



## Alcances

- Estudio de las características y desempeño de las líneas de transmisión.

LT 6643, HUANCAVELICA-INGENIO 60 KV



## Hipótesis

- Las LT por lo común operan con una carga trifásica balanceada; por lo tanto el análisis puede hacerse sobre la base por fase.



LT 1127, HUALLANCA PIERINA 138 KV, ANCASH

30-09-2004

3

## Cuadripolo

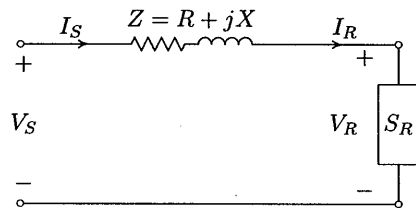
- Una LT sobre la base por fase, se puede considerar como una red de dos puertos, donde la tensión en el extremo de envío  $V_S$  y la corriente  $I_S$  están relacionados con la tensión y corriente en el extremo receptor  $V_R$  e  $I_R$  mediante las constantes  $ABCD$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Se cumple:  $A \cdot D - B \cdot C = 1$

4

## Modelo de Líneas corta



Longitudes  $\leq 80$  km  
Tensión  $\leq 69$  kV

Nota: la admitancia total en derivación  $j\omega C\ell$  a 60 Hz es despreciable

$$Z = (r + j\omega L)\ell$$

$$= R + jX$$

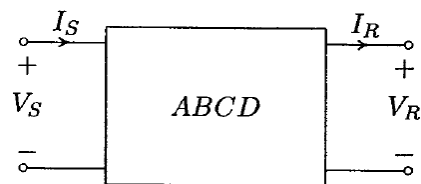
$$I_R = \frac{S_{R(3\phi)}^*}{3V_R^*}$$

$$V_S = V_R + ZI_R$$

$$I_S = I_R$$

5

## Modelo de Líneas corta



$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

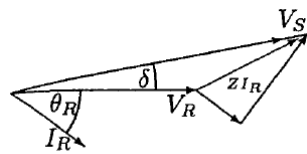
$$A = 1 \quad B = Z \quad C = 0 \quad D = 1$$

$$\text{Percent } VR = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100$$

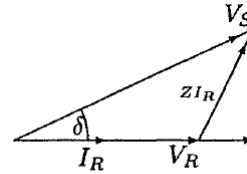
$$S_{S(3\phi)} = 3V_S I_S^* \quad S_{L(3\phi)} = S_{S(3\phi)} - S_{R(3\phi)} \quad \eta = \frac{P_{R(3\phi)}}{P_{S(3\phi)}}$$

6

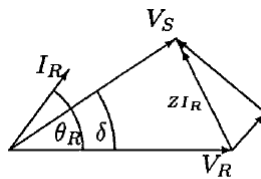
## Modelo de Líneas corta



(a) Lagging pf load



(b) Upf load



(c) Leading pf load

7

## Modelo de Líneas media

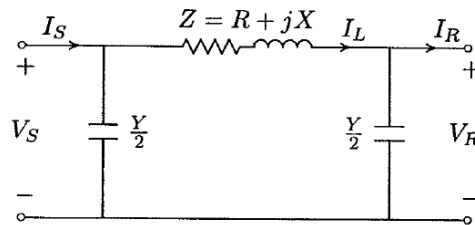
- Para LT de longitud mayor a 80 km, no se puede despreciar la corriente de carga debido a la admitancia en paralelo.
- Para LT en la gama de 80 a 240 km de longitud, es suficientemente preciso concentrar la admitancia de línea.

### *Representación $\pi$ nominal*

- La capacitancia total de la línea se divide en dos partes iguales que se concentran en los extremos de envío y recepción.

