



Fundamentos de la protección de sistemas eléctricos de potencia

Dr. Ernesto Vázquez Martínez
Universidad Autónoma de Nuevo León, México

Sistemas de automatización

- ▶ Regulación de parámetros en régimen normal:
 - ▶ Regulación automática de frecuencia,
 - ▶ Regulación del flujo en líneas de transmisión,
 - ▶ Regulación de voltaje y potencia reactiva,
 - ▶ Sincronización automática de generadores, etc.
- ▶ Automatización de los regímenes de avería
 - ▶ Protección,
 - ▶ Recierre automático,
 - ▶ Conexión automática de reserva,
 - ▶ Corte de carga (frecuencia/voltaje),
 - ▶ Sistemas especiales de automatización, etc.

Expertise

Protección de elementos:
Líneas, generadores,
transformadores, etc.

PDS:
Algoritmos,
filtrado, etc.

SEP:
Análisis, estabilidad,
operación, transitorios,
etc.

Comunicaciones:
Protocolos, integración
redes, etc.

Impacto tecnológico



Características actuales de los sistemas eléctricos de potencia

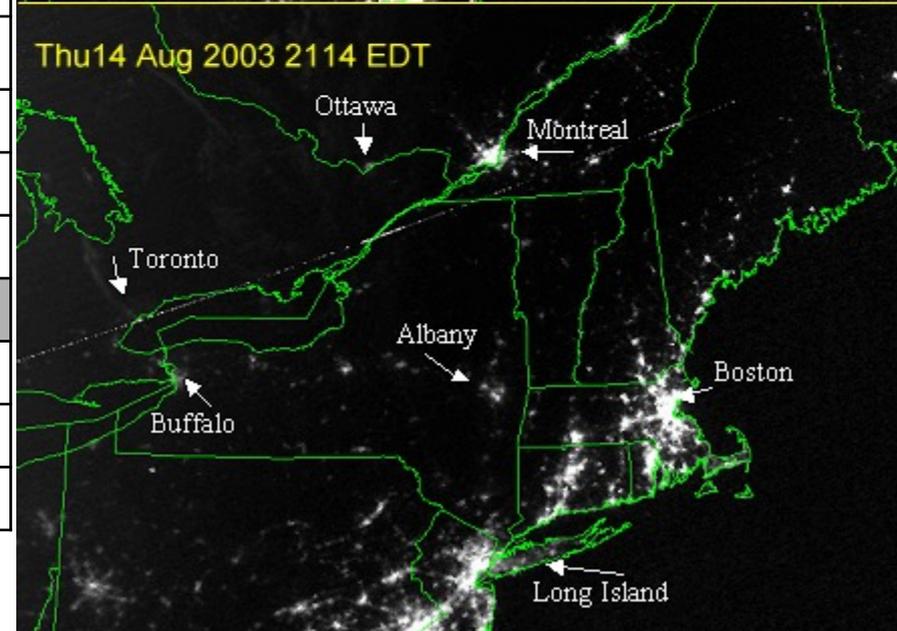
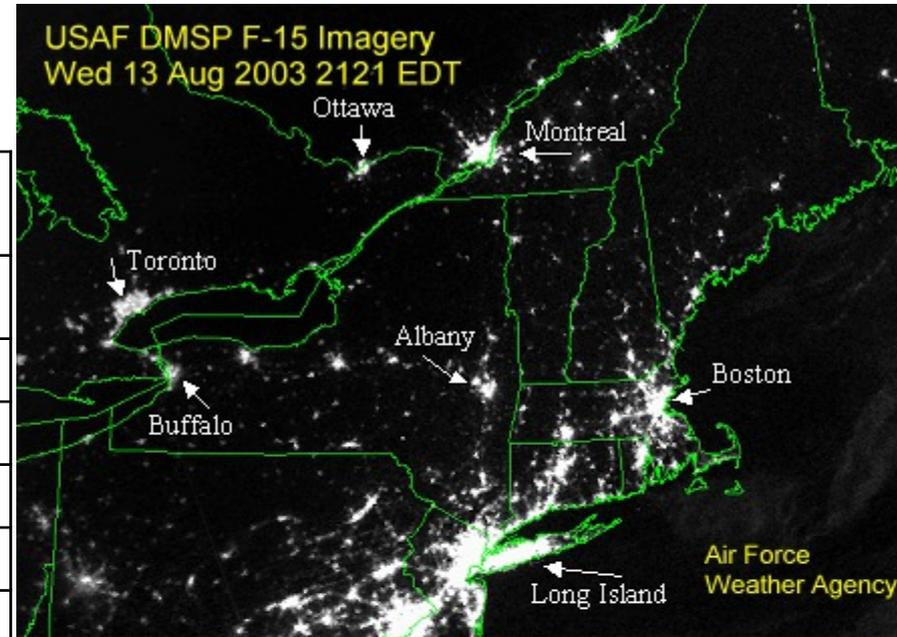
- ▶ Condiciones de operación cerca de los límites de seguridad del sistema,
 - ▶ Unidades de generación de gran tamaño (fuentes primarias de energía disponibles),
 - ▶ Líneas de transmisión muy largas entre generación y carga,
 - ▶ Niveles de redundancia en los sistemas de transmisión,
- ▶ Generación distribuida (generadores independientes).

Origen de un disturbio (2)

- ▶ Oscilaciones de potencia pueden ocasionar operaciones incorrectas de las zonas de protección 2 y 3 de relevadores de distancia,
- ▶ Algunos generadores pueden ser desconectados, debido a una pérdida del balance carga-generación (baja frecuencia y bajo voltaje),
- ▶ Los generadores pueden ser desconectados por:
 - ▶ Baja frecuencia,
 - ▶ Bajo voltaje,
 - ▶ Sobreexcitación,
 - ▶ Pérdida de sincronismo,
 - ▶ Sobre voltaje.

Disturbios en el mundo

Location	MW or Population
US-NE / 65	20,000 MW, 30M people
New York / 77	6,000 MW, 9M people
France / 78	29,000 MW
Japan / 87	8,200 MW
US-West / 94	7,500 MW
US-West / 94	9,300 MW
US-West / 96	11,700 MW
US-West / 96	1,200 MW
US-West 96	30,500 MW
Brazil /99	25,000 MW
US-NE / 03	62,000 MW, 50M people
London / 03	724 MW, 476K people
Denmark & Sweden / 03	4.85M people
Italy / 03	27,700 MW, 57M people



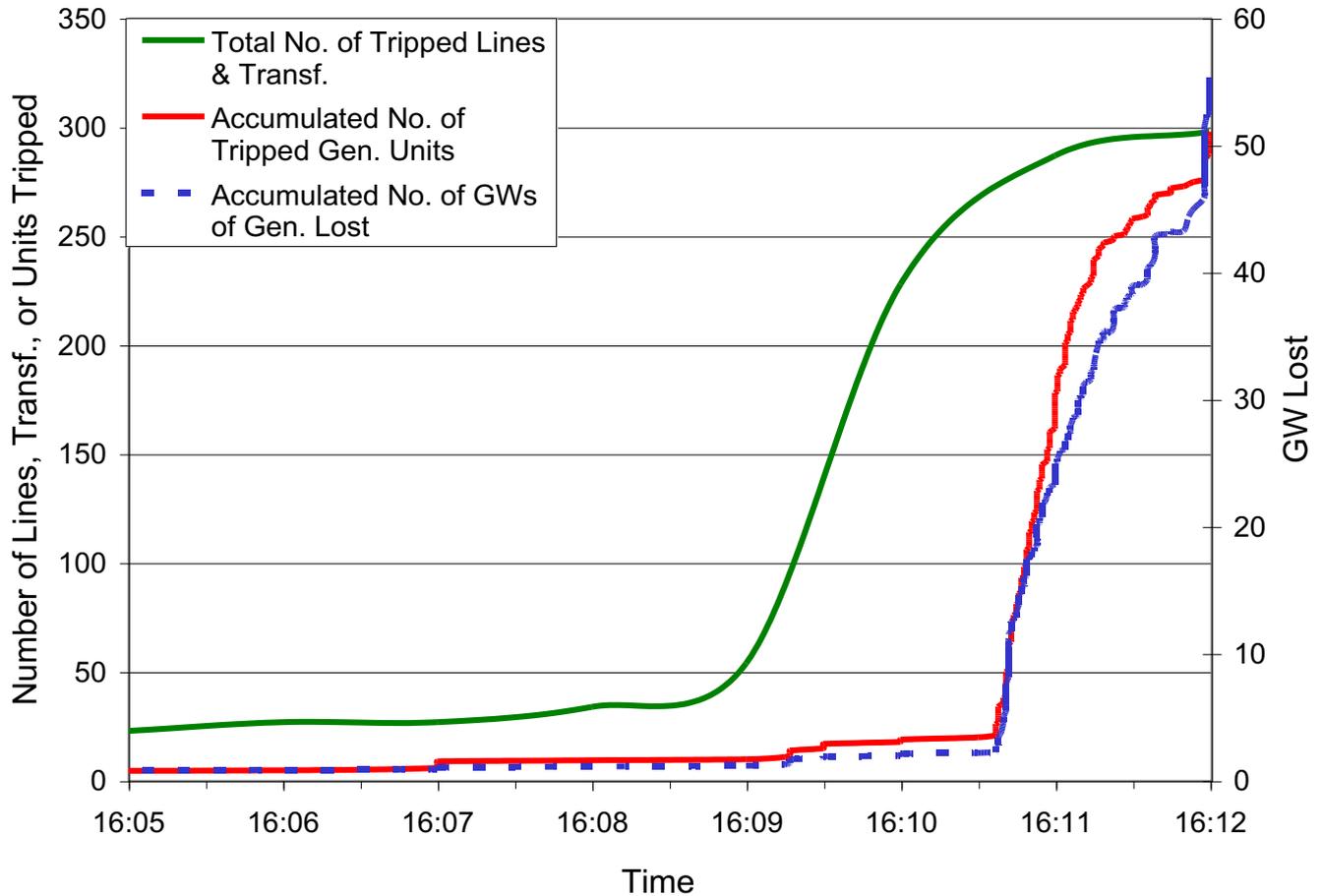
Resumen: 14/Agosto/2003

- ▶ 1. 12:05 Conesville Unit 5 (rating 375 MW)
- ▶ 2. 1:14 Greenwood Unit 1 (rating 785 MW)
- ▶ 3. 1:31 Eastlake Unit 5 (rating: 597 MW)

