

COMPONENTES SIMÉTRICAS Y CORTOCIRCUITOS

5.1. Representación de sistemas de potencia.

La representación de un sistema de potencia, en su forma más sencilla, en el cual se han de colocar toda la información de los elementos y estructuras que constituyen el sistema de potencia.

Es posible elaborar dos tipos de diagramas, uno en el cual se realice una representación general del sistema pero informativa (diagrama unifilar), y otra exhaustiva y particular para cada uno de los elementos que conforman el sistema de potencia con sus valores (diagrama de impedancias).

5.1.1. Diagrama unifilar.

En el análisis de un circuito trifásico equilibrado, se puede realizar la simplificación del estudio tomando un circuito monofásico equivalente, conformado por una de las fases y su respectivo neutro de retorno.

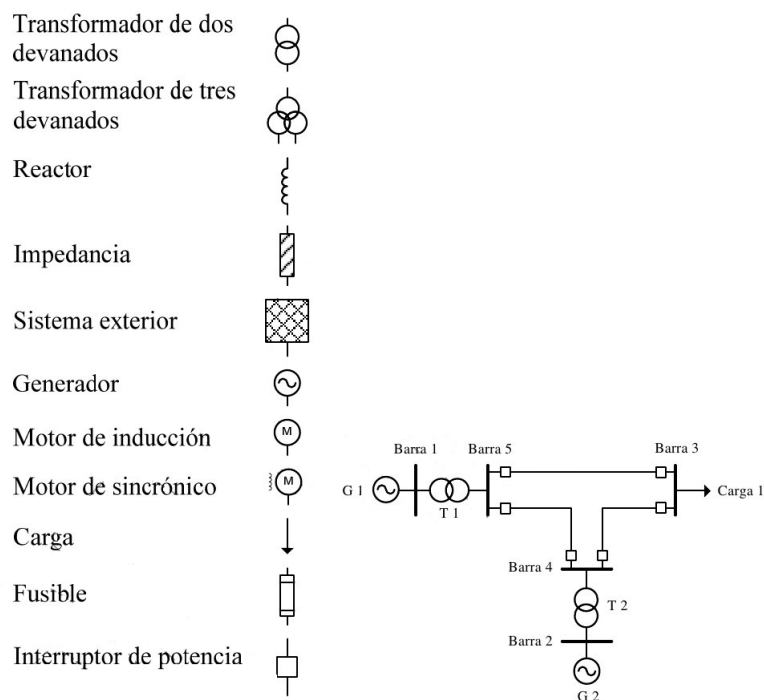


Figura 5.1: Símbolos elementos (CEI)

Cuando el equivalente monofásico por fase se simplifica suprimiendo el camino de cierre de corrientes por el neutro, y se sustituye cada elemento por un símbolo normalizado y estandarizado surge, como resultado el diagrama unifilar.

Un diagrama unifilar es la representación del sistema trifásico que se obtiene al reemplazar los diferentes elementos del sistema en el equivalente por fase por simples símbolos normalizados suprimiendo el camino de retorno.

Los objetivos del diagrama unifilar son:

- Permitir una representación del sistema más simple.
- Mostrar los datos más importantes o características del sistema.

En la figura 5.1 se indican los símbolos utilizados para representar diversos elementos, según la CEI (comisión electrotécnica internacional) y un ejemplo de un diagrama unifilar de un sistema de potencia.

Barra: es una conexión de impedancia nula, donde se conectan diferentes elementos de un sistema como: líneas, transformadores, generadores, carga, etc.

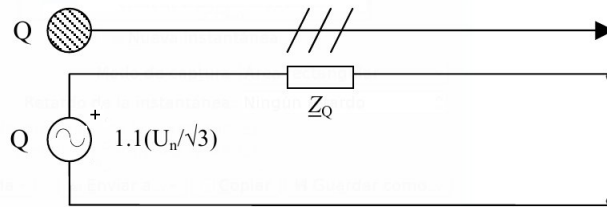
5.1.2. Modelado de los componentes de un sistema eléctrico.

El modelo de un elemento, es una abstracción de una situación real que permite poder simular el comportamiento de un elemento cuantitativamente, sin llegar a un análisis físico real de la situación. Los modelos pueden ir desde los más complejos y detallados a los más sencillos, todo dependen de cuan exacto se requiera la situación real.

Los elementos pasivos en los sistemas de potencia como son las líneas de transmisión, transformadores, condensadores, son considerados lineales y modelados por una o más cantidades eléctricas: resistencias, inductancias, condensadores. Los elementos activos como motores, generadores, condensadores síncronos, y cargas como hornos, elementos ajustables de velocidad, etc, son componentes no lineales, pero bajo algunas restricciones pueden ser considerados lineales. Uno o más parámetros del modelo de un elemento activo varía en función del tiempo, frecuencia, velocidad, etc.

5.1.2.1. Acometidas o redes de alimentación.

El valor de la corriente de cortocircuito para una acometida viene determinado por la potencia de cortocircuito en el punto de conexión (Q) de la red que alimenta a dicha acometida.



La impedancia de cortocircuito resulta ser:

$$\underline{Z}_Q = R_Q + jX_Q \quad Z_Q = 1,1 \frac{U_{nQ}^2}{S_{kQ}} \quad (5.1)$$

donde U_{nQ} es la tensión nominal de la red en el punto de acometida Q; S_{kQ} es la potencia de cortocircuito para la corriente inicial simétrica en el punto de acometida. Si no se conoce la relación entre R_Q y X_Q se puede tomar $R_Q = 0,1X_Q$ $X_Q = 0,995Z_Q$.

5.1.2.2. Cables.

No es posible dar fórmulas con una precisión suficiente la resistencia y reactancia. Los valores deberán ser indicados por el fabricante o mediante medidas.

5.1.2.3. Modelado de transformadores.

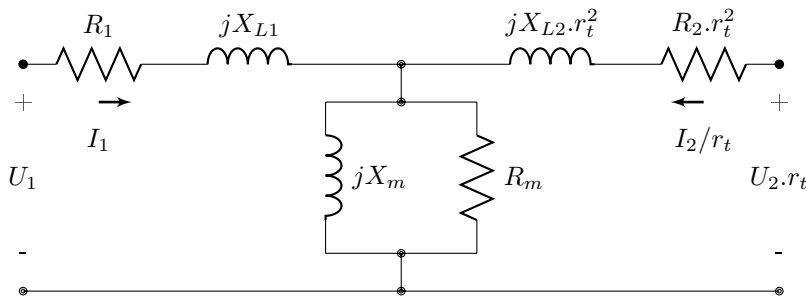
El transformador de potencia, es el elemento del sistema de potencia, que se encarga de modificar los niveles de tensión y corriente, adaptándolos a los requerimientos del sistema.

El transformador más simple consiste en dos arrollamientos, entrelazados sobre un mismo núcleo magnético.

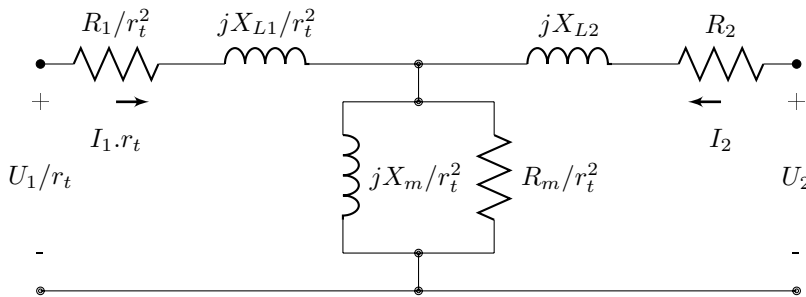
El circuito equivalente real exacto de un transformador de potencia de dos devanados considera los efectos de la resistencia de los arrollamientos, las dispersiones de flujo y las corrientes de excitación. El efecto del circuito primario es simulado atribuyendo a dicho arrollamiento una reactancia de dispersión, y una resistencia en serie para simular la caída de tensión en el arrollamiento. La corriente de excitación se toma en cuenta por la colocación de una resistencia en paralelo con una inductancia. El circuito secundario es simulado al igual que el primario, por una resistencia y una reactancia en serie.

Este modelo expuesto, corresponde al circuito equivalente de un transformador de dos devanados, en el cual no se utiliza el artificio del transformador idela. No hay modificación del nivel de tensión correspondiente a la transformación de tensión de los lados de alta y baja. Si se desprecia la corriente magnetizante, las corrientes en ambos extremos son iguales. Esto se logra refiriendo apropiadamente mediante la aplicación de la relación de transformación todos los parámetros eléctricos a un mismo lado del transformador.

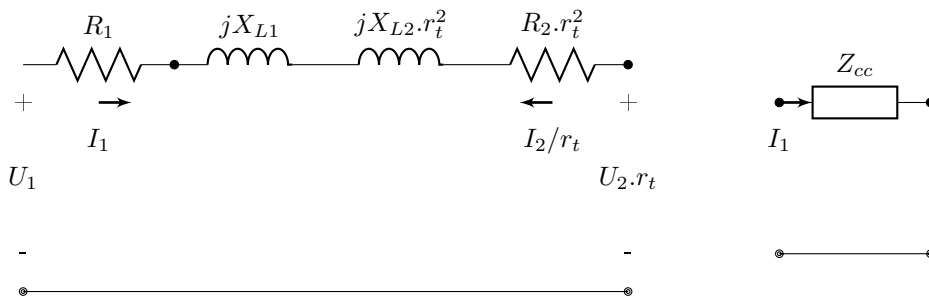
Si el arrollamiento primario tiene N_1 espiras y el secundario N_2 espiras, el circuito equivalente con los parámetros referidos al primario será el siguiente, siendo $r_t = N_1/N_2$:



El circuito equivalente con los parámetros referidos al secundario será el siguiente:



Si despreciamos la corriente magnetizante, el circuito se simplifica quedando:



Si utilizamos los parámetros referidos al primario, tendremos una impedancia en serie. Esta impedancia se denomina impedancia de cortocircuito y se calcula mediante el ensayo de cortocircuito, en el cual se coloca el secundario en cortocircuito y la corriente que circula es la corriente nominal. La tensión primaria de alimentación será la tensión de cortocircuito que se representa en % respecto a la tensión nominal.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad U_{cc} = \frac{\varepsilon_{cc}}{100} U \quad Z_{cc} = \frac{\frac{U_{cc}}{\sqrt{3}}}{I_n} = \frac{\varepsilon_{cc}}{100} \frac{U^2}{S} \quad (5.2)$$

siendo S la potencia nominal del transformador; U la tensión (de línea) nominal del transformador en el primario; I_n la corriente nominal del primario; ε_{cc} la tensión de cortocircuito (en %) .

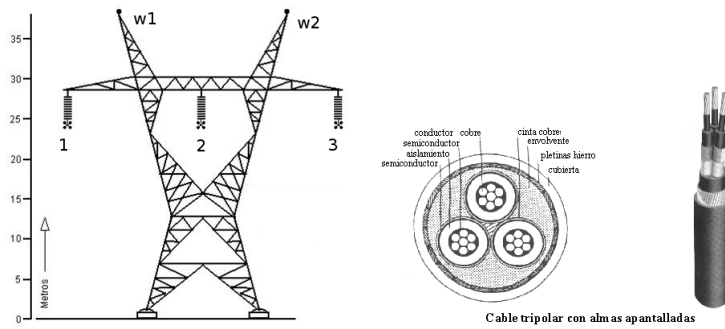
Si la impedancia de cortocircuito se toma referida al secundario, las fórmulas son semejantes, pero con la tensión U la nominal del secundario. Se observa que

$$Z_{cc \text{ referida primario}} = Z_{cc \text{ referida secundario}} \cdot r_t^2 \quad (5.3)$$

En muchas ocasiones, las impedancias de los transformadores se expresan en forma de valores relativos (z_T en Ohmios), referidos a la tensión (kV) y potencia del transformador (MVA) y corresponden a las impedancias por fase en estrella. La impedancia expresada en Ohmios, referida al primario o secundario sería:

$$Z_{cc \text{ referida primario}} = z_T \frac{U^2}{S} \quad Z_{cc \text{ referida secundario}} = Z_{cc \text{ referida primario}} / r_t^2 \quad (5.4)$$

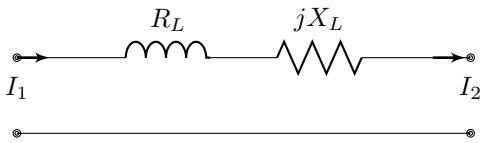
5.1.2.4. Modelado de líneas de transmisión.



Los elementos de mayor extensión dentro de los sistemas de potencia son las líneas de transmisión.

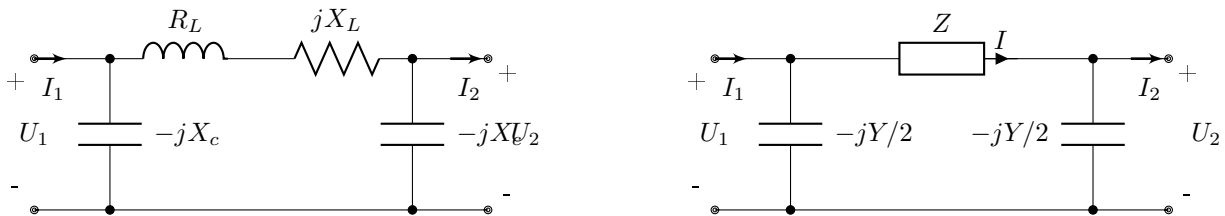
Las líneas de transmisión normalmente funcionan con cargas trifásicas equilibradas, aunque no estén dispuestos sus conductores equilateralmente e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña y se pueden considerar como elementos trifásicos equilibrados.

Las líneas se clasifican según su longitud. Las líneas cortas son por lo general de longitud menor de 80 km, y su modelo consiste en una resistencia e inductancia en serie, debido a que la susceptancia capacitiva total es pequeña



En el caso de líneas cortas la corriente de entrada I_1 y la de salida I_2 son iguales.

Cuando la longitud de las líneas está entre 80 y 230 km, se trata de líneas medias y la influencia de la capacidad se hace presente. Se utiliza el modelo en Π dividiendo la capacidad total en dos partes iguales.

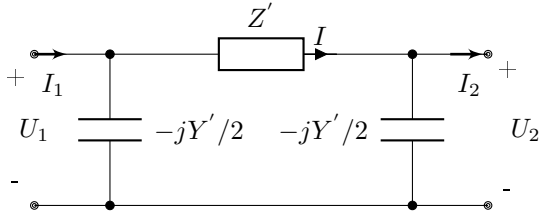


Las fórmulas que relacionan las corrientes y tensiones de entrada y salida son:

$$\underline{I} = \underline{I}_2 - j \frac{Y}{2} \underline{U}_2 \quad \underline{U}_1 = \underline{U}_2 + Z \underline{I} \quad \underline{I}_2 = \underline{I} - j \frac{Y}{2} \underline{U}_2 \quad (5.5)$$

$$\underline{U}_1 = (1 - jZ \frac{Y}{2}) \underline{U}_2 + Z \underline{I}_2 \quad \underline{I}_1 = -jY(1 - j \frac{ZY}{4}) \underline{U}_2 + (1 - j \frac{ZY}{2}) \underline{I}_2 \quad (5.6)$$

Las líneas de longitud superior a 320 km, o líneas largas, debe ser más preciso el cálculo del modelo equivalente debido a que los fenómenos asociados con estas son muy complejos, por lo que se consideran todos los parámetros de manera distribuida. Resulta un circuito como el siguiente:



Donde

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) \quad Y' = Y \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (5.7)$$

siendo γ y Z_c la constante de propagación y la impedancia característica de la línea.

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad Z_c = \sqrt{\frac{(r + j\omega L)}{(g + j\omega C)}} \quad (5.8)$$

5.1.2.5. Modelado de generadores síncronos.

Las máquinas síncronas son empleadas como generadores de potencia activa y reactiva, aunque en ocasiones se utilizan exclusivamente para la generación de potencia reactiva (condensador síncrono).

Existen en función de la geometría de su rotor, dos tipos de generadores: rotor liso o cilíndrico y rotor de polos salientes (figura 5.2)

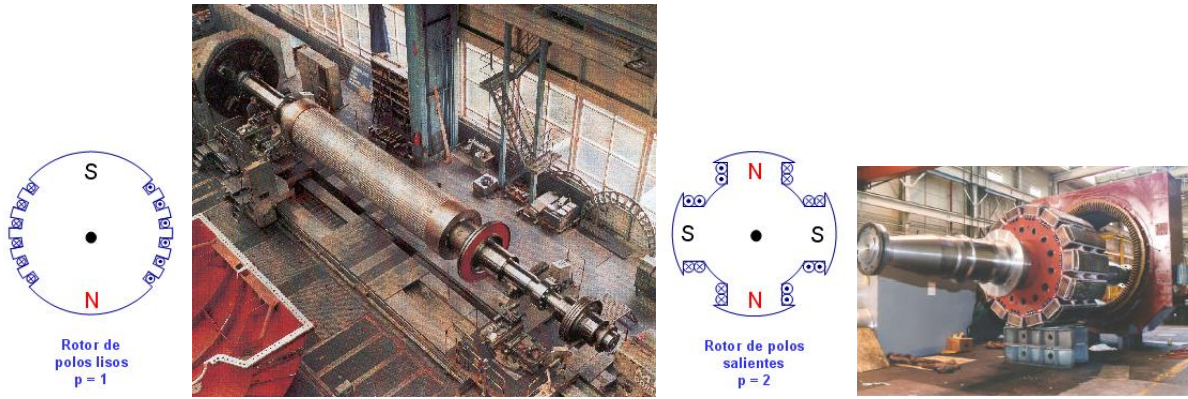


Figura 5.2: Rotor síncronos

Un punto importante, es establecer el circuito equivalente para el generador síncrono, para poder simular el comportamiento que el generador presentará ante cualquier situación en el sistema de potencia.

