

CAPITULO 2

REGULACIÓN DE TENSION O CONTROL DE VOLTAJE

2.1. Introducción

Un sistema de potencia bien diseñado debe ser capaz de entregar un servicio confiable y de calidad. Entre los aspectos que caracterizan una buena calidad de servicio están, la adecuada regulación del voltaje así como de la frecuencia. El Control de Voltaje tiene como objetivo mantener los niveles de tensión dentro de límites razonables. El problema; sin embargo, es diferente según se trate de una red de distribución o una de transmisión.

En una red de transmisión se pueden admitir variaciones de tensión mayores que en una red de distribución, ya que no existen aparatos de utilización directamente conectados a ella. Por lo tanto, dentro de ciertas limitaciones, no hay mayores inconvenientes en que la tensión en un punto dado de la red de transmisión varíe dentro de límites relativamente amplios, generalmente $\pm 10\%$ como máximo de un valor que habitualmente es diferente del nominal.

En las redes de distribución, las variaciones de tensión están limitadas por las características de los consumos. Estos sólo funcionan adecuadamente con tensiones cercanas a la nominal y admiten variaciones lentas que no sobrepasen un $\pm 5\%$ en aplicaciones térmicas (cocinas, lámparas, calentadores) y un $\pm 8\%$ en el caso de motores, lavadoras, receptores de radio y televisión, etc. Con tensiones muy altas habrá calentamiento y menor vida útil. Si son muy bajas habrá mal rendimiento, malas características de torque (motores), etc.

2.2. Clasificación de las variaciones de tensión

Según sus características, las variaciones de tensión se pueden clasificar en:

- **Variaciones lentas:** Tanto previsibles (periódicas), originadas en los cambios periódicos de los consumos que presentan máximos a ciertas horas del día y mínimos en otras; como aleatorias, debidas a las conexiones y desconexiones de los consumos, que pueden ocurrir en cualquier momento.
- **Variaciones bruscas:** Tanto regulares como aleatorias (“pestaños”), debidas a los “golpes de corriente” causados por el funcionamiento intermitente de equipos tales como refrigeradores, ascensores, soldadoras, etc.
- **Caídas de tensión:** De breve duración (desde fracciones de segundo hasta algunos segundos) y de amplitudes muy variables (hasta un 100% de la tensión). Su efecto es casi equivalente al de una interrupción de servicio

En este capítulo, se analizará exclusivamente el control de las variaciones lentas de tensión en las redes de transmisión y distribución.

2.3. Formas de regular las variaciones lentas de tensión

La regulación lenta de tensión tiene por fin mantener el módulo de la tensión en todo el sistema en el mejor valor posible. Los métodos más empleados son:

- **Inyección (absorción) de potencia reactiva:** permite modificar la potencia reactiva circulante en el sistema, que es una importante causa de variación de la tensión. Se consigue con el empleo de condensadores estáticos, compensadores síncronos, reactores y los generadores de las centrales.
- **Inserción de una tensión serie adicional:** para compensar la caída que se desea regular. Se consigue, por ejemplo, con los transformadores con derivaciones, que permiten variar discontinuamente la razón de transformación. Las derivaciones pueden ser operables en vacío (más baratas) o bajo carga.

- **Modificación de la reactancia:** para mantener constante la caída longitudinal ZI . Se consigue por ejemplo, usando conductores fasciculados, empleando condensadores serie, colocando líneas en paralelo o disminuyendo el largo de las líneas, acercando los transformadores de distribución a los consumos.

2.4. Formas de actuar de los medios de regulación de tensión

- **Regulación continua:** Reguladores de inducción y compensadores síncronos.
- **Regulación cuasi-continua:** Cambiadores de derivación bajo carga de los transformadores.
- **Regulación intermitente:** Condensadores estáticos.
- **Regulación fija:** Condensadores serie y cambiadores de derivación en vacío.

2.5. Regulación de tensión por inyección de potencia reactiva

a. **Línea corta de transmisión:** Con el objeto de establecer algunos conceptos básicos consideraremos en primer lugar, el caso de una línea corta de transmisión y su diagrama fasorial correspondiente, tal como se muestra en la Figura 2.1. P_R y Q_R son las potencias activa y reactiva que llegan a la carga a través de la línea.

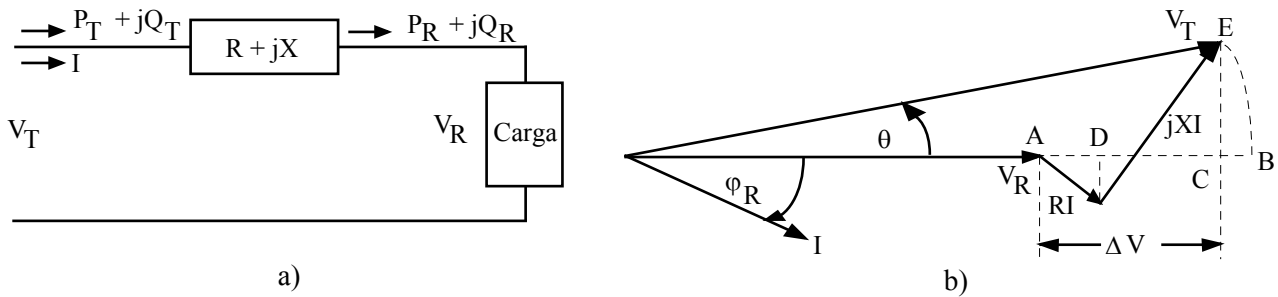


Figura 2.1.- Línea corta de transmisión: a) Circuito equivalente; b) Diagrama fasorial

