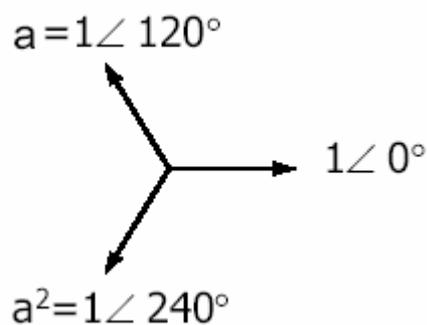
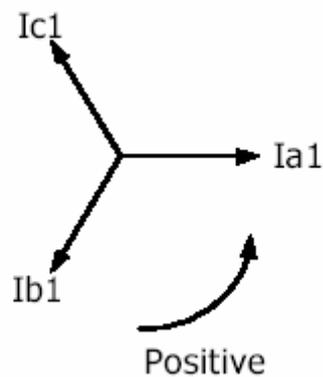
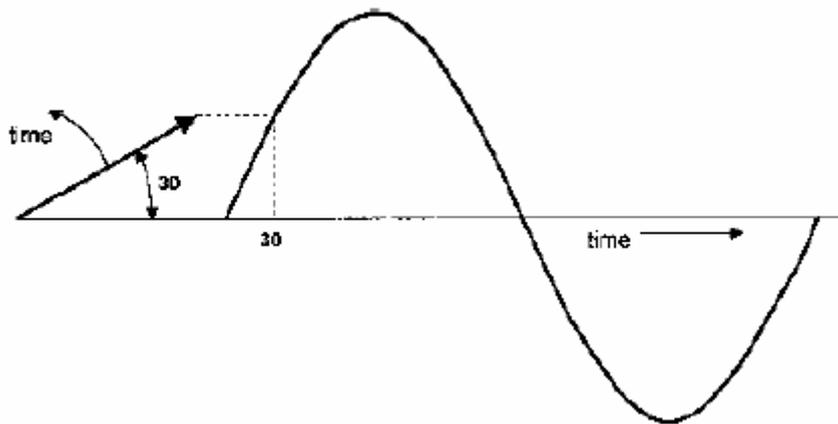


# 1. Fundamentos sobre Protección de Sistemas de Potencia

## 1.1 Fallas en los sistemas de potencia

- Operación normal de una red: sistema trifásico balanceado  $\rightarrow$  corrientes y tensiones senoidales iguales en magnitud pero desfasadas  $120^\circ$



$$I_{b1} = I_{a1} \angle 240 = a^2 I_{a1}$$

$$I_{c1} = I_{a1} \angle 120 = a I_{a1}$$

- Las corrientes y tensiones se comportan según las leyes de Kirchhoff de los circuitos eléctricos:
  - o La suma de las corrientes que entran y salen de un nodo es igual a cero
  - o La suma de las caídas y elevaciones de tensión en una malla o loop es igual a cero.
- De los valores de corriente y tensión se derivan las magnitudes de potencia, la cual integrada durante un cierto intervalo de tiempo da como resultado la energía → generación, transmisión, distribución, consumo
- Las magnitudes eléctricas (corriente, tensión, potencia, etc..) en general son evaluadas o modeladas de distinta forma: valores instantáneos, valores promedios, activo, reactivo, complejos.
- Operación normal: los valores de corriente, tensión, potencia y energía son mantenidos dentro de ciertos valores compatibles con las restricciones de diseño de cada componente de la red eléctrica.
- Operación anormal: estados atípicos que suceden con poca frecuencia → descargas atmosféricas, carga excesiva, deterioro o perforación de la aislación de un equipo, intervención de humanos o animales en general.
- Fallas: eventos que contribuyen a la violación de los límites de diseño de componentes, respecto al material aislante, aislación, galvánica, niveles de tensión, corriente o potencia nominal → naturaleza aleatoria asociada a cualquier componente.

- Estres excepcional → Desconexión o desenergización rápida para evitar daños considerables (El daño es mayor mientras mayor es el tiempo bajo falla)
- La desconexión de componentes puede afectar la operación general del sistema: afectar la estabilidad del sistema y/o producir la recarga de otros componentes.
- Pueden presentar riesgos para la vida de humanos y animales que no existen durante la operación normal.
- **Los sistemas de protección se inventaron al mismo tiempo que los sistemas eléctricos para asegurar la detección de fallas y desconexión de equipos**
- Tipos de fallas: fase-fase, fase-tierra

