

Clasificación de las líneas

Lineas corta

medias. Si la línea aérea se clasifica como corta, la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo con una pérdida de exactitud pequeña y sólo se requiere considerar la resistencia R y la inductancia L en serie para la longitud total de la línea.

En lo que se refiere a la capacitancia, se consideran como cortas las líneas de 60 Hz de conductor abierto que tienen menos de 80 km (50 millas) de longitud.

Lineas de transmision media

Como se muestra en la figura 6.2, una línea de longitud media se puede representar con suficiente exactitud con R y L como parámetros concentrados, con la mitad de la capacitancia al neutro de la línea concentrada en cada terminal del circuito equivalente. Como se mencionó anteriormente, por lo general, la conductancia en derivación, G , se desprecia cuando se calcula el voltaje y la corriente de líneas de transmisión de potencia. Si los capacitores se omiten, el mismo circuito representa las líneas cortas.

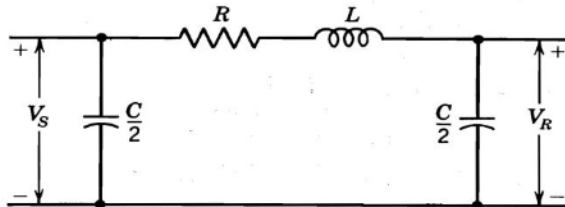


FIGURA 6.2

Equivalente monofásico de una línea de longitud media. Los capacitores se omiten para una línea corta.

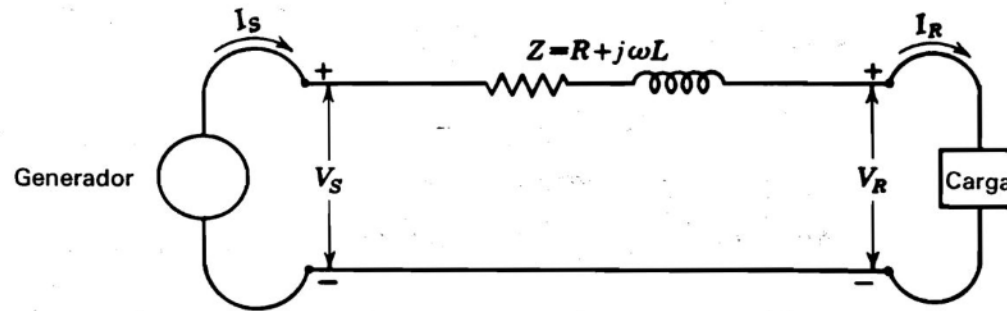
Las líneas de longitud media son las que están entre 80 km (50 millas) y 240 km (150 millas) de longitud.



Lineas de transmision alta

líneas que tienen más de 240 km (150 millas) requieren de cálculos en términos de constantes distribuidas si se necesita un alto grado de exactitud, aunque para algunos propósitos, se puede usar una representación de parámetros concentrados para líneas hasta de 320 km (200 millas) de largo.

LINEA DE TRANSMISION CORTA

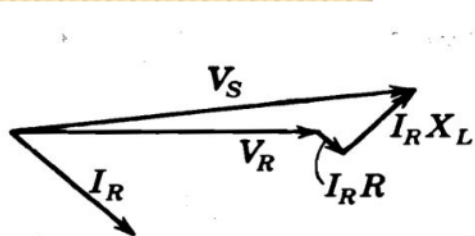


I_s e I_r son las corrientes en los extremos del generador y receptor

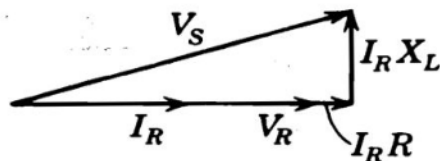
V_s y V_r son los voltajes linea a neutro en esos mismos extremos.

