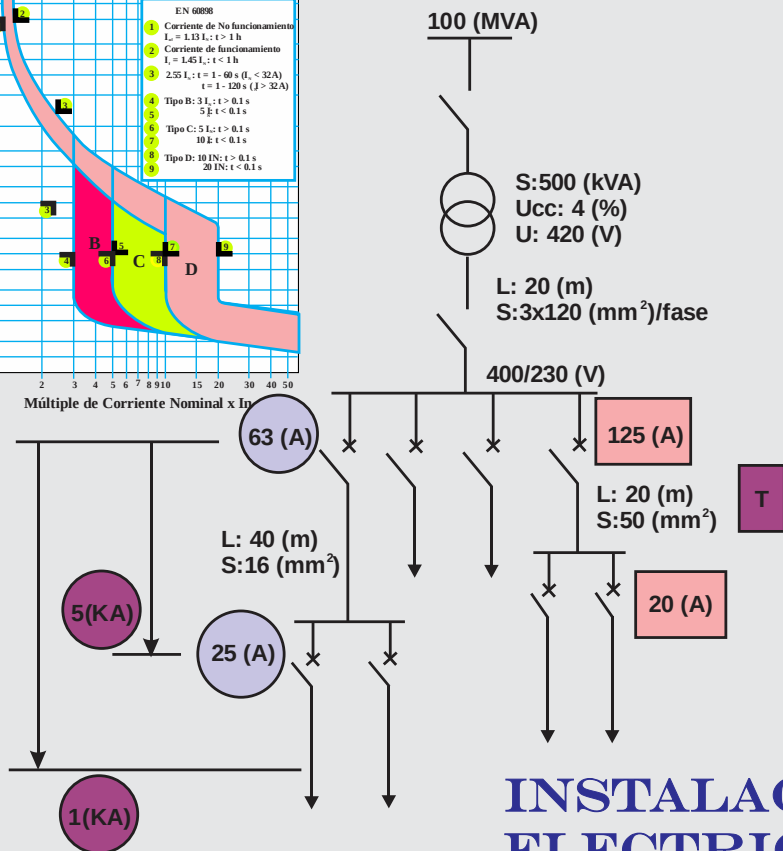
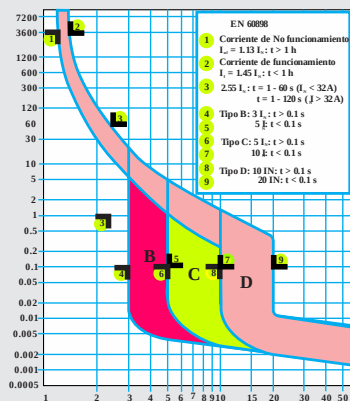


CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

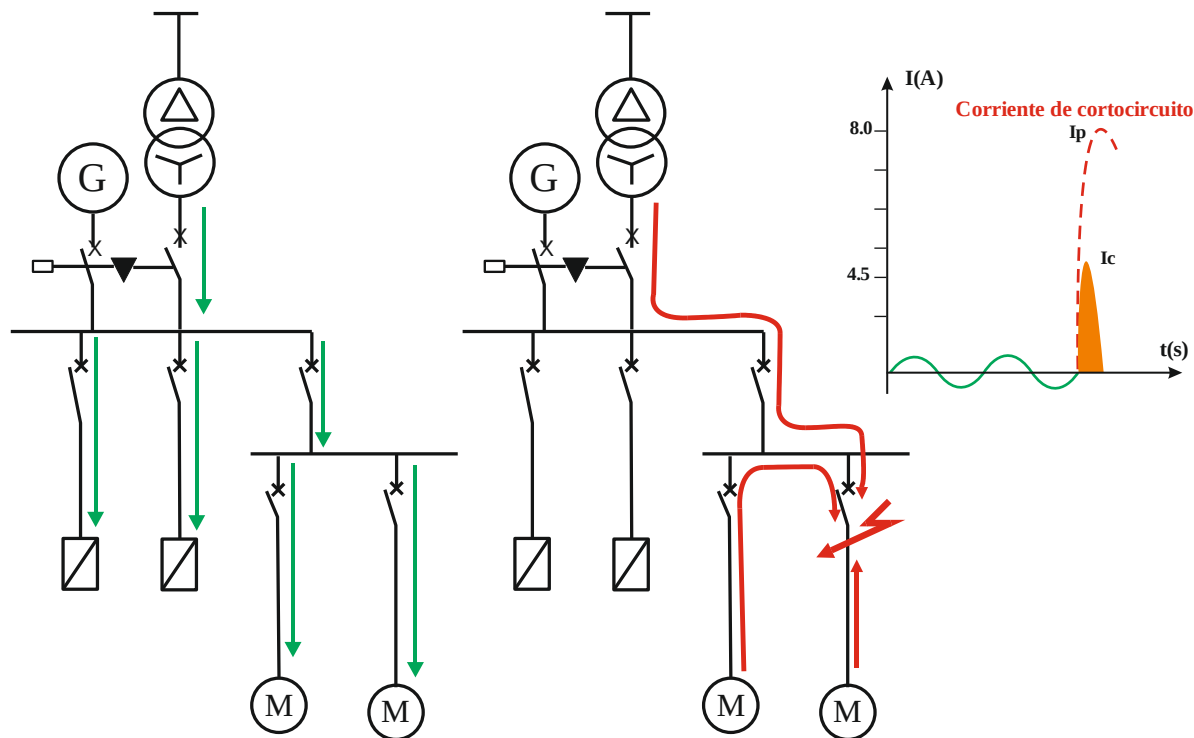


INSTALACIONES ELECTRICAS II ELT 280

ING. JORGE GUTIERREZ TEJERINA

CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Se denomina corriente de cortocircuito, a una condición de falla cuando se unen dos o mas puntos aislados de la instalación eléctrica a diferente potencial (tensión) mediante una impedancia de valor muy pequeño o teóricamente nula.
- La magnitud de la corriente de cortocircuito es mucho mayor a la corriente de la carga que circulaba por el punto de falla, del orden de los kilo amperios (kA).



CAUSAS POSIBLES

- Originados por factores mecánicos como rotura de conductores.
- Conexión eléctrica accidental entre dos conductores producida por un objeto conductor extraño, como herramientas metálicas o animales.
- Debidos a sobretensiones eléctricas de origen interno o atmosférico.
- Daño del aislamiento por envejecimiento o en el proceso de instalación, degradación del aislamiento provocada por el calor, la humedad o un ambiente corrosivo, por lo que se presenta una falla de aislamiento.
- Su localización: Dentro o fuera de una máquina o un tablero eléctrico.
- La magnitud de la corriente de cortocircuito depende del tipo de falla que se presenta.
- Cuando la corriente es muy pequeña también se la denomina como corriente de fuga, cuando es menor a la corriente de actuación del dispositivo de protección la corriente fluye permanentemente incrementando el consumo de energía eléctrica.



EFFECTOS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Las consecuencias del cortocircuito dependen de la naturaleza y duración de los defectos, del punto de la instalación afectada y de la magnitud de la intensidad:
- Elevada corriente que debe interrumpir el dispositivo de protección.
- Pequeña corriente de falla que se debe interrumpir, sensibilidad a la corriente de falla.
- Según el lugar del defecto, la presencia de un arco puede:
 - degradar los aislantes,
 - fundir los conductores,
 - provocar un incendio o representar un peligro para las personas.
- Según el circuito afectado, pueden presentarse:
 - sobreesfuerzos electrodinámicos, con:
 - deformación de los JdB (juegos de barras).
 - arrancado o desprendimiento de los cables.

EFECTOS DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Sobrecalentamiento debido al aumento de pérdidas por efecto Joule, con riesgo de deterioro del aislamiento del conductor.
- Perturbación a otros circuitos eléctricos;
 - 1) Incremento de la caída de tensión durante el tiempo de la eliminación del defecto, milisegundos a varias centenas de milisegundos.
 - 2) Desconexión de una parte de la instalación, según el esquema y la selectividad de sus protecciones.
 - 3) Perturbaciones en los circuitos de mando y control;
- Es importante determinar la corriente de falla, porque en función de la corriente de cortocircuito se determinan la capacidad de corte y conexión de los dispositivos de protección, el tiempo máximo de interrupción de la falla para evitar daños en los conductores, los esfuerzos dinámicos que someten a las barras de los tableros,
- Poder de corte $\geq$ Corriente de cortocircuito.

METODOS DE CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- La IEC (International Electrotechnical Commission), de origen europeo;
 - a) IEC 60865-1: 1993 Corriente de cortocircuito.
 - b) IEC 6909-2: 1992 Equipos eléctricos.
 - c) IEC 60909-3: 1995 Calculo de la corriente de cortocircuito en sistemas trifásicos, cortocircuito fase tierra.
 - d) IEC 60949: 1988 Cálculo de las corrientes de cortocircuito, tomando en cuenta los efectos de calentamiento adiabático.
 - e) IEC 60909-4: 2000 Cálculo de la corriente de cortocircuito, ejemplo de aplicación.
- ANSI/IEEE (American National Standard Institute/IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers) de origen norteamericano.

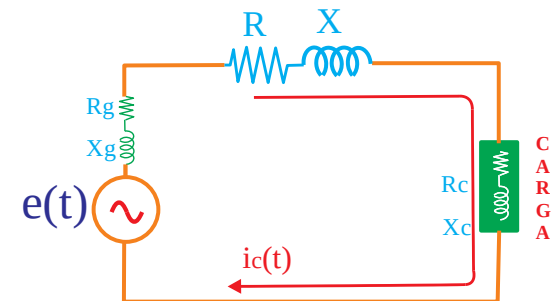
METODOS DE CALCULO DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Existen varios métodos de cálculo de la corriente de cortocircuito:
- Método Equivalente de Thevenin.
- Método de los MVA.
- Métodos de Las Componentes Simétricas.
- Método de la Matriz de Impedancias.
- Cuando se realizan los cálculos de cortocircuito en sistema de mas de un nivel de voltaje, es necesario expresar todas las magnitudes del circuito en por unidad.
- $$\text{Magnitud en pu.} = \frac{\text{Magnitud Real}}{\text{Magnitud Base}} \text{ Por unidad}$$
- Las magnitudes bases son:
- Potencia Base (Pb) en MVA, Voltaje Base (Ub) en kilovoltios, Corriente Base (Ib) en Amperios, Impedancia Base (Zb) en ohmios.

- Norma CIE 909 (VDE 0102) que se aplica a todas las redes, radiales o malladas hasta 230 kV, utilizado en AT, emplea el principio de las componentes simétricas.
- Basado en el teorema de Thevenin, consiste en calcular una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito y calcular la corriente de falla en este punto.
- El método de las Impedancias para las instalaciones radiales en BT.
- La red es radial y su tensión nominal está comprendida entre BT y AT.
- La corriente de cortocircuito, al producirse un cortocircuito trifásico, se supone establecida simultáneamente en las tres fases.
- Durante el cortocircuito, el número de fases afectada no se modifica, un defecto trifásico sigue siendo trifásico y un defecto fase-tierra sigue siendo fase-tierra.
- Durante el tiempo de cortocircuito, las tensiones que han provocado la circulación de la corriente como las impedancias de cortocircuito no varían en forma significativa.
- Tomas de los reguladores en posición nominal.
- No se tiene en cuenta la resistencia de arco.
- Se desprecian todas las capacidades de las líneas.
- Se desprecian las corrientes de carga.
- Se tiene en cuenta las impedancias homopolares.

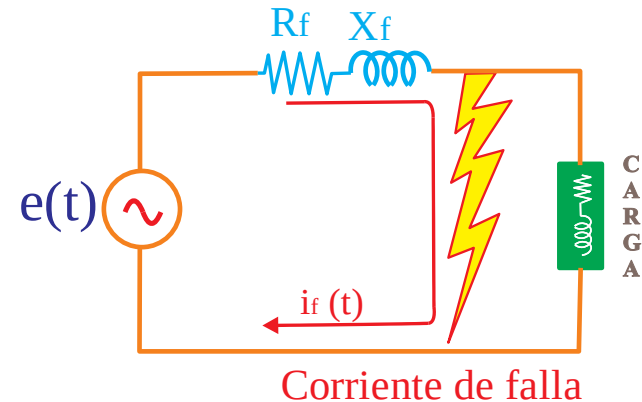
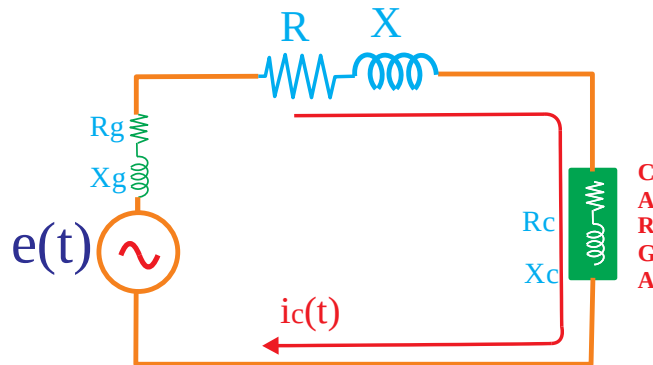
OSCILOGRAMA DE LA CORRIENTE

- La condición del circuito antes de la falla es la siguiente es;
- $e(t) = E_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi)$
- $L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = E_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi)$
- La corriente que circula en la malla equivalente es la siguiente;
- $i_{cc}(t) = I_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi - \alpha)$
- $\alpha = \text{Arctg} \left(\frac{X_g + X + X_c}{R_g + R + R_c} \right)$
- $I_o = \frac{E_o}{\sqrt{(R_g + R + R_c)^2 + (X_g + X + X_c)^2}}$



OSCILOGRAMA DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Asumiendo al punto de falla, R_F , X_F , Resistencia y reactancia inductiva cuyos valores dependen de la impedancia del generador y la impedancia de la línea.



- $i_f(t)$, corriente de cortocircuito.
- $e(t) = E_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi)$
- $L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = E_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi)$

- La solución a la ecuación diferencial.

- $$i_{cc}(t) = I_o \cdot \left[\text{Sen}(\omega t + \varphi - \theta) - e^{-\left(\frac{R}{L}\right) \cdot t} \cdot \text{Sen}(\varphi - \theta) \right]$$

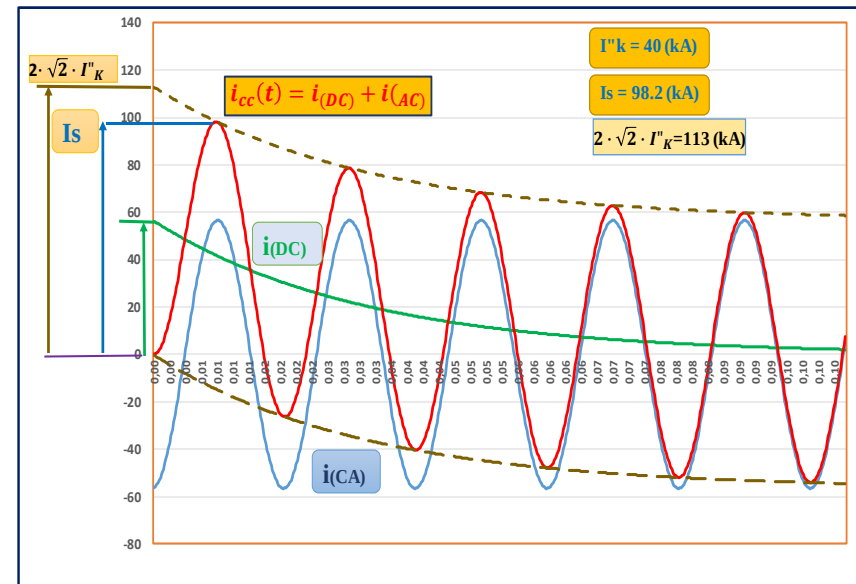
- En la solución final se pueden identificar dos componentes:
- Componente de CA:
- $i_{CA} = I_o \cdot \text{Sen}(\omega t + \varphi - \theta)$
- Componente de CC: La intensidad de cortocircuito sigue un régimen transitorio.

- $$i_{DC} = I_o \cdot e^{-\left(\frac{R_f}{L_f}\right) \cdot t} \cdot \text{Sen}(\varphi - \theta)$$
- Donde:
- $R_f = R_g + R$
- $X_f = X_g + R$

- $$I_o = \frac{E_o}{Z_f} = \frac{E_o}{\sqrt{(R_f)^2 + (X_f)^2}}$$

- $$\theta = \text{Arctg} \left(\frac{X_f}{R_f} \right)$$

- $$\tau = \frac{L_f}{R_f}$$



- Dependiendo como influye la impedancia del generador en la impedancia de falla, el cortocircuito se puede clasificar como;
- Cercanos, si la impedancia del generador (R_g y X_g) son influyentes en la impedancia de falla.
- Lejano, si la impedancia del generador (R_g y X_g) tiene poca o ninguna influencia en la magnitud de la impedancia de falla.

