

Figura 5.6. Diagrama unifilar.

final de ella, otro transformador que reduce la tensión desde el nivel de tensión de la línea hasta el del nudo al que están conectadas las cargas. Existen dos cargas, una de impedancia constante, que es una batería de condensadores, y otra una carga de potencia constante.

A partir del diagrama unifilar, cada uno de esos elementos reales se puede sustituir por los elementos de circuito del modelo eléctrico que los representan. De esta forma, en el sistema de la Figura 5.6, el generador se representa por una fuente de tensión ideal, cada transformador por su impedancia serie, la línea por su equivalente en "pi" y la batería de condensadores por su impedancia equivalente. Así se ha pasado de una representación esquemática del sistema a una representación eléctrica que consiste en un circuito que se puede analizar y resolver; este circuito es el diagrama de impedancias y admitancias que, para el ejemplo descrito, es el circuito de la Figura 5.7.

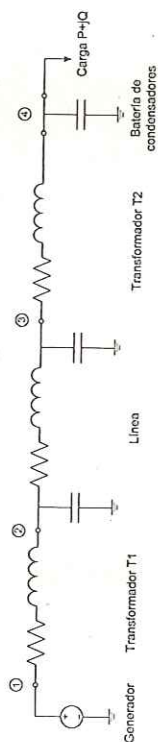


Figura 5.7. Diagrama de impedancias y admitancias del sistema eléctrico de la Figura 5.6.

5.2.

El sistema en valores por unidad

En un sistema eléctrico de potencia real existen valores muy dispares de potencias, generadas, transmitidas, consumidas y nominales de equipos, de intensidades y, sobre todo, distintos niveles de tensión debidos a los transformadores. Esto hace que los valores de los elementos que lo forman y los valores de las variables eléctricas que se obtienen de su análisis, expresados todos ellos en sus unidades correspondientes, presenten cierta dispersión que dificulta en ocasiones poder calcularlos y compararlos.

Un método que permite simplificar ese cálculo y análisis es la utilización de los valores por unidad, vistos en el Capítulo 2, extendiendo su concepto desde los elementos y equipos a todo el sistema como un conjunto. Así, eligiendo como bases un conjunto apropiado de esas variables se puede hacer que todas las variables del circuito (potencias, tensiones, intensidades e impedancias) sean adimensionales, que estén expresadas en tanto por uno, y, sobre todo, que los distintos niveles de tensión que hay en el sistema "se unifique" y, por lo tanto, "desaparezcan"

los transformadores (que se representan simplemente por su impedancia serie); de esta forma el diagrama de impedancias y admitancias que representa el sistema eléctrico se reduce a un circuito plano y conexo formado por fuentes e impedancias que se resuelve, sin mayor problema, mediante las herramientas de cálculo de la teoría de circuitos.

El análisis por unidad de un sistema eléctrico necesita en primer lugar de la elección de un conjunto de magnitudes base que sea congruente y apropiado, que se obtiene siguiendo las siguientes tres reglas muy simples:

1. Se toma un único valor de potencia como potencia base para todo el sistema.
2. Se determinan las zonas correspondientes a los distintos niveles de tensión del sistema, que están delimitadas por los transformadores. Se toma la tensión de una de ellas como tensión base de esa zona y, a partir de ella, se determinan las tensiones base de las demás zonas conforme a la relación de transformación nominal de los transformadores que las conectan.
3. Para cada zona, una vez establecida la potencia base y su tensión base conforme a las dos reglas anteriores, se calculan las impedancias o admitancias en por unidad bien mediante la impedancia base de la zona (calcula por la Expresión (2.26)) o bien mediante el correspondiente cambio de bases si ya estaban en por unidad (Expresión (2.33)).

La aplicación sistemática de estas tres reglas permite obtener fácilmente los valores en por unidad del diagrama de impedancias y admitancias de un sistema eléctrico de potencia. El ejemplo que se desarrolla a continuación ilustra este método.

EJEMPLO 5.1

Para el sistema de cuatro nudos representado por el diagrama unifilar de la Figura 5.6 y los valores nominales de sus elementos dados a continuación, calcular el diagrama de impedancias y admitancias y los valores de sus elementos en por unidad, tomando como potencia base y tensión base las nominales del generador.

Generador: 100 MVA, 36 kV, 50 Hz, $\frac{2\pi}{220}$
 Transformador T1: 125 MVA, 220/36 kV, $u_{ec} = 9\%$
 Transformador T2: 100 MVA, 220/66 kV, $u_{ec} = 8\%$
 Línea: $R = 0,03 \Omega/\text{km}$, $L = 0,7 \text{ mH}/\text{km}$, $C = 3,1 \text{ nF}/\text{km}$, longitud 100 km.
 Batería de condensadores: 3,25 $\mu\text{F}/\text{fase}$, conexión en triángulo.
 Carga de potencia constante: 50 MW, con un factor de potencia 0,8 inductivo.

