

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

PARTE 1

TENSIÓN TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO DE DISYUNTORES

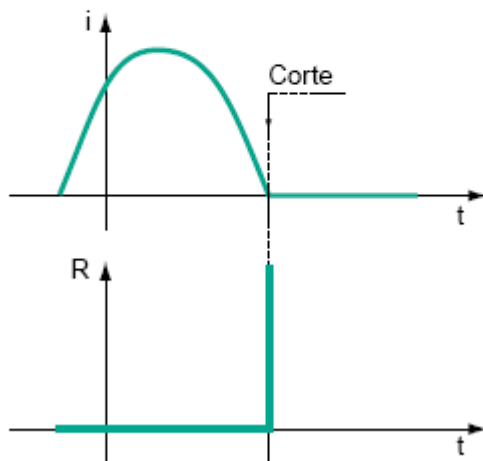
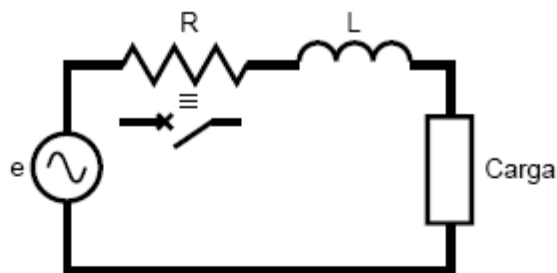
EL PROCESO DE INTERRUPCIÓN

El disyuntor ideal

El disyuntor ideal se caracteriza por la propiedad de que la resistencia entre sus contactos pasa instantáneamente de un valor nulo a un valor infinito en la apertura.

Se asume asimismo que la apertura (extinción de corriente) se da siempre en el instante en que la corriente pasa por cero. Esta suposición refleja aproximadamente la situación que se da en los disyuntos reales, en los que a medida que disminuye la corriente disminuye la temperatura y, por lo tanto, la ionización en el medio aislante que separa los contactos que se están separando.

El disyuntor soporta inmediatamente luego del corte la tensión de restablecimiento entre sus bornes, por lo que requiere una velocidad de recuperación del dieléctrico infinita.



El disyuntor real: el arco eléctrico

En el disyuntor real, entre el instante de separación de contactos y el cero de corriente se produce un arco eléctrico.

Por lo tanto: 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, 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

El proceso de interrupción

El proceso de interrupción está constituido por tres períodos:

a) El período de arco (*arcing*)

b) El período de extinción

c) El período de recuperación

a) Período de arco:

Se produce la separación de los contactos, provocando la ruptura dieléctrica del medio ínter contactos y 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), cuyo valor depende de la intensidad de la corriente y de los intercambios térmicos con el entorno

b) Período de extinción:

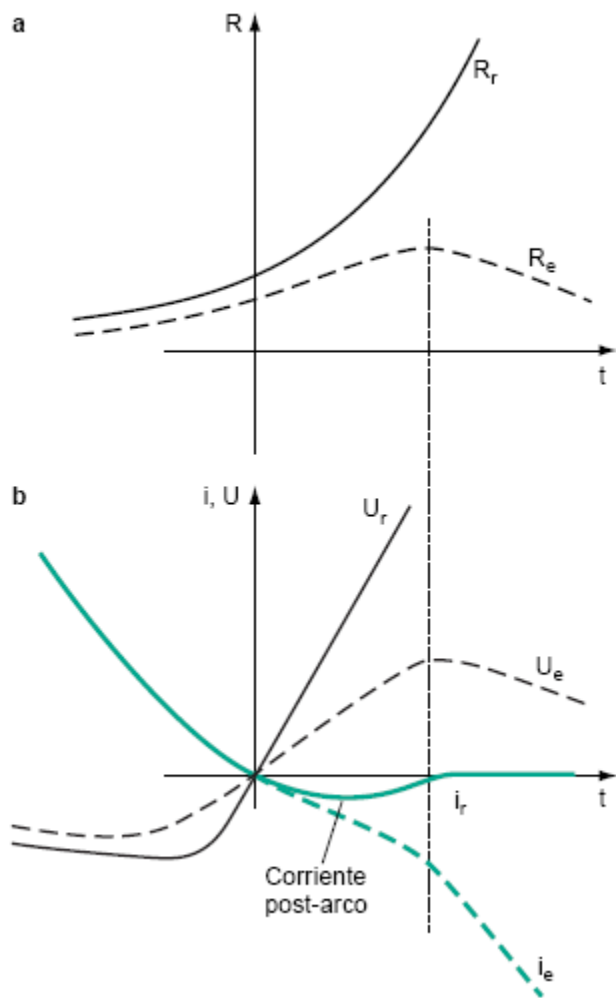
Cerca del cero de corriente, la resistencia de arco aumenta en función de la constante de tiempo de desionización del medio ínter contactos.

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.

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*)

Si la energía disipada por efecto Joule en este período (que es función de la tasa de crecimiento de la TTR) 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.

La ruptura térmica se da normalmente en el período de corriente postarco (hasta algunas decenas de μs luego de la extinción del arco).



