

MODELADO DE DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS EN ESTADO ESTACIONARIO

3.1 Representación de máquinas síncronas

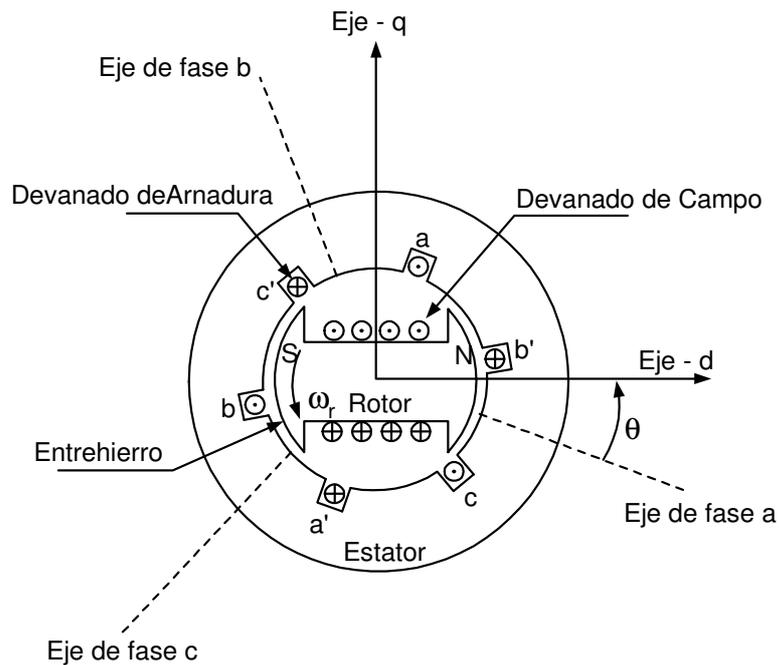


Fig. 3.1 Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica.

En la Figura 3.1 se muestra el esquema de una máquina síncrona trifásica con un par de polos de campo. El concepto de máquina síncrona involucra a los generadores, motores y condensadores síncronos debido a que estos dispositivos operan bajo el mismo principio.

Consiste en dos elementos esenciales: el campo y la armadura. El devanado de campo lleva la corriente directa y produce un campo magnético con el cual induce voltaje alterno en los devanados de la armadura [1] y [5].

Cuenta con 2 o más polos en el rotor y pueden ser de polos salientes o de rotor cilíndrico. Los de rotor cilíndrico, como las turbinas de gas y vapor, operan a altas velocidades. Por otro lado, los de polos salientes, como lo son las turbinas hidráulicas, operan a bajas velocidades, de aquí que se necesite un mayor número de polos para producir un valor de frecuencia. El número de polos de campo depende de la velocidad mecánica del rotor y la frecuencia de las corrientes eléctricas del estator.

Los devanados de las fases del estator se agrupan en $3P$ zonas, donde P es el número de polos del rotor.

La expresión que relaciona la frecuencia con el número de polos es:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} [Hz] \quad (3.1)$$

donde:

P : Número de polos

n : Velocidad en rpm.

Cada zona está espaciada $120/P$ grados eléctricos. La región de influencia de cada polo del rotor alrededor del entrehierro es de 180° eléctricos. La relación entre grados eléctricos y grados mecánicos está dada por:

$$\theta_{elec} = \frac{P}{2} \theta_{mec} \quad (3.2)$$

El devanado del rotor se excita con una fuente de CD que produce un campo magnético constante llamado campo principal.

El devanado del estator está diseñado para que, en condiciones balanceadas, induzca tensiones simétricas desfasadas 120° y variables en el tiempo.

Para la representación de la máquina se utiliza al generador de polos lisos o rotor cilíndrico. El voltaje en terminales del generador con carga depende del voltaje inducido por el flujo magnético del entrehierro, el cual es creado por el efecto combinado de la corriente del rotor y las corrientes del estator. Tanto la corriente del rotor como las del estator producen campos magnéticos, los cuales se pueden estudiar por separado si el circuito magnético se considera lineal y se desprecia la saturación.

Cuando la máquina opera en circuito abierto, únicamente la corriente del rotor es la que genera el voltaje en el estator debido al flujo magnético que produce; por lo que dicho campo magnético es constante visto desde el rotor. Sin embargo, los devanados del estator lo ven como un campo magnético de distribución sinusoidal cuando el rotor está girando.

Cuando el generador opera con carga y a velocidad síncrona se presenta un campo magnético, el cual es generado por las corrientes de las fases del estator y que se opone al campo magnético principal produciendo una desmagnetización; a este efecto se le conoce como “reacción de armadura” y se representa como una caída de voltaje.

VOLTAJE GENERADO EN CIRCUITO ABIERTO

Para el análisis se supone que la distribución alrededor del entrehierro del campo magnético creado por la corriente del rotor es sinusoidal, por lo que su representación está dada por:

$$B = B_{\max} \cos(\alpha - \theta) \quad (3.3)$$

donde:

θ : Indica la posición del rotor respecto a un eje de referencia

α : Indica el desplazamiento a un punto arbitrario alrededor del entrehierro respecto al eje de referencia.

VOLTAJE DE REACCIÓN DE ARMADURA

El efecto del voltaje de reacción de armadura sobre el voltaje en terminales depende de la magnitud y ángulo de fase de la corriente del estator.

VOLTAJE EN TERMINALES

Cuando el generador opera con carga, el flujo magnético del entrehierro se produce por la combinación del campo magnético principal y de reacción de armadura, por lo que se produce una cierta caída de tensión en el voltaje interno.

También existe una pequeña porción del flujo magnético, creado por las corrientes del estator, que no cruza el entrehierro, llamado flujo de dispersión. Por lo que, el voltaje en terminales del generador resulta de restar esta caída de tensión al voltaje interno.

Las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina síncrona en su modelo clásico son:

$$E_t = E_f - I_a (r_a + jX_s) \quad (3.4)$$

$$X_s = X_{s1} + X_l \quad (3.5)$$

donde:

E_t : Voltaje en terminales

E_f : Voltaje de campo (voltaje interno)

R_a, X_s : Resistencia de los devanados del estator

Cuando el factor de potencia de la máquina es atrasado el efecto de la reacción de armadura es desmagnetizante.

3.2 Modelado de cargas

El comportamiento dinámico de los sistemas de potencia es muy dependiente de la respuesta de las cargas. La modelación de carga es complicada ya que está compuesta por un gran número de dispositivos tales como lámparas, refrigeradores, calentadores, compresoras, motores, etc. por lo que es difícil estimar la composición exacta de la carga además de que dicha composición cambia dependiendo del horario, condiciones ambientales y del estado de la economía. *El comportamiento de las cargas es, en términos generales, función de la frecuencia y del voltaje* [3]. Los modelos de carga son clasificados en dos categorías: modelos estáticos y modelos dinámicos.

3.2.1 Modelado clásico de la carga en función del voltaje

Un modelo estático de carga expresa las características de la carga en cualquier instante del tiempo como funciones algebraicas. La componente de potencia activa (P) y la componente de potencia reactiva (Q) son consideradas por separado. Los modelos en estado estable se han formulado suponiendo que las cargas permanecen constantes, y que son independientes del voltaje. Para una representación más realista se utiliza el siguiente modelo:

$$P = P_o \left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha \quad (3.6)$$

$$Q = Q_o \left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta \quad (3.7)$$

donde:

V_o : Voltaje nominal

P_o : Potencia activa a voltaje nominal

Q_o : Potencia reactiva a voltaje nominal

Se determina el valor de los voltajes α y β para representar los modelos clásicos de carga que son:

Potencia constante
Corriente constante
Impedancia constante

MODELO PARA POTENCIA CONSTANTE

Dado que la potencia no varía con el voltaje, siempre se conserva la misma potencia. Por lo que tenemos de la ecuación (3.6):

$$P = P_o = P_o \left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha \quad (3.8)$$

Despejando de la ecuación (3.8) a α :

$$\left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha = \left[\frac{P}{P_o} \right] = 1 \Rightarrow \alpha = 0 \quad (3.9)$$

Procediendo de forma similar para la potencia reactiva y encontrar el valor de β , tenemos de la ecuación (3.7):

$$Q = Q_o = Q_o \left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta \quad (3.10)$$

$$\left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta = \left[\frac{Q}{Q_o} \right] = 1 \Rightarrow \beta = 0 \quad (3.11)$$

MODELO PARA CORRIENTE CONSTANTE

Expresando la potencia de la forma:

$$P_o = |V_o| |I_o| \cos \phi \quad (3.12)$$

$$Q_o = |V_o| |I_o| \sin \phi \quad (3.13)$$

Si la magnitud de la corriente permanece constante lo mismo que el factor de potencia, las ecuaciones (3.12) y (3.13) quedan como:

$$P = |V| |I_o| \cos \phi \quad (3.14)$$

$$Q = |V||I_o| \operatorname{sen} \phi \quad (3.15)$$

Sustituyendo la ecuación (3.14) en (3.6):

$$|V||I_o| \cos \phi = |V_o||I_o| \cos \phi \left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha \quad (3.16)$$

Despejando a α de la expresión (3.16):

$$\left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha = \left[\frac{V}{V_o} \right]^1 \Rightarrow \alpha = 1 \quad (3.17)$$

Para la potencia reactiva, tenemos de las ecuaciones (3.13) y (3.7):

$$|V||I_o| \operatorname{sen} \phi = |V_o||I_o| \operatorname{sen} \phi \left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta \quad (3.18)$$

Obteniendo a β de la ecuación (3.18):

$$\left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta = \left[\frac{V}{V_o} \right]^1 \Rightarrow \beta = 1 \quad (3.19)$$

MODELO PARA IMPEDANCIA CONSTANTE

La forma común de expresar la potencia es:

$$S = VI^* \quad (3.20)$$

La corriente se puede expresar por la ley de Ohm como:

$$I = V/Z \quad (3.21)$$

Sustituyendo la ecuación (3.21) en (3.20):

$$S = \frac{|V|^2}{Z^*} \quad (3.22)$$

Expresando la ecuación (3.22) en forma rectangular:

$$S = \frac{e^2 + f^2}{r - jx} \quad (3.23)$$

Desarrollando algebraicamente la ecuación (3.23):

$$S = \frac{e^2 + f^2}{r - jx} \frac{r + jx}{r + jx} = \frac{r(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} + j \frac{x(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} \quad (3.24)$$

Separando la parte real de la imaginaria de la ecuación (3.24) obtenemos las siguientes expresiones:

$$P = \frac{r(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} \quad (3.25)$$

$$Q = \frac{x(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} \quad (3.26)$$

Igualando las ecuaciones (3.6) y (3.26) para la potencia activa:

$$\frac{r(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} = \frac{r(e_o^2 + f_o^2)}{r^2 + x^2} \left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha \quad (3.27)$$

$$\frac{e^2 + f^2}{e_o^2 + f_o^2} = \left[\frac{V}{V_o} \right]^\alpha \quad (3.28)$$

$$|V_o|^2 = e_o^2 + f_o^2 \quad (3.29)$$

$$|V|^2 = e^2 + f^2 \quad (3.30)$$

De las expresiones (3.29) y (3.30) concluimos que el valor de α es:

$$\alpha = 2 \quad (3.31)$$

Para la potencia reactiva, igualando las ecuaciones (3.7) y (3.26):

$$\frac{x(e^2 + f^2)}{r^2 + x^2} = \frac{x(e_o^2 + f_o^2)}{r^2 + x^2} \left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta \quad (3.32)$$

$$\frac{e^2 + f^2}{e_o^2 + f_o^2} = \left[\frac{V}{V_o} \right]^\beta \quad (3.33)$$

De la ecuación (3.33) obtenemos que el valor de β es:

$$\beta = 2 \quad (3.34)$$

3.3 Modelado de Líneas de Transmisión

3.3.1 Aspectos Generales

La red eléctrica es un elemento para convertir y transportar energía [7]. Una red eléctrica se compone de tres partes principales: las centrales generadoras, las líneas de transmisión y las redes de distribución. Las líneas de transmisión constituyen los eslabones de conexión entre las centrales generadoras y las redes de distribución y conduce a otras redes de potencia por medio de interconexiones. Una red de distribución conecta las cargas aisladas de una zona determinada con las líneas de transmisión.

La aceptación de los sistemas de corriente alterna fue la existencia del transformador que hace posible el transporte de energía eléctrica a una tensión más alta que la de generación o utilización con la ventaja de una mayor capacidad de transmisión.

