

10. CONTROL DE TENSIÓN Y POTENCIA REACTIVA CON COMPENSADORES ESTÁTICOS

10.1 Control de tensión y energía reactiva en las redes eléctricas

En la figura 10.1-1 se muestra una red radial en la que se consideran despreciables la resistencia ($R \ll X$) y las impedancias paralelas. Además, se supone conectada en el nudo A una fuente de potencia infinita lo cual permite considerar que la tensión E permanece constante con independencia de la carga.

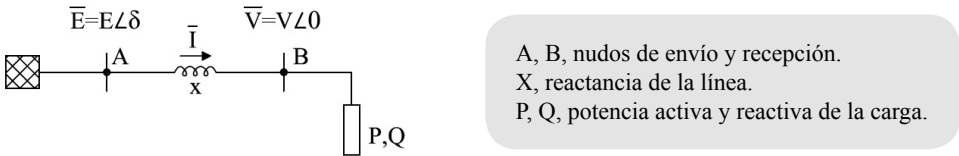


Figura 10.1-1 Red radial sin pérdidas ($R = 0$) y potencia de cc. infinita en origen.

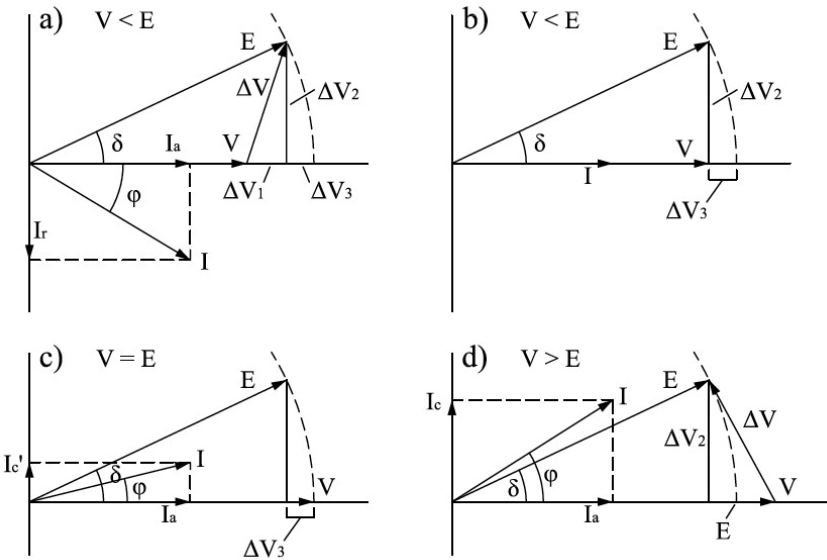


Figura 10.1-2 Determinación gráfica de la tensión de recepción para diferentes tipos de cargas, para E y P o la constantes.
 a) Carga resistiva/inductiva típica. b) Carga solo resistiva.
 c) Carga con capacidad ajustada para conseguir que $V = E$.
 d) Carga sobrecompensada para que $V > E$.

En la figura 10.1-2 se representan los diagramas fasoriales correspondientes a los distintos tipos de cargas identificadas por la corriente I y el ángulo ϕ de desfase con la tensión V . La tensión de origen E permanece en todos los casos constante. El ángulo de desfase entre las tensiones de envío y recepción δ permanece también constante, ya que en todos los casos se supone que la potencia activa de la carga no varía.²¹⁵

La figura a) corresponde a la carga más común que comprende potencia activa y reactiva, por tanto, representa la carga típica de los motores de inducción. La tensión de recepción sufre una caída de tensión:

$$\Delta V = \Delta V_1 + j\Delta V_2 = I_r X + jI_a X$$

La caída de tensión $j\Delta V_2$ es la causante del ángulo de desfase δ entre E y V , que permanece constante por serlo I_a .

Para **compensar la carga** se inyecta en la red una corriente reactiva suministrada por condensadores $I_c = I_r$, con lo que se suprime la caída de tensión $\Delta V_1 = I_r X$ resultando el diagrama de la figura b). En el que a pesar de haber compensado la carga persiste la caída de tensión ΔV_3 , provocada por la reactancia de la línea y la componente activa I_a de la carga. Como es obvio que no se trata de inyectar una corriente activa $-I_a$ para compensarla, lo que equivaldría a la red en vacío, la compensación de ΔV_3 se consigue inyectando una corriente reactiva adicional tal que $I'_c X = \Delta V_3$, de esta forma se consigue que $|E| = V$ como se observa en el diagrama c). En resumen, con I_c compensamos la carga y con I'_c logramos **compensar la línea**.