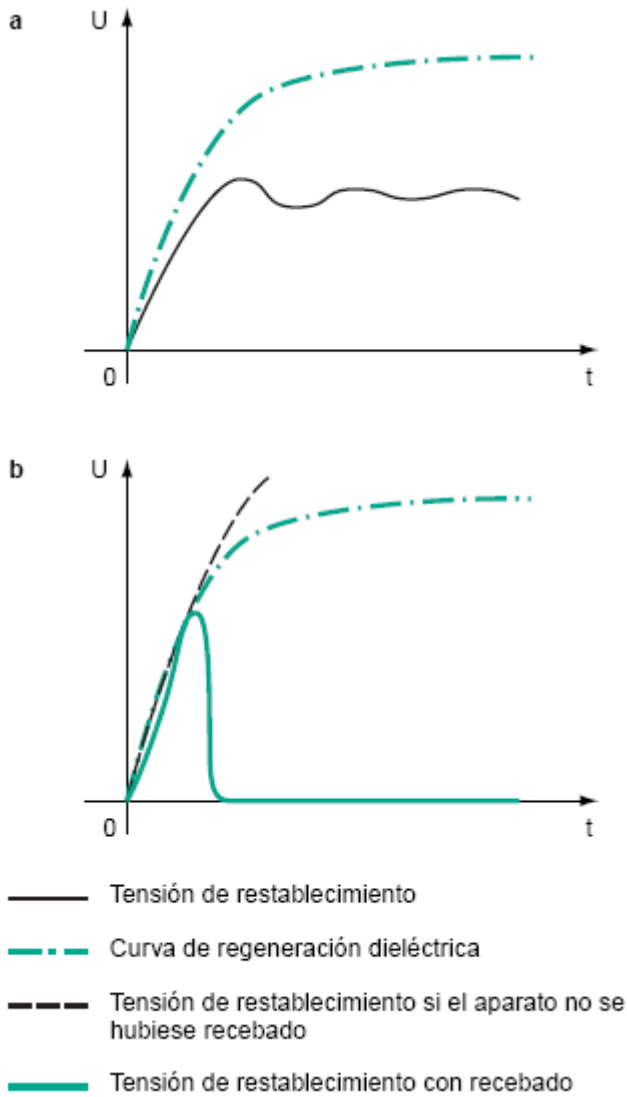
a Evolución de la resistencia de arco

b Evolución de la corriente y tensión entre bornes del disyuntor

Caso r: apertura exitosa Caso e: reencendido (avalancha térmica)

c) Período de recuperación:

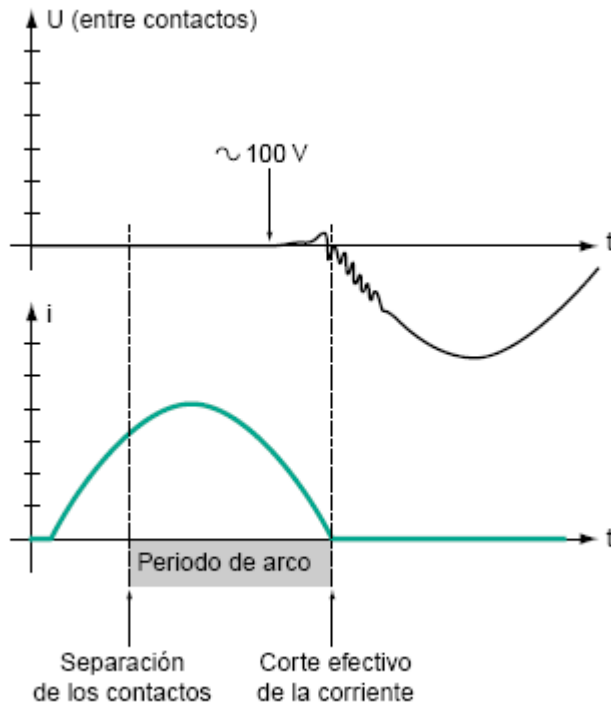
Para que la interrupción tenga éxito, es necesario que la velocidad de regeneración dieléctrica sea más rápida que la TTR, de otro modo aparecerá una ruptura dieléctrica. Las rupturas dieléctricas post corte se clasifican en: reencendidos (*reignition*) si tienen lugar en el cuarto período que sigue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



a Corte exitoso b Ruptura dieléctrica

LA INTERACCION DEL DISYUNTOR CON LA RED

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



Como el cero de corriente es cercano al cero de tensión el transitorio de recuperación es “suave” (TTR limitadas).

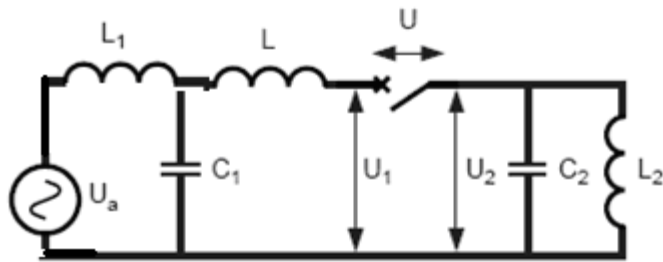
2) Corte de pequeñas corrientes inductivas

Un caso especial a analizar es el corte de pequeñas corrientes inductivas, situación que se da cuando es necesario maniobrar:

- Motores en vacío
- Transformadores en vacío o poco cargados
- Reactores “shunt”

Los valores de corriente a cortar oscilan entre algunos A hasta centenas de A.

