



**APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE
TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS
A LA ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS**

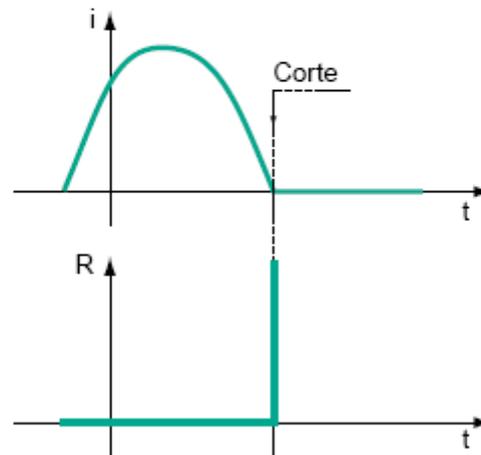
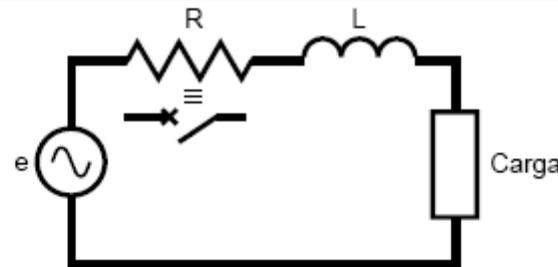
PARTE 1



TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO DE DISYUNTORES

EL DISYUNTOR IDEAL

- Abre en el cero de corriente .
- La resistencia entre sus contactos pasa de valor cero a infinito en forma instantánea durante la apertura.
- Soporta inmediatamente la tensión de recuperación entre sus bornes

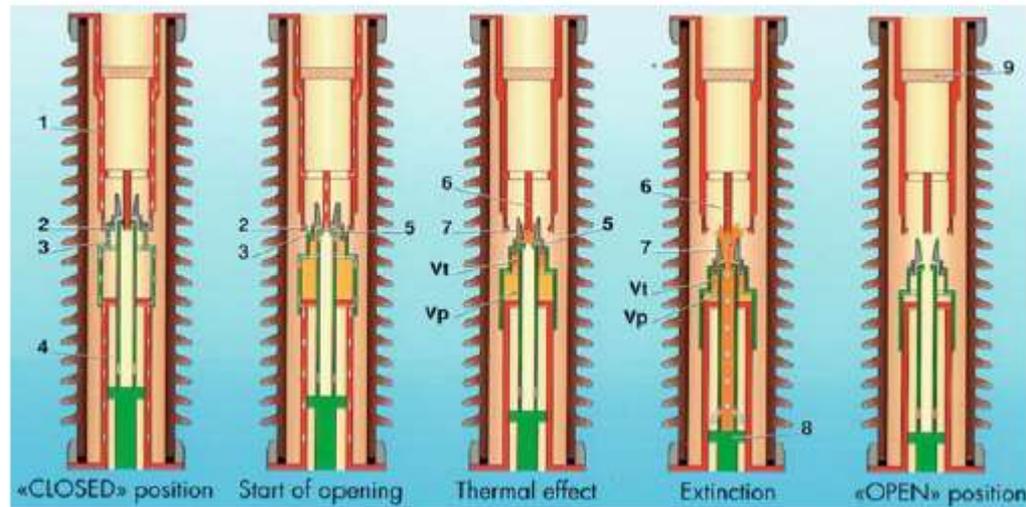


EL DISYUNTOR REAL: EL ARCO ELÉCTRICO

- ✓ Entre el instante de separación de contactos y el cero de corriente se produce un arco eléctrico.
- ✓ La resistencia entre contactos evoluciona gradualmente de cero a infinito al variar la resistencia del arco.
- ✓ La extinción del arco se produce en un cero “natural” de la corriente (debido al enfriamiento del arco a medida que baja la corriente), que puede ser el primero siguiente a la separación de contactos u otro posterior.
- ✓ La rigidez dieléctrica entre contactos aumenta gradualmente en función de las características del dieléctrico, técnicas de soplado de arco y velocidad de separación de contactos.

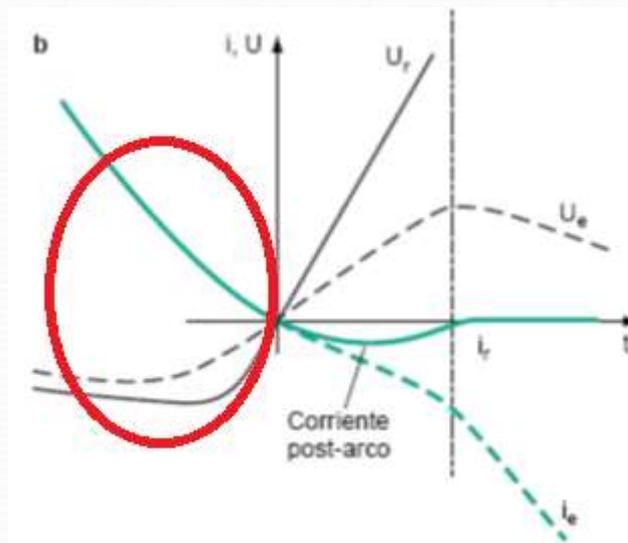
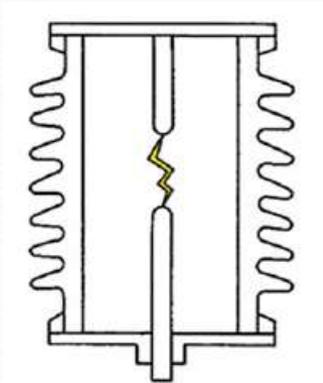
Etapas del proceso de interrupción en los disyuntores reales

- ✓ Período de arco (*arcing*)
- ✓ Período de extinción
- ✓ Período de recuperación



Período de arco

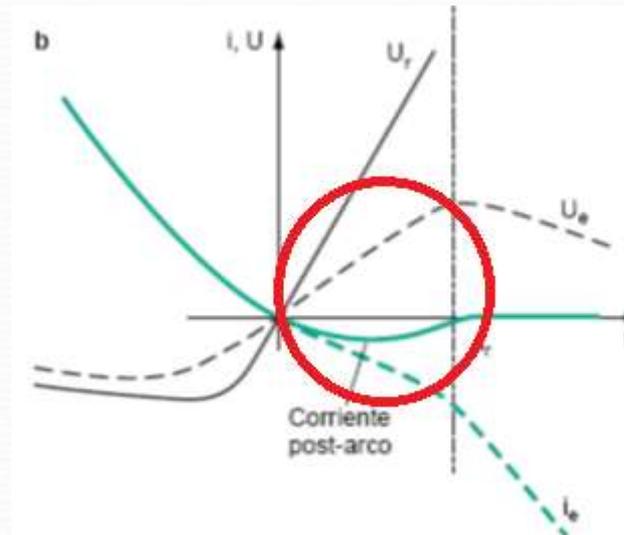
- La separación de los contactos, provoca la ruptura dieléctrica del medio inter contactos, generándose el arco eléctrico.
- El arco se automantiene por la energía que él mismo disipa por efecto Joule.
- Aparece la *tensión de arco* entre los contactos (decenas a cientos de volts en MT, algunos kV en AT y EAT).
Su valor depende de la intensidad de la corriente y de los intercambios térmicos con el entorno.