La interconexión de sistemas incrementa la intensidad de corriente en la red cuando se produce un cortocircuito y exige la instalación de interruptores de mayor corriente nominal. La perturbación causada por un cortocircuito en un sistema puede extenderse a los demás sistemas que están conectados a él. Las redes interconectadas no sólo tienen que tener la misma frecuencia nominal, sino que los generadores síncronos de una red deben estar en fase con los de las demás.

La programación del funcionamiento, perfeccionamiento y expansión de una red eléctrica exige el estudio de cargas y de estabilidad y el cálculo de fallas.

El problema más básico que se enfrenta en los sistemas de potencia es la determinación de la potencia que fluye a lo largo de las líneas individuales de una red cuando se especifican las cantidades de potencia que son inyectadas por los generadores y retiradas por las cargas. Este análisis es un cálculo del estado estable en el cual todos los voltajes y las corrientes son sinusoidales y pueden ser descritas por variables complejas asociadas con fasores girando a la frecuencia de la potencia.

El análisis de una red de líneas de transmisión requiere un método de solución para los voltajes y las corrientes en todos los puntos de la red construida por la interconexión de varios circuitos equivalentes de las líneas de transmisión. Dado estos elementos, el ingeniero puede calcular las condiciones que existirían en cualquier punto de una red de transmisión real para un conjunto propuesto de cargas y salidas de generador.

3.3.2 Estudio de flujos de carga

Es la determinación de la tensión, intensidad, potencia y factor de potencia o potencia reactiva en varios puntos de una red eléctrica, en condiciones normales de funcionamiento. Los estudios de flujos de cargas son fundamentales en la programación del desarrollo futuro del sistema.

3.3.3 Cálculo de fallas

Una falla en un conductor es cualquier desperfecto que interfiera la circulación normal de corriente. La mayor parte de las averías en líneas de transporte de 115 kV y superiores son producidas por los rayos que dan lugar a descargas en los aisladores. La alta tensión que existe entre un conductor y la torre derivada a tierra que lo soporta, provoca la ionización del aire proporcionando un paso hacia tierra a la carga inducida por el rayo. Una vez establecido el paso a tierra, la baja impedancia resultante permite el paso de corriente desde el conductor a tierra y de aquí al neutro conectado a tierra del transformador o generador, completando así el circuito.

POTENCIA EN CIRCUITOS MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA

La potencia en volts que absorbe la carga en cualquier instante es el producto de la caída de tensión instantánea en volts a través de la carga y la corriente instantánea en amperes dentro de la carga.

El coseno del ángulo de fase θ entre el voltaje y la corriente se conoce como el factor de potencia. Un circuito inductivo se dice que tiene un factor de potencia en atraso y un circuito capacitivo se dice que tiene un factor de potencia en adelanto. En otras palabras, los términos de factor de potencia en atraso y en adelanto indican cuando la corriente está atrasando o adelantando el voltaje aplicado.

Otros métodos de cálculo del factor de potencia son:

$$\cos \theta = \cos \tan^{-1} \frac{Q}{P} \quad (3.35)$$

y

$$\cos \theta = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.36)$$

DIRECCIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA

La relación entre P, Q y el voltaje de barra V, o voltaje generado E, con respecto a los signos P y Q es importante cuando se considera el flujo de potencia en un sistema. El problema implica la dirección del flujo de potencia, es decir, si se está generando o absorbiendo potencia cuando se especifica un voltaje y una corriente.

IMPEDANCIA SERIE DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión tiene cuatro parámetros que influyen en su aptitud para llenar su función como componente de una red eléctrica. Estos parámetros son resistencia, inductancia, capacidad y conductancia [6].

En un conductor las líneas del campo eléctrico nacen en las cargas positivas y pasan a las cargas negativas del otro y las líneas de flujo magnético forman anillos cerrados que rodean a cada conductor. Toda variación de la corriente que pasa por los conductores produce una variación en el número de las líneas de flujo magnético que atraviesan el circuito. Por otra parte, cualquier variación de éste induce una fem en el circuito, siendo esta fem inducida, proporcional a la velocidad de variación del flujo. La inductancia es la propiedad de un circuito que relaciona la fem inducida, por la variación del flujo, con la velocidad de variación de la corriente.

Existe la capacitancia entre los conductores, y es la carga sobre los conductores por unidad de diferencia de potencia entre ellos.

La resistencia y la conductancia uniformemente distribuidas a la carga de la línea forman la impedancia serie. La conductancia y la capacitancia que existen entre conductores de una línea monofásica o desde un conductor a neutro de una línea trifásica forman la admitancia paralelo. Aunque la resistencia, inductancia y capacitancia son distribuidas, el circuito equivalente está formado por parámetros.

Los flujos de potencia a lo largo de una línea de transmisión cuando hay una diferencia de voltaje entre sus terminales fuerzan a la corriente a fluir a través de los conductores de la fase. La caracterización básica de una línea de transmisión es, por lo tanto, un conjunto de impedancias que relacionan las diferencias del voltaje de fase de terminal a terminal para las corrientes de fase.

El cálculo de los parámetros de una línea de transmisión inicia cuando las especificaciones de las líneas aéreas cruzan una sección, como se observa en la Fig. 3.2.

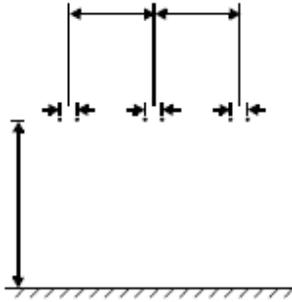


Fig. 3.2 Ejemplo de una sección transversal de una línea de transmisión

Con esta sección transversal, se puede calcular el flujo de encadenamiento en cada conductor cuando pasa cierta cantidad de corriente especificada, a su vez, por cada conductor. Este cálculo está basado en la solución normal de las ecuaciones de Maxwell para los campos magnéticos alrededor de un largo conductor recto de corriente, esto es, en la ecuación de Biot-Savart

$$B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3.37)$$

donde

- B(r) Densidad del flujo en dirección tangencial al conductor, en el plano de su sección transversal de radio r
- I Corriente en el conductor
- μ_0 Permeabilidad del espacio libre

El resultado del cálculo del flujo de encadenamiento básico es una matriz de impedancia serie, expresada en ohms/kilometro, que relaciona la caída del voltaje a través de cada fase en una sección de la línea, como se muestra en la Fig. 3.3, con la corriente en cada fase. Nótese que el cálculo de las constantes de la línea normalmente implican que los conductores individuales de un grupo están juntos garantizando los intervalos de frecuencia y salidas presentes como si cada fase fuera un sólo conductor equivalente que lleva toda la corriente de fase.

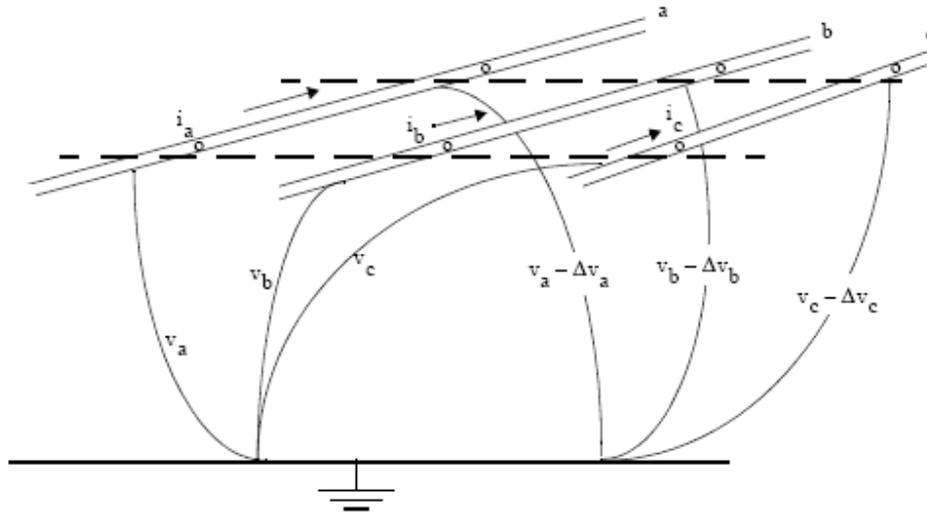


Fig. 3.3 Caída de voltaje a lo largo de una sección de la línea de transmisión

La matriz de impedancia define la relación de caída de voltaje como

$$\begin{bmatrix} \Delta v_a \\ \Delta v_b \\ \Delta v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

volts / km
ohms / km
amps

Como el flujo de encadenamiento total de cada conductor en la línea es una función de la corriente en cada conductor, la matriz de impedancia es completamente llenada. Además, como la sección transversal de la línea no es simétrica con respecto a todas las fases y a la tierra, todos sus elementos deben ser diferentes.

Esto es importante para ver que los elementos de la matriz de impedancia serie tienen la forma $R+jX$, correspondiente a una inductancia con resistencia serie. La parte imaginaria de cada elemento es calculada con respecto a una frecuencia establecida (generalmente de 60 Hz) y todos los elementos de la matriz de impedancia serie, tanto la resistencia como la reactancia, cambian cuando la frecuencia cambia. Para pequeñas variaciones de la frecuencia, se puede asumir que la parte real de cada elemento es constante, y que la parte imaginaria es proporcional a la frecuencia. Esta suposición no es válida para amplias variaciones de la frecuencia porque si la frecuencia incrementa se reduce la penetración de la corriente a la tierra y puede producir cambios significativos en la resistencia efectiva de la línea.

CAPACITANCIA SHUNT DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Todos los cuerpos conductores suspendidos en el espacio establecen capacitancia uno con otro [6]. En los conductores de una línea de transmisión, la capacitancia entre las fases y la

tierra es significativa. Como resultado, la corriente significativa fluye de los conductores a tierra y de fase a fase durante la operación normal en la línea de transmisión.

Las capacitancias de la línea pueden calcularse sobre una base por kilómetro por una solución de las ecuaciones del campo electrostático, dando la sección transversal de la línea. El resultado de este cálculo es una matriz de admitancia shunt que define las corrientes de carga shunt definidas en la Fig. 3.4.

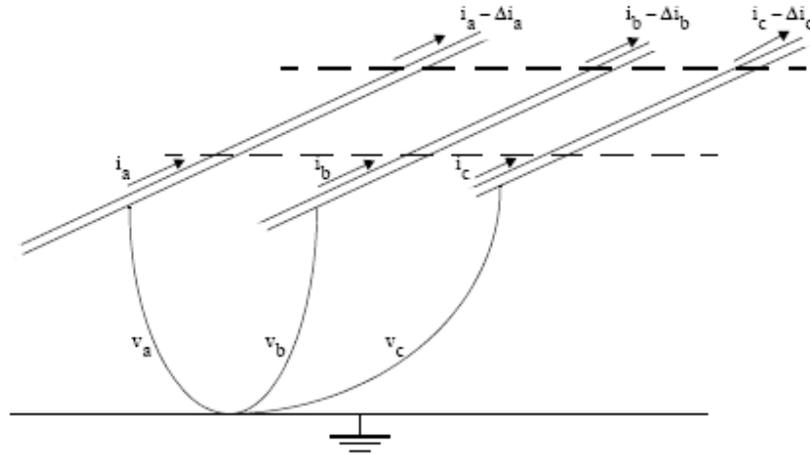


Fig. 3.4 Corrientes de carga en una línea de transmisión

La siguiente ecuación (3.39) muestra la relación de la corriente de carga-voltaje después de que se calculó la admitancia a frecuencia nominal correspondiente a cada elemento de la capacitancia:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_a \\ \Delta i_b \\ \Delta i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{aa} & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ba} & B_{bb} & B_{bc} \\ B_{ca} & B_{cb} & B_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

amps / km
mhos / km
volts

Como la corriente de carga fluye de fase a fase así como de fase a tierra, la matriz de admitancia anterior es totalmente completada. Nuevamente, ya que los diseños de la transmisión no necesariamente son simétricos, todos los elementos pueden ser diferentes. Ya que las resistencias de encadenamiento de los conductores a tierra de la línea de transmisión son esencialmente infinitas, la corriente de carga es puramente capacitiva. Los elementos de la matriz de admitancia shunt son por lo tanto directamente proporcionales a la frecuencia.