El circuito a analizar es el siguiente:

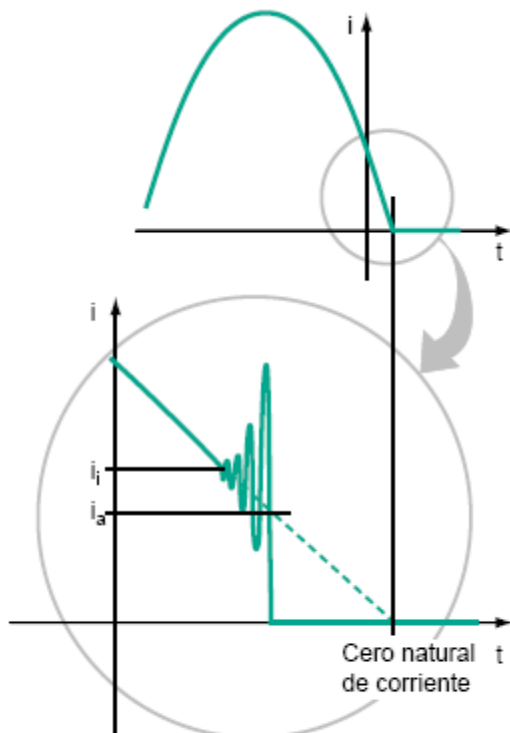


L_1, C_1 = inductancia y capacidad aguas arriba (fuente de alimentación),
 L_2, C_2 = inductancia y capacidad aguas abajo
 L = inductancia de enlace aguas arriba del disyuntor D (conjunto de barras o cables),

Una particularidad de este circuito es la posibilidad de que las capacidades C_2 del lado carga sean muy pequeñas, lo cuál significa que la frecuencia natural del circuito de carga puede ser muy alta.

Fenómeno del “corte” de corriente (arranque de corriente o *chopping*):

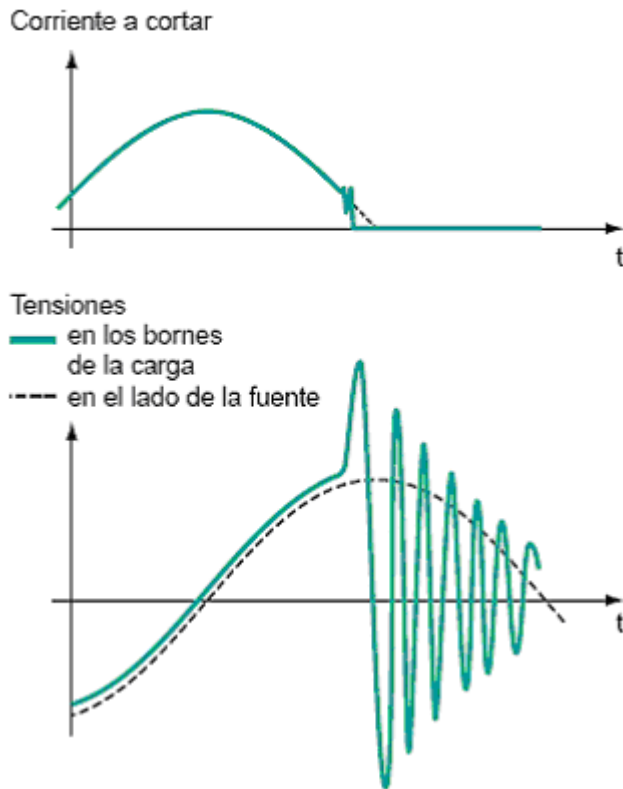
Por ser la corriente pequeña es probable que el disyuntor imponga un “corte” de corriente antes del cero natural, y con tiempos de arco cortos.



i = corriente en el disyuntor,
 i_1 = valor de la corriente que provoca la inestabilidad,
 i_a = valor de la corriente arrancada,