Período de extinción

-Cerca del cero de corriente, la resistencia de arco aumenta debido a la desionización del medio ínter contactos.

-Se mantiene inicialmente una pequeña corriente post-arco (la resistencia de arco aun no es infinita), que crece con la derivada di/dt de la corriente cortada.

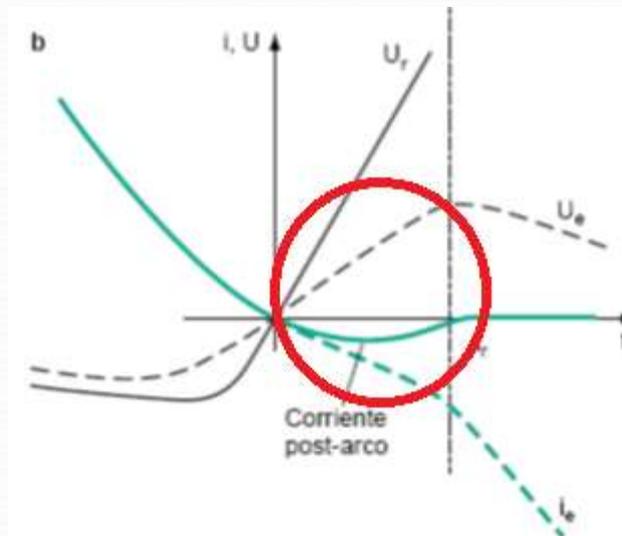


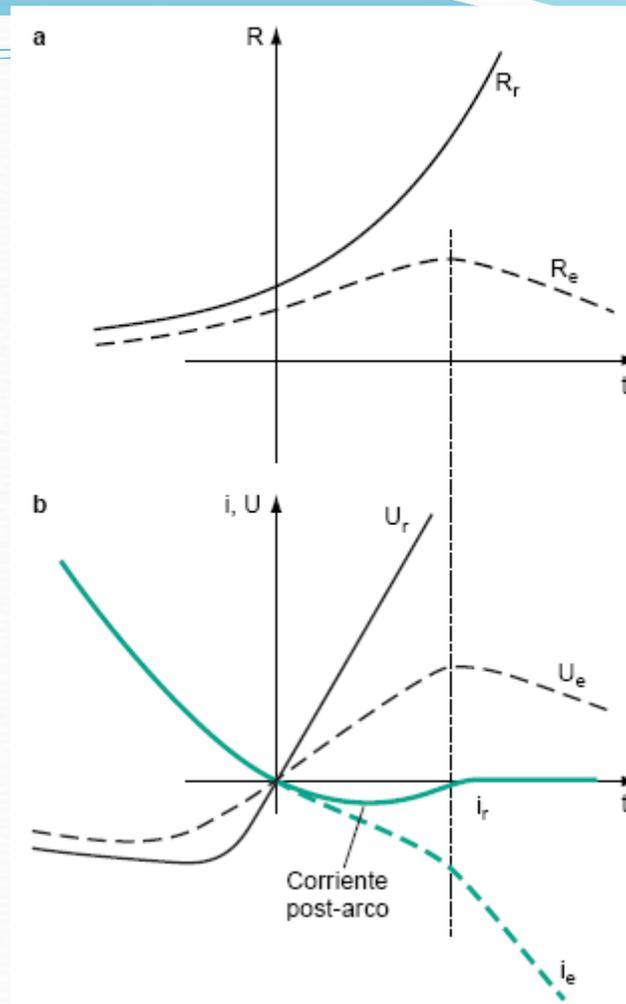
Período de extinción

-La tensión entre contactos del disyuntor comienza a evolucionar hacia la tensión de la red por medio de un transitorio que es función de los parámetros de la red (*Tensión transitoria de restablecimiento, TTR o TRV*).

-Si la energía disipada por efecto Joule en este período (que es función de $d(TTR)/dt$) sobrepasa la potencia de enfriamiento impuesta por el disyuntor, el medio no se sigue enfriando .

Se produce una avalancha térmica seguida de una ruptura dieléctrica: es una ruptura térmica





a Evolución de la resistencia de arco

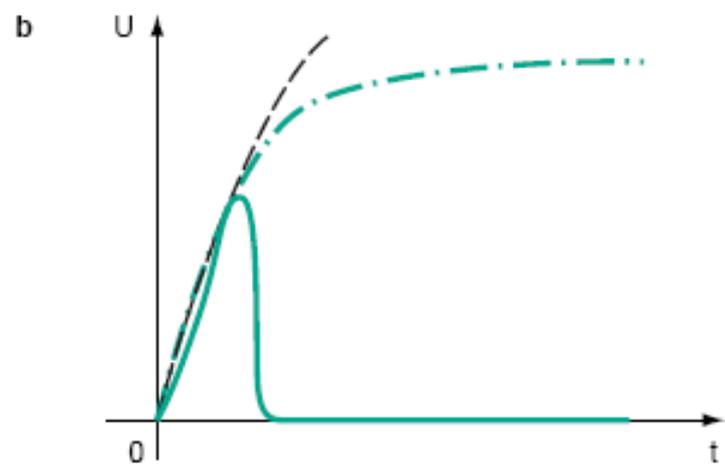
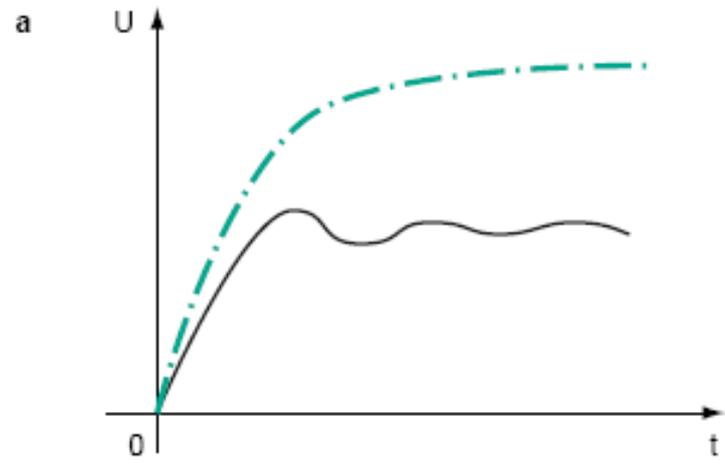
b Evolución de la corriente y tensión

