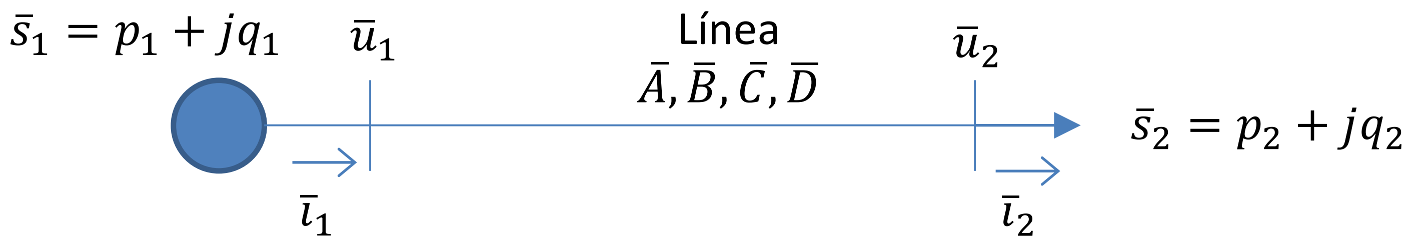
Conceptos de trasmisión AC

Trasmisión AC



- $\begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{\imath}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{\imath}_2 \end{pmatrix}$ o $\begin{pmatrix} \bar{u}_2 \\ \bar{\imath}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{D} & -\bar{B} \\ -\bar{C} & \bar{A} \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{\imath}_1 \end{pmatrix}$
- En ambos casos, la primera ecuación relaciona la corriente de un extremo con las tensiones de barra.
- $\bar{\imath}_2 = \frac{1}{\bar{B}} \bar{u}_1 - \frac{\bar{A}}{\bar{B}} \bar{u}_2$
- $\bar{\imath}_1 = \frac{\bar{D}}{\bar{B}} \bar{u}_1 - \frac{\bar{1}}{\bar{B}} \bar{u}_2 = \frac{\bar{A}}{\bar{B}} \bar{u}_1 - \frac{1}{\bar{B}} \bar{u}_2$
- Eligiendo $\bar{u}_2$ como origen de fases
  - $\bar{u}_2 = u_2$
  - $\bar{u}_1 = u_1 e^{j\delta}$
  - $\bar{D} = \bar{A} = Ae^{j\alpha}$
  - $\bar{B} = Be^{j\beta}$

Trasmisión AC

- Reescribiendo para $\bar{\imath}_1$ e $\bar{\imath}_2$
  - $\bar{\imath}_1 = \frac{A}{B} u_1 e^{j(\alpha-\beta+\delta)} - \frac{1}{B} u_2 e^{-j\beta}$
  - $\bar{\imath}_2 = \frac{u_1}{B} e^{j(\delta-\beta)} - \frac{A}{B} u_2 e^{j(\alpha-\beta)}$
- Conjugando las corrientes
  - $\hat{\imath}_1 = \frac{A}{B} u_1 e^{j(\beta-\alpha-\delta)} - \frac{1}{B} u_2 e^{j\beta}$
  - $\hat{\imath}_2 = \frac{u_1}{B} e^{j(\beta-\delta)} - \frac{A}{B} u_2 e^{j(\beta-\alpha)}$
- Potencia aparente $\bar{s}_1$ y $\bar{s}_2$
  - $\bar{s}_1 = \bar{u}_1 . \hat{\imath}_1 = \frac{A u_1^2}{B} e^{j(\beta-\alpha)} - \frac{u_1 u_2}{B} e^{j(\beta+\delta)}$
  - $\bar{s}_2 = \bar{u}_2 . \hat{\imath}_2 = \frac{u_1 u_2}{B} e^{j(\beta-\delta)} - \frac{A u_2^2}{B} e^{j(\beta-\alpha)}$