REPRESENTACIÓN DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

La transformación de la componente simétrica

La simulación de un sistema de potencia bajo la mayoría de las condiciones generales de operación, donde hay una asimetría significativa en los elementos de la matriz z de cada línea (3.38), podría requerir que cada línea sea caracterizada por (3.38) y (3.39). Esto, a su vez, llevaría un conjunto de $3N$ simultáneo a las ecuaciones lineales para la descripción de un sistema de N buses [6].

Tales soluciones completamente generales raramente son necesarias porque un sistema de potencia normalmente está diseñado para ser básicamente simétrico con respecto a sus tres fases. El impulso inmediato podría ser analizar sólo una fase, mientras se confía completamente en la simetría de las otras dos fases. Tal acercamiento sólo es válido para el equipo donde, además de ser simétricos, los voltajes inducidos en cada fase sólo son funciones de la corriente en esa fase. Esto es verdad para algunos transformadores y cargas pero no es aplicable en general porque, como se ha indicado en (3.38), la caída del voltaje en una fase de una línea de transmisión normalmente es una función de las corrientes en las tres fases.

La manera más común de tomar ventaja de la simetría de las fases del sistema de potencia está basada en la transformación de las componentes simétricas, que está dado por

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

donde a es el número complejo $(-0.5 + j0.866) = e^{+j\frac{2\pi}{3}}$.

FUENTES DE VOLTAJE EN LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

La inmediata importancia de la transformación de las componentes simétricas se nota en que en la fuente de voltaje del sistema de potencia normal, la rotación hacia adelante del generador síncrono, produce un conjunto balanceado de los voltajes de fase.

$$\begin{aligned}
v_a &= v \sin(\omega t + \phi) = V e^{j(\omega t + \phi)} \\
v_b &= v \sin\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right) = V e^{j\left(\omega t + \phi - \frac{2\pi}{3}\right)} \\
v_c &= v \sin\left(\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right) = V e^{j\left(\omega t + \phi - \frac{4\pi}{3}\right)}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Sustituyendo (3.42) en (3.41) y utilizando la identidad $e^{jk} + e^{j\left(k - \frac{2\pi}{3}\right)} + e^{j\left(k - \frac{4\pi}{3}\right)} = 0$ se muestra que, para los voltajes balanceados de (3.42) las componentes simétricas correspondientes de los voltajes son

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V e^{j\omega t} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

Siguiendo el mismo procedimiento para el generador síncrono rotando hacia atrás se mostraría que las componentes simétricas de los voltajes son

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V e^{j\omega t} \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

Finalmente, asumiendo que las tres fases del voltaje son idénticas, $v_a = v_b = v_c = V e^{j\omega t}$, se producen las componentes simétricas de los voltajes

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V e^{j\omega t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

Como v_1 puede ser producido por un generador de rotación normal, este es referido como el voltaje de secuencia positiva. Correspondientemente, como v_2 puede proceder tanto del generador rotando en dirección contraria o invirtiendo dos de sus conexiones de fase este es referido como el voltaje de secuencia negativa. La componente del voltaje de secuencia cero es v_0 .

Las únicas fuentes de voltaje producidas por los generadores de un sistema de potencia son conjuntos trifásicos balanceados con fase rotando hacia adelante. De manera correspondiente, el análisis en términos de las componentes simétricas se encuentra con fuentes de voltaje diferentes a cero sólo en la secuencia positiva.

LÍNEAS TRIFÁSICAS DE CIRCUITOS PARALELOS

Dos circuitos trifásicos que están igualmente constituidos y están en paralelo tienen la misma reactancia inductiva [7]. La reactancia inductiva del circuito equivalente simple es, sin embargo, solamente la mitad de la de uno de los circuitos considerado cuando están tan separados que la inductancia mutua sea despreciable. Si los dos circuitos están sobre el mismo apoyo, puede emplearse el método de la DMG para encontrar la inductancia por fase, considerando que todos los conductores de una fase son hilos de un mismo conductor compuesto.

La Fig. 3.5 muestra un arreglo típico de un circuito trifásico paralelo. Aunque la línea probablemente no sea transpuesta, suponemos que lo está a fin de simplificar los cálculos para obtener un valor práctico de la inductancia.

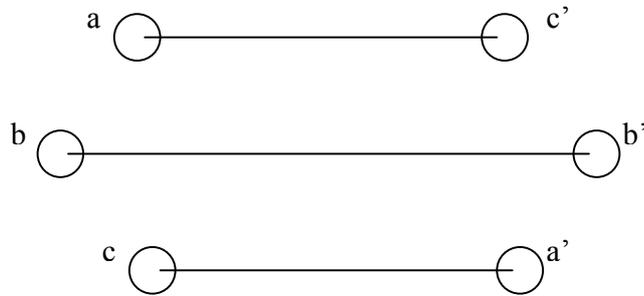


Fig. 3.5 Distribución típica de los conductores en línea trifásica de circuitos paralelos

Los conductores a y a' están en paralelo para formar la fase a . Las fases b y c son similares. Suponemos que a y a' toman las posiciones de b y b' y luego de c y c' como aquellos conductores que se rotan en un ciclo de transposición.

Para calcular D_{eq} , que es la separación equilátera equivalente de la media geométrica de las tres distancias de la línea, el método de la DMG requiere que se use D_{ab}^p , D_{bc}^p y D_{ca}^p donde el superíndice indica aquellas cantidades que son valores DMG propios y donde D_{ab}^p significa la DMG entre los conductores de la fase a y aquellos de la fase b .

De la ecuación de la inductancia de un conductor

$$L_a = 0.46059 \log \frac{D_{eq}}{D_s^p} \text{ mH/km} \quad (3.46)$$

D_s^p es la media geométrica de los valores RMG de los dos conductores que ocupan primero las posiciones de a y a' , luego las posiciones de b y b' y finalmente las posiciones de c y c' .

CAPACITANCIA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La admitancia paralelo de una línea de transporte se compone de conductancia y reactancia capacitiva. A la conductancia por lo común se le desprecia debido a que su contribución a la admitancia paralela es muy pequeña. Otra razón por la que no se le toma en cuenta a la conductancia es que no hay una buena forma de calcularla debido a que es muy variable. Las fugas de los aisladores, la principal fuente de conductancia, varía apreciablemente con las condiciones atmosféricas y con las propiedades conductoras de la mugre que se adhiere a los aisladores. El efecto corona que produce fugas entre las líneas, también varía mucho con las condiciones atmosféricas. Afortunadamente, el efecto de conductancia no es un componente de la admitancia paralela digna de tenerse en cuenta.

La diferencia de potencial entre los conductores de una línea de transmisión hace que estos se carguen como las placas de un condensador cuando existe una diferencia de potencia entre ellas. La capacidad entre conductores es la carga por unidad de diferencia de potencial. La capacidad entre conductores paralelos es constante, dependiendo del tamaño y de la separación de los conductores. El efecto de la capacidad de líneas es pequeño y normalmente se desprecia. En líneas más largas de alta tensión, la capacidad llega a tener gran importancia.

Una tensión alterna aplicada a una línea de transmisión da lugar a que la carga de los conductores, en cualquier punto, aumente o disminuya con el aumento o disminución, respectivamente, del valor instantáneo de la tensión entre conductores, en aquel punto. El flujo de la carga es una corriente y la producida por la carga y descarga alternativa de una línea, debida a una tensión alterna, se llama corriente de carga de la línea. La corriente de carga fluye en una línea de transmisión, incluso, cuando está el circuito abierto. *Tiene influencia sobre la caída de tensión a lo largo de la línea, sobre su rendimiento y factor de potencia y la estabilidad de la red de la que forma parte la línea* [7].

3.3.4. Relaciones entre la tensión y la corriente de una línea de transmisión

Un problema interesante a tener en cuenta al proyectar una línea de transporte y en su funcionamiento es el mantenimiento de la tensión, dentro de los límites especificados, en varios puntos del sistema [6] y [7].

REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS

Las líneas de transporte funcionan normalmente con cargas trifásicas balanceadas. Aunque no estén dispuestas equilateralmente, e incluso sin transposición, la influencia de la asimetría es pequeña y se consideran equilibradas las fases. La Fig. 3.6, representa un generador conectado en Y, alimentando una carga equilibrada con el mismo tipo de conexión, a través de una línea de transporte. En la Figura, el generador conectado en Y

suministra la carga a través de una línea de transmisión. El circuito equivalente de dicha línea ha sido simplificado, poniendo únicamente, la resistencia R y la reactancia inductiva L en serie que se representan como parámetros agrupados o concentrados, en lugar de uniformemente repartidos a lo largo de la línea. No existe diferencia, cuando se trata de medidas en los extremos de la línea, entre considerar los parámetros concentrados o uniformemente repartidos, siempre que se desprecie la admitancia en paralelo, puesto que la corriente por la línea es la misma en ambos casos. El generador se representa por una impedancia conectada en serie con la fem, generada en cada fase.

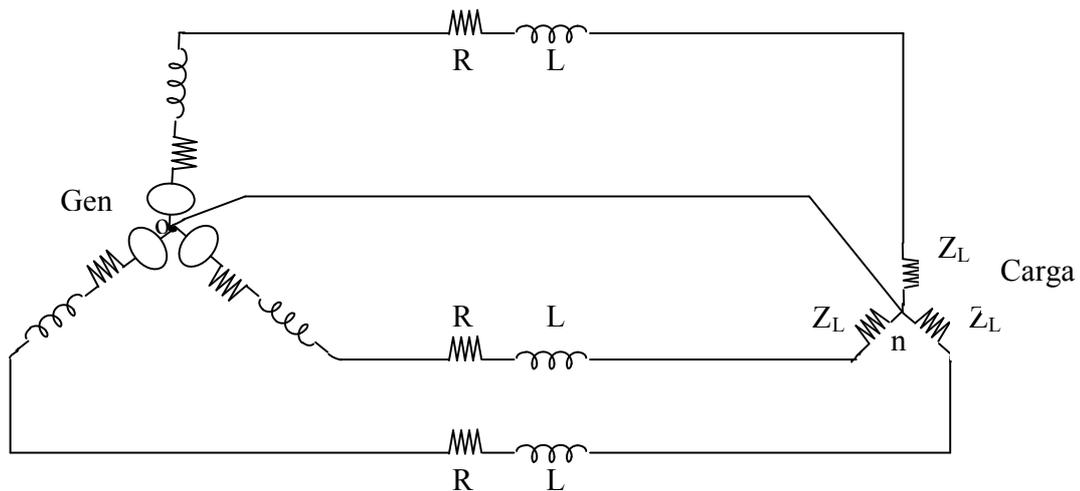


Fig. 3.6 El generador alimenta una carga equilibrada en Y a través de una línea de transmisión

De los cuatro parámetros de una línea de transmisión, se le ha dado mayor atención a la inductancia y la capacitancia. La resistencia es de igual importancia pero requiere menos análisis puesto que no es función de la disposición del conductor. Las ecuaciones de la inductancia para una de las fases de una línea trifásica equilibrada, y las de la capacitancia de línea a neutro pueden aplicarse a la solución de una línea trifásica con un neutro de impedancia cero como se muestra en la Fig. 3.7 con la mitad de la capacitancia a neutro agrupada en cada extremo del circuito equivalente. La conductancia, en paralelo, se desprecia casi siempre cuando se trata de calcular la tensión y la intensidad de una línea de transporte.

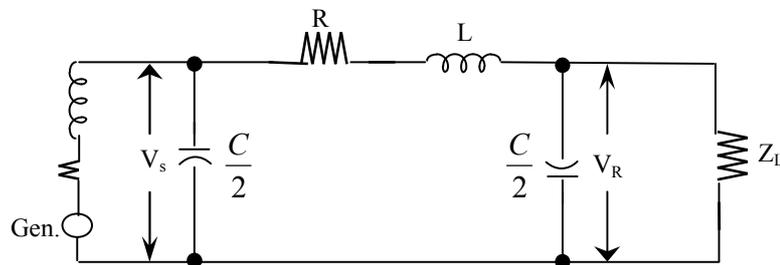


Fig. 3.7 Equivalente monofásico de un generador, carga y línea de transmisión con parámetros concentrados R , L y C .

La clasificación de las líneas de transmisión, según su longitud basada en las aproximaciones admitidas al operar con los parámetros de la línea. La resistencia, inductancia y capacidad están uniformemente repartidas a lo largo de la línea y en el cálculo exacto de líneas largas hay que considerarlo así. En las líneas de longitud media se considera, sin embargo, que la mitad de la capacidad está agrupada en cada extremo de la línea, sin que por ello se cometa un error apreciable al calcular la tensión y la intensidad en las terminales. Por último, en las líneas cortas es tan pequeña la susceptancia capacitiva total, que puede despreciarse.