De la Figura 2.1 y considerando que θ es un ángulo pequeño, se puede escribir:

$$|\dot{V}_T| - |\dot{V}_R| = V_T - V_R \approx \Delta V \quad (2.1)$$

pero, $\Delta V = AD + DC$, con: $AD = RI \cos \varphi_R$ y $DC = XI \sin \varphi_R$, por lo que se obtiene finalmente:

$$\Delta V = \frac{RP_R + XQ_R}{V_R} \quad (2.2)$$

De la misma forma:

$$EC = \frac{XP_R - RQ_R}{V_R} \quad (2.3)$$

Por lo que:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{EC}{V_R + \Delta V} \right) \quad (2.4)$$

Las ecuaciones (2.2) y (2.4) muestran claramente que el transporte de P_R y Q_R desde el extremo transmisor T al receptor R, va acompañado de una caída de tensión ΔV y de un desfase θ entre las tensiones de

ambos extremos de la línea. Debido a que usualmente, en los sistemas de transmisión y generación $R \ll X$, el término dominante en la ecuación (2.2) es XQ_R , o sea la potencia reactiva transferida desde T a R es la causante principal de la caída de tensión ΔV . Por la misma razón anterior, el término dominante en (2.4) es XP_R , de donde se concluye que el desfase θ es decisivo en el valor de la potencia activa suministrada al consumo.

Según lo planteado, para reducir la caída de tensión ΔV es necesario evitar (disminuir) el transporte de potencia reactiva por la línea, es decir, la potencia reactiva debería ser suministrada en lo posible, en el mismo punto donde será consumida.

Supongamos que se desea mantener constante ΔV para cualquier valor de P_R . Entonces, a partir de la ecuación (2.2), Q_R debe variar según la ecuación (2.5), para cumplir con la condición señalada.

$$Q_R = K - \frac{R}{X} P_R \quad (2.5)$$

Donde el término $K = (\Delta V/X)V_R$ es constante, puesto que para V_T y ΔV constantes, entonces, V_R es constante y por lo tanto, la potencia reactiva Q_R enviada al consumo a través de la línea debe variar tal como se muestra en la Figura 2.2.

Controlando la potencia reactiva Q_R en la forma mostrada en la Figura 2.2, es posible mantener la tensión V_R constante para diversos valores de potencia activa P_R . Este control se hace, evidentemente en el extremo receptor y el procedimiento se conoce con el nombre de “regulación de tensión por inyección de potencia reactiva”.

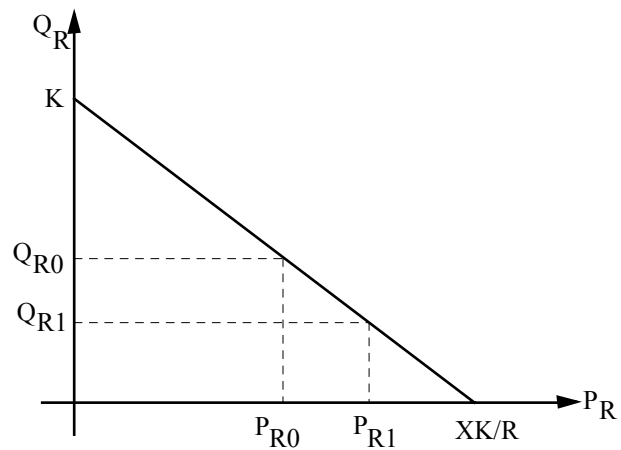


Figura 2.2.- Variación de la potencia reactiva Q_R entregada por la línea en función de la potencia activa del consumo, para mantener V_R constante

Conviene insistir en que la potencia Q_R correspondiente a la ecuación (2.5) representa solamente la potencia reactiva que llega al consumo a través de la línea, cuyo valor, en caso de producirse una variación de P_R , será diferente al correspondiente al consumo ya que su ley de variación para ΔV constante está definida por la ecuación (2.5)

Con el objeto de precisar lo expuesto, consideremos:

Q_{R0} : Potencia reactiva requerida por el consumo

P_{R0} : Potencia activa inicial del consumo

Q_{R1} : Nuevo valor de potencia reactiva que se debe suministrar al consumo a través de la línea.

P_{R1} : Nuevo valor de potencia activa requerida por el consumo.