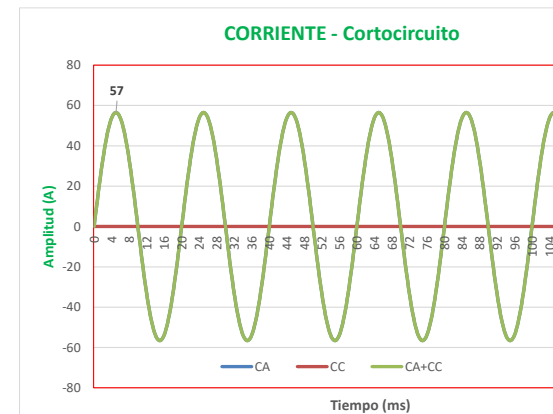
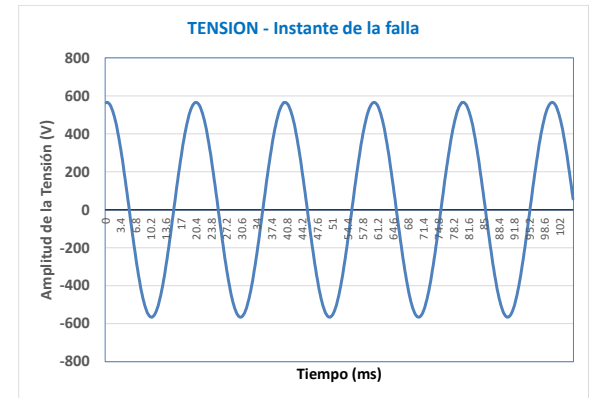
• **EVOLUCION DE CORRIENTE SIMETRICA DE CORTOCIRCUITO.-**

- La evolución y magnitud de la onda de la corriente de falla, además depende del valor que tiene la tensión en el instante en que ocurre el cortocircuito, es el ángulo φ (desfase) determina el valor de la tensión cuando se produce el cortocircuito.
- $\varphi; \pi/2, 3\pi/2, \dots$ Tensión inicial máximo.
- $\varphi; 0, \pi, \dots$ Tensión inicial nulo.
- El valor de la componente continua, $i(DC) = I_o \cdot \text{Sen}(\varphi - \theta)$, queda determinado por la tensión inicial al cerrar el circuito en función de " φ " y por la resistencia e impedancia del circuito que define el valor de " θ "

- En líneas eléctrica de AT y MT, el valor de la reactancia inductiva equivalente es mayor que el de la resistencia por lo que puede asumir que “ $\theta=90^\circ$ ”. Asumiendo que la tensión en el instante de la falla es máxima con “ $\varphi=90^\circ$ ”, el término de la componente continua $Sen(\varphi - \theta)$ es cero, por lo cual no se genera la componente continua.

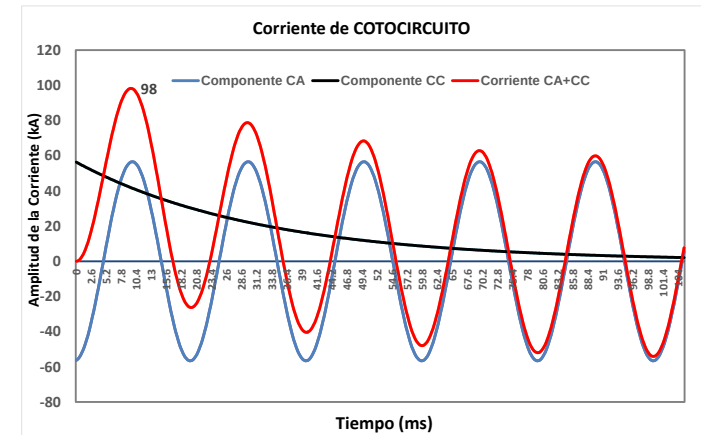
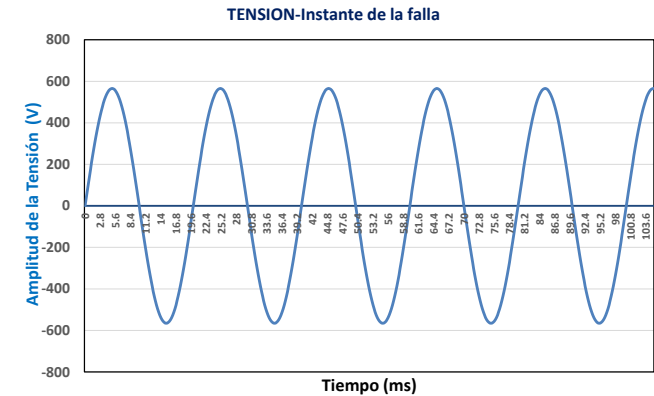
- CORRIENTE SIMÉTRICA DE CORTOCIRCUITO.**

- $e(t) = E_o \cdot Sen \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = E_o \cdot Cos(\omega t)$
- $(\varphi - \theta); 0, \pi$
- $i(t) = I_o \cdot \left[Sen(\omega t + 0) - e^{-\left(\frac{R}{L}\right) \cdot t} \cdot Sen(0) \right]$
- $i(DC) = 0 \Rightarrow i(t) = i(CA)$
- $i(t) = I_o \cdot Sen(\omega t)$
- El valor de cresta de la corriente de falla es la corriente de pico choque o impulso cuyo valor es: $i_p = \sqrt{2} \cdot I''_K$

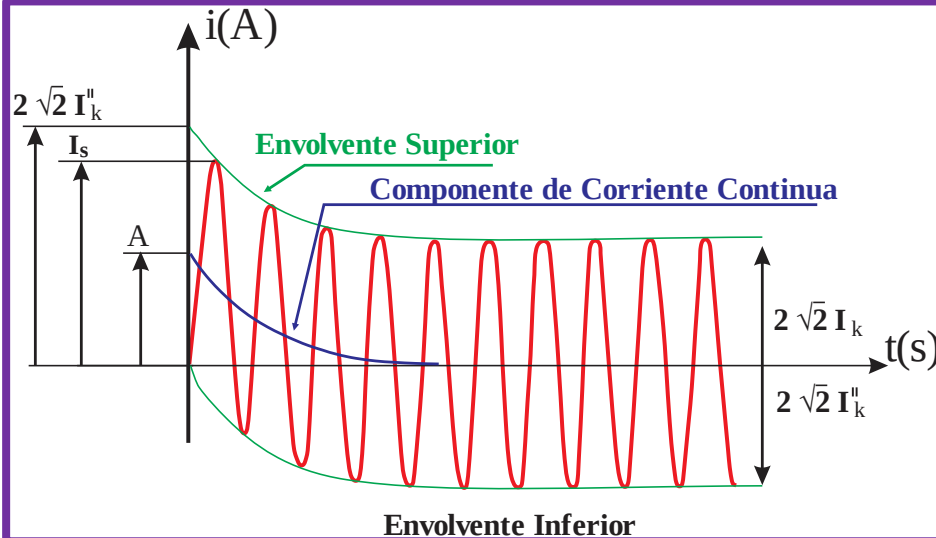


- **CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO ASIMÉTRICA MÁXIMA.**

- Se presenta cuando el ángulo de desfase “ $\varphi=0^\circ$ ” y el ángulo “ $\theta=90^\circ$ ”, por lo que la diferencia es;
- $(\varphi - \theta); -\pi/2$
- Evaluando para el tiempo $t=0$
- Componente de CA:
- $i(CA) = I_o \cdot \text{Sen}(0 + 90^\circ) = I_o$
- Componente de CC:
- $i(CC) = I_o \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right) \cdot t} \cdot \text{Sen}(90^\circ) = I_o$
- El resultado final de la corriente de cortocircuito es;
- $i(t) = i(CA) + i(CC) = 2 \cdot I_o$



DEFINICIONES



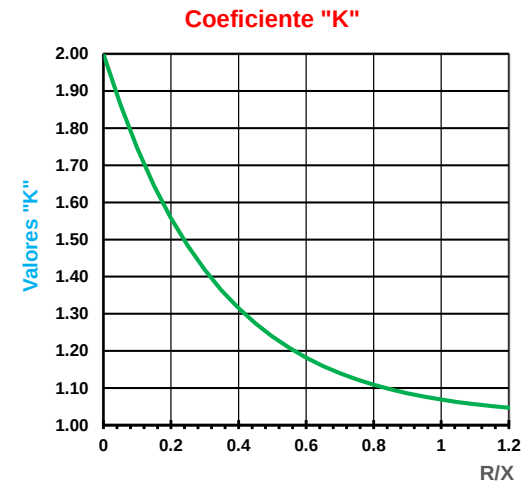
- I_k'' Corriente simétrica inicial de cortocircuito
- I_s Corriente de impulso o de choque (Corriente de pico)
- I_k Corriente permanente de cortocircuito
- A Valor inicial de la componente de corriente continua

- **Corriente presunta de cortocircuito.**- Corriente que circularía si el cortocircuito fuera reemplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable sin ningún cambio en la alimentación.
- **Corriente simétrica de cortocircuito.**- Valor eficaz de la componente alterna simétrica de una corriente presunta de cortocircuito siendo despreciable, en caso existir, la componente aperiódica de corriente.
- **Corriente simétrica inicial de cortocircuito I_k'' .**- Valor eficaz de la componente alterna simétrica de una corriente presunta de cortocircuito en el instante de aparición del cortocircuito si la impedancia mantiene su valor inicial.

- **Potencia aparente simétrica inicial de cortocircuito S''_k .**- Valor de potencia aparente definido como el producto de la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_k , la tensión nominal del sistema U_N , y el factor raíz de 3.
- $S''_k = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I''_k$
- **Corriente decreciente aperiódica i_{dc} de la corriente de cortocircuito.**- Valor medio entre las envolventes superior e inferior de una corriente de cortocircuito decreciente desde su valor inicial hasta cero.
- **Corriente de impulso, de choque, de cresta (corriente de pico i_p).**- Posible valor máximo instantáneo de la corriente presunta de cortocircuito.
- La magnitud de la corriente de pico de cortocircuito varía de acuerdo con el momento en que ocurre la falla. El cálculo de la corriente de pico de cortocircuito i_p se efectúa para la fase y en instante en el cual existe la mayor corriente de cortocircuito posible. Cortocircuitos secuenciales no son considerados.
- $I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$
- **Corriente permanente de cortocircuito I_k .**- Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que permanece luego de la extinción del fenómeno transitorio.

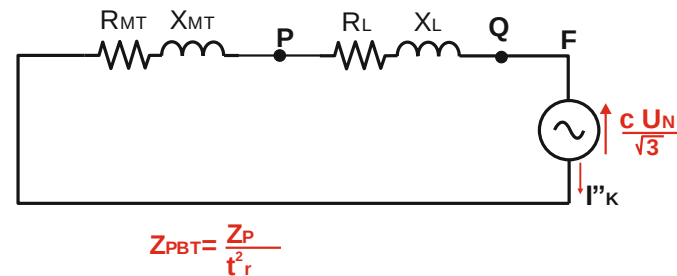
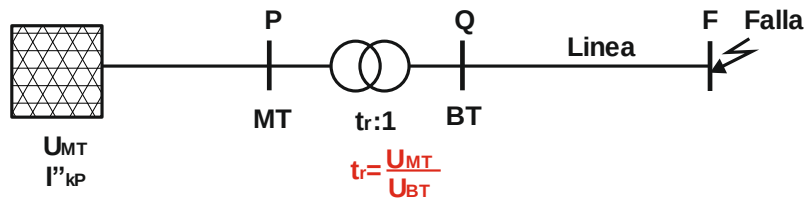
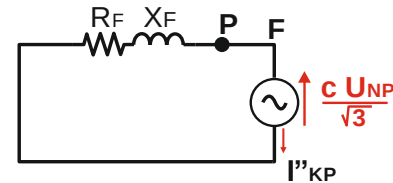
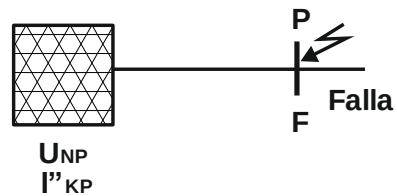
CORRIENTE DE IMPULSO, DE PICO “I_P”

- También denominada como “Corriente de Pico de Choque”
Es la máxima corriente que aparece en el punto de cortocircuito. Su cálculo es fundamental para la determinación del poder de cierre de los dispositivos de protección.
- Todas las **fuerzas** que aparecen sobre los conductores, barras o sobre los elementos de maniobra o protección **dependen de la corriente de impulso**, por lo tanto su cálculo se utiliza para verificar que los elementos de la instalación soportarán las fuerzas que sobre ellos aparecen durante un cortocircuito.
- La magnitud de corriente de impulso “I_s ó I_p”, depende de la condición de asimetría de la corriente de falla, de la relación R/X.
- Para determinar el factor “k” en función de la relación R/X se utilizan curvas o la siguiente ecuación.
- $\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X}$
- $I_P = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$



IEC 60781 BAJA TENSION REDES RADIALES

- Calcular las impedancias de los elementos del sistema.
- Calcular las corrientes de cortocircuito.
- Corriente Máxima de Cortocircuito.
- Corriente Mínima de cortocircuito.



- **Fuente de tensión equivalente** $c \cdot U_N / \sqrt{3}$.- Tensión de una fuente ideal aplicada al punto del cortocircuito en el sistema de secuencia directa, para el cálculo de la corriente de cortocircuito. Esta es la única tensión activa de la red.
- **Factor de tensión c**.- Relación entre la fuente de tensión equivalente nominal del sistema $U_N / \sqrt{3}$.

Tensión Nominal U_N	Factor de tensión "C" para el calculo de:	
	Corriente de máxima de cortocircuito " C_{max} "	Corriente de minima de cortocircuito " C_{min} "
Baja Tensión 100 (V) a 1000 (V) (IEC 60038, Tabla I)	1,05 ⁽³⁾ 1,10 ⁽⁴⁾	0,95
Media Tensión > 1 (kV) a 35 (kV) (IEC 60038, Tabla III)	1,1	1,0
Alta Tensión (2) > 35 (kV) a 380 (kV) (IEC 60038, Tabla IV)		

C_{max} y U_N , no deben exceder la máxima tensión U para equipamientos de sistemas de potencia.

(2): Si no se define una tensión nominal, se debe aplicar C_{max} y $U_N = U$ o C_{min} y $U_N = 0,9 U$

(3): Para sistemas de baja tensión con tolerancia de + 6 (%), por ejemplo para sistemas renombrados de 380 (V) a 400 (V)

(4): Para sistemas de baja tensión con tolerancia de + 10 (%)

- **Máxima corriente de cortocircuito.-**

- Esta corriente se determina a la salida de los dispositivos de protección, si bien la de mayor magnitud se presenta cerca de la fuente de energía, se calcula en los diferentes puntos de la instalación y la falla o corriente de cortocircuito trifásico es la de mayor magnitud, se utiliza para:
- Especificar y determinar la capacidad de corte y de cierre de los dispositivos de protección.
- Para determinar los esfuerzos térmicos y electrodinámicos en los componentes de la instalación.

- ***Para el cálculo de las corrientes máximas de cortocircuito, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:***

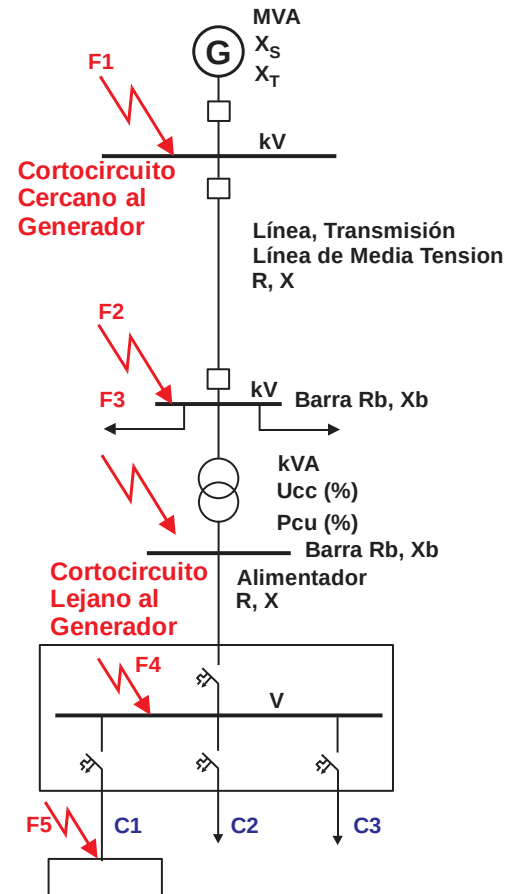
- El factor de tensión $C_{máx}$ de acuerdo a la tabla Factor de Tensión C, debe ser aplicado para el cálculo de las corrientes máximas de cortocircuito.
- Elegir la configuración del sistema y la máxima contribución de las fuentes, lo que conduce al máximo valor de la corriente de cortocircuito en el punto de falla.
- Los motores, si corresponde, deben ser incluidos.
- La resistencia R_L de las líneas (aéreas y cables) debe ser introducida a una temperatura de 20 °C.

- **Mínima corriente de cortocircuito.-**

- Esta corriente corresponde al extremo del conductor protegido. En las instalaciones de baja tensión están representados por el cortocircuito monofásico, fase – neutro.
- Se utilizan para elegir los dispositivos de protección contra los contactos eléctricos indirectos, y para dimensionar los conductores de tierra de protección.
- Para el cálculo de las corrientes mínimas de cortocircuito, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones:
- El factor de tensión ***C_{mín}*** de acuerdo a la tabla Factor de Tensión ***C***, debe ser aplicado para el cálculo de las corrientes mínimas de cortocircuito.
- Elegir la configuración del sistema y la mínima contribución de las centrales eléctricas, lo que conduce al mínimo valor de la corriente de cortocircuito en el punto de falla;
- Los motores deben ser despreciados.
- La resistencia R_L de las líneas (aéreas y cables) debe ser introducida a una temperatura mayor (según IEC 60885-1).