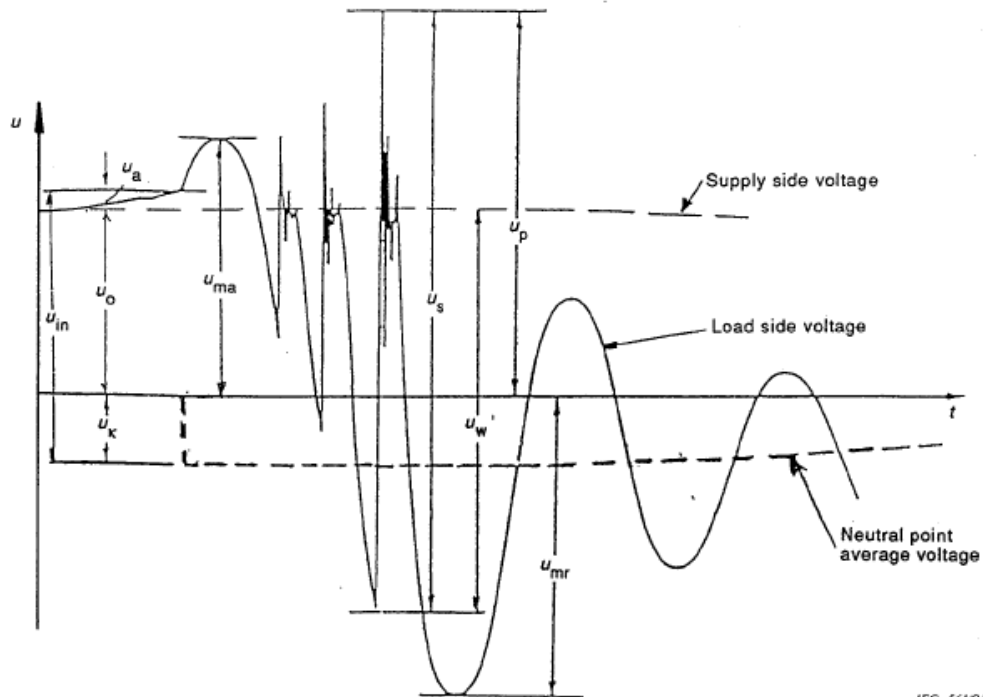
- El corte brusco de corriente (con alta di/dt) provoca sobretensiones del lado carga (la llamada *tensión de supresión*)

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 lo suficiente.



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

Si el disyuntor tiene capacidad de extinguir estas corrientes de alta frecuencia (como es el caso de los 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.



IEC 561/94

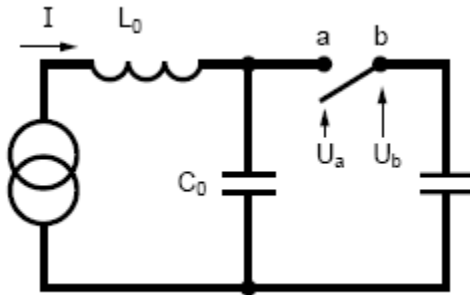
- u_o = power frequency voltage crest value to earth
- u_k = neutral voltage shift at first-phase interruption
- u_a = circuit-breaker arc voltage drop
- $u_{in} = u_o + u_a + u_k$ = initial voltage at the moment of current chopping
- u_{ma} = suppression peak voltage to earth
- u_{mr} = recovery peak voltage to earth
- u_w = voltage across circuit-breaker at re-ignition
- u_p = maximum overvoltage to earth (could be = u_{ma} or u_{mr} if no re-ignitions occur)
- u_s = maximum peak-to-peak voltage excursion at re-ignition

3) Corte de corrientes capacitivas

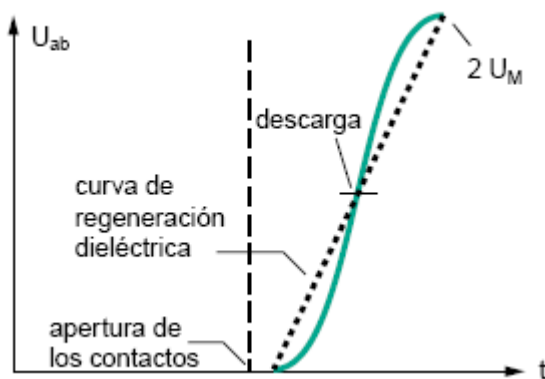
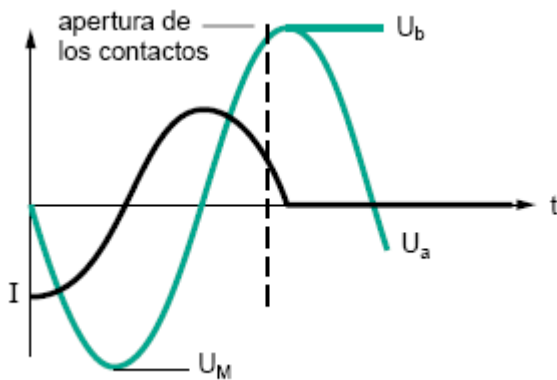
Otro caso especial a analizar es el corte de corrientes capacitivas, situación que se da cuando es necesario maniobrar:

- Capacitores
- Líneas en vacío largas
- Cables en vacío

El circuito clásico a analizar es el siguiente:

