

Representación de Sistemas de Potencia

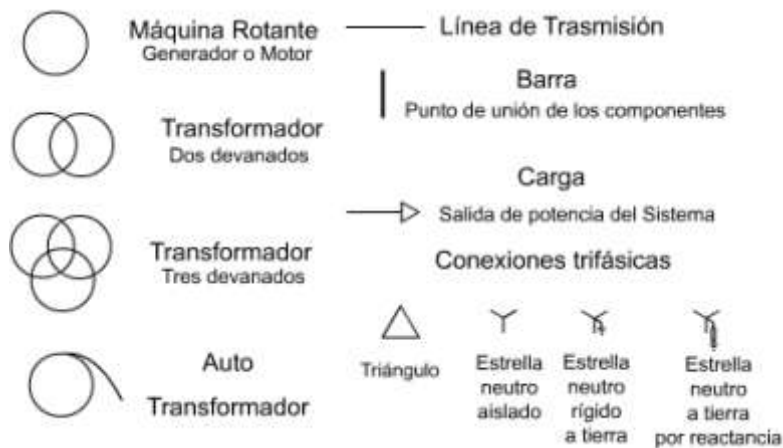
Diagrama Unifilar

Un sistema trifásico equilibrado, puede ser representado como un circuito monofásico formado por una de las fases y un neutro de retorno.

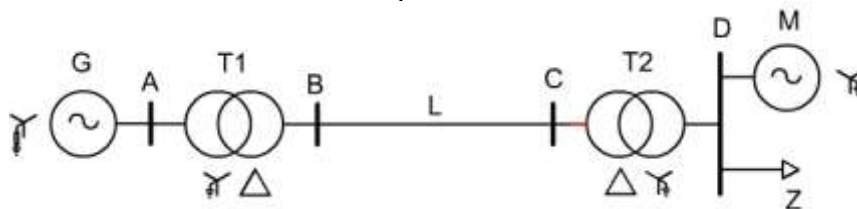
Una simplificación mayor se hace suprimiendo el neutro de retorno e indicando sus componentes por medio de símbolos normalizados.

Al diagrama resultante de esta simplificación se lo llama Diagrama Unifilar.

Algunos símbolos utilizados en los diagramas unifilares:



Ejemplo de un unifilar de un sistema de potencia:



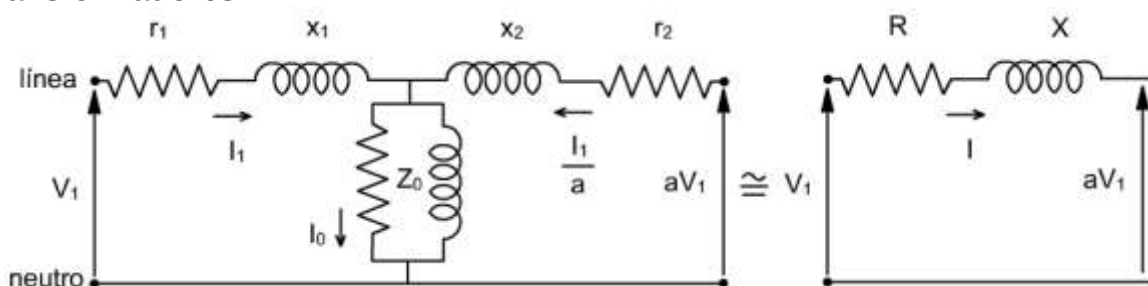
La cantidad de información que incluye un diagrama unifilar, depende del estudio al que se someterá al sistema de potencia.

Diagrama de impedancias

Un diagrama de impedancias esta formado por los circuitos equivalentes de los componentes del sistema. La representación es monofásica y el retorno se hace a través del neutro del sistema. Las conexiones del neutro de los componentes a tierra, se indican solo cuando se tiene la seguridad de que el sistema funcionará en forma desequilibrada, en este caso se lo representa por medio de las componentes simétricas, lo que será objeto de estudio más adelante.