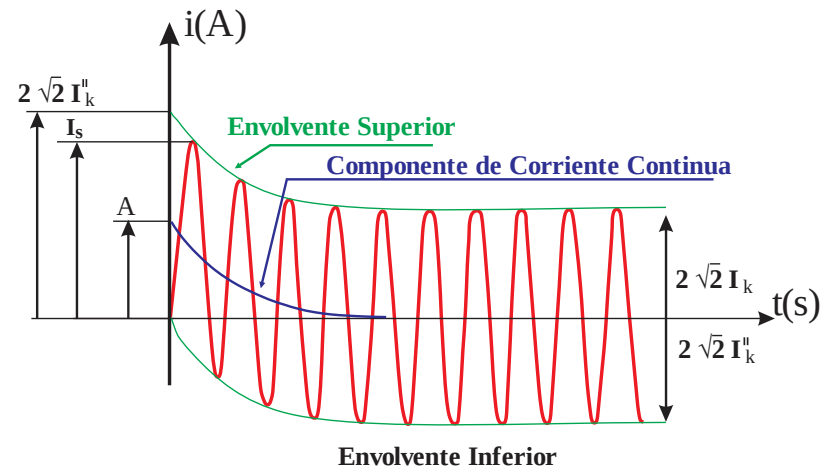
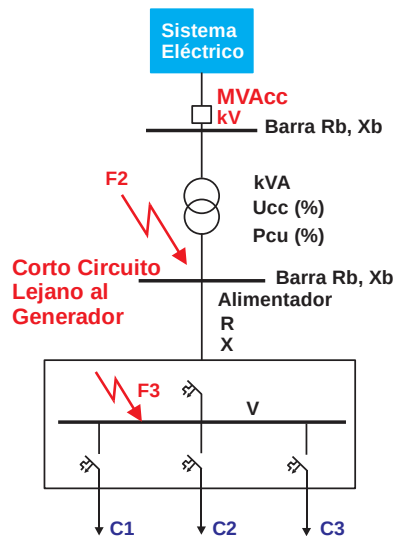
ESQUEMA DE UN SISTEMA ELECTRICO CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Corriente de falla en diferentes puntos de un sistema eléctrico.
- Cortocircuito Cercano Falla F1.
- Se denomina como Cortocircuito Lejano fallas F2, F3, F4 y F5.



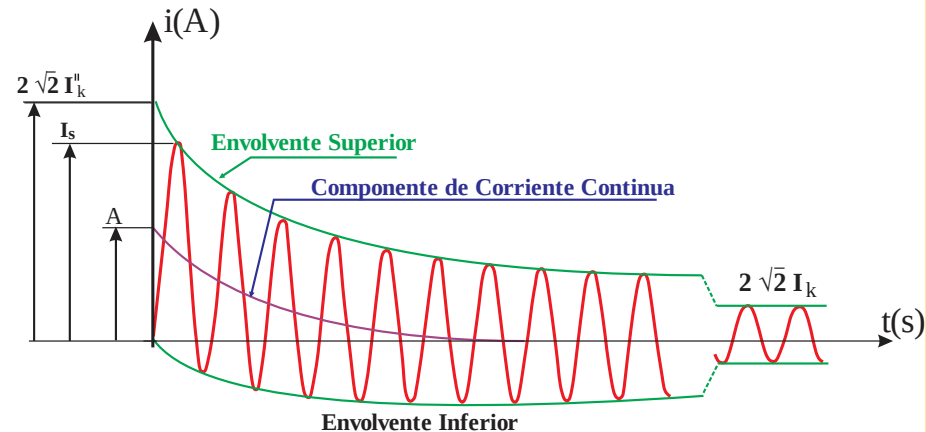
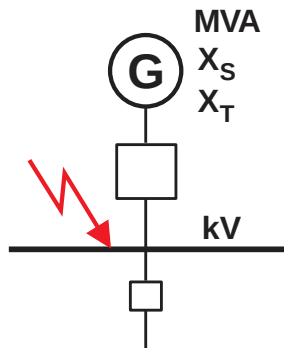
CORTOCIRCUITO LEJANO

- Esta situación es típica de aquellas instaladas conectadas a la red de distribución de media tensión, evaluamos la falla en baja tensión al interior de las instalaciones industriales, grandes edificios.
- Para efectos de cálculo, se asume constante las impedancias que intervienen.



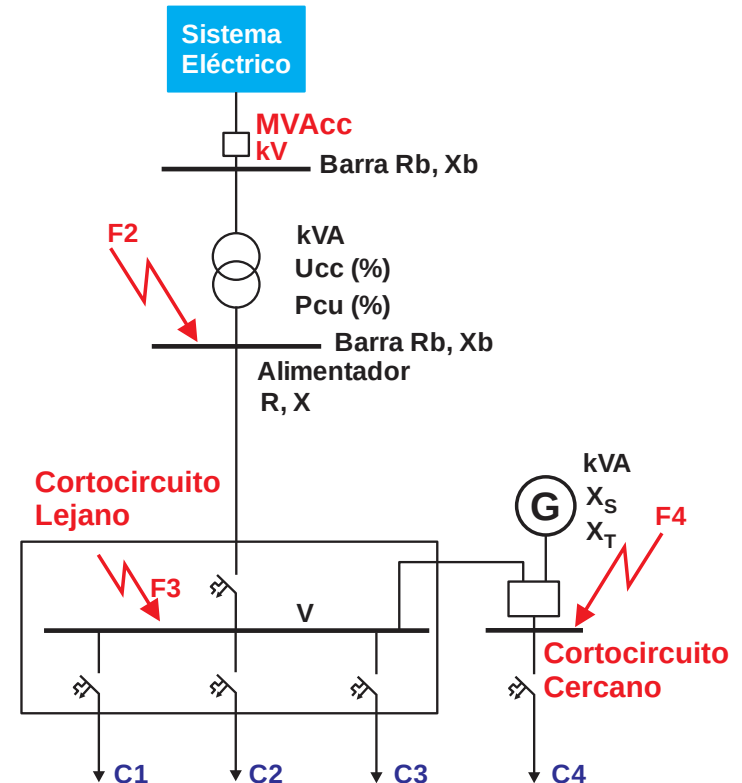
CORTOCIRCUITO CERCANO

- En el proceso de la liberación de la falla, el generador pasa por el estado de funcionamiento diferentes, subtransitorio caracterizado por la REACTANCIA SUBTRANSITORIA (X_s), transitorio con la reactancia TRANSITORIA (X_T), de régimen permanente con la reactancia de régimen permanente (X).



COMBINACIÓN, FALLA LEJANA Y CERCANA

- En las instalaciones con sistema de respaldo.
- En el diagrama, el sistema de respaldo funcionará solamente cuando se corte el suministro de la red de distribución, en baja o media tensión.
- En otras situaciones el sistema de respaldo puede funcionar en paralelo, en tal caso el análisis es diferente porque ambos estarían funcionando simultáneamente.

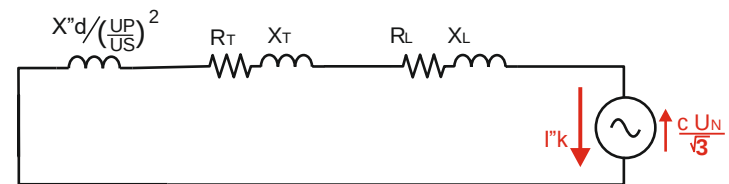
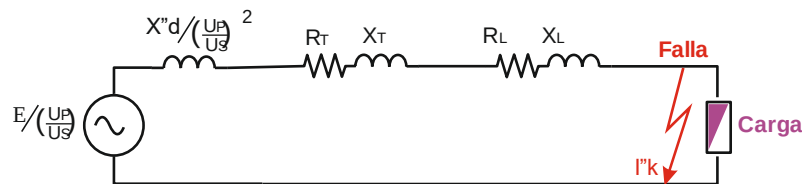
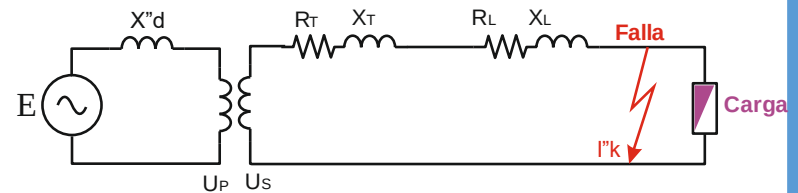
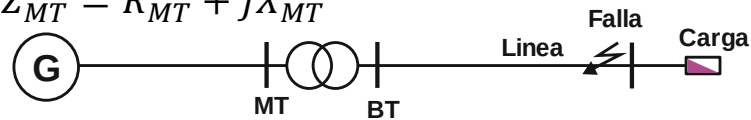


ANALISIS DEL CORTOCIRCUITO

- **ACOMETIDA.-**

- El valor de la corriente de cortocircuito para una acometida viene determinado por la potencia de cortocircuito en el punto de la conexión de la red que conecta a la acometida de la instalación eléctrica.

- $Z_{MT} = R_{MT} + jX_{MT}$



IMPEDANCIAS, DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR PARA DIVERSAS MAQUINAS Y DISPOSITIVOS ELECTRICOS

- Valores aproximados para calcular las diferentes impedancias, para las impedancias homopolares debe hallarse en forma experimental si se desean calcular con exactitud.

Valores de las Impedancias directa, inversa y homopolar para diversas máquinas y dispositivos eléctricos

Dispositivo	Componente Directa	Componente Inversa	Componente Homopolar
Transformador	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1 \cdot 0.9$
Bobina (L)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Condensador (C)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Resistencia (R)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Línea (L)	X_1	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Máquina Síncrona	X_1	Turbogenerador $X_2 = X_1$ Hidroturbinas $X_2 = 1.2 \cdot X_1$	$X_2 = 0.4 \cdot X_1$ $X_0 = (1/6 \text{ a } 3/4) \cdot X_1$ Solo máquinas dinámicas
Máquina Asíncrona	X_1	$X_2 = X_1$	

- La red de alimentación o impedancia representa una red externa a nuestro sistema; podría ser la conexión con la compañía, de esta red se conoce la corriente de cortocircuito trifásica I''_{kQ} o la potencia de cortocircuito trifásico $S_{cc_{kQ}}$, con lo que se puede determinar la impedancia de secuencia positiva, Z_Q del equivalente Thevenin en el punto común de conexión con red externa. Esta impedancia puede calcularse como:

- $$Z_Q = \frac{c \cdot U_{NQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}}$$

- Alternativamente, si en lugar de conocer la corriente de falla aguas arriba se conoce la potencia de cortocircuito, la impedancia del sistema puede calcularse como;

- $$Z_Q = \frac{c \cdot (U_{NQ})^2}{S_{cc_{kQ}}}$$

- Donde;

- U_{NQ} : tensión nominal del sistema en el punto de conexión de la alimentación.
- I''_{kQ} ; corriente de cortocircuito simétrica en el punto de conexión de la alimentación.
- c ; es un factor de voltaje para el voltaje U_{NQ} .
- S''_{kQ} ; potencia de cortocircuito.

- Si la cortocircuito trifásico de acuerdo a la figura está limitado desde una red en la cual solo se conoce la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_{KP} en el punto de conexión de la alimentación "P", entonces la impedancia equivalente en el punto "P" de la red (impedancia de secuencia directa) en el punto de conexión de la alimentación "P" puede ser determinada.

- $$Z_f = \frac{c \cdot U_{NP}}{\sqrt{3} \cdot I''_{KP}} = \frac{c \cdot U_{NP}^2}{S''_{KP}} = Z_{punto_P}$$

- $$Z_f = R_f + X_f$$

- Donde:

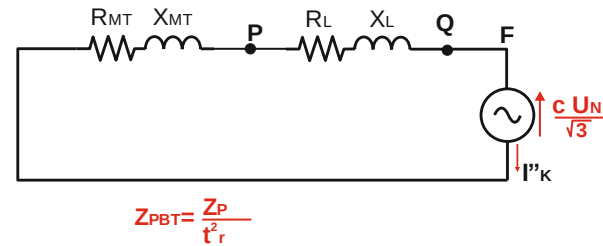
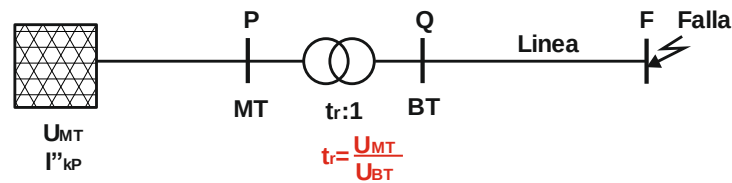
- U_{NP} ; tensión nominal de la red en el punto de la acometida "P".

- S''_{KP} ; Potencia de cortocircuito para la corriente inicial simétrica en el punto de acometida "P" en MVA.

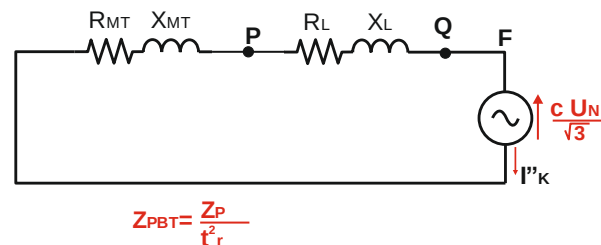
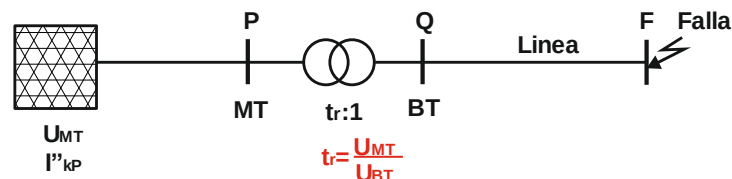
- I''_{KP} ; Intensidad inicial simétrica de cortocircuito en el punto de acometida "P" en (A).



- Si el cortocircuito esta alimentado mediante un transformador desde una red de Media Tensión, en el cual solo se conoce la corriente simétrica inicial de cortocircuito en el punto "P", I''_{kP} , entonces la impedancia de cortocircuito de secuencia directa equivalente Z_{PBT} , referida al lado de baja tensión del transformador se determina mediante;



- $$Z_{PMT} = \frac{c \cdot U_{NP}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kP}}$$
- $$Z_{PMT} = \frac{c \cdot U_{NP}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kP}} \cdot \frac{U_{NP}}{U_{NP}} = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{kP}}$$
- $$Z_{PMT} = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{kP}}$$



- $Z_{PBT} = \frac{c \cdot U_{NP}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kP}} \cdot \frac{1}{t^2 r}$
- Donde:
- Z_{PBT} ; impedancia de la red de MT referida a BT
- U_{NP} ; Tensión nominal de la red en el punto "P", MT.
- I''_{kP} ; Corriente inicial simétrica de cortocircuito en el punto de acometida "P" en (A), MT.
- c ; es el factor de tensión para la tensión U_{NP} , MT.
- $t^2 r$; es la relación de transformación asignada con el conmutador bajo carga en posición principal. Las corrientes simétricas iniciales de cortocircuito del lado de alta tensión del transformador deben ser dadas por la compañía distribuidora.
- Si no se conoce otros valores, puede tomarse para la resistencia efectiva $R_Q = 0.1 X_Q$, con $X_Q = 0.995 Z_Q$.

- $tr = \frac{U_{MT}}{U_{BT}}$; relación de transformación.

- $Z_{PBT} = \frac{Z_{PMT}}{t^2 r}$

- $Z_{PBT} = \frac{c \cdot U_{NP}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kP}} \cdot \frac{1}{t^2 r}$

- $Z_{PBT} = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{kP}} \cdot \frac{1}{tr^2} = \frac{c \cdot U_N^2}{S''_{kP}} \cdot \left(\frac{U_{BT}^2}{U_N^2} \right)$

- $Z_{PBT} = \frac{c \cdot U_{BT}^2}{S''_{kP}}$

- En forma simplificada;

- $Z_{MT} = X_{MT} = \frac{U_{MT}^2}{S''_k}$

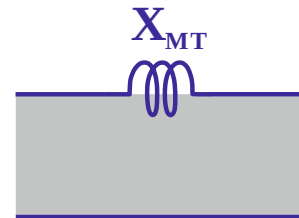
- Para que la impedancia referida a la baja tensión.

- $Z_{PBT} = X_{MT} = \frac{Z_{MT}}{t^2 r}$

- Acc, potencia de cortocircuito o capacidad de interrupción del interruptor.

- Impedancia de MT referida a BT, en forma directa.

- $Z_{PBT} = X_{PBT} = c \cdot \frac{U_{BT}^2}{S''_k}$



IMPEDANCIA DE LOS EQUIPOS ELECTRICOS

- Generalmente la información para calcular la impedancia de los equipos eléctricos viene la información en por unidad (**pu**) o en porcentaje (%), transformadores, motores, generadores, bobinas.
- $$Z (\Omega) = Z(pu) \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} = Z(pu) \cdot \frac{U_N^2}{\sqrt{3} \cdot S_N}$$
- Donde;
- Z, impedancia del equipo (Ω).
- Z(pu); impedancia en por unidad o porcentaje.
- U_N ; tensión nominal del equipo (kV).
- I_N ; corriente nominal del equipo (kA).
- S_N ; potencia nominal del equipo (MVA).
- Las impedancias de los generadores (G) y los transformadores (T), deben multiplicarse por los factores K_G , K_T para el cálculo de los corrientes de cortocircuito.

IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR

- Las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar dependen del número y tipo de conexión de los devanados: La magnitud o módulo de la impedancia inversa suele ser igual al del módulo de la impedancia directa.
- La impedancia de cortocircuito del transformador coincide con la impedancia de secuencia directa.

Impedancia del transformador.