$I_s = I_r$

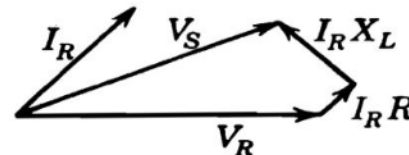
$V_s = V_r + I_r Z$



a) f.p. de la carga = 70% en atraso



b) f.p. de la carga = 100%



c) f.p. de la carga = 70% en adelante

FIGURA 6.4

Diagramas fasoriales de una línea de transmisión corta. Todos los diagramas se representan para las mismas magnitudes de V_R e I_R .

$$\text{Por ciento de regulación} = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (6.3)$$

$V_{R,NL}$ es la magnitud del voltaje en el extremo receptor de la carga

$V_{R,FL}$ es la magnitud del voltaje en el extremo receptor a plena carga

VS PERMANENCE CONSTANTE

Ejemplo 6.1. Un generador trifásico de 300 MVA, 20 kV tiene una reactancia subtransitoria de 20%. El generador alimenta cierto número de motores sincrónicos a través de una línea de transmisión de 64 km que tiene transformadores en ambos extremos, como se muestra en el diagrama unifilar de la figura 6.5. Los motores, todos de 13.2 kV, se representan sólo por dos motores equivalentes. El neutro del motor M_1 se aterriza a través de una reactancia. El neutro del segundo motor M_2 no está conectado a tierra (una condición inusual). Las entradas nominales de los motores son 200 MVA y 100 kVA para M_1 y M_2 , respectivamente. Para ambos motores $X_d'' = 20\%$. El transformador trifásico T_1 tiene los valores nominales 350 MVA, 230/20 kV con reactancia de dispersión de 10%. El transformador T_2 está compuesto de tres transformadores monofásicos, cada uno de 127/13.2 kV, 100 MVA con reactancia de dispersión de 10%. La reactancia serie de la línea de transmisión es de $0.5 \Omega/\text{km}$. Dibuje el diagrama de reactancias, con todas las reactancias señaladas en por unidad. Seleccione los valores nominales del generador como base en el circuito del generador.

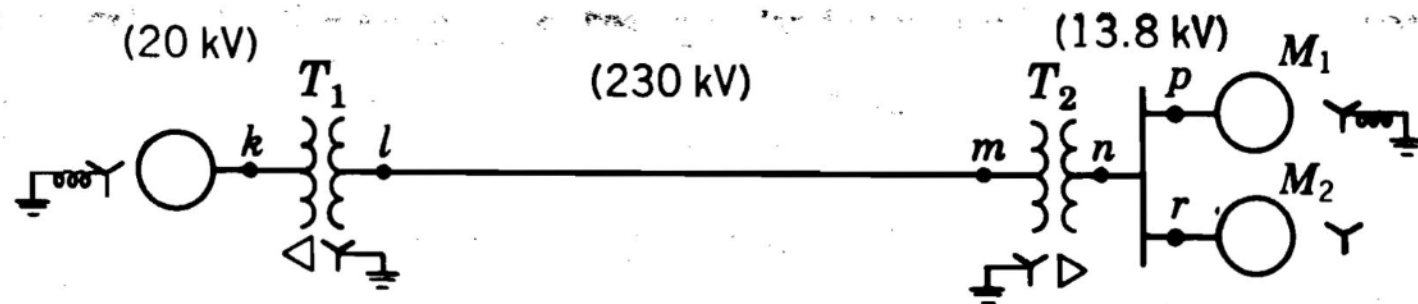


FIGURA 6.5

Diagrama unifilar para el ejemplo 6.1.

Solución. El valor nominal trifásico del transformador T_2 es

$$3 \times 100 = 300 \text{ kVA}$$

y su relación de voltajes línea a línea es

$$\sqrt{3} \times \frac{127}{13.2} = \frac{220}{13.2} \text{ kV}$$

Una base de 300 MVA y 20 kV en el circuito del generador requiere una base de 300 MVA en todas las partes del sistema, así como los siguientes voltajes base:

En la línea de transmisión: 230 kV (ya que T_1 tiene valores nominales 230/20 kV)

$$\text{En el circuito del motor: } 230 \frac{13.2}{220} = 13.8 \text{ kV}$$

Estas bases se muestran entre paréntesis en el diagrama unifilar de la figura 6.5. Las reactancias de los transformadores, convertidas a la base apropiada, son

$$\text{Transformador } T_1: \quad X = 0.1 \times \frac{300}{350} = 0.0857 \text{ por unidad}$$

$$\text{Transformador } T_2: \quad X = 0.1 \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2 = 0.0915 \text{ por unidad}$$