SOLUCIÓN

El primer paso es determinar las zonas correspondientes a los distintos niveles de tensión que hay en el sistema. Los dos transformadores definen tres zonas: una contiene al generador (nudo 1), otra a la línea (nudos 2 y 3) y la tercera corresponde a las cargas (nudo 4).

La potencia base, S_b , para todo el sistema es 100 MVA, que es la nominal del generador. De la misma forma, conforme a lo indicado en el enunciado del ejemplo, se toma 36 kV como la tensión base de la primera zona, U_{b1} .

A partir de esa tensión base se calculan las de las otras dos zonas. Así, la relación nominal de transformación del transformador T1 permite obtener la tensión base de la zona 2:

$$U_{b2} = 36 \cdot \frac{220}{36} = 220 \text{ kV}$$

Y con ésta y la relación de transformación nominal del transformador T2, la tensión base de la zona 3 que resulta:

$$U_{b3} = 220 \cdot \frac{66}{220} = 66 \text{ kV}$$

Conocidas la potencia base y la tensión base de cada zona, se pueden calcular la impedancia base y la intensidad base mediante las Expresiones (2.25) y (2.26) y, con todas ellas, los valores en por unidad de todos los elementos del sistema.

La impedancia de cortocircuito del transformador T1 viene dada en valor por unidad (expresada en%) respecto a sus valores nominales. Como la potencia nominal del transformador es diferente a la potencia base del sistema, tan solo es necesario hacer una corrección de potencias base:

$$X_{cc1,nueva} = X_{cc1,antigua} \cdot \frac{S_{b,nueva}}{S_{b,antigua}} = 0,08 \cdot \frac{100}{125} = 0,072 \text{ p.u.}$$

La línea se representa por su modelo en "pi". Teniendo en cuenta que los datos de la línea se dan por unidad de longitud y que la longitud de la línea es de 100 km, el valor de la impedancia serie es:

$$\tilde{Z}_s = (R + j\omega L) \cdot l = 3 + j22 \Omega$$

y el de las dos ramas en paralelo (considerando la mitad de la longitud en cada extremo de la línea):

$$\tilde{Z}_p = \frac{-j}{(\omega C) \cdot l/2} = -j20,536 \Omega$$

Como la impedancia base de la zona 2 es:

$$Z_{b2} = \frac{U_{b2}^2}{S_b} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 484 \Omega$$

Los valores del equivalente en "pi" de la línea en valores por unidad son:

$$\tilde{Z}_s = \frac{3 + j22}{484} = 0,0062 + j0,04545 \text{ p.u.}$$

$$\tilde{Z}_p = \frac{-j20,536}{484} = -j42,43 \text{ p.u.}$$

En cuanto al transformador T2, como su impedancia de cortocircuito viene dada en valor por unidad (expresada en %) respecto a sus valores nominales y éstos coinciden con las bases de las zonas en las que se encuentra, no es necesario hacer ninguna corrección con lo que:

$$X_{cc2} = 0,08 \text{ p.u.}$$

La batería de condensadores es una carga de impedancia constante. Como los condensadores están en triángulo, para calcular la impedancia por fase de la batería de condensadores hay que utilizar la capacidad equivalente en estrella que es tres veces mayor, así:

$$X_c = \frac{-1}{\omega C_y} = \frac{-1}{100\pi \cdot 3 \cdot 3,25 \cdot 10^{-6}} = -326,47 \Omega$$

La impedancia base de la zona 3 es:

$$Z_{b3} = \frac{U_{b3}^2}{S_b} = \frac{(66 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 43,56 \Omega$$

lo que hace que la impedancia que supone la batería de condensadores en valor por unidad sea:

$$\tilde{Z}_c = \frac{-j326,47}{43,56} = -j7,495 \text{ p.u.}$$

Este valor también se podría haber obtenido a partir de la potencia reactiva nominal consumida por la batería de condensadores:

$$Q_c = -3U_c^2 \omega C = -3 \cdot (66 \cdot 10^3)^2 \cdot 100\pi \cdot 3,25 \cdot 10^{-6} = -13,343 \text{ MVAR}$$

que en valor por unidad resulta:

$$Q_c = \frac{-13,343}{100} = -0,13343 \text{ p.u.}$$

La impedancia se obtiene a partir de la potencia reactiva generada:

$$X_c = \frac{U_c^2 (\text{p.u.})}{Q_c (\text{p.u.})} = \frac{1^2}{-0,13343} = -7,495 \text{ p.u.}$$

que, lógicamente, es el mismo resultado:

$$\tilde{Z}_c = jX_c = -j7,495 \text{ p.u.}$$

Por último, la carga de potencia constante no puede representarse por una impedancia, como ya se ha comentado en el apartado anterior, por lo que se representa directamente mediante el valor de la potencia activa y de la potencia reactiva consumida en valores por unidad:

$$\tilde{S} = \frac{50 + j37,5}{100} = 0,5 + j0,375 \text{ p.u.}$$

Con estos valores, el diagrama de impedancias del sistema eléctrico de la Figura 5.6 es el circuito de la Figura 5.8 con todos sus valores expresados por unidad. Analizando este circuito se puede ahora calcular cualquier magnitud eléctrica del mismo, tal y como se hace en el ejemplo siguiente.