Vamos a comenzar en condiciones tal que no exista saturación y en régimen estacionario. El generador está constituido por un devanado trifásico en el estator y por otro devanado monofásico en el rotor. Cuando el devanado rotórico es energizado con una corriente continua, se produce un campo magnético y el flujo de excitación Φ_{ex} (rotativo con respecto al estator, debido a que el rotor está girando a una velocidad constante (3000, 1500, 750,... rpm). En los devanados trifásicos, se induce en cada fase una f.e.m. (fuerza electromotriz) que está retrasada 90° respecto al flujo de excitación Φ_{ex} . La f.e.m. inducida vale:

$$E_o = k\Phi_{ext}\omega \quad (5.9)$$

Para una velocidad ω constante, la f.e.m. es función de la corriente de excitación: $E_o = f(I_{ex})$

Si en los terminales del devanado trifásico del estator, se conecta una carga trifásica equilibrada, comenzará la circulación de una corriente en cada fase. Se dice que la máquina trabaja en carga. En este caso la tensión en los terminales de la máquina difiere de la f.e.m. inducida debido a conjunción de varios fenómenos a considerar.

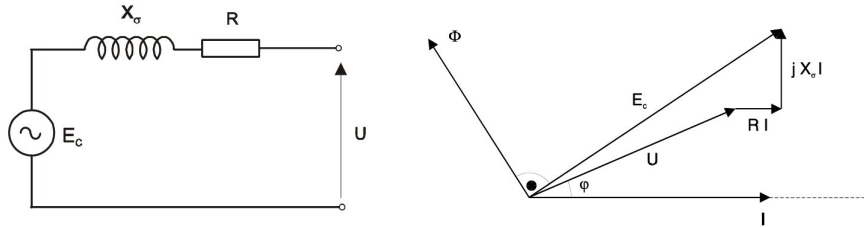
Al circular corriente por los devanados trifásicos, aparece el efecto de reacción de inducido. Además del flujo de excitación, la circulación de corriente por el circuito inducido, origina la presencia de un flujo de reacción (Φ_r) cuya posición espacial depende de la carga acoplada a los terminales del generador, resultando un flujo total

$$\Phi_t = \Phi_{ex} + \Phi_r \quad (5.10)$$

La tensión de salida $\underline{U}$ no coincidirá con la f.e.m. generada debiendo considerarse la tensión óhmica e inductiva del devanado inducido, debido a la presencia de resistencia de los devanados del inducido y del flujo de dispersión del inducido.

Si se llama a $\underline{E}_c$ a la f.e.m. generada en carga y que es función de Φ_t , tendremos:

$$\underline{E}_c = \underline{U} + \underline{RI} + jX_\sigma \underline{I} \quad (5.11)$$



Considerando aisladamente cada flujo tendremos asociada una f.e.m.: $\Phi_t \Rightarrow E_c$ $\Phi_o \Rightarrow E_o$ $\Phi_r \Rightarrow E_r$

La f.e.m. resultante $\underline{E}_c$ inducida por el flujo resultante será:

$$\underline{E}_c = \underline{E}_o + \underline{E}_r = \underline{E}_o - jX_r \underline{I} \quad (5.12)$$

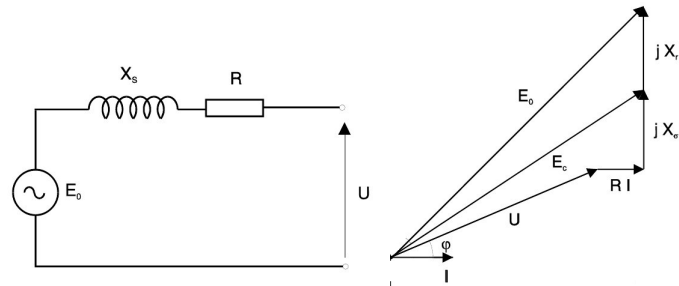
siendo X_r la reactancia debida a la reacción de inducido.

Sustituyendo, tendremos

$$\underline{E}_o = \underline{E}_c - \underline{E}_r = \underline{U} + \underline{RI} + jX_\sigma \underline{I} + jX_r \underline{I} \quad (5.13)$$

$$\underline{E}_o = \underline{U} + \underline{RI} + jX_s \underline{I} \quad (5.14)$$

La reactancia síncrona X_s es la suma de la reactancia de dispersión y de la reacción de inducido.



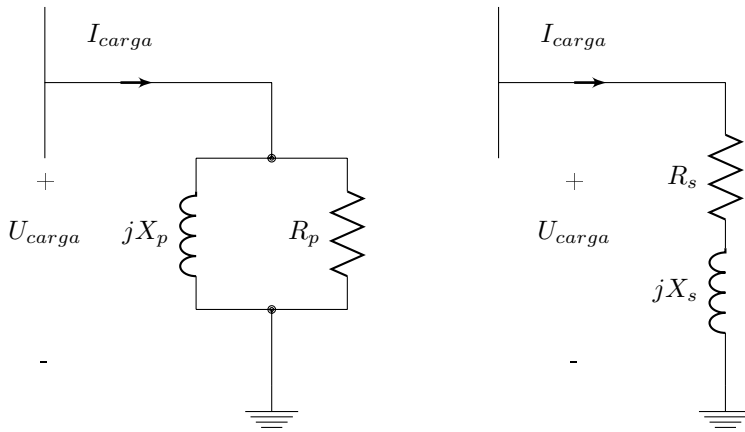
El desfase entre $\underline{U}$, $\underline{I}$ determina el factor de potencia del generador. En cambio el desfase entre $\underline{E}_o$, $\underline{U}$ el denominado ángulo de potencia, que sirve para calcular la potencia activa y reactiva suministrada por el generador.

5.1.2.6. Modelado de las cargas.

Las cargas son elementos empleados en la representación de los sistemas de potencia y consumen por lo general potencia activa y reactiva. La representación exacta es un problema complejo. Primeramente las cargas han de ser clasificadas en dos grupos: cargas estáticas y cargas dinámicas (en referencia a su comportamiento ante un cortocircuito).

Las cargas estáticas son aquellas que tienen un comportamiento tal que ante un cortocircuito no pueden entregar corriente. Son elementos que consumen potencia activa y reactiva. Se asumen constantes. Este tipo de cargas es simulada por elementos pasivos que consumen potencia constante.

El modelo de cargas estáticas puede ser un modelo serie o paralelo. En general constan de una resistencia que absorbe la potencia activa y una reactancia inductiva que consume potencia reactiva o, reactiva capacitiva que cede potencia reactiva.



Las cargas dinámicas son aquellas que ante eventos de fallos, pueden contribuir con corriente al cortocircuito. En este tipo de carga recaen las máquinas giratorias de tipo síncrono y de inducción, pero sin incluir dispositivos de estado sólido.

5.1.3. Diagramas de impedancias.

Si se considera el diagrama unifilar y se procede a sustituir cada uno de los elementos por su modelo equivalente, se crea un nuevo esquema denominado diagrama de impedancias. Este diagrama de impedancias, permite el cálculo de las variables eléctricas a partir del planteamiento de las ecuaciones del circuito (lazos o nudos).

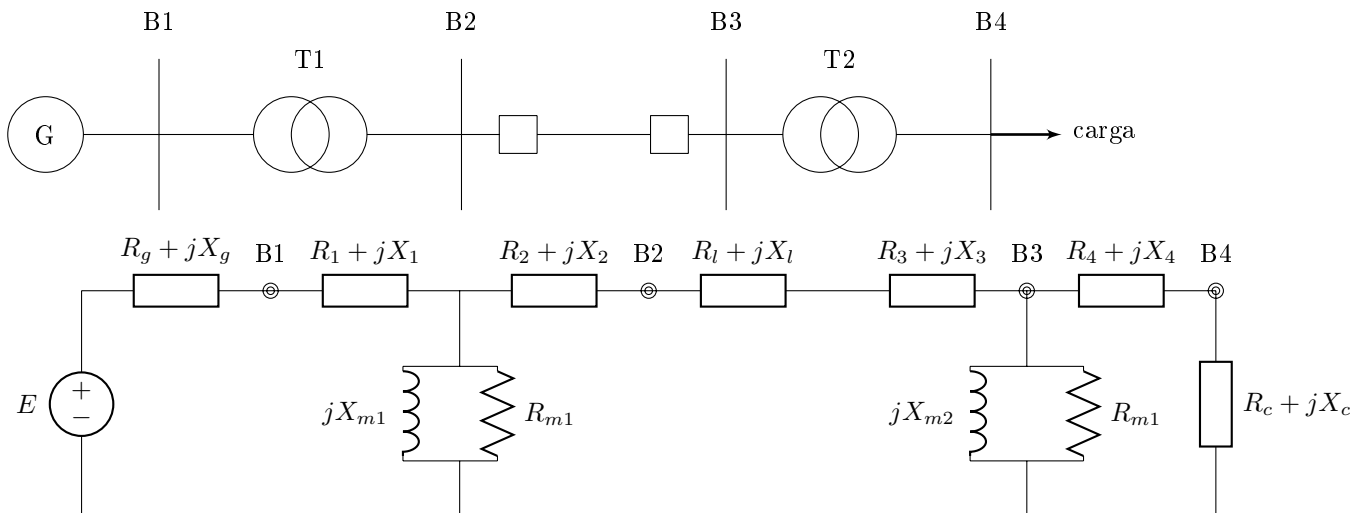
La construcción del diagrama de impedancias debe ser cuidadosa. Se tiene que tener en cuenta los distintos niveles de tensión, de forma que la impedancia del secundario de los transformadores deben referirse al primario multiplicando por la relación de transformación al cuadrado (se tiene referir también las impedancias del primario al secundario).

En el caso de varios niveles de tensión, se debe además considerar el grupo de conexión de sus arrollamientos.

Puede haber simplificaciones de forma que las resistencias se desprecian (debido a tener valores muy pequeños en comparación con las reactancias) y el diagrama de impedancias se convierte en un diagrama de reactancias.

Los diagrama de impedancias se denominan diagramas de secuencia directa, puesto que representan las impedancias para las corrientes equilibradas de un sistema trifásico simétrico.

Si se considera un diagrama unifilar con un generador, dos transformadores, una línea de transmisión y una carga:



5.1.4. Sistemas por unidad (p.u.).

Los sistemas eléctricos, debido a los valores significativos de energía que manejan, obligan al uso de cantidades que poseen valores cuantitativos elevados de potencia (MW, MVA, kA, MA,...) que deben ser manejados a través de los cálculos. Con objeto de reducir el tamaño de estas cifras se creó el sistema por unidad.

El valor por unidad de una magnitud se define como la relación de su valor real y un valor denominado base:

$$Variable_{pu} = \frac{Valor\ real\ variable}{Valor\ base\ variable} \quad (5.15)$$

Cuando se toma una base, normalmente se toman como valores base, los valores nominales de los generadores y de los transformadores. Si los valores nominales de los generadores y de los transformadores son diferentes, se toma como base los valores nominales de tensión y potencia aparente más repetidos.

Ventajas de los sistemas por unidad:

1. Las impedancias de los generadores y transformadores varían en un estrecho margen sin que dependan del tamaño de los mismos.
2. Se evita tener que referir las cantidades de un lado a otro de los transformadores.
3. Se evita el reconocer el tipo de conexión de los transformadores.
4. Se reduce el empleo del $\sqrt{3}$ en los cálculos.

Los valores por unidad de las variables básicas son:

$$U_{pu} = \frac{U}{U_{base}} \quad I_{pu} = \frac{I}{I_{base}} \quad Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{base}} \quad S_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \quad (5.16)$$

La tensión base U_{base} es siempre de línea y es expresada en kV. La potencia base S_{base} es siempre la potencia trifásica total y es expresada en MVA.

La potencia aparente y las variable bases deben satisfacer:

$$S = \sqrt{3}UI \quad S_{base} = \sqrt{3}U_{base}I_{base} \quad (5.17)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}(MVA)}{\sqrt{3}U_{base}(kV)} (kA) \quad (5.18)$$

La corriente base I_{base} viene expresada en kA.

Expresando en p.u. la potencia, tendremos:

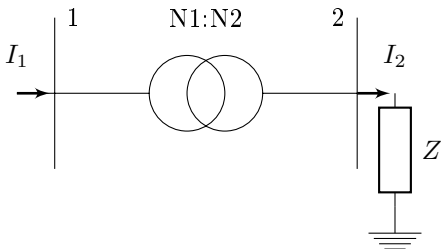
$$S_{pu} \cdot S_{base} = \sqrt{3}U_{pu}U_{base}I_{pu}I_{base} \quad S_{pu} = U_{pu}I_{pu} \quad (5.19)$$

La impedancia base Z_{base} , viene expresada en Ohmios y tiene por expresión

$$Z_{base}(\Omega) = \frac{U_{base}(kV)/\sqrt{3}}{I_{base}(kA)} = \frac{U_{base}^2(kV^2)}{S_{base}(MVA)} \quad (5.20)$$

5.1.4.1. Transformadores en el sistema por unidad.

Suponiendo un transformador ideal con dos arrollamientos de N_1 espiras el primario y N_2 espiras el secundario.



Como se considera ideal no posee reactancia interna. El cociente entre las tensiones primaria y secundaria es

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.21)$$

Si se definen las tensiones bases de forma que

$$\frac{U_{base1}}{U_{base2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5.22)$$

resulta

$$U_{1pu} = \frac{U_1}{U_{base1}} \quad U_{2pu} = \frac{U_2}{U_{base2}} \Rightarrow U_{1pu} = U_{2pu} \quad (5.23)$$

Cuando se expresan las tensiones de un transformador en el sistema por unidad se elimina la relación de transformación.

Si analizamos las corrientes, tendremos:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \frac{I_{base1}}{I_{base2}} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow I_{1pu} = I_{2pu} \quad (5.24)$$

Las corrientes reales resultan:

$$I_1 = I_{1pu} I_{base1} \quad I_2 = I_{2pu} I_{base2} \quad (5.25)$$

La impedancia colocada en el secundario cumple

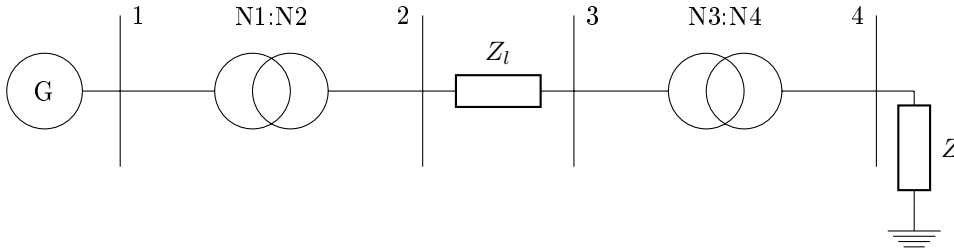
$$U_2 = Z I_2 \quad U_{2pu} = Z_{pu} I_{2pu} \quad (5.26)$$

Si se refiere al primario debe cumplir

$$U_1 = Z_1 I_1 \quad U_{1pu} = Z_{1pu} I_{1pu} \quad (5.27)$$

de forma que la impedancia por unidad referida al secundario como al primario son iguales, no importa de que lado del transformador se expresen.

Si se tienen varios niveles de tensión distintos debido a la presencia de varios transformadores, se hace lo siguiente:



Se conocen los datos nominales del generador, transformadores, línea y carga (tensiones nominales, potencia nominal, impedancias por unidad):

Generador: Potencia nominal S_{gn} ; Tensión nominal U_{gn} ; Impedancia por unidad X_{gpu}

Transformador 1: Potencia nominal S_{T1n} ; Tensiones nominales U_{1n} , U_{2n} ; Impedancia por unidad X_{T1pu}

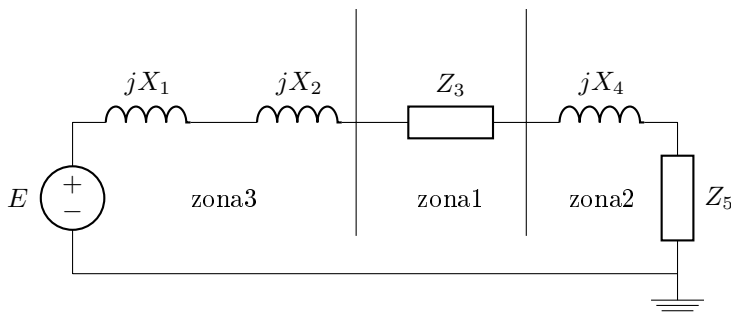
Transformador 2: Potencia nominal S_{T2n} ; Tensiones nominales U_{3n} , U_{4n} ; Impedancia por unidad X_{T2pu}

Las impedancias por unidad están siempre referidas a la tensión nominal y potencia nominal de cada elemento.

Línea: Impedancia real Z_l

Carga: Impedancia real Z

Vamos a representar el circuito de impedancias (desprecian las resistencias en los transformadores y generador) en valores por unidad.



Se debe elegir una potencia base S_{base} . Esta potencia puede ser igual a la potencia nominal de alguno de los elementos del circuito.

Como existen varios niveles de tensión, debido a la presencia de dos transformadores, se tendrán 3 zonas distintas, en las cuales tendremos tres tensiones bases distintas.

Elegimos una tensión base, por ejemplo, la tensión nominal en la zona donde está situada la línea de transporte U_{1base} .

Las otras zonas tendrán una tensión base, que debe ser calculada a partir de las relaciones de transformación de los transformadores correspondientes:

$$U_{2base} = \frac{U_{1base}}{\frac{U_{3n}}{U_{4n}}} \quad U_{3base} = U_{1base} \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right) \quad (5.28)$$

A partir de esta tensión base, podremos calcular la impedancia base en esta zona y expresar el valor de las impedancias en p.u.