La impedancia base de la línea de transmisión es

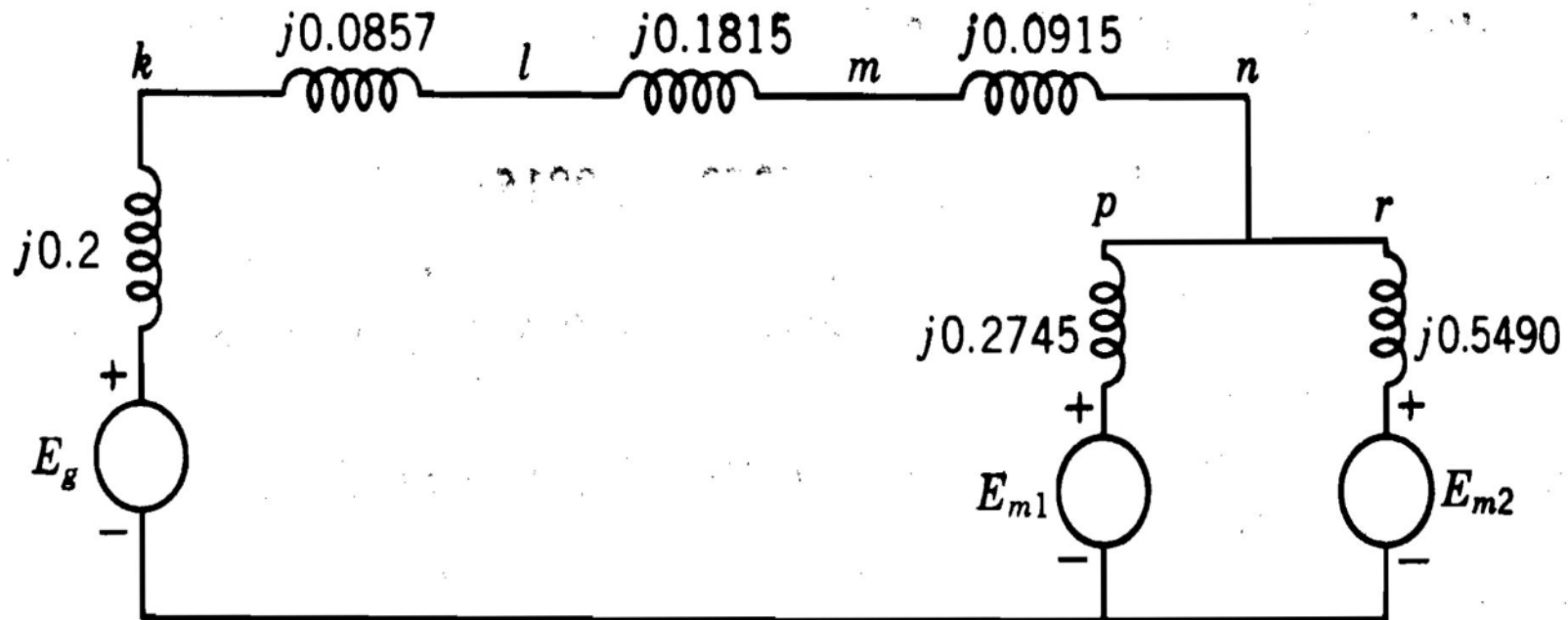
$$\frac{(230)^2}{300} = 176.3 \Omega$$

y la reactancia de la línea es

$$\frac{0.5 \times 64}{176.3} = 0.1815 \text{ por unidad}$$

$$\text{Reactancia } X_d'' \text{ del motor } M_1 = 0.2 \left(\frac{300}{200} \right) \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2 = 0.2745 \text{ por unidad}$$