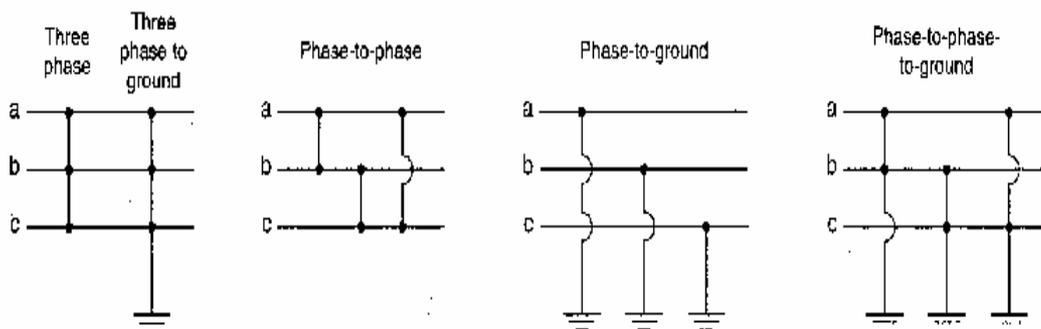


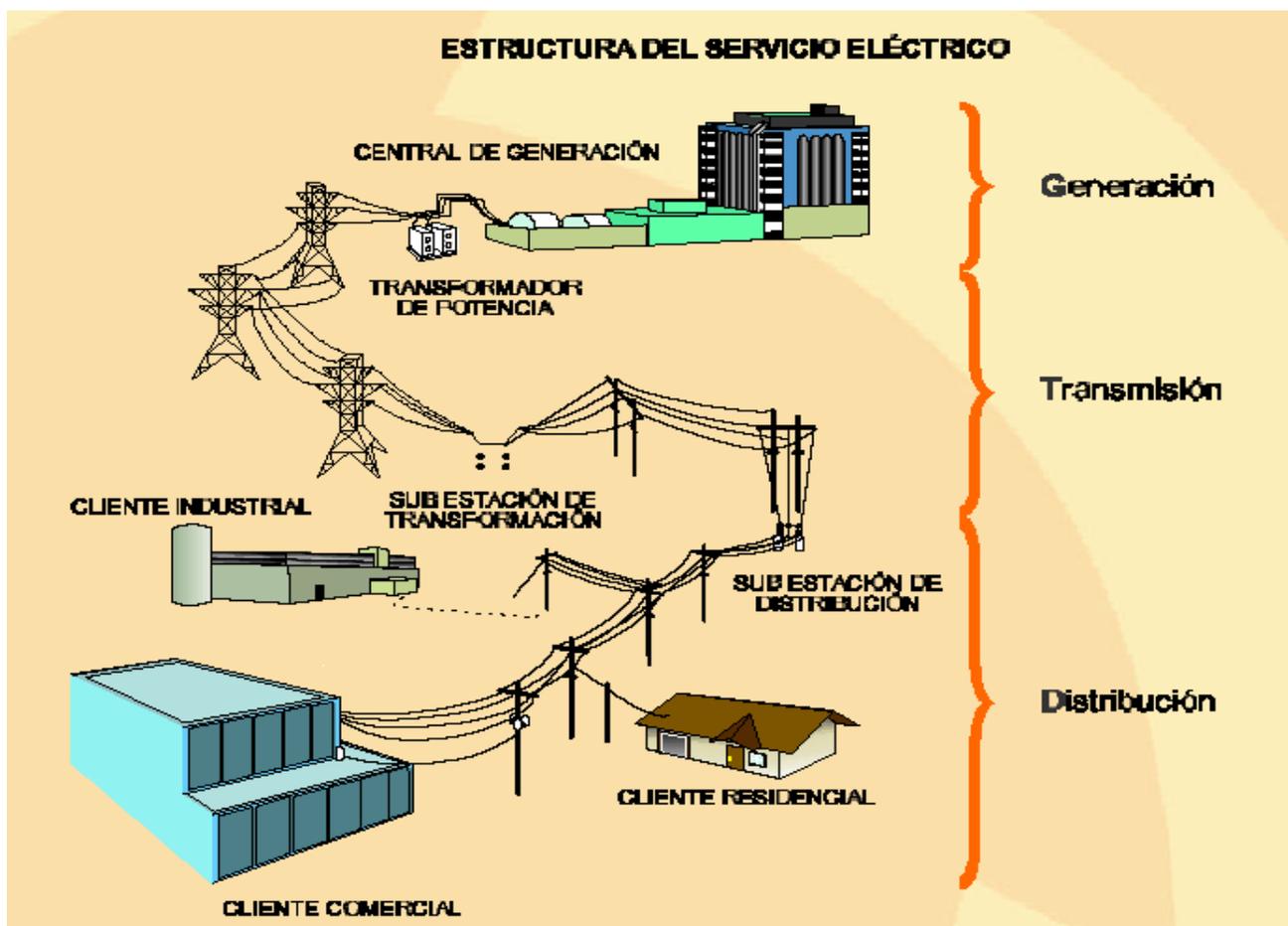
FIGURE 9.1 Eleven Types of Most Common Transmission Line Faults

## 1.2 Componentes de los sistemas de potencia

- Generadores, transformadores, líneas de transmisión, barras y cargas
- Cada componente puede ser conectado o desconectado al sistema vía interruptores (capaces de desconectar bajo condiciones normales y de falla) y/o

seccionadores (solo bajo condiciones normales) → se logra aislar equipos fallados y modificar la topología o configuración de la red.

- Agrupación de componentes conectados entre si por líneas de distinta longitud y nivel de tensión:
  - Centrales eléctricas (generación y transformación)
  - Subestaciones de transformación (cambio de niveles de tensión y acciones de conexión y desconexión de equipos)
  - Centros de distribución de carga (maniobras, transformación y conexión a consumidores finales)



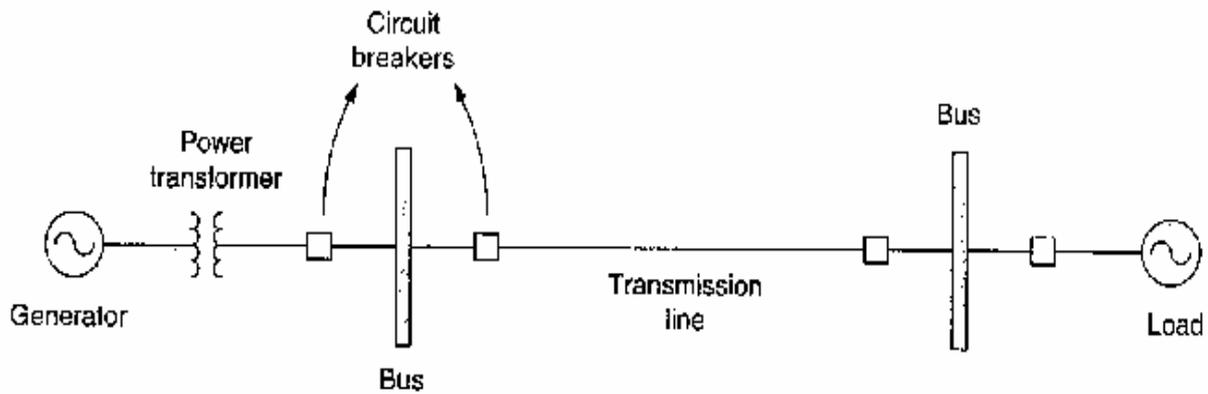


FIGURE 9.2 One-Line Representation of the Power System Components and Connection

## Representación de una red mediante diagrama unifilar

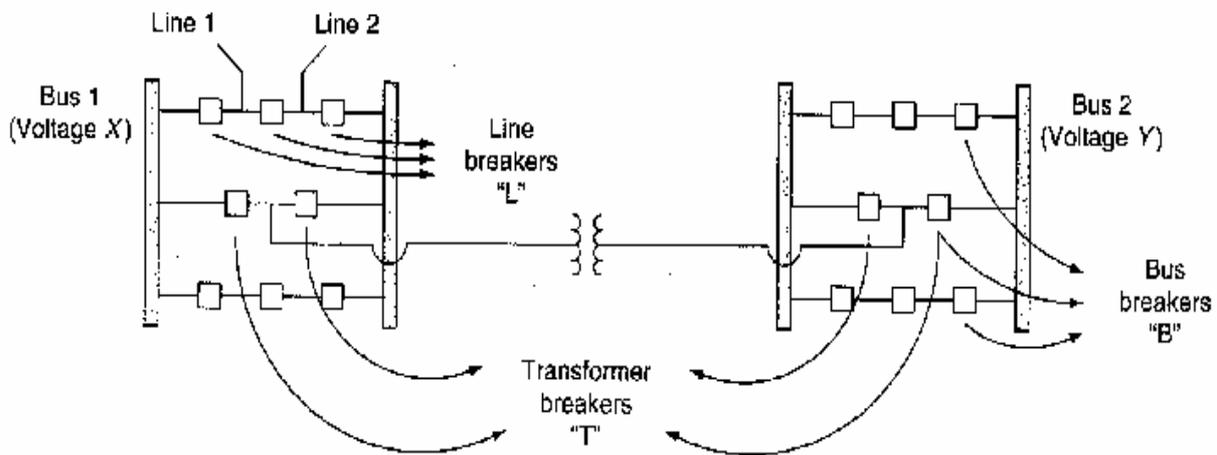


FIGURE 9.3 Breaker-and-a-Half Substation Connection

- Representación más detallada de una subestación de interruptor y medio
- Interruptores de línea L , de transformadores T y de barras B
- En la jerga: todos los interruptores asociados a una función de protección específica se denomina “bay” → se habla luego de “protection bays” de línea, trafos, barras, etc.
- En la fig. 9.3 se puede observar que cada interruptor sirve al menos a 2 bays.