La línea está en la zona 1, tendremos:

$$Z_{1base} = \frac{U_{1base}^2}{S_{base}} \quad Z_{lpu} = \frac{Z_l}{Z_{1base}} = Z_3 \quad (5.29)$$

La carga está en la zona2 y el valor p.u. de la impedancia de la carga es :

$$Z_{2base} = \frac{U_{2base}^2}{S_{base}} \quad Z_{cpu} = \frac{Z_c}{Z_{2base}} = Z_5 \quad (5.30)$$

El transformador T2, lo hemos situado en zona 2 (también podíamos haberlo situado en zona1), y tiene una reactancia por unidad como dato de valor X_{T2pu} . Este valor de impedancia debe ser modificado, si la tensión base no coincide con la tensión nominal del transformador y la potencia base no coincide con la potencia nominal del transformador

$$X_{T2punueva} = X_{T2pu} \cdot \left(\frac{U_{4n}^2}{S_{T2n}} \right) / (U_{2base}^2 / S_{base}) = X_4 \quad (5.31)$$

Con el transformador T1 pasa igual que con el transformador T2. Se supone que está en zona 1 y, tiene una reactancia por unidad como dato de valor X_{T1pu} . Este valor de impedancia debe ser modificado, si la tensión base no coincide con la tensión nominal del transformador y la potencia base no coincide con la potencia nominal del transformador

$$X_{T1punueva} = X_{T1pu} \cdot \left(\frac{U_{2n}^2}{S_{T1n}} \right) / (U_{1base}^2 / S_{base}) = X_2 \quad (5.32)$$

El generador está situado en la zona 3 y, la reactancia del generador en p.u. X_{gpu} tiene que ser transformada en un nuevo valor con la nueva tensión base y potencia base, si éstas no coinciden con las nominales del generador

$$X_{gpunueva} = X_{gpu} \cdot \left(\frac{U_{1n}^2}{S_{gn}} \right) / (U_{3base}^2 / S_{base}) = X_1 \quad (5.33)$$

La tensión por unidad del generador será

$$E_{pu} = \frac{U_{gn}}{U_{3base}} \quad (5.34)$$

5.2. Fallos y anomalías en sistemas de potencia.

La planificación, diseño y operación de los sistemas de potencia requiere de una serie de estudios para evitar sorpresas en su funcionamiento y seleccionar óptimamente los equipos. Debido a la complejidad de los sistemas de potencia, los estudios no se realizan mediante métodos manuales, sino que se hacen mediante herramientas digitales basadas en programas de ordenador.

Los estudios más comúnmente realizados son:

- Estudios de flujo de potencia.
- Estudios de cortocircuitos.
- Estudios de estabilidad.
- Estudios de arranque de motores.
- Estudios de armónicos.

Los estudios de flujo de potencia permite determinar las tensiones, corrientes, potencias activa y reactiva y los factores de potencia de cada elemento en un sistema de potencia. Se utilizan para la planificación del sistema. Se analizan problemas de contingencias, como por ejemplo, la pérdida de un generador, una línea o carga. Permiten determinar cuando existen sobrecargas o niveles bajos de tensión.

Los estudios de cortocircuito son realizados para determinar la magnitud de las corrientes que fluyen a través del sistema de potencia a varios intervalos de tiempo desde que el fallo ocurre. Las corrientes de cortocircuito sufren un proceso transitorio hasta llegar a la condición de régimen permanente. Durante el proceso transitorio, los sistemas de protección deben intervenir y desconecta el fallo y dejar en "isla" la zona afectada. Estos estudios permiten determinar también los esfuerzos térmicos y mecánicos a que están sometidos los equipos durante el cortocircuito.

Cuando en un sistema de potencia contiene dos o más máquinas síncronas, si ocurre un cambio en el sistema (pérdida de carga,...) la habilidad del sistema de potencia de continuar operando es una medida de su estabilidad. El problema de la estabilidad toma dos formas: la estabilidad de régimen permanente y la estabilidad transitoria. La estabilidad en régimen permanente puede ser definida como la habilidad del sistema de mantener el sincronismo entre las máquinas dentro del sistema después de un cambio de condiciones. La estabilidad transitoria es la habilidad del sistema para mantener el sincronismo bajo condiciones transitorias, como fallos, maniobras,...

En un sistema de potencia se pueden dar una serie de circunstancias para producirse una operación fuera de las condiciones normales de funcionamiento:

- Fallo de los componentes del sistema.
- Situaciones de carácter imprevisto (tormentas,...).
- Errores de operación.

5.2.1. Anormalidades dentro de un sistema de potencia.

Una clasificación que afecta al sistema de potencia puede ser:

- Perturbaciones.
- Fallos.

5.2.1.1. Perturbaciones.

Las perturbaciones son condiciones que permitan la operación de un sistema pero que pueden ocasionar el daño de ciertos equipos si su duración es prolongada. Las perturbaciones pueden ser causadas por:

- Sobretensiones (temporales, frente lento, atmosféricas o frente rápido).
- Sobrecarga (breves o duraderas).
- Oscilaciones de potencia

Las sobretensiones son cualquier valor, cuyo valor de pico, es mayor que la tensión máxima del sistema en condiciones de operación. La tensión en el sistema eléctrico es variable, dependiendo de las condiciones del sistema. Estas variaciones están limitadas por las características de los equipos, tensión nominal y tensión máxima.

- Tensión nominal de un sistema: es el valor de la tensión con la cual el sistema es denominado, y al cual se refieren sus características, de acuerdo con lo que indican las normas sobre tensiones nominales. En los sistemas trifásicos se considera como tensión nominal la compuesta o de línea.

- Tensión más elevada de una red trifásica: es el valor más elevado de la tensión entre fases que pueda presentarse en un instante y en un punto cualquiera de la red en condiciones normales de explotación. No se tienen en cuenta las variaciones transitorias (por ejemplo, maniobras en la red) ni las variaciones temporales de tensión debidas a condiciones anormales de la red (por ejemplo averías o desconexiones bruscas de cargas importantes).
- Tensión nominal para el material: es la tensión más elevada para el material asignada por el fabricante.
- Tensión más elevada para el material U_m : el el valor más elevado de la tensión entre fases para el que el material esta especificado en lo que respeta a su aislamiento, así como a otras características relacionadas con esta tensión en la normas propuestas para cada material.

Cuando un equipo esta sobrecargado ocurre si la corriente es mayor que el valor de la corriente nominal. Estas sobrecargas pueden ser breves o duraderas. Las sobrecargas vienen en general acompañadas de efectos térmicos. Las causas más comunes de sobrecargas son:

- Cortocircuitos no aislados.
- Excesos de carga.

Las oscilaciones de potencia son causadas normalmente por la conexión y desconexión de circuitos en el sistema eléctrico, cuando se producen variaciones de potencia. Esto es debido a que los generadores no toman instantáneamente el ángulo de la impedancia de la carga, sino después de varias oscilaciones amortiguadas, pudiéndose inclusive perder el sincronismo. Esto se traduce en una sobrecarga ya que las corrientes generadas son de diferente frecuencia a la frecuencia industrial.

Las oscilaciones de potencia son especialmente graves para los generadores y turbinas, existen unos ciertos equipos específicos que tratan de controlar las oscilaciones de potencia, que son los reguladores de velocidad.

5.2.2. Fallos eléctricos.

Un fallo es una condición que impide la operación de uno o más equipos de un sistema y se debe intervenir rápidamente para evitar el daño de los equipos. Una definición de fallos eléctricos es:

1. Produzca la apertura de un interruptor.
2. Error de operación de un interruptor o seccionador.
3. Cualquier interrupción del servicio no planificado.

Un fallo eléctrico implica o un fallo de aislamiento que se traduce en un cortocircuito o, un fallo de continuidad eléctrica que implica un circuito abierto.

Los tipos de fallos en un sistema de potencia son:

- Cortocircuitos.
- Circuitos abiertos.
- Fallos simultáneos.
- Fallos en arrollamientos.
- Fallos en evolución.

5.2.2.1. Cortocircuitos.

El cortocircuito se define como el fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí, caracterizándose por la circulación de elevadas magnitudes de corriente hasta el punto de fallo.

El cortocircuito también se puede definir como el fenómeno transitorio que tiene lugar cuando elementos de un sistema de potencia que poseen una diferencia de potencial entran en contacto entre sí, provocando un circulación de corriente que puede ser varias veces la nominal.

Los cortocircuitos pueden clasificarse según como se efectúa el contacto entre los conductores energizados o con tierra:

- Cortocircuito por contacto directo: surge por el contacto directo entre los conductores de fases distintas o de fases con tierra.
- Cortocircuito por ruptura de aislamiento: se produce como consecuencia de un arco eléctrico que atraviesa el medio aislante. Un arco eléctrico es generado en cualquier medio, cuando el gradiente de potencial supera la rigidez dieléctrica del medio, provocando la creación de un camino de baja resistencia por donde fluye la corriente por el medio.

Los cortocircuitos pueden ser una multitud de fenómenos, entre los cuales se encuentran:

- Origen eléctrico: cuando es consecuencia de la modificación de los parámetros de un sistema, ya sea por causa interna o externa. Dentro de estas causas están las descargas atmosféricas, sobretensiones de maniobra, contaminación de aisladores o envejecimiento del aislamiento,...
- Origen mecánico: es común la rotura de cadena de aisladores, la caída de un cuerpo extraño como una rama de un árbol sobre una línea, golpes sobre los conductores, destrucción de una torre, ...
- Origen fortuito: se deben a falsas maniobras, apertura de un seccionador bajo carga, ...

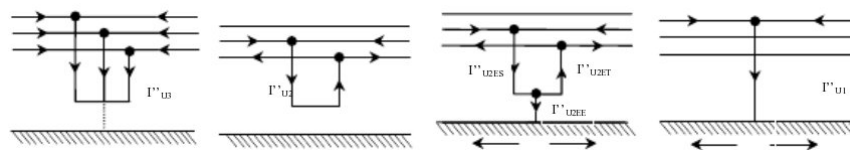


Figura 5.3: Tipos de cortocircuitos

Los tipos de cortocircuitos se pueden diferenciar como:

- Cortocircuito trifásico: se origina cuando los tres conductores entran en contacto entre sí. Son los únicos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases están afectadas por igual. Es uno de los más violentos y de obligado cumplimiento su cálculo. Al ser un sistema equilibrado, para su cálculo sólo será necesaria utilizar la red de secuencia directa.
- Cortocircuito bifásico: tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre sí. Las corrientes son menores que las del fallo trifásico, aunque si se produce en las cercanías de un generador o motor de cierta potencia, las corrientes pueden llegar a presentar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico. Este cortocircuito no es equilibrado, obligando su cálculo a la utilización de las redes de secuencia directa e inversa.
- Cortocircuito bifásico a tierra: tiene lugar cuando los conductores de dos fases distintas hacen contacto entre sí y tierra. Es necesario para su cálculo utilizar además de las redes de secuencia directa e inversa, la homopolar.
- Cortocircuito línea a tierra: es el más común, provocado cuando un conductor de fase energizado toca tierra.
- Cortocircuito trifásico a tierra: es muy remoto, y consiste que los tres conductores de fase realicen un contacto a tierra.

Los cortocircuitos no son frecuentes y, cuando se producen, debido a los sistemas de protección apenas duran unas décimas de segundo pero sus consecuencias son graves e imprevisibles. Las consecuencias de un cortocircuito depende de gran número de variables, pero en general depende de tres factores:

- Ubicación del punto de fallo.
- Potencia asociada al cortocircuito.
- Duración del cortocircuito.

Los efectos más comunes son:

- Destrucción física del lugar del cortocircuito, debido a la gran cantidad de energía disipada.
- Esfuerzos mecánicos, originados por los elevados valores de las corrientes de cortocircuito.

- Interrupción del suministro eléctrico, debido a la intervención de los sistemas de protección de aislan el lugar dentro se produce el cortocircuito.
- Sobretensiones, debido a la asimetría producida por el cortocircuito. Se produce una elevación de potencial de las fases sanas provocando una sobretensión.
- Oscilaciones electromagnética en las máquinas síncronas, debido a que las corrientes de cortocircuito alteran el equilibrio entre la potencia mecánica y eléctrica en la máquina.
- Alteración de la relación de transformación de los transformadores de medida, debido a la presencia de la componente de continua (exponencial) que posee la corriente de cortocircuito.
- Perturbaciones en sistemas eléctricos vecinos, debido a la presencia de campo magnético asociados al fallo.

5.2.2.2. Conductores en circuito abierto.

Consiste en la falta de continuidad eléctrica de una o más fases del circuito. Las causas son muy variadas entre las que destaca la operación incorrecta de un interruptor al abrir o cerrar, la ruptura de los conductores de amarre en las líneas, ...

5.2.2.3. Fallos simultáneos.

Son combinaciones de dos o más fallos de ocurrencia al mismo tiempo. Los fallos pueden ser del mismo tipo o diferentes y, ocurrir en el mismo punto o diferentes.

Normalmente el segundo fallo ocurre como consecuencia del primero.

5.2.2.4. Fallos evolutivos.

Son fallos que cambian durante el tiempo de permanencia u ocurrencia de los mismos. Son causadas comúnmente por la propagación del arco a otras fases y eventualmente a otros circuitos.

5.2.3. Cálculo de la corriente de fallo.

Estimar el valor de la corriente de fallo por cortocircuito es muy importante porque permite realizar en función de sus resultados una serie de mejoras dentro del mismo para contrarrestar los efectos del fallo y:

- Seleccionar y coordinar las protecciones.
- Determinar las capacidades de interrupción de los interruptores.
- Determinar los esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones.
- Determinar la capacidad de cortocircuito de una central o un sistema.

5.2.4. Equipos para detectar fallos y limitar sus efectos.

Con el fin de eliminar los fallos se incorporan una serie de componentes con el fin de eliminar los efectos de los fallos. Los equipos utilizados para la detección de fallos son:

- Relés: reciben información del sistema de potencia (corrientes y tensiones) y pueden discriminar condiciones normales y anormales de operación.
- Fusibles: su función es detectar sobrecorrientes. Su funcionamiento se basa en el hecho de que un material atravesado por una corriente suficientemente elevada puede fundir el conductor interrumpiendo el paso de la corriente. Los fusibles e interruptores son dispositivos utilizados para despejar las sobrecorrientes o los fallos.
- Pararrayos: son dispositivos limitadores de sobretensión y se basan en el hecho de que a partir de un nivel de tensión de ruptura, el pararrayos permite la circulación de corriente a tierra. A medida que la sobretensión es mayor a la de ruptura, la resistencia que presenta el pararrayos disminuye permitiendo una circulación más elevada de corriente y disminuyendo las sobretensiones.

5.2.5. Sistemas de protección.

Un sistema de protección es un conjunto de elementos y de circuitos de control unidos entre sí cuya función es detectar cualquier fallo y proteger a uno o más elementos del sistema de potencia.

La configuración de la red puede ser de tipo radial y mallada (figura 5.4).

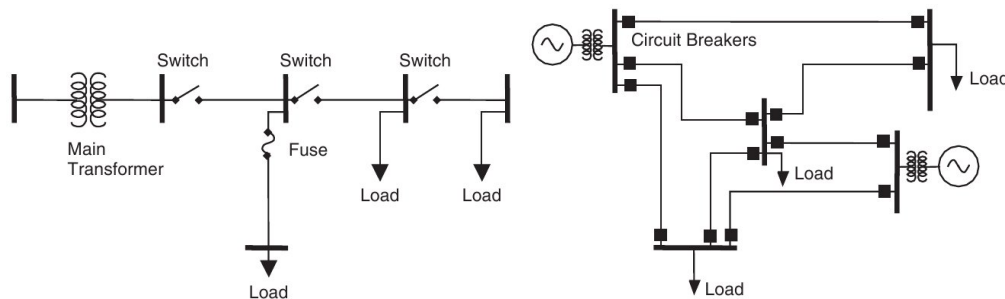


Figura 5.4: Red radial y mallada

Las protecciones tienen la responsabilidad de despejar (aislar) la zona de fallo (figura 5.5). En la figura se indica la zona de actuación.

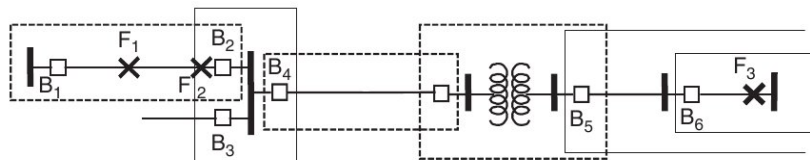


Figura 5.5: Zonas actuación

Los elementos de un sistema de protección son:

- Transformadores de medida (de corriente o de tensión): son dispositivos que permiten obtener la información del sistema en forma de corrientes o tensiones.
- Relés: es el dispositivo capaz de discriminar entre condiciones normales y anormales de operación. Permite habilitar en forma de detector directa o indirectamente los circuitos de apertura del interruptor.
- Interruptores: su misión es aislar los equipos que están en carga. Un interruptor puede interrumpir un circuito en carga, en cambio, un seccionador solamente permite aislar desde el punto de vista eléctrico dos circuitos

Los relés de protección son dispositivos, más o menos complejos, que deciden una acción, generalmente la apertura de un interruptor automático, si aparece un defecto en la red, en la alimentación o en la máquina controlada. Estos dispositivos se denominan relés, porque son unos intermediarios entre una magnitud física controlada y un disparador.

Ante un defecto, los relés dan la orden de apertura a los interruptores (figura 5.6).