Caso r: apertura exitosa

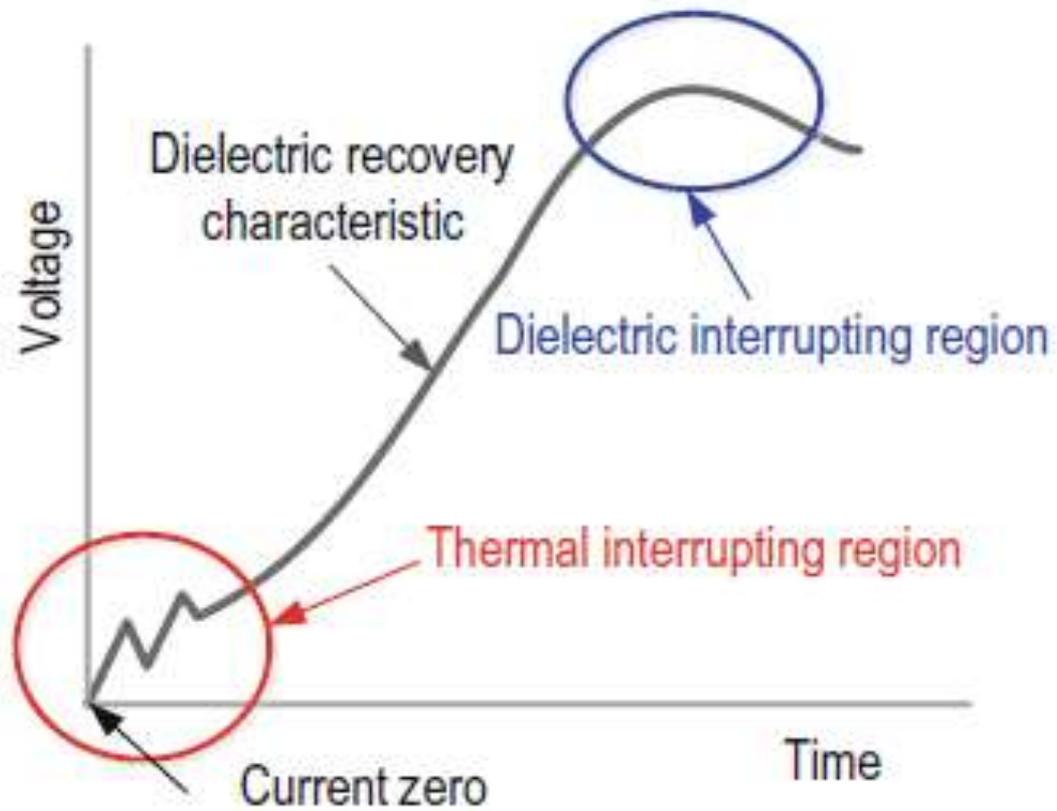
Caso e: reencendido (avalancha térmica)

Período de recuperación

- Para que la interrupción tenga éxito, es necesario que la velocidad de regeneración dieléctrica sea más rápida que la TTR , de otro modo aparecerá una ruptura dieléctrica.
- Las rupturas dieléctricas post corte se clasifican en:
 - ✓ Reencendidos (*reignition*) si tienen lugar en el primer cuarto de período que sigue al cero de corriente.
 - ✓ Recebados (*restrike*) si se producen después.

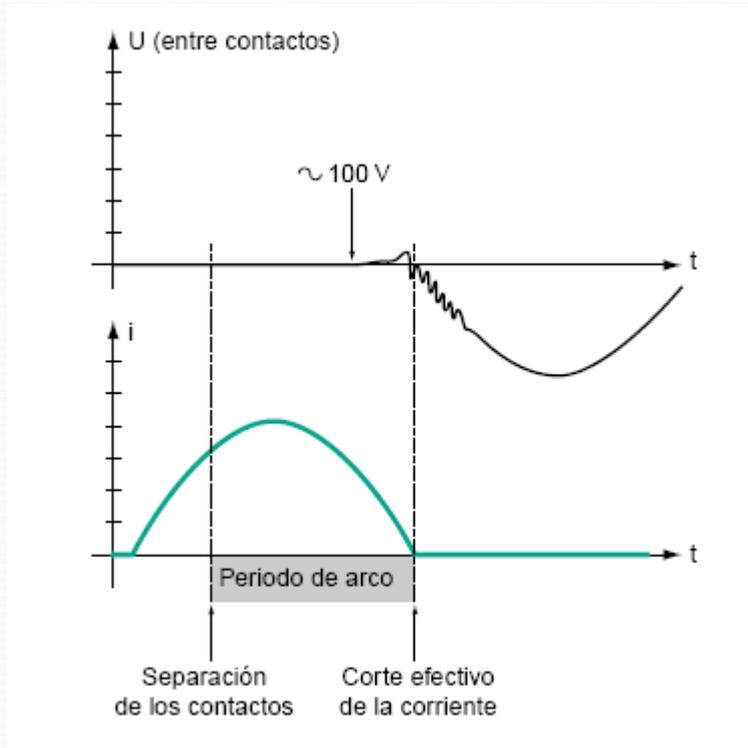


- Tensión de restablecimiento
- - - Curva de regeneración dieléctrica
- - - Tensión de restablecimiento si el aparato no se hubiese recibido
- Tensión de restablecimiento con recibido



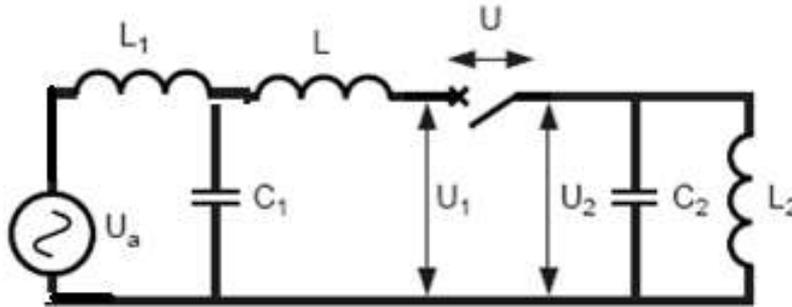
LA INTERACCIÓN DEL DISYUNTOR CON LA RED

1) Corte de cargas “normales” (carga principalmente activa)



**-Cero de corriente cercano al cero de tensión :
el transitorio de recuperación es “suave” (TTR limitadas)**

2) Corte de pequeñas corrientes inductivas (reactores, motores, transformadores en vacío)