En lo que se refiere a los cálculos en que interviene la capacidad, se consideran cortas las líneas aéreas, a 60 Hz, de menos de 80 Km. Líneas de longitud media son las comprendidas entre 80y 250 Km, aproximadamente. En el cálculo de las líneas de más de 250 Km, es preciso considerar las constantes distribuidas si se necesita gran precisión, aunque, en ciertos casos, puede aplicarse a líneas de hasta 350 Km.

Para distinguir la impedancia total de la línea de la impedancia por unidad de longitud, se empleará la siguiente notación:

- z : impedancia en serie por unidad de longitud y fase
- y : admitancia en paralelo por unidad de longitud, entre fase y neutro
- l : longitud de la línea
- $Z = zl$: impedancia total en serie, por fase
- $Y = yl$: admitancia total en paralelo, entre fase y neutro

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CORTAS

El circuito equivalente de una línea corta de transporte está representado en la Fig. 3.8, donde I_S e I_R son, respectivamente, las corrientes en los extremos transmisor y receptor y V_S y V_R las tensiones entre fase y neutro en esos mismos puntos.

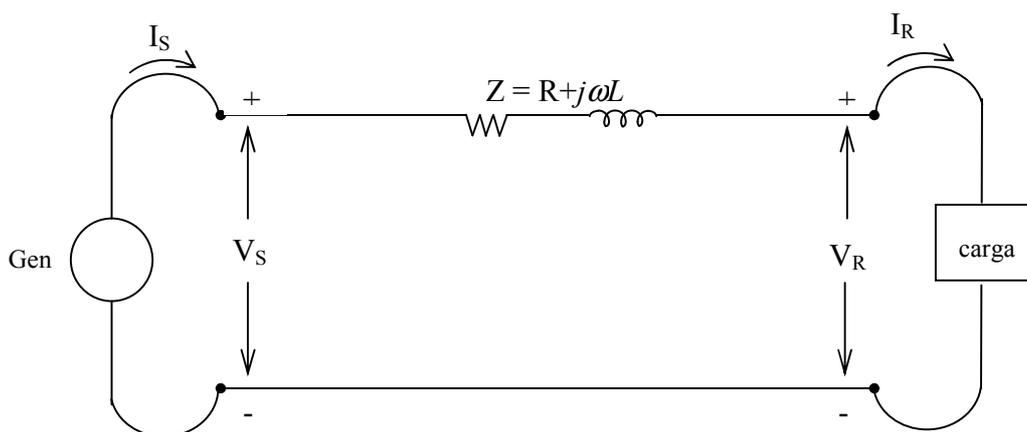


Fig. 3.8 Circuito equivalente de una línea corta de transmisión

El circuito se resuelve como un sencillo circuito serie de corriente alterna. Como no hay ramas en paralelo, la corriente es la misma en ambos extremos de la línea, por lo que

$$I_S = I_R \quad (3.47)$$

La tensión en el extremo distribuidor es

$$V_S = V_R + I_R Z \quad (3.48)$$

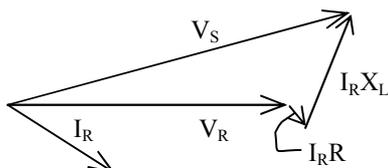
donde Z es $z l$, la impedancia total de la línea.

El efecto de la variación del factor de potencia de la carga sobre el factor de regulación de la tensión de una línea se comprende mejor en las líneas cortas.

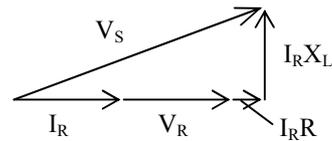
El factor de regulación de la tensión de una línea de transporte es la elevación de tensión en el extremo receptor, expresado en por ciento de la tensión a plena carga, cuando ésta, a un determinado factor de potencia especificado, desaparece manteniendo constante la tensión en el extremo transmisor. La expresión matemática es

$$\text{por ciento de regulación} = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (3.49)$$

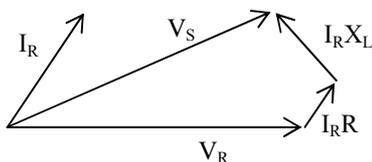
donde $|V_{R,NL}|$ es el valor absoluto de la tensión en el extremo receptor en vacío y $|V_{R,FL}|$ es el valor absoluto de la tensión en el extremo receptor a plena carga. Después de eliminar la carga de una línea de transporte, como la representada en la Fig. 3.7, la carga conectada, la tensión en el lado receptor se representa por V_R , siendo $|V_R| = |V_{R,FL}|$. La tensión en el extremo transmisor es V_S , siendo $|V_S| = |V_{R,NL}|$.



(a) Factor de potencia de la carga = 70% en retardo



(b) Factor de potencia de la carga = 100%



(c) Factor de potencia de la carga = 70% en adelanto

Fig. 3.9 Diagramas vectoriales de una línea corta de transmisión. Todos ellos para los mismos valores de V_R e I_R

Los diagramas vectoriales de la Fig. 3.9 corresponden a iguales amplitudes de tensión y corriente en el extremo receptor, e indican que, para mantener una tensión dada en el extremo receptor, es preciso una corriente mayor en el extremo transmisor cuando la corriente en aquél está retrasada, respecto a la tensión, que cuando está en fase con ella. Para mantener en el extremo receptor la tensión dada, es preciso, cuando la tensión está retrasada, respecto a la corriente en el extremo receptor, una pequeña tensión permanente en el extremo transmisor. El factor de regulación es máximo con los factores de potencia en retardo y mínimo o incluso, negativo con los factores de potencia en adelanto. La reactancia inductiva de una línea de transporte es mayor que la resistencia y el principio de regulación representado en la Fig. 3.9 es cierto, sea cualquiera la carga suministrada a través de un circuito predominante inductivo. Las magnitudes de caída de voltaje $I_R R$, $I_R X_L$ para una línea corta se han exagerado con respecto a V_R en dibujos de los diagramas vectoriales a fin de ilustrar el punto con mayor claridad. La relación entre el factor de potencia y el de regulación, para líneas largas, es análoga a la establecida para las cortas.

LÍNEAS DE LONGITUD MEDIA

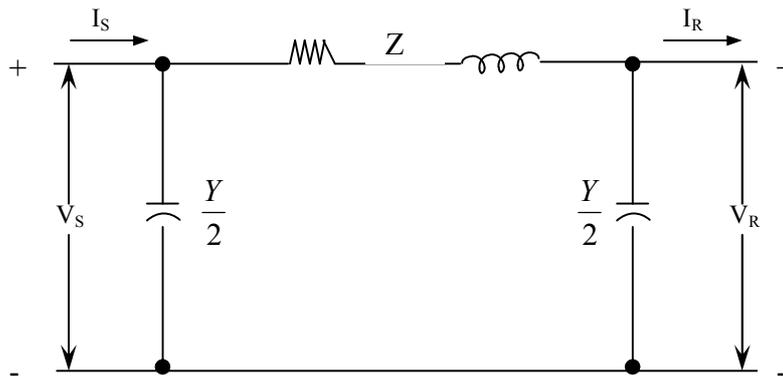


Fig. 3.10 Circuito nominal en π de una línea de transmisión de longitud media

La admitancia, generalmente capacidad pura, se incluye en los cálculos de las líneas de longitud media. Si la admitancia total está dividida en dos partes iguales, colocadas en los dos extremos de la línea el circuito se llama nominal π . Para derivar las ecuaciones nos referimos a la Fig. 3.10. La ecuación V_S , en este caso, puede deducirse, teniendo en cuenta que la corriente es la capacidad del extremo receptor es $V_R \frac{Y}{2}$ y que la del ramal serie es $I_R + V_R \frac{Y}{2}$, con lo que:

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \quad (3.50)$$

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (3.51)$$

Para determinar I_S , notemos que la corriente en la capacidad en paralelo del extremo transmisor es $V_S \frac{Y}{2}$, la cual sumada a la del ramal serie da

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (3.52)$$

y sustituyendo en la ecuación (3.52), el valor de V_S , dado por la ecuación (3.51), tenemos

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (3.53)$$

para el circuito en T pueden deducirse las ecuaciones correspondientes. En el cual toda la admitancia pura se supone concentrada en el punto medio del circuito que representa la línea: y en series divididas igualmente las impedancias entre las dos ramas, como se muestra en la Fig. 3.11. Comparando las ecuaciones (3.51) y (3.53), con las ecuaciones (3.47) y (3.48), vemos el efecto de incluir la admitancia Y en los cálculos. Si la línea es corta, la admitancia total Y es pequeña y, cuando disminuye ésta, las ecuaciones de las líneas de longitud media se aproximan a las de las cortas.

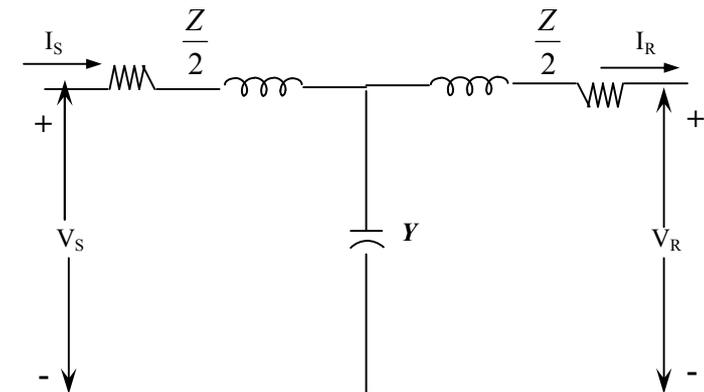


Fig. 3.11 Circuito nominal en T de una línea de transmisión de longitud media

Los circuitos en T y en π no representan la línea real, por lo que en caso de duda sobre la longitud que tenga, lo mejor es emplear el circuito equivalente que represente exactamente la línea. Ambos circuitos, en T y en π , no son equivalentes como puede verse por la aplicación de las ecuaciones de transformación Y- Δ a cada uno de ellos. Los circuitos T y π se aproximan más entre sí y al circuito equivalente de la línea cuando ésta se divide en dos o más secciones, cada una representada por sus circuitos nominales en T o en π .

Las ecuaciones (3.51) y (3.53) pueden expresarse en la forma general

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (3.54)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (3.55)$$

donde

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1 \quad (3.56)$$

$$B = Z \quad (3.57)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) \quad (3.58)$$

Estas constantes ABCD algunas veces se conocen como las constantes generalizadas de circuitos de la línea de transmisión. En general, son números complejos. A y D son adimensionales e iguales entre sí, si la línea es la misma cuando se ve desde cualquier terminal. Las dimensiones de B y C están en ohms y mhos, respectivamente. Las constantes se aplican a circuitos lineales, pasivos y bilaterales de cuatro terminales; tienen dos pares de terminales. En una línea de transmisión las terminales de transmisión son donde la potencia entra a la red y las terminales de recepción donde la potencia abandona la red.

Con las constantes ABCD se puede demostrar que

$$AD - BC = 1 \quad (3.59)$$

Esto se puede verificar fácilmente para valores de A, B, C y D de líneas de longitud media. Estas relaciones son útiles para encontrar V_R , I_R si V_S y I_S son conocidas.