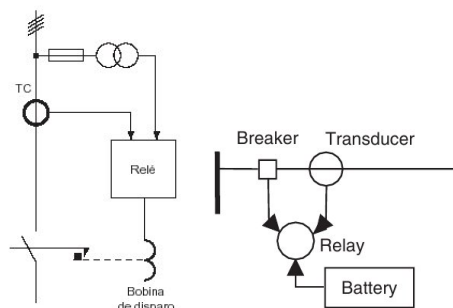


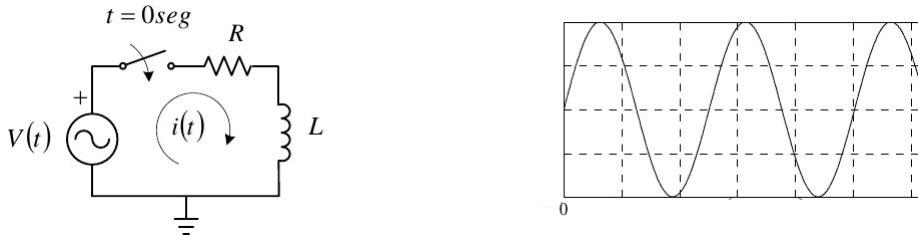
Figura 5.6: Elementos protección

5.3. Cortocircuitos trifásicos.

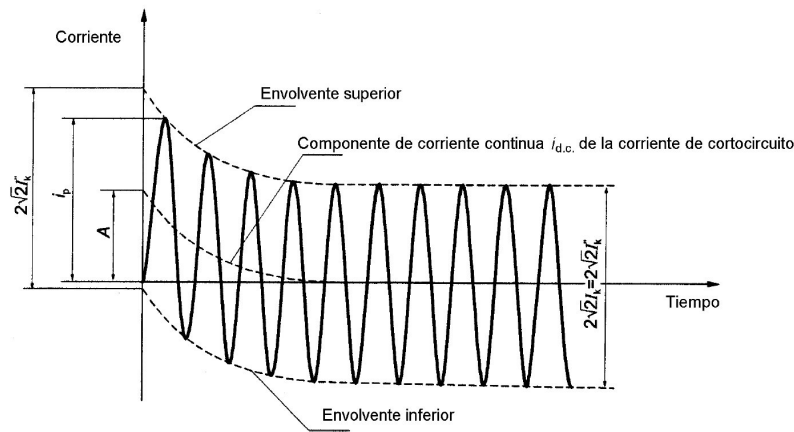
5.3.1. Introducción.

Los interruptores dentro de los sistemas eléctricos de potencia son los elementos encargados de interrumpir el flujo de la energía en cualquier situación. Por ello, la selección de un interruptor no depende únicamente de la corriente que pasa a través del interruptor, sino también de la corriente máxima que tiene que interrumpir.

Para comprender el problema de calcular la corriente inicial de cortocircuito cuando una máquina sufre un fallo en los terminales se analiza el régimen transitorio de un circuito RL.



Suponemos que: la corriente de carga es nula, el valor de la tensión de la figura (conexión al azar) coincide con el paso por cero de la tensión de la fuente y la tensión de la fuente no varía con el paso del tiempo. La corriente que circula por el circuito tendrá la forma indicada en la siguiente figura



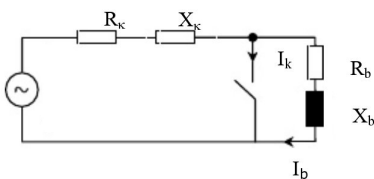
donde I_k'' es la corriente de cortocircuito simétrica inicial; i_p es el valor de cresta de la corriente de cortocircuito; I_k es la corriente de cortocircuito permanente; i_{dc} es la componente de continua de la corriente de cortocircuito; A : valor inicial de la componente de continua.

Que la tensión de la fuente en el instante de producirse el cierre del interruptor pase por cero nos indica que con impedancias muy inductivas, la intensidad permanente estará pasando por su máximo negativo, lo que implica que con la disminución de la impedancia, la intensidad alcanzará valores muy elevados. Además como la intensidad en la inductancia no puede cambiar bruscamente, la corriente transitoria tiene una componente aperiódica de tipo exponencial, la cual irá desapareciendo paulatinamente.

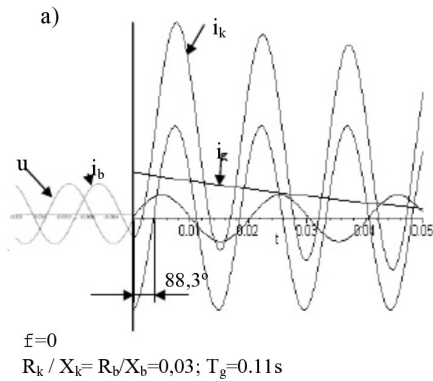
La intensidad I_k'' depende de la tensión de la fuente y de la impedancia equivalente y representa el valor eficaz de la corriente en el instante de producirse el cortocircuito.

En sistemas donde se produce un cortocircuito alejado de un alternador (síncrona), el efecto es semejante al analizado en el circuito RL y la intensidad de cortocircuito inicial I_k'' coincide con la intensidad permanente I_k .

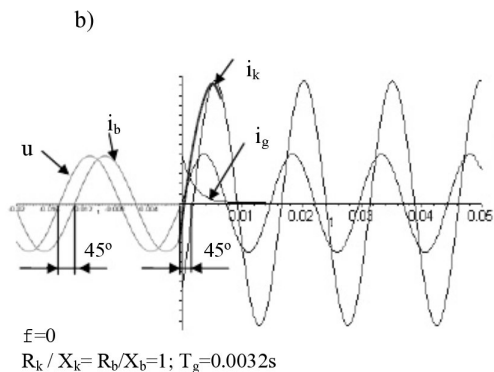
Si analizamos un cortocircuito en un circuito RL en carga. Vamos a considerar que $(R_k/X_k) = (R_b/X_b)$:



La figura siguiente corresponde con un circuito altamente inductivo y el cortocircuito se produce cuando la tensión pasa por cero. En estas condiciones, el cortocircuito es muy violento y duradero, ya que la componente aperiódica se amortigua lentamente.



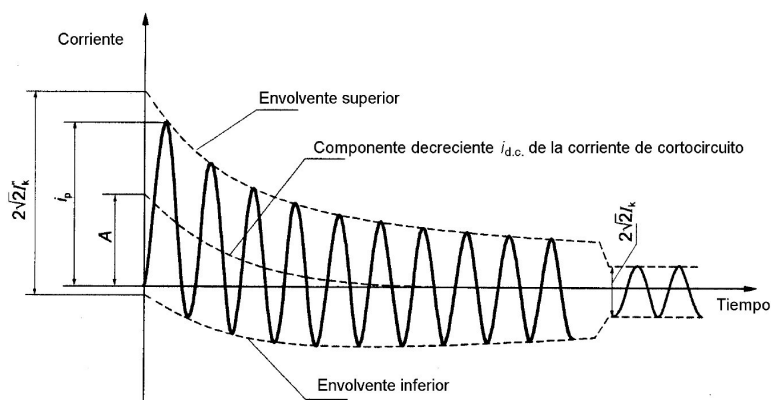
La figura siguiente corresponde con un circuito donde la resistencia y reactancia son iguales y el cortocircuito se produce cuando la tensión pasa por cero. En estas condiciones, el cortocircuito es menos violento, ya que la componente aperiódica se amortigua más rápido.



En las redes eléctricas, si el cortocircuito se produce alejado de un alternador, la corriente transitoria de cortocircuito tiene la forma indicada anteriormente del circuito RL.

En las redes eléctricas, si el cortocircuito se produce cercano a un alternador, la corriente transitoria de cortocircuito tiene otra forma distinta.

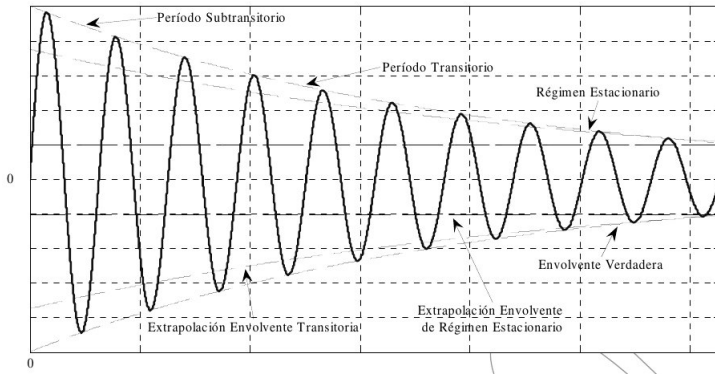
En una máquina síncrona se debe tener presente que existe una liberación o absorción de energía por parte de las masas en movimiento. Se deben considerar además de los transitorios eléctricos, otros transitorios de tipo electromecánico. El análisis del periodo transitorio de la máquina síncrona supone la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales de circuitos acoplados. La forma de la corriente aproximadamente viene indicada en la siguiente figura



La primera irrupción de corriente, muchas veces mayor que la de carga, es seguida por un periodo durante el cual la corriente en el inducido decae gradualmente hasta el valor de cortocircuito mantenido que corresponde a la excitación inicial. En cuanto la corriente del inducido decae, la corriente de excitación compensa el efecto desmagnetizante, decrece. El gradual decrecimiento de ambas corrientes es consecuencia de que la energía almacenada se disipa en la resistencia del inducido y en los arrollamientos de excitación y debido a las corrientes parásitas.

El periodo de cortocircuito de un alternador se suele dividir en tres etapas (figura): periodo subtransitorio, periodo transitorio y periodo permanente. El periodo subtransitorio es el más severo en los valores de las

magnitudes de corrientes. Tiene una duración muy corta, no mayor a varios ciclos, pero los efectos pueden ser devastadores.



La división del fenómeno en estos tres periodos obedece al hecho de la disipación de energía en el campo de la máquina y donde cada periodo corresponde a una constante de tiempo asociada a la disipación de energía:

Constante subtransitoria (τ_d''); Constante transitoria (τ_d'); Constante permanente (τ_d). Cada constante de tiempo relaciona la inductancia/resistencia de cada periodo.

La reactancia síncrona X_d se define como la relación de la tensión en vacío de la máquina entre el valor de la corriente en régimen permanente.

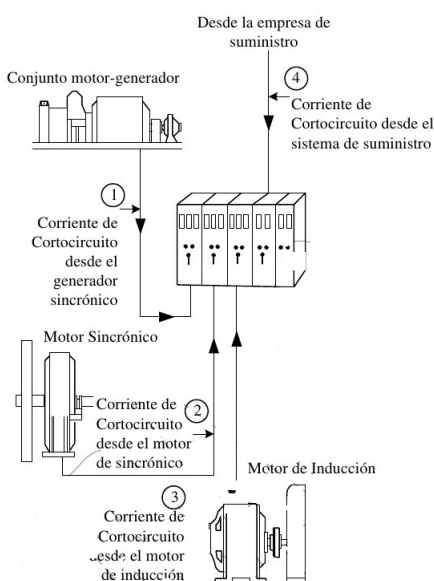
La reactancia transitoria X_d' se define como la relación de la tensión en vacío de la máquina entre el valor de la corriente en régimen transitorio.

Cuando el alternador se pone en cortocircuito aparece una reactancia subtransitoria X_d'' que considera la reactancia del arrollamiento de excitación, la reactancia del devanado amortiguado, y la reactancia del arrollamiento del inducido y en la relación entre la tensión en terminales en vacío de la máquina entre el valor de la corriente en régimen subtransitorio.

En la mayoría de los casos prácticos no es necesaria una determinación exacta. Es interesante conocer el valor eficaz de la componente simétrica de corriente alterna I_k'' y el valor de cresta de la corriente de cortocircuito i_p después de la ocurrencia del cortocircuito. El valor más alto de i_p depende de la constante de tiempo de la componente aperiódica decreciente y de la frecuencia, es decir de la relación R/X de la impedancia de cortocircuito Z_K y, se alcanza si el cortocircuito se inicia cuando la tensión pasa por cero. En las redes malladas hay varias constantes de tiempo de corriente continua y debido a ello no es posible dar un método fácil para el cálculo de i_p e i_{dc} .

5.3.2. Fuentes de corriente de cortocircuito.

En los sistemas de potencia las fuentes de corriente de cortocircuitos son mayoritariamente los generadores síncronos conectados a la red, pero existen otros equipos eléctricos capaces de entregar, bajo ciertas condiciones y por un periodo de tiempo determinado, energía a la red.

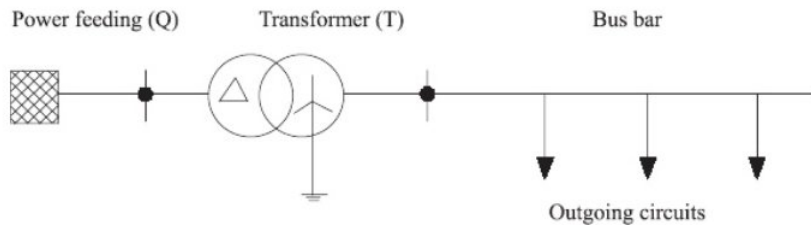


Las fuentes básicas de corriente de cortocircuito son:

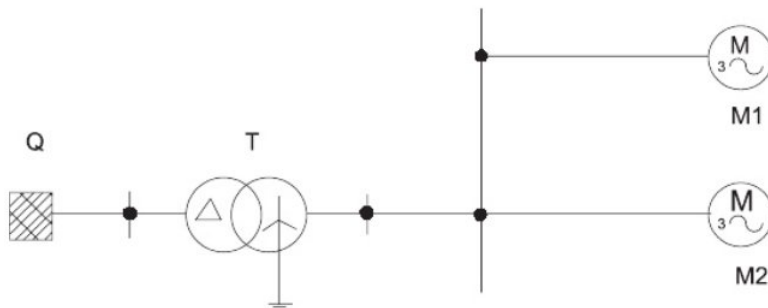
- Generador síncronos.
- Motores síncronos.
- Motores de inducción.
- Sistema de suministro eléctrico o generación remota (redes de alimentación).

A continuación se exponen distintos tipos de sistemas de potencia.

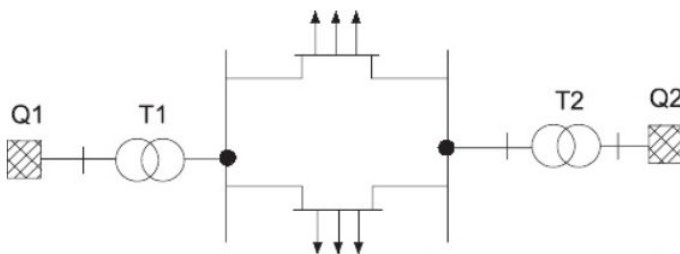
Líneas alimentadas con una única fuente de suministro



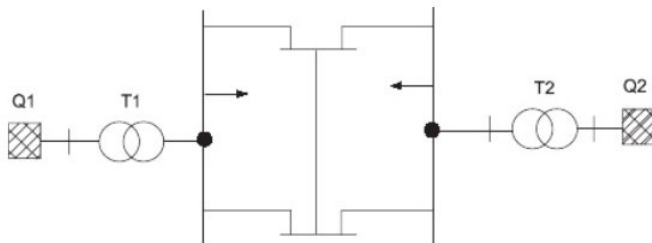
Redes radiales



Redes anillo



Redes malladas



5.3.3. Cálculo de la corriente de cortocircuito trifásico mediante la norma UNE-EN-60909.

5.3.3.1. Modelado de las componentes del sistema.

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito cada elemento del sistema de potencia, debe ser representado por un circuito equivalente.

Acometidas: Ver apartado 5.1.2.1.

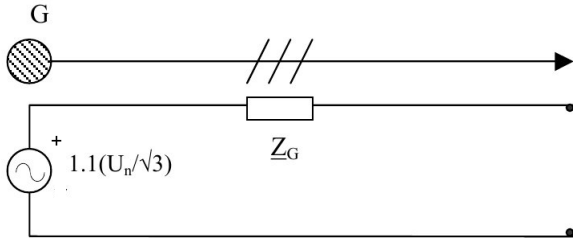
Transformadores: Ver apartado 5.1.2.3.

Líneas: Ver apartado 5.1.2.4.

Máquinas síncronas: Ver apartado 5.1.2.5. La reactancia inicial subtransitoria (X_g'') de la máquina síncrona nos da el valor de la corriente inicial simétrica de cortocircuito. La impedancia del generador es

$$\underline{Z}_g = R_g + jX_g'' \quad X_g'' = \frac{x''}{100} \frac{U_{ng}^2}{S_{ng}} \quad (5.35)$$

siendo U_{ng} la tensión nominal del generador; S_{ng} la potencia nominal y x'' la reactancia inicial porcentual.



Máquinas asíncronas: La impedancia a considerar, para el cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito de las máquinas de inducción, se obtiene de la corriente inicial de arranque del motor a la tensión nominal

$$\underline{Z}_m = R_m + jX_m \quad Z_m = \frac{U_{nm}}{\sqrt{3}I_{arr}} = \frac{1}{I_{arr}/I_{nm}} \frac{U_{nm}^2}{S_{nm}} \quad (5.36)$$

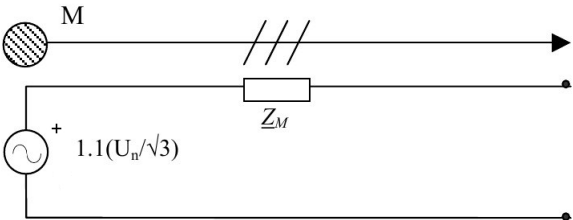
donde U_{nm} es la tensión nominal del motor; I_{arr} es la corriente de arranque del motor; I_{nm} es la corriente nominal del motor; S_{nm} es la potencia aparente nominal del motor.

Para la resistencia de los devanados, se puede tomar:

$R_m/X_m = 0,1$ con $X_m = 0,995$ para motores de alta tensión y relación (potencia/par de polos) ≥ 1 MW

$R_m/X_m = 0,15$ con $X_m = 0,989$ para motores de alta tensión y relación (potencia/par de polos) < 1 MW

$R_m/X_m = 0,3$ con $X_m = 0,958$ para motores de baja tensión (< 1 kV)



5.3.3.2. Método de cálculo.

La norma UNE nos indica un método para hallar las corrientes de cortocircuito diferente del cálculo tradicional, donde se consideran las fuentes internas de los generadores, acometidas y motores explicado anteriormente.