- ▶ 4. 2:02 Stuart – Atlanta 345 kV
- ▶ 5. 3:05 Harding-Chamberlain 345 kV
- ▶ 6. 3:32 Hanna-Juniper 345 kV
- ▶ 7. 3:41 Star-South Canton 345 kV
- ▶ 8. 3:45 Canton Central-Tidd 345 kV
- ▶ 9. 4:05 Sammis-Star 345 kV

- ▶ 10. 4:08:58 Galion-Ohio Central-Muskingum 345 kV
- ▶ 11. 4:09:06 East Lima-Fostoria Central 345 kV
- ▶ 12. 4:09:23-4:10:27 Kinder Morgan (rating: 500 MW; loaded to 200 MW)
- ▶ 13. 4:10 Harding-Fox 345 kV
- ▶ 14. 4:10:04 – 4:10:45 20 generators along Lake Erie in north Ohio, 2174 MW
- ▶ 15. 4:10:37 West-East Michigan 345 kV
- ▶ 16. 4:10:38 Midland Cogeneration Venture, 1265 MW
- ▶ 17. 4:10:38 Transmission system separates northwest of Detroit
- ▶ 18. 4:10:38 Perry-Ashtabula-Erie West 345 kV
- ▶ 19. 4:10:40 – 4:10:44 4 lines disconnect between Pennsylvania & New York
- ▶ 20. 4:10:41 2 lines disconnect and 2 gens trip in north Ohio, 1868 MW
- ▶ 21. 4:10:42 – 4:10:45 3 lines disconnect in north Ontario, New Jersey, isolates NE part of Eastern Interconnection, 1 unit trips, 820 MW
- ▶ 22. 4:10:46 – 4:10:55 New York splits east-to-west. New England and Maritimes separate from New York and remain intact.
- ▶ 23. 4:10:50 – 4:11:57 Ontario separates from NY w. of Niagara Falls & w. of St. Law. SW Connecticut separates from New York, blacks out.

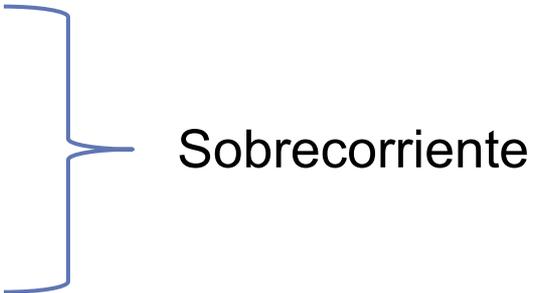
Resumen: 14/Agosto/2003 (2)



Funciones básicas de la protección

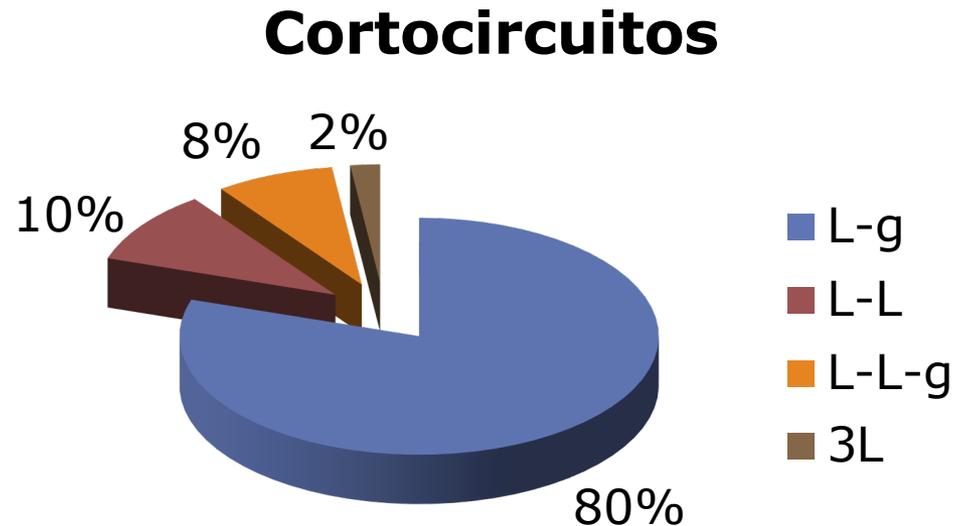
- ▶ Detección de la falla o régimen anormal en el sistema de potencia,
- ▶ Desconexión automática del elemento afectado,
- ▶ Indicar el elemento del sistema donde ha ocurrido la falla o régimen anormal.

Dispositivos de protección

- ▶ Fusibles,
 - ▶ Restauradores automáticos,
 - ▶ Seccionalizadores,
 - ▶ Interruptores de bajo voltaje,
 - ▶ Relevadores:
- 
- Sobrecorriente
- ▶ Sobrecorriente,
 - ▶ Corriente diferencial,
 - ▶ Ángulos de fase de las corrientes de falla,
 - ▶ Dirección del flujo de potencia,
 - ▶ Impedancia,
 - ▶ Frecuencia,
 - ▶ Armónicas,
 - ▶ Sobre y bajo voltaje,
 - ▶ Componentes de alta frecuencia, etc.

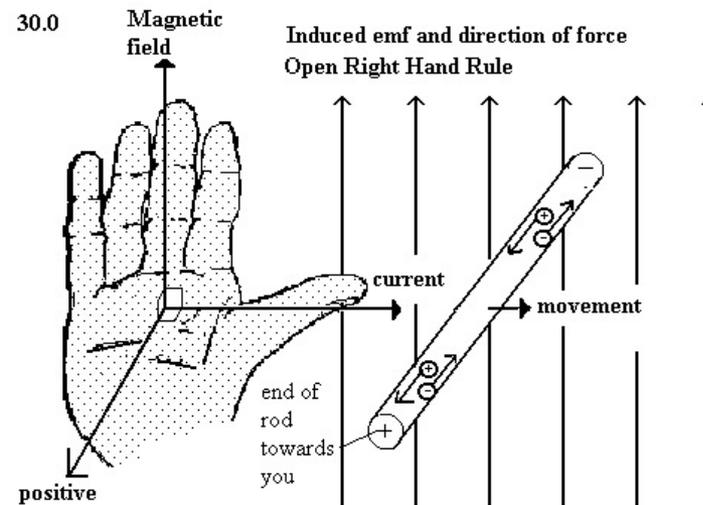
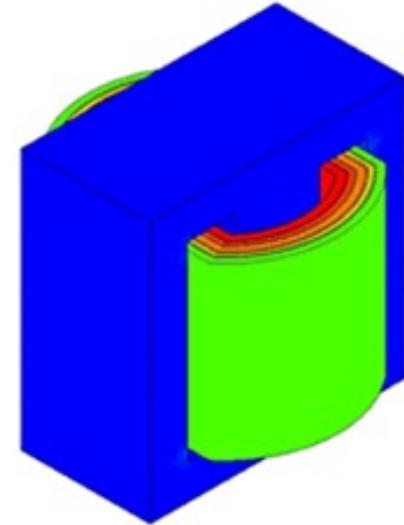
Fallas en sistemas eléctricos de potencia

- ▶ Cortocircuitos,
- ▶ Contactos a tierra:
 - ▶ Sistemas aislados de tierra,
 - ▶ Sistemas de puesta a tierra de alta impedancia,
- ▶ Fases abiertas.