### 1.3 Conexión de los relés y zonas de protección

- Relé de protección conectado a:
  - Instrumentos transformadores (señales de entrada)
  - Interruptores (open-close)
  - Otros relés vía canales de comunicación (intercambio de información)
  - A menudo se conectan a otros dispositivos auxiliares de monitoreo y control
  
- En redes de alta tensión, los relés se ubican en subestaciones (salas de control, por ej.) → conexión a transformadores de medición e interruptores en playa por medio de conductores estándar (cobre):
  
- Solución eficaz de protección → definición de zonas de protección (uno o más componentes a ser protegidos, conjuntamente con los interruptores que los separará del sistema en caso de falla)
  
- ***En el proyecto, ningún elemento bajo tensión puede quedar total o parcialmente fuera de todas las zonas de protección definidas !!!***

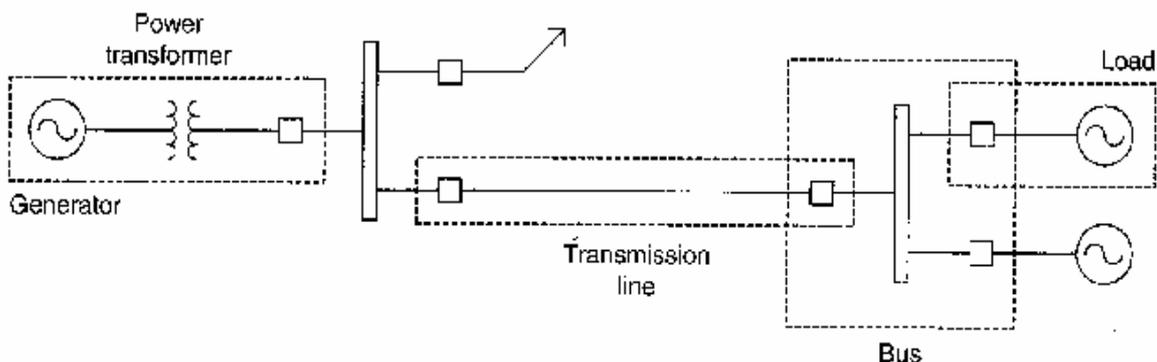


FIGURE 9.4 Allocation of Zones of Protection for Different Power System Components

- Las zonas se definen permitiendo el uso múltiple de los interruptores para zonas distintas (al menos dos):
  - o Separación de componentes vecinos fallados
  - o Se minimiza el número de interruptores
  - o **En el solapamiento de zonas hay que asegurar que ningún elemento bajo tensión quede total o parcialmente fuera de las zonas de protección definidas !!!**
  - o Es importante la definición de cobertura de back-up o respaldo (caso típico de una línea de transmisión)

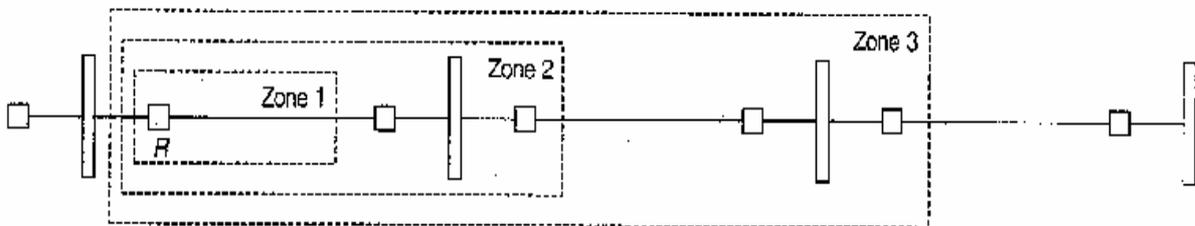


FIGURE 9.5 Selection of the Overlapping Zones for Transmission Line Protection

- Las zonas de protección se definen a través del **ajuste de alcance y de ajuste de tiempo (esto es general para todos los relés de protección) !!!**
  - o Relé R con 3 zonas de protección, zona 1 (principal), 80% de la línea, actuación instantánea, zonas 2 y 3 de respaldo (back-up, redundancia), más del 100% de la longitud de la línea, y tiempo de actuación con retardo o temporizadas (escalonamiento de los tiempos de actuación).

## 2. Sistemas de Protección: principios y criterios de operación

### 2.1 Componentes de un sistema de protección

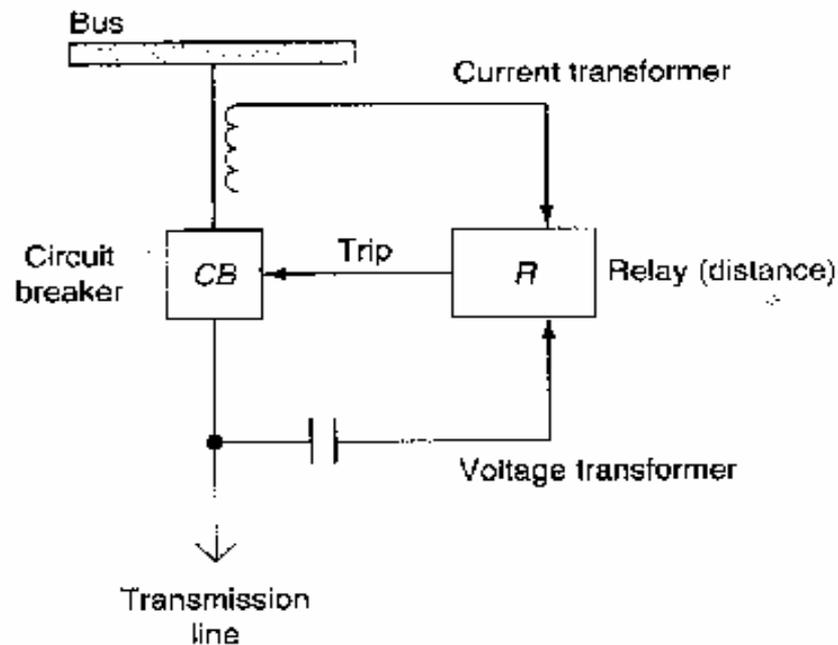
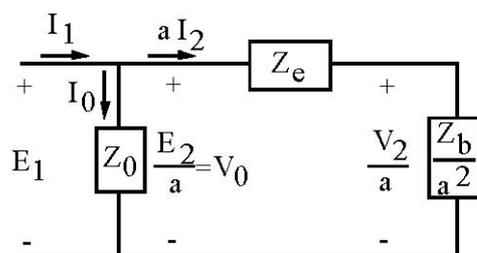