Hasta ahora hemos considerado que todas las fuentes de energía que estaban conectadas y activas en el momento de producirse el cortocircuito influían en éste, y esto es cierto, pero la norma UNE nos propone un sistema alternativo, en el cual es suficiente con considerar en el punto de cortocircuito una única fuente ficticia de energía con un valor de la fuerza electromotriz entre fase y neutro de:

$$E_{cc} = c \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.37)$$

El coeficiente c representa el paso de la tensión de línea al valor de la fuerza electromotriz de la fuente ficticia (normalmente es 1,1).

El método de cálculo está basado en la representación por impedancias de un circuito equivalente.

Solamente existirá una única fuente que estará conectada entre el punto de cortocircuito y el neutro.

Todas las fuentes de alimentación (redes de alimentación o acometidas, máquinas síncronas y asíncronas) son reemplazadas por sus impedancias internas, sin fuerza electromotriz. Estas impedancias se conecta un extremo al neutro y el otro según la conexión física de los componentes del sistema de potencia).

No se consideran las capacidades, ni las pérdidas por conductancia de las líneas, así como las impedancias transversales de los motores.

No son indispensables los datos de operación ni de carga de los consumidores, ni la precisión de los cambiadores de tomas de los transformadores, no la excitación de los alternadores, etc.

Cuando se calculan las corrientes en sistemas con diferentes niveles de tensión, es necesario transferir los valores de las impedancias de un nivel a otro. Para sistemas en por unidad no es necesaria la transformación si son coherentes.

Por ejemplo, si tenemos (figura 5.8) una red de acometida conectada a un transformador y una línea, y se produce el cortocircuito trifásico en el punto k3, tendremos el circuito equivalente representado por todas las impedancias. Se incluye la impedancia de la acometida que se conecta entre el punto Q y el neutro, la impedancia del transformador, y la impedancia de la línea. Como el cortocircuito ocurre en el punto F, todas las impedancias tienen que estar referidas al nivel de tensión de esa zona del circuito. No se consideran las admitancias en paralelo (capacidades de línea y las cargas pasivas) cuando se calculan las corrientes de cortocircuito.

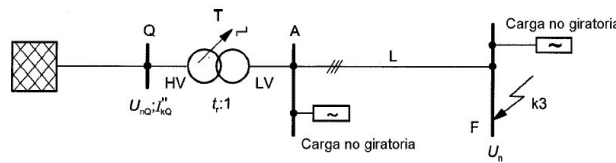


Fig. 4a – Diagrama del sistema

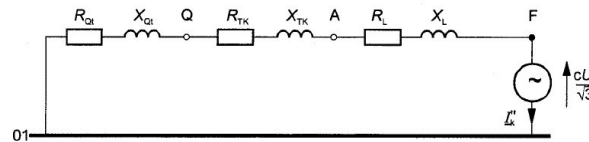


Figura 5.7: Fuente de tensión equivalente

El factor c se elige de acuerdo con lo indicado en la figura 5.8.

Tensión nominal U_n	Factor de tensión c para el cálculo de	
	las corrientes de cortocircuito máximas $c_{\max}^{(1)}$	las corrientes de cortocircuito mínimas $c_{\min}$
Baja tensión 100 V a 1 000 V (Tabla 1 de la Norma CEI 60038)	1,05 ⁽²⁾ 1,10 ⁽³⁾	0,95
Media tensión > 1 kV a 35 kV (Tabla 3 de la Norma CEI 60038)	1,10	1,00
Alta tensión ⁽²⁾ > 35 kV (Tabla 4 de la Norma CEI 60038)		

Figura 5.8: Factor c

5.3.3.3. Método de cálculo de la corriente inicial simétrica de cortocircuito.

En general se calcula mediante la ecuación:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (5.38)$$

El esquema de cálculo de un cortocircuito trifásico, para una red de alimentación con un transformador como ejemplo, es el indicado en la figura 5.9, donde $\underline{Z}_1$ es la impedancia equivalente de la red, de secuencia directa.

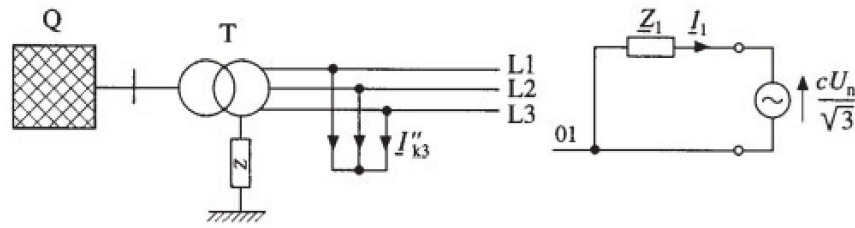


Figura 5.9: Esquema cálculo cortocircuito trifásico

$$I''_{k3} = I_1 = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} \quad (5.39)$$

Ejemplo 1:

Sea el circuito de la figura

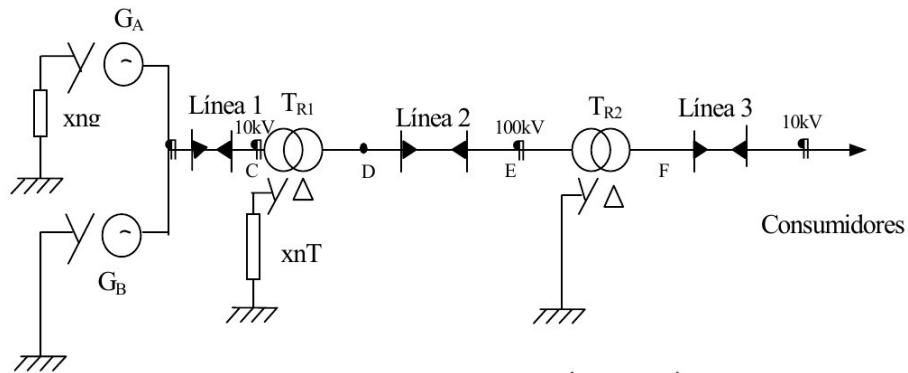


Figura 5.10: Ejemplo

El diagrama de impedancias de secuencia directa es el siguiente

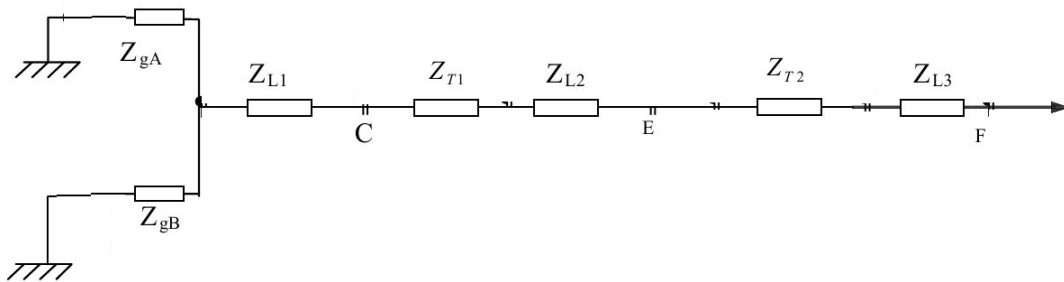
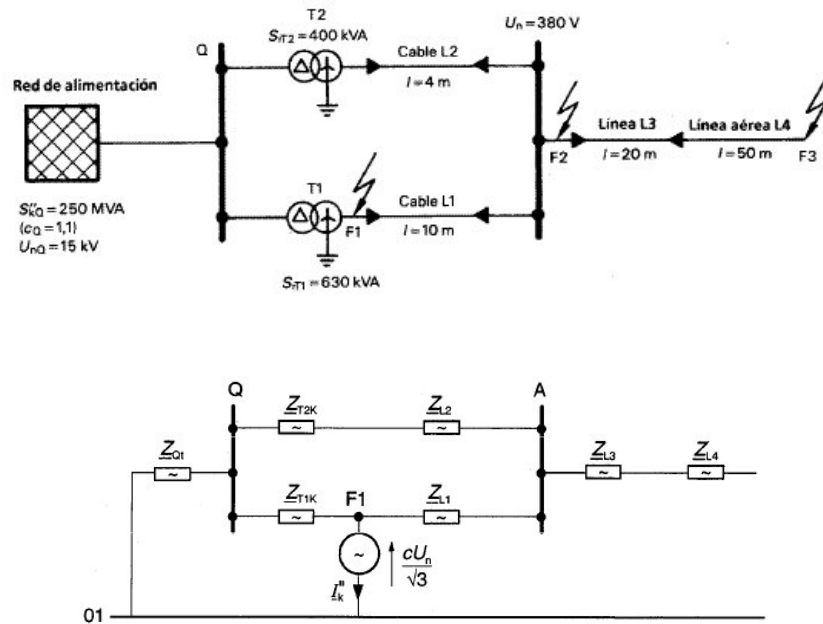


Figura 5.11: Red de impedancias

Cuando se calcule el cortocircuito en un punto determinado, se colocará entre ese punto y el neutro, la fuente equivalente correspondiente. La fuente tendrá la tensión correspondiente al nivel de tensión de la zona donde el punto de cortocircuito y todas las impedancias tienen que estar expresadas en el nivel de tensión correspondiente, para lo cual se utilizan las relaciones de transformación necesarias.

Ejemplo 2:

En las siguientes figuras se representa el diagrama unifilar de un sistema de potencia y la red secuencia directa utilizada para calcular el cortocircuito en el punto F1.



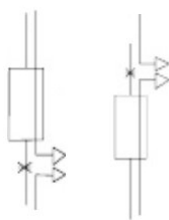
5.3.3.4. Cálculo del poder de cierre de los interruptores (valor de cresta de la corriente de cortocircuito).

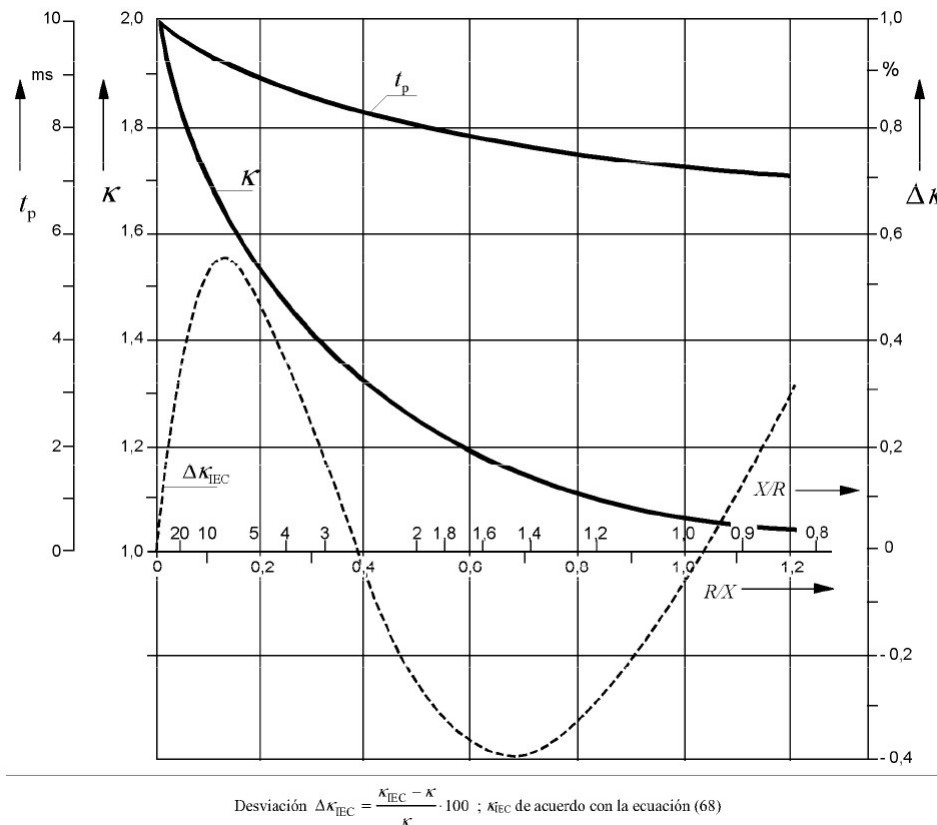
Los interruptores automáticos sirven para proteger un circuito contra sobrecargas y los cortocircuitos. Pero primeramente resulta imprescindible protegerlos a ellos mismos. Es por ello que se determina el poder de corte y el poder de cierre de los mismos para los casos de cortocircuitos más desfavorables, es decir, un cortocircuito cercano a ellos, siendo la corriente la mayor posible.

Resulta muy improbable un cortocircuito en el interior del propio interruptor, por lo que la situación más desfavorable se supone cortocircuitos justo en los bornes (exterior).

Si el cortocircuito se produce en el exterior, como mínimo se producen dos casos, que serían los cortocircuitos en ambos extremos.

Tanto si se produce en un extremo como en el otro, y recordando que cuando se produce un cortocircuito todas las intensidades van a parar al punto de cortocircuito, por el interior del interruptor nunca pasará el valor total de la corriente de cortocircuito. Pasará por lo tanto por el interruptor una de las aportaciones de corriente.



Figura 5.12: Factor κ Redes no malladas:

La contribución al valor de cresta de la corriente de cortocircuito de cada una de las ramas se puede expresar por (el factor κ se obtiene aproximadamente mediante la fórmula siguiente):

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad \text{donde} \quad \kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (5.40)$$

A partir de la gráfica, también se puede calcular el factor κ y el instante de tiempo t_p en el cual se produce el pico de corriente.

Cuando hay varias fuentes, es la suma de las corrientes parciales de cortocircuito.

El factor κ depende de la relación R/X correspondiente a los distintos elementos implicados en el cortocircuito y tiene presente el amortiguamiento temporal de la componente aperiódica, y en el caso de cortocircuitos cercanos al alternador de la componente simétrica. El factor κ dará el valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito, por lo tanto se supone que el cortocircuito se inicia cuando la tensión pasa por cero y la corriente de pico i_p se alcanza aproximadamente a los 10 ms desde la aparición del cortocircuito.

Redes malladas:

Se utilizan tres posibles métodos de obtención del factor κ . El primero debería ser usado como primera estimación.

1) Relación uniforme R/X :

El factor κ se determina tomando la menor relación R/X de aquellas ramas de la red que transportan corrientes parciales de cortocircuito y pertenecen a una parte de la red que tiene la misma tensión nominal. También se tienen en cuenta las ramas con transformadores adyacentes al punto de cortocircuito. Este método está limitado a redes con $R < 0.3X$.

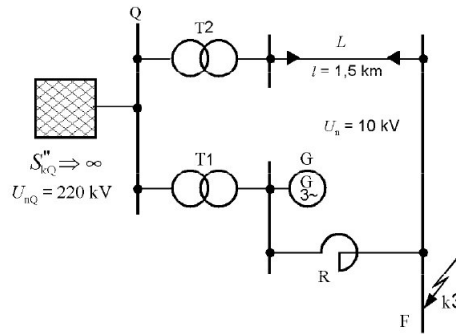
2) Relación R/X en el punto de cortocircuito.

Se calcula el factor κ mediante la gráfica 5.12, usando la relación R_k/X_K de la impedancia directa equivalente en el punto de cortocircuito, y multiplicando el resultando de la gráfica por 1,15 como factor de seguridad, que sirve para cubrir las imprecisiones causadas por el uso de la relación R_k/X_K de una reducción de red con impedancias complejas. Es necesario tener en todas las ramas una relación $R/X < 1$ para evitar desviaciones superiores al -5 %.

3) Frecuencia equivalente $f_c = 20 \text{ Hz}$.

Se calcula el factor κ mediante la gráfica 5.12, usando la relación $R/X = (R_c \cdot f_c)/(X_c, 50)$, donde $R_c + jX_c$ es la impedancia equivalente en el punto de cortocircuito a la frecuencia f_c .