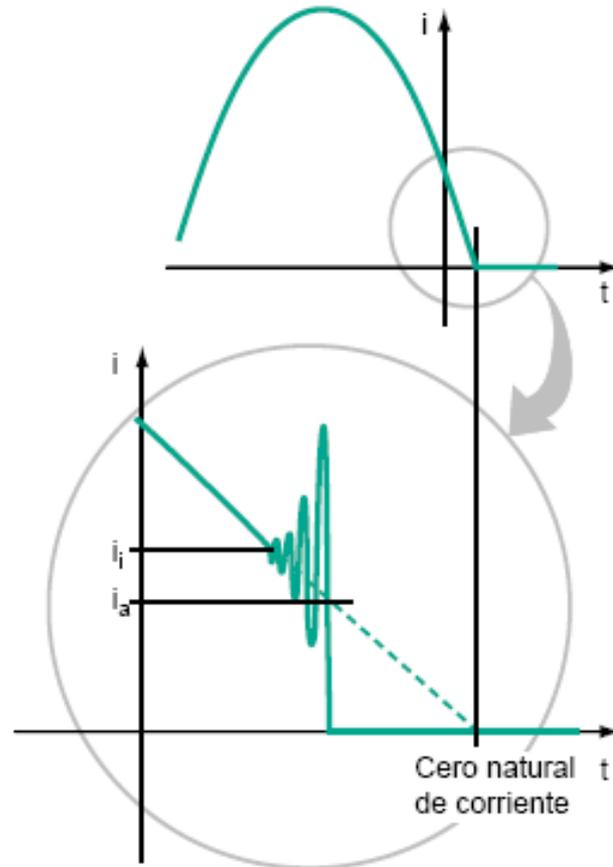


L_1, C_1 = inductancia y capacidad aguas arriba
(fuente de alimentación),
 L_2, C_2 = inductancia y capacidad aguas abajo
 L = inductancia de enlace aguas arriba del disyuntor D
(conjunto de barras o cables),

-Valores de corriente de hasta centenas de A.

-La capacidad C_2 suele ser muy pequeña, por lo que la frecuencia natural del circuito lado carga es muy alta.

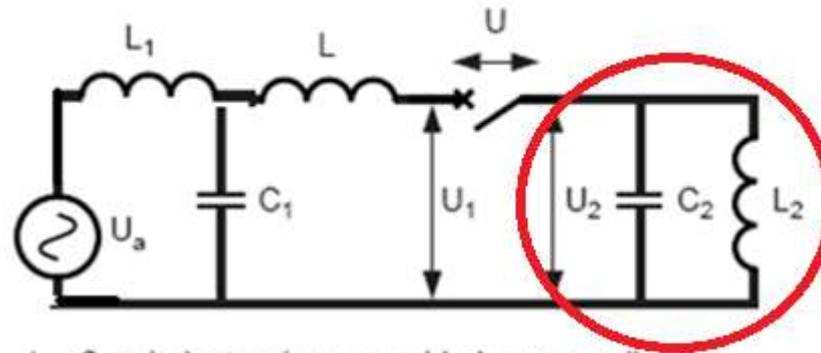
-Por ser la corriente pequeña es probable que el disyuntor imponga un “corte” de corriente antes de cero natural, y con tiempos de arco cortos (corriente *arrancada* o de *chopping*).



i = corriente en el disyuntor,
 i_i = valor de la corriente que provoca la inestabilidad,
 i_a = valor de la corriente arrancada,

-El corte brusco de corriente (con alta di/dt) provoca sobretensiones del lado carga (la llamada *tensión de supresión*)

-La tensión alta así “almacenada” en las capacidades del lado de la carga oscila a frecuencias altas (decenas de kHz), por lo que hay riesgo de reencendido, dado que los contactos no tienen tiempo de separarse.

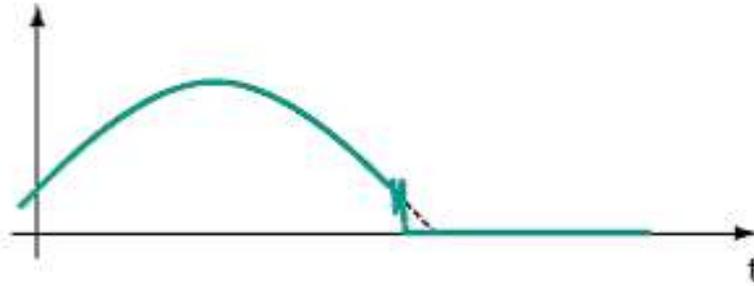


L_1, C_1 = inductancia y capacidad aguas arriba (fuente de alimentación),

L_2, C_2 = inductancia y capacidad aguas abajo

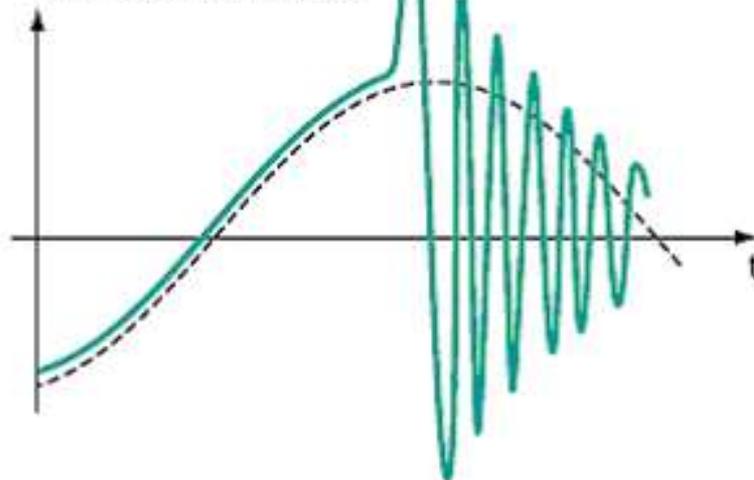
L = inductancia de enlace aguas arriba del disyuntor D (conjunto de barras o cables),