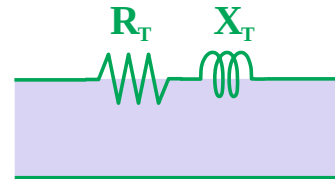
$$Z_T = \frac{U_{CC}(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_N}$$

$$R_T = \frac{P_{CU}(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_N}$$

$$R_T = \frac{P_P}{3 \cdot I^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

$$Z_T = R_T + jX_T$$



Tensión de cortocircuito U_{cc} (%) para Transformadores de diferentes potencias

S_N (kVA)	50	100	160	250	400	630	800	1,000
U_{cc} (%)	4	4	4	4	4	4	6	6

- ***Factor de corrección de impedancia para transformadores de redes de dos y tres arrollamientos.***
- Un transformador es un equipo conectado a dos tensiones diferentes, para transformadores de dos arrollamientos con o sin conmutador bajo carga, se introduce un factor de corrección de impedancia K_T .
- $Z_{kT} = K_T \cdot Z_T$
- $K_T = 0.95 \cdot \frac{C_{max}}{1+0.6 \cdot x_T}$
- Z_{kT} ; Magnitud de la impedancia corregida por el factor K_T .
- K_T ; factor de corrección por el cambio de tensión en las redes de diferentes tensiones.
- C_{max} ; factor de tensión "C= 1.05" en el rango de Bajan tensión 1000 (V), tolerancia 6 (%).
- x_T ; reactancia inductiva del transformador corregido con la siguiente ecuación.
- $x_T = X_T / (U_N^2 / S_N)$
- X_T ; reactancia inductiva del transformador sin corrección.

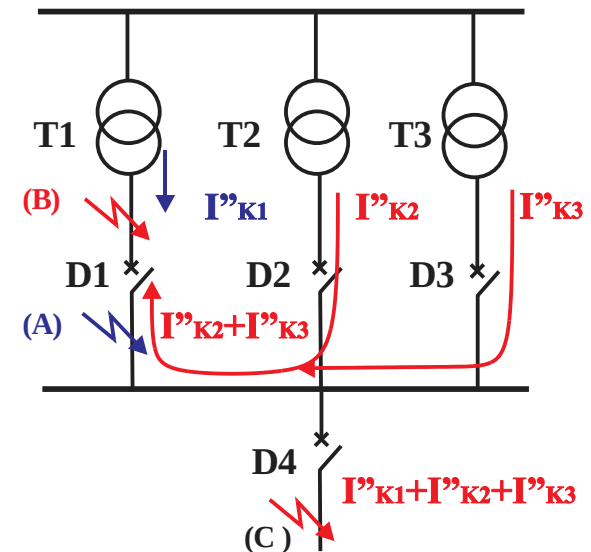
- Impedancias corregidas por el factor K_T , para calcular las corrientes simétricas de cortocircuitos
- Transformador
- U_N ; 420 (V)
- Factor; C_{max} ; 1.05

CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR						Factores de corrección		Impedancias Corregidas		
S_N (kVA)	U_{cc} (%)	Perdida (W)	Z_T (m Ω)	R_T (m Ω)	X_T (m Ω)	x_T (pu)	K_T	$K_T \cdot Z_T$	$K_T \cdot R_T$	$K_T \cdot X_T$
50	4	1100	141.12	77.61	117.86	0.0334	0.978	138.00	75.90	115.26
100	4	1750	70.56	30.87	63.45	0.0360	0.976	68.897	30.141	61.954
160	4	2350	44.10	16.19	41.02	0.0372	0.976	43.03	15.80	40.02
250	4	3250	28.22	9.17	26.69	0.0378	0.975	27.53	8.95	26.03
400	4	4600	17.64	5.07	16.90	0.0383	0.975	17.20	4.94	16.47
630	4	6500	11.20	2.89	10.82	0.0386	0.975	10.92	2.82	10.55
800	6	8100	13.23	2.23	13.04	0.0591	0.963	12.74	2.15	12.56
1000	6	10500	10.58	1.85	10.42	0.0591	0.963	10.20	1.78	10.04

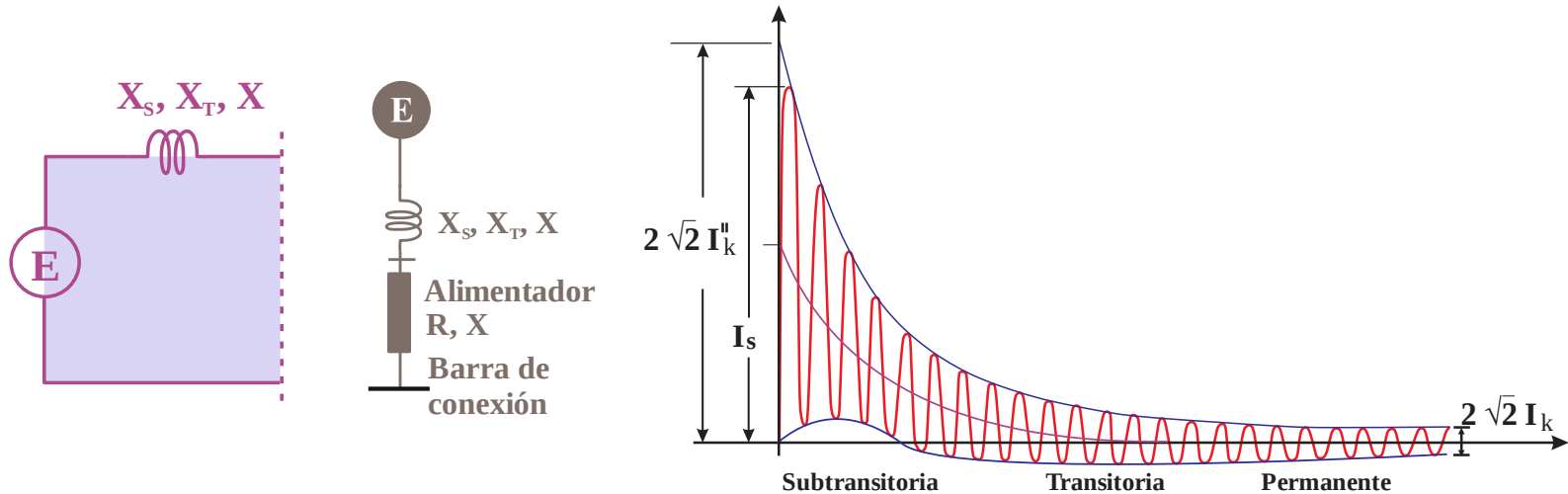
- Para determinar la corriente de cortocircuito con mayor aproximación se debe conocer la potencia de cortocircuito y la impedancia de la red, si esta información no es posible tomar en cuenta la capacidad de apertura del interruptor principal.
- Otra forma para tener una idea de la magnitud de la corriente de falla es asumiendo como barra infinita en punto de conexión del primario del transformador, en los bornes del transformador.
- En este caso para determinar la corriente de cortocircuito aproximadas en los bornes del transformador, la impedancia del transformador representa la impedancia de falla;
- $$I''_K = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_T}$$
- $$I''_K = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_T} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\frac{U(\%)_{cc}}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}} \right) = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N}{U(\%)_{cc} \cdot U_N^2} \right) = \frac{I_N}{U(\%)_{cc}} \cdot 100$$
- $$I''_K = \frac{I_N}{U(\%)_{cc}} \cdot 100$$

TRANSFORMADORES EN PARALELO

- La capacidad de corte de los dispositivos de protección, esta de acuerdo al punto donde se presente la falla.
- Si fuese en el punto (A), por debajo el dispositivo de protección, su capacidad de corte debe ser por lo menos a la corriente de cortocircuito I''_{K1} , considerando al transformador T1, lo mismo ocurre con los otros dos transformadores.
- Para la falla en el punto (B), se debe considerar el aporte, $I''_{K2} + I''_{K3}$, de los dos transformadores T2 y T3.
- Si la falla se presente en el punto (C) se debe tomar en cuenta el aporte, $I''_{K1} + I''_{K2} + I''_{K3}$ de los tres transformadores, T1, T2 y T3.



MAQUINAS SINCRONAS

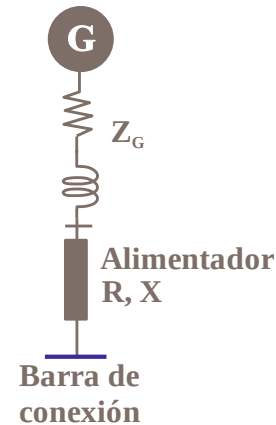
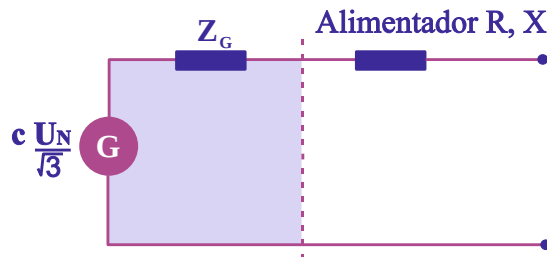


- Para determinar la corriente simétrica inicial de cortocircuito, para la impedancia de un generador conectado sin transformador a sistema de carga, se debe considerar la siguiente impedancia del sistema de secuencia directa.
- $Z_{GK} = K_G \cdot Z_G = K_G \cdot (R_G + jX''_s)$

- Con el factor de corrección:
- $$K_G = \frac{U_N}{U_{NG}} \cdot \frac{C_{max}}{1+x''_s \cdot \text{Sen}\varphi_{rG}}$$
- $C_{m\acute{a}x}$; es el factor de tensi3n "C= 1.05"
- U_N ; es la tensi3n nominal del sistema.
- U_{NG} ; es la tensi3n asignada del generador.
- Z_{GK} ; es la impedancia subtransitoria corregida del generador.
- Z_G ; es la impedancia subtransitoria del generador en el sistema de secuencia directa:
- $Z_G = R_G + jX''_s$
- φ_{NG} ; es el 3ngulo de fase entre I_{NG} y $U_{NG}/\sqrt{3}$
- x''_s ; es la reactancia subtransitoria relativa del generador relativa a la impedancia.

- $x''_s = \frac{X''_s}{Z_{NG}}$
- $Z_{NG} = \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}}$
- $X_s'' = \frac{X_s(\%)}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_g}$
- S_g , potencia nominal del generador.
- X_s , reactancia subtransitoria en (%).
- X_s'' , reactancia subtransitoria (Ω)
- Debe ser introducido el factor de corrección K_G para el cálculo de la impedancia subtransitoria corregida Z_{GK} , debido a que la fuente de tensión equivalente se utiliza en lugar de la tensión subtransitoria E'' detrás de la reactancia subtransitoria del generador sincrónico.
- Valor de la reactancia inicial porcentual x''_s de acuerdo al tipo de máquina eléctrica.
- Información a la hora de calcular las impedancias de secuencia inversa, cumpliéndose en general;

- $X''_s > 18$ (%) máquinas con rotor de polos salientes: $X_2 = 1.2 X_1$.
- $X''_s < 18$ (%) máquina con rotor liso, $X_2 = X_1$.
- Para la resistencia de los bobinados del generador " R_G " se puede tomar la siguiente información con mucha precisión.
- $R_G = 0.05 X''_s$ para generadores con $U_{rG} < 1$ (kV) y $S_{NG} \geq 100$ (MVA).
- $R_G = 0.07 X''_s$ para generadores con $U_{rG} < 1$ (kV) y $S_{NG} < 100$ (MVA).
- $R_G = 0.15 X''_s$ para generadores con $U_{NG} < 1000$ (V).
-



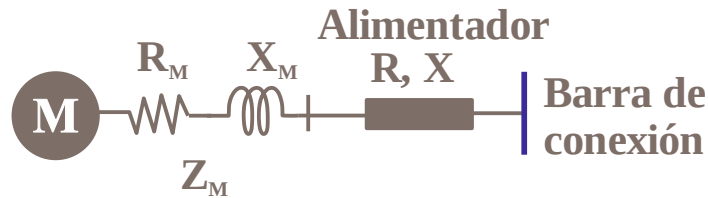
- Un análisis de menor precisión, sería de la siguiente forma;

- $I''_K = \frac{I_{NG}}{X''(\%)_s} \cdot 100$

- $I''_K = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X''_g} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{\frac{X''(\%)_s \cdot U_N^2}{100 \cdot S_N}} \right) = \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{100 \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N}{X''(\%)_s \cdot U_N^2} \right) = \frac{I_N}{X''(\%)_s} \cdot 100$

- Donde;
- I''_K ; corriente de cortocircuito en los bornes del generador, no se toma en cuenta las magnitudes de los conductores que conecta con la barra o punto de derivación del alimentador del generador.
- I_N , corriente nominal del generador.
- $X''(\%)_s$, reactancia subtransitoria del generador.

MOTOR ASINCRONO



- Los motores de media tensión deben ser considerados para el cálculo de la corriente máxima de cortocircuito. Los motores de baja tensión deben ser tomados en cuenta en servicios auxiliares de grupos de generación.
- Los motores de inducción, en media tensión y en baja tensión, como los de rotor de jaula de ardilla y de rotor bobinado, ante una falla se comportan como generadores, aportando energía y corriente hacia el defecto, corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_K y a la corriente de pico I_P por un tiempo muy pequeño (1 a 3 ciclos), la corriente que aporta depende de las características del motor y de la impedancia desde el motor hasta el punto de falla.
- Se debe sumar la impedancia del cable que va desde el motor al punto de falla.
- Esta corriente es generada debido a la existencia de energía cinética almacenada en el rotor y la carga, más la presencia de la tensión inducida producto del campo magnético giratorio presente en el entrehierro.

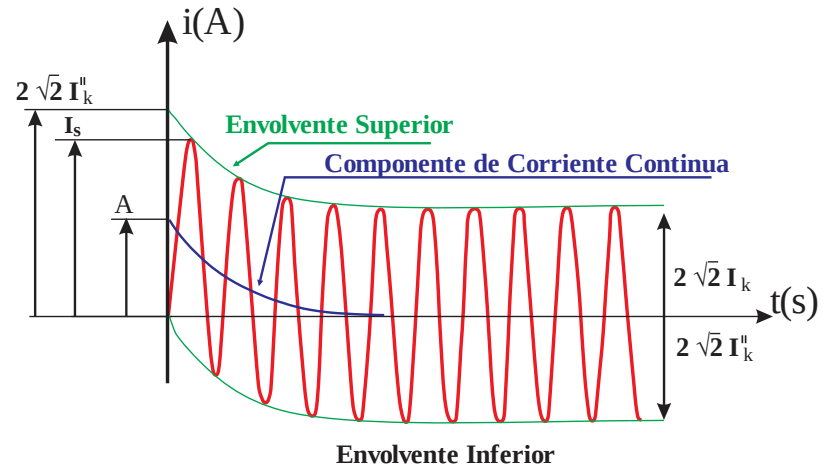
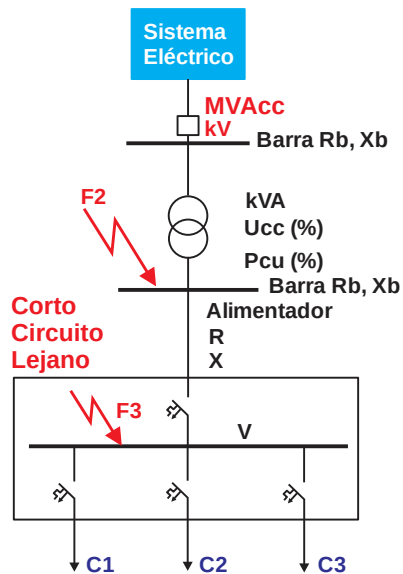
- La corriente de cortocircuito aportada por un motor de inducción, está limitada solamente por su reactancia subtransitoria, X''_s . Este valor es similar a la reactancia de rotor bloqueado del motor.
- Los motores de media tensión deber ser considerados en el cálculo de la corriente máxima de cortocircuito, para los motores de baja tensión la corriente I''_{KM} puede ser despreciada si su aporte no es mayor al 5 (%) de la corriente inicial de cortocircuito calculada sin motores.
- Se cumple; $I''_{KM} \leq 0.05 \cdot I''_{K \text{ sin motores}}$
- También se puede estimar con; $I''_K \cong I_{RB} \cong 5 \cdot \sum I_{NM}$
- $\sum I_{NM} \leq 0.01 \cdot I''_{k \text{ sin motores}}$
- $\sum I_{NM}$; es la suma de las corrientes asignadas de los motores conectados directamente (sin transformador) a la red donde ocurre el cortocircuito.
- $I''_{K \text{ sin motores}}$; es la corriente simétrica inicial de cortocircuito sin la influencia de los motores.

- La impedancia del motor de secuencia positiva y negativa para el cálculo de la corriente de cortocircuito puede ser calculada como;
- $$Z_M = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{RB}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_{RB}} \cdot \left(\frac{I_N}{I_N} \right) = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot \left(\frac{I_N}{I_{RB}} \right) = \frac{1}{I_{RB}/I_N} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \left(\frac{U_N}{U_N} \right)$$
- $$Z_M = \frac{1}{I_{RB}/I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$$
- Donde;
- Z_M ; es la tensión impedancia del motor (Ω).
- U_N ; es la tensión asignada del motor (V).
- I_{RB} ; es la corriente de rotor bloqueado del motor (A).
- I_N ; es la corriente asignada del motor (A).
- S_N ; es la potencia aparente asignada del motor (kVA);
- $$S_N = \frac{P_N}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}$$
- I_{RB}/I_N ; es la relación entre la corriente a rotor bloqueado y la corriente asignada al motor.