FIGURE 9.6 Protective Relaying System Consisting of Instrument Transformers, a Relay, and a Breaker

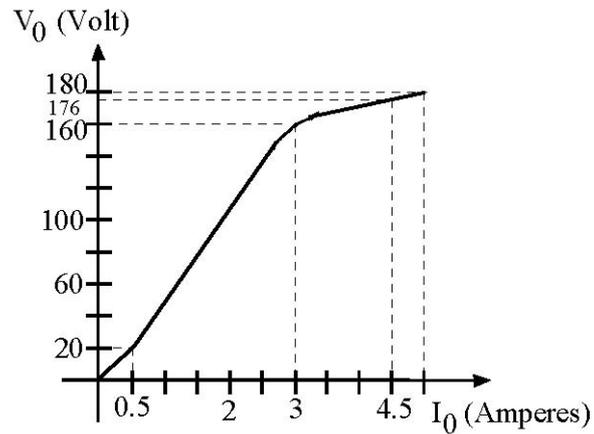
- Ante falla en la línea los interruptores en ambos extremos interrumpen la falla
- Los trafos de medición: aislación galvánica y de adaptación de los valores de corriente y tensión acordes a los relés → Selección de la relación de transformación adecuada
- La clase y precisión están regladas normas internacionales

### - Transformadores de corriente:

- Reducción de las corrientes normales a niveles de 1 o 5 A
- Vienen en forma independiente o asociados a interruptores o trafos de potencia (bushing)
- La mayoría son de núcleo de hierro → propensos a la saturación (lazo de histéresis) con corrientes de falla elevadas → **buen dimensionamiento de la sección del núcleo !!**
- Sin saturación, el trafa trabaja en la parte lineal de la característica de magnetización → se puede aplicar directamente la relación de transformación nominal; **hay que lograr esto por lo menos durante el tiempo que el relé de protección necesita para medir la señal y calcular !!!!**



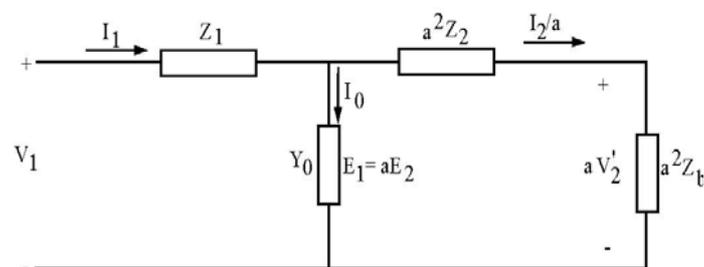
Circuito equivalente aproximado de un transformador de corriente



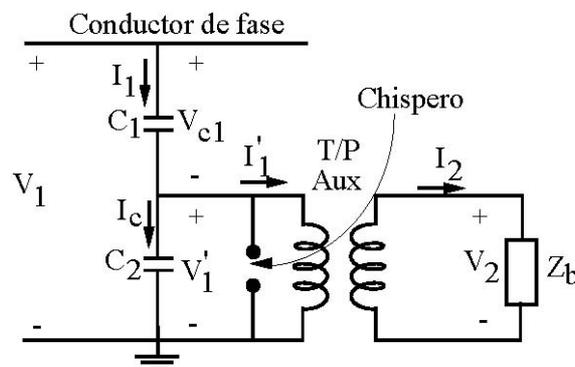
Característica de excitación de un transformador de corriente

### - Transformadores de tensión:

- Dos tipos: núcleo de hierro inductivos (transformadores de potencial PT) y capacitivos (CVT)



Inductivo



Capacitivo (redes de muy alta tensión)