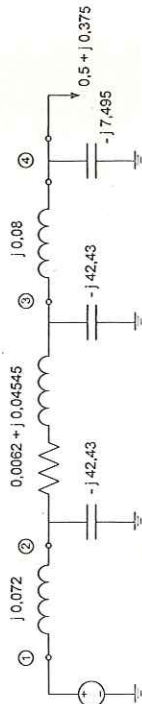


Figura 5.8. Diagrama de impedancias del sistema del Ejemplo 5.1.

EJEMPLO 5.2

En el sistema eléctrico del Ejemplo 5.1 se sabe que la tensión en el nudo 4 es igual a 65,34 kV. Con el diagrama de impedancias del sistema representado en la Figura 5.8, se pide calcular en sus unidades correspondientes:

1. Intensidad de línea que consumen las dos cargas.
2. Tensión en cada nudo.
3. Intensidad en bornes del generador.
4. Potencia activa y potencia reactiva generadas por el generador.

SOLUCIÓN

Tomando como origen de ángulos la tensión en el nudo 4, su valor por unidad es:

$$\bar{U}_4 = \frac{65,34/0^\circ}{66} = 0,99/0^\circ \text{ p.u.}$$

1. A partir de los valores de las impedancias expresadas por unidad y calculadas en el Ejemplo 5.1 (Figura 5.8), la intensidad que consumen las dos cargas es:

$$\bar{I}_4 = \frac{0,99/0^\circ}{7,495/-90^\circ} + \left(\frac{0,5 + j0,375}{0,99/0^\circ} \right)^* = 0,5621/-26^\circ \text{ p.u.}$$

Como la intensidad base en la carga es:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 66 \cdot 10^3} = 874,77 \text{ A}$$

La intensidad consumida por las dos cargas (intensidad de corriente en el secundario del transformador T2) es por tanto:

$$I_4 = 0,5621 \cdot 874,77 = 491,7 \text{ A}$$

2. Para calcular las demás tensiones en los nudos, se resuelve el circuito eléctrico de la Figura 5.8. Así, la tensión en el nudo 3 es:

$$\bar{U}_3 = j0,08 \cdot 0,5621/-26^\circ + 0,99/0^\circ = 1,0105/2,29^\circ \text{ p.u.}$$

La intensidad en la línea:

$$\bar{I} = 0,5621/-26^\circ + \frac{1,0105/2,29^\circ}{-j42,43} = 0,5512/-23,9^\circ \text{ p.u.}$$

La tensión en el nudo 2:

$$\bar{U}_2 = (0,0062 + j0,04545) \cdot \bar{I} + \bar{U}_3 = 1,0249/3,46^\circ \text{ p.u.}$$

La intensidad en el generador:

$$\bar{I}_1 = 0,5512/-23,9^\circ + \frac{1,0249/3,46^\circ}{-j42,43} = 0,5405/-21,6^\circ \text{ p.u.}$$

Y, finalmente, la tensión en el nudo 1:

$$\bar{U}_1 = j0,072 \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_2 = 1,0419/5,4^\circ \text{ p.u.}$$

Una vez calculados los valores por unidad de la tensión en cada nudo y conocida la tensión base de cada uno (calculadas en el Ejemplo 5.1), obtener el valor de la tensión de línea de cada nudo en su unidad es inmediato:

$$\begin{aligned} U_1 &= 1,0419 \cdot 36 = 37,51 \text{ kV} \\ U_2 &= 1,0249 \cdot 220 = 225,48 \text{ kV} \\ U_3 &= 1,0105 \cdot 220 = 222,31 \text{ kV} \\ U_4 &= 0,9900 \cdot 66 = 65,34 \text{ kV} \end{aligned}$$

3. La intensidad en el generador se ha obtenido en el apartado anterior al resolver el circuito correspondiente al diagrama de impedancias del sistema. Como la intensidad base en el nudo 1 es:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 36 \cdot 10^3} = 1603,75 \text{ A}$$

la intensidad pedida es:

$$I_1 = 0,5405 \cdot 1603,75 = 866,8 \text{ A}$$

4. Por último, la potencia generada por el generador es:

$$P_g + jQ_g = 1,0419/5,4^\circ \cdot (0,5405/-21,6^\circ)^* = 0,5017 + j0,2556 \text{ p.u.}$$

Como la potencia base del sistema es 100 MVA, finalmente resulta:

$$\begin{aligned} P_g &= 0,5017 \cdot 100 = 50,17 \text{ MW} \\ Q_g &= 0,2556 \cdot 100 = 25,56 \text{ MVAR} \end{aligned}$$