- Para determinar los componentes de la impedancia de los motores de baja tensión, se puede asumir que;
- $R_M / X_M = 0.42$ con $X_M = 0.922 \cdot Z_M$
- Si no existe información completa de los motores, se puede asumir que.
- La corriente de rotor bloqueado;
- $I_{RB} = 5 \cdot I_N$
- Se asume el motor como si fuese solamente una reactancia inductiva.
- $X_M = \frac{1}{5 \cdot I_N / I_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$
- $X_M = 0,2 \cdot \frac{U_N^2}{S_N}$

CORTOCIRCUITO ALEJADO DEL GENERADOR

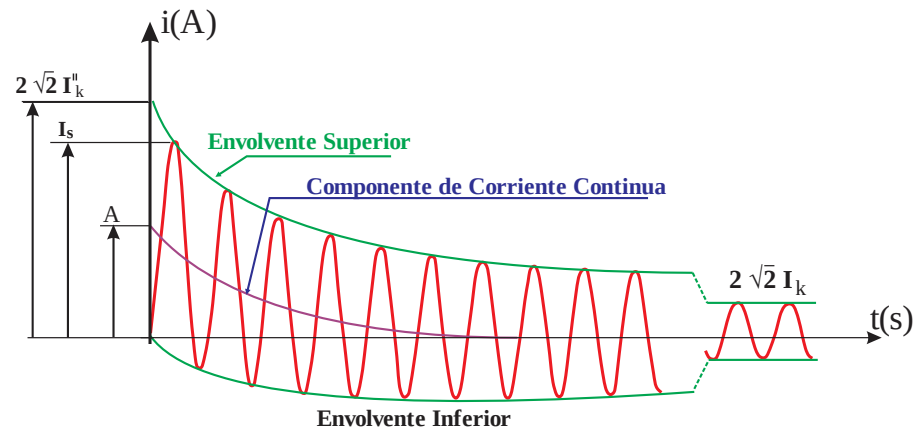
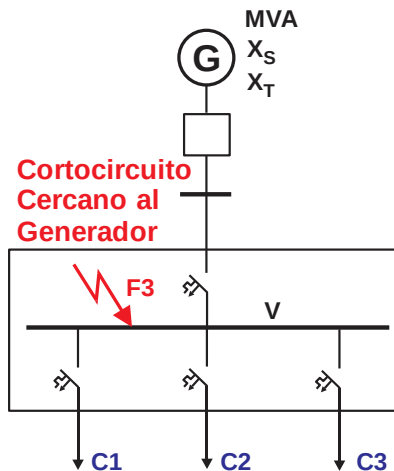
- Esta situación es típica de aquellas instaladas conectadas a la redes de distribución de media tensión, evaluamos la falla en baja tensión al interior de las instalaciones industriales, grande edificios.
- Para efectos de calculo, se asume constante las impedancias que intervienen.



- La corriente de falla esta compuesta por:
- Componente de corriente alterna cuya magnitud disminuye durante la falla.
- Componente de corriente continua desde el valor "A" hasta cero.
- La corriente de falla es el resultado de la suma de las componentes.
- Componente de corriente alterna cuya amplitud permanece constante durante el tiempo que transcurre la falla.
- La componente de la corriente continua de valor "A" decrece hasta el valor cero.
- Las corrientes I''_k , I_b e I_k expresadas en valor eficaz son prácticamente iguales en magnitud.
- En las instalación con transformador, la falla puede ser considerada como alejada del generador si la reactancia del transformador es mayor al doble de la reactancia de la acometida en el punto de conexión.

CORTOCIRCUITO CERCANO AL GENERADOR

- En el proceso de la liberación de la falla, el generador pasa por el estado de funcionamiento diferentes, subtransitorio caracterizado por la REACTANCIA SUBTRANSITORIA (X_s), transitorio con la reactancia TRANSITORIA (X_T), de régimen permanente con la reactancia de régimen permanente (X).



- Por la característica de la corriente de cortocircuito que disminuye en el transcurso del tiempo, es necesario conocer las siguientes corrientes;
- Corriente simétrica inicial de cortocircuito, I''_k .
- Corriente de pico de cortocircuito, I_p .
- Corriente de ruptura, I_b .
- Corriente permanente de cortocircuito, I_k .
- En este caso se cumple que; $I''_k > I_b > I_k$

- **RESISTENCIA DEL CONDUCTOR ELÉCTRICO.**

- $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$

- $\rho = \rho_{20^{\circ}C} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = \rho_{20^{\circ}C} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20^{\circ}C)]$

CORRIENTE DE FALLA	Resistividad	Valor de la Resistividad		Conductores Afectados
		Cobre	Aluminio	
Corriente Máxima de Cortocircuito	$\rho_1=1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase - N
Corriente Mínima de Cortocircuito	$\rho_1=1,5\rho_{20}$	0,027	0,043	Fase - N
Corriente de Defecto en los esquemas TN e IT	$\rho_1=1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase - N (**)
				PE - PEN
Caída de Tensión	$\rho_1=1,25\rho_{20}$	0,0225	0,036	Fase - N (*)
Corriente de Sobreintensidad para la verificación de las solicitaciones térmicas del conductor	$\rho_1=1,5\rho_{20}$	0,027	0,043	Fase - N PEN - PE incorporado en el mismo cable multiconductor

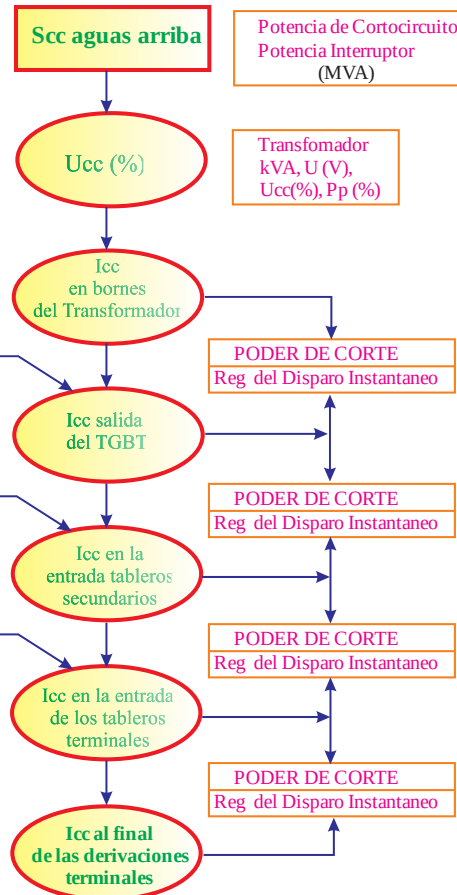
(**): ρ_{20} . Resistividad de los conductores a 20°C: 0,01724 (Ω -mm²/m) para el cobre y 0,02826 para el aluminio

(*): N la sección del conductor de Neutro sea inferior a la de los conductores de fase, sistema trifásico

Secuencia de Pasos para Calcular la Corriente de Cortocircuitos

CARACTERISTICAS DE LOS CONDUCTORES:

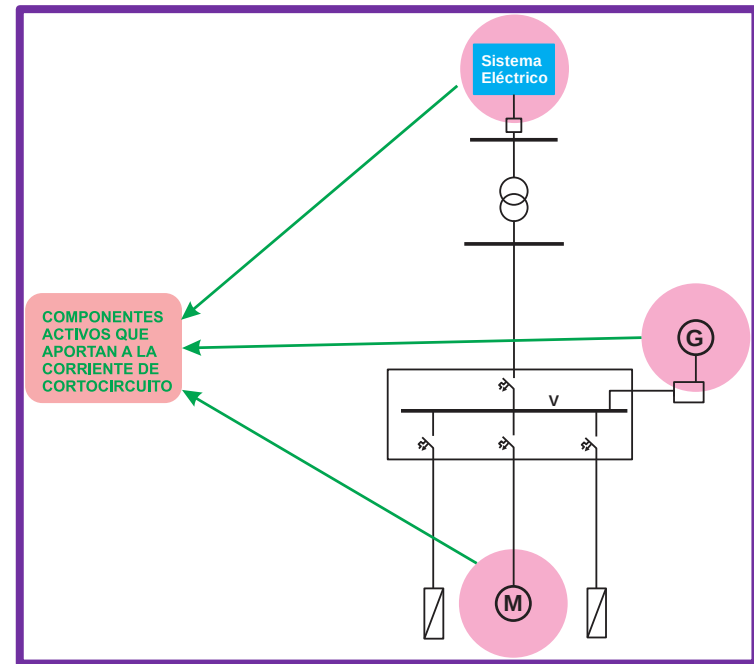
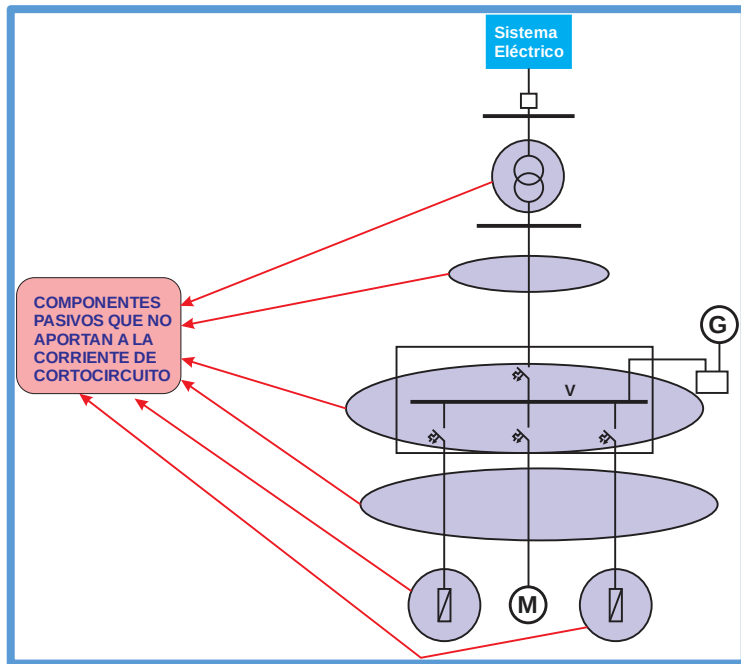
- 1.- Juegos de Barras
Espesor
Ancho
Longitud
- 2.- Cables
Tipo de Aislante
Unifilar o Multifilar
Longitud
Seccion
- 3.- Entorno
Temperatura Ambiente
Modo de Instalacion
Numero de Conductores juntos



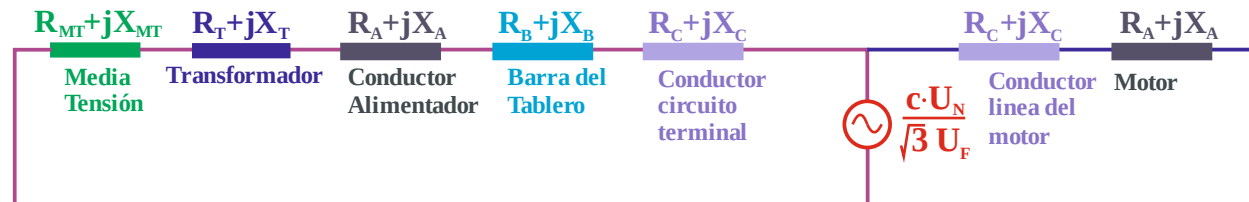
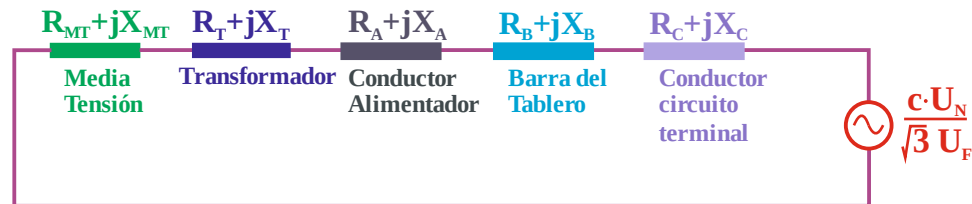
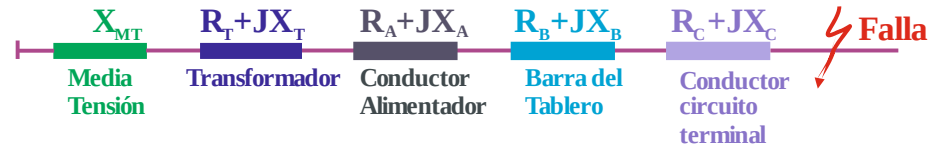
FUENTES PARA LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO

- Generadores.
- Motores sincrónicos y condensadores sincrónicos.
- Motores de inducción.
- En cada una de estas fuentes, para falla en sus terminales, la corriente de cortocircuito es limitada únicamente por su impedancia interna.
- Los motores síncronos suministra corriente de cortocircuito de forma similar a los generador.
- Cuando un motor pierde bruscamente su fuente de alimentación debido a un cortocircuito, se genera una tensión en el estator por efecto del flujo remante y el movimiento del rotor, por lo que produce una corriente hacia el punto de falla.
- La corriente proveniente de un condensador dirigida hacia el punto de falla, salvo que no se consuma en las resistencias internas, sin embargo el efecto no es muy por lo que se puede no tomarlo en cuenta. $\frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3}}$.

COMPONENTES ACTIVOS Y PASIVOS, SISTEMA ELECTRICO, CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO



COMPONENTES



TIPOS DE FALLAS

- De acuerdo al tipo de falla, la magnitud de la corriente de cortocircuito varia.
- Cortocircuito Trifásico.
- Cortocircuito entre dos fases.
- Modo de conexión TT, TN.
- Modo de conexión IT.
- Fase – Fase.
- Cortocircuito monofásico.
- Modo de conexión a tierra TT.
- Fase – Neutro
- Fase – Conductor de Protección.
- Modo de conexión a tierra TN.
- Fase – Neutro
- Fase – Conductor de Protección.

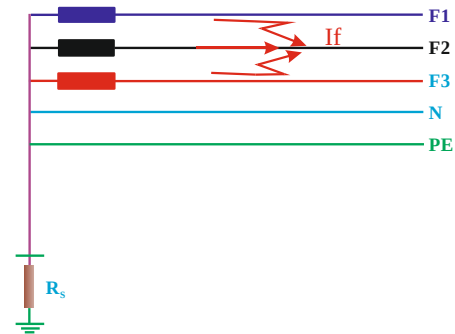
MODO DE CONEXIÓN A TIERRA TN, TT e IT

I''_K

- CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO. $I_{cc3\Phi}$.-

- F-F-F

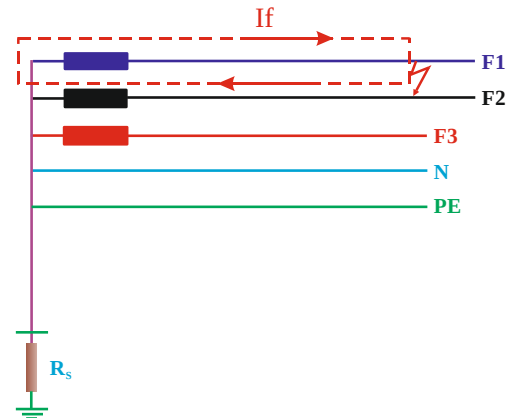
- $I''_{K3\Phi} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f|}$



- CORTOCIRCUITO BIFÁSICO. $I_{cc2\Phi}$.-

- F-F

- $I''_{K2\Phi} = \frac{c \cdot U_N}{2 \cdot |Z_f|}$



MODO DE CONEXIÓN A TIERRA TN

I''_K

- CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO

- F-N. $I_{cc1\Phi}$.-

$$I''_{K1\Phi(F-N)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f + Z_N|}$$

- CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO

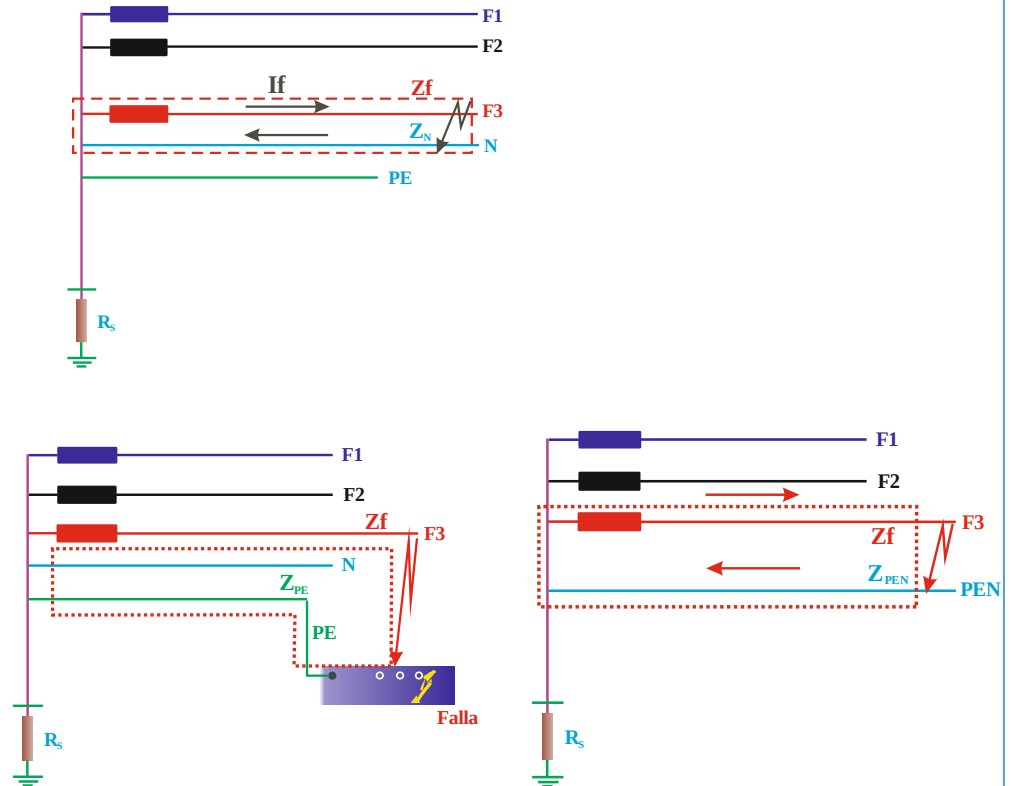
- F-PE. $I_{cc1\Phi}$.-

$$I''_{K1\Phi(F-PE)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f + Z_{PE}|}$$

- CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO

- F-PEN. $I_{cc1\Phi}$.-

$$I''_{K1\Phi(F-PE)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f + Z_{PEN}|}$$



MODO DE CONEXIÓN A TIERRA TT

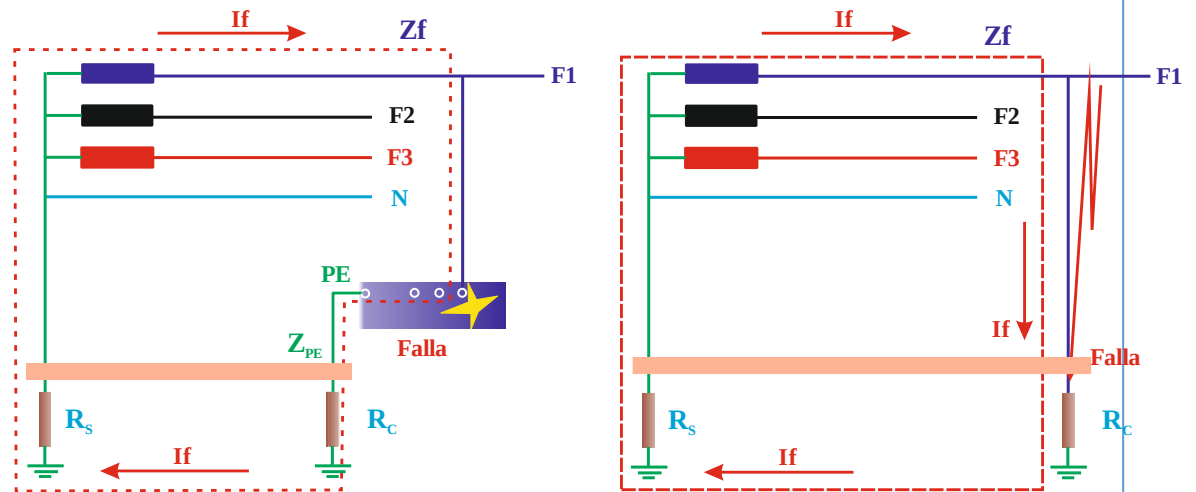
I''_K

- CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO.