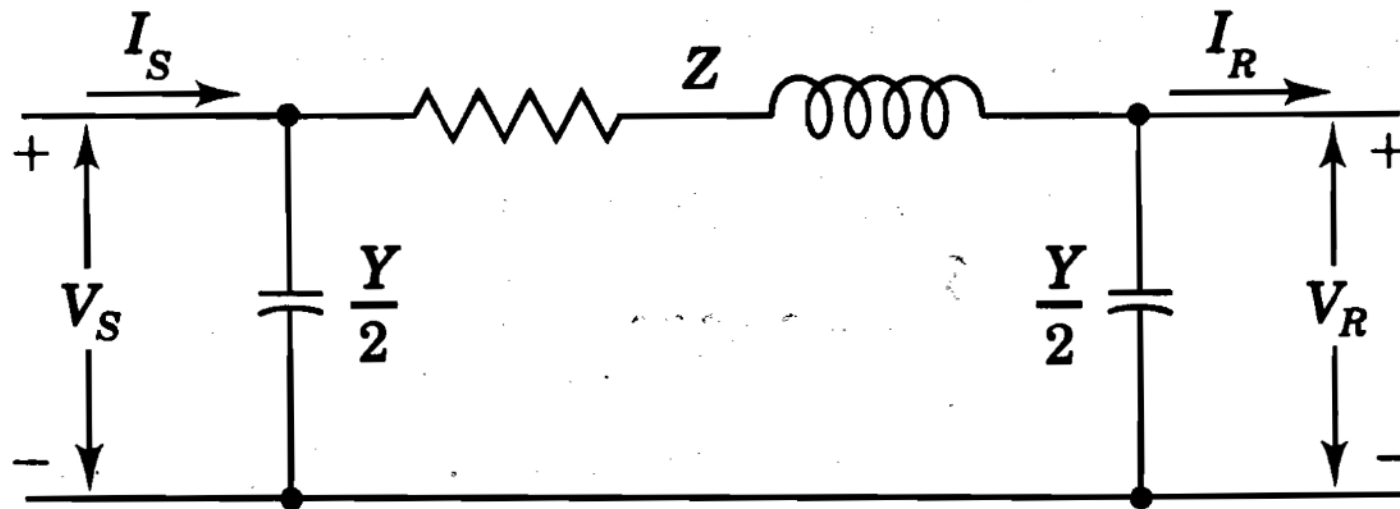
$$\text{Reactancia } X_d'' \text{ del motor } M_2 = 0.2 \left(\frac{300}{100} \right) \left(\frac{13.2}{13.8} \right)^2 = 0.5490 \text{ por unidad}$$



Línea de transmisión media

En los cálculos de una línea de longitud media se incluye la admitancia paralelo (generalmente capacitancia pura). Si se divide en dos partes iguales la admitancia paralelo total de la línea y cada una se coloca en los extremos generador y receptor, se obtiene el llamado circuito *nominal* π . Se hará referencia a la figura 6.7 para desarrollar las ecuaciones. Con el fin de obtener una expresión para V_S , se observa que la corriente en la capacitancia en el extremo receptor es $V_R Y/2$ y la corriente en la rama serie es $I_R + V_R Y/2$. Entonces,

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \quad (6.4)$$



$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \quad (6.5)$$

Para encontrar I_S , se observa que la corriente en la capacitancia en derivación en el extremo generador es $V_S Y/2$, que sumada a la corriente en la rama serie da

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (6.6)$$

Al sustituir V_S , de la ecuación (6.5), en la ecuación (6.6), se obtiene

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (6.7)$$

Las ecuaciones (6.5) y (6.7) se pueden expresar en la forma general

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (6.8)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (6.9)$$

donde

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1 \quad (6.10)$$

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

A las constantes $ABCD$ se les llama algunas veces *constantes generalizadas de circuito* 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 cada terminal. Las dimensiones de B y C son los ohms y los mhos o siemens, respectivamente. Las constantes se aplican a cualquier red lineal, pasiva y con cuatro terminales en dos lados, y cada uno tiene un par de ellas. A tal circuito se le conoce como *red de dos puertos*.

Fácilmente se puede dar un significado físico a las constantes. Si en la ecuación (6.8) I_R es cero, se observa que A es la relación V_S/V_R sin carga. De igual forma, B es la relación V_S/I_R cuando el extremo receptor está en cortocircuito. La constante A es útil en el cálculo de la regulación. Si $V_{R,FL}$ es el voltaje en el extremo receptor a plena carga para un voltaje en el extremo generador V_S , la ecuación (6.3) da

$$\text{Por ciento de regulación} = \frac{|V_S| / |A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (6.11)$$

En la tabla A.6 del apéndice se enlistan las constantes $ABCD$ para varias redes y combinaciones.