Impacto de los cortocircuitos

- ▶ Incremento de corriente
 - ▶ Estrés mecánico
 - ▶ Estrés térmico
- ▶ Reducción del voltaje
 - ▶ Estabilidad de voltaje
 - ▶ Calidad de la energía



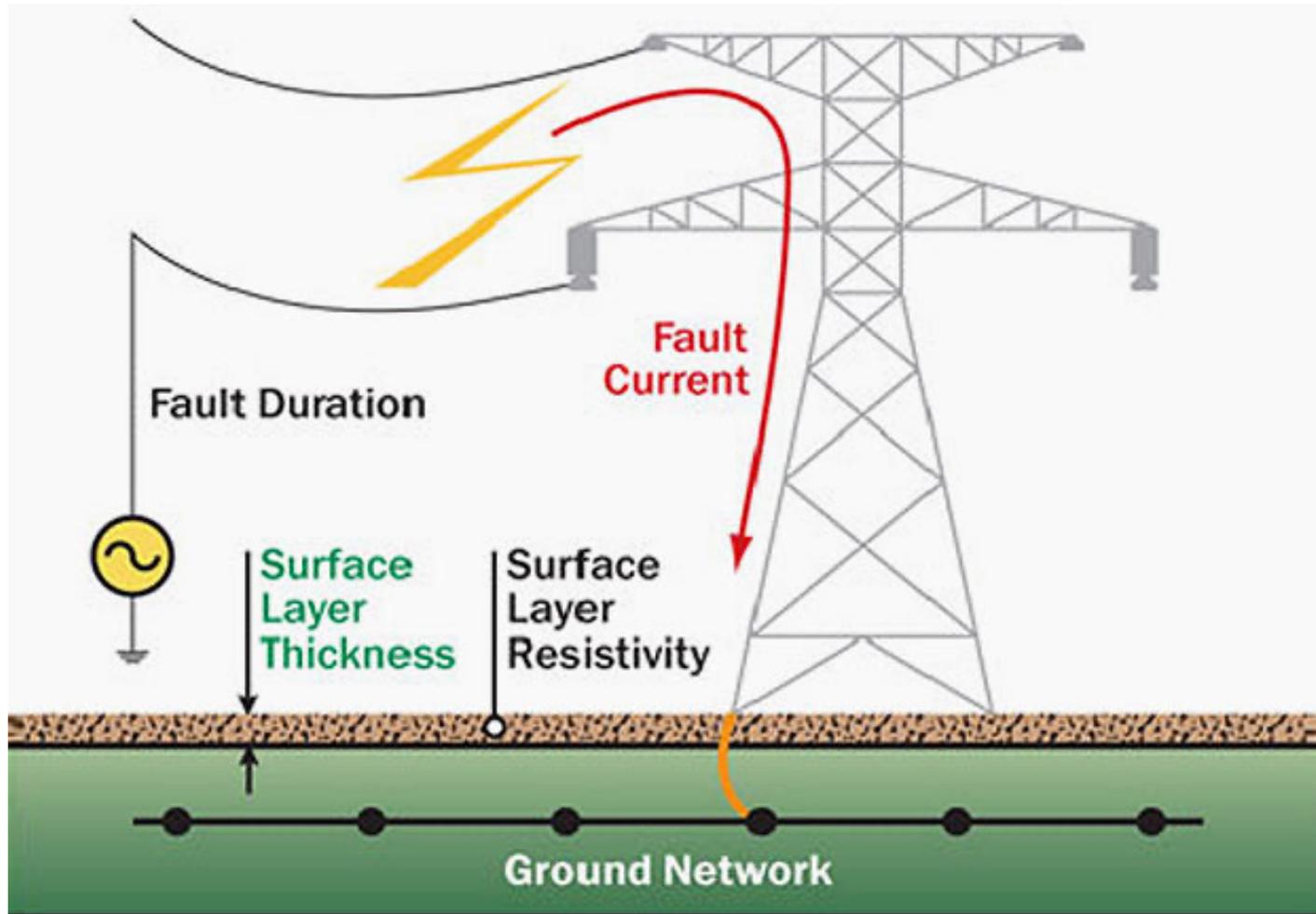
Regímenes anormales de operación en un sistema eléctrico de potencia

- ▶ Sobrecorrientes,
 - ▶ Sobrecargas,
 - ▶ Fallas externas,
- ▶ Condiciones de operación desbalanceada,
- ▶ Oscilaciones de potencia,
 - ▶ Estables,
 - ▶ Inestables,
- ▶ Corriente de magnetización en transformadores y motores,
- ▶ Corrientes de restauración de carga fría.

Protección contra fallas a tierra

- ▶ Fallas más frecuentes,
- ▶ Protecciones más sensibles que las de fase, ya que no responden a la corriente de carga,
- ▶ La protección es independiente para cada nivel de voltaje, debido a que la red de secuencia cero es interrumpida por los devanados en delta de los transformadores.
- ▶ Las fallas a tierra con arco pueden ser muy destructivas si no se eliminan con rapidez.

Impedancia de falla



Sistemas de puesta a tierra

- ▶ El objetivo de los esquemas de puesta a tierra es minimizar potenciales sobrevoltajes transitorios, ocasionados por fallas, maniobras, descargas atmosféricas, etc. Su impacto en los esquemas de protección es una reducción de sensibilidad para fallas a tierra.
- ▶ Sistema aislado,
- ▶ Sistema sólidamente puesto a tierra,
- ▶ Puesta a tierra de alta impedancia,
- ▶ Puesta a tierra de baja impedancia,
- ▶ Sistema con puesta a tierra resonante.

Tiempo de operación

The protective system should act fast to isolate faulty sections to prevent:

- Increased damage at fault location. Fault energy = $I^2 \times R_f \times t$, where t is time in seconds.
- Danger to the operating personnel (flashes due to high fault energy sustaining for a long time).
- Danger of igniting combustible gas in hazardous areas, such as methane in coal mines which could cause horrendous disaster.
- Increased probability of earth faults spreading to healthy phases.
- Higher mechanical and thermal stressing of all items of plant carrying the fault current, particularly transformers whose windings suffer progressive and cumulative deterioration because of the enormous electromechanical forces caused by multi-phase faults proportional to the square of the fault current.

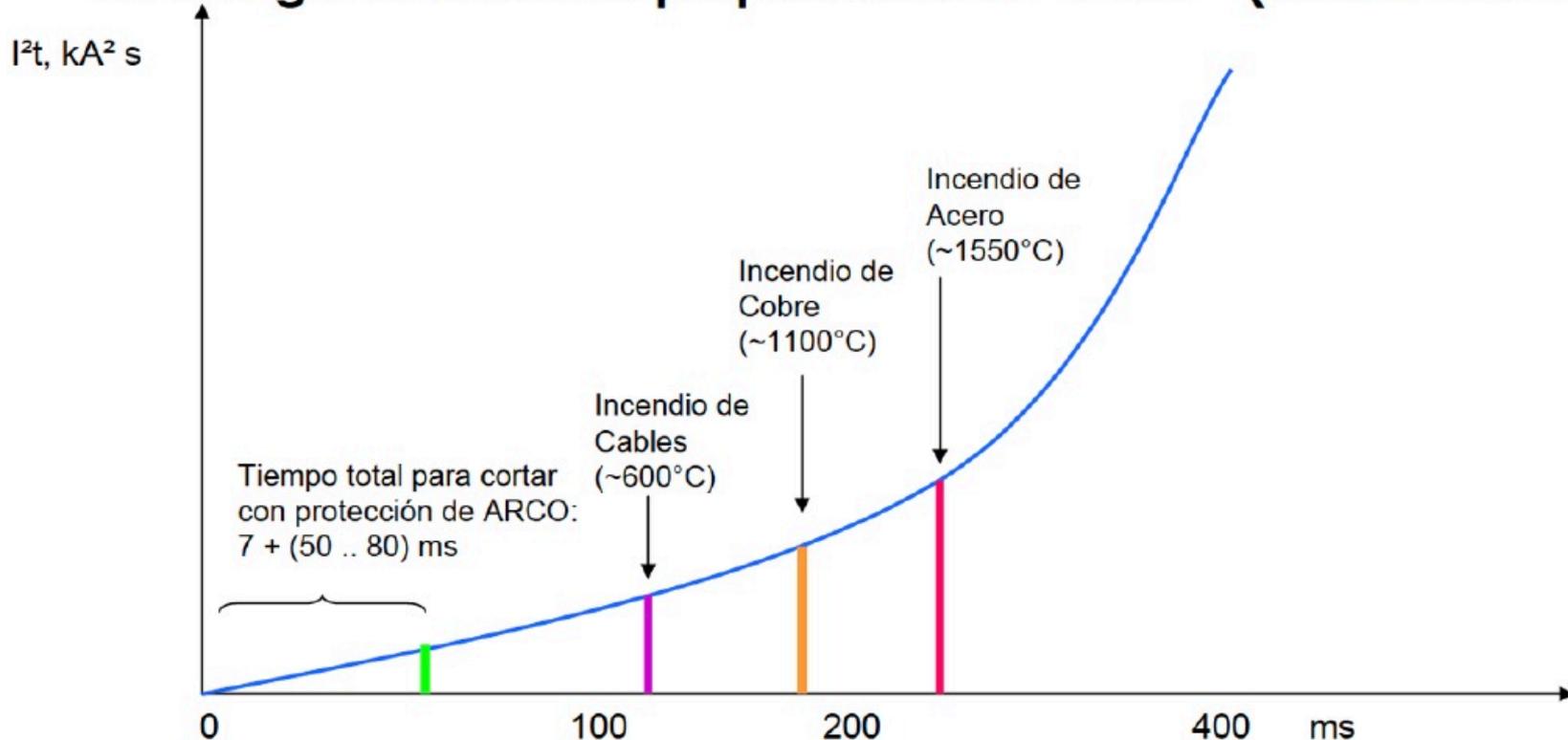
Sustained voltage dips resulting in motor (and generator) instability leading to extensive shutdown at the plant concerned and possibly other nearby plants connected to the system.