# High-Voltage Instrument Transformers 72.5 kV to 800 kV

Oil/paper inner insulation  
Porcelain or composite insulator

Current transformers

DC current transducers  
for HVDC

Voltage transformers  
inductive  
capacitive

Combined units

SF<sub>6</sub> inner insulation  
Composite insulator

Current transformers

Voltage transformers

Combined units

SF<sub>6</sub> insulated  
Metal-enclosed for GIS

Voltage transformers

Current transformers

Reactors  
for resonant test sets

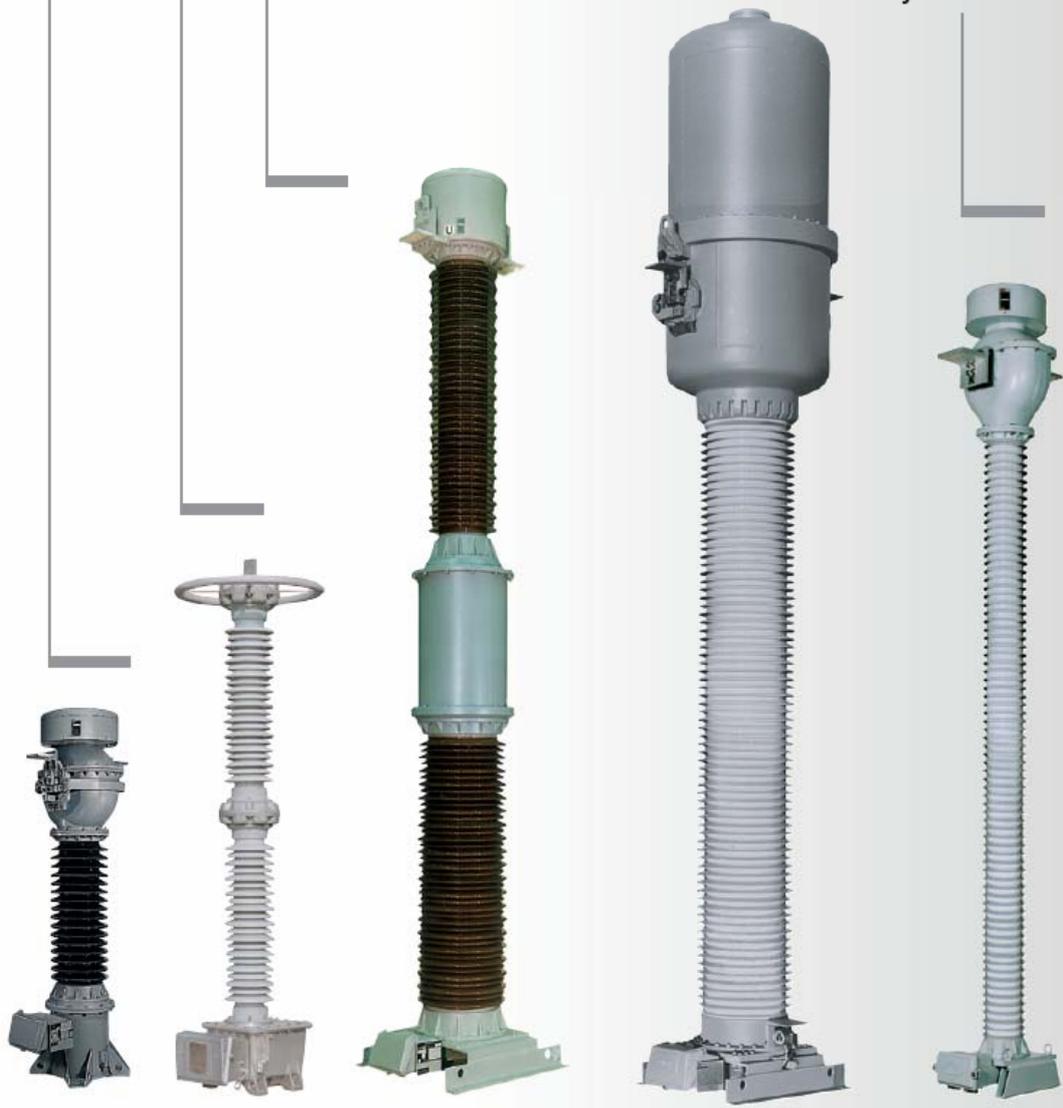
Sensors

Current, AC and DC

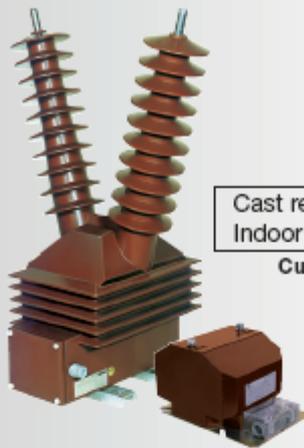
Voltage

Combined units

Hybrid sensors



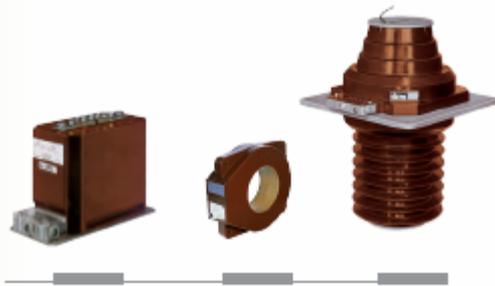
**Medium-Voltage Instrument Transformers 3 kV to 72.5 kV**



Cast resin insulated  
Indoor or outdoor

**Current transformers**

- Post type
- Window type
- Bushing type  
fully insulated



**Voltage transformers**

Earthed or unearthed



Metal-enclosed  
instrument transformers for GIS

**Current transformers**

**Voltage transformers**

**Combined units**  
e.g. for tariff metering



Special design

**Voltage transformers**  
for rail road engines



**Generator current transformers**  
for bus ducts or terminal boxes

**Damping systems**  
against ferroresonance



**Ohmic voltage dividers**



**Current and voltage sensors**

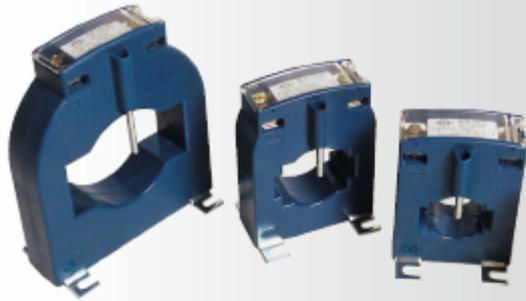


**Low-Voltage Instrument Transformers up to 1.2 kV**

Polycarbonat housing or  
cast resin insulated

**Current transformers**

- Slip-on type
- Bushing type
- Tube type
- Bar type
- Wound type
- Auxiliary type



**Voltage transformers**

**Laboratory  
current transformers  
and voltage transformers**

Summation type

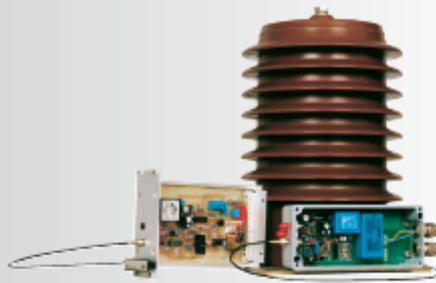
Split type



**Current sensors**

## Optoelectronic Components

### Optical Transducer



galvanic isolation of ohmic capacitive dividers  
with analogue optic signal transmission  
and auxiliary power supply

### Optical Interface

with optical powered remote module at the  
metering point and digital optic data transmissi-  
on

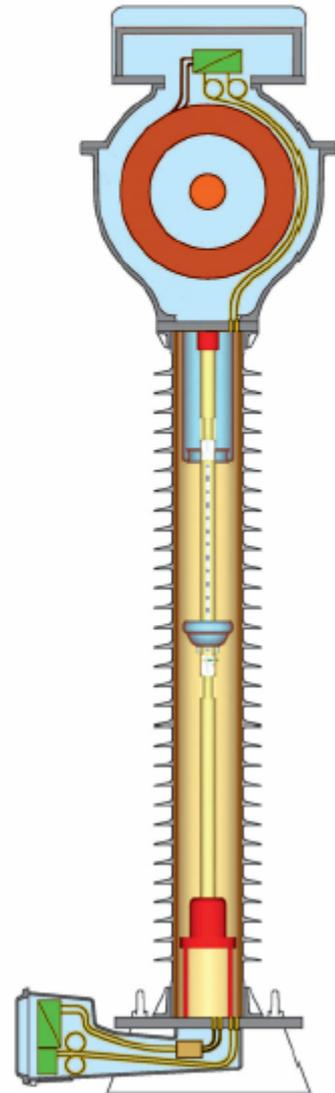
#### Protocol Converter



### Optical Voltage and Current Sensor

**Current Sensor**  
with inductive wide range sensor  
and optical interface

**Optical Voltage Sensor**  
with distributed Pockel's crystals



- Relés

- o La **característica** del relé puede ser muy distinta **dependiendo** de las **magnitudes procesadas** y el **principio** empleado