Trasmisión AC

- Potencias activas y reactivas
  - $p_1 = \frac{Au_1^2}{B} cos(\beta - \alpha) - \frac{u_1 u_2}{B} cos(\beta + \delta)$
  - $q_1 = \frac{Au_1^2}{B} sen(\beta - \alpha) - \frac{u_1 u_2}{B} sen(\beta + \delta)$
  - $p_2 = \frac{u_1 u_2}{B} cos(\beta - \delta) - \frac{Au_2^2}{B} cos(\beta - \alpha)$
  - $q_2 = \frac{u_1 u_2}{B} sen(\beta - \delta) - \frac{Au_2^2}{B} sen(\beta - \alpha)$
- p_2 es máximo cuando $\beta = \delta$
  - $p_{2_{max}} = \frac{u_1 u_2}{B} - \frac{Au_2^2}{B} cos(\beta - \alpha)$
  - $q_2 = -\frac{Au_2^2}{B} sen(\beta - \alpha)$

Trasmisión AC

- Para una línea corta
  - $\bar{A} = \bar{D} = 1$
  - $\bar{B} = ze^{j\theta}$
- Reescribiendo para las potencias
  - $p_1 = \frac{u_1^2}{z} cos(\theta) - \frac{u_1 u_2}{z} cos(\theta + \delta)$
  - $q_1 = \frac{u_1^2}{z} sen(\theta) - \frac{u_1 u_2}{z} sen(\theta + \delta)$
  - $p_2 = \frac{u_1 u_2}{z} cos(\theta - \delta) - \frac{u_2^2}{z} cos(\theta)$
  - $q_2 = \frac{u_1 u_2}{z} sen(\theta - \delta) - \frac{u_2^2}{z} sen(\theta)$

Trasmisión AC

- En líneas de Trasmisión
  - $r \ll x$
  - $z \cong x$
  - $\theta \cong 90°$
- Reescribiendo para p_2 y q_2
  - $p_2 = \frac{u_1 u_2}{x} sen(\delta)$
  - $q_2 = \frac{u_1 u_2}{x} cos(\delta) - \frac{u_2^2}{x}$
- Considerando δ pequeño para q_2
  - $q_2 = \frac{u_2}{x}(u_1 - u_2)$

Trasmisión AC

- **Conclusiones respecto a $\boldsymbol{p_2}$**
  - $p_2 = \frac{u_1 u_2}{x} sen(\delta)$
  - Considerando $u_1 \; y \; u_2$ constantes, **la potencia activa transportada por la línea depende del ángulo $\boldsymbol{\delta}$**, diferencia de fase entre las tensiones a ambos extremos de la línea.
  - La transferencia de **potencia es máxima** cuando $\boldsymbol{\delta = 90°}$
  - El **ángulo $\boldsymbol{\delta}$** debe mantenerse **muy por debajo de $\boldsymbol{90}$°** por razones de estabilidad. En general no supera los **20° o 30°.**
  - **Se puede transferir potencia incluso cuando $\boldsymbol{u_1 \leq u_2}$** pues la transferencia depende del desfasaje y no del módulo de las tensiones.
  - **La potencia máxima se incrementa si $\boldsymbol{u_1 \; y \; u_2}$ aumentan**. Si las tensiones de trasmisión se aumentan x2, la potencia máxima se incrementa x4.

Trasmisión AC

- **La potencia máxima es inversamente proporcional a la reactancia x de la línea**. Una disminución en x aumenta la capacidad de transferencia.
  - Líneas en paralelo
  - Más de un conductor por fase
  - Instalación de capacitores en serie (compensación serie)

- **Conclusiones respecto a q_2**
  - $q_2 = \frac{u_2}{x}(u_1 - u_2)$
- El flujo de potencia reactiva es directamente **proporcional a $(u_1 - u_2)$**.
- La caída de tensión en la línea depende del flujo de potencia reactiva a través de la línea.
- Es conveniente compensar el consumo de reactiva de las cargas de manera local para disminuir el flujo de potencia reactiva por las líneas.