Protección contra arco eléctrico



Protección contra arco eléctrico

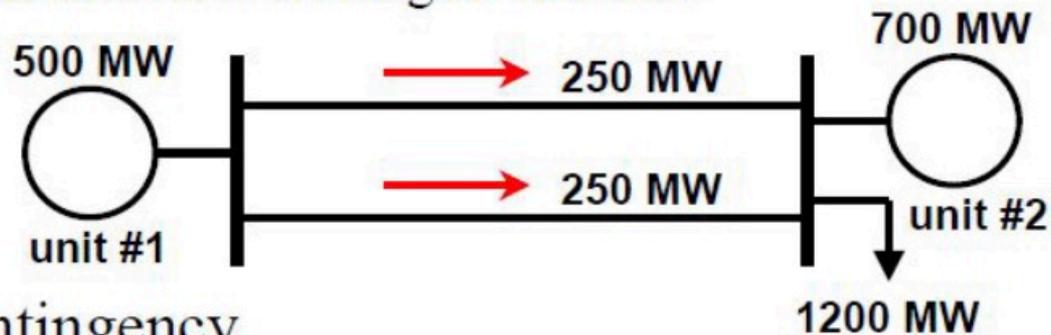
La Energía liberada es proporcional a $\sim I^2 \times t$. (véase IEEE 1584)



Seguridad de una red eléctrica

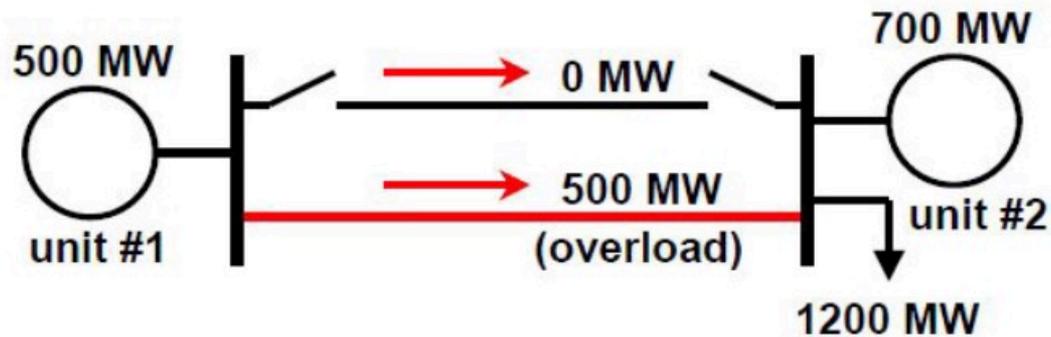
- ♦ optimal dispatch

- ignoring losses
- maximum line loading of 400 MW



- ♦ post contingency

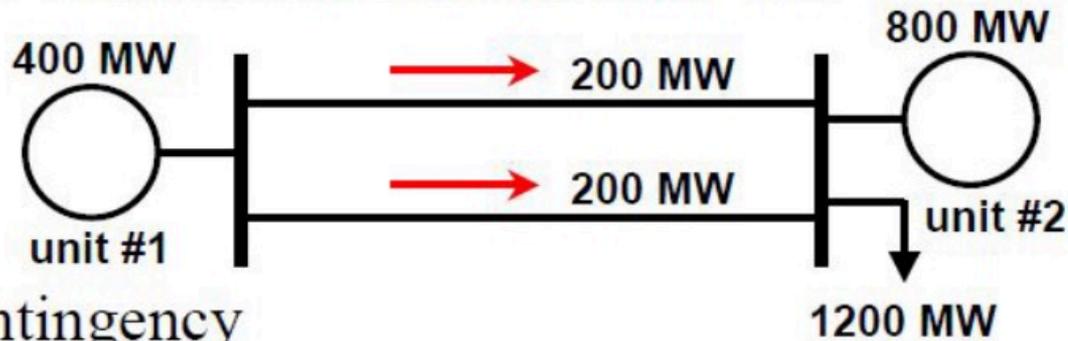
- consider that a transmission line has opened because of a failure