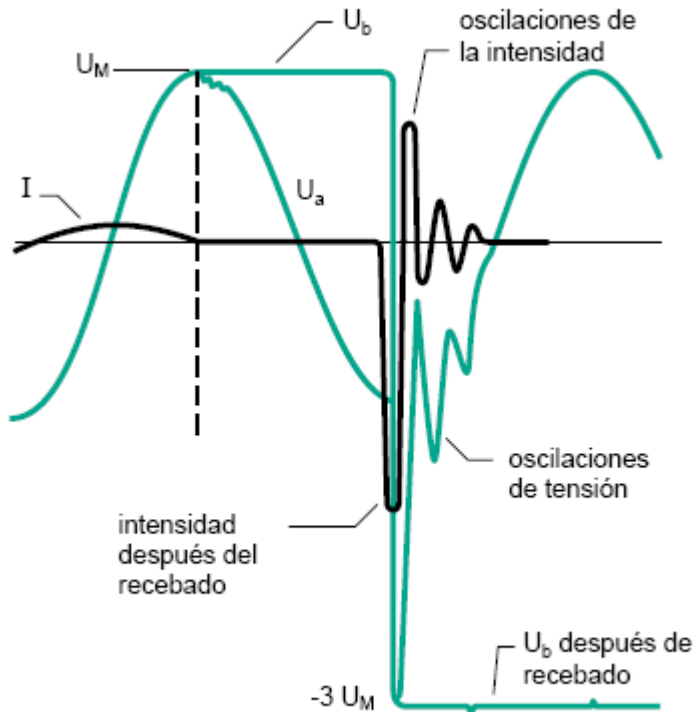


La TTR crece lentamente debido a la presencia del capacitor del lado carga

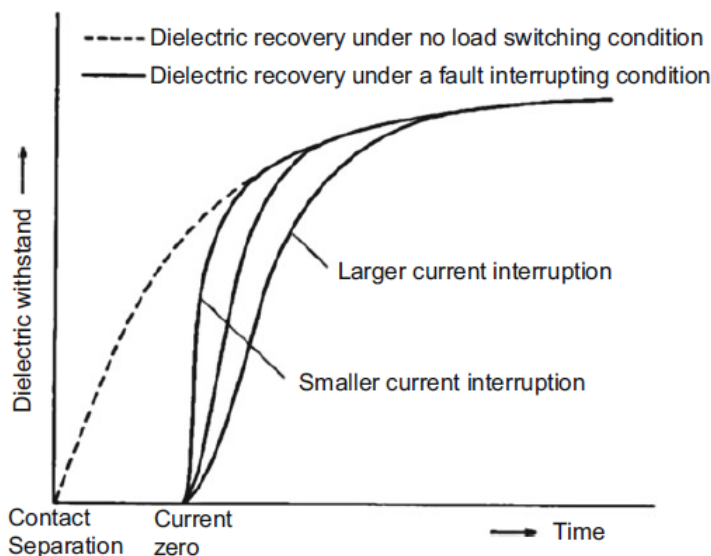


Medio ciclo después del corte, la tensión en bornes de disyuntor es el doble de la tensión de red, con riesgo de recibado por ruptura dieléctrica.

Si se produce el recebado, el fenómeno pasa a ser similar al descrito para el corte de corrientes inductivas (peligro de escalada de tensión), aunque ahora las frecuencias de oscilación de la corriente son menores (aumenta la probabilidad de que el disyuntor pueda cortarlas)



El riesgo de recebado depende muy fuertemente de la velocidad de separación de contactos y de recuperación de la rigidez dieléctrica. La velocidad de recuperación de la rigidez dieléctrica es función de la corriente que se está cortando, y en primera aproximación se suele estimar por medio de la “característica fría” del disyuntor (variación de la rigidez dieléctrica entre contactos cuando se abre el disyuntor en vacío), en particular para corrientes de hasta 1 kA aproximadamente.



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_{bb} A, r.m.s.	I_{bb} A, r.m.s.	I_{bl} kA, peak	f_{bl} 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

Comentario

Los disyuntores también deben ser capaces de energizar cargas capacitivas, maniobra que provoca la aparición de corrientes de alto valor (decenas de veces superior a la corriente nominal) y frecuencia (algunos kHz) durante el período transitorio (corriente de *inrush*).

Si la maniobra es frecuente, estas corrientes pueden provocar desgaste en los contactos del disyuntor, particularmente en disyuntores de diseño antiguo (aislamiento en aceite). Al disyuntor se le asigna una *capacidad de cierre* (valor y frecuencia de corriente) para este tipo de maniobras, en especial para el caso crítico en que se conecta un banco de condensadores con otros bancos de condensadores ya en servicio (energización “back to back”)

Durante los ensayos, los disyuntores quedan sometidos, como hemos visto, a TTR con las siguientes características:

- tasa de crecimiento pequeña
- valor de pico del orden del doble de la tensión de premaniobra
- tiempo en que se produce el valor de pico del orden de medio ciclo.

La Norma establece para estos ensayos valores de tensión de premaniobra superiores a la normal (valores típicos: 1,2 y 1,4 p.u), a efectos de exigir al máximo al disyuntor. Existen casos, no obstante, en que es necesario realizar en el sistema maniobras de apertura de corrientes capacitivas en condiciones de tensión de premaniobra aun más

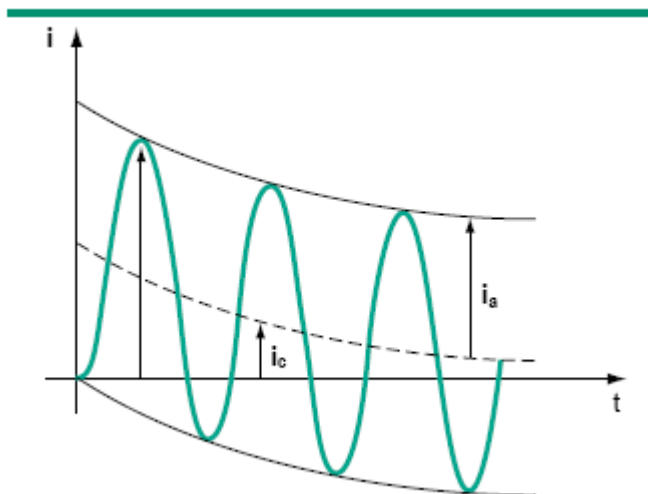
altas (apertura de líneas en vacío luego de rechazo de carga, apertura de cargas capacitivas durante una falta fase-tierra, etc.). En tales casos, es recomendable realizar una simulación digital precisa, a efectos de comparar el valor de pico de la TTR de la simulación con el valor de pico de la TTR con que el disyuntor ha sido ensayado.