Linea de transmision larga

Ejemplo 6.3. Una línea de transmisión de un circuito a 60 Hz tiene una longitud de 370 km (230 millas). Los conductores son del tipo *Rook* con espaciamento plano horizontal y 7.25 m (23.8 pies) entre ellos. La carga en la línea es de 125 MW a 215 kV con un factor de potencia de 100%. Encuentre el voltaje, la corriente, la potencia en el extremo generador y la regulación de voltaje de la línea. Determine también la longitud y la velocidad de propagación de la onda en la línea.

Solución. Con el fin de usar las tablas A.3 a A.5 del apéndice, se seleccionan los pies y las millas en vez de los metros y kilómetros:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{23.8 \times 23.8 \times 47.6} \cong 30.0 \text{ pies}$$

y de las tablas para el conductor *Rook*

$$z = 0.1603 + j(0.415 + 0.4127) = 0.8431 \angle 79.04^\circ \Omega/\text{milla}$$

$$y = j[1/(0.0950 + 0.1009)] \times 10^{-6} = 5.105 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/milla}$$

$$\gamma l = \sqrt{yz} l = 230 \sqrt{0.8431 \times 5.105 \times 10^{-6}} \angle \frac{79.04^\circ + 90^\circ}{2}$$

$$= 0.4772 \angle 84.52^\circ = 0.0456 + j0.4750$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0.8431}{5.105 \times 10^{-6}}} \angle \frac{79.04^\circ - 90^\circ}{2} = 406.4 \angle -5.48^\circ \Omega$$

$$V_R = \frac{215\,000}{\sqrt{3}} = 124\,130 \angle 0^\circ \text{ V a neutral}$$

$$I_R = \frac{125\,000\,000}{\sqrt{3} \times 215\,000} = 335.7 \angle 0^\circ \text{ A}$$

De las ecuaciones (6.42) y (6.43) y si se conoce que 0.4750 radianes $= 27.22^\circ$

$$\cosh \gamma l = \frac{1}{2} \varepsilon^{0.0456 \angle 27.22^\circ} + \frac{1}{2} \varepsilon^{-0.0456 \angle -27.22^\circ}$$

$$= 0.4654 + j0.2394 + 0.4248 - j0.2185$$

$$= 0.8902 + j0.0209 = 0.8904 \angle 1.34^\circ$$

$$\sinh \gamma l = 0.4654 + j0.2394 - 0.4248 + j0.2185$$

$$= 0.0406 + j0.4579 = 0.4597 \angle 84.93^\circ$$

Entonces, de la ecuación (6.35)

$$V_S = 124\,130 \times 0.8904 \angle 1.34^\circ + 335.7 \times 406.4 \angle -5.48^\circ \times 0.4597 \angle 84.93^\circ$$

$$= 110\,495 + j2\,585 + 11\,483 + j61\,656$$

$$= 137\,860 \angle 27.77^\circ \text{ V}$$

y de la ecuación (6.36)

$$I_S = 335.7 \times 0.8904 \angle 1.34^\circ + \frac{124\,130}{406.4 \angle -5.48^\circ} \times 0.4597 \angle 84.93^\circ$$

$$= 298.83 + j6.99 - 1.00 + j140.41$$

$$= 332.31 \angle 26.33^\circ \text{ A}$$

En el extremo generador

$$\text{Voltaje de línea} = \sqrt{3} \times 137.86 = 238.8 \text{ kV}$$

$$\text{Corriente de línea} = 332.3 \text{ A}$$

$$\text{Factor de potencia} = \cos(27.77^\circ - 26.33^\circ) = 0.9997 \cong 1.0$$

$$\text{Potencia} = \sqrt{3} \times 238.8 \times 332.3 \times 1.0 = 137\,443 \text{ kW}$$

De la ecuación (6.35) se observa que sin carga, ($I_R = 0$)

$$V_R = \frac{V_S}{\cosh \gamma l}$$

Así, la regulación de voltaje es

$$\frac{137.86/0.8904 - 124.13}{124.13} \times 100 = 24.7\%$$

La longitud de onda y la velocidad de propagación se calculan como sigue:

$$\beta = \frac{0.4750}{230} = 0.002065 \text{ rad/milla}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{0.002065} = 3043 \text{ milla}$$

$$\text{Velocidad} = f\lambda = 60 \times 3043 = 182\,580 \text{ millas/s}$$