- $I_{cc1\Phi}$. F-PE.-

$$I''_{K1\Phi(F-PE)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f + R_s + R_c|}$$

$$I''_{K1\Phi(F-PE)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |R_c|}$$



MODO DE CONEXIÓN A TIERRA IT

I''_K

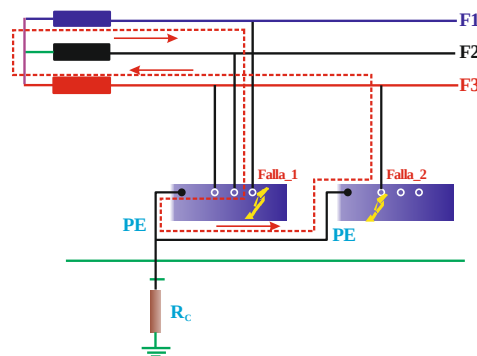
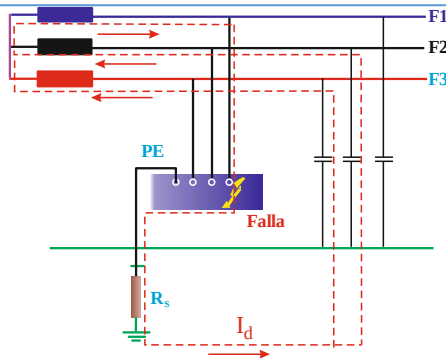
- CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO.
- $I_{cc1\Phi}$. F-PE.-

$$I''_{K1\Phi(F-PE)} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot |Z_f + Z_s + Z_c|}$$

- CORTOCIRCUITO BINOFÁSICO.

- $I_{cc2\Phi}$. F-F.-
- Segunda falla

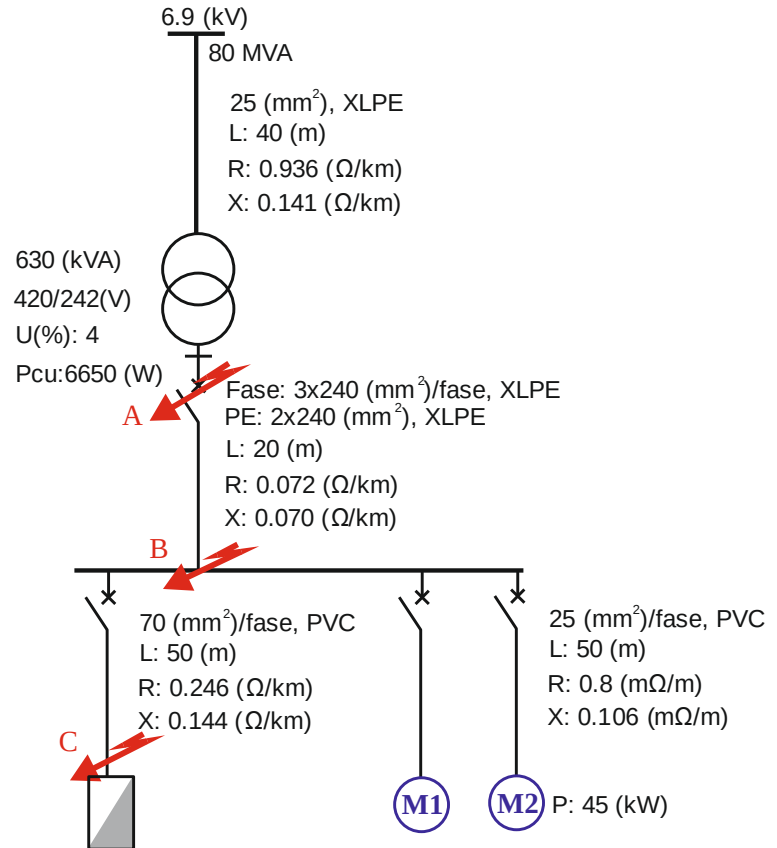
$$I''_{K2\Phi} = \frac{c \cdot U_N}{2 \cdot |Z_f|}$$



EJEMPLO DE APLICACIÓN

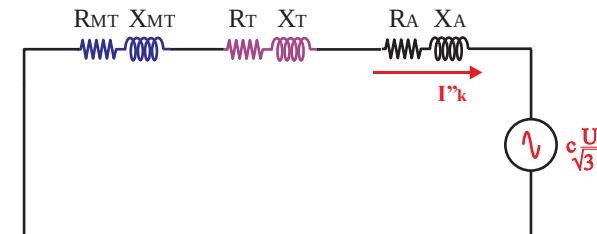
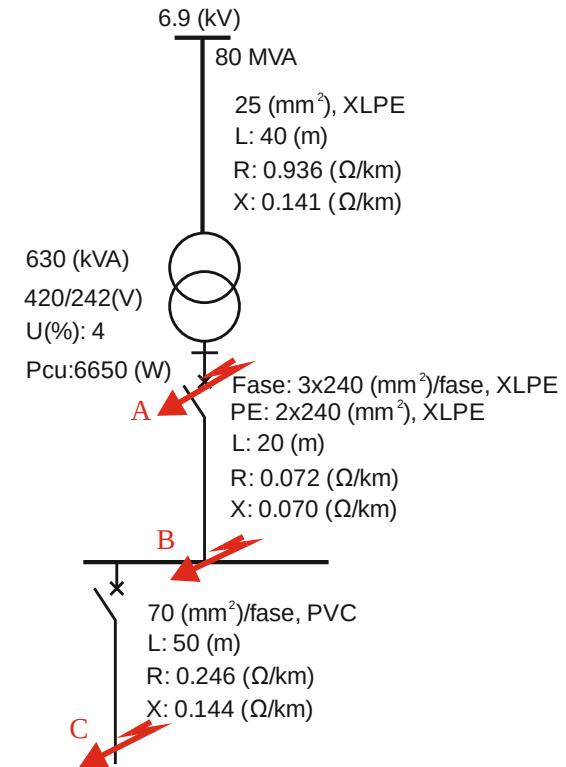
- Empresa DELAPAZ, tensión nominal red primaria 6.9 (kV), potencia de cortocircuito 80 (MVA), determinar la corriente de cortocircuito trifásicos en los puntos A, B y C.
- **Solución.**
- La corriente de falla en cada uno de los puntos serán calculadas de dos maneras diferente.
- a) Analizando por separado, la corriente que contribuye la red del sistema eléctrico, sumando la corriente del aporte de los motores.
- b) Determinando la impedancia equivalente para uno de los puntos de falla y calcular la corriente de cortocircuito.

- Diagrama unifilar.



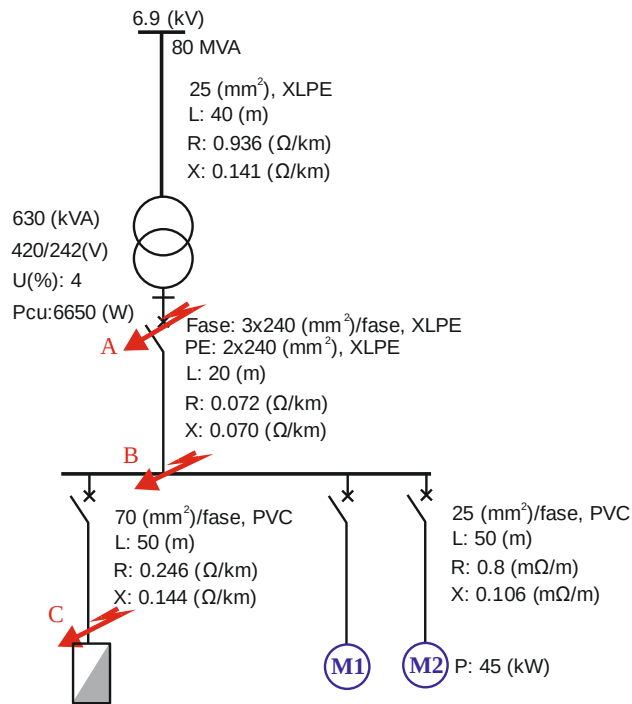
Ejemplo de aplicación

- Inicialmente analicemos, como si el sistema eléctrico estaría conformado solamente con la conexión a la red de MT de la empresa eléctrica.
- Impedancia de la red de media tensión.
- $Z_{MT} = \frac{c \cdot U_N^2}{A_{CC}} = \frac{1.1 \cdot (6.9)^2}{80} = 0.655 \text{ } (\Omega)$
- $X_{MT} = 0.995 \cdot Z_{MT} = 0.995 \cdot 0.655 = 0.652 \text{ } (\Omega)$
- $R_{MT} = 0.1 \cdot X_{MT} = 0.1 \cdot 0.655 = 0.065 \text{ } (\Omega)$
- $Z_{MT} = 0.065 + j0.652 \text{ } (\Omega)$
- Impedancia de la red acometida en media tensión.
- Resistencia.
- $R_{aMT} = R' \cdot L = 0.936 \cdot 0.04 = 0.037 \text{ } (\Omega)$
- Reactancia inductiva.
- $X_{aMT} = X' \cdot L = 0.141 \cdot 0.04 = 0.006 \text{ } (\Omega)$

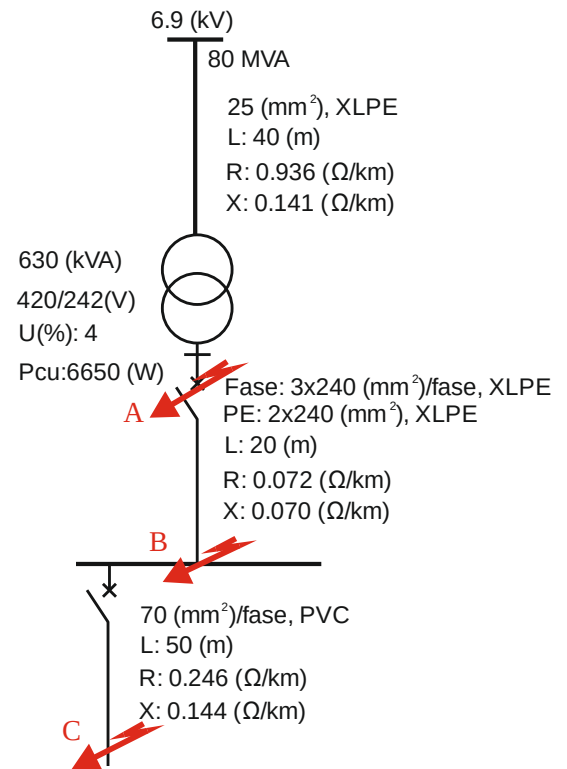


Ejemplo de aplicación

- Empresa DELAPAZ, tensión nominal red primaria 6.9 (kV), potencia de cortocircuito 80 (MVA), determinar la corriente de cortocircuito en los puntos A, B y C.



- Impedancia total de media tensión;
- $Z_{MT} = (0.065 + 0.037) + j(0.652 + 0.006)$
- $Z_{MT} = 0.102 + j0.658 \text{ (m}\Omega\text{)}$
- Relación de transformación.
- $tr = \frac{U_P}{U_S} = \frac{6900}{420} = 16.43$
- Impedancia referida a baja tensión.
- $Z_{MBT} = \frac{Z_{MT}}{tr^2} = \frac{0.102 + j0.658}{(16.43)^2} = 0.378 + j2.437 \text{ (m}\Omega\text{)}$
- $Z_{MBT} = \sqrt{0.378^2 + 2.437^2} = 2.466 \angle 81.2^\circ \text{ (m}\Omega\text{)}$



IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR

- Impedancia del transformador.

$$Z_T = \frac{U_{CC}(\%)}{100} \cdot \frac{U^2}{A} = \frac{4}{100} \cdot \frac{(420)^2}{630} = 11,2 (m\Omega)$$

- Resistencia del transformador.

$$a) R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I^2}$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,42} = 866 (A)$$

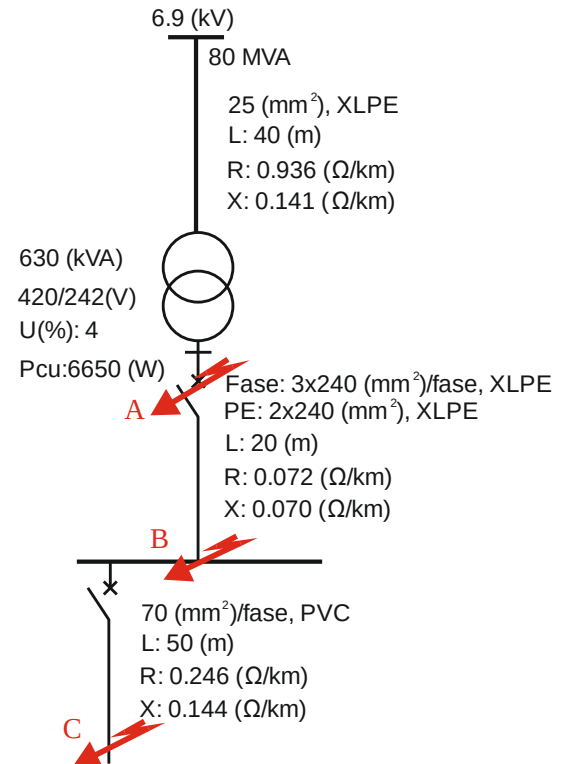
$$R_T = \frac{6650}{3 \cdot (866)^2} = 2,956 (m\Omega)$$

$$R_T = \frac{P_{cu}(\%)}{100} \cdot \frac{U^2}{A}$$

$$P_{cu}(\%) = \frac{P_{cu}}{S} \cdot 100 = \frac{6650}{630000} \cdot 100 = 1,05 (\%)$$

$$R_T = \frac{1,05}{100} \cdot \frac{(420)^2}{630} = 2,94(m\Omega)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(11,2)^2 - (2,956)^2} = 10,803(m\Omega)$$



- Factor de corrección;

- $x_T = \frac{X_T}{U_N^2 / S_N} = \frac{10.803}{(420)^2 / 630} = 0.03858$

- $K_T = 0.95 \cdot \frac{C_{max}}{1 + 0.6 \cdot x_T} = 0.95 \cdot \frac{1.05}{1 + 0.6 \cdot 0.03858} = 0.975$

- Impedancia del transformador;

- $Z_T = K_T \cdot (R_T + jX_T)$

- $Z_T = 0.975 \cdot (2.956 + j10.803) = 2.882 + j10.533$

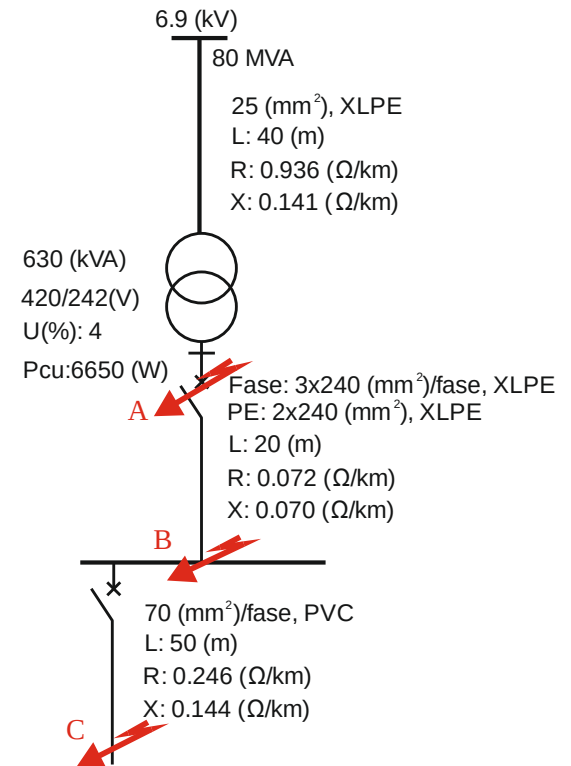
- Impedancia de falla en el punto "A".