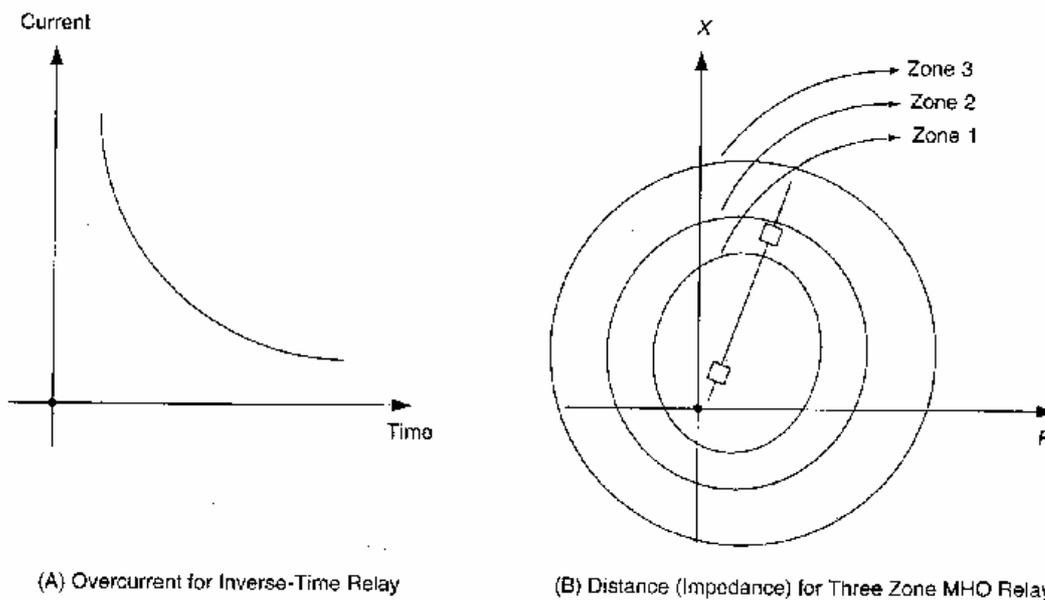
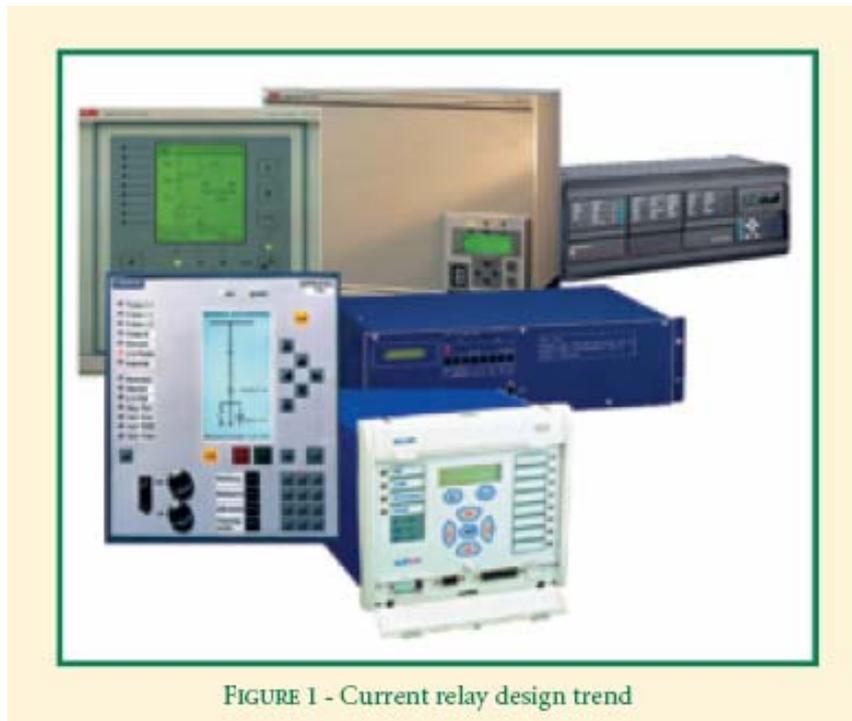


FIGURE 9.7 Typical Relay-Operating Characteristic

- Principio de operación: comparación entre la magnitud medida y el umbral o ajuste
- Cuando la magnitud medida supera el umbral (ajuste) definido, el relé interpreta que hay una falla → envía una orden de apertura al interruptor (denominado relay tripping o disparo del relé)
- Diferentes diseños y tecnologías: electromecánicos – electrónicos de válvulas – electrónicos de estado sólido (analógicos) – microprocesados → menor tamaño y menores costos



## - Interruptores:

- Interrumpen la continuidad del circuito eléctrico, voluntariamente o necesidad de aislar un equipo o una parte del circuito fallado.
- La apertura de los contactos es comandada por un circuito de control → señal del relé → energiza el mecanismo encargado de abrir los contactos (contactos principales y auxiliares, cámara de apagado de arco).
- Diseño complicado:
  - Estado cerrado: Deben conducir la corriente sin introducir pérdidas ni calentamiento de importancia.
  - Estado abierto: Deben impedir totalmente el paso de la corriente sin presentar fugas de importancia.

- El principio básico: Contacto fijo y contacto móvil que se separa de éste en forma rápida para crear un espacio no conductor entre ellos. La separación se logra, generalmente, por la acción de un resorte que se comprime con la ayuda de un motor auxiliar.
- Normalmente, se trata e lograr la interrupción ante paso por cero de la corriente → mínima energía
- A menudo no se tiene éxito en la interrupción al primer intento y es necesario varios ciclos → afecta la velocidad de interrupción
- Velocidad: 2 ciclos los más rápidos (alta tensión) hasta 50 ciclos (niveles de tensión menores)
- Fallas en líneas aéreas: mayoría temporarias → capacidad de autorecierre (autoreclosing), intento aislado o múltiple, monofásico o trifásico
- Necesidad de relés auxiliares por si el interruptor falla al abrir (Protección por falla de interruptor PFI o Breaker Failure Protection BFP)
- **Tipo de Interruptores: Dependen del nivel de tensión y velocidad de apertura requerida**
  - Interruptores de gran volumen de aceite
  - Interruptores de pequeño volumen de aceite
  - Interruptores neumáticos
  - Interruptores de aire a presión atmosférica
  - Interruptores de aire comprimido
  - Interruptores en vacío
  - Interruptores en Hexafluoruro de Azufre ( $\text{SF}_6$ )

## 2.2 Principios básicos de protección

- En la protección de componentes de un SSEE se utilizan varios principios; los mayormente aplicados son: **sobrecorriente, distancia, direccional y diferencial**
- En líneas de muy alta tensión se utilizan adicionalmente canales de comunicación entre relés en los extremos → intercambio de información → **teleprotección y protecciones pilotos**
- Características de los mayormente aplicados:
  - **Protección de sobrecorriente**
    - Premisa: normalmente, la corriente de falla es  $>$  que la corriente de carga
    - **Relé de sobrecorriente instantáneo**: cuando la Ifalla supera un determinado valor por arriba de la corriente de carga, luego envía la orden al int. en forma instantánea → Protección de líneas radiales de baja tensión, protección de tierra de líneas de AT, protección de motores y generadores, otros..
    - **Relé de sobrecorriente temporizado**: cuando la Ifalla supera un determinado valor por arriba de la corriente de carga, luego envía la orden al int. en forma temporizada; el tiempo de actuación es función de la corriente de falla (tiempo constante, tiempo inverso) → sobrecargas temporales severas, coordinación con otros dispositivos de protección, etc..