Por último, en el diagrama d) se aprecia que aportando una corriente reactiva $I''_c > (I_c + I'_c)$ se consigue que la tensión de recepción resulte superior a la de envío, $U > E$. Fenómeno que suele conocerse como efecto Ferranti y que se da también en transformadores. Concluyendo que en una línea inductiva es posible no solo eliminar la caída de tensión sino provocar un aumento de la misma.

10.1.1 Curvas P-V

Estas curvas relacionan la tensión en un nudo de la red con la potencia activa de la carga conectada en el mismo.

Para la obtención de estas curvas se procede como sigue:

La potencia S absorbida por la carga será:²¹⁶

$$\bar{S} = \bar{V} \cdot \bar{I}^* = \bar{V} \frac{\bar{E}^* - \bar{V}^*}{(jX)^*} = j \frac{V}{X} (E \cos \delta + jE \sin \delta - V) \quad (10.1.1/1)$$

Y como
$$\bar{S} = P + jQ \quad (10.1.1/2)$$

215. Se puede observar en los distintos diagramas que el desfase entre tensiones δ depende de la corriente activa o potencia activa, mientras que la diferencia de módulos depende de la reactiva.

216. El símbolo * se utiliza para el conjugado de un número complejo.

Igualando las partes reales e imaginarias de (10.1.1/1) y (10.1.1/2) se obtiene:

$$P = -\frac{EV}{X} \operatorname{sen} \delta \quad (10.1.1/3)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \delta \quad (10.1.1/4)$$

además: $\operatorname{sen}^2 \delta + \cos^2 \delta = 1 \quad (10.1.1/5)$

De estas tres últimas expresiones y eliminando $\operatorname{sen} \delta$ y $\cos \delta$ se obtiene:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + (P^2 + Q^2)X^2 = 0 \quad (10.1.1/6)$$

Y si en (10.1.1/6) sustituimos Q por:

$$Q = P \tan \varphi$$

Y teniendo en cuenta que (10.1.1/6) es una ecuación de segundo grado en (V^2) se obtiene la solución:

$$V = \left[\frac{E^2}{2} - PX \tan \varphi \pm \left(\frac{E^2}{4} - X^2 P^2 - XE^2 P \tan \varphi \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (10.1.1/7)$$

Dividiendo la expresión (10.1.1/7) por E, la tensión y la potencia se convierten en valores p.u., esta última referida a la potencia de cc. ($S_k = E^2/X$), resulta:

$$V_{pu} = \left[\frac{1}{2} - P_{pu} \tan \varphi \pm \left(\frac{1}{4} - P_{pu}^2 - P_{pu} \tan \varphi \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (10.1.1/8)$$

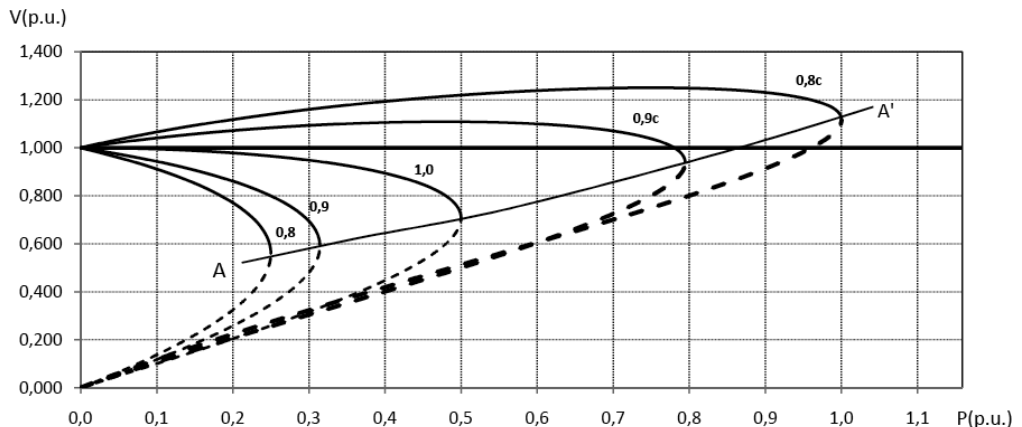


Figura 10.1.1-1 Curvas de estabilidad P-V.