4) Corte de corrientes de cortocircuito

En este caso, los circuitos a cortar son típicamente inductivos, con corrientes de falla de decenas de kA. Siendo las corrientes tan altas no se da en igual forma el fenómeno de corte (chopping) mencionado en relación a las cargas inductivas.

Forma de la onda de corriente

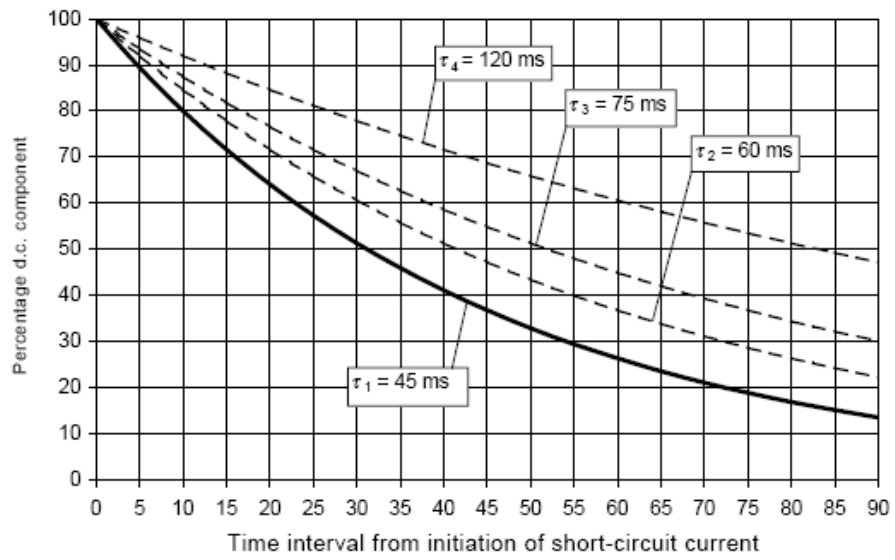
La corriente a cortar por lo general no es simétrica, apareciendo una *componente continua* cuyo valor depende de la corriente en el instante anterior a producirse la falta (esto es consecuencia de la presencia de inductancias: el circuito no puede tener discontinuidades de corriente) y los parámetros específicos (inductancia, resistencia) del circuito.



La magnitud de la componente de continua (asimétrica) 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.

Comentario: En casos especiales (disyuntores cercanos a generadores) se puede dar una componente de continua de valor tan alto y decrecimiento tan lento que el disyuntor tenga que “esperar” mucho hasta que se produzca el primer cero de corriente (tiempo de arco excesivamente alto). La presencia de estos arcos que demoran mucho en extinguirse condiciona en forma importante el diseño del equipo.

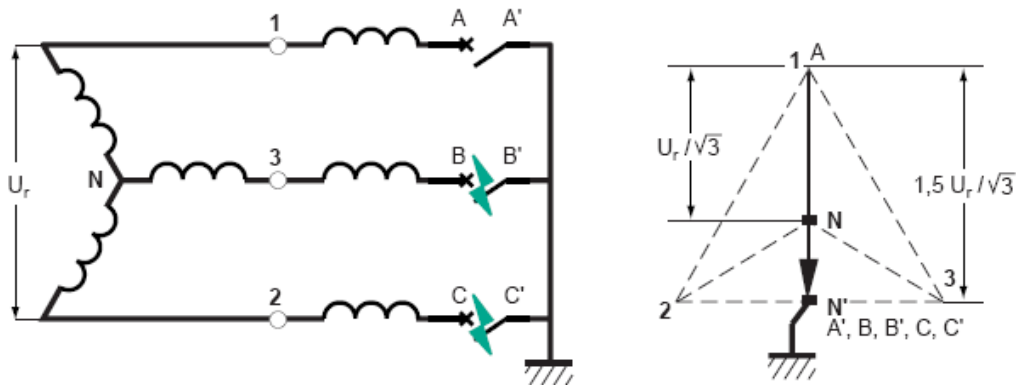
Las Normas indican valores típicos de la componente continua para diversos tipos de red (diversos valores de la constante de tiempo de decrecimiento)



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.

Supongamos por ejemplo una falta trifásica con contacto a tierra en una red con neutro aislado:



Apenas abre el primer polo, queda sometido a una tensión entre contactos 1,5 veces mayor que la tensión de red (factor de primer polo=1,5)

Se observa que, por el contrario, si el neutro de la red hubiese estado perfectamente aterrado, la tensión entre contactos del primer polo que abre hubiese coincidido con la tensión de la red (factor de primer polo=1). El estado del neutro de la red determina, por lo tanto, la magnitud de la TTR.