- La combinación de estos con relés direccionales provee una gran flexibilidad

## - Protección de distancia

- El principio es la comparación de la relación compleja entre la tensión y corriente  $\rightarrow V / I = Z$ , que es proporcional a la longitud de la línea. (de allí el nombre de relé de distancia)
- Es principalmente utilizado en líneas de alta tensión  $\rightarrow$  solo el principio de sobrecorriente no es suficiente para determinar la distancia hasta la falla.
- El cálculo de la impedancia resulta laborioso: cada tipo de falla implica fórmulas de cálculo distintas  $\rightarrow$  distintos ajustes para fallas a tierra y fallas entre fases.
- Factores que distorsionan la medición: presencia de resistencia de falla, in-feed (alimentación intermedia) en barras extremas, acoplamiento inductivo con otros sistemas, otros  $\rightarrow$  cálculo erróneo de la impedancia hasta el lugar de la falla, vista por el relé.
- Una vez calculada la impedancia, se compara con los ajustes que definen la característica de operación del relé  $\rightarrow$  basada en comparación, se decide si una falla ha ocurrido y en que zona de protección.
- Zonas de protección definidas en el plano complejo:

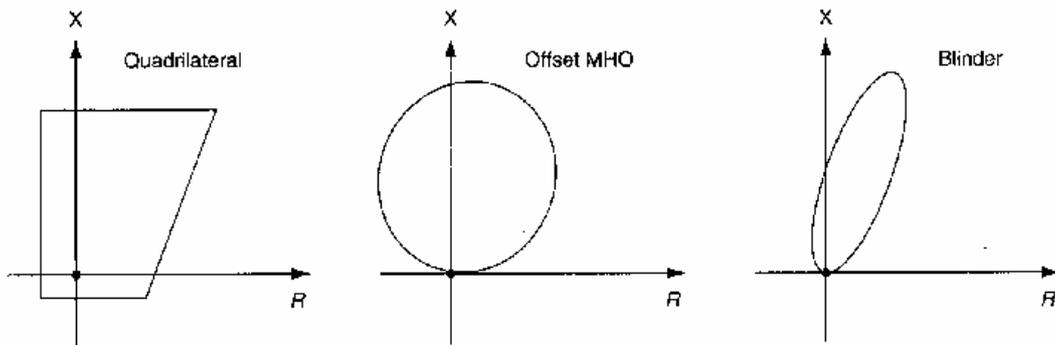


FIGURE 9.8 Operating Characteristics of a Distance Relay

- La característica determina le performance para una aplicación específica: cambios en los niveles de carga, diferentes valores de resistencia de falla, presencia de acoplamiento mutuo e inversión de la dirección de la corriente de falla.
- Se pueden vincular dos relés en los extremos de una línea y armar los llamados esquemas de protección con canales de comunicación → técnicas de bloqueo o desbloqueo; en estas técnicas es muy importante el principio de direccionalidad

### - Protección direccional

- Basado en la comparación del ángulo de la corriente de falla comparado con el ángulo de la tensión (fase o línea)
- Puede ser utilizado en protecciones de sobrecorriente o impedancia (en el último caso se ve en que cuadrante cae la impedancia calculada)
- Se definen así zonas (o cuadrantes) reversas y zonas hacia delante.

- Puede estar basada en el cálculo de la potencia que entra o sale de un componente (por ej. Protección por inversión de potencia activa en un generador)

### - **Protección diferencial**

- Ampliamente usada en la protección de líneas, transformadores, generadores y barras.
- Principio: comparación de las corrientes medidas que entran y salen de un determinado componente → si las corrientes son las mismas, luego el componente está sano; si hay diferencia (corriente diferencial), esta indica una falla en el componente.
- La diferencia de corriente debe ser suficientemente grande: hay situaciones en que la corriente diferencial alcanza valores no despreciables sin presencia de falla (por ej. Imprecisiones en los transformadores de intensidad)

## 2.3 Criterios de operación

- Velocidad: tecnología, algoritmos de cálculo
- Dependabilidad-Seguridad: confiabilidad
- Selectividad: coordinación del sistema de protección

## 3. Protección de líneas

### 3.1 Protección por sobrecorriente de alimentadores

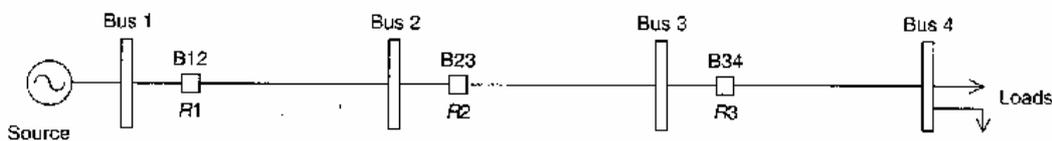


FIGURE 9.10 Protection of a Radial Distribution Feeder

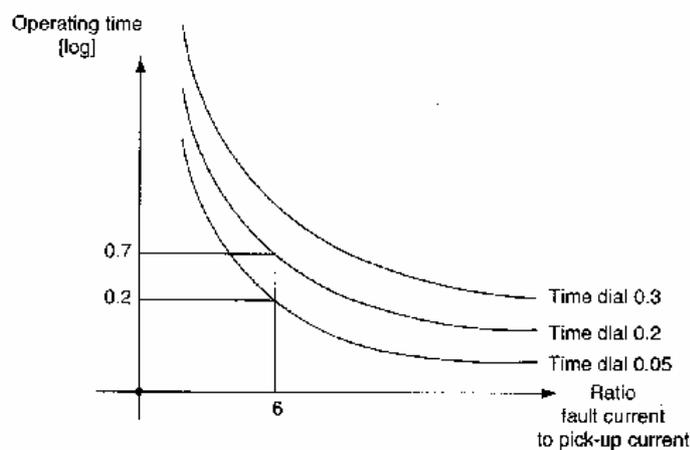


FIGURE 9.11 Inverse-Time Operating Characteristic of an Overcurrent Relay

### 3.2 Protección de distancia de líneas de transmisión

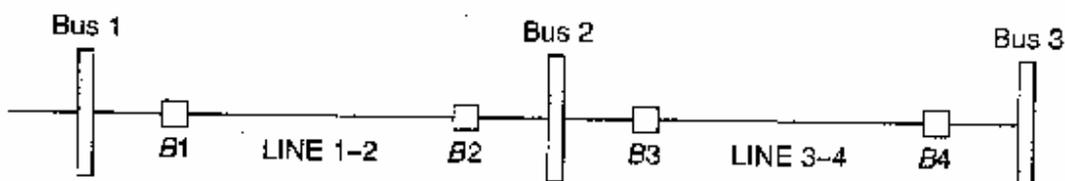


FIGURE 9.12 A Sample System for Distance Relaying Application

### 3.3 Esquemas de protección direccional para líneas de alta tensión

**TABLE 9.3** Summary of Basic Characteristics of Most Common Relaying Schemes

Scheme type (Directional Comparison)	The use of communication channel	Type of signal sent
Blocking	Blocking a signal (use of power line carrier)	Block
Unblocking	Sending either block or unblock signal all the time (use of frequency shift keying channel)	Block/unblock
Overreaching transfer trip Underreaching transfer trip	Sending a trip signal (use of audio tones)	Trip/guard