Resolviendo las ecuaciones (3.50) y (3.51) para V_R , I_R tenemos:

$$V_R = \frac{DV_S - BI_S}{AD - BC} \quad (3.60)$$

y

$$I_R = \frac{AI_S - CV_S}{AD - BC} \quad (3.61)$$

De donde aceptando la relación $AD - BC = 1$,

$$V_R = DV_S - BI_S \quad (3.62)$$

$$I_R = -CV_S + AI_S \quad (3.63)$$

Un significado físico se asigna fácilmente a las constantes. Dando un valor de cero a I_R en la ecuación (3.54) vemos que A es la relación V_S/V_R sin carga. De modo parecido, B es la relación V_S/I_R cuando la terminal del receptor está en corto circuito. La constante A es útil

en el cálculo de la regulación. $V_{R,FL}$ la tensión en la terminal receptora a plena carga para una tensión V_S de la terminal de transmisión la ecuación (3.49) se reduce a:

$$\text{Por ciento de regulación} = \frac{|V_S|/|A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (3.64)$$

TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN EXACTA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Los esquemas en T y en π no representan exactamente una línea de transmisión porque no tienen en cuenta que los parámetros de la línea están repartidos uniformemente. La diferencia entre los circuitos en T y en π y la línea real aumenta a medida que ésta es más larga. Sin embargo, es posible encontrar el circuito equivalente de una línea larga de transmisión y representarla con precisión, en lo que se refiere a los valores en los extremos de la línea, por medio de una red con los parámetros concentrados. La derivación de un modelo de una terminal de una línea de transmisión se facilita con las ecuaciones

$$v(x) = \frac{[v(0) - z_s i(0)]}{2} e^{\gamma x} + \frac{[v(0) + z_s i(0)]}{2} e^{-\gamma x} \quad (3.65)$$

$$i(x) = \frac{[v(0) - z_s i(0)]}{2z_s} e^{\gamma x} + \frac{[v(0) + z_s i(0)]}{2z_s} e^{-\gamma x} \quad (3.66)$$

donde

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad \text{constante de propagación} \quad (3.67)$$

$$z_s = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad \text{impedancia característica o también llamada impedancia de sobre tensión de la línea} \quad (3.68)$$

que al reestructurar las ecuaciones (3.65) y (3.66) relacionan las condiciones de envío y recepción final. La notación correspondiente a la Fig. 3.12 es:

$v(0)$ v_s , voltaje final enviado
 $v(L)$ v_r , voltaje final recibido
 $i(0)$ i_s , corriente final enviada
 $i(L)$ i_r , corriente final recibida

donde L es la longitud de la línea

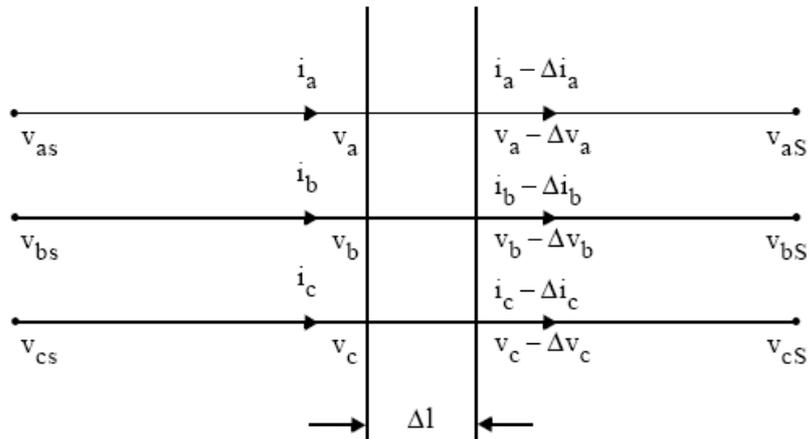


Fig. 3.12 Voltaje y corriente de carga en un segmento de una línea de transmisión elemental

Las ecuaciones (3.65) y (3.66) pueden ser manipuladas de la forma

$$v_r = Av_s + Bi_s \quad (3.69)$$

$$i_r = Cv_s + Di_s \quad (3.70)$$

donde

$$A = \cosh \gamma L \quad (3.71)$$

$$B = -Z_s \sinh \gamma L \quad (3.72)$$

$$C = \frac{-1}{Z_s} \sinh \gamma L \quad (3.73)$$

$$D = \cosh \gamma L \quad (3.74)$$

La matriz es completada de (3.69) y (3.70) quedando como

$$\begin{bmatrix} v_r \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ i_s \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

y, más tarde, asignar el símbolo, M_{rs} a la matriz de coeficientes

$$M_{rs} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

El circuito equivalente requerido puede ser derivado ahora de la reestructuración de (3.69) y (3.70) como sigue:

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-A}{B} & \frac{1}{B} \\ C - \frac{DA}{B} & \frac{D}{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Sustituyendo (3.69) en (3.72) se obtiene

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_s \tanh \gamma L} & \frac{-1}{Z_s \sinh \gamma L} \\ \frac{-1}{Z_s \sinh \gamma L} & \frac{1}{Z_s \tanh \gamma L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

el cual es la descripción de la matriz de admitancia de la línea de transmisión vista desde sus terminales.

Se propone ahora un nuevo circuito equivalente de la forma en que se muestra en la Fig. 3.13, donde la matriz de admitancia es

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} \left[\frac{1}{Z_{ex}} + \frac{Y_{ex}}{2} \right] & \frac{-1}{Z_{ex}} \\ \frac{-1}{Z_{ex}} & \left[\frac{1}{Z_{ex}} + \frac{Y_{ex}}{2} \right] \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

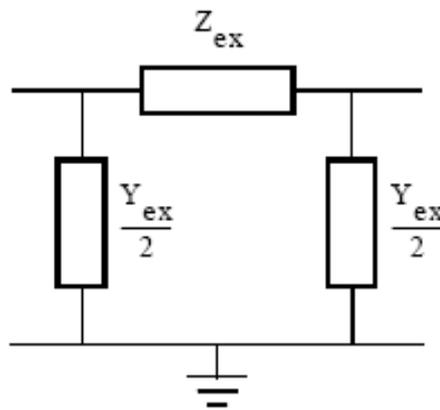


Fig. 3.13 Circuito equivalente π de una línea de transmisión

Con la comparación de (3.79) con (3.78) y alguna manipulación trigonométrica se obtiene

$$Z_{ex} = z_s \sinh \gamma L \quad (3.80)$$

$$Y_{ex} = \frac{2}{z_s} \tanh \gamma L \quad (3.81)$$

El modelo del circuito equivalente de la línea de transmisión (Fig. 3.14) puede ser derivada desde la base de la impedancia serie por kilómetro y la admitancia shunt para dar una representación exacta de una línea de cualquier longitud a una única frecuencia diseñada.

Como γ es fuertemente dependiente de la frecuencia y z_s puede variar con la frecuencia, este circuito equivalente es exacto sólo a la frecuencia para la cual fue derivada.

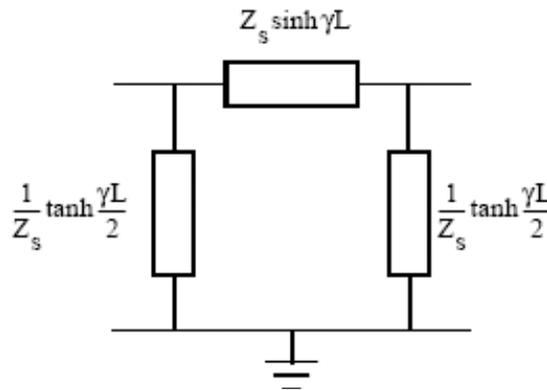


Fig. 3.14 Circuito equivalente exacto de una línea de transmisión de longitud L a una frecuencia dada

Nótese de las ecuaciones (3.67) y (3.68) que,

$$Z = \gamma z_s \quad (3.82)$$

$$Y = \frac{\gamma}{z_s} \quad (3.83)$$

El cual puede ser sustituido en (3.78) y (3.79) para obtener

$$Z_{ex} = ZL \frac{\sinh \gamma L}{\gamma L} \quad (3.84)$$

$$Y_{ex} = YL \frac{\tanh \frac{\gamma L}{2}}{\frac{\gamma L}{2}} \quad (3.85)$$

Estos resultados muestran que la línea en serie Z_{ex} del circuito equivalente exacto es igual a la impedancia serie total, ZL , de la línea, multiplicada por un factor de corrección de $\left(\frac{\sinh \gamma L}{\gamma L}\right)$. De manera similar, la admitancia shunt total Y_{ex} del circuito equivalente es

igual a la admitancia shunt total, YL , de la línea, multiplicada por un factor de corrección de $\left(\frac{\tanh\left(\frac{\gamma L}{2}\right)}{\frac{\gamma L}{2}} \right)$. Los valores de los factores de corrección son muy cercanos a la unidad mientras la longitud de la línea sea menor a la décima parte de la longitud de onda de la línea.

Finalmente, para referencia, la comparación de (3.77) y (3.75) muestra que

$$Z_{ex} = -B \quad (3.86)$$

$$\frac{Y_{ex}}{Z} = \frac{1-A}{B} \quad (3.87)$$

3.3.5 Flujo de potencia en la línea de transmisión

Aunque el flujo de potencia en cualquier punto a lo largo de una línea de transmisión siempre puede encontrarse si se conocen o se pueden calcular la tensión, la corriente y el factor de potencia se pueden derivar ecuaciones para la potencia en términos de las constantes ABCD [7]. Las ecuaciones se aplican a cualquier red de dos pares de terminales. Repitiendo la ecuación (3.138) y resolviendo para la corriente del terminal receptor, I_R obtenemos

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (3.88)$$

$$I_R = \frac{V_S - AV_R}{B} \quad (3.89)$$

tomando

$$A = |A| \angle \alpha \quad (3.90)$$

$$B = |B| \angle \beta \quad (3.91)$$

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ \quad (3.92)$$

$$V_S = |V_S| \angle \delta \quad (3.93)$$

obtenemos

$$I_R = \frac{|V_S|}{|B|} \angle(\alpha - \beta) - \frac{|A| \cdot |V_R|}{|B|} \angle(\alpha - \beta) \quad (3.94)$$

Luego la potencia compleja $V_R I_R^*$ en el terminal receptor es

$$P_R + jQ_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \angle(\beta - \alpha) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \angle(\beta - \alpha) \quad (3.95)$$

y la potencia real y reactiva en el terminal receptor son:

$$P_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \cos(\beta - \alpha) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha) \quad (3.96)$$

$$Q_R = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \sin(\beta - \alpha) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \sin(\beta - \alpha) \quad (3.97)$$

Observando que la expresión para la potencia compleja $P_R + jQ_R$ es, según la ecuación (3.95), la resultante de combinar dos vectores expresados en forma polar, se pueden dibujar estos vectores en el plano complejo cuyas coordenadas horizontal y vertical están dadas en unidades de potencia (Volts y Vars). La Fig. 3.15 muestra las dos cantidades complejas y su diferencia como lo expresa la ecuación (3.95). La Fig. 3.16 muestra los mismos vectores con el origen de los ejes coordenados desplazado. Este dibujo es un diagrama de potencia con la resultante cuya magnitud es $|P_R + jQ_R|$ o $|V_R||I_R|$, formando un ángulo θ_R con el eje horizontal.

Como es de esperarse, las componentes real e imaginaria de $|P_R + jQ_R|$ son

$$P_R = |V_R||I_R| \cos \theta_R \quad (3.98)$$

y

$$Q_R = |V_R||I_R| \text{sen } \theta_R \quad (3.99)$$

donde θ_R es el ángulo de fase por el cual V_R adelanta a I_R .

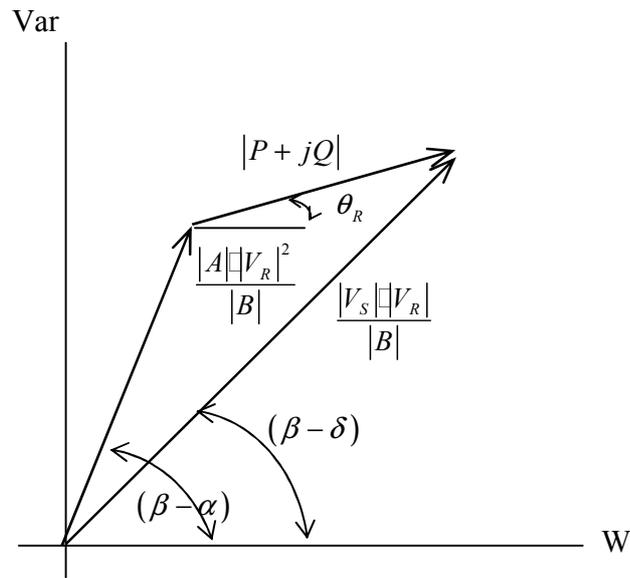


Fig. 3.15 Vectores de la ecuación (3.95) dibujados en el plano complejo con magnitudes y ángulos

El signo de Q concuerda con el convenio que asigna valores positivos a Q cuando la corriente está retrasada respecto a la tensión.

A continuación se determinan algunos puntos del diagrama de potencias de la Fig. 3.16, correspondientes a varias cargas para valores fijos de $|V_S|$ y $|V_R|$. En primer lugar, el punto n no depende de la corriente I_R y que no cambiará en tanto $|V_R|$ permanezca constante. Además, la distancia entre los puntos n y k es constante para valores fijos de $|V_S|$ y $|V_R|$. Por tanto, como al cambiar la carga varía la distancia de 0 a k , este último punto, al tener que mantenerse a distancia constante del punto fijo n , tiene que moverse sobre una circunferencia cuyo centro es n . Por esto, todos los puntos representativos de cargas de una red con valores fijos de $|V_S|$ y $|V_R|$ están sobre una circunferencia determinada por los valores de las tensiones dadas. Si un nuevo valor de $|V_S|$ se mantiene constante con el mismo valor de $|V_R|$, el punto n queda invariable, pero se obtiene una nueva circunferencia de radio nk .