Para redes con neutro aterrado reales (en que el factor de puesta a tierra es siempre mayor que 1) se maneja un factor de primer polo típico=1,3

Comentario

Con el mismo razonamiento: si el cortocircuito es sin contacto a tierra, el factor de primer polo 1,5 se dará aun cuando la red sea con neutro aterrado. Por lo tanto: el factor de primer polo también depende del tipo de falta.

El caso general para el cortocircuito trifásico con contacto a tierra se analiza observando que la tensión en el primer polo que abre es la correspondiente a la fase sana de una red en la cuál se está produciendo un cortocircuito bifásico:

$$U_{\text{primer polo}} = 3U \cdot Z_0 / (2Z_0 + Z_1)$$

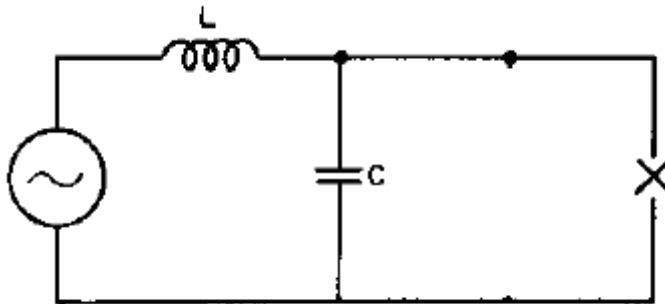
U = Tensión de operación previa fase-tierra

Z_0, Z_1 = Impedancias de secuencia cero y positiva vistas desde el disyuntor hacia la red.

Por lo tanto, el factor de primer polo $k_p = U_{\text{primer polo}} / U = 3 Z_0 / (2Z_0 + Z_1)$

Expresión general de la TTR para faltas trifásicas

El andamio general de la TTR para faltas balanceadas se puede deducir a partir del análisis del siguiente circuito clásico monofásico:



Este circuito ya se analizó en el primer Capítulo del curso.

De acuerdo al desarrollo hecho en aquél momento, la tensión entre extremos del condensador=TTR del disyuntor, obedecía a la siguiente expresión aproximada:

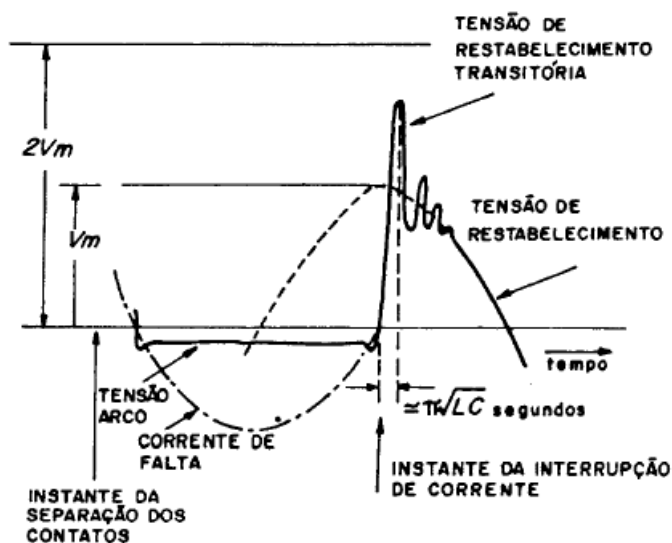
$$TTR(t) = V_m (1 - \cos(\nu t))$$

V_m = Valor de pico de la tensión lado fuente = $U \cdot k_p$
 $\nu = 1/(LC)^{1/2}$ = frecuencia natural del circuito

En los primeros instantes de la interrupción, el pico de TTR de este caso ideal sería, por lo tanto, el doble de la tensión lado fuente: $k_c = \text{pico TTR}/V_m = 2$

Ya observamos en ese primer Capítulo que, en rigor, los amortiguamientos no modelados imponen un valor de pico menor:

En particular: la propia presencia del arco aumenta en algo el amortiguamiento,



Se estima habitualmente que ese factor de pico k_c se reduce del valor 2 ideal a valores del orden de $k_c=1,4$

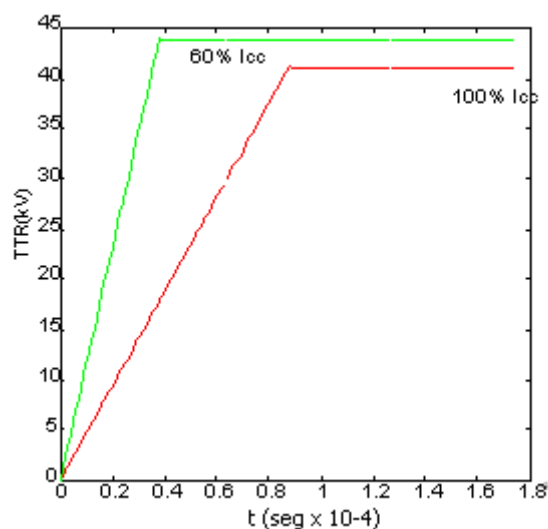
TTR límite

Como ya hemos visto, la forma y magnitud exacta de la TTR asociada a cortocircuitos trifásicos depende de los parámetros de la red y del tipo de cortocircuito, y su cálculo preciso se hace a través de simulaciones numéricas

Las normas establecen TTR “típicas” a los efectos de ensayar el disyuntor en laboratorio.