A partir de (2.5) se puede escribir:

$$Q_{R0} = K - \frac{R}{X} P_{R0}$$

$$Q_{R1} = K - \frac{R}{X} P_{R1} \quad (2.6)$$

Según sea el nuevo valor P_{R1} , se pueden presentar dos casos:

- a1) $P_{R1} > P_{R0}$; entonces $Q_{R1} < Q_{R0}$
- a2) $P_{R1} < P_{R0}$; entonces $Q_{R1} > Q_{R0}$

La potencia que se debe inyectar en el consumo será:

$$\Delta Q = Q_{R0} - Q_{R1} \quad (2.7)$$

El valor de ΔQ será positivo o negativo, según corresponda al caso a1) o a2) y se puede considerar en general como una potencia inyectada según se muestra en la Figura 2.3.

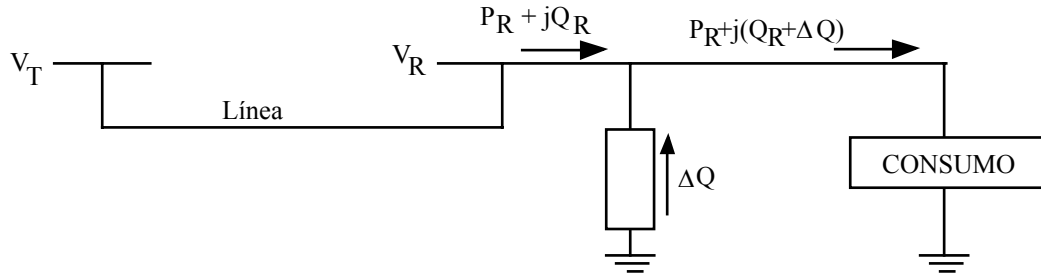


Figura 2.3.- Representación de ΔQ como fuente de potencia reactiva

Ejemplo 2.1. El sistema de la Figura 2.4, alimenta una carga que en demanda máxima ($D_{\max}$) es de 45 MVA, $\cos \phi = 1$. Durante la demanda mínima ($D_{\min}$) la carga es de $(10+j2)$ MVA. Si la tensión en el extremo transmisor puede tomar como valores extremos 110 y 100% respectivamente, determinar la compensación de potencia reactiva necesaria en el extremo receptor durante $D_{\max}$ y $D_{\min}$, si se desea mantener en dicho extremo una tensión de 100 y 95% respectivamente. $S_B=100$ MVA

Solución:

a) Para demanda máxima: $\dot{S}_L = 0,45 + j0,0$ (pu);
 $V_T=1,1$ (pu); $V_R= 1,0$ (pu)

Aplicando la aproximación de una línea corta (Ecuación 2.2) se tiene:

$$\Delta V = V_T - V_R = \frac{R P_R + X Q_R}{V_R} \Rightarrow 1,1 - 1 = \frac{0,38 * 0,45 + 0,6 * Q_R}{1}$$

De donde se obtiene: $Q_R = -0,1183$ (pu) $\Rightarrow Q_C = Q_L - Q_R = 0 - (-0,1183) = 0,1183$ (pu) $\Rightarrow \mathbf{Q_C = 11,83 \text{ MVAR (inyectar)}}$.

b) Para demanda mínima: $\dot{S}_L = 0,1 + j0,02$ (pu); $V_T=1,0$ (pu); $V_R= 0,95$ (pu)

Aplicando la ecuación (2.2) se tiene:

$$1,0 - 0,95 = \frac{0,38 * 0,1 + 0,6 * Q_R}{0,95} \Rightarrow Q_R = 0,01583 \Rightarrow Q_C = Q_L - Q_R = 0,02 - 0,01583 = 0,00417 \text{ (pu)}$$

$\Rightarrow \mathbf{Q_C = 0,417 \text{ MVAR (inyectar)}}$.

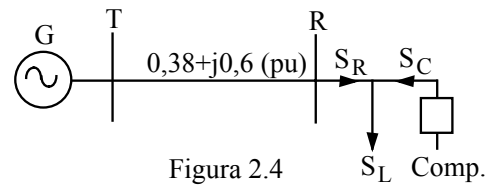


Figura 2.4

b. Línea de longitud media o larga: El estudio de la regulación de tensión en una línea media o larga, mediante inyección de potencia reactiva, se realiza usualmente, empleando las ecuaciones de potencia activa y reactiva en función de las constantes generalizadas A-B-C-D ya vistas, que se resumen a continuación.

$$\begin{aligned}
 P_T &= \left(\frac{D}{B}\right) V_T^2 \cos(\beta - \delta) - \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \cos(\beta + \theta) \\
 Q_T &= \left(\frac{D}{B}\right) V_T^2 \sin(\beta - \delta) - \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \sin(\beta + \theta) \\
 P_R &= \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \cos(\beta - \theta) - \left(\frac{A}{B}\right) V_R^2 \cos(\beta - \alpha) \\
 Q_R &= \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \sin(\beta - \theta) - \left(\frac{A}{B}\right) V_R^2 \sin(\beta - \alpha)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Ejemplo 2.2. Repetir el Ejemplo 2.1, empleando parámetros ABCD y las ecuaciones de potencia del extremo receptor.