Corriente a cortar



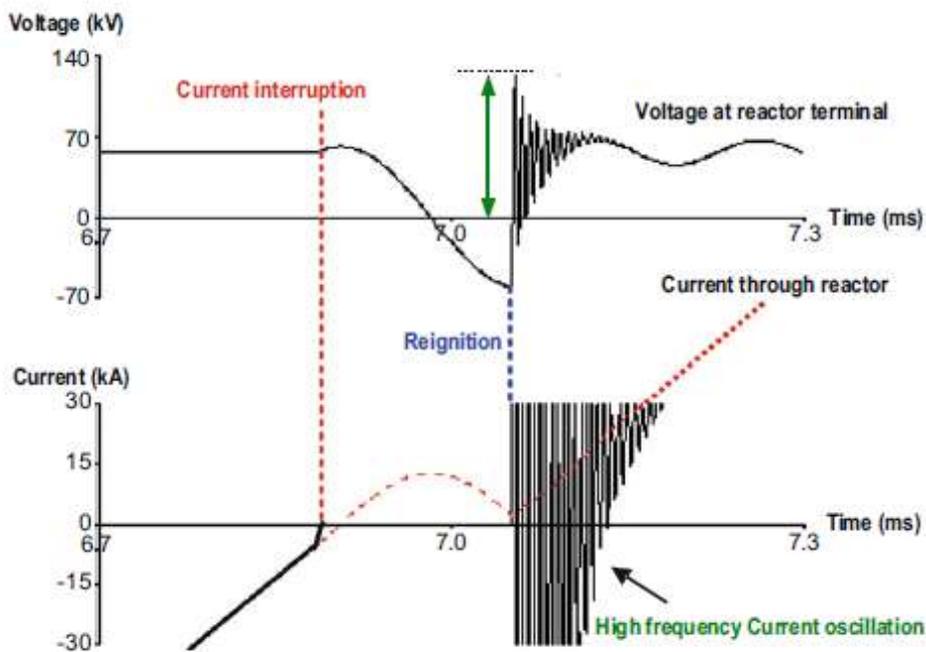
Tensiones

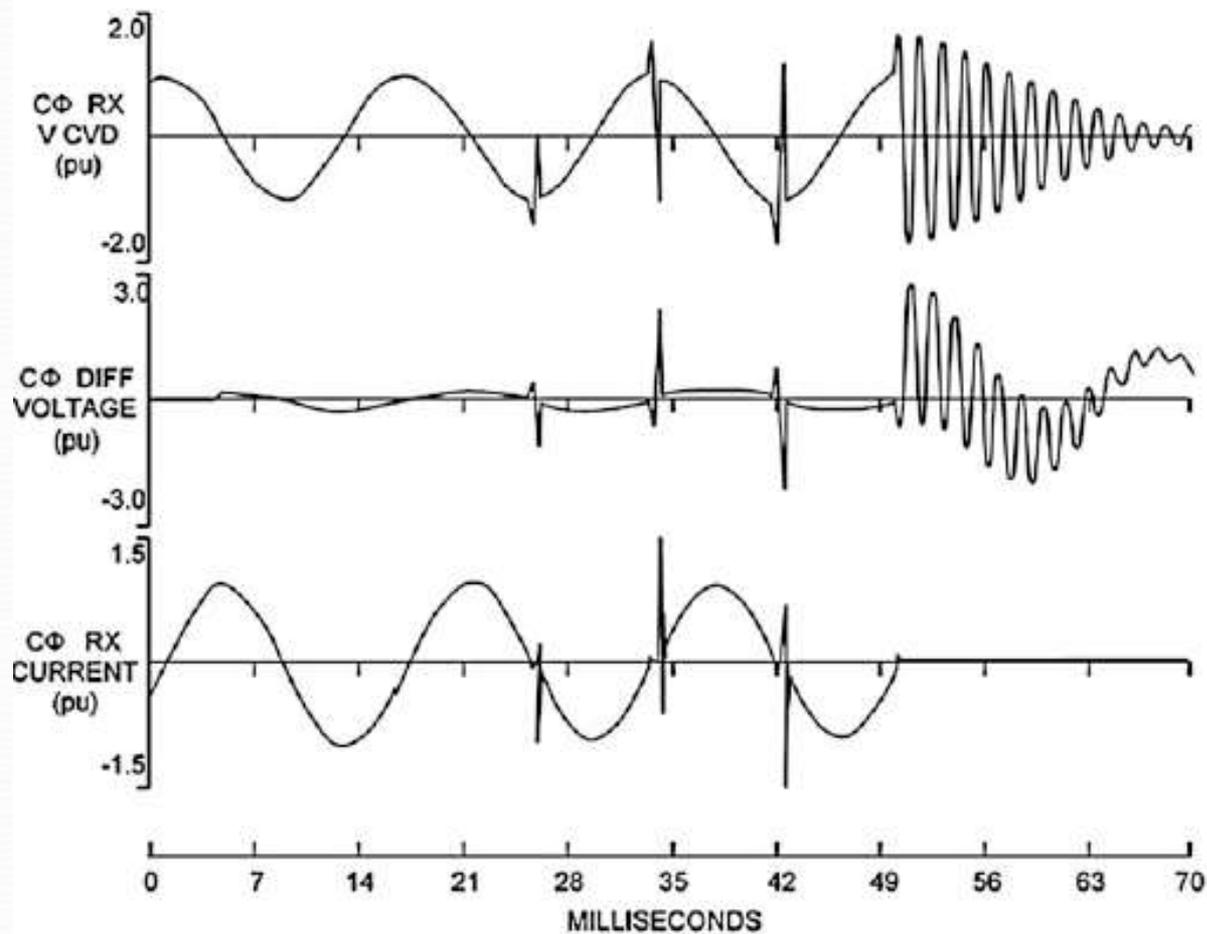
- en los bornes de la carga
- - - en el lado de la fuente



-Si se produce el reencendido, la tensión oscila a frecuencias muy altas y con pendientes de crecimiento muy altas (decenas o centenas de $\text{kV}/\mu\text{s}$), poniendo en riesgo el aislamiento de la carga.

-Si el disyuntor tiene capacidad de extinguir estas corrientes de alta frecuencia (disyuntores de vacío) el fenómeno se puede repetir varias veces, pero comenzando de tensiones cada vez más altas (“escalada” de tensión) hasta que los contactos se hayan separado lo suficiente.





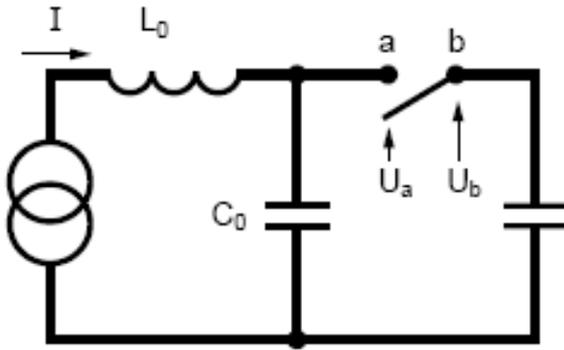
Upper oscillogram: Voltage to ground at shunt reactor