En la figura 10.1.1-1 se muestran las curvas derivadas de la expresión (10.1.1/8) para diversos valores de $\tan \varphi$, que se indican junto a las distintas curvas en la forma de

$\cos\varphi$ con indicación c para capacitivo. Se observa que a medida que aumenta el $\cos\varphi$ inductivo o disminuye el capacitivo, para una potencia dada, aumenta la tensión de recepción V . Además, también aumenta la capacidad de transmisión de la línea. La familia de curvas puede dividirse por la línea AA' que une los máximos de P . Por encima de AA' la tensión es estable y las curvas corresponden a las soluciones de (10.1.1/8) con signo + mientras por debajo de AA' se sitúa la región inestable correspondiente al signo -.

El propósito de mostrar las curvas P - V se limita en nuestro caso a resaltar la importancia de la reactiva en el control de la tensión y la potencia de la red. Otros aspectos importantes como es el de estabilidad no forman parte del propósito de este manual.

10.1.2 Relación entre tensión y potencia reactiva en líneas cortas

Para líneas cortas, es decir, de pocos kilómetros y de tensión reducida, inferior a 66 kV, la resistencia no es despreciable y el diagrama fasorial es el que se representa en la figura 10.1.2-1.

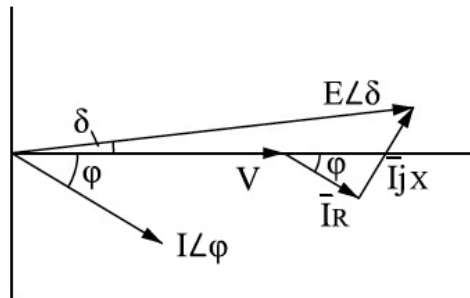


Figura 10.1.2-1 Diagrama fasorial de una línea corta.

Del cual se deduce para ángulos δ pequeños:

$$E = V + IR\cos\varphi + IX\sin\varphi \quad (10.1.2/1)$$

$$\Delta V = \frac{E - V}{V} = \frac{IR}{V}\cos\varphi + \frac{IX}{V}\sin\varphi$$

Y teniendo en cuenta que:

$$P = \sqrt{3} UI\cos\varphi \quad , \quad Q = \sqrt{3} UI\sin\varphi$$

Se deduce la expresión:

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V^2} \quad (10.1.2/2)$$

En el supuesto de $R \ll X$ se obtendría:

$$\Delta V = \frac{Q}{S_k} \quad (10.1.2/3)$$

Siendo S_k la potencia de cc. en el nudo de conexión de Q .

Ejemplo 10.2.1-1

Considerando una red radial cuyas características se indican a continuación:

- Longitud, 10 km
- Tensión de recepción en vacío, 21 kV
- Reactancia unitaria, $x = 0,31 \text{ ohm/km}$
- Resistencia unitaria, $r = 0,38 \text{ ohm/km}$
- Carga de 4 MW a 20 kV con $\cos\varphi = 0,85$

- a) Calcular la potencia de la batería para compensar la carga a $\cos\varphi = 1$.
- b) Determinar la caída de tensión con la carga sin y con compensación a $\cos\varphi = 1$.
- c) Calcular la potencia reactiva a inyectar para lograr una caída de tensión del 3 %.

a) La potencia reactiva a compensar será:

$$Q = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = 4 \cdot 0,62 = 2,48 \text{ Mvar}$$

b) La caída de tensión a plena carga sin batería de condensadores, teniendo en cuenta que la reactiva absorbida por la carga sería, sin compensar, de 2,48 Mvar:

$$\Delta V = \frac{4 \cdot 3,8 + 2,48 \cdot 3,1}{21^2} = 0,052 \text{ , (5,2\%)}$$

Al compensar la carga a $\cos\varphi = 1$, la caída de tensión se reduciría a:

$$\Delta V = \frac{4 \cdot 3,8}{21^2} = 0,034 \text{ , (3,4\%)}$$

c) Por último, para lograr reducir la caída de tensión al 3 % se necesitaría que la potencia reactiva de la red fuera de:²¹⁷

$$Q = \frac{\Delta V \cdot V^2 - PR}{X} = \frac{0,03 \cdot 21^2 - 4 \cdot 3,8}{3,1} = 0,635 \text{ Mvar}$$

Luego, la potencia de la batería sería:

$$Q_c = 2,48 + 0,635 = 3,115 \text{ Mvar}$$

217. En el cálculo a continuación debe considerarse el convenio habitual de signos de receptor en que Q positiva corresponde a reactiva absorbida y Q negativa a reactiva inyectada.