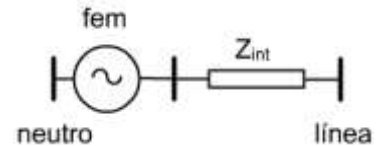
Circuitos equivalentes

Transformadores:



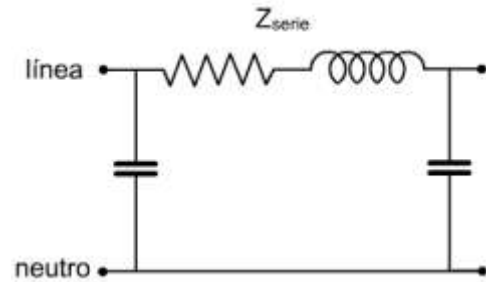
En general se desprecia la corriente magnetizante (I_0), reduciéndose el circuito equivalente a una impedancia en serie: ($R_1 = r_1 + a^2 \cdot r_2$; $X_1 = x_1 + a^2 \cdot x_2$), en donde: $a = \frac{N_1}{N_2}$, es la relación entre la cantidad de espiras del primario y secundario.

Máquinas rotantes: Se representan por una f.e.m. en serie con su impedancia interna.



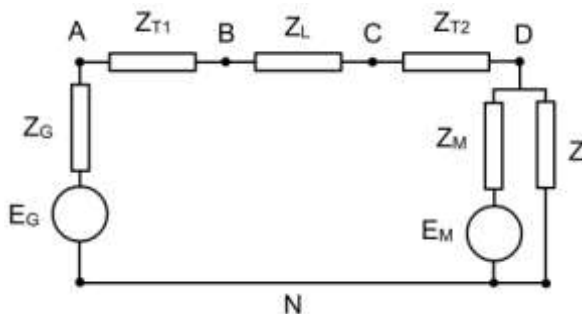
Línea: Se representa por su impedancia serie, y su capacidad al neutro en paralelo. En la representación conocida como Circuito π (Figura), la capacidad se indica por mitades en cada extremo de la línea, se desprecia la conductancia a tierra debida, fundamentalmente, al efecto corona.

(Existen otras formas de representar una línea que serán estudiadas en el capítulo correspondiente).



En algunos estudios se puede despreciar la influencia de la capacidad en paralelo (Ej. Cortocircuito), quedando la línea representada solo por su impedancia serie.

Para el unifilar ejemplo y hechas las aproximaciones en los circuitos equivalentes, el diagrama de impedancias es el siguiente:



Se supone al sistema en equilibrio, o sea que a pesar de tener información sobre cómo se conectan los neutros a la tierra, no se incluirá en esta representación. (En el capítulo de Componentes Simétricas se estudia el caso de sistemas desequilibrados)

Para que un sistema quede completamente representado es necesario conocer los valores de impedancias y fuerzas electromotrices que lo componen. Cada elemento posee un conjunto de valores característicos que lo define:

Líneas

Conocida su configuración geométrica, el tipo de conductor y su longitud, es posible determinar sus parámetros: Resistencia; Reactancia inductiva y Reactancia capacitiva.

Cargas

Por lo general se conoce su potencia y la tensión a la que se entrega esa potencia,

lo que permite calcular la impedancia de carga: $Z = \frac{V^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{S [\text{MVA}]} = [\Omega]$, tomando

tensión de línea y potencia aparente trifásica.

Máquinas Rotantes: Los datos los entrega el fabricante. Se pueden conocer: La potencia; la tensión; el $\cos \phi$ y los valores de reactancia.

Por ejemplo los datos de un generador pueden ser:

$$G \begin{cases} S_n = 50 \text{ MVA} \\ U_n = 13,8 \text{ kV} \\ x_{\text{int.}} = 12\% \end{cases}$$

El 12% de reactancia interna esta referido a un valor característico de la máquina llamado Impedancia Base, el cual se obtiene en función de la potencia nominal y la

tensión nominal: $Z_{b_G} = \frac{U_n^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{S_n [\text{MVA}]} = [\Omega]$

Para el caso del ejemplo: $Z_{b_G} = \frac{(13,8)^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{50 [\text{MVA}]} = 3,81 \Omega$, o sea que el valor en Ω de

la reactancia interna es: $x_{\text{int.}[\Omega]} = \frac{x_{\text{int.}[\%]}}{100} \cdot Z_{b_G} = \frac{12}{100} \cdot 3,81 = 0,457 \Omega$.