Solución: Los parámetros ABCD de la línea son:

$$A=D=1\angle 0^\circ; \quad C=0; \quad B=Z=0,38+j0,6=0,7102\angle 57,65^\circ$$

a) Para demanda máxima: $V_T=1,1$ (pu), $V_R=1$ (pu); $P_L=0,45$ (pu) y $Q_L=0$

Las ecuaciones correspondiente al extremo receptor se obtienen de (2.8), es decir:

$$\begin{aligned}
 P_R &= \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \cos(\beta - \theta) - \left(\frac{A}{B}\right) V_R^2 \cos(\beta - \alpha) \\
 Q_R &= \left(\frac{1}{B}\right) V_R V_T \sin(\beta - \theta) - \left(\frac{A}{B}\right) V_R^2 \sin(\beta - \alpha)
 \end{aligned}$$

A partir de P_R despejamos $\cos(\beta - \theta)$, donde:

$$\cos(\beta - \theta) = \frac{P_R B + A V_R^2 \cos(\beta - \alpha)}{V_R V_T} = \frac{0,45 * 0,7102 + 1 * 1^2 * \cos(57,65^\circ - 0^\circ)}{1 * 1,1} = 0,77698 \Rightarrow \theta = 18,64^\circ$$

reemplazando valores en la ecuación de Q_R :

$$Q_R = \left(\frac{1}{0,7102}\right) 1 * 1,1 * \sin(57,65 - 18,64^\circ) - \left(\frac{1}{0,7102}\right) 1^2 * \sin(57,65^\circ - 0^\circ) = -0,2146 \text{ (pu)}$$

De donde se obtiene que: $Q_C=Q_L-Q_R=0-(-0,2146)=0,2146$ (pu) $\Rightarrow Q_C=21,46$ MVAR (inyectar).

b) Para demanda mínima: $V_T=1,0$ (pu), $V_R=0,95$ (pu); $P_L=0,1$ (pu) y $Q_L=0,02$

A partir de P_R despejamos $\cos(\beta - \theta)$, de donde:

$$\cos(\beta - \theta) = \frac{P_R B + A V_R^2 \cos(\beta - \alpha)}{V_R V_T} = \frac{0,1 * 0,7102 + 1 * 0,95^2 * \cos(57,65^\circ - 0^\circ)}{0,95 * 1,0} = 0,5831 \Rightarrow \theta = 3,32^\circ$$

reemplazando valores en la ecuación de Q_R :

$$Q_R = \left(\frac{1}{0,7102} \right) 0,95 * 1,0 * \sin(57,65 - 3,32^\circ) - \left(\frac{1}{0,7102} \right) 0,95^2 * \sin(57,65^\circ - 0^\circ) = 0,01315 \text{ (pu)}$$

De donde se obtiene que: $Q_C = Q_L - Q_R = 0,02 - 0,01315 = 0,00685 \text{ (pu)} \Rightarrow Q_C = 0,685 \text{ MVAR (inyectar)}$.

c. Sistema enmallado: En un caso general, interesa estudiar la influencia de la inyección o extracción de potencia reactiva en una barra cualquiera del sistema, sobre la tensión de dicha barra. El estudio parte de la premisa que existe una relación definida entre las potencias P , Q y la tensión V de la barra, relación que puede escribirse como $V = V(P, Q)$, de donde:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ \quad (2.9)$$

o bien:

$$dV = \frac{dP}{(\partial P / \partial V)} + \frac{dQ}{(\partial Q / \partial V)} \quad (2.10)$$

Es decir, la variación de tensión en un punto cualquiera p de un sistema, debido a cambios dP y dQ en las potencias activa y reactiva allí entregadas, está completamente determinada si se conocen los coeficientes $(\partial P / \partial V)$ y $(\partial Q / \partial V)$. De los dos, el $(\partial Q / \partial V)$ es el más importante ya que orienta sobre la amplitud de la variación de potencia reactiva que es necesario producir para provocar una variación determinada de tensión en el punto considerado.

Para determinar estos coeficientes, consideremos que la carga $S = P + jQ$ existente en el punto p del sistema de la Figura 2.5 a) se aumenta en un consumo puramente inductivo ΔQ , de valor muy pequeño (y que en el límite se hace tender a cero). Este hecho modifica la tensión en p , que de V pasa a $V + \Delta V$.

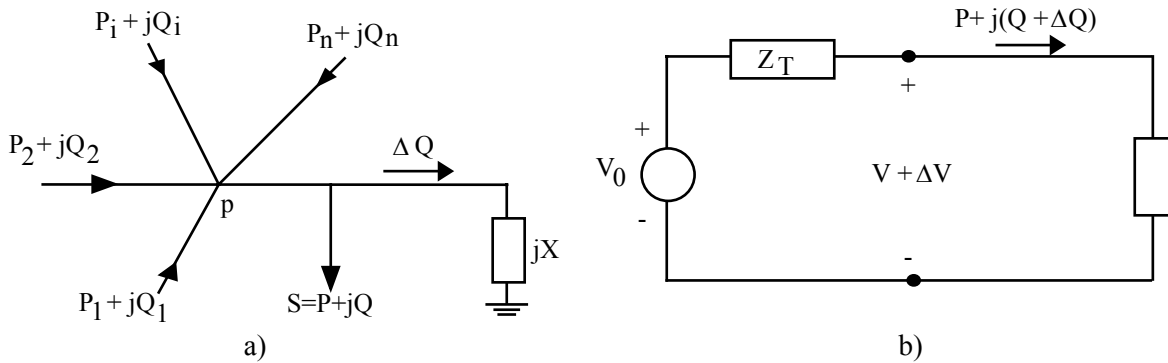


Figura 2.5.- Determinación del coeficiente $(\partial Q / \partial V)$. a) Diagrama unilineal; b) Circuito equivalente