- $Z_f = Z_{MBT} + Z_T = (0.378 + 2.882) + j(2.437 + 10.533)$

- $Z_f = 3.26 + j12.97(m\Omega)$

- Impedancia de falla en el punto "A".

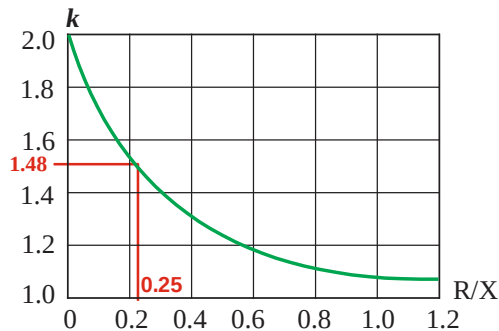
- $Z_f = \sqrt{R_f^2 + X_f^2} = \sqrt{(3.26)^2 + (12.97)^2} = 13.34 (m\Omega)$



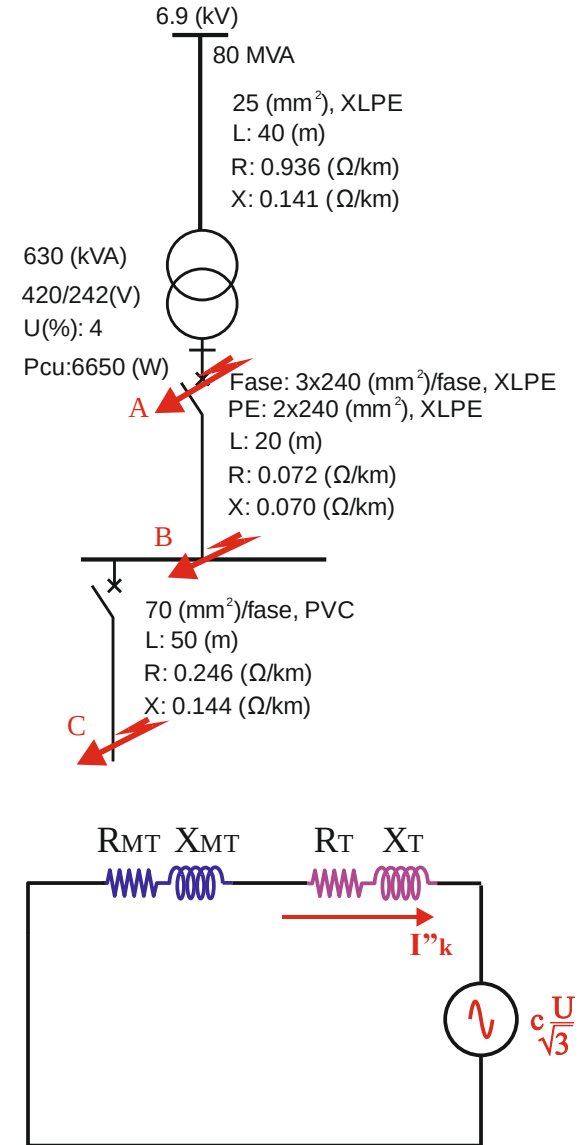
- Cortocircuito en el punto "A".

$$I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 13.34} = 18.18 \text{ (kA)}$$

- Se cumple que; $I''_k = I_b = I_k$
- La corriente de impuso o de pico;
- $\kappa = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot R/X}$
- Relación; $R/X_L = 3.26/12.97 = 0.25$
- $\kappa = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot 0.25} = 1.48$



- $I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_k$
- $I_p = 1.48 \cdot \sqrt{2} \cdot 18.18 = 38.05 \text{ (kA)}$



IMPEDANCIAS DE LOS CONDUCTORES

- **Alimentador transformador – tablero: A-B.**

- Resistencia a 20 °C.

- $R_c = R' \cdot L = 0.072 \cdot 0.02 \cdot 1000 = 1.44 (m\Omega)$

- $R_c = \frac{0.01724}{240} \cdot 20 \cdot 1000 = 1.437(m\Omega)$

- Como son tres por fase, están en paralelo.

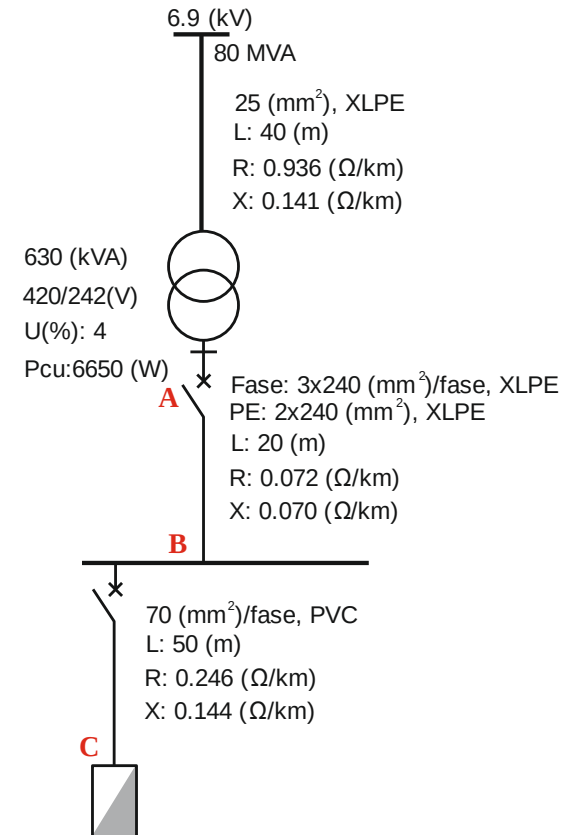
- $R_p = \frac{R_c}{n} = \frac{1.44}{3} = 0.48(m\Omega)$

- Reactancia inductiva.

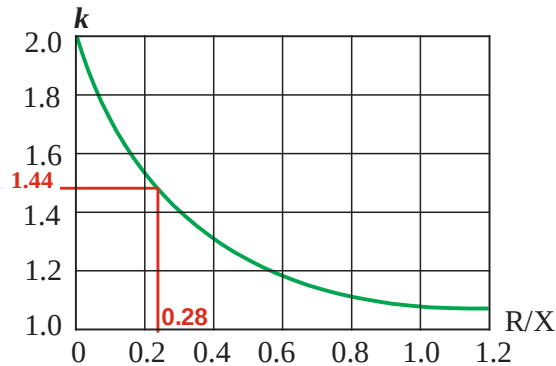
- $X_c = X' \cdot L = 0.070 \cdot 0.02 = 1.4(m\Omega)$

- Como son tres por fase, están en paralelo.

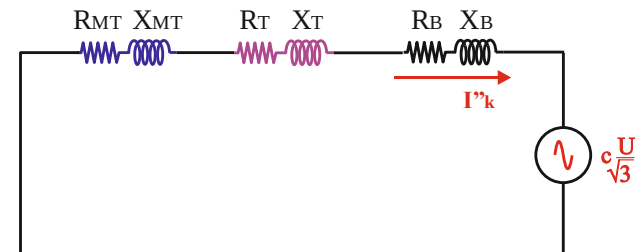
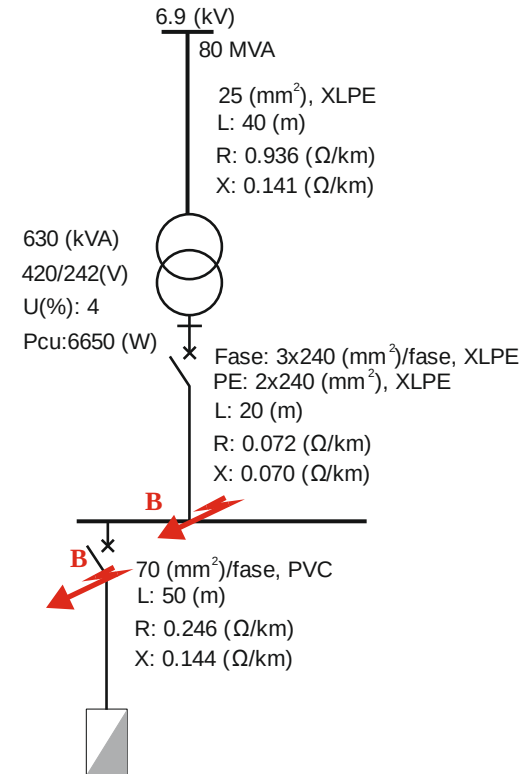
- $X_p = \frac{X_c}{n} = \frac{1.4}{3} = 0.47(m\Omega)$



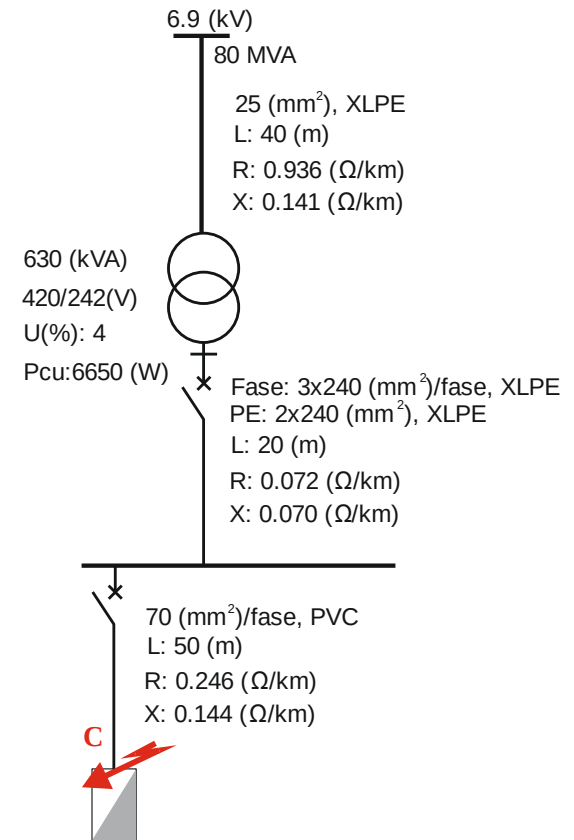
- Impedancia de falla en el punto "B".
- $Z_f = Z_{MBT} + Z_T = (3.26 + 0.48) + j(12.97 + 0.47)$
- $Z_f = 3.74 + j13.44(m\Omega)$
- $Z_f = \sqrt{R_f^2 + X_f^2} = \sqrt{(3.74^2 + (13.44)^2)} = 13.95 (m\Omega)$
- Cortocircuito en el punto "B".
- $I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 13.95} = 17.38 (kA)$
- Se cumple que; $I''_k = I_b = I_k$
- La corriente de impulso o de pico;
- Relación; $R/X_L = 3.74/13.44 = 0.28$
- $\kappa = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot 0.28} = 1.44$



- $I_p = 1.44 \cdot \sqrt{2} \cdot 17.38 = 35.39 (kA)$



- **ALIMENTADOR TABLERO PUNTO DE FALLA “C”..**
- Resistencia a 20 °C.
- $R_c = R' \cdot L = 0.246 \cdot 0,05 = 12,3(m\Omega)$
- $R_c = \frac{0,01724}{70} \cdot 50 \cdot 1000 = 12,31(m\Omega)$
- Reactancia inductiva.
- $X_c = X' \cdot L = 0,144 \cdot 0,05 = 7,2(m\Omega)$
- Impedancia de falla en el punto “C”.
- $Z_{fC} = (3.74 + 12.3) + j(13.44 + 7.2) = 16.04 + j20.64(m\Omega)$
- $Z_f = \sqrt{R_f^2 + X_f^2} = \sqrt{(16.04)^2 + (20.64)^2} = 26.14 (m\Omega)$



- **CORTOCIRCUITO EN EL PUNTO “C”.**

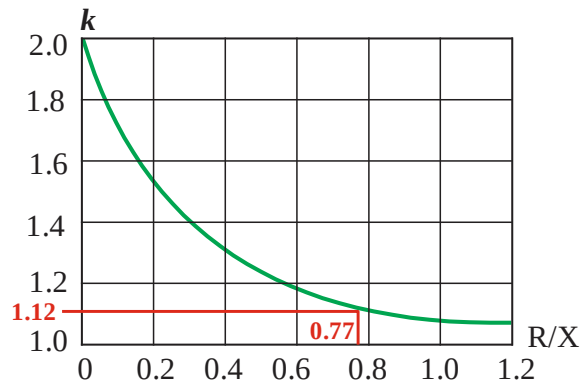
- $I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 26.14} = 9.28 \text{ (kA)}$

- Se cumple que; $I''_k = I_b = I_k$

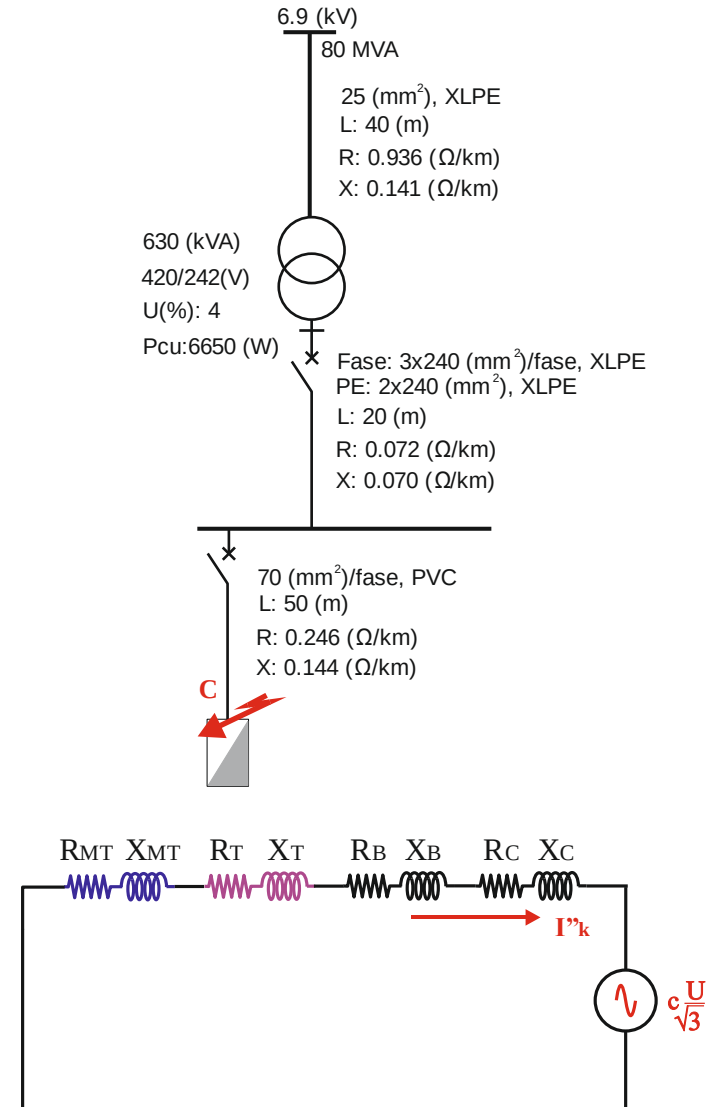
- La corriente de impulso o de pico;

- Relación; $R/X_L = 16.04/20.64 = 0.77$

- $\kappa = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot 0.77} = 1.12$

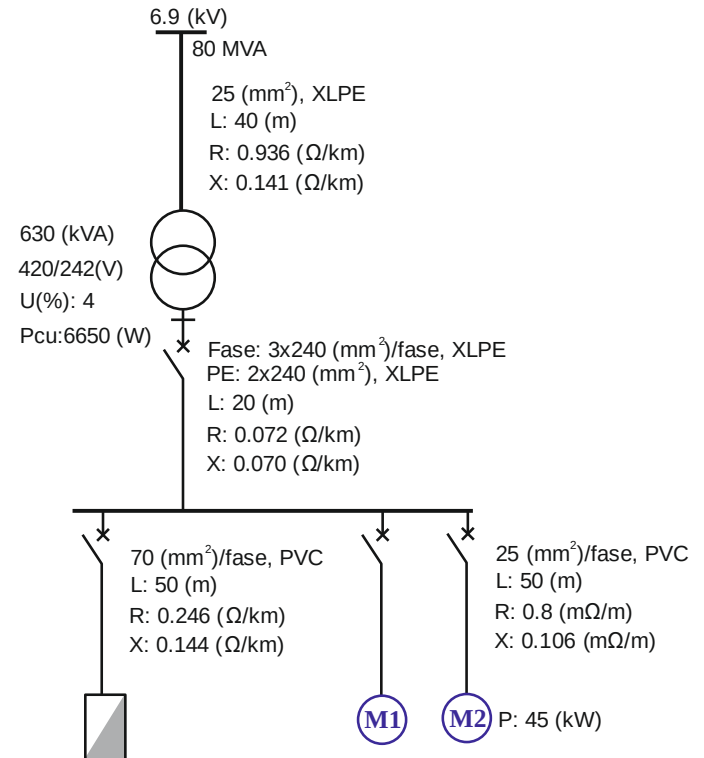


- $I_p = 1.12 \cdot \sqrt{2} \cdot 9.28 = 14.70 \text{ (kA)}$

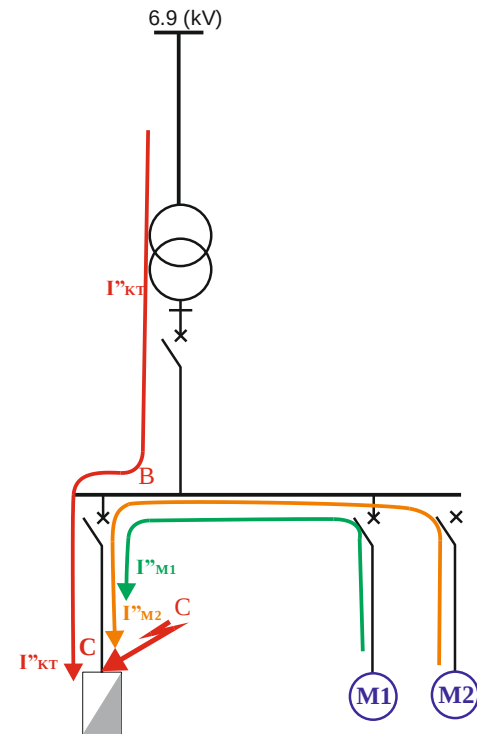


• **APORTE DE LOS MOTORES.**

- Motor de 55 (kW).
- Tensión 400 (V).
- η : 93.6 (%).
- $\cos\varphi$: 0.88
- I_N : 96 (A).
- I_{RB}/I_N : 6.7
- Conductor; 25 (mm²)
- $R_{20^\circ C}$: 0.8 (m Ω /m)
- X (conductor): 0.106 (m Ω /m)
- Longitud (m): 50
- Cortocircuito en el punto "B".
- $$I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 13.95} = 17.38 \text{ (kA)}$$



- Verificar si consideramos el aporte de los motores
- $\sum I_{NM} \leq 0.01 \cdot I''_k \text{ sin motores}$
- $0.01 \cdot 17380 = 173.8 \text{ (A)}$
- $1 \cdot 96 < 173.8 \text{ (A)}$
- $96 \text{ (A)} < 173.8 \text{ (A)}$, no es necesario el aporte del motor.
- Consideremos ahora dos motores;
- $2 \cdot 96 < 173.8 \text{ (A)}$
- $192 \text{ (A)} > 173.8 \text{ (A)}$
- Se debe tomar en cuenta el aporte de los dos motores.