8

## Modelo de Líneas media



80 km < Longitudes < 250 km

$$Y = (g + j\omega C)\ell$$

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2}V_R$$

$$V_S = V_R + ZI_L$$

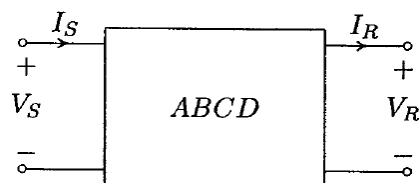
$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)V_R + ZI_R$$

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2}V_S$$

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

9

## Modelo de Líneas media



$$AD - BC = 1$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix}$$

$$A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \quad B = Z$$

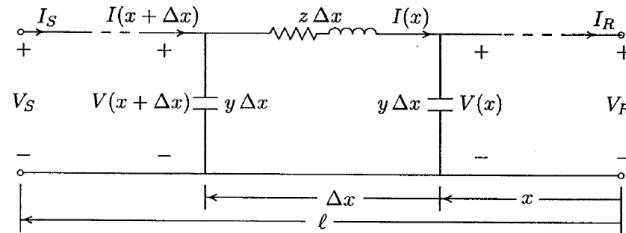
$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \quad D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$$

$$A = D.$$

10

## Modelo de línea larga

Los parámetros de la línea no se concentran, se distribuyen uniformemente a lo largo de su longitud



Longitudes > 250 km

$$z = r + j\omega L$$

$$y = g + j\omega C$$

11

## Modelo de línea larga

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z \Delta x I(x)$$

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = z I(x)$$

$$\Delta x \rightarrow 0,$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = z I(x)$$

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y \Delta x V(x + \Delta x)$$

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = y V(x + \Delta x)$$

$$\Delta x \rightarrow 0,$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = y V(x)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2V(x)}{dx^2} &= z \frac{dI(x)}{dx} \\ &= zy V(x) \end{aligned}$$

12

## Modelo de línea larga

$$\gamma^2 = zy$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0$$

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)}$$

- $\alpha$  = constante de atenuación.
- $\beta$  = constante de fase (rad/km).

13

## Modelo de línea larga

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x})$$

$$= \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x})$$

- Cuando

$$x = 0, V(x) = V_R$$

$$I(x) = I_R.$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x})$$

$$A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2}$$

$$A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$$

14

## Modelo de línea larga

$$V(x) = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_c I_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$I(x) = \frac{\frac{V_R}{Z_c} + I_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{\frac{V_R}{Z_c} - I_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_R + Z_c \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} V_R + \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} I_R$$

$$V(x) = \cosh \gamma x V_R + Z_c \sinh \gamma x I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x V_R + \cosh \gamma x I_R$$

15

## Modelo de línea larga

Haciendo:  $x = \ell, V(\ell) = V_s$

y  $I(\ell) = I_s$

$$V_s = \cosh \gamma \ell V_R + Z_c \sinh \gamma \ell I_R$$

$$I_s = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma \ell V_R + \cosh \gamma \ell I_R$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$A = \cosh \gamma \ell \quad B = Z_c \sinh \gamma \ell$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma \ell \quad D = \cosh \gamma \ell \quad A = D \text{ and } AD - BC = 1.$$

16

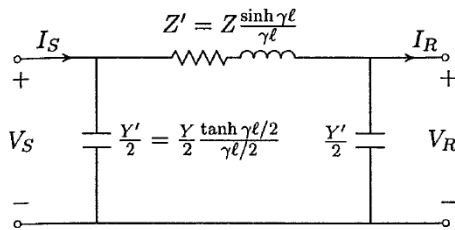


## Modelo de línea larga

$$V_S = \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) V_R + Z'I_R$$

$$I_S = Y' \left(1 + \frac{Z'Y'}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z'Y'}{2}\right) I_R$$

$$\tanh \frac{\gamma \ell}{2} = \frac{\cosh \gamma \ell - 1}{\sinh \gamma \ell}$$



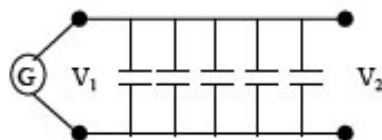
$$Z' = Z_c \sinh \gamma \ell = Z_c \frac{\sinh \gamma \ell}{\gamma \ell}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma \ell}{2} = \frac{Y \tanh \gamma \ell / 2}{2 \gamma \ell / 2}$$