Si tenemos un sistema de potencia de la siguiente figura



Generador G: $S_{rg} = 100 \text{ MVA}$; $U_{rg} = 10 \text{ kV}$; $x_d'' = 11 \%$; $r_g = 0,11 \%$

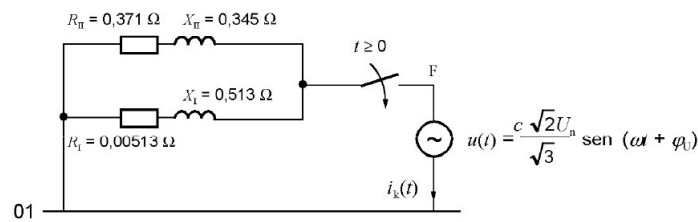
Transformador T1: $S_{T1} = 100 \text{ MVA}$; $U_{T1H} = 220 \text{ kV}$; $U_{T1L} = 10 \text{ kV}$; $\varepsilon_{ccx} = 11 \%$; $\varepsilon_{ccr} = 0,11 \%$

Transformador T2: $S_{T2} = 31,5 \text{ MVA}$; $U_{T2H} = 220 \text{ kV}$; $U_{T2L} = 10 \text{ kV}$; $\varepsilon_{ccx} = 6 \%$; $\varepsilon_{ccr} = 0,75 \%$

Cable L: $R_L = 0,231 \Omega/\text{km}$; $X_L = 0,104 \Omega/\text{km}$; 1,5 km

Reactancia R: $R_R = 0,00458 \Omega/\text{km}$; $X_R = 0,458 \Omega/\text{km}$

Vamos a reducir el circuito a dos ramas en paralelo



Impedancia del generador (a 10 kV):

$$X_g = 0,11 \frac{10^2}{100} = 0,11; r_g = 0,011 \frac{10^2}{100} = 0,011$$

Impedancia del transformador T1 (a 10 kV):

$$X_{T1} = 0,11 \frac{10^2}{100} = 0,11; r_{T1} = 0,011 \frac{10^2}{100} = 0,011$$

Impedancia del transformador T2 (a 10 kV):

$$X_{T2} = 0,06 \frac{10^2}{31,5} = 0,1904; r_{T2} = 0,075 \frac{10^2}{31,5} = 0,0238$$

Impedancia cable:

$$R_L = 0,3465; X_L = 0,156$$

Impedancia reactancia:

$$R_R = 0,00458; X_R = 0,458$$

Impedancia acometida: 0

Las impedancias de las ramas en paralelo son:

$$\underline{Z}_I = \underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_L;$$

$$\underline{Z}_I = 0,00513 + j0,513; R_I/X_I = 0,01; Z_I = 0,51303$$

$$\underline{Z}_{II} = (\underline{Z}_{T2} // \underline{Z}_G) + \underline{Z}_R$$

$$\underline{Z}_{II} = 0,371 + j0,345; R_{II}/X_{II} = 1,0754; Z_{II} = 0,5066$$

$$Z_I/Z_{II} = 1,0127$$

La impedancia de cortocircuito en el punto F es

$$\underline{Z}_K = 0,11276 + j0,25349; Z_K = 0,27744$$

Mediante la gráfica 5.12, a partir de la relación $R_k/X_k = 0,445$, se obtiene $\kappa = 1,55$

Si analizamos los tres métodos de cálculos, tendremos:

$$1) \left[\frac{R}{X} \right]_{\text{minima}} = \frac{R_i}{X_i} = 0,01; \kappa = 1,971. \text{ Como } R_k > 0,3X_k$$

$$b) \frac{R_k}{X_k} = 0,4448; \kappa = 1,278 * 1,15 = 1,4697$$

$$c) Z_c = R_c + jX_c \quad \frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{20}{50} = 0,1732; \kappa = 1,6029$$

5.3.3.5. Cálculo del poder de corte de los interruptores (valor de corte de la corriente de cortocircuito).

Para determinar el poder de corte, debemos primeramente conocer la intensidad de cortocircuito inicial que fluirá desde cada generador, motor síncrono, red o motor asíncrono hacia el punto de cortocircuito.

Cortocircuito alejado de un alternador:

Para cortocircuitos alejados de alternadores, las corrientes de corte son iguales a las corrientes iniciales de cortocircuito:

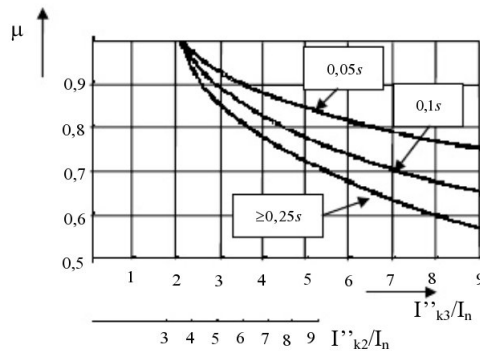
$$I_b = I''_k$$

Cortocircuito cercano a un alternador redes no malladas:

En este caso la corriente de cortocircuito decrece rápidamente durante las primeras décimas de segundo después de la aparición del cortocircuito, debido a la variación de flujo en el rotor del generador durante el cortocircuito. No es fácil simular este decrecimiento, pero la norma UNE permite utilizar para el cálculo de la corriente de corte la ecuación

$$I_b = \mu I''_k \quad (5.41)$$

donde el factor μ se ha obtenido en ensayos de laboratorio y mediante cálculos detallados de los generadores con diferentes potencias y tipos. La figura las gráficas para el cálculo de μ . Este factor depende de la relación I''_K/I_n (corriente inicial cortocircuito y corriente nominal del generador) y del retardo mínimo de desconexión.



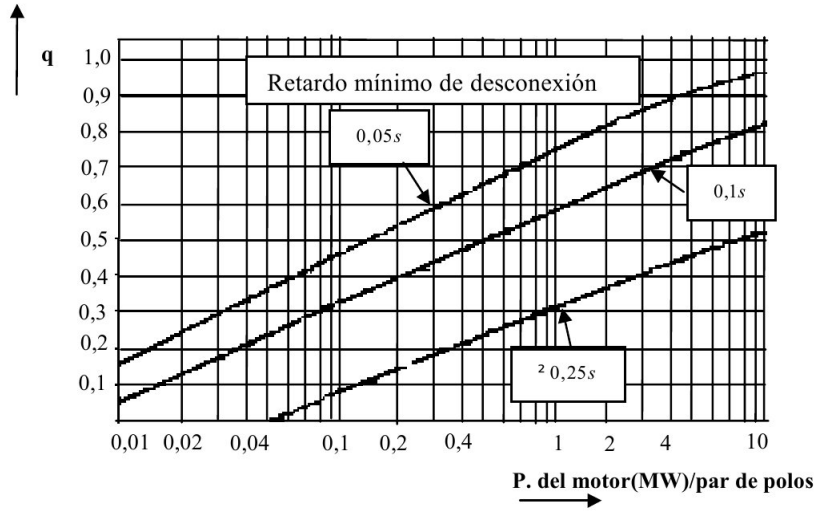
Si las máquinas síncronas están excitadas por excitatrices rotativas o excitatrices de convertidor estático, el valor de μ es:

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26e^{-0,26I''_{kG}/I_{rG}} & \text{para } t_{min} &= 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51e^{-0,30I''_{kG}/I_{rG}} & \text{para } t_{min} &= 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72e^{-0,32I''_{kG}/I_{rG}} & \text{para } t_{min} &= 0,01 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94e^{-0,38I''_{kG}/I_{rG}} & \text{para } t_{min} &\geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (5.42)$$

Contribución de motores asíncronos:

$$I_b = \mu q I''_k \quad (5.43)$$

El factor q depende de la relación entre la potencia del motor (en MW) y su número de pares de polos. Con este valor, y el retardo mínimo t_{min} se entra en la gráfica y se obtiene el valor.



Se puede utilizar también las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}
 q &= 1,03 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) & \text{para } t_{min} = 0,02 \text{ s} \\
 q &= 0,79 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) & \text{para } t_{min} = 0,05 \text{ s} \\
 q &= 0,57 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) & \text{para } t_{min} = 0,01 \text{ s} \\
 q &= 0,26 + 0,12 \ln(P_{rM}/p) & \text{para } t_{min} \geq 0,25 \text{ s}
 \end{aligned} \tag{5.44}$$

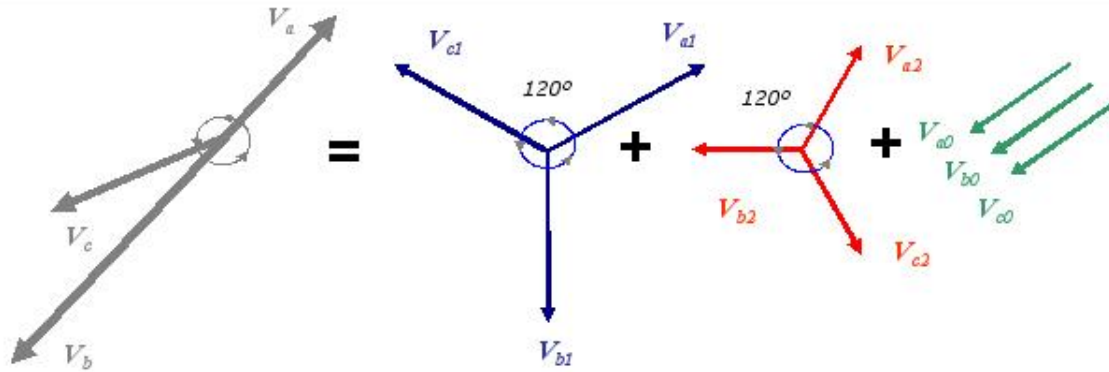
donde P_{rM} es la potencia asignada en MW; p es el número de pares de polos del motor.

5.4. Componentes simétricas. Introducción.

El método en este caso establece que un sistema de tres fases no equilibradas, se puede descomponer en tres sistemas equilibrados. Los conjuntos equilibrados de componentes son:

1. Componentes de secuencia directa (o positiva): Conformado por tres fasores de igual magnitud y una diferencia de fase de 120° y secuencia de fase directa o positiva.
2. Componentes de secuencia inversa (o negativa): Formada por tres fasores de igual magnitud, con diferencias de fase de 120° y secuencia de fase inversa o negativa.
3. Componentes de secuencia homopolar (o cero): Formado por tres fasores de igual magnitud y con ángulo de fase nulo entre ellos.

Los tres conjuntos de componentes simétricas se designan con el subíndice adicional 1 para las componentes de secuencia directa, 2 para las componentes de secuencia inversa y 0 para las componentes de secuencia homopolar.



Como cada uno de los fasores originales desequilibrados es igual a la suma de sus componentes, los fasores expresados en función de sus componentes son (las fórmulas son para tensiones, pero valen también para intensidades):

$$\begin{aligned}
 \underline{V}_a &= \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\
 \underline{V}_b &= \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{b0} \\
 \underline{V}_c &= \underline{V}_{c1} + \underline{V}_{c2} + \underline{V}_{c0}
 \end{aligned} \tag{5.45}$$

Los fasores de cualquier sistema trifásico equilibrado pueden ser relacionados unos con otros mediante el "OPERADOR a " que origina una rotación de 120° en sentido contrario a las manecillas del reloj. Tal operador es un número complejo de modulo unidad y argumento 120° , y está definido por la siguiente expresión:

$$a = 1\angle 120^\circ = -0,5 + j0,866 \quad (5.46)$$

Si se aplica a un fasor el "operador a " dos veces consecutivas, el vector girará 240° y con tres aplicaciones lo hará girar 360° .

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ \quad (5.47)$$

Utilizando el operador a , el sistema de secuencia directa podemos escribir:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{b1} &= \underline{V}_{a1} 1\angle -120^\circ = a^2 \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{c1} &= \underline{V}_{a1} 1\angle +120^\circ = a \underline{V}_{a1} \end{aligned} \quad (5.48)$$

Utilizando el operador a , el sistema de secuencia inversa podemos escribir:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{b2} &= \underline{V}_{a2} 1\angle 120^\circ = a \underline{V}_{a2} \\ \underline{V}_{c2} &= \underline{V}_{a2} 1\angle -120^\circ = a^2 \underline{V}_{a2} \end{aligned} \quad (5.49)$$

Utilizando el operador a , el sistema de secuencia homopolar podemos escribir:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{bo} &= \underline{V}_{ao} \\ \underline{V}_{co} &= \underline{V}_{ao} \end{aligned} \quad (5.50)$$

Utilizando el operador a , las tres tensiones originales serán:

$$\begin{aligned} \underline{V}_a &= \underline{V}_{a0} + \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} \\ \underline{V}_b &= \underline{V}_{a0} + a^2 \underline{V}_{a1} + a \underline{V}_{a2} \\ \underline{V}_c &= \underline{V}_{a0} + a \underline{V}_{a1} + a^2 \underline{V}_{a2} \end{aligned} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \end{Bmatrix} \quad (5.51)$$

Si representamos por

$$V_{asim} = \begin{Bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{Bmatrix} \quad V_{sim} = \begin{Bmatrix} \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \end{Bmatrix} \quad A = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{Bmatrix} \quad (5.52)$$

$$V_{asim} = A.V_{sim} \quad (5.53)$$

El siguiente paso es calcular las componentes simétricas fundamentales $\underline{V}_{a0}$, $\underline{V}_{a1}$ y $\underline{V}_{a2}$, que se hace despejando de la ecuación anterior:

$$\begin{Bmatrix} \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{3}(\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c) \\ \frac{1}{3}(\underline{V}_a + a\underline{V}_b + a^2\underline{V}_c) \\ \frac{1}{3}(\underline{V}_a + a^2\underline{V}_b + a\underline{V}_c) \end{Bmatrix} \quad (5.54)$$

De forma que:

$$V_{asim} = \begin{Bmatrix} \underline{V}_a \\ \underline{V}_b \\ \underline{V}_c \end{Bmatrix} \quad V_{sim} = \begin{Bmatrix} \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_{a1} \\ \underline{V}_{a2} \end{Bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{Bmatrix} \quad (5.55)$$

$$V_{sim} = A^{-1}.V_{asim} \quad (5.56)$$

Esto significa que no habrá componentes de secuencia homopolar en un sistema trifásico desequilibrado cuando se calculan las componentes simétricas de las tensiones de línea a línea independientemente del desequilibrio de estas tensiones. De acuerdo a lo anterior, las tensiones trifásicas de línea a línea desequilibradas solamente tienen componentes de secuencia directa y componentes de secuencia inversa.

Las corrientes también pueden ser expresadas en función de las componentes simétricas.

$$I_{asim} = \begin{Bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{Bmatrix} \quad I_{sim} = \begin{Bmatrix} \underline{I}_{a0} \\ \underline{I}_{a1} \\ \underline{I}_{a2} \end{Bmatrix} \quad A = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{Bmatrix} \quad (5.57)$$

$$I_{asim} = A \cdot I_{sim} \quad I_{sim} = A^{-1} \cdot I_{asim} \quad (5.58)$$

Para el caso de las intensidades de línea (por ejemplo las absorbidas por una carga en estrella o triángulo), las intensidades homopolares serán:

$$\underline{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) \quad (5.59)$$

Solamente podrá existir componente homopolar cuando la suma de las tres intensidades de línea sea distinta de cero, por lo que será posible solamente en carga en estrella con el centro de la estrella conectado al neutro. La suma de las tres intensidades de línea $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$ es igual a $3\underline{I}_{a0}$ (tres veces la intensidad homopolar) y es la corriente que se circula desde el centro de la estrella al neutro. Por lo tanto, en estrella son conexión al neutro y en triángulo, no existen corrientes homopolares.

La potencia es los sistemas trifásicos es

$$\underline{S} = \underline{V}_A \underline{I}_A^* + \underline{V}_B \underline{I}_B^* + \underline{V}_C \underline{I}_C^* = [\underline{V}_A \quad \underline{V}_B \quad \underline{V}_C] \begin{bmatrix} \underline{I}_A^* \\ \underline{I}_B^* \\ \underline{I}_C^* \end{bmatrix} \quad (5.60)$$

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} \underline{V}_A \\ \underline{V}_B \\ \underline{V}_C \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \underline{I}_A^* \\ \underline{I}_B^* \\ \underline{I}_C^* \end{bmatrix} = [V_{asim}]^T I_{asim}^* \quad (5.61)$$

$$\underline{S} = [V_{asim}]^T I_{asim}^* = [V_{sim}]^T A^T A [I_{sim}]^T \quad (5.62)$$

$$\underline{S} = [V]^T A^T A [I_{sim}]^T = 3\underline{V}_{a0} \underline{I}_{a0}^* + 3\underline{V}_{a1} \underline{I}_{a1}^* + 3\underline{V}_{a2} \underline{I}_{a2}^* \quad (5.63)$$

5.4.1. Impedancias debidas a las corrientes de diferente secuencia.

La caída de tensión que se origina en un circuito por la corriente de una determinada secuencia, depende de la impedancia de tal parte del circuito para la corriente de dicha secuencia.

La impedancia que ofrece un circuito cuando por el circulan solamente corrientes de secuencia directa, se denomina impedancia de secuencia directa:

$$\underline{Z}_1 = \frac{\underline{U}_{a1}}{\underline{I}_{a1}} = \frac{\underline{U}_{b1}}{\underline{I}_{b1}} = \frac{\underline{U}_{c1}}{\underline{I}_{c1}}$$

La impedancia que ofrece un circuito cuando por el circulan solamente corrientes de secuencia inversa, se denomina impedancia de secuencia inversa:

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_{a2}}{\underline{I}_{a2}} = \frac{\underline{U}_{b2}}{\underline{I}_{b2}} = \frac{\underline{U}_{c2}}{\underline{I}_{c2}}$$

La impedancia que ofrece un circuito cuando por el circulan solamente corrientes de secuencia homopolar, se denomina impedancia de secuencia homopolar:

$$\underline{Z}_0 = \frac{\underline{U}_{a0}}{\underline{I}_{a0}} = \frac{\underline{U}_{b0}}{\underline{I}_{b0}} = \frac{\underline{U}_{c0}}{\underline{I}_{c0}}$$

Los valores de Z_1 y Z_2 son idénticos para resistencias, condensadores, inductancias, líneas de transporte, transformadores, ya la impedancia no depende de la secuencia de fase. En cambio la impedancia homopolar Z_o será diferente debido a la interacción en los campos magnéticos y eléctricos de las tres fases.

En máquinas rotativas, las tres impedancias serán distintas.

En la tabla siguiente se da una relación de valores típicos de estas impedancias para diferentes máquinas y líneas eléctricas. Los datos están en valores por unidad ($Z_{pu} = Z/Z_{base}$), siendo $Z_{base} = \frac{U_{línea}^2}{S}$ siendo $U_{línea}$ la d.d.p. de línea y S la potencia aparente.

Máquina o línea	Z_1	Z_2	Z_o
Transformadores 132 kV	j0,1	j0,1	
Transformadores 220 kV	j0,14	j0,14	
Transformadores 380 kV	j0,16	j0,16	
Alternador 3000 rpm	j2	j0,15	j0,1
Alternador 1500 rpm	j1,2	j0,25	j0,25
Alternador rotor saliente	j2	j2	j2
Motores de inducción	3,4+j0,8	0,15+j0,8	
Líneas transporte 132 kV	$(8 + j17) \cdot 10^{-4}$	$(8 + j17) \cdot 10^{-4}$	
Líneas transporte 220 kV	$(4 + j17) \cdot 10^{-4}$	$(4 + j17) \cdot 10^{-4}$	
Líneas transporte 380 kV	$(2 + j17) \cdot 10^{-4}$	$(2 + j17) \cdot 10^{-4}$	

5.4.2. Redes de secuencia.

El estudio de fallos asimétricos consiste en la determinación de las componentes simétricas de las corrientes desequilibradas que circulan. Las componentes de secuencia de la corriente dan lugar a caídas de tensión solamente en la misma secuencia, en un sistema equilibrado. Entonces las corrientes de cualquier secuencia pueden considerarse circulando por una red independiente conformada exclusivamente por las impedancias a la corriente de tal secuencia.