Middle oscillogram: Voltage across circuit breaker

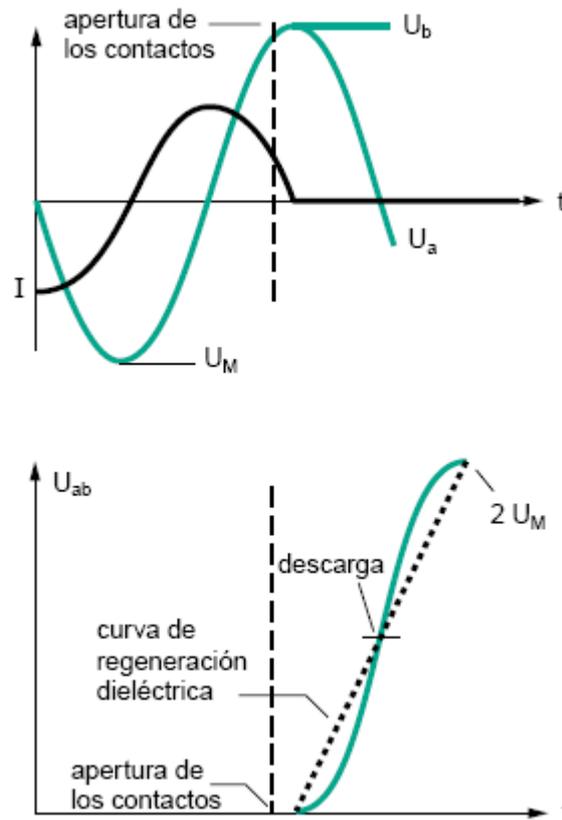
Lower trace: Shunt reactor current

Fig. 4.31 Field oscillogram of switching out a 550 kV 135 MVAR directly grounded shunt reactor

3) Corte de corrientes capacitivas (capacitores, cables, líneas en vacío)

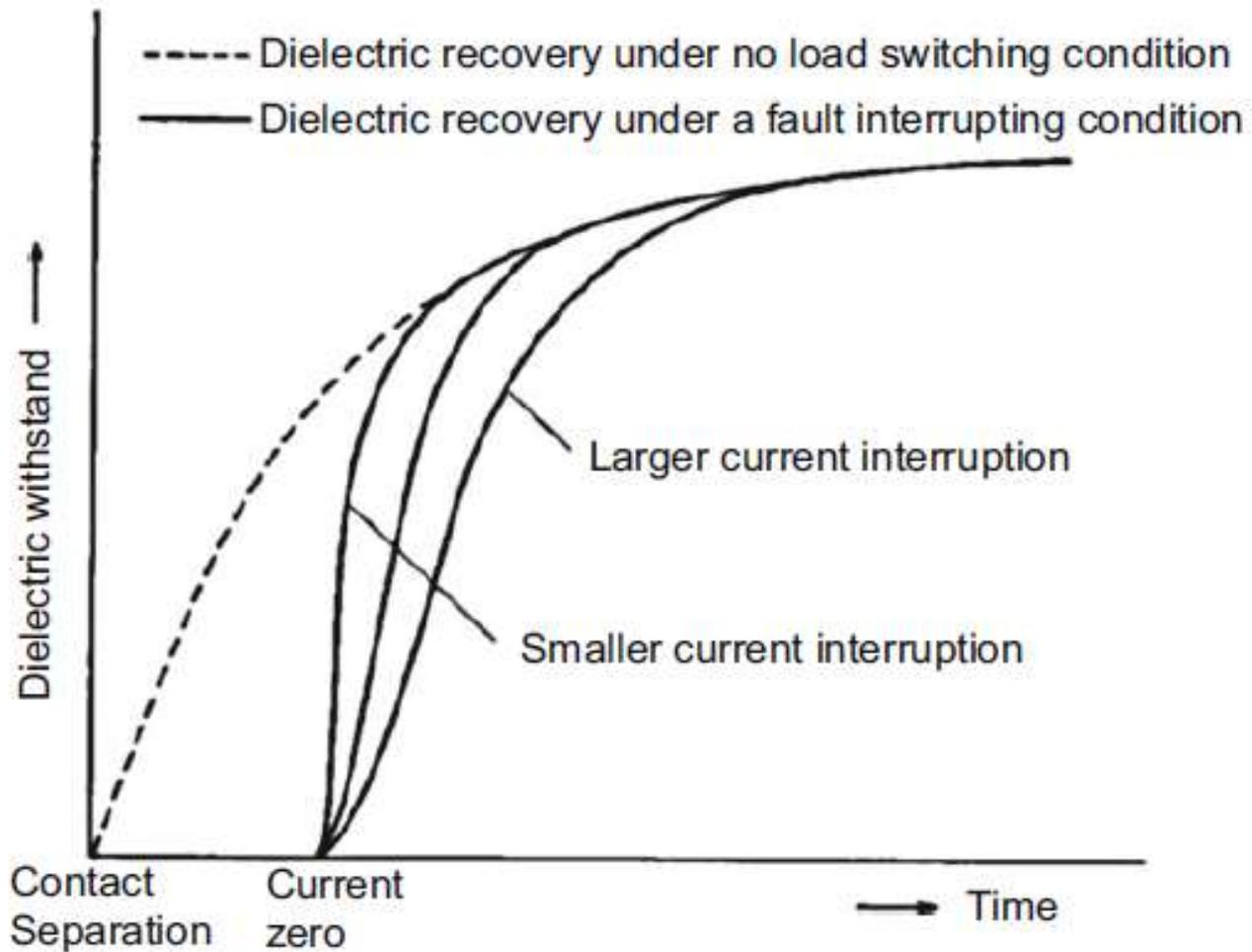


-La TTR crece lentamente, debido a la presencia del capacitor del lado carga



-Medio ciclo después del corte, la tensión en bornes de disyuntor es el doble de la tensión de red, con riesgo de recebado por ruptura dieléctrica.

-El riesgo de recebado depende muy fuertemente de la velocidad de separación de contactos y de recuperación de la rigidez dieléctrica.



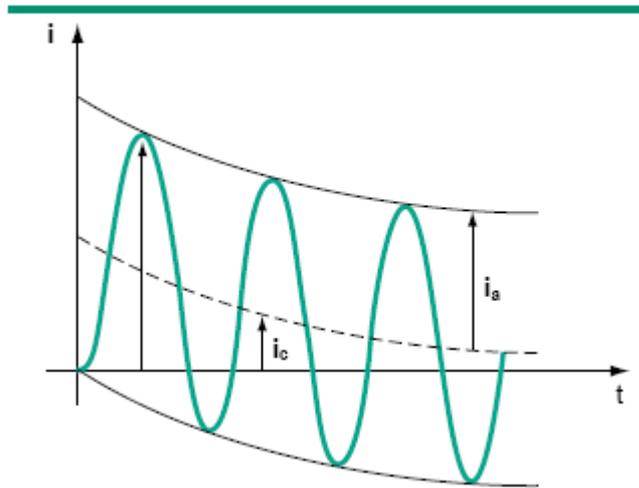
Al disyuntor se le asigna un “poder de corte” de cargas capacitivas, verificándose por ensayo que el disyuntor es capaz de abrirlas con una muy baja probabilidad de recebado.