Seguridad de una red eléctrica

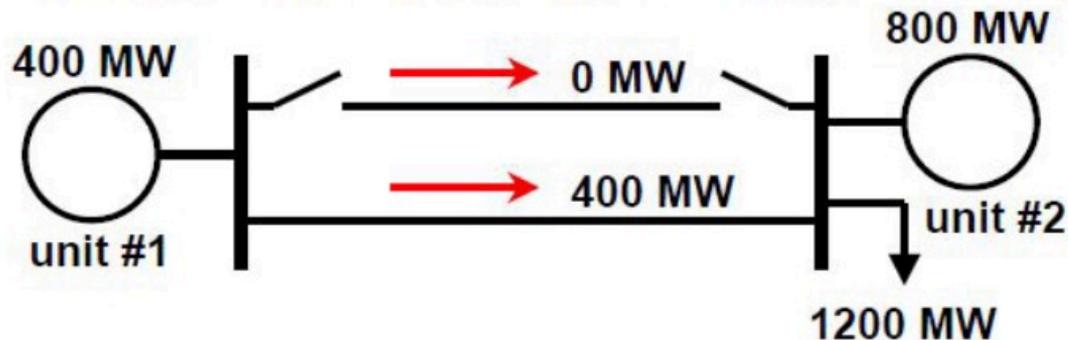
- ◆ secure dispatch

- unit #1 generation set to maximum secure line loading of 400 MW

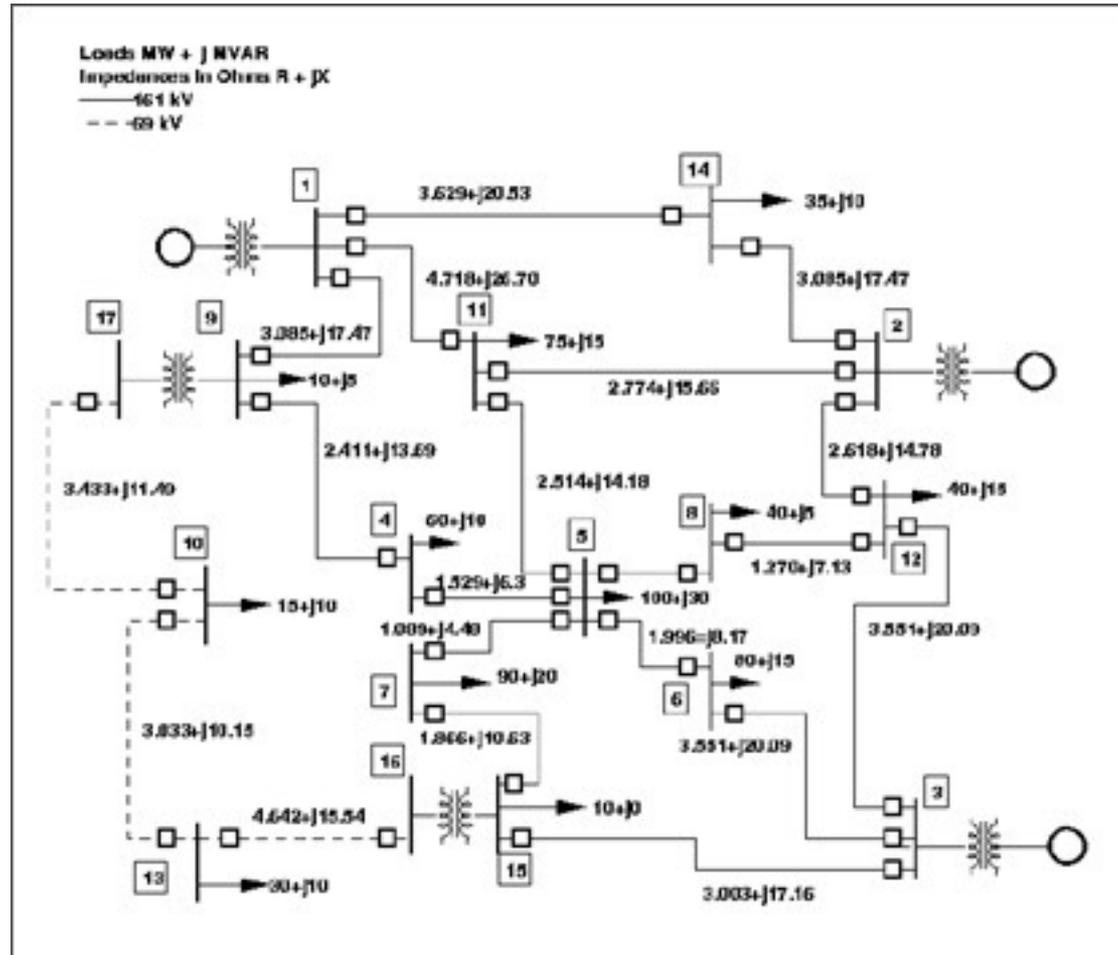


- ◆ post contingency

- consider the same contingency, resulting in no violations



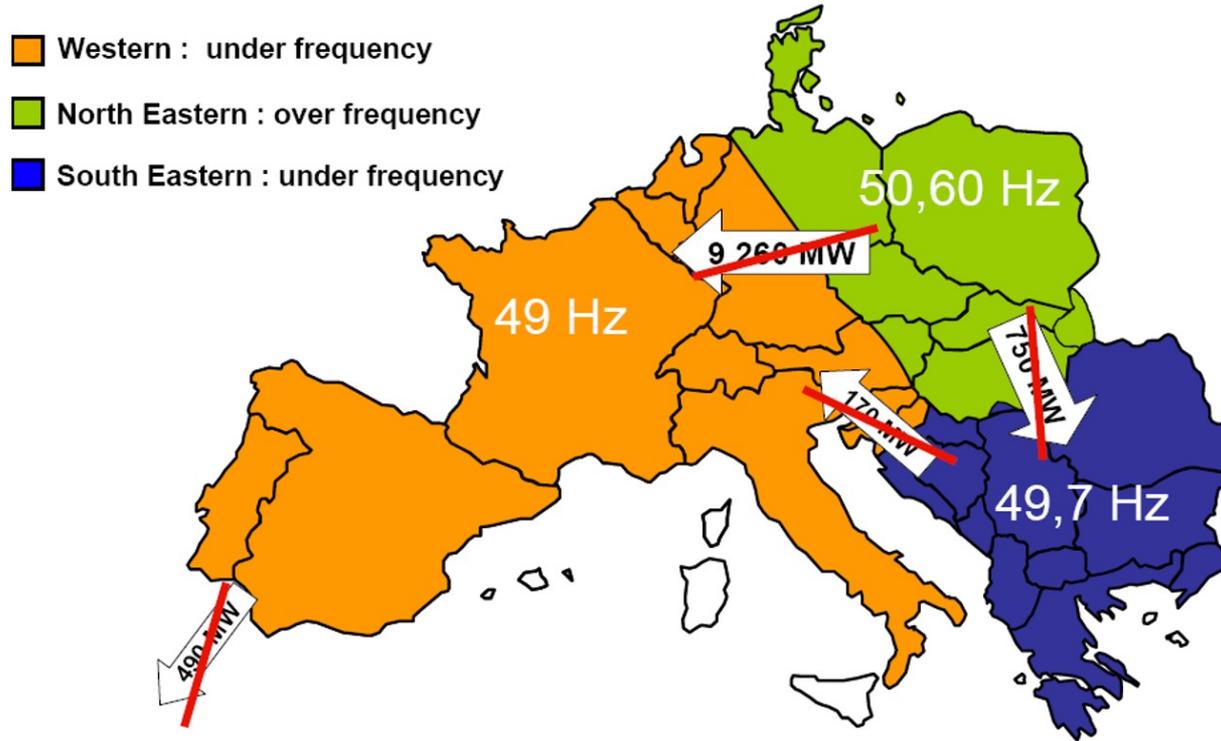
Deterioró de la infraestructura



Maniobras incorrectas

El incidente (que no apagón) del 4-11-2006

La apertura de una línea de 380 kV sobre el Rin para que pasara un barco a las 22:10 de la noche provocó una oscilación de la frecuencia que dió lugar a la desconexión de 17000 MW, afectando a 15 millones de consumidores



Maniobras incorrectas

▶ Zona Oeste:

- ▶ Deslaste automático de cargas (17 GW) al alcanzar 49 Hz
- ▶ Desconexión automática de centrales por relés de frecuencia (10,9 GW, de ellos 4,9 GW eólicos)

▶ Zona NE:

- ▶ 10 GW de generación en exceso, llegando a los 50,6 Hz
- ▶ Desconexión de centrales por los operadores para recuperar la frecuencia

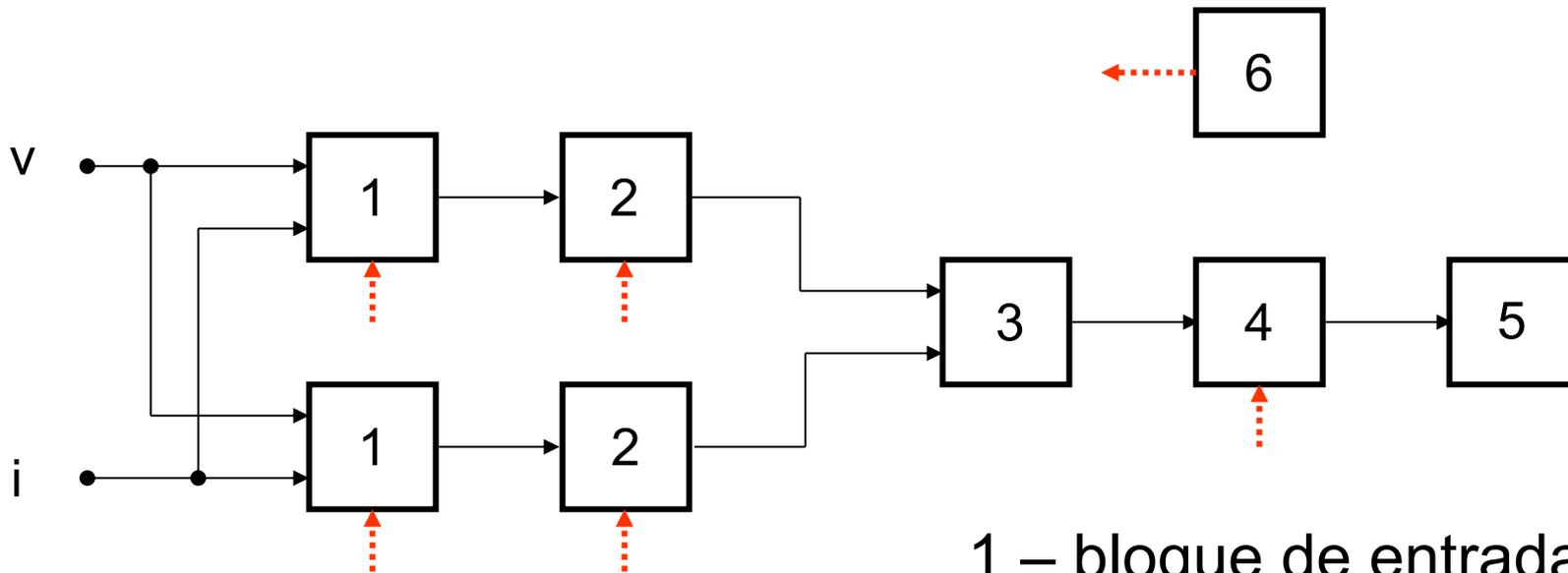
▶ Zona SE:

- ▶ Caída de la frecuencia hasta los 49,7 Hz
- ▶ Redespacho de la generación para recuperar la frecuencia, sin necesidad de arrancar otras centrales

Maniobras incorrectas

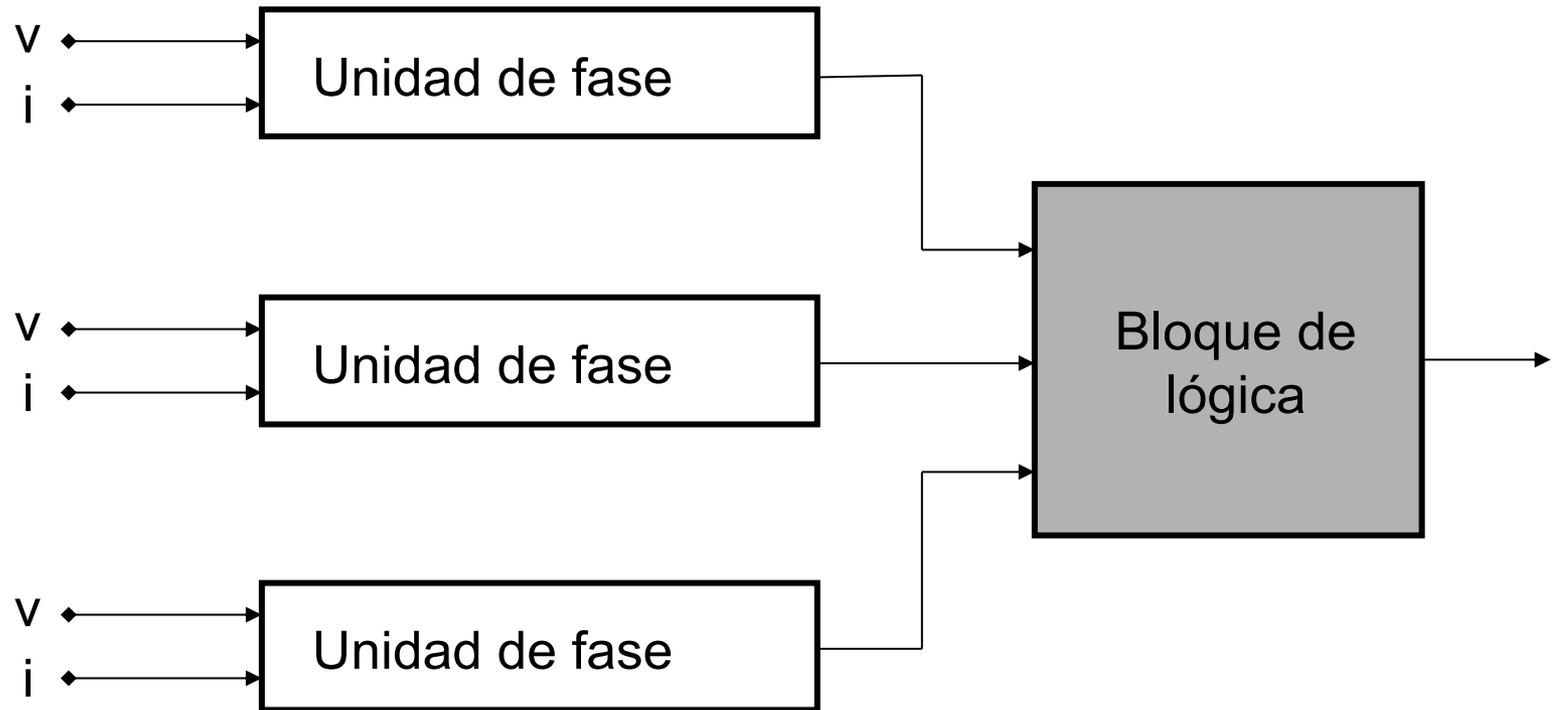
- ▶ Resolución del incidente:
 - ▶ 16.4 GW de generación conectada nuevamente a la red por los operadores en pocos minutos.
 - ▶ Recuperación de las interconexiones en 40 minutos.
- ▶ Causas del incidente:
 - ▶ Incumplimiento del criterio de seguridad N-1.
 - ▶ Necesidad de mayor coordinación entre operadores de distintos países.
 - ▶ Factor agravante; Desconexión automática de pequeñas centrales por relés de frecuencia (49 – 51 Hz).