En general suelen darse los valores en por unidad, esto es el valor porcentual dividido 100 (Ej: $12\% \Rightarrow \frac{12}{100} = 0,12 \text{ pu}$)

Transformadores: En un transformador existe un valor de potencia nominal para todo el transformador, pero cada devanado tiene un valor de tensión propio, esto hace que hayan dos valores de impedancia base, uno para cada devanado, debiéndose referir la reactancia del transformador según el lado de tensión en que nos encontramos.

Ej.: $T \begin{cases} S_n = 30 \text{ MVA} \\ U_n = 13,2/132 \text{ kV} \\ x_T = 0,1 \text{ pu} \end{cases}$

La impedancia base de BT (baja tensión): $Z_{b_{BT}} = \frac{(13,2)^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{30 [\text{MVA}]} = 5,808 \Omega$, y la

reactancia referida a BT será: $x_{BT[\Omega]} = x_{T[\text{pu}]} \cdot Z_{b_{BT}} = 0,1 \cdot 5,808 = 0,5808 \Omega$

Sabemos que la reactancia referida al primario se puede referir al secundario afectándola por la relación de espiras al cuadrado y que $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$, o sea que:

$x_{AT[\Omega]} = \frac{1}{a^2} x_{BT[\Omega]} = \left(\frac{132}{13,2} \right)^2 \cdot 0,5808 = 58,08 \Omega$. Por otro lado, si usamos la

impedancia base de AT: $Z_{b_{AT}} = \frac{(132)^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{30 [\text{MVA}]} = 580,8 \Omega$ referimos la reactancia del

transformador a esta base: $x_{AT[\Omega]} = x_{T[\text{pu}]} \cdot Z_{b_{AT}} = 0,1 \cdot 580,8 = 58,08 \Omega$, como vemos se obtiene el mismo resultado.

Como conclusión, podemos decir que la reactancia de un transformador, en por unidad, es independiente del lado del devanado que estemos considerando.

Teniendo en cuenta esto último, en un sistema de potencia podemos realizar todos los cálculos en por unidad independientemente de los cambios de tensión de los transformadores. Para esto se debe elegir un valor de potencia base, para todo el sistema y un valor de tensión base en una barra determinada del sistema y obtener

valores en por unidad para todas las tensiones de las barras del sistema en función de las relaciones de transformación de los transformadores.

Para el del sistema ejemplo:

Se elige: S_b [MVA]

En la barra A, se elige: U_{b_A} [kV]

Recorriendo el sistema, cada vez que se atraviesa un transformador, se debe determinar una nueva tensión base en función de la relación de transformación del transformador. En el sistema ejemplo:

En la barra B: $U_{b_B} = U_{b_A} \cdot \frac{U_{AT}}{U_{BT}}$, en la barra C no hay cambio de tensión, por lo

tanto: $U_{b_C} = U_{b_B}$. En la barra D: $U_{b_D} = U_{b_C} \cdot \frac{U_{BT}}{U_{AT}}$

Una vez determinadas todas las tensiones base (una por cada barra), aplicando los teoremas de circuito eléctricos podemos calcular la impedancia y corriente base en cada barra:

Impedancia base en la barra i: $Z_{b_i} = \frac{U_{b_i}^2 [\text{kV} \cdot \text{kV}]}{S_n [\text{MVA}]} = [\Omega]$

Corriente base en la barra i: $I_{b_i} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{b_i} [\text{kV}]}{S_n [\text{MVA}]} = [\text{kA}]$

Para que los valores en por unidad sean equivalentes deben estar referidos todos a una misma base de potencia y a la base de tensión correspondiente al sector del sistema en donde nos encontramos.

Puede ocurrir que los valores base propios de un componente no coincidan con las bases elegidas para el sistema completo; en este caso es necesario recurrir a un cambio de base para adecuar el valor por unidad del componente a la base del sistema.