17

## Efecto Ferranti

- El efecto de la capacitancia de la línea causa que la tensión en el extremo receptor en condiciones sin carga sea mayor que la tensión en el extremo transmisor.



$$V_2 > V_1$$

18

## Impedancia de carga natural

- Cuando la línea tiene como carga en su extremo de recepción, cuya impedancia es igual a la impedancia natural, la corriente de recepción es:

$$I_R = \frac{V_R}{Z_c}$$

Para una línea sin pérdidas  $Z_c$  es puramente resistiva. La carga para la impedancia natural a la tensión natural es la potencia natural (SIL)

$$SIL = 3V_R I_R^* = \frac{3|V_R|^2}{Z_c} \quad SIL = \frac{(kV_{Lrated})^2}{Z_c} \text{ MW}$$

19

## Flujo de potencia a través de una LT

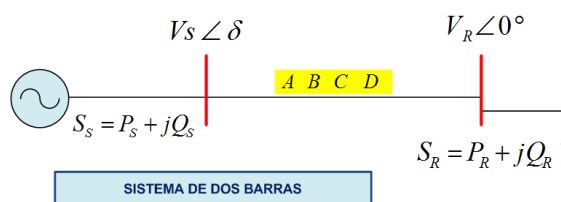
Se considera que:

$$\begin{aligned} \bar{V}_S &= |\bar{V}_S| \angle \delta \\ \bar{V}_R &= |\bar{V}_R| \angle 0^\circ \end{aligned}$$

$\delta$  es el ángulo de torsión

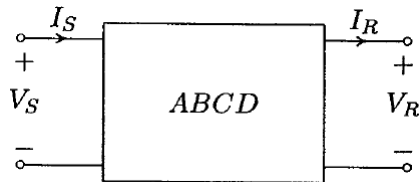
Potencia compleja en extremos de envío y recepción

$$\begin{aligned} S_R &= P_R + jQ_R = V_R \cdot I_R^* \\ S_S &= P_S + jQ_S = V_S \cdot I_S^* \end{aligned}$$



20

## Flujo de potencia compleja en LT



$$A = |A|\angle\theta_A \quad B = |B|\angle\theta_B$$

$$V_S = |V_S|\angle\delta \quad V_R = |V_R|\angle\theta$$

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

$$I_R = \frac{|V_S|\angle\delta - |A|\angle\theta_A|V_R|\angle\theta}{|B|\angle\theta_B}$$

$$= \frac{|V_S|}{|B|}\angle\delta - \theta_B - \frac{|A||V_R|}{|B|}\angle\theta_A - \theta_B$$

$$S_{R(3\phi)} = P_{R(3\phi)} + jQ_{R(3\phi)} = 3V_R I_R^*$$

$$S_{R(3\phi)} = 3 \frac{|V_S||V_R|}{|B|}\angle\theta_B - \delta - 3 \frac{|A||V_R|^2}{|B|}\angle\theta_B - \theta_A$$

$$S_{R(3\phi)} = \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|}\angle\theta_B - \delta - \frac{|A||V_{R(L-L)}|^2}{|B|}\angle\theta_B - \theta_A$$

21

## Flujo de potencia compleja en LT

$$S_{R(3\phi)} = \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|}\angle\theta_B - \delta - \frac{|A||V_{R(L-L)}|^2}{|B|}\angle\theta_B - \theta_A$$

$$P_{R(3\phi)} = \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|}\cos(\theta_B - \delta) - \frac{|A||V_{R(L-L)}|^2}{|B|}\cos(\theta_B - \theta_A)$$

$$Q_{R(3\phi)} = \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|}\sin(\theta_B - \delta) - \frac{|A||V_{R(L-L)}|^2}{|B|}\sin(\theta_B - \theta_A)$$