Esquema estructural de un relevador monofásico

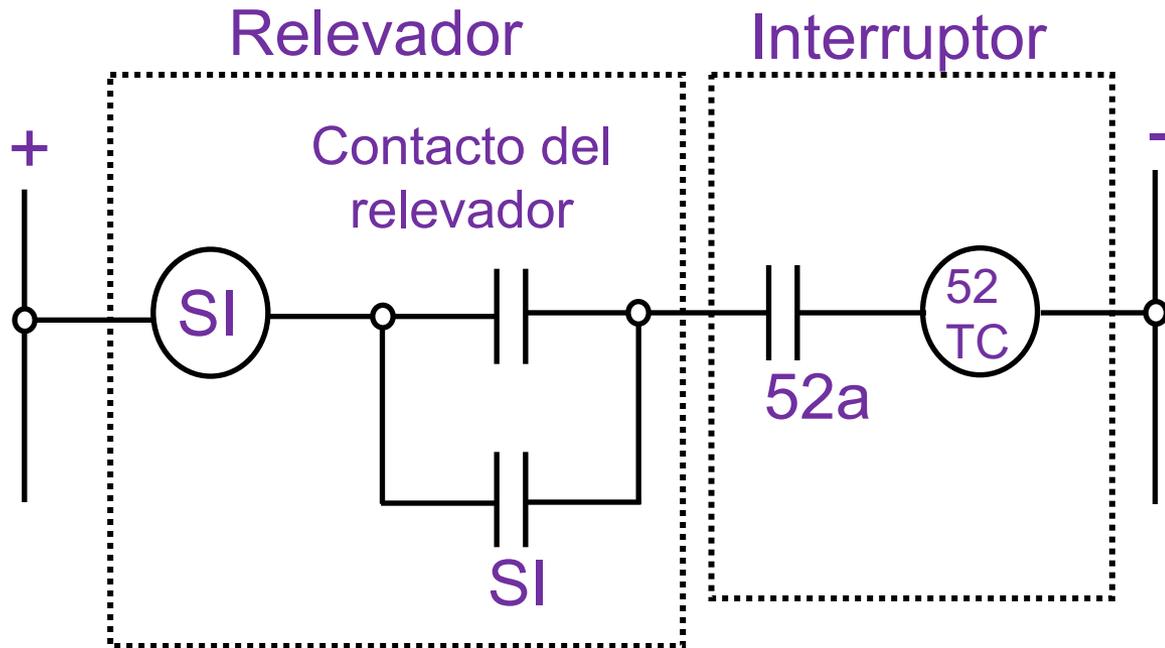


- 1 – bloque de entrada
- 2 – bloque de conversión
- 3 – comparador
- 4 – retardo de tiempo
- 5 – bloque de salida
- 6 - ajustes

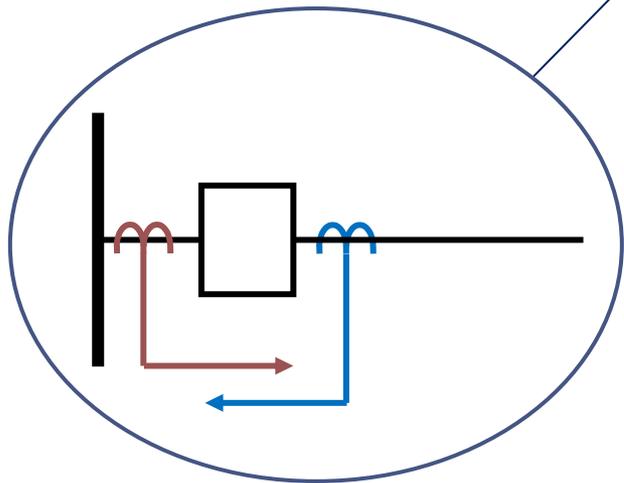
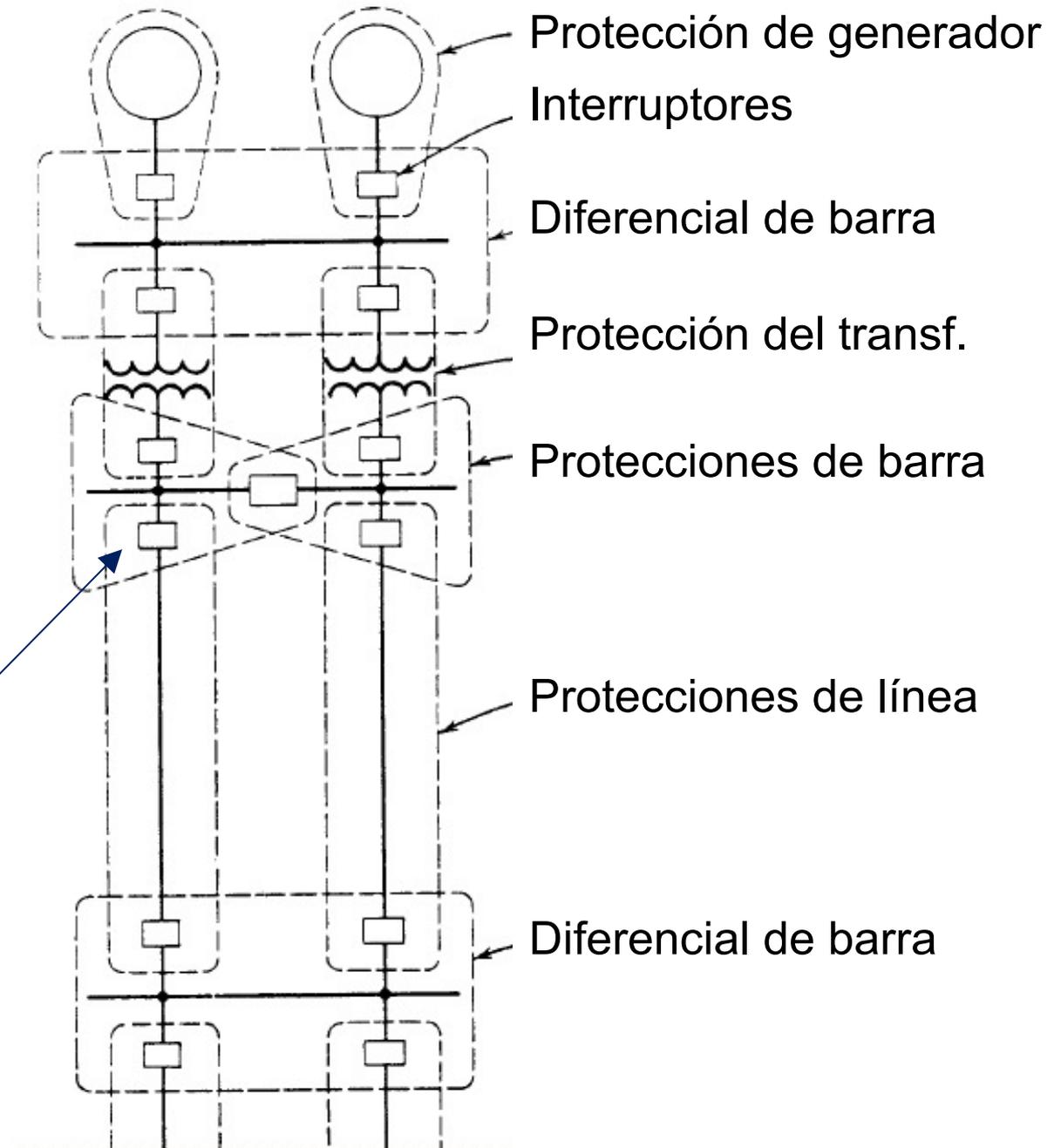
Esquema estructural de un relevador trifásico