Según el teorema de Thevenin, el sistema puede ser representado por el circuito de la Figura 2.5 b), donde V_0 es el voltaje que existía en p cuando no había consumo y Z_T es la Impedancia equivalente de Thevenin del sistema vista desde p . En el circuito de la Figura 2.5 b) se puede aplicar lo planteado en las ecuaciones (2.1) y (2.2); que en este caso quedan:

$$\Delta V = V_0 - V = \frac{R_T P + X_T Q}{V} \quad (2.11)$$

es decir:

$$V_0 V - V^2 - R_T P - X_T Q = 0 \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) es una función implícita y por lo tanto, como en este caso, sólo se produce un cambio en Q, (P permanece constante) se puede derivar parcialmente respecto a V y se obtiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_0 - 2V}{X_T} \quad (2.13)$$

Si hubiera un cambio en P (ΔP) con Q constante, se encuentra que:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{V_0 - 2V}{R_T} \quad (2.14)$$

En el caso en que no exista consumo previo S en el punto p, $V_0=V$, por lo que (2.13) y (2.14) quedan:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V}{X_T} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{V}{R_T} \quad (2.16)$$

Valores típicos de $(\partial Q/\partial V)$ van desde los -3 a -15 [MVar/kV]. El signo menos indica que si ΔQ (ó ΔP) es positivo, lo que significa que la potencia que sale de p aumenta, entonces la tensión en el nudo p disminuye. Por lo tanto, la conexión de un reactor produce una baja de tensión mientras que la conexión de un condensador produce un aumento en la tensión.

Es interesante hacer notar que $(\partial P/\partial V)$ y $(\partial Q/\partial V)$ tienen las dimensiones de corriente. Por otra parte; la corriente de cortocircuito trifásico en p (I_{CC}), (como se verá en el Capítulo 4), se puede calcular directamente de la Figura 2.5, despreciado R_T y la corriente previa a la falla y vale:

$$I_{CC} = \frac{V}{X_T} \quad (2.17)$$

Las expresiones de $(\partial Q/\partial V)$ e I_{CC} (en módulo) son prácticamente iguales. La diferencia está en que la corriente de cortocircuito se calcula con las reactancias transitorias de las máquinas; mientras que $(\partial Q/\partial V)$ considera reactancias permanentes o sólo las reactancias hasta aquellas barras en que la tensión permanece constante por efecto de la acción de los reguladores de tensión. Para nudos algo alejados de las máquinas, casi no habrá diferencias entre ambas definiciones. Por ello se suelen considerar como aproximadamente iguales.

Para el cálculo real de $(\partial Q/\partial V)$ no se consideran las impedancias de las cargas y se suponen constantes las tensiones en bornes de las máquinas síncronas.

Por otra parte, aunque hasta el momento, sólo se ha considerado inyectar potencia reactiva, es evidente que, dependiendo de las condiciones de carga en el sistema, habrá que absorber potencia reactiva en algunos casos, para mantener la tensión dentro de los límites prefijados. Generalmente es necesario absorber potencia reactiva en las horas de poco consumo, lo que se debe fundamentalmente a la potencia reactiva “generada” por las líneas de transmisión que operan a niveles de tensión elevados o por redes de cables.

Ejemplo 2.3. En el sistema de la Figura 2.6, las barras A y C se mantienen a tensión nominal de 220 kV. La barra B se mantiene a tensión nominal de 154 kV. Suponiendo que una cierta variación de carga en el sistema hace disminuir en 5 kV la tensión en la barra M, calcular la inyección de potencia reactiva necesaria en esta barra para restablecer su tensión primitiva. Los valores en % están con $S_B=500$ MVA.

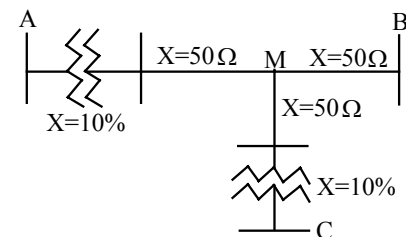


Figura 2.6

$$S_B = 500 \text{ MVA}; V_{BL} = 154 \text{ kV} \Rightarrow$$

$$Z_B = \frac{154^2}{500} = 47,432 \text{ Ohm};$$

$$X_L = \frac{50}{47,432} = 1,05414 \text{ (pu)}.$$

Por otra parte:

$$\Delta V = \frac{-5}{154} = -0,03247 \text{ (pu)}$$

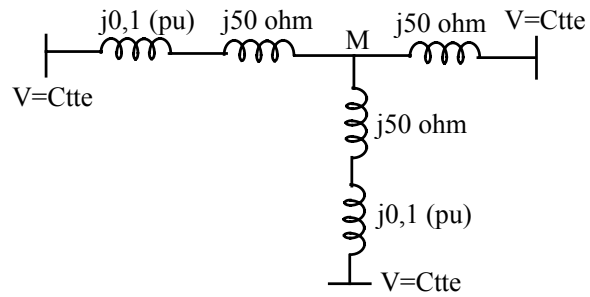


Figura 2.7

Solución:

La reactancia de Thevenin en M es:

$$X_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{1,15414} + \frac{1}{1,15414} + \frac{1}{1,05414}} = 0,3729 \text{ (pu)} \quad \text{A partir de la ecuación (2.10):}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{\partial P / \partial V} + \frac{\Delta Q}{\partial Q / \partial V}; \quad \text{con } \frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{V}{R_{TH}} = \infty \quad \text{y} \quad \frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V}{X_{TH}} = -\frac{1}{0,3729} = -2,6815 \quad \text{se obtiene:}$$

$$\Delta Q = 0,03247 * (-2,6815) = -0,08707 \text{ (pu)} \Rightarrow \text{Inyectar } 43,53 \text{ MVar}$$

2.6. Regulación de tensión mediante transformadores con cambio de TAP (TCT)

El coeficiente $(\partial Q / \partial V)$ de una barra puede en algunos casos alcanzar e incluso superar valores del orden de -15 [MVar/kV] . En estas condiciones no resulta adecuado el sistema de inyección de potencia reactiva debido a la magnitud de las cantidades que habría que poner en juego para compensar las variaciones de tensión en la barra correspondiente.

Puede suceder que la tensión regulada se desee en la barra q correspondiente al secundario de un transformador conectado a la barra p como se muestra en la Figura 2.8.

A pesar de la reactancia introducida entre p y q, $(\partial Q / \partial V)$ puede aún resultar demasiado elevado. En estas condiciones, lo más adecuado es emplear un TCT que permita regular la tensión en la barra q “inyectando una tensión adicional”. Esto no genera potencia reactiva, pero modifica su distribución en el sistema. El empleo de TCT para regular tensión en una barra determinada, se ilustrará mediante el análisis de los casos siguientes:

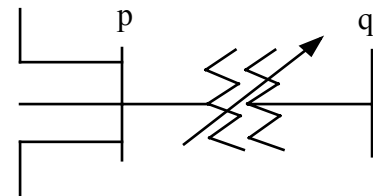


Figura 2.8.- Transformador con cambio de Tap conectado entre las barras p y q de un sistema

2.6.1. Sistema de transmisión radial con un TCT en el extremo transmisor

En el sistema de la Figura 2.9 se tiene:

Z_L : Impedancia de la línea de transmisión (Ω/fase).

Z_T : Impedancia del TCT (Ω/fase), referida al secundario.

V_{1N}, V_{2N} : Tensiones nominales del TCT.

$a_N = V_{1N} / V_{2N}$: Razón nominal del TCT.

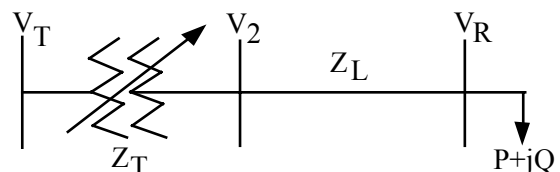


Figura 2.9.- Sistema radial con un TCT ubicado en el extremo transmisor

V_T, V_2, V_R : Tensiones en los puntos que se indican antes del cambio de Tap.

$a=V_{1N}/V'_{2N}$: razón del transformador después del cambio de Tap (razón no nominal)

$V'_T; V'_2; V'_R$: Tensiones en los puntos que se indican después del cambio de Tap.

La razón de cambio en el Tap t (suponiéndolo en el secundario del transformador), es:

$$t = \frac{a}{a_N} = \frac{V_{2N}}{V'_{2N}} \quad (2.18)$$

Si se supone que $V_T=V_{1N}$ y que Z_T , prácticamente no varía al cambiar el TAP, las redes equivalentes “por fase” antes y después del cambio de TAP son las que se muestran en las Figuras 2.10 a) y b)

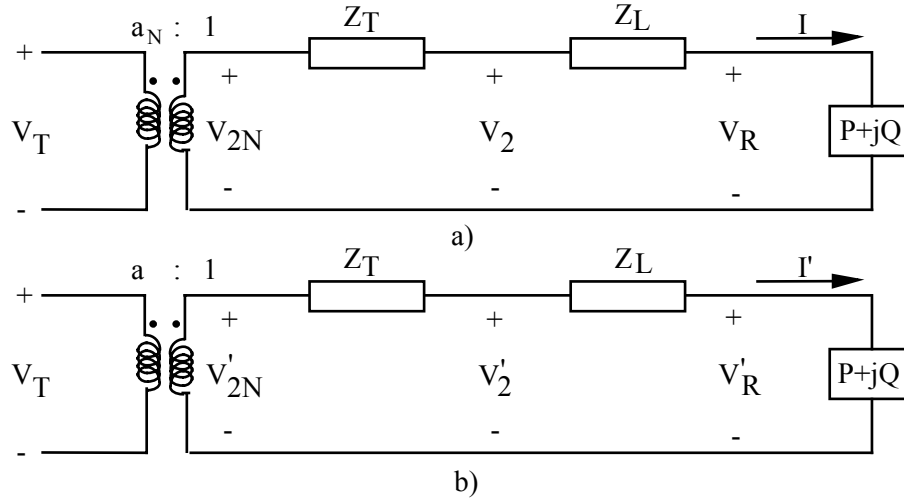


Figura 2.10.- Redes equivalentes por fase correspondientes al sistema de la Figura 2.9. a) Antes del cambio de Tap, b) Después del cambio de Tap