La red de secuencia corresponde al circuito monofásico equivalente conformado por las impedancias a la corriente de una secuencia particular.

Existen tres tipos de redes de secuencia: secuencia directa (positiva), inversa (negativa) y homopolar (cero).

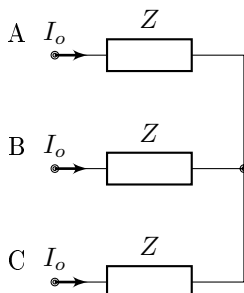
5.4.2.1. Redes de secuencia de cargas equilibradas.

En los sistemas de potencia es común encontrar cargas pasivas, que son simuladas a través de impedancias. Si se considera que son lineales estáticas y simétricas, sus redes de secuencia son iguales ya que se conoce que la impedancia de los circuitos es independiente de la secuencia, es decir, es invariante ante el cambio del orden de las fases, a condición de que las tensiones aplicadas estén equilibradas.

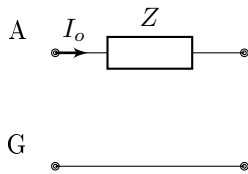
$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{carga} \quad (5.64)$$

Por lo tanto, las redes equivalentes para cargas estáticas en secuencia directa e inversa son iguales, con la salvedad que la forma del modelo equivalente de secuencia cero depende de la forma de conexión de la impedancia.

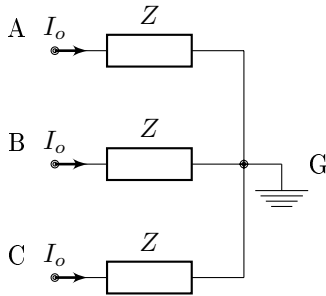
Carga conectada en estrella sin conexión del neutro a tierra (homopolar). Cuando una carga se conecta en estrella con neutro aislado, la suma de las corrientes que van hacia el neutro es cero, por lo que las corrientes no poseen componentes de secuencia homopolar (no hay camino de retorno para la secuencia homopolar por el neutro). En este caso, las componentes de secuencia homopolar no puede circular por las líneas.



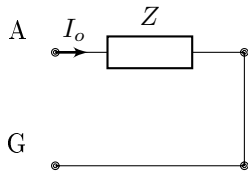
El circuito equivalente será:



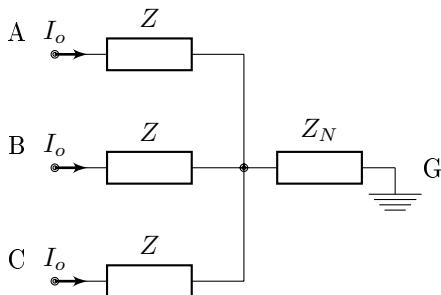
Carga conectada en estrella con el neutro puesto a tierra (homopolar). En este caso las corrientes de secuencia pueden circular por las líneas.



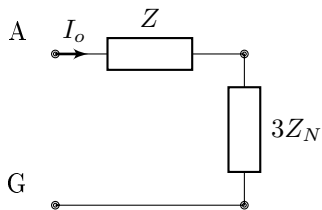
El circuito equivalente es:



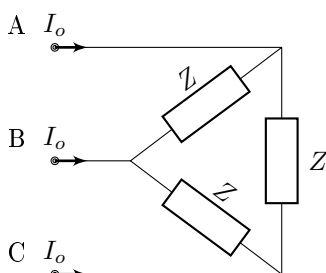
Carga conectada en estrella con el neutro puesto a tierra a través de una impedancia (homopolar). En este caso las corrientes de secuencia pueden circular por las líneas y por la impedancia Z_N circula $3\underline{I_o}$.



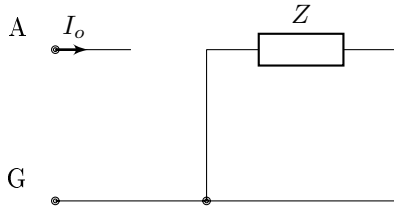
El circuito equivalente es:



Carga conectada en triángulo (homopolar). Una carga conectada en triángulo no dispone de un camino de retorno, presentando una impedancia infinita a las corrientes de secuencia homopolar.



El circuito equivalente es:



5.4.2.2. Redes de secuencia de líneas de transmisión.

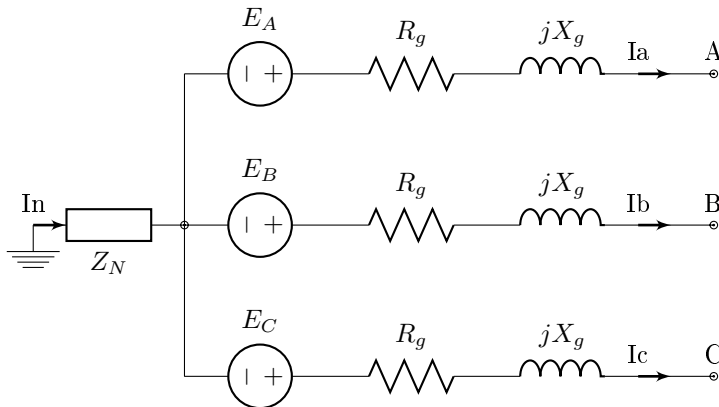
Ante las corrientes de secuencia directa e inversa no presentan invariabilidad, por lo que se consideran iguales.

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_{linea} \quad (5.65)$$

Cuando por las líneas circulan solamente corrientes de secuencia homopolar, estas son idénticas en todas las fases y retornan por tierra o por el cable de guarda. Las corrientes de secuencia homopolar, originan un campo magnético muy diferente al debido a la circulación de las corrientes de secuencia directa e inversa, originando una reactancia de secuencia homopolar de 2 a 3.5 veces superior a la de secuencia directa. En el caso de las líneas de doble circuito y líneas sin cable de guarda los valores pueden ser mayores.

5.4.2.3. Redes de secuencia de un generador síncrono en vacío.

Considérese un generador síncrono en vacío operando en condiciones nominales (velocidad nominal y tensión en bornes la nominal), puesto a tierra su neutro a través de una impedancia.

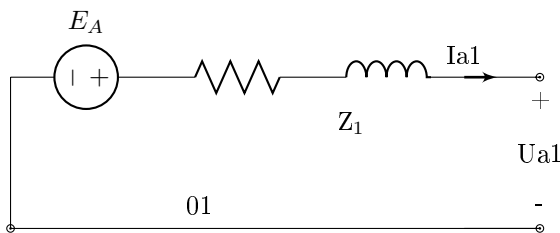


En el instante en que aparece un cortocircuito, por las fases del alternador circulan las corrientes de fase I_a , I_b , I_c . Si el fallo implica un contacto a tierra aparecerá una corriente por el neutro I_n . En situación de fallo una o dos corrientes pueden tener un valor nulo, pero las restantes corrientes pueden descomponerse en sus componentes simétricas independientemente de lo desequilibrada que se encuentren.

Red de secuencia directa:

Los generadores son diseñados para entregar tres tensiones equilibradas, por lo que las tensiones solo poseen secuencia positiva, entregando solo tensiones equilibradas de esa secuencia.

El circuito equivalente monofásico del generador en secuencia directa es:

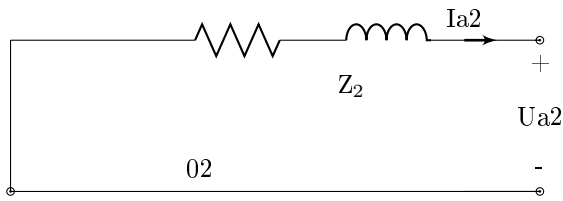


La impedancia de secuencia directa es $\underline{Z}_1$.

En función de las condiciones del estado de cortocircuito, la impedancia directa puede ser definida para el régimen subtransitorio, transitorio o permanente.

Red de secuencia inversa:

La red de secuencia inversa está formada por las impedancias de secuencia inversa, por lo que el circuito equivalente monofásico del generador en secuencia inversa es:



La impedancia de secuencia inversa es Z_2 .

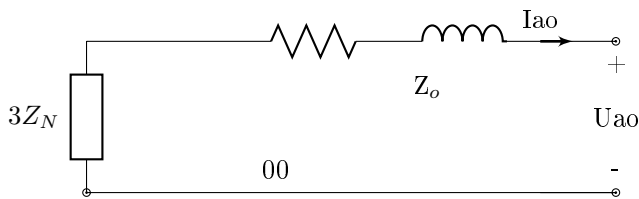
Las corrientes de secuencia inversa que circulan por el devando inducido producen un campo magnético giratorio que gira en sentido contrario al rotor y por tanto producen corrientes de doble frecuencia en el circuito de excitación y en el devanado amortiguador, por lo que las f.m.m. producidas por las corrientes de secuencia inversa en el inducido cambia la dirección de la constante con relación a los ejes directos y de cuadratura, por lo que:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (5.66)$$

siendo X_d'' y X_q'' las reactancias subtransitoria de eje directo y de eje inverso respectivamente.

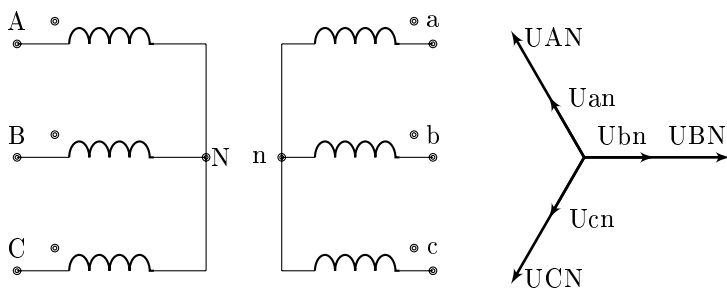
Red de secuencia homopolar:

La red de secuencia inversa está formada por las impedancias de secuencia homopolar y la impedancia de puesta a tierra, por lo que el circuito equivalente monofásico del generador en secuencia inversa es:

**5.4.2.4. Desfasaje de las componentes simétricos en bancos de transformadores estrella-triángulo.**

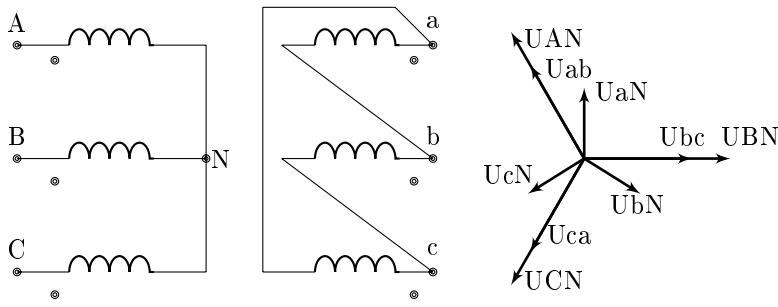
En los transformadores es común denotar los terminales de alta tensión por letras como A, B, C mientras que los de baja tensión a, b, c.

Los transformadores cuyos devanados son en conexión estrella-estrella o triángulo-triángulo, las tensiones respecto al neutro de los terminales A, B, C están en fase con las tensiones respecto al neutro de los terminales a, b, c respectivamente.



En los transformadores estrella-triángulo las tensiones de fase y línea en el primario no están en fase con las tensiones respectivas en el secundario. Debido a ello, las componentes simétricas de secuencia directa e inversa no se encuentran en fase en ambos lados del transformador. Estos desfases pueden ser $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$ o $\pm 150^\circ$.

Por ejemplo en un desfase de 30° :



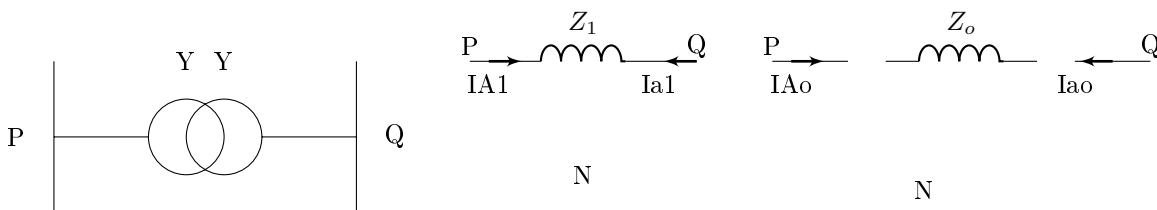
5.4.2.5. Redes de secuencia de transformadores de dos devanados.

Para el estudio de la representación de los transformadores trifásicos se debe tener claro el concepto de circuito equivalente por fase de un sistema trifásico. Un transformador trifásico puede estar constituido por tres transformadores monofásicos separados (cada uno en su propio núcleo) conectados entre sí externamente, o bien, tratarse de una sola unidad con un núcleo trifásico de una sola pieza sobre el cual están montados todos los arrollamientos. Existen dos tipos de núcleos trifásicos, el denominado tipo acorazado (shell type transformer) y el denominado transformador tipo núcleo (core type transformer).

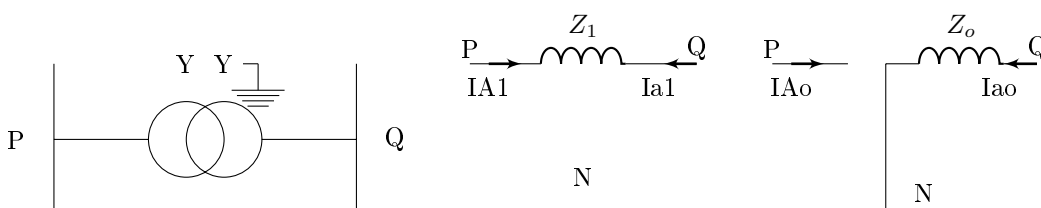
El procedimiento para determinar los circuitos equivalentes por fase para las redes de secuencia directa, inversa y homopolar es:

1. Cada uno de los transformadores monofásicos que constituye el transformador trifásico se representa por su circuito equivalente visto desde los terminales de las inductancias.
2. Las conexiones entre transformadores monofásicos para formar un banco trifásico se representan circuitualmente efectuando estas mismas conexiones entre los terminales de los circuitos equivalentes de cada unidad.
3. Una vez obtenida la representación circuital de las conexiones del banco trifásico, se le aplican a uno de los lados del banco de tensiones de secuencia directa, inversa y homopolar, según la red de secuencia que se esté determinando. El otro lado del banco se considera conectado a un banco de impedancias simétricas con neutro conectado a tierra (esta última condición solo es necesaria en el caso de la red de secuencia homopolar), de modo de que pueden circular por las líneas las corrientes de la secuencia que se estudia.
4. Asumiendo que la conexión del banco es simétrica, y que los restantes transformadores monofásicos que la forma son idénticos, las corrientes que circulan por el circuito trifásico serán solo de la secuencia correspondiente a las tensiones aplicadas.
5. De la relación entre tensiones y corrientes en este circuito trifásico se tratará de obtener un circuito equivalente por fase para las cantidades de secuencia correspondiente.

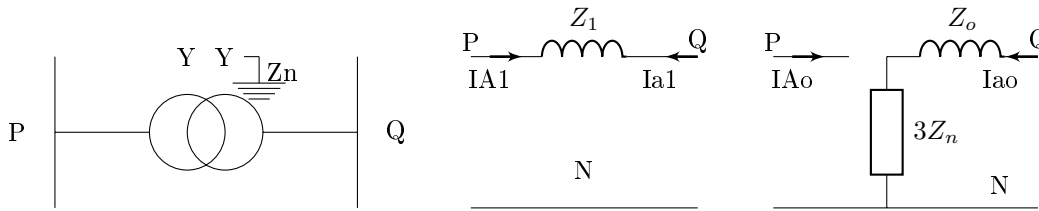
Conexión estrella-estrella sin conexión a tierra (Y-Y). Las estrellas no conectada a tierra, en secuencia homopolar, se comporta como un circuito abierto para las partes del sistema por el conectado. En cambio, la estrella conectada a tierra, permite la circulación de la corriente homopolar.



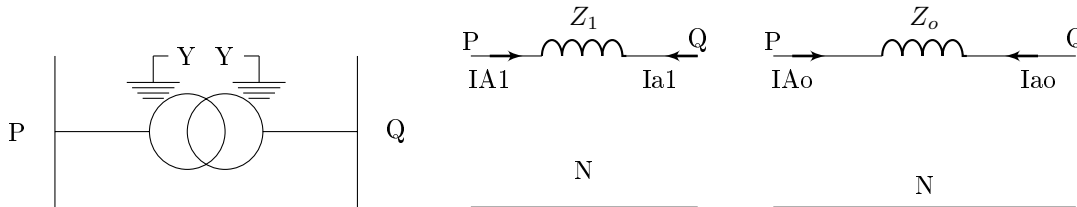
Conexión estrella-estrella con un neutro a tierra (Y-Yn). La estrella no conectada a tierra, en secuencia homopolar, se comporta como un circuito abierto para las partes del sistema por el conectado. En cambio, la estrella conectada a tierra, permite la circulación de la corriente homopolar.