Régimen Característico de una LT

- Cuando la línea alimenta una carga igual a la impedancia característica de la línea $(\bar{Z}_c)$, se dice que está operando en Régimen Característico.
- Modelo de una Línea de Trasmisión (LT)
  - $\overline{U}(x) = \overline{U}_2.\cosh(\bar{\gamma}x) + \bar{Z}_c\bar{I}_2 \sinh(\bar{\gamma}x)$
  - $\bar{I}(x) = \frac{\overline{U}_2}{\bar{Z}_c}.\sinh(\bar{\gamma}x) + \bar{I}_2 \cosh(\bar{\gamma}x)$
- Conectando en el extremo una impedancia $\bar{Z} = \bar{Z}_c$ se cumple $\overline{U}_2 = \bar{Z}_c\bar{I}_2$
  - $\overline{U}(x) = \overline{U}_2(\cosh(\bar{\gamma}x) + \sinh(\bar{\gamma}x)) = \overline{U}_2 e^{\bar{\gamma}x}$
  - $\bar{I}(x) = \bar{I}_2(\cosh(\bar{\gamma}x) + \sinh(\bar{\gamma}x)) = \bar{I}_2 e^{\bar{\gamma}x}$

Régimen Característico de una LT

- Observaciones
- La impedancia vista de la línea en todo punto es $\bar{Z}_c$
  - $\frac{\bar{U}(x)}{\bar{I}(x)} = \frac{\bar{U}_2}{\bar{I}_2} = \bar{Z}_c$
- Régimen Característico es análogo al régimen de una línea infinita ($x \to \infty$)
  - $\cosh(\bar{\gamma}x) \cong \sinh(\bar{\gamma}x) \cong \frac{e^{\bar{\gamma}x}}{2}$
  - $\bar{U}(x) = \bar{U}_2 . \cosh(\bar{\gamma}x) + \bar{Z}_c \bar{I}_2 \sinh(\bar{\gamma}x) = \bar{Z}_c \left(\frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_c} + \bar{I}_2\right) \frac{e^{\bar{\gamma}x}}{2}$
  - $\bar{I}(x) = \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_c} . \sinh(\bar{\gamma}x) + \bar{I}_2 \cosh(\bar{\gamma}x) = \left(\frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_c} + \bar{I}_2\right) \frac{e^{\bar{\gamma}x}}{2}$
  - $\frac{\bar{U}(x)}{\bar{I}(x)} = \bar{Z}_c$

Régimen Característico de una LT

- Observaciones
- Potencia Natural de la línea
  - $\bar{Z}_c = Z_c e^{j\varphi}$
  - $P_{natural} = \frac{U_2^2}{Z_c}\cos(\varphi)$ (SIL: Surge Impedance loading)
- Para una línea sin pérdidas con una carga Zc, el módulo de la corriente y de la tensión es cte en toda la línea.
  - $\bar{\gamma} = \sqrt{(r + lwj)(g + cwj)} = \alpha + \mathrm{j}\beta$ constante de propagación
    - α: constante de atenuación
    - β: constante de fase
  - Línea sin pérdidas, $\alpha = 0$
  - $U(x) = U_2 e^{\alpha x} = U_2$
  - $I(x) = I_2 e^{\alpha x} = I_2$