A partir de la Figura 2.10 b) se puede escribir:

$$\dot{V}'_{2N} = (Z_T + Z_L) \dot{I}' + \dot{V}'_R \quad (2.19)$$

Considerando la ecuación (2.2) se puede determinar en forma aproximada, el módulo de la caída de tensión en las impedancias del transformador y la línea como sigue:

$$(Z_T + Z_L) I' \approx \Delta V_{TL} = \frac{(R_T + R_L) P + (X_T + X_L) Q}{V'_R} \quad (2.20)$$

Despejando V'_{2N} de (2.18), introduciendo este valor y (2.20) en (2.19) y despejando t , se obtiene:

$$t = \frac{V_{2N} V'_R}{(R_T + R_L) P + (X_T + X_L) Q + (V'_R)^2} \quad (2.21)$$

Utilizando esta ecuación se puede determinar el cambio de tap necesario para cumplir determinadas condiciones. Por ejemplo, si se quiere compensar la caída de tensión en la línea, $V'_R = V_2$ y por lo tanto:

$$t = \frac{V_{2N} V_2}{(R_T + R_L) P + (X_T + X_L) Q + V_2^2} \quad (2.22)$$

Si adicionalmente se desprecia la caída en el transformador, se tiene que: R_T y X_T son iguales a cero y $V_2=V_{2N}$ y por lo tanto:

$$t = \frac{V_{2N}^2}{R_L P + X_L Q + V_{2N}^2} \quad (2.23)$$

2.6.2. Sistema de transmisión radial con TCT en ambos extremos de la línea

En el sistema de la Figura 2.11 se tiene:

Z_L : Impedancia de la línea de transmisión (Ω /fase)

Z_A y Z_B : Impedancia de cada TCT (Ω /fase), referida al sector de la línea.

$a_{1N} = V_{AN}/V_{aN}$: Razón nominal del TCT A

$a_{2N} = V_{BN}/V_{bN}$: Razón nominal del TCT B

$a_1 = V_{AN}/V'_{aN}$: razón del transformador A después del cambio de Tap

$a_2 = V_{BN}/V'_{bN}$: razón del transformador B después del cambio de Tap

V_T, V_1, V_2, V_R : Tensiones en los puntos indicados antes del cambio de Tap.

V'_T, V'_1, V'_2, V'_R : Tensiones en los puntos indicados después del cambio de Tap.

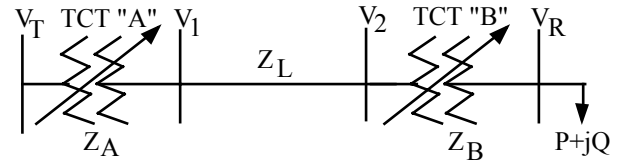


Figura 2.11.- Regulación de tensión con TCT en ambos extremos

La razones de cambio en los Tap t_1 y t_2 se pueden definir como:

$$t_1 = \frac{a_1}{a_{1N}} = \frac{V_{aN}}{V'_{aN}} \quad (2.24)$$

$$t_2 = \frac{a_2}{a_{2N}} = \frac{V_{bN}}{V'_{bN}} \quad (2.25)$$

Las redes equivalentes antes y después del cambio de Tap se muestran en la Figura 2.12.

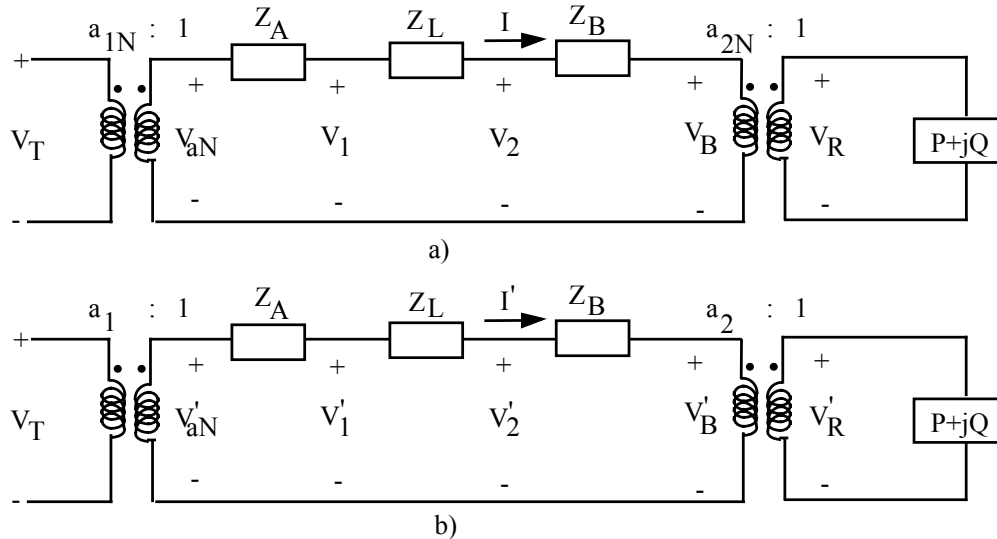


Figura 2.12.- Redes equivalentes por fase correspondientes al sistema de la Figura 2.11. a) Antes del cambio de Tap, b) Después del cambio de Tap