La Norma IEC especifica los valores de ensayo mínimos mediante curvas sencillas: 2 rectas en el caso de los disyuntores de MT (representa en forma aproximada el caso simple de un circuito con una única frecuencia natural como el analizado más arriba), 3 rectas en el caso de los disyuntores de AT y EAT.

Estas curvas dependen a su vez, como es natural, del valor de la corriente de cortocircuito que se está cortando en relación a la nominal

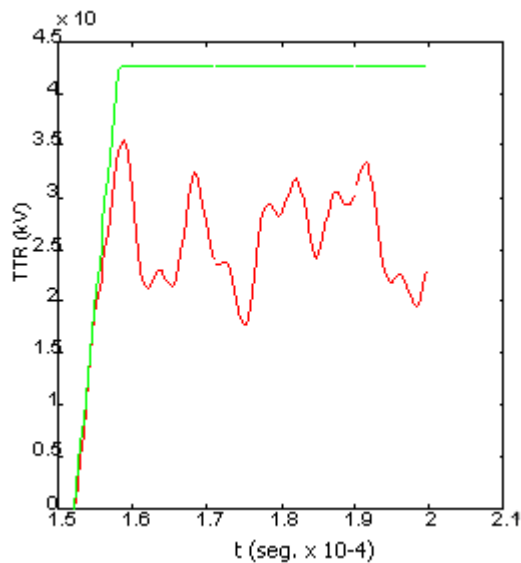


Curva de TTR límite de un disyuntor de 36 kV para 60 % y 100 % de su corriente de corte nominal.

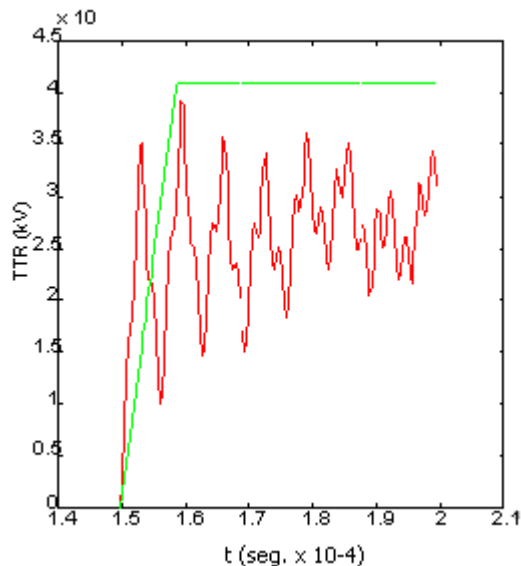
Los ensayos se deben realizar a valores tales que la curva de TTR obtenida sea más exigente (esté “por encima”) de estos valores límite.

Cuando se estiman las curvas de TTR reales que se esperan mediante simulaciones digitales, se deben comparar los valores obtenidos con estos valores límite a los cuáles ha sido ensayado el disyuntor.

Si la simulación muestra valores más exigentes que los valores de ensayo, es de esperar que el disyuntor falle durante la maniobra simulada, ya sea por reencendido térmico (violación de la pendiente de TTR inicial) o dieléctrico (violación de la pendiente o del pico de TTR).



Comparación de TTR simulada con TTR límite: caso aceptable



Comparación de TTR simulada con TTR límite: caso no aceptable (posible reencendido térmico)

Si bien las curvas límite de TTR especificadas por la Norma están pensadas para que los disyuntores puedan cumplirlas en la realidad, existen situaciones especiales en las cuáles se hace particularmente importante realizar una verificación cuidadosa.

Se destacan entre esos casos:

- 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 muy cercanas a generadores (componentes continuas grandes en la corriente de cortocircuito)

Modelado

El modelado para simulación de TTR sigue los lineamientos clásicos del modelado para simular una sobretensión de maniobra típica.

No es necesario por lo general modelar en detalle las conexiones dentro de la Estación ni las capacidades parásitas de los equipos, sino más bien las inductancias (transformadores, reactores) y capacitancias (cables subterráneos) concentradas de cierta magnitud.

La red se suele modelar en detalle hasta 2 barras atrás del disyuntor que maniobra.

Las máquinas se modelan como fuentes de tensión.

En el caso de los cortocircuitos terminales suele hacerse un “barrido” del instante de la falta a lo largo del ciclo de frecuencia industrial, a efectos de tener en cuenta las diversas combinaciones posibles de parámetros que definen la maniobra (tensión de prefalta, componente continua de la corriente de cortocircuito, etc.)

El disyuntor se modela como una llave ideal, y sólo en casos muy especiales es necesario modelar el arco.

Esta situación se da, en particular, si se quiere analizar el comportamiento frente a faltas muy cercanas a generadores, dado que el arco influye fuertemente en la evolución de la componente continua de la corriente de cortocircuito.