22

## Flujo de potencia compleja en LT

$$S_{S(3\phi)} = P_{S(3\phi)} + jQ_{S(3\phi)} = 3V_S I_S^*$$

$$I_S = \frac{|A|\angle\theta_A |V_S|\angle\delta - |V_R|\angle 0}{|B|\angle\theta_B}$$

$$P_{S(3\phi)} = \frac{|A||V_{S(L-L)}|^2}{|B|} \cos(\theta_B - \theta_A) - \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|} \cos(\theta_B + \delta)$$

$$Q_{S(3\phi)} = \frac{|A||V_{S(L-L)}|^2}{|B|} \sin(\theta_B - \theta_A) - \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{|B|} \sin(\theta_B + \delta)$$

23

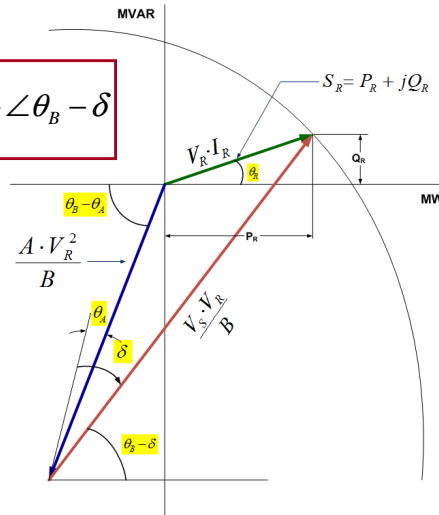
## Diagramas circulares

- El lugar geométrico de la potencia compleja del extremo de envío y recepción es una circunferencia.
- Los diagramas circulares son una útil ayuda para visualizar el problema de flujo de carga en una sola LT.
- Las expresiones de potencias de envío y recepción, se forman de dos componentes fasoriales: *uno es un fasor constante y el otro es un fasor de magnitud fija pero de ángulo variable.*

24

## Diagrama circular – Extremo receptor

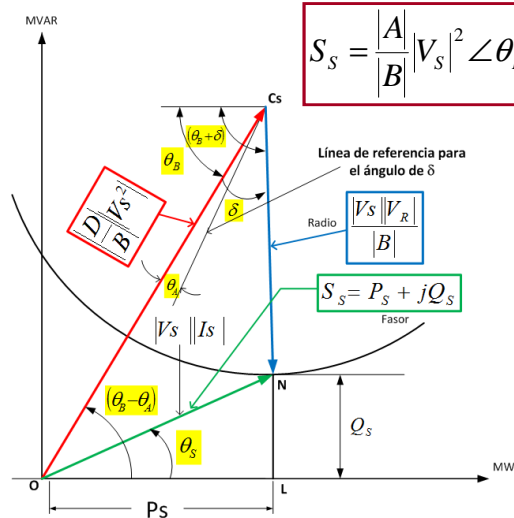
$$S_R = -\frac{|A|}{|B|} |V_R|^2 \angle \theta_B - \theta_A + \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \angle \theta_B - \delta$$



25

## Diagrama circular – Extremo Emisor

$$S_S = \frac{|A|}{|B|} |V_S|^2 \angle \theta_B - \theta_A - \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{|B|} \angle \theta_B + \delta$$



26

## Capacidad de una LT

La capacidad está dada por los límites de capacidad térmica y de estabilidad.

La potencia activa que se puede transferir en un línea sin pérdidas es:

$$P_{3\phi} = \frac{|V_{S(L-L)}||V_{R(L-L)}|}{X'} \sin \delta$$

$$S_{thermal} = 3V_{\phi rated}I_{thermal}$$

Donde :  $I_{thermal}$  es el límite térmico.

- El límite teórico se obtiene cuando  $\delta = 90^\circ$ .
- De la práctica operacional se tiene que  $\delta_{max}$  no sobrepasa entre  $30$  a  $45^\circ$