Régimen Característico de una LT

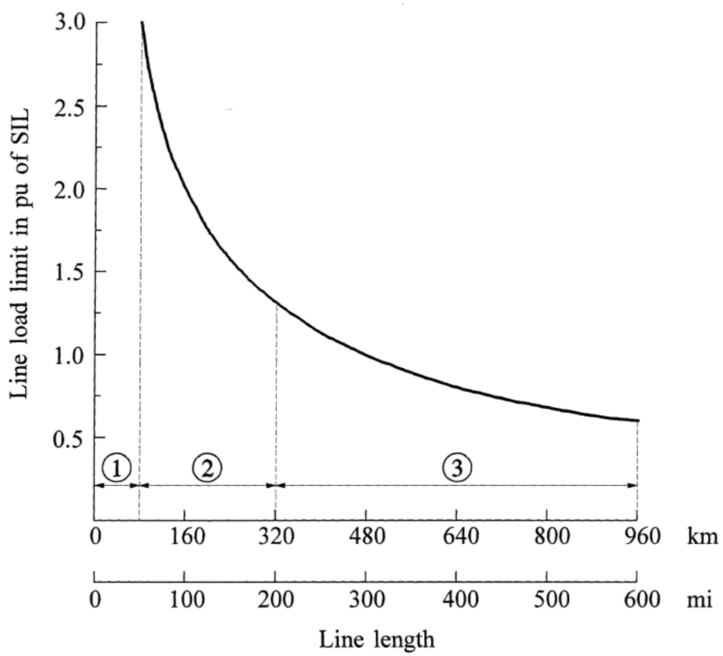
- Observaciones
- Línea sin pérdidas, $\varphi = 0$ y Zc es resistivo puro
  - $P_o = \frac{U_2^2}{Z_c}$
  - $\bar{Z}_c = Z_c$, resistencia pura
  - $\overline{U} = Z_c \bar{I}$, corriente y tensión siempre en fase
  - No hay consumo ni generación de potencia reactiva en la línea.
  - Es el régimen ideal desde el punto de vista del control de tensión.
- Cuando $P_2 > P_o$ $(Z_2 < Z_c)$ puede ser necesario compensación capacitiva al final de la línea.
- Cuando $P_2 < P_o$ $(Z_2 > Z_c)$ puede ser necesario compensación inductiva al final de la línea.

Límite térmico de una LT

- La corriente que circula por la línea calienta la línea debido a las pérdidas Joule.
- Principales efectos
  - Pérdida de resistencia mecánica en el conductor por sobrecalentamiento continuo.
  - Recalentamiento en juntas, morsetos, etc
  - Incremento de la flecha de la línea (disminución de la distancia al suelo) debido a la dilatación del conductor por calentamiento.
- El incremento de la flecha en general es el que impone la limitante a la máxima temperatura de operación.
- La máxima corriente permitida (ampacidad) depende de la temperatura ambiente, de la velocidad del viento y de la radiación solar.
- La constante de tiempo térmica es del orden de 10 a 20 minutos. Por lo tanto se definen 2 límites distintos.
  - Un límite para régimen permanente
  - Otro límite, mayor, pero permitido por poco tiempo (en UTE 1h).

Capacidad de Carga de una LT

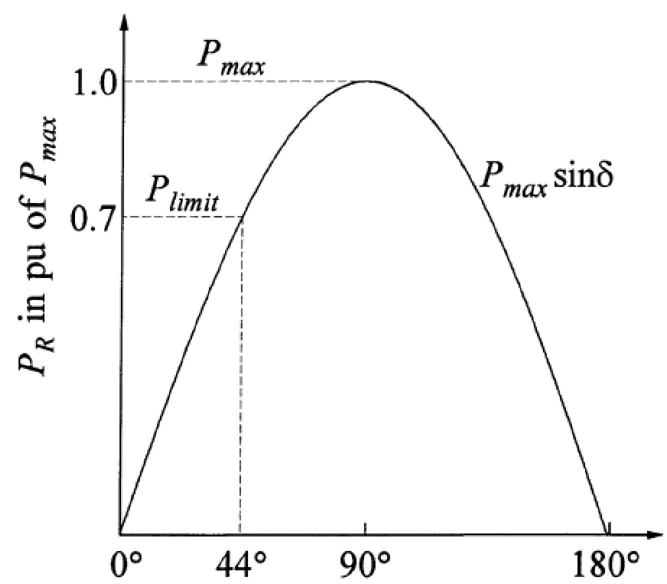
- Es la capacidad máxima de carga de una línea teniendo en cuenta:
    1. Límite térmico
    2. Caída de voltaje en la línea
    3. Límites de estabilidad
- Se presenta a continuación una curva que relaciona la capacidad de carga de una LT en función del largo de la línea e indica cual de las 3 condiciones es la determinante.
- La potencia máxima de la línea está en pu de la potencia natural.