Table 5 – Preferred values of rated capacitive switching currents

Rated voltage	Line	Cable	Single capacitor bank	Back-to-back capacitor bank		
	Rated line-charging breaking current	Rated cable-charging breaking current	Rated single capacitor bank breaking current	Rated back-to-back capacitor bank breaking current	Rated back-to-back capacitor bank inrush making current	Frequency of the inrush current
U_r kV, r.m.s.	I_l A, r.m.s.	I_c A, r.m.s.	I_{sb} A, r.m.s.	I_{db} A, r.m.s.	I_{bi} kA, peak	f_{bi} Hz
3,6	10	10	400	400	20	4 250
4,76	10	10	400	400	20	4 250
7,2	10	10	400	400	20	4 250
8,25	10	10	400	400	20	4 250
12	10	25	400	400	20	4 250
15	10	25	400	400	20	4 250
17,5	10	31,5	400	400	20	4 250
24	10	31,5	400	400	20	4 250
25,8	10	31,5	400	400	20	4 250
36	10	50	400	400	20	4 250
38	10	50	400	400	20	4 250
48,3	10	80	400	400	20	4 250
52	10	80	400	400	20	4 250
72,5	10	125	400	400	20	4 250

4) Corte de corrientes de cortocircuito

En este caso, los circuitos a cortar son típicamente inductivos, con corrientes de falla de decenas de kA.



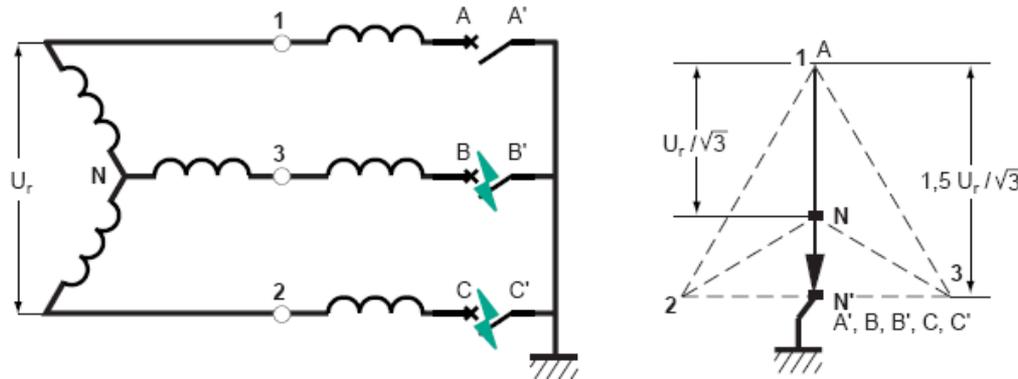
La magnitud de la componente de continua y su velocidad de decrecimiento influyen en la capacidad del disyuntor de cortar corrientes de cortocircuito, debido a que definen la magnitud de la corriente a cortar al momento de separarse los contactos-

Factor de primer polo

Cuando un disyuntor trifásico interrumpe una falta trifásica, el primer polo que abre queda sometido a una tensión a frecuencia industrial entre contactos superior a la tensión normal de red, durante el período de tiempo que transcurre entre la extinción de corriente en ese primer polo y la extinción de corriente entre los otros 2 polos.

El factor de aumento es el llamado *factor de primer polo*.

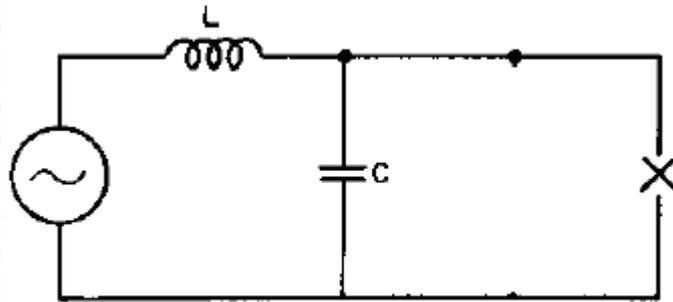
Ejemplo:



-Expresión general: $k_p = 3Z_0 / (2Z_0 + Z_1)$

-Factores de primer polo normalizados: 1,3 (redes con neutro a tierra) y 1,5.

TTR para faltas trifásicas



$$TTR(t) \approx V_m (1 - \cos(ut))$$

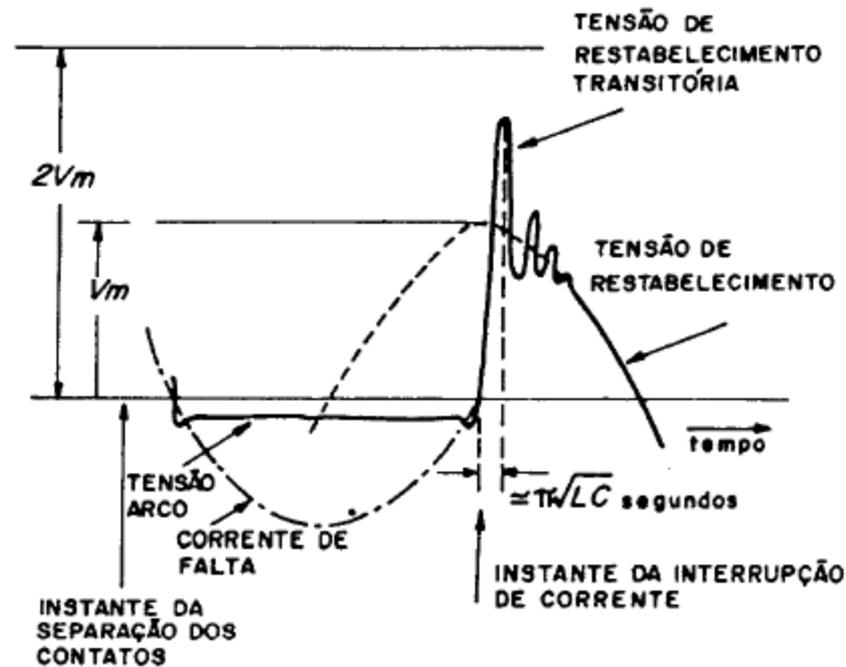
V_m = Valor de pico de la tensión lado fuente = $U \cdot k_p$

U = Valor de pico de la tensión de fuente antes de la falta

$u = 1/(LC)^{1/2}$ = frecuencia natural del circuito

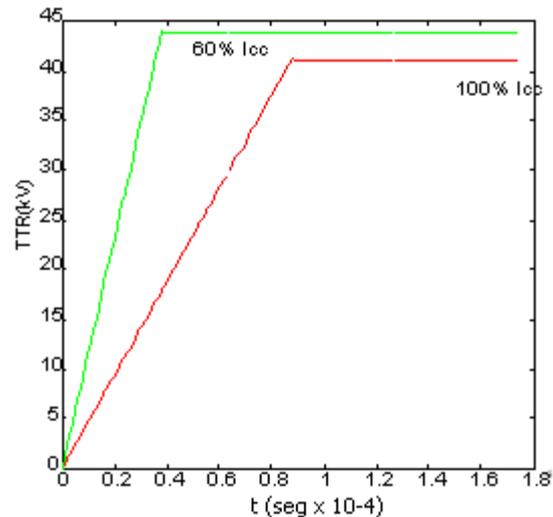
-Dado que $\omega \gg$ frecuencia industrial de la red, el pico de TTR se dará muy rápidamente luego de la extinción, y valdrá aproximadamente el doble de la tensión lado fuente.