El punto n puede situarse tomando $\frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|}$ desde el origen formando, en el tercer cuadrante, un ángulo $\beta - \alpha$ con el eje horizontal. Se obtiene mayor precisión situando el punto n mediante el cálculo de sus coordenadas rectangulares. El examen de la Fig. 3.16 nos da para el diagrama en el extremo receptor:

$$\text{Radio del círculo del extremo receptor} = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \quad VA \quad (3.100)$$

Coordenadas del centro del círculo del extremo receptor

$$\text{Horizontal} = -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \cos(\beta - \alpha) \quad W \quad (3.101)$$

$$\text{Vertical} = -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \sin(\beta - \alpha) \quad \text{Var} \quad (3.102)$$

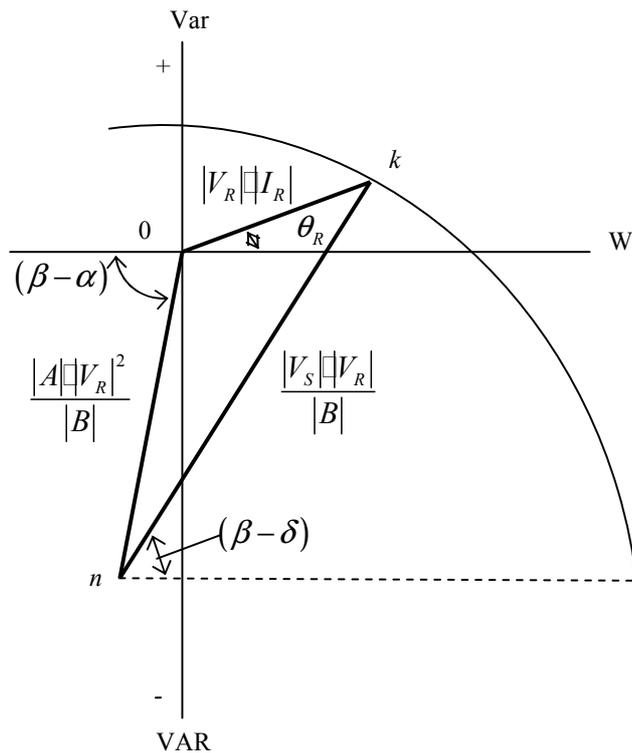


Fig. 3.16 Diagrama de potencia obtenido por el desplazamiento del origen de los ejes coordenados de la Fig. 3.15

Como las ecuaciones (3.96) y los diagramas de potencias se han desarrollado a partir de las constantes de una red de dos pares de terminales, las tensiones están en Volts, respecto al neutro, por fase y las coordenadas en Volts y Vars, por fase, si el circuito representado por la red es un circuito trifásico. Si sustituimos las tensiones entre líneas y neutro por las de línea, cada longitud de diagrama se multiplica por 3, puesto que el producto de dos tensiones es el que define cada longitud y la tensión de línea de un circuito trifásico equilibrado es $\sqrt{3}$ veces la tensión entre línea y neutro. Así, cuando se utilizan las tensiones de línea en las ecs. (3.96), los Volts y Vars del diagrama son valores trifásicos totales. En los sistemas de potencia, las tensiones de línea se especifican en kilo volts y los valores de potencia se miden en kilo Volts, kilo Vars y kilo Volt-amperes trifásicos totales o en mega Volts, mega Vars y mega Volt-amperes. Las coordenadas dadas por la ecuación (3.102) son mega Volts y mega Vars para las tres fases totales si los términos de tensión son kilo Volts de línea a línea. Esto también se aplica a las ecs. (3.95) a (3.97).

Si se mantiene constante la tensión en el extremo receptor y se trazan los diagramas de este extremo, para diversos valores de la tensión en el extremo distribuidor, las circunferencias obtenidas son concéntricas, puesto que la situación del centro de las circunferencias correspondientes al extremo receptor es independiente de la tensión en el extremo distribuidor.

Si no varía la tensión en el extremo distribuidor, las circunferencias del extremo receptor, para diferentes tensiones en dicho extremo, no son concéntricas, por que las ecuaciones (3.102) indican que los centros de las circunferencias están en un punto distinto para cada valor de $|V_R|$ pero todos ellos sobre una recta que pasa por el origen. Los radios de las circunferencias varían también con $|V_R|$.

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN FINITA

Para una línea de transmisión corta es bastante satisfactorio el uso de las aproximaciones

$$Z_{ex} \approx Z_{series} L \quad (ohms) \quad (3.103)$$

$$Y_{ex} \approx \frac{L}{Z_{shunt}} \quad (micromhos) \quad (3.104)$$

Donde Z_{series} y Z_{shunt} son los elementos de la diagonal de las matrices serie e impedancia shunt y L es la longitud de la línea [6].

Para las líneas que exceden los 120 km. de longitud, la multiplicación simple de las propiedades inherentes de la línea por kilómetro por la longitud de la línea es inadecuada y las correcciones de la longitud de la línea exacta descritas en una sección anterior (*Transmisión y recepción exacta del circuito equivalente*) deberán usarse.

VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA EN LÍNEAS LARGAS

Frecuencia dependiente del circuito equivalente de una línea de transmisión

El circuito equivalente de una línea de transmisión mostrado en la Fig. 3.13 y en la Fig. 3.14 se dice que es exacto ya que la solución de la corriente y el voltaje en sus terminales corresponde exactamente a la solución de las ecuaciones parciales de la línea para una frecuencia dada. El circuito equivalente es exacto sólo en una frecuencia única, sin embargo, y aproximando sólo la solución de las ecuaciones diferenciales como la frecuencia desviada del valor nominal [6].

El rango de frecuencia de interés en la mayoría de los estudios del diseño del sistema está entre 55 y 75 Hz. La frecuencia del sistema puede fallar y bajar a 55 Hz en situaciones de emergencia donde una sección del sistema es separada del resto y tiene una deficiencia de

generación. Las frecuencias altas como de 75 Hz pueden ocurrir en la principal transmisión de los sistemas hidroeléctricos remotos cuando estos están desconectados de su carga por la apertura de las líneas largas interconectadas en sus terminales de la recepción.

Se asume que la resistencia inherente de la línea por kilómetro, la inductancia y la capacitancia shunt son constantes por sobre el rango de frecuencia, aunque estos parámetros no son constantes sobre los rangos de frecuencia amplios debido a la variación en la profundidad de penetración de corrientes a tierra y debido al efecto superficial del conductor. El asumir que los parámetros inherentes de la línea son constantes permite la secuencia por kilómetro de impedancias y que las admitancias sean usadas y escritas como

$$Z(j\omega) = R_s + j\omega L_s \quad (3.105)$$

$$Y(j\omega) = j\omega C_s \quad (3.106)$$

donde R_s , L_s y C_s son valores inherentes en kilómetro secuencia positiva, negativa o cero de los parámetros de la línea.

Una línea de transmisión corta cuyos parámetros exacto y aproximado del circuito equivalente son muy parecidos puede ser modelado de manera satisfactoria por el circuito equivalente que se muestra en la Fig. 3.17. Una línea de transmisión larga no puede ser representada por un circuito equivalente de la forma en que se muestra en la Fig. 3.17 porque el comportamiento de Z_{ex} y Y_{ex} de una línea larga no corresponden a los valores constantes de R_s , L_s y C_s incluso para la banda de frecuencia reducida que se está considerando aquí.

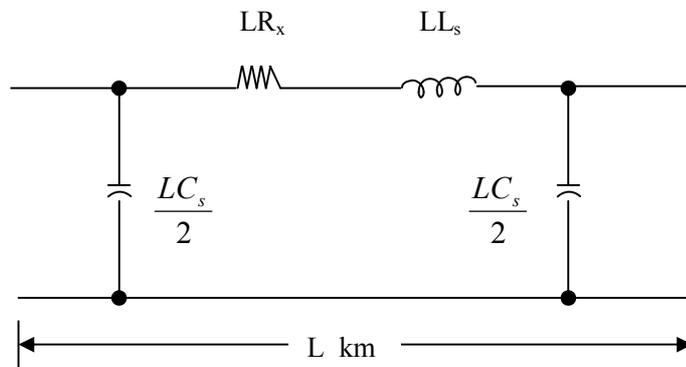


Fig. 3.17 *Circuito equivalente de una línea de transmisión corta bajo una banda de frecuencia reducida respecto a una relación de frecuencia*

Los parámetros exactos, Z_{ex} y Y_{ex} , del circuito equivalente mostrado en la Fig. 3.13 y en la Fig. 3.14 pueden ser escritos como

$$Z_{ex} = R_{ex} + j\omega L_{ex} \quad (3.107)$$

$$Y_{ex} = j\omega C_{ex} \quad (3.108)$$

Los parámetros R_{ex} , L_{ex} y C_{ex} no son constantes, varían de manera significativa puesto que la frecuencia es variada por encima del rango de interés, con la variación se vuelven más fuertes conforme aumenta la longitud de la línea.

3.4 Modelado de Transformadores de Potencia

Cuando se representa un transformador por un circuito equivalente no hay transformación de tensión correspondiente a la transformación de tensión entre los lados de alta y baja tensión del transformador real. La corriente en ambos extremos del circuito equivalente es idéntica si se desprecia la corriente magnetizante. En un transformador real, la corriente en los arrollamientos de alta y baja tensión sería idéntica únicamente para igual número de vueltas en el primario y en el secundario, despreciando la corriente magnetizante. En un circuito en el que los transformadores están representados por sus circuitos equivalentes, las impedancias adecuadas son las del circuito real, referido al lado del transformador para el que se construye el circuito equivalente.

La teoría de los transformadores demuestra que la impedancia del secundario de un transformador puede referirse a la del primario, multiplicando dicha impedancia por el cuadrado del cociente de las vueltas del arrollamiento primario y del secundario.

Para transferir el valor óhmico de la impedancia desde el nivel de voltaje sobre un lado del transformador trifásico hasta el nivel de voltaje en el otro lado, el factor de multiplicación es el cuadrado de la relación de los voltajes línea a línea sin que importe si la conexión del transformador es Y-Y o Δ -Y [7].

3.4.1 Impedancia por unidad de transformadores de tres devanados

Los arrollamientos primario y secundario de un transformador de dos devanados tienen los mismos kVA nominales, pero los tres arrollamientos de un transformador de tres devanados pueden tener distintos kVA nominales. La impedancia de cada arrollamiento de un transformador de tres devanados puede venir dada en por ciento o por unidad sobre base del valor de régimen de su propio arrollamiento, o pueden realizarse ensayos para determinar las impedancias. En cualquier caso, todas las impedancias por unidad en el diagrama de impedancias deben expresarse respecto a los mismos kVA base.

Pueden medirse tres impedancias por el ensayo normal de cortocircuito, como sigue:

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.

Si las tres impedancias, medidas en ohms, se refieren a la tensión de uno de los devanados, las impedancias de cada devanado por separado, referidas al mismo devanado, están relacionadas con las medidas en la forma siguiente:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t \quad (3.109)$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t$$

en las que Z_p , Z_s y Z_t son las impedancias de los devanados primario, secundario y terciario, referidas al circuito primario si Z_{ps} , Z_{pt} y Z_{st} son las impedancias medidas referidas al circuito primario. Resolviendo las ecuaciones (3.109), se obtiene

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \quad (3.110)$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \quad (3.111)$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \quad (3.112)$$

Las impedancias de los tres arrollamientos (Fig. 3.18) están conectadas en estrella para representar el circuito equivalente monofásico del transformador de tres devanados, despreciando la corriente magnetizante.

El punto común es ficticio y no tiene relación con el neutro del sistema. Los puntos p , s y t están conectados a las partes del diagrama de impedancias que representan las partes del sistema unidas a los devanados primario, secundario y terciario del transformador. Como los valores en ohms de las impedancias deben estar referidos a la misma tensión, la conversión a impedancias por unidad requiere los mismos kVA base para los tres circuitos y tensiones base, en los tres circuitos, que estén en la misma relación que las tensiones de línea a línea nominales de los tres circuitos del transformador.