1	0–80 km:	Region of thermal limitation
2	80–320 km:	Region of voltage drop limitation
3	320–960 km:	Region of small-signal (steady-state) stability limitation

Capacidad de Carga de una LT

- Para la construcción de la tabla se consideraron los criterios siguientes:
  - Caída de tensión máxima igual a 5%
  - Margen de estabilidad de 30%: $Margin = \frac{P_{max} - P_{limit}}{P_{max}} * 100$



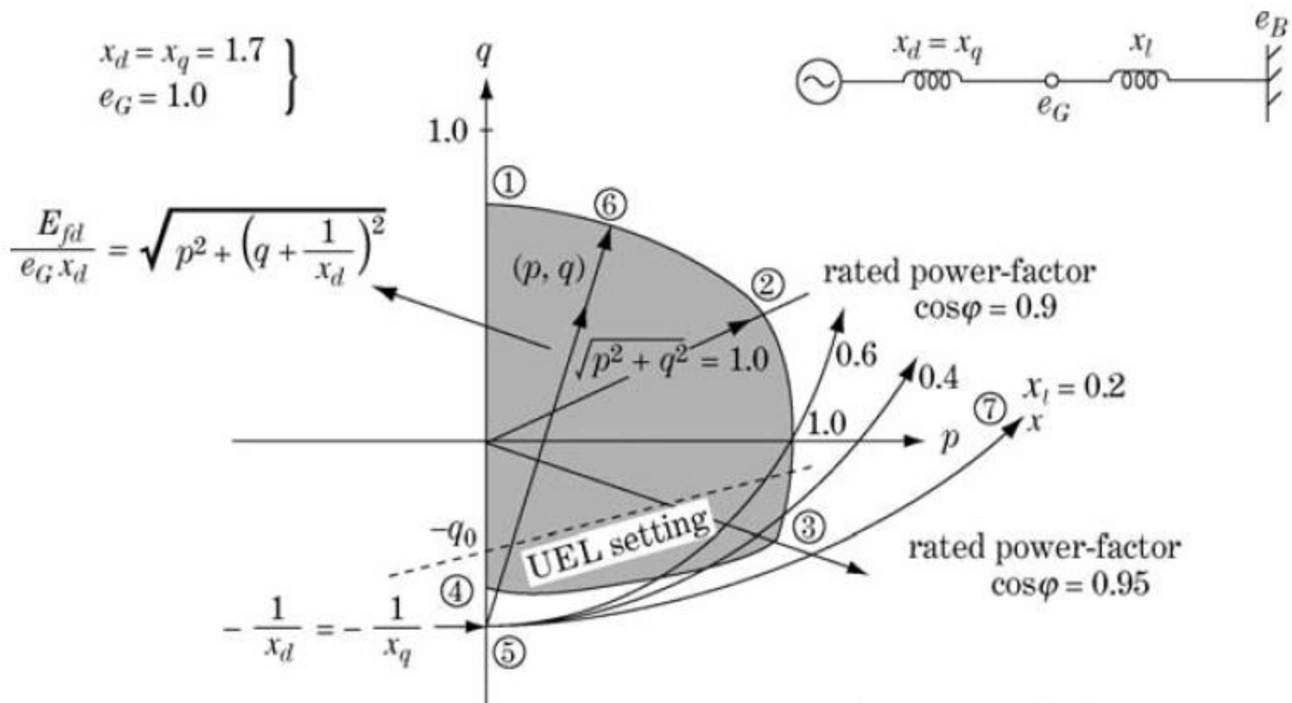
Control de tensión

- La tensión en el sistema se debe mantener acotada en una banda alrededor de la tensión nominal.
- Para controlar la tensión es necesario controlar el flujo de potencia reactiva.
- Disminuir el flujo de potencia reactiva en el sistema tiene muchos beneficios
  - Reduce las caídas de tensión y mejora el perfil de tensiones del sistema.
  - Disminuye la corriente: $\downarrow Q \rightarrow \downarrow S \rightarrow \downarrow I$
  - Disminuye las pérdidas en el sistema: $\downarrow I \rightarrow \downarrow RI^2$
  - Ahorros de inversión en equipos: $\downarrow Q \rightarrow \uparrow P$
  - Disminuye el «despacho forzado por control de tensión» de generadores