27

## Capacidad de una LT

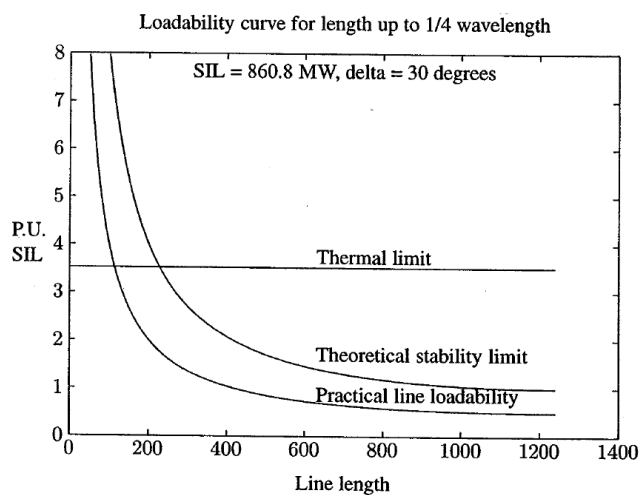
- Para planeamiento y otros propósitos, es muy frecuente emplear la potencia transferida en términos de SIL, y construir la curva de cargabilidad de la línea.
- Para una línea sin pérdidas  $X' = Z_c \sin \beta \ell$ .

$$P_{3\phi} = \left( \frac{|V_{S(L-L)}|}{V_{rated}} \right) \left( \frac{|V_{R(L-L)}|}{V_{rated}} \right) \left( \frac{V_{rated}^2}{Z_c} \right) \frac{\sin \delta}{\sin \beta \ell}$$

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= \frac{|V_{Spu}||V_{Rpu}|SIL}{\sin \beta \ell} \sin \delta \\ &= \frac{|V_{Spu}||V_{Rpu}|SIL}{\sin(\frac{2\pi \ell}{\lambda})} \sin \delta \end{aligned}$$

28

## Capacidad de una LT



29

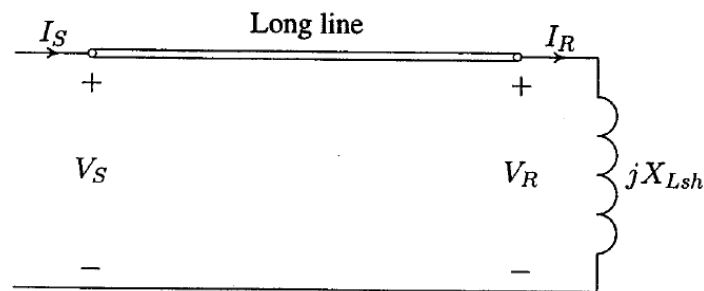
## Compensación de la LT

- Prácticamente todos los equipos que se emplean en los SEP están especificados para un nivel de tensión con una rango permisible de variación.
- Las tensiones en las diversas barras deben, por lo tanto, controlarse dentro de los valores especificados de regulación.

30

## Compensación con reactores shunt

- Los reactores shunt son empleados para compensar las tensiones indeseables, efectos asociados a la capacitancia de la línea.



31

## Compensación con reactores shunt

- La compensación requerida del reactor, a la línea, es para mantener la tensión del extremo recepción, al valor especificado, este puede ser obtenido como sigue.

$$V_S = \cos \beta \ell V_R + j Z_c \sin \beta \ell I_R$$

$$I_R = \frac{V_R}{j X_{Lsh}}$$

$$V_S = V_R \left( \cos \beta \ell + \frac{Z_c}{X_{Lsh}} \sin \beta \ell \right)$$

$V_S$  y  $V_R$  están en fase

$$X_{Lsh} = \frac{\sin \beta \ell}{\frac{V_S}{V_R} - \cos \beta \ell} Z_c$$

32



## Compensación con reactores shunt

- Para  $V_R = V_S$

$$X_{Lsh} = \frac{\sin \beta l}{1 - \cos \beta l} Z_c$$

- Asimismo

$$I_S = j \frac{1}{Z_c} \sin \beta l V_R + \cos \beta l I_R$$

$$I_S = \left( -\frac{1}{Z_c} \sin \beta l X_{Lsh} + \cos \beta l \right) I_R$$

33

## Capacitores shunt

- Son empleados en la corrección del factor de potencia.
- El efecto de suministrar potencia reactiva permite mantener los niveles de tensión en las barras de recepción dentro de los niveles satisfactorios.
- Se pueden conectar directamente a la barra o a través del devanado terciario del transformador.

34