En la práctica: los amortiguamientos llevan este factor 2 a factores del orden de 1,4.



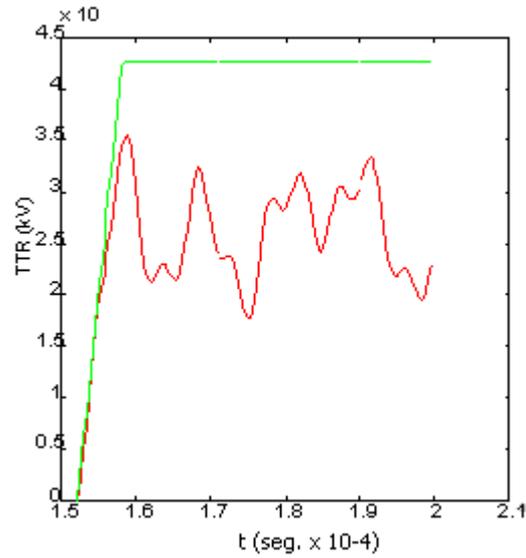
TTR límites para apertura de cortocircuitos

-Las Normas IEC especifican las TTR límites en base a curvas simplificadas: 2 rectas (MT) o 3 rectas (AT,EAT) ,parametrizadas en la corriente a cortar.

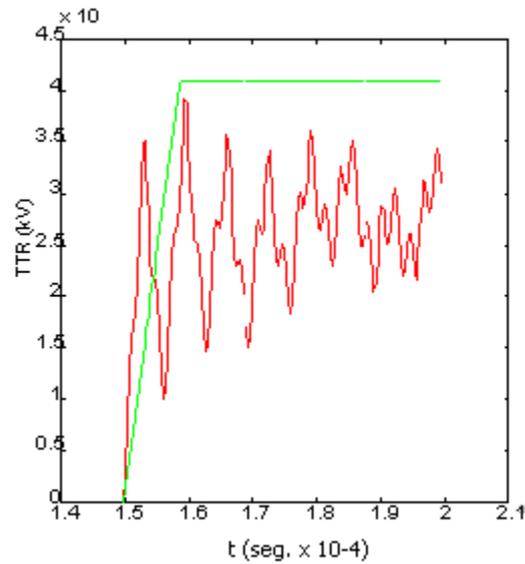


-Si la simulación muestra que se viola la curva límite, es de esperar un reencendido térmico (violación de pendiente) o dieléctrico (violación de pico)

Acceptable:

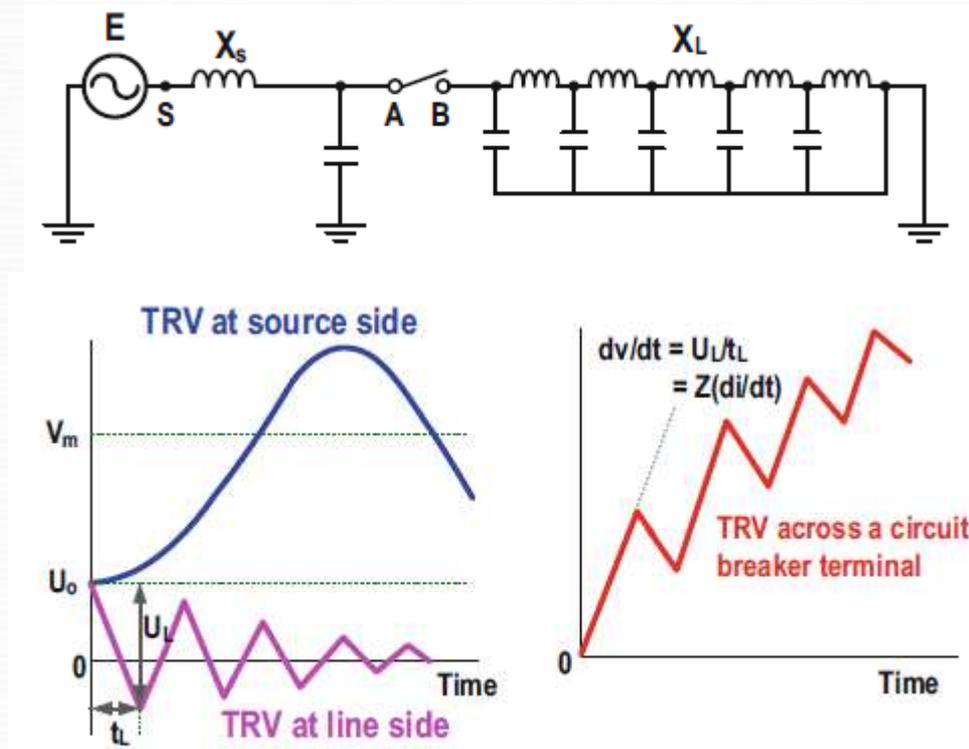


No acceptable:



Caso especial : falta en línea corta (SLF)

-Falta en una línea aérea en un punto cercano a la Estación (cientos de m, hasta unos pocos km)



-Riesgo de reencendido térmico por alta TTR inicial

Casos a analizar con cuidado :

- La apertura de faltas terminales por parte de un disyuntor de MT a la salida de un transformador “grande” (corriente de cortocircuito grande en relación a la nominal del disyuntor) y sin capacidades importantes entre el disyuntor y el transformador (conexiones aéreas, sin cables subterráneos).**
- La apertura de faltas terminales en un disyuntor conectado a un reactor serie.**
- La apertura de faltas terminales en un disyuntor con bancos de capacitores del lado fuente.**
- Faltas cercanas a generadores (ceros atrasados).**

Modelado en las simulaciones (apertura de cortocircuitos)

- Modelos típicos de estudio de sobretensiones de maniobra.**
- Dentro de la estación se modelan las capacidades e inductancias relevantes.**
- Máquinas como fuentes de tensión.**
- Modelo del sistema: 2 barras hacia atrás e impedancia equivalente.**
- Cortocircuitos: barrido del ciclo de tensión a efectos de detectar el peor caso (tensión de prefalta, componente continua).**
- El disyuntor se modela como una llave ideal, sólo en casos muy especiales es necesario modelar el arco.**