Métodos de control de tensión

- Los generadores del sistema son el recurso básico para realizar el control de tensión.
- Se requieren métodos adicionales para controlar la tensión del sistema
  - Reactores shunt
  - Capacitores shunt
  - Compensadores síncronos
  - SVCs: Static VAr Compensators
  - Capacitores Serie
  - Trafos con cambiadores de tap bajo carga

Curva de Capabilidad de un Generador Síncrono



curve ①-② : excitation current limit

curve ②-③ : apparent power limit

curve ③-④ : overheat limit around stator/rotor end section

curve ⑤-⑦ : steady-state stability limit

(⑤ is the fixed point for the x_q, while ⑦ is the moving point by power system reactance x_l)

Figure 16.3 Capability curve of generator

Métodos de control de tensión

- Reactores shunt
  - Consumen potencia reactiva de la red ($q = \frac{u^2}{x_L}$) y disminuyen las tensiones locales
  - Compensación (fija) en líneas largas de EAT que son muy capacitivas
  - Compensación maniobrable conectada en estaciones de transformación. Contribuyen a bajar la tensión del sistema cuando la demanda es baja (madrugadas)
  - Durante las horas de máxima demanda, los reactores maniobrables se sacan de servicio para subir tensión
  - Constructivamente son similares a un transformador, pero con un único bobinado por fase en un núcleo de hierro inmerso en aceite. Pueden ser monofásicos o trifásicos

Métodos de control de tensión

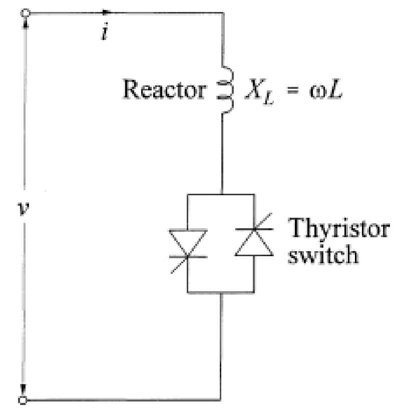
- Capacitores shunt
  - Entregan potencia reactiva a la red ($q = -\frac{u^2}{x_C}$) y aumentan las tensiones locales.
  - Método más económico para entregar potencia reactiva a la red.
  - Compensación maniobrable conectada en estaciones de transformación. Contribuyen a subir la tensión del sistema cuando la demanda es alta (pico de mediodía y pico de la noche)
  - Desventaja: la potencia reactiva que entrega disminuye cuadráticamente con la tensión.
  - Durante las horas de mínima demanda se deben desconectar para bajar la tensión del sistema.

Métodos de control de tensión

- Compensador síncrono
  - Es una máquina sincrónica funcionando como motor.
  - Variando la corriente de excitación de la máquina se puede entregar o absorber potencia reactiva.
  - Costos altos de inversión, operación y mantenimiento.
  - Muchas ventajas:
    - Mejoran la potencia de cortocircuito del sistema
    - La producción de reactiva no se ve afectada por la tensión del sistema.
  - Algunos generadores del sistema se pueden utilizar como compensador síncrono cuando no son despachados para generar potencia activa desacoplando el motor primario.

Métodos de control de tensión

- Static VAR Compensators
  - Elementos shunt con consumo/entrega de potencia reactiva variable mediante electrónica de potencia.
    - TCR: Thyristor controlled reactor



    - TSC: Thyristor switched capacitor