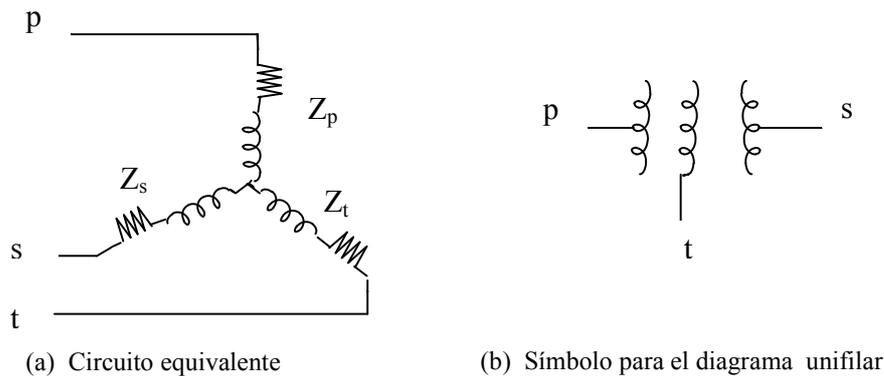


Fig. 3.18 *Circuito equivalente de un transformador de tres devanados y símbolo correspondiente que debe utilizarse en el diagrama unifilar. Los puntos p, s y t unen el circuito del transformador a los circuitos equivalentes apropiados que representan las partes del sistema conectados a los arrollamientos primario, secundario y terciario.*

CONTROL POR MEDIO DE TRANSFORMADORES

Los transformadores suministran un medio adicional de controlar el flujo de la potencia real y reactiva. Un concepto del transformador en un sistema de potencia es el de cambiar de un nivel de voltaje a otro, sin embargo, hay transformadores que suministran un pequeño ajuste en la magnitud del voltaje, generalmente en el intervalo de $\pm 10\%$, y otros en los cuales el desplazamiento del ángulo de fase de los voltajes de línea son componentes importantes de un sistema de potencia. Algunos transformadores regulan la magnitud y el ángulo de fase.

Casi todos los transformadores suministran derivaciones sobre los devanados a fin de ajustar la relación de transformación cambiando las tomas cuando el transformador está desenergizado. Un cambio en una toma puede hacerse mientras el transformador está energizado; a este transformador se le llama transformador cambiador de toma con carga (LTC) o transformador cambiador de toma sobre carga (TCUL). El cambio de toma es automático y operado por motores que responden a relevos colocados para mantener el voltaje a un nivel preestablecido. Hay circuitos especiales que permiten el cambio sin interrumpir la corriente.

Un tipo de transformador diseñado para pequeños ajustes de voltaje en vez de cambios de los niveles de voltaje, es el que se conoce como transformador regulante. La Fig. 3.19 muestra un transformador regulante para controlar la magnitud del voltaje; la Fig. 3.20 muestra un transformador regulante para el control de fase. El diagrama vectorial de la Fig. 3.21 ayuda a explicar el desplazamiento en el ángulo de fase. Cuando uno de los devanados sobre los cuales se hace la derivación están sobre el mismo núcleo magnético, así como la fase del devanado cuyo voltaje está a 90° fuera de fase con el voltaje desde el neutro al punto conectado al centro del devanado con derivaciones. Por ejemplo, el voltaje a neutro

V_{an} se incrementa mediante una componente ΔV_{an} que está en fase a 180° fuera de fase con V_{bc} . La Fig. 3.21 muestra cómo los tres voltajes de línea están desplazados en fase con muy poco cambio en magnitud.

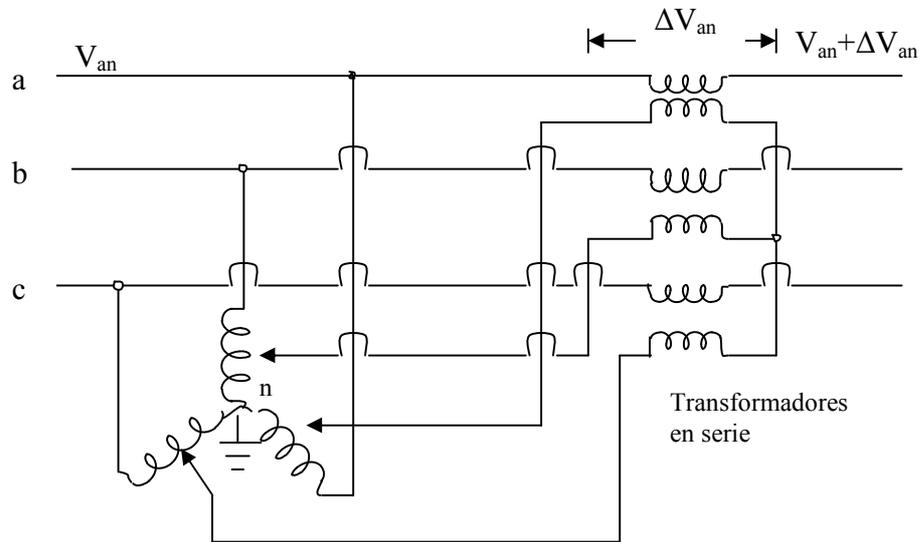


Fig. 3.19 Transformador regulante para el control de la magnitud del voltaje

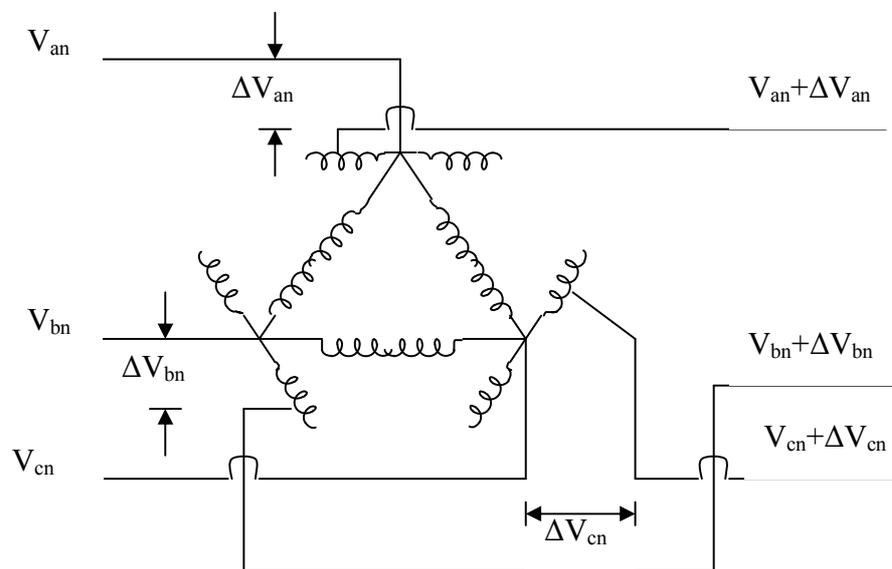


Fig. 3.20 Transformador regulante para control del ángulo de fase. Los devanados dibujados paralelos entre sí están enrollados sobre el mismo núcleo magnético

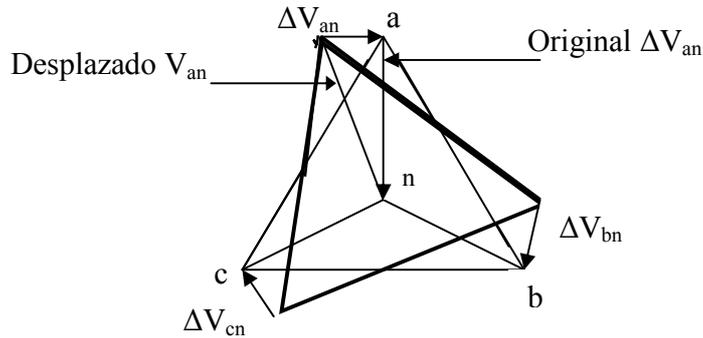


Fig. 3.21 Diagrama vectorial para el transformador regulante que se muestra en la Fig. 3.20

El procedimiento para determinar Y_{barra} y Z_{barra} por unidad para un circuito que contiene un transformador regulante es el mismo que el de cualquier transformador cuya relación de espiras es diferente a la relación utilizada para seleccionar la relación de los voltajes base por los dos lados del transformador. Un transformador como el descrito se dice que tiene una relación de espiras no nominal.

Si tenemos dos barras conectadas por un transformador, y si la relación de voltajes de línea a línea del transformador es la misma que la relación de voltajes base de las dos barras, el circuito equivalente (ignorando la corriente de magnetización) es simplemente la impedancia del transformador por unidad en la base elegida, conectada entre las barras. La Fig. 3.22a es un diagrama unifilar de transformadores en paralelo. Suponiendo que una de ellas tiene la relación de voltaje $1/n$, la cual es también la relación de voltajes base en los dos lados del transformador, y que la relación de voltajes del otro es $1/n'$, el circuito equivalente sería el de la Fig. 3.22b.

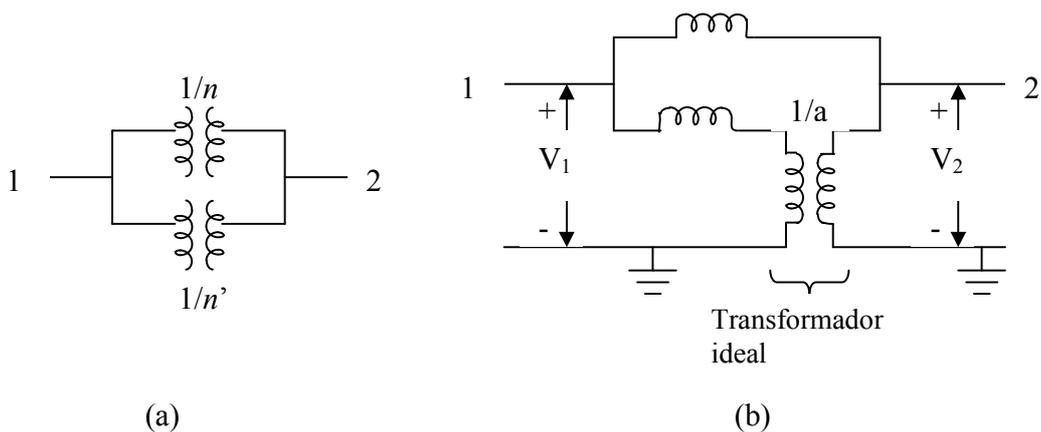


Fig. 3.22 Transformadores con diferente relación de espiras conectados en paralelo.
 (a) Diagrama unifilar;
 (b) Diagrama de reactancia por unidad. La relación de espiras $1/a$ es igual a n/n'

Si se tiene un transformador regulante (en vez de un LTC, que cambia el nivel de voltaje en la medida en que cambia la derivación). La Fig. 3.22b puede interpretarse como dos líneas de potencia en paralelo con un transformador regulante en una línea.

Evidentemente, el problema es encontrar las admitancias de los nodos de la Fig. 3.23, que es una representación más detallada del LTC, el cual tiene una relación de espiras de $1/n'$ o del transformador regulante con la relación de transformación $1/a$. La admitancia Y en la figura es el equivalente de la impedancia por unidad del transformador, pues la admitancia Y se muestra en el lado del transformador ideal cercano al nodo 1; el lado de cambio de toma (o el lado correspondiente n') está cercano al nodo 2. Esta designación es importante en el uso de las ecuaciones que van a derivarse. Si se considera un transformador con una relación de espiras a es n'/n la razón. Si es un transformador regulante, a puede ser real o imaginario, tal como 1.02 para un 2% de refuerzo en magnitud ó $e^{j\pi/60}$ para 3° de corrimiento en fase.