Ejemplo: Cambio de base de la reactancia del generador del sistema dado:

Suponer que la potencia base elegida para el sistema es: $S_b = 100 \text{ MVA}$ y que la tensión base para la barra A (barra donde se encuentra conectado el generador) es $U_{b_A} = 13,2 \text{ kV}$

1º - Convertimos a Ω el valor en por unidad de la reactancia del generador, usando las bases propias de la máquina: $x_{G[\Omega]} = x_{G[\text{p.u.}]} \cdot \frac{U_{n_G}^2}{S_{n_G}}$, reemplazando por los datos

del generador: $x_{G[\Omega]} = \frac{12}{100} \cdot \frac{13,8^2 \text{ kV}^2}{50 \text{ MVA}} = 0,457 \Omega$

2º - Con el valor en Ω de la reactancia convertirla a por unidad, pero usando los valores base del sistema:

La impedancia base del sistema correspondiente a la barra A es:

$$Z_{bA} = \frac{U_{bA}^2}{S_b} = \frac{13,2^2 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 1,724 \Omega$$

Para convertir a la reactancia del generador a un valor por unidad compatible con el sistema, debemos dividir el valor en ohms de dicha reactancia por la impedancia base del sistema que corresponde a la barra A:

$$X_{G[0/1]A} = X_{G[\Omega]} \cdot \frac{S_b}{U_{bA}^2} = \frac{0,457 \Omega}{1,724 \Omega} = 0,265$$

Podemos sintetizar el cambio de base en la fórmula general:

$$X_{G[0/1]A} = X_{G[0/1]} \cdot \frac{U_{nG}^2}{U_{bA}^2} \cdot \frac{S_b}{S_{nG}} \text{ en donde:}$$

$X_{G[0/1]}$ = reactancia del generador en tanto por uno referida a los datos propios.

U_{nG} = Tensión nominal del generador.

S_{nG} = Potencia nominal del generador.

U_{bA} = Tensión base del sistema en la barra A.

S_b = Potencia base del sistema.

Aplicando la fórmula para el caso del generador:

$$X_{G[0/1]A} = \frac{12}{100} \cdot \frac{13,8^2 \text{ kV}^2}{13,2^2 \text{ kV}^2} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{50 \text{ MVA}} = 0,262, \text{ la diferencia entre este valor y el}$$

obtenido anteriormente se debe a errores de aproximación en los cálculos, el resultado más exacto se obtiene aplicando la fórmula.

De la misma manera se procede con los transformadores, teniendo en cuenta que no se deben mezclar los niveles de tensión en los cálculos. (si se usa la tensión nominal de BT del transformador, se debe usar la tensión base del sistema que corresponde a la barra donde está conectado el devanado de BT)

Bancos de transformadores

Para poder cargar al banco trifásico en forma balanceada, se deben cumplir con las siguientes condiciones:

1. Todos los transformadores deben tener idéntica relación de transformación.
2. Todos los transformadores deben tener el mismo valor de impedancia.
3. Todos los transformadores deben conectar en el mismo tap o derivación.

Conexión delta-delta.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas de alumbrado pequeñas y cargas trifásica simultáneamente. Para esto se puede localizar una derivación o Tap en el punto medio del devanado secundario de uno de los transformadores conectándose a tierra y se conecta también al neutro del secundario. De esta manera, las cargas monofásicas se conectan entre los conductores de fase y neutro, por lo tanto, el transformador con la derivación en el punto medio toma dos terceras partes de la carga monofásica y una tercera parte de la carga trifásica. Los otros dos transformadores cada uno toma un tercio de las cargas monofásicas y trifásica.

Conexión delta abierta-delta abierta.

La conexión delta-delta representa en cierto modo la más flexible de las conexiones trifásicas. Una de las ventajas de esta conexión, es que si uno de los transformadores se daña o se retira de servicio, los otros dos pueden continuar operando en la llamada conexión “delta-abierta” o “V”. Con esta conexión se suministra aproximadamente el 58% de la potencia que entrega un banco en conexión delta-delta.

En la conexión delta abierta, las impedancias de los transformadores no necesitan ser iguales necesariamente, aunque esta situación es preferible cuando es necesario cerrar la delta con un tercer transformador.

La conexión delta abierta, se usa normalmente para condiciones de emergencia, cuando en una conexión delta-delta uno de los transformadores del banco se desconecta por alguna razón. En forma similar a la conexión delta-delta, del punto medio del secundario de uno de los transformadores se puede tomar una derivación para alimentar pequeñas cargas de alumbrado o bien otros tipos de cargas.

Conexión estrella-delta.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes de un sistema trifásico de alimentación conectado en estrella. Tiene la limitante de que para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en forma simultánea, no dispone del neutro.

Por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión.

Conexión estrella-estrella.