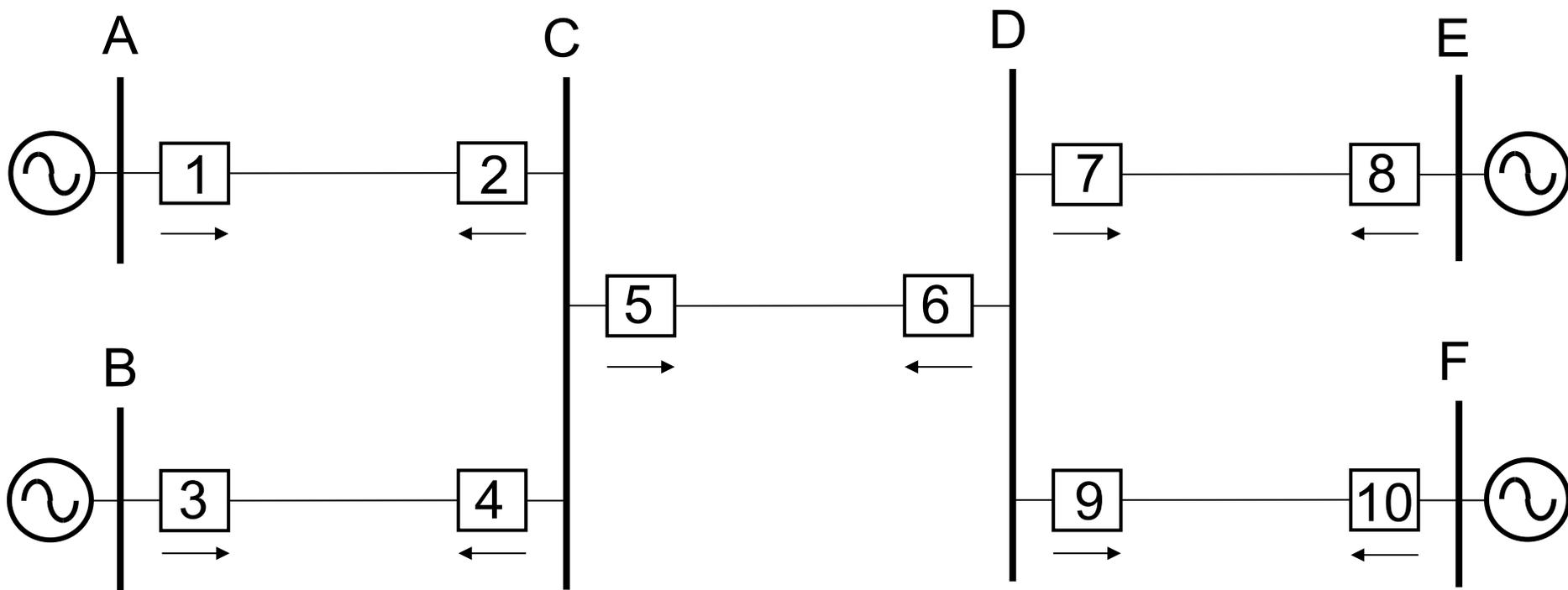
Circuito de disparo del interruptor



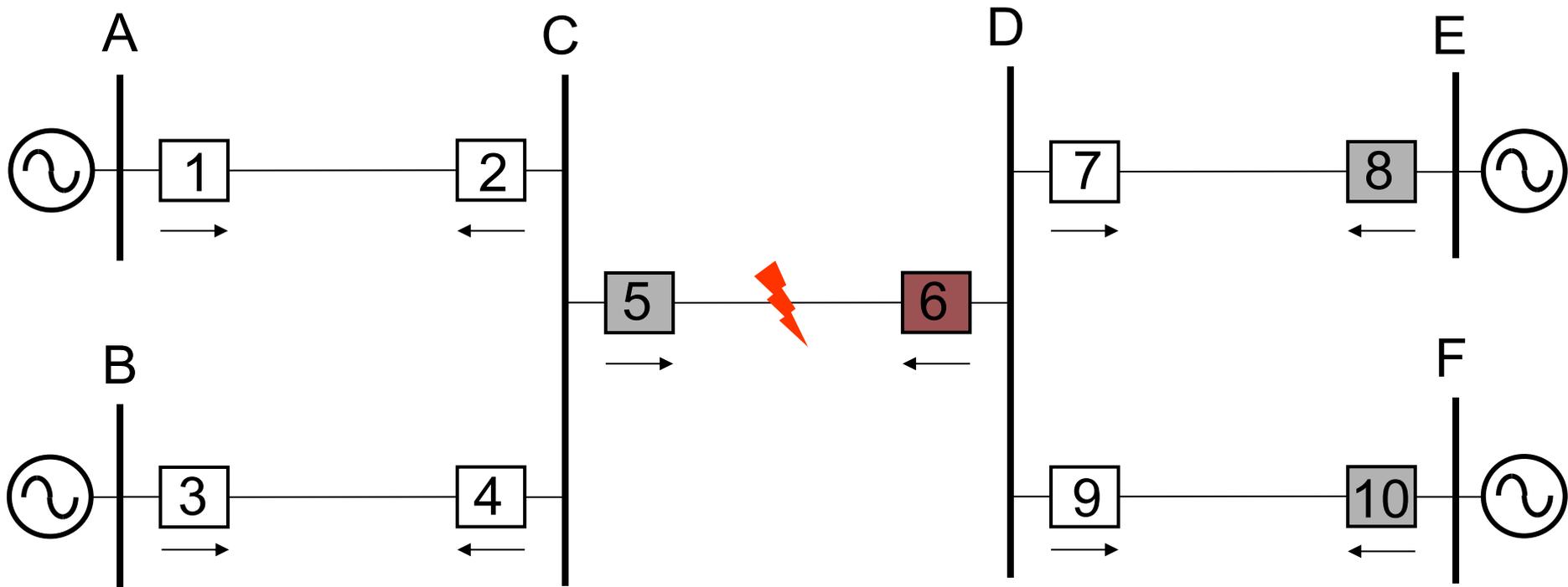
Zonas de protección primaria



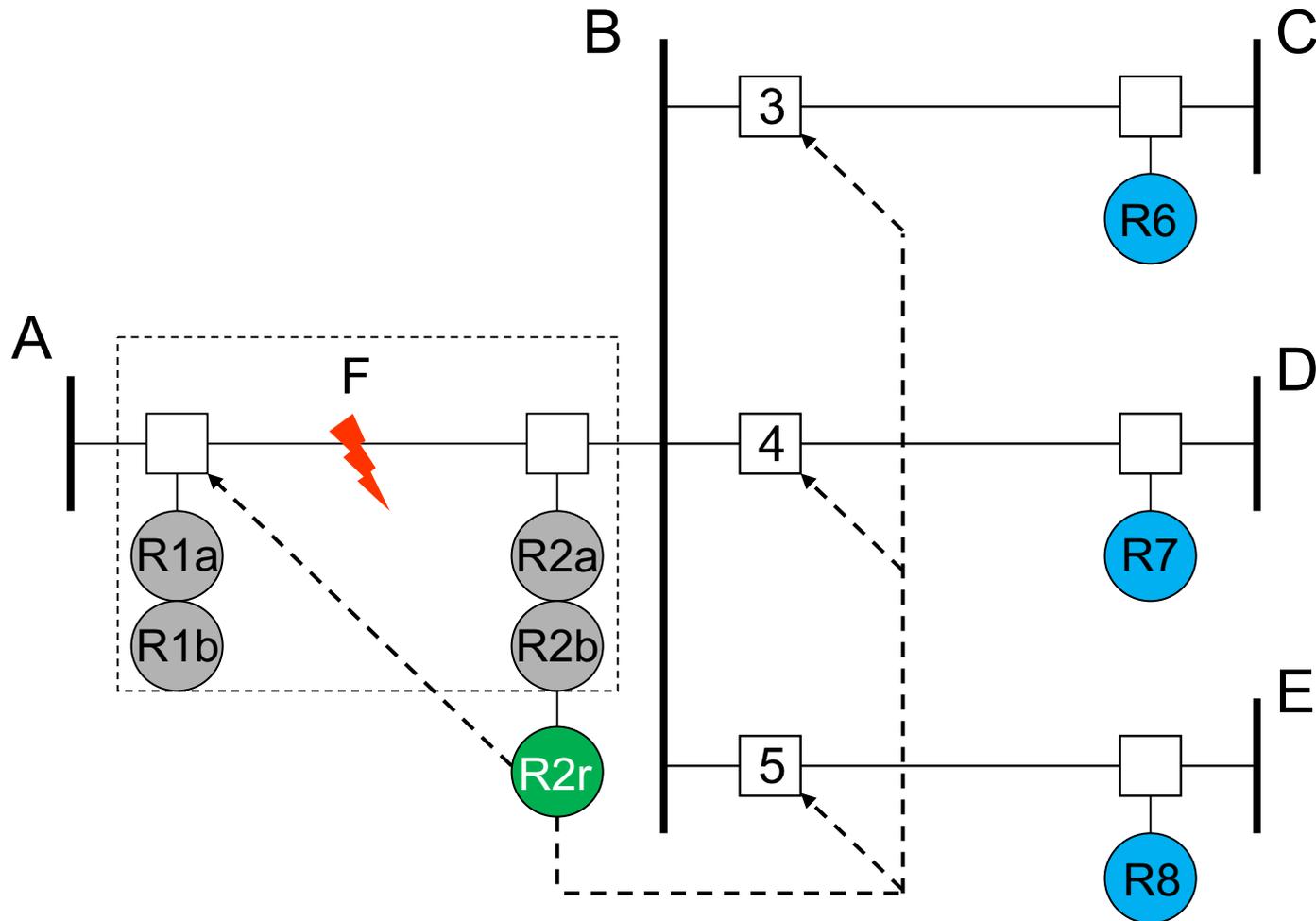
Protección de respaldo



Protección de respaldo remoto

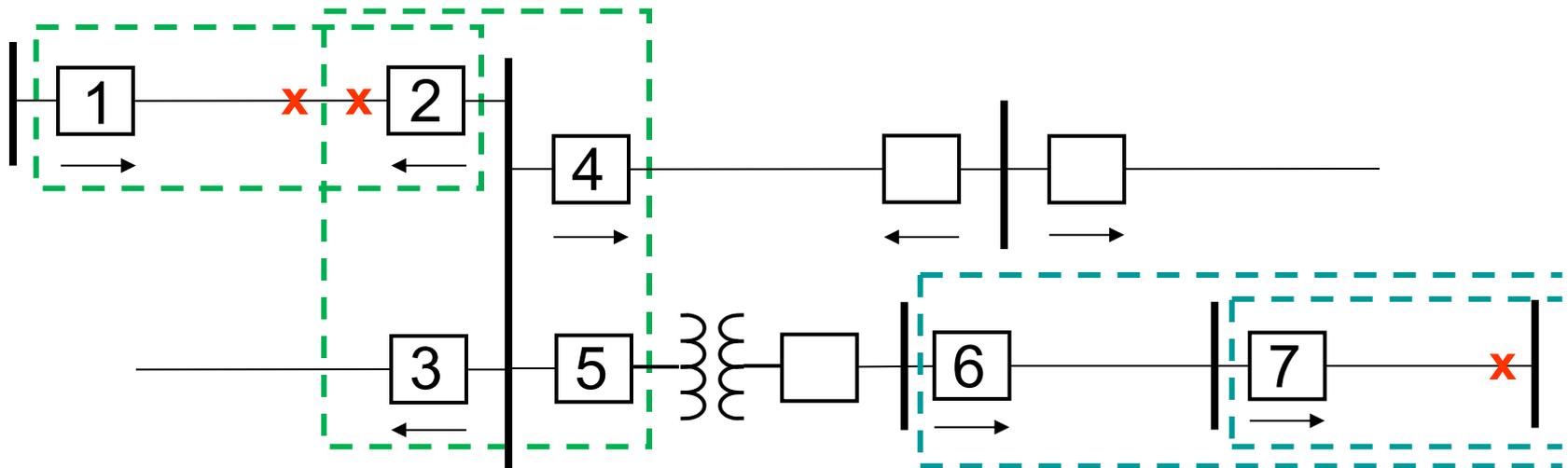


Protección de respaldo local



Clasificación de las protecciones: SELECTIVIDAD

- ▶ Protecciones con selectividad absoluta,
 - ▶ Operan solo para fallas en la zona protegida,
 - ▶ Son instantáneas (sin retardo de tiempo intencional),
- ▶ Protecciones con selectividad relativa,
 - ▶ Realizan funciones de respaldo,
 - ▶ Tienen retardo de tiempo.



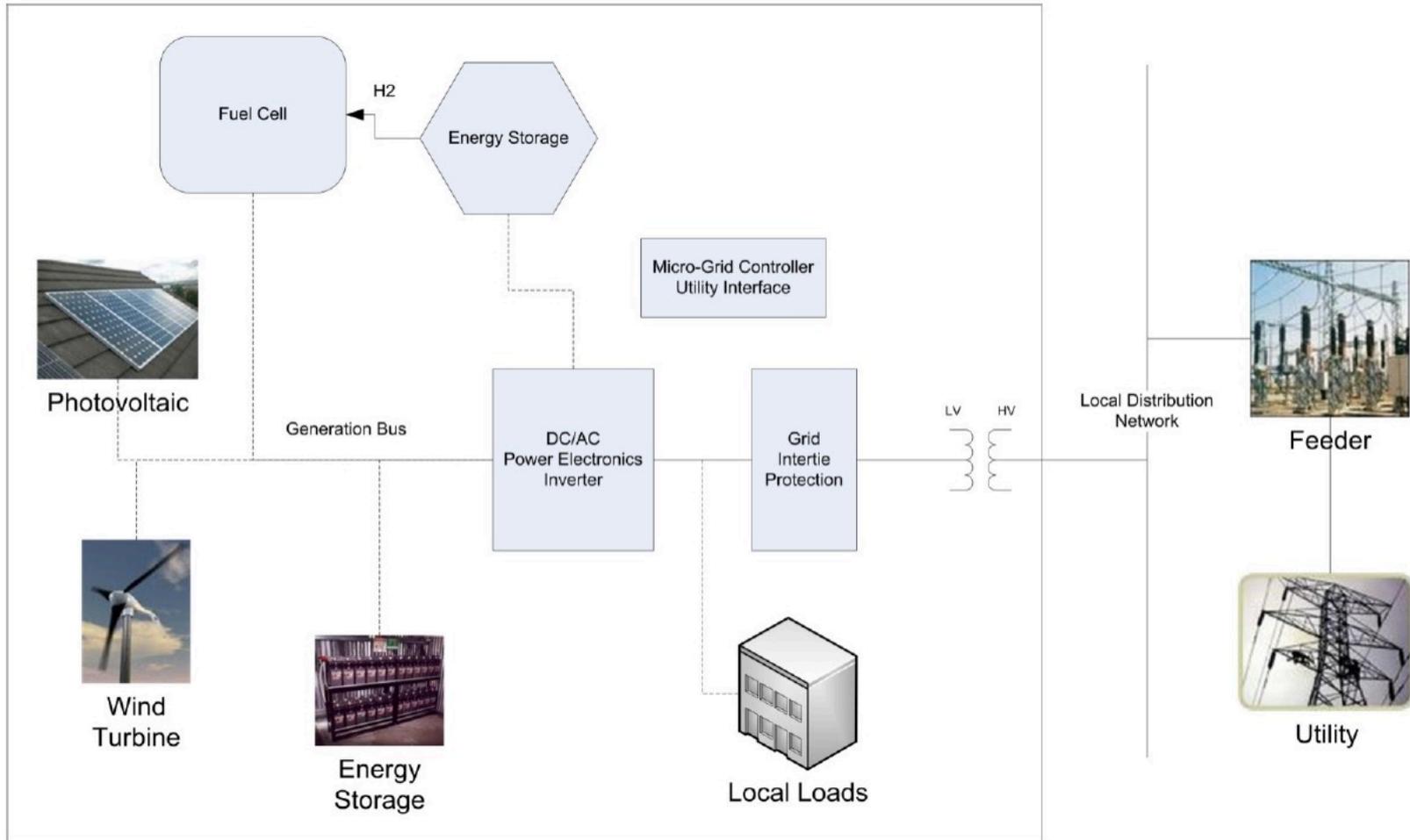
Características de las protecciones (1)

- ▶ Confiabilidad. La protección debe garantizar un funcionamiento correcto en todo momento.
 - ▶ Dependabilidad (lógica OR),
 - ▶ Seguridad (lógica AND),
- ▶ Selectividad. Se debe garantizar la máxima continuidad del servicio con la mínima desconexión de elementos durante una falla.
- ▶ Velocidad de operación. Se debe garantizar tiempos reducidos de eliminación de las fallas.
 - ▶ Mejorar la estabilidad del sistema
 - ▶ Reducir el daño al equipo,
 - ▶ Calidad de la energía.
 - ▶ Protección al personal.

Características de las protecciones (2)

- ▶ Sensibilidad. Se debe garantizar que la protección sea capaz de detectar todas las fallas que ocurran en la zona protegida, aún las más pequeñas,
 - ▶ Fallas de alta impedancia,
 - ▶ Generación dispersa,
- ▶ Simplicidad,
- ▶ Costo,
 - ▶ Costo de la protección y el equipo,
 - ▶ Costo de la desconexión de elementos.

Impacto de la generación renovable