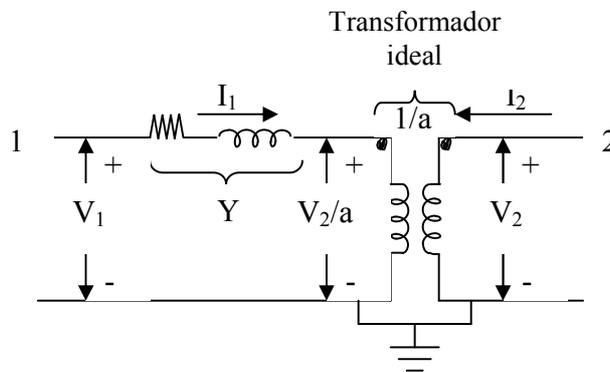


Fig. 3.23 Diagrama detallado de reactancia por unidad del transformador de la Fig. 3.22b, cuya relación de espiras es $1/a$

La Fig. 3.23 ha sido rotulada para mostrar las corrientes I_1 e I_2 entrando a los dos nodos, y los voltajes son V_1 y V_2 referidos al nodo de referencia. La expresión compleja para la potencia en el transformador ideal en dirección del nodo 1 es

$$S_1 = \frac{V_2}{a} I_1^* \quad (3.113)$$

y en el transformador desde el nodo 2

$$S_2 = V_2 I_2^* \quad (3.114)$$

Puesto que se supone un transformador ideal sin pérdidas, la potencia en el transformador ideal desde el nodo 1 debe ser igual a la potencia de salida del transformador desde el nodo 2, y así

$$\frac{V_2}{a} I_1^* = -V_2 I_2^* \quad (3.115)$$

y

$$I_1 = -a^* I_2 \quad (3.116)$$

La corriente I_1 puede expresarse por

$$I_1 = \left(V_1 - \frac{V_2}{a} \right) Y \quad (3.117)$$

ó

$$I_1 = V_1 Y - V_2 \frac{Y}{a} \quad (3.118)$$

Sustituyendo $-a^* I_2$ por I_1 y resolviendo para I_2 encontramos

$$I_2 = -V_1 \frac{Y}{a^*} + V_2 \frac{Y}{aa^*} \quad (3.119)$$

comparando las ecuaciones (3.114) y (3.115) tenemos, ya que $aa^* = |a|^2$, las admitancias de nodos

$$Y_{11} = Y \quad (3.120)$$

$$Y_{22} = \frac{Y}{|a|^2} \quad (3.121)$$

$$Y_{12} = -\frac{Y}{a} \quad (3.122)$$

$$Y_{21} = -\frac{Y}{a^*} \quad (3.123)$$

El equivalente π correspondiente a estos valores de admitancias de nodo puede encontrarse solamente si a es real, de modo que $Y_{21} = Y_{12}$. Si los transformadores cambian su magnitud pero no la fase, el circuito es el de la Fig. 3.24. Este circuito no puede realizarse si Y tiene una componente real, lo que requería una resistencia negativa en el circuito. El factor importante, sin embargo, es el que podemos tener en cuenta para magnitud desplazamiento de fase, y transformadores con relación de espiras no nominales en los cálculos para obtener Y_{barra} y Z_{barra} .

Cuando dos transformadores están en paralelo se puede variar la distribución de potencia reactiva entre los transformadores ajustando las relaciones de magnitud de voltaje. Cuando

dos transformadores en paralelo, de igual número de kVA, no comparten los kVA por igual porque sus impedancias difieren, los kVA pueden prácticamente igualarse ajustando la magnitud del voltaje a través de un cambio de derivación.

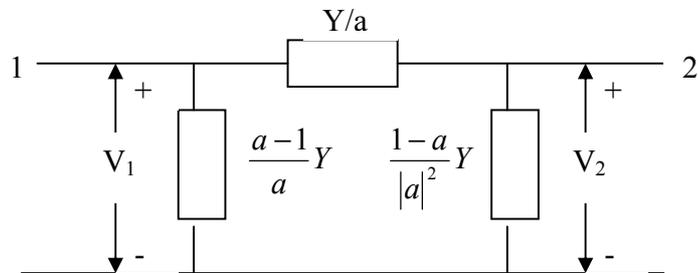


Fig. 3.24 Circuito con las admitancias de nodo de las ecuaciones (3.116) cuando a es real

Si una línea de transmisión determinada lleva una potencia reactiva o muy pequeña o muy grande, un transformador regulante para ajustar la magnitud del voltaje puede colocarse en un extremo de la línea a fin de hacer que la línea transmita una potencia reactiva grande o pequeña.

El generador sincrónico entrega una cantidad creciente de potencia reactiva al sistema al que está conectado a medida que el estímulo se aumenta. Cuando este estímulo se reduce, proporciona menos potencia reactiva y cuando está sobre estimulado saca potencia reactiva del sistema.

En la aplicación de condensadores a la carga, la potencia reactiva proporcionada por los condensadores producen un aumento en el voltaje de la carga. Ya que al incrementar el estímulo del generador sincrónico se provoca la entrada, de potencia reactiva al sistema, el efecto es igual a agregar condensadores y producir un aumento en el voltaje en la barra del generador a menos que el sistema sea muy grande.

3.5 Modelado de elementos en derivación

3.5.1 Capacitores en derivación

Proporcionan potencia reactiva y elevan el voltaje local [5]. Son usados en todo el sistema y los hay de diferentes tamaños.

Las principales ventajas de los capacitores en derivación son su bajo costo y su flexibilidad en su instalación y operación. Su principal desventaja es que su salida de potencia reactiva es proporcional al cuadrado del voltaje.

Los capacitores en derivación son usados extensamente en los sistemas de distribución para la corrección del factor de potencia y controlar el alimentador de voltaje.

El objetivo de la corrección del factor de potencia es el de proporcionar potencia reactiva cerca del punto donde va a ser consumida en lugar de ser proporcionada desde una fuente remota. La mayoría de las cargas absorben potencia reactiva; esto es, tienen factores de potencia atrasados.

3.5.2 Reactores en derivación

Se utilizan para compensar los efectos de capacitancia de la línea, particularmente para limitar la elevación del voltaje en un circuito abierto o en carga de luz. Se utiliza generalmente en líneas superiores a 200 Km de longitud [5].

Un reactor en derivación de suficiente tamaño debe estar conectado de forma permanente a la línea para limitar la frecuencia fundamental de los sobrevoltajes temporales a aproximadamente 1.5 p. u. para una duración menor a 1 segundo. Tales reactores conectados a la línea también sirven para limitar los sobrevoltajes en la energización (switchero transitorio).

Para líneas cortas usadas en sistemas fuertes, no se requiere que los reactores estén conectados de manera permanente. En algunos casos, todos los reactores usados pueden estar switcheados, conectados ya sea al devanado terciario del transformador. En algunas aplicaciones, los reactores con derivador facilitan el control del voltaje al permitir la variación en el valor del reactor.

Los reactores en derivación se construyen de manera similar al transformador, pero tienen un único devanado (por fase) en un núcleo de acero con entrehierro y sumergidos en aceite. Su construcción puede ser monofásico o trifásico.

3.5.3 Condensadores síncronos

Un condensador síncrono es una máquina síncrona funcionando sin un primotor o una carga mecánica [5]. Para controlar el campo de excitación, esto se puede hacer ya sea absorbiendo o generando potencia reactiva. Se puede utilizar un regulador de voltaje, para ajustar automáticamente la salida de potencia reactiva y así mantener constante el voltaje terminal.

Se encuentran dentro de la categoría de compensadores activos en derivación. Los condensadores síncronos sirven como excelentes dispositivos para controlar el voltaje y la potencia reactiva.

Los compensadores síncronos tienen diversas ventajas sobre los compensadores estáticos, ya que contribuyen a la capacidad de corto circuito del sistema. Su producción de potencia reactiva no es afectada por el voltaje del sistema. Durante las oscilaciones de potencia (oscilaciones electromagnéticas) hay un intercambio de energía cinética entre un condensador síncrono y el sistema de potencia. Durante oscilaciones de potencia un condensador síncrono puede proporcionar una gran cantidad de potencia reactiva.

3.6 Modelado de elementos serie

3.6.1 Capacitores serie

Son conectados en serie con los conductores para compensar la reactancia inductiva de la línea. Esto reduce la reactancia de transferencia entre los buses en los cuales están conectadas las líneas, incrementa la potencia máxima a la cual puede ser transmitida, y reduce la pérdida de potencia reactiva efectiva. A pesar de que los capacitores serie no son usualmente instalados para el control del voltaje, pueden contribuir a mejorar el control de voltaje y el balance de la potencia reactiva. La potencia reactiva producida por los capacitores serie aumenta con el incremento de la transferencia de potencia [3] y [5].

Su filosofía es la disminución de la distancia eléctrica en un sistema de transmisión para evitar la pérdida de sincronismo. La presencia de fallas en sistemas poco mallados, representa un desbalance de potencia grande; cuando se libera la falla, el cambio de topología presenta un nuevo disturbio que puede llevar el sistema a condiciones de operación inestable; el control reduce la distancia eléctrica y con ello la magnitud de la perturbación que se refleja en las desviaciones angulares de los generadores, aumentando la posibilidad de recobrar la condición estable.

La distancia eléctrica se altera incorporando a la línea de transmisión capacitores serie durante un corto tiempo, su ventaja es que el dimensionamiento de los capacitores se hace para su operación temporal reduciendo así el costo de inversión.

El efecto de incorporar un capacitor serie en la línea de transmisión es la cancelación de una parte de la reactancia inductiva de la línea, pero el efecto capacitivo parece inalterado; de esta forma el efecto que se observa en estado estable es el de la operación de una línea más corta con un efecto capacitivo mayor.

3.7 Métodos de control de voltaje

El control del nivel de voltaje se logra controlando la producción, absorción y flujo de la potencia reactiva en todo el sistema de potencia [5]. Las unidades de generación proporcionan el principio básico del control de voltaje; los reguladores automáticos de voltaje controlan la excitación del campo para mantener un nivel de voltaje fijo en las terminales de los generadores. Normalmente se exigen medios adicionales para controlar el voltaje a lo largo del sistema. Los dispositivos utilizados se pueden clasificar de la forma siguiente:

1. Fuentes de potencia reactiva; tales como capacitores en derivación, reactores en derivación, condensadores síncronos y compensadores estáticos de Var's.
2. Compensadores de reactancia de línea, tales como capacitores serie.
3. Transformadores de regulación, tales como transformadores con derivación y elevadores.

Los capacitores en derivación, reactores en derivación y capacitores serie proporcionan compensación pasiva, y están conectados ya sea de forma permanente al sistema de transmisión y de distribución o con interruptor. Contribuyen al control de voltaje modificando las características del área.

Los condensadores síncronos y CEV's proporcionan compensación activa; la potencia reactiva absorbida o proporcionada por estos dispositivos es automáticamente ajustada para mantener el voltaje de los buses en un cierto valor específico a los cuales están conectados. Junto con las unidades generadoras, establecen los voltajes a un punto establecido de voltaje en el sistema. Los voltajes en otros puntos en el sistema están determinados por el flujo de potencia activa y reactiva a través de los diversos circuitos del sistema, incluyendo los dispositivos de compensación pasiva.

3.7.1 Producción y absorción de potencia reactiva

Los generadores síncronos pueden generar o absorber potencia reactiva dependiendo de la excitación; cuando un generador está sobre-excitado suministra potencia reactiva, y cuando está sub-excitado la absorbe. La capacidad para continuar suministrando o absorbiendo la potencia reactiva es, sin embargo, limitada por la corriente de campo, la corriente de armadura y los límites de calentamiento. Los generadores síncronos están generalmente equipados con reguladores automáticos de voltaje que continuamente ajustan la excitación para controlar el voltaje de la armadura [5].

Las líneas aéreas, dependiendo de la corriente de carga, absorben o suministran potencia reactiva.

Si las cargas están por debajo de la carga natural, las líneas producen potencia reactiva y si la carga está por arriba de la carga natural las líneas absorben la potencia reactiva.

Los cables subterráneos, adeudando su propia capacitancia alta, tienen cargas naturales altas. Siempre tienen carga por debajo de sus cargas naturales, y de aquí que generen potencia reactiva bajo todas las condiciones en que operen.

Los generadores siempre absorben potencia reactiva sin tener en cuenta su propia carga; sin ninguna carga, los efectos de la reactancia en derivación de magnetización predominan; y a carga llena, los efectos de la reactancia de magnetización predominan.

Las cargas normalmente absorben la potencia reactiva. Un típico bus de carga proporcionado por un sistema de potencia está compuesto por un gran número de dispositivos. Los cambios en su composición dependen del día, hora y condiciones ambientales. Las características compuestas son tales que normalmente un bus de carga absorbe la potencia reactiva. Tanto la potencia activa como la reactiva de las cargas compuestas varía en función de la magnitud del voltaje. Las cargas con un factor de potencia un poco atrasado provocan un descenso excesivo en el voltaje del área de transmisión y no es económico el suministro. Los consumidores industriales normalmente se cobran tanto la potencia reactiva así como la potencia activa; esto les da un incentivo para mejorar el factor de potencia de la carga usando capacitores en derivación [5].

Los dispositivos de compensación usualmente ayudan a proporcionar o absorber potencia reactiva y por consiguiente controlan el balance de la potencia reactiva de una manera deseada.