frac{\overline{V}_A}{\overline{I}_A} = \frac{(m \cdot \overline{Z}_L) \cdot \overline{I}_A + R_f \cdot (\overline{I}_A + \overline{I}_B)}{\overline{I}_A}$$

$$\overline{Z}_B = \frac{\overline{V}_B}{\overline{I}_B} = \frac{((1 - m) \cdot \overline{Z}_L) \cdot \overline{I}_B + R_f \cdot (\overline{I}_A + \overline{I}_B)}{\overline{I}_B}$$



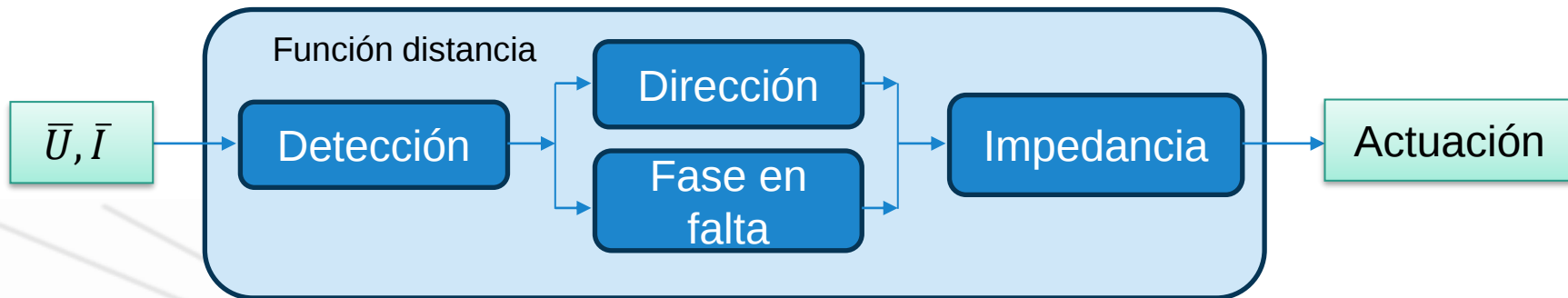
Medición de impedancia – Condición de extremo débil y no homogeneidad de la red

- Posibles sobrealcances o subalcances de la zona de impedancia



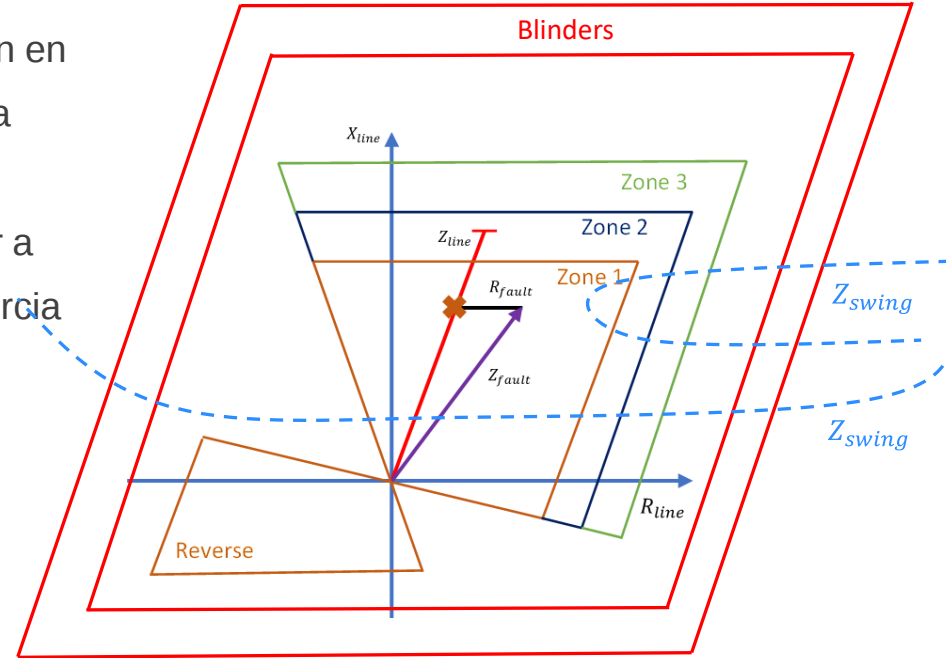
Detección de falta, selección de fase en falta, detección de direccionalidad

- Intensidad de 1.1-1.2 pu
- Intensidad de secuencia negativa limitada o suprimida
- Transitorio tras inicio de falta
- Algoritmos basados en fasores y cantidades incrementales



Oscilación de potencia

- La falta de inercia puede causar una variación en la impedancia con una dinámica diferente a la que se observa con generación síncrona.
- Los algoritmos *grid-forming* pueden contribuir a limitar este problema con la emulación de inercia



Necesidades

- Algoritmos multicriterio que combinan diferentes principios de protección se han mostrado como buenas opciones para los diferentes escenarios.
- Mayor conocimiento sobre el funcionamiento de los algoritmos de control *grid-forming* en conjunto con las protecciones.
- Actualización constante de los códigos de red para adaptarse a las capacidades de los equipos de electrónica de potencia.
- Sistemas de comunicaciones en las líneas para intercambio de datos entre las protecciones (87L, sistemas de área)