- Impedancia del motor.

$$S_N = \frac{P_N}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N} = \frac{55 \text{ (kW)}}{0.936 \cdot 0.88} = 66.77 \text{ (kVA)}$$

$$Z_M = \frac{1}{6.7} \cdot \frac{420^2}{66.77} = 394.31 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

$$X_M = 0.922 \cdot Z_M$$

$$X_M = 0.922 \cdot 394.31 = 363.55 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

$$R_M / X_M = 0.42$$

$$R_M = 0.42 \cdot X_M$$

$$R_M = 0.42 \cdot 363.55 = 152.69 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

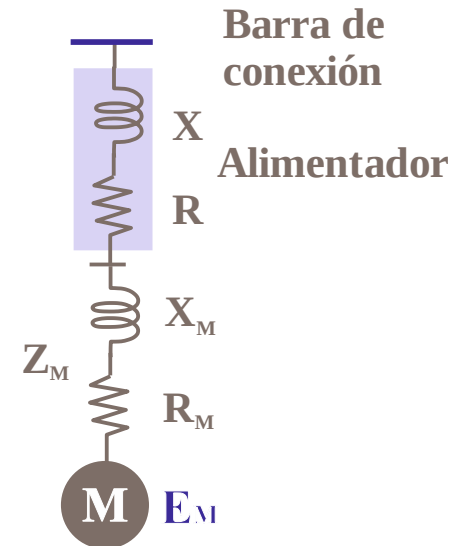
- Impedancia total, motor mas conductores a la barra del punto B.

$$Z_{MC} = 0.8 \cdot 50 + j 0.106 \cdot 50 + 152.69 + j 363.55$$

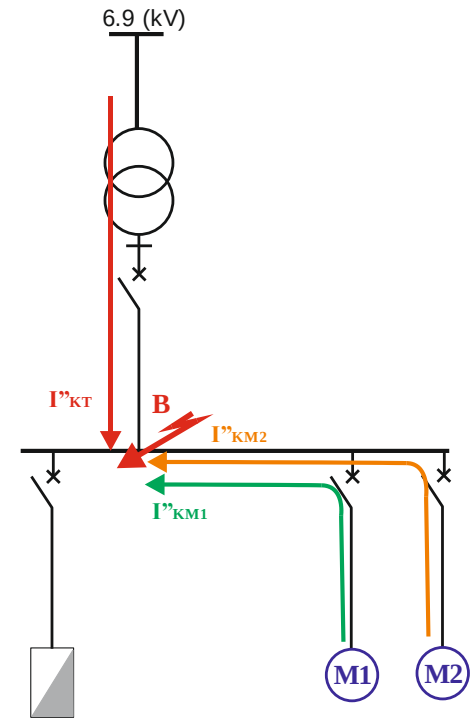
$$Z_{MC} = 40 + 152.69 + j (5.3 + 363.55)$$

$$Z_{MC} = 192.69 + j 368.85$$

$$Z_{MC} = \sqrt{192.69^2 + 368.85^2} = 416.15 \text{ (m}\Omega\text{)}$$

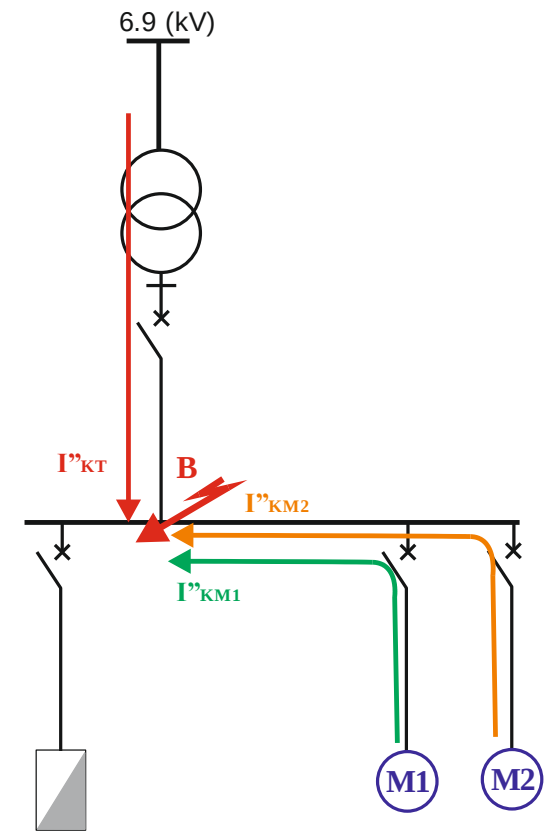


- FALLA PUNTO “B”, método suma aritmética de las corrientes.
- Aporte a la corriente de falla.
- $I''_{KM1} = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{MC}} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 416,15} = 0.5827(kA) = 582,7 (A)$
- De los dos motores: $2 \cdot 582,7 = 1165,4 (A)$
- En total la corriente de falla en el punto B.
- $I''_{KT} = 17.38 + 1,16 = 18.54 (kA)$.
- La corriente de impuso o de pico;
- Relación; $R/X_L = 192,69/368,85 = 0.52$
- $\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot 0.52} = 1.24$
- $I_p = 1.24 \cdot \sqrt{2} \cdot 485.9 = 852.09 (A)$
- Los dos motores.
- $I''_{KM} = 2 \cdot 852,7 = 1705.4(A)$
- En total.
- $I_{pT} = 35,39 + 1,70 = 37,09 (kA)$

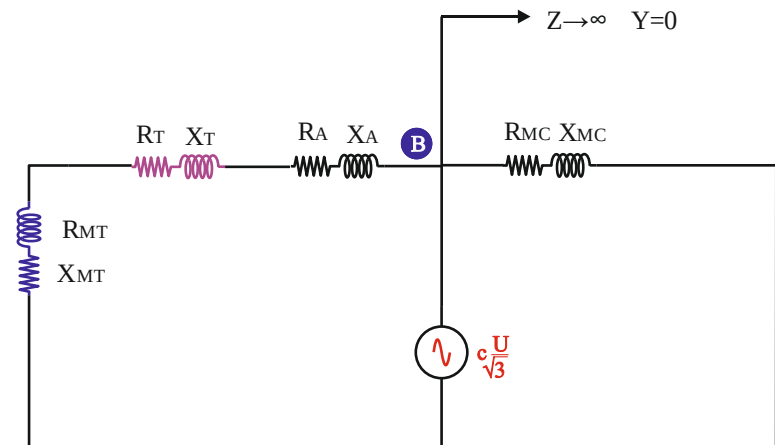
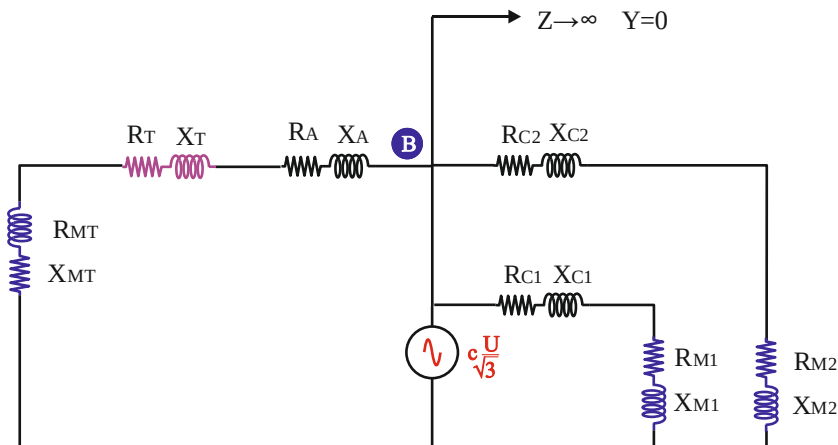
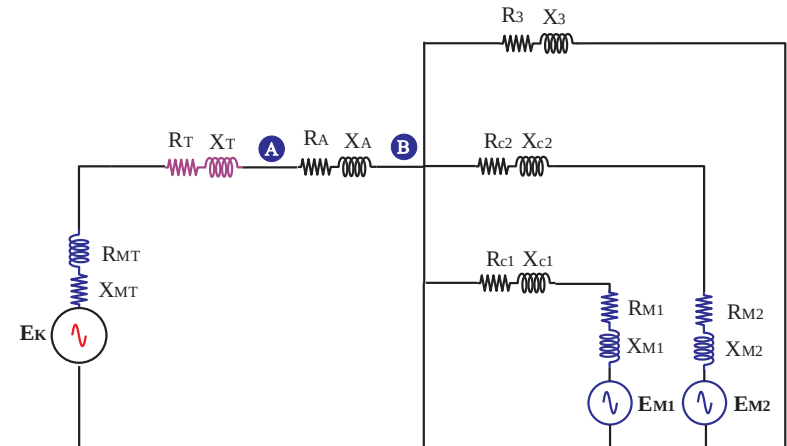


- FALLA PUNTO “B”, método suma considerando el factor de potencia.
- Cortocircuito en el punto “B”.
- $Z_f = 3.74 + j13.44(m\Omega)$
- $Z_f = 13.95 \angle 74.45^\circ$
- $I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 13.95} = 17.38 (kA)$
- $I''_K = 4659.22 + j 16768$
- Motores:
- $Z_{MC} = 192,69 + j 368,85 = 416,15 \angle 62,42^\circ$
- $I''_{KM1y2} = 1165,42(A)$
- $I''_{KM} = 539,57 + j1032,99$
- $I''_{KT} = 4659.22 + 539,57 + j (16768 + 1032,99) = 5198.79 + j17800,99$
- $I''_{KT} = 18,54 (kA).$

- Corriente impulso, considerando el aporte de los motores.
- Cortocircuito en el punto "B".
- $Z_f = 3.74 + j13.44(m\Omega)$
- $Z_f = 13.95 \angle 74.45^\circ$
- $I_p = 1.44 \cdot \sqrt{2} \cdot 17.38 = 35.39 (kA)$
- $I_p = 9,31 + j34,09$
- Para los motores.
- $Z_{MC} = 192,69 + j 368,85 = 416,15 \angle 62,42^\circ$
- $I''_{KM} = 1705.4(A)$
- $I''_{KM} = 789,58 + j1511,61$
- La corriente de impulso total.
- $I''_{KT} = 9,31 + 0,78 + j (34,09 + 1,51)$
- $I''_{KT} = 10,09 + j35,60$
- $I''_{KT} = 37,00 (kA).$



- METODO “Impedancia equivalente”.
- En la barra “B”.
- $Z_f = 3.74 + j13.44 \text{ (m}\Omega\text{)}$
- $Z_f = 13.95 \angle 74.45^\circ \text{ (m}\Omega\text{)}$
- Los dos motores en paralelo
- $Z_{eM} = \frac{1}{2} (192,69 + j 368,85)$
- $Z_{eM} = 96,34 + j184.42$
- $Z_{eM} = 208,07 \angle 62,42^\circ$



- Impedancia equivalente.

- $$Z_T = \frac{Z_f \cdot Z_{eM}}{Z_f + Z_{eM}}$$

- $$Z_T = \frac{(13.95 \angle 74.45^\circ)(208.07 \angle 62.42^\circ)}{3.74 + j13.44 + 96.34 + j184.42}$$

- $$Z_T = \frac{2902.58 \angle 136.87^\circ}{100.08 + j197.86}$$

- $$Z_T = \frac{2902.58 \angle 136.87^\circ}{221.73 \angle 63.17^\circ} = 13.09 \angle 73.7^\circ$$

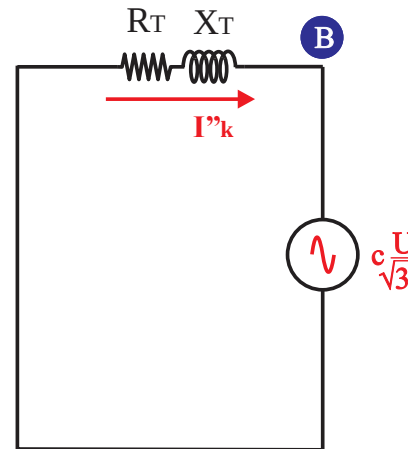
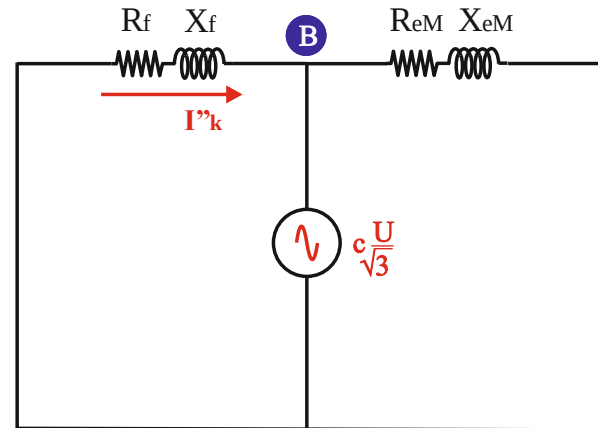
- $$Z_T = 3.67 + j 12.56$$

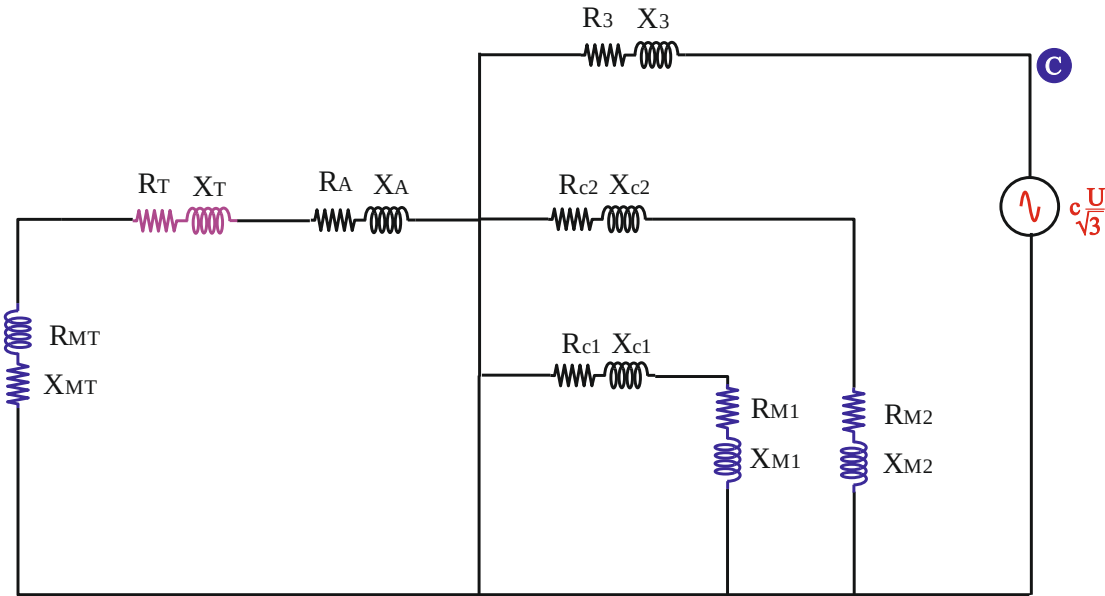
- $$I''_K = \frac{1.05 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_f} = \frac{1.05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 13.09} = 18.52 \text{ (kA)}$$

- Relación; $R/X_L = 3.67/12.56 = 0.29$

- $$\kappa = 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot 0.29} = 1.43$$

- $$I_p = 1.43 \cdot \sqrt{2} \cdot 18.52 = 37.45 \text{ (kA)}$$





- Para calcular la corriente de cortocircuito en el punto C, proceder de la misma manera, determinando el circuito equivalente a partir de la siguiente representación.
- En paralelo impedancia de los motores y sus conductores.
- En paralelo impedancia entre el equivalente de los motores y la impedancia denominada de falla, de la red con el transformador.
- Impedancia equivalente final, del paralelo del punto anterior en serie con la impedancia R_3 y X_3 .

GRACIAS