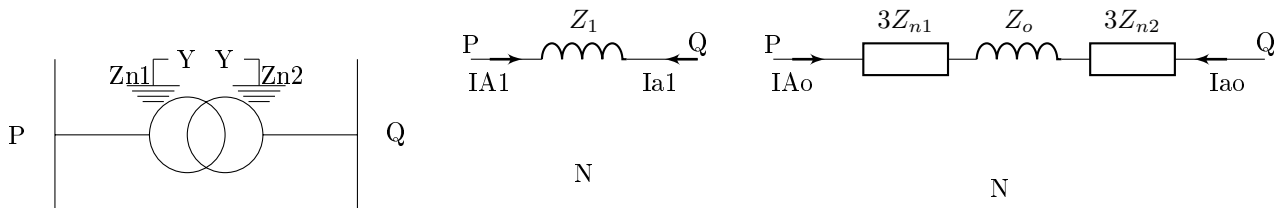
Si existiese impedancia de puesta a tierra, tendríamos:



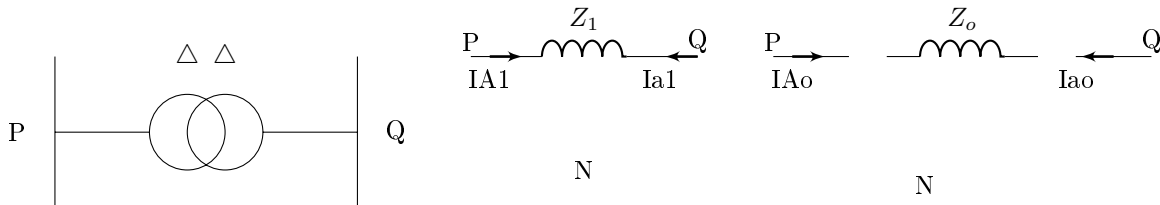
Conexión estrella-estrella con dos neutros a tierra (Y_n-Y_n). Las estrellas conectadas a tierra, en secuencia homopolar, permiten la circulación de la corriente homopolar.



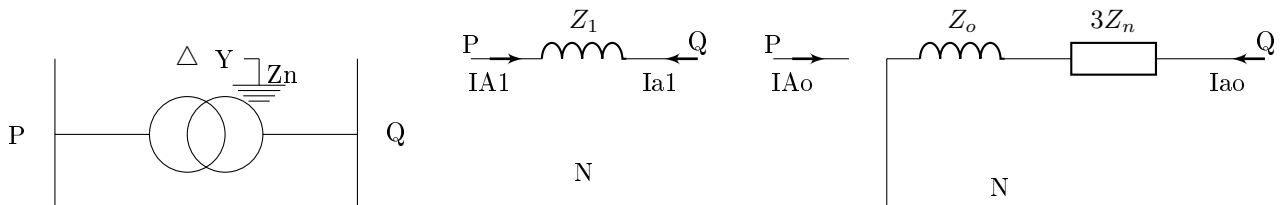
Si hubiese impedancias conectadas entre el centro de las estrellas y tierra, tendríamos:



Conexión triángulo-triángulo ($\Delta-\Delta$). Los triángulos en secuencia homopolar, se comporta como un circuito abierto para las partes del sistema por el conectado.

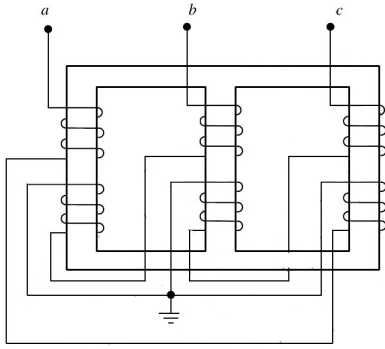


Conexión triángulo-triángulo ($\Delta-Y_n$). El triángulo en secuencia homopolar, se comporta como un circuito abierto para las partes del sistema por el conectado. En cambio, la estrella conectada a tierra, permite la circulación de la corriente homopolar.



Transformadores de puesta a tierra. Los transformadores de puesta a tierra, son empleados normalmente con el objetivo de proporcionar una conexión a tierra en un sistema trifásico que de otra manera dispondría de un neutro aislado. En condiciones de operación los transformadores no transmiten potencia, pero en condiciones de desequilibrios permiten la circulación de corrientes a tierra. En Europa la conexión típica en Zig-Zag.

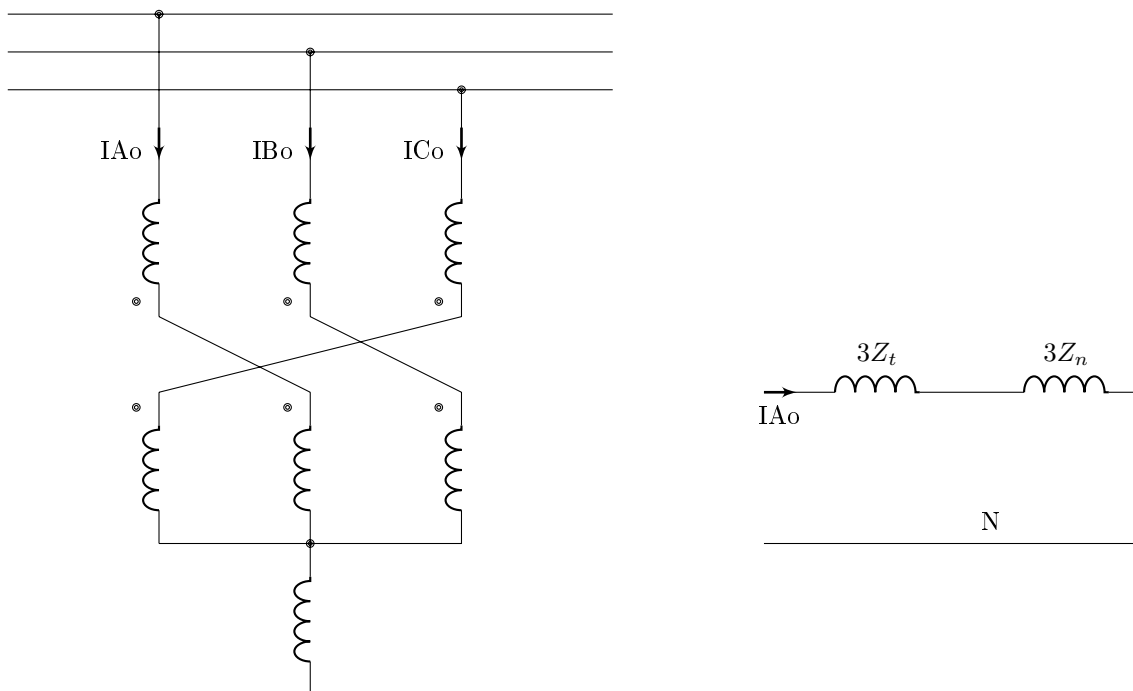
Este transformador se basa en tres unidades monofásicas de dos arrollamientos y de relación 1:1:



Se conecta el arrollamiento primario de una unidad en serie con el secundario de otra unidad y el resto de los arrollamiento se conectan de manera similar, estando conectados todos los arrollamientos en polaridad contraria.

En condiciones de equilibrio, es decir, secuencia directa o inversa, no pueden circular corrientes por los arrollamientos, debido a la compensación de flujo producido por las corrientes al circular por los arrollamientos. Por lo tanto, el circuito equivalente de secuencia directa e inversa en un circuito abierto.

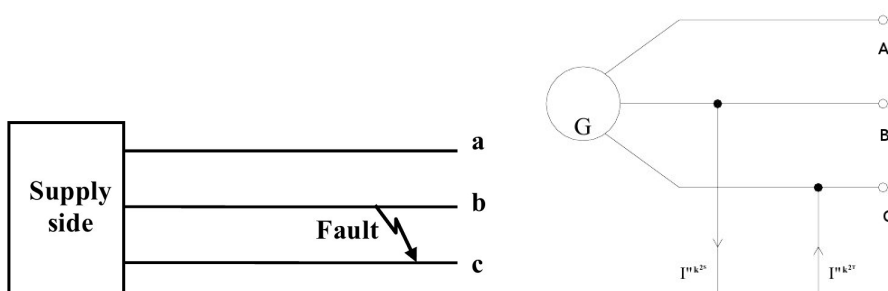
Cuando circulan las corrientes homopolares:



5.5. Análisis de cortocircuitos desequilibrados.

Fuera de los cortocircuitos trifásicos simétricos, en todos los demás casos ya no existirá equilibrio entre las fases y por tanto será necesario incorporar las componentes inversa y homopolar.

5.5.0.6. Cortocircuito línea-línea (bifásico).



Vamos a considerar el caso de un cortocircuito bifásico en bornes de una fuente de alimentación. Las condiciones iniciales son:

$$\underline{I}_a = 0; \underline{I}_b = \underline{I}_c; \underline{V}_b = \underline{V}_c \quad (5.67)$$

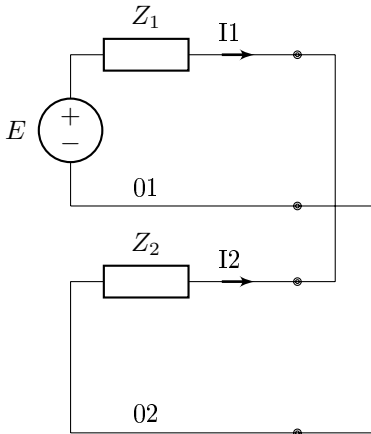
Utilizando las componenes simétricas de corrientes y tensiones, tendremos:

$$\begin{Bmatrix} \underline{I}_{a0} \\ \underline{I}_{a1} \\ \underline{I}_{a2} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ \underline{I}_b \\ -\underline{I}_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a - a^2)\underline{I}_b \\ -\frac{1}{3}(a - a^2)\underline{I}_b \end{Bmatrix} \quad (5.68)$$

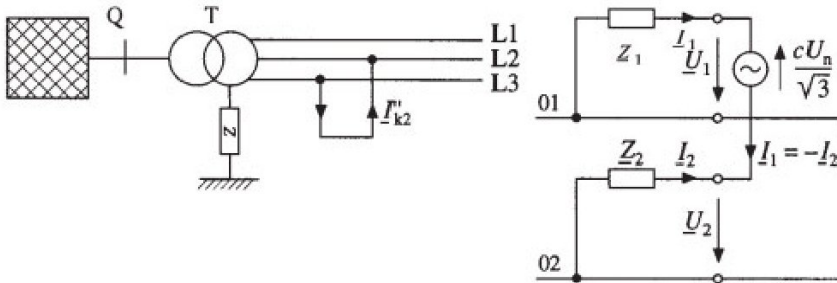
Luego

$$\underline{I}_{a0} = 0; \quad \underline{I}_{a1} = -\underline{I}_{a2}; \quad \underline{I}_1 = -\underline{I}_2 \quad (5.69)$$

A partir de la ecuación 5.69, se observa que las redes de secuencia directa e inversa tienen que estar colocadas según la figura siguiente:

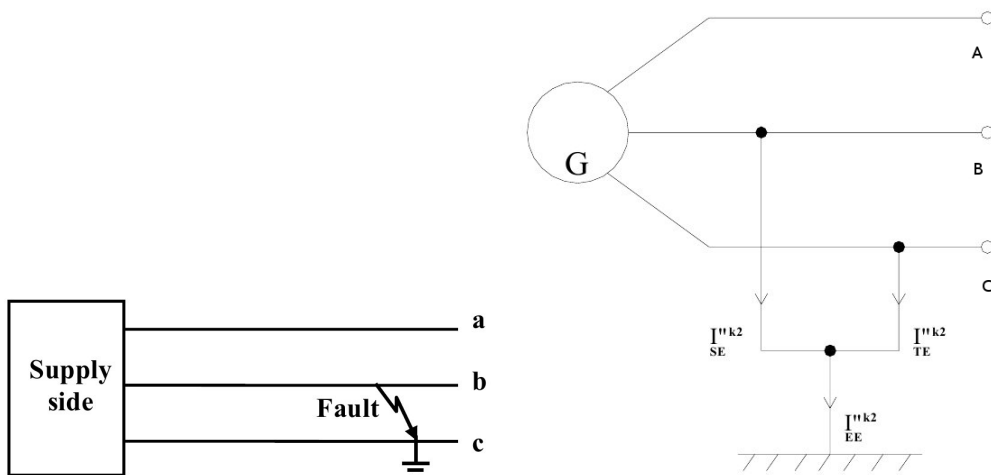


El circuito equivalente utilizando solamente una única fuente ficticia en el punto de cortocircuito es el siguiente:



La fuente equivalente externa siempre se coloca en serie con el circuito de secuencia directa.

5.5.0.7. Cortocircuito línea-línea a tierra (bifásico a tierra).



Las condiciones iniciales son:

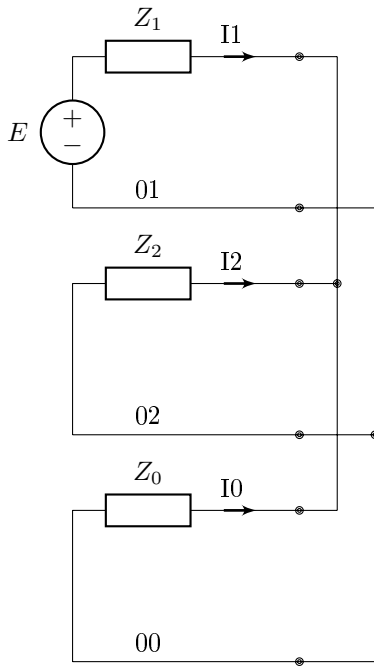
$$\underline{I}_a = 0; \underline{V}_b = \underline{V}_c = 0 \quad (5.70)$$

Utilizando las componenes simétricas , tendremos:

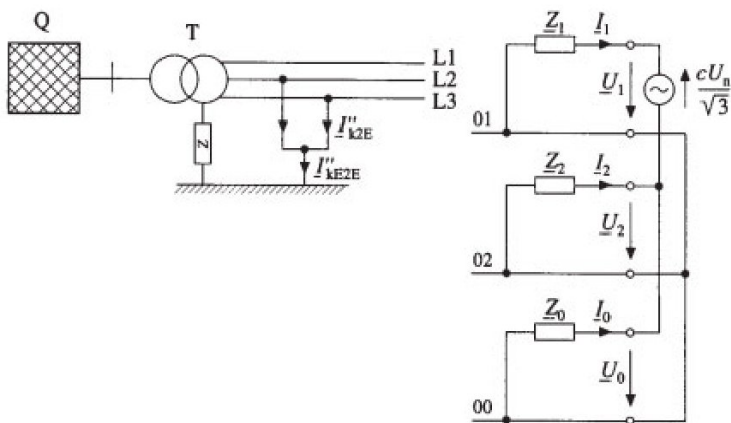
$$\begin{Bmatrix} \underline{U}_{a0} \\ \underline{U}_{a1} \\ \underline{U}_{a2} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{U}_a \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.71)$$

$$\underline{U}_{a0} = \underline{U}_{a1} = \underline{U}_{a2} = \frac{1}{3} \underline{U}_a \quad (5.72)$$

A partir de la ecuación 5.72, se observa que las redes de secuencia directa, inversa y hompolar tienen que estar según la figura siguiente:

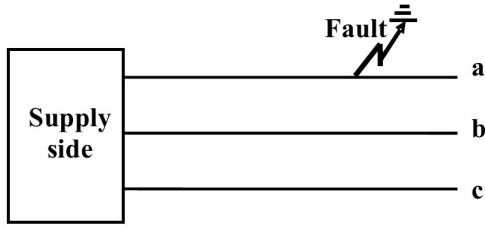


Utilizando el método de la fuente equivalente:



La fuente equivalente externa siempre se coloca en serie con el circuito de secuencia directa.

5.5.0.8. Cortocircuito línea a tierra (monofásico).



Las condiciones iniciales son:

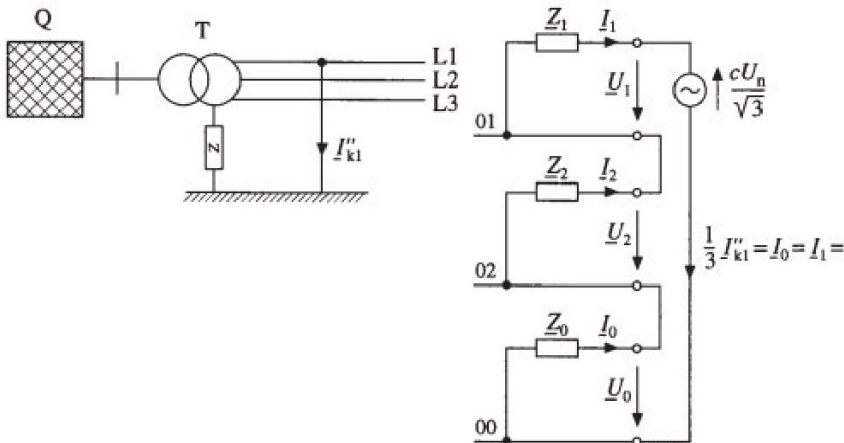
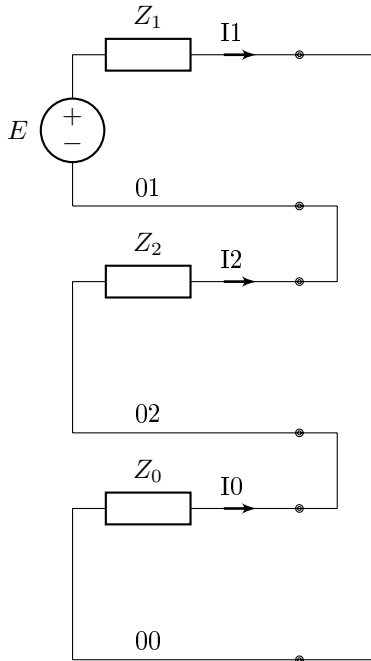
$$\underline{V}_a = 0; \underline{I}_b = \underline{I}_c = 0 \quad (5.73)$$

Utilizando las componenes simétricas , tendremos:

$$\begin{Bmatrix} \underline{I}_{a0} \\ \underline{I}_{a1} \\ \underline{I}_{a2} \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5.74)$$

$$\underline{I}_{a0} = \underline{I}_{a1} = \underline{I}_{a2} = \frac{1}{3} \underline{I}_a \quad (5.75)$$

A partir de la ecuación 5.75, se observa que las redes de secuencia directa, inversa y homopolar tienen que estar según la figura siguiente:



La fuente equivalente externa siempre se coloca en serie con el circuito de secuencia directa.