- Bloqueo-Desbloqueo
- Transferencia de disparo (sub- y sobrealcance)

### 3.4 Protección Diferencial para líneas de alta tensión

**TABLE 9.4** Summary of Most Common Differential Relaying Principles

Differential principle	Signals used for comparison	Properties
Pilot-wire	Three-phase currents converted into sequence voltage	Use of sequence filters due to direct use of wires prone to transients caused by interference
Phase comparison	Three-phase currents converted into a single current waveform	Composite waveform converted into binary string used for phase comparison
Segregated phase comparison	Phase currents in each phase directly compared at two ends	Currents converted into square waves used for phase comparison
Current differential	Samples of each current transmitted to the other end for comparison	Currents from both ends directly compared
Composite-waveform differential	Each current converted into sequence current and a combined composite signal is transmitted	Composite signals from both ends directly compared

## 4. Protección de transformadores

### 4.1 Condiciones de operación: Interpretación errónea de las corrientes diferenciales

- Fenómeno de corriente in-rush ( o corriente de energización)

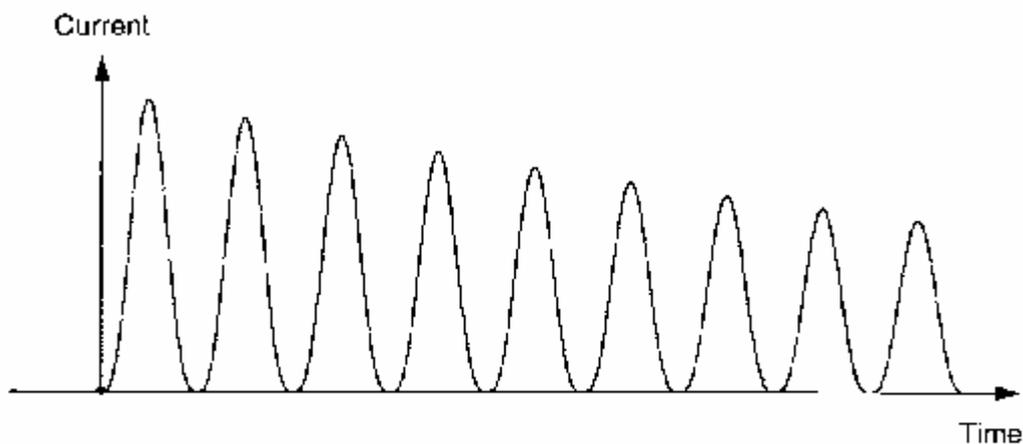


FIGURE 9.13 Magnetizing Inrush Affecting Primary Current

### 4.2 Aspectos de implementación que conducen a la interpretación errónea de las corrientes diferenciales

- Diferencias en la relación de transformación de los TIs
- Diferencias de fase

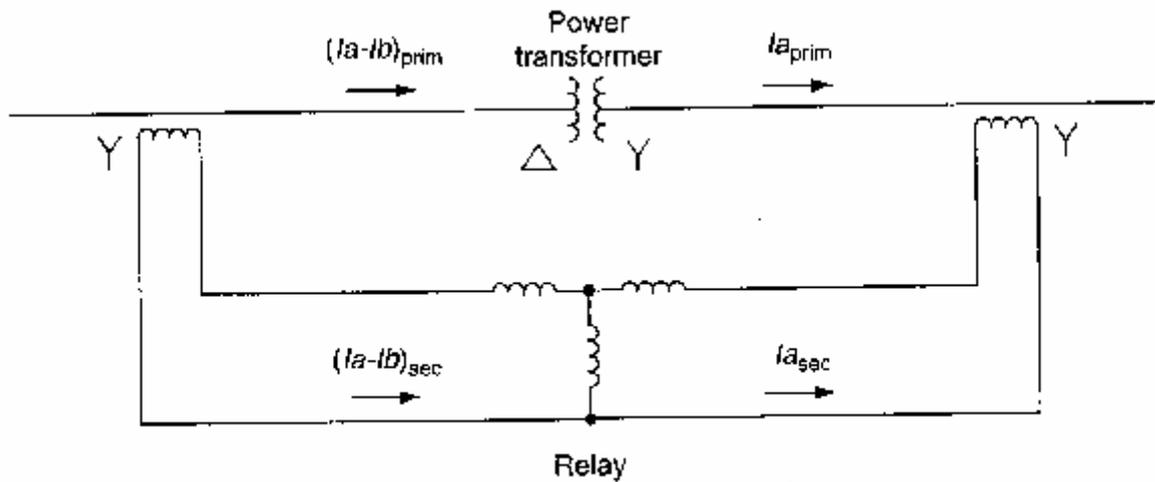


FIGURE 9.14 Phase Mismatch

### 4.3 Soluciones de protección vía corrientes diferenciales

$$|(I_1 - I_2)| \geq I_T.$$

- Solución directa:

$$|(I_1 - I_2)| \geq \frac{|(I_1 - I_2)|}{2} ;$$

- Debido a los errores de medición: diferencial con restricción.

### 5. Protección de generadores sincrónicos

- Protección principal: diferencial de corriente.
- Adicionalmente los generadores deben satisfacer otras diversas condiciones especiales de operación → funciones de protección adicionales
- Es el componente más protegido del sistema → aprox. 28 funciones de protección !!!

## **5.1 Requerimientos para las protecciones de generadores sincrónicos**

- Debe ser protegido contra fallas internas y condiciones anormales de operación
- Se requiere protección tanto para el estator como para el rotor
- El estator es protegido contra fallas a tierra y de fase
- El rotor es protegido contra fallas a tierra y pérdida parcial o total del campo de excitación
- Protección contra disturbios en la red: sobre y subtesniones, corrientes desbalanceadas, desviaciones de frecuencia de la red, oscilaciones subsincrónicas, etc..
- Condiciones peligrosas de operación: pérdida de la turbina de impulso (motorización), energización inadvertida (cierre asincrónico), sobrecarga, salida de sincronismo (out-of-step) y operación a frecuencias no permitidas.

## **6. Protección de barras**

- Baja tasa de ocurrencia de falla
- Falla grave → normalmente de baja resistencia, puede ocasionar problemas de sincronismo y deterioro de equipo si es desconectada a tiempo
- Fuerza la salida de toda la subestación

## **6.1 Requerimientos para las protecciones de barras**

- Velocidad: protección instantánea
- Probables problemas debido a la saturación de TIs

## **6.2 Principios de protección utilizados**

- Diferencial de barra: baja y alta impedancia (cuando hay peligro de saturación de algún TI)