Impacto de la generación renovable

- ▶ Su capacidad es menor que las unidades convencionales (térmicas e hidráulicas).
- ▶ Su nivel de carga no es asignado.
- ▶ Las unidades están conectadas en medio o bajo voltaje.
- ▶ Contribuyen poco al control de frecuencia y voltaje en la red.
- ▶ No son consideradas cuando se hacen estudios de expansión de la red.

Información necesaria para definir los requerimientos de la protección

- ▶ Configuración de la red eléctrica,
- ▶ Impedancias de los equipos a proteger y su conexión, así como su frecuencia y voltaje de operación,
- ▶ Procedimientos de operación en la red,
- ▶ Importancia del equipo que se va a proteger,
- ▶ Estudio de fallas,
- ▶ Niveles máximos de carga y los límites de estabilidad del sistema ante disturbios,
- ▶ Localización de los TP, y TC, sus conexiones y relaciones de transformación,
- ▶ Planeación del crecimiento de la red eléctrica.

Áreas de investigación en la protección de sistemas eléctricos de potencia

- ▶ Estudios de estabilidad transitoria y simulación de fenómenos transitorios electromagnéticos,
- ▶ Coordinación automática de protecciones,
- ▶ Supervisión y análisis de la operación de la protección a partir de información de tiempo real,
- ▶ Algoritmos para procesar grandes volúmenes de información,
- ▶ Integración de funciones de protección,
- ▶ Realización de funciones complejas de protección,
- ▶ Aplicación de técnicas de procesamiento digital de señales e inteligencia artificial.



Fundamentos de la protección de sistemas eléctricos de potencia

Dr. Ernesto Vázquez Martínez
Universidad Autónoma de Nuevo León, México