Esta conexión se usa cuando se requiere alimentar grandes cargas monofásicas en forma simultánea, con cargas trifásicas. También se usa sólo si el neutro del primario se puede conectar sólidamente al neutro de la fuente de alimentación ya sea con un neutro común o a través de tierra. Cuando los neutros de ambos lados del banco de transformadores no se unen, el voltaje de línea a neutro tiende a distorsionarse (no es senoidal). La conexión estrella-estrella, se puede usar también sin unir los neutros, a condición de que cada transformador tenga un tercer devanado que se conoce como “devanado terciario”. Este devanado terciario está siempre conectado en delta.

Con frecuencia, el devanado terciario se usa para alimentar los servicios de la Subestación.

Grupos de conexión de bancos de transformadores trifásicos

Identificación		Diagrama		Esquema		(*) Relación de transf. compuestas $\frac{U_{AT}}{U_{BT}}$
Defasaje (Ángulo de Baja tens. en retraso)	Denomina- ción C.E.I.	AT	BT	AT	BT	
0°	Dd0					$\frac{N_A}{N_B}$
	Yy0					$\frac{N_A}{N_B}$
	Dz0					$\frac{2N_A}{3N_B}$
150°	Dy5					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$
	Yz5					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$
180°	Dd6					$\frac{N_A}{N_B}$
	Yy6					$\frac{N_A}{N_B}$
	Dz6					$\frac{2N_A}{3N_B}$
-30	Dy11					$\frac{N_A}{\sqrt{3}N_B}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N_A}{N_B}$
	Yz11					$\frac{2N_A}{\sqrt{3}N_B}$
(*) U_{AT} : Tensión de línea en AT U_{BT} : Tensión de línea en BT						
N_A : Espiras por fase en AT N_B : Espiras por fase en BT						

Transformadores de tres devanados

Las impedancias de dispersión vienen expresadas en % o %/1 tomando como base un arrollamiento y se obtienen por medio del ensayo de cortocircuito del transformador.

Z_{ps} = Impedancia de dispersión medida en el primario, con el secundario en cortocircuito y el terciario abierto.

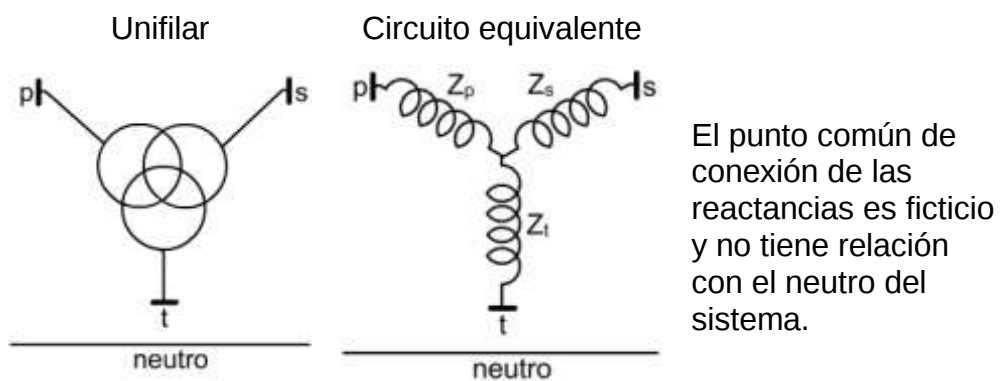
Z_{pt} = Impedancia de dispersión medida en el primario, con el terciario en cortocircuito y el secundario abierto.

Z_{st} = Impedancia de dispersión medida en el secundario, con el terciario en cortocircuito y el primario abierto.

Para conocer las impedancias individuales de cada devanado, sabemos que se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} Z_{ps} = Z_p + Z_s \\ Z_{pt} = Z_p + Z_t \\ Z_{st} = Z_s + Z_t \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Resolviendo el sistema de tres} \\ \text{ecuaciones con tres incógnitas} \\ \text{planteado se obtiene:} \end{array} \quad \begin{cases} Z_p = \frac{1}{2} \cdot (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s = \frac{1}{2} \cdot (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t = \frac{1}{2} \cdot (Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{cases}$$

Representación de los transformadores de tres devanados



BIBLIOGRAFÍA

Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.-Willian D. Stevenson. Ed.Mcgraw-Hill