A partir de la Figura 2.12 b) se puede escribir:

$$\dot{V}'_{aN} = (Z_A + Z_L + Z_B) \dot{I}' + \dot{V}'_B \quad (2.26)$$

Considerando la ecuación (2.2) se puede determinar en forma aproximada, el módulo de la caída de tensión en las impedancias de los transformadores y la línea como sigue:

$$(Z_A + Z_L + Z_B) I' \approx \Delta V_{ALB} = \frac{(R_A + R_L + R_B) P + (X_A + X_L + X_B) Q}{V_B'} \quad (2.27)$$

Despejando V_{aN}' de (2.24), introduciendo este valor y (2.27) en (2.26) y despejando t_1 , se obtiene:

$$t_1 = \frac{V_{aN}' V_B'}{(R_A + R_L + R_B) P + (X_A + X_L + X_B) Q + (V_B')^2} \quad (2.28)$$

Por otra parte, de la Figura 2.12.b) y considerando la ecuación (2.25) se tiene que:

$$V_B' = a_2 V_R' = t_2 a_{2N} V_R' \quad (2.29)$$

Introduciendo (2.29) en (2.28), se obtiene finalmente:

$$t_1 = \frac{V_{aN}' t_2 a_{2N} V_R'}{(R_A + R_L + R_B) P + (X_A + X_L + X_B) Q + (t_2 a_{2N} V_R')^2} \quad (2.30)$$

Si V_T permanece constante, la ecuación (2.30) permite determinar los cambios de TAP necesarios t_1 y t_2 de tal modo que se obtenga un valor deseado V_R' . En particular, si se desea que V_R' sea igual a la tensión nominal del secundario del transformador B, o sea $V_R' = V_{bN}$, entonces, a partir de (2.30) se obtiene:

$$t_1 = \frac{V_{aN}' t_2 V_{bN}}{(R_A + R_L + R_B) P + (X_A + X_L + X_B) Q + (t_2 V_{bN})^2} \quad (2.31)$$

Si además, se desprecian las caídas internas de los transformadores y se considera $t_1 = t_2$, entonces:

$$t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{V_{aN}' - \frac{R_L P + X_L Q}{V_{bN}^2}}{V_{bN}}} \quad (2.32)$$

Ejemplo 2.4. En el sistema de la Figura 2.13, calcular los cambios de TAP necesarios para mantener 33 kV en el consumo. Qué potencia reactiva se debería inyectar en la barra de carga para mantener 33 kV, en el caso de que los transformadores no tuvieran cambiadores de TAP?

Solución:

a) Usando la ecuación (2.30), con $t_1=t_2$ se tiene:

$$t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{V_{aN}' * a_{2N} * V_R' - R_T * P - X_T * Q}{(a_{2N} * V_R')^2}}$$

en que todos los valores son por fase y por lo tanto:

$$P=150/3=50 \text{ MW/fase}$$

$$Q=(50/0,8)*\sin(\cos^{-1} 0,8)=37,5 \text{ MVAR/fase}$$

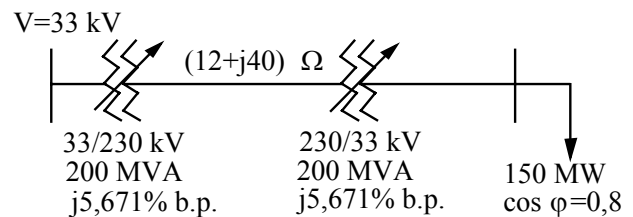


Figura 2.13

$$X_{TR}=0,05671 * Z_{B2}=0,05671 * (230^2/200)$$

$$X_{TR}=15 \Omega/\text{fase}$$

$$R_T=12 \Omega/\text{fase};$$

$$X_T=(15+40+15)=70 \Omega/\text{fase}$$

$$t_1 = t_2 = \sqrt{\frac{\frac{230}{\sqrt{3}} * \frac{230}{33} * \frac{33}{\sqrt{3}} - 12 * 50 - 70 * 37,5}{\left(\frac{230}{33} * \frac{33}{\sqrt{3}}\right)^2}} = 0,90394$$

b) Usando aproximación de la línea corta:

$$\Delta V = \frac{R P_R + X Q_R}{V_R} = 0 \Rightarrow Q_R = -\frac{R * P_R}{X} = -\frac{12 * 50}{70} = -8,57 \text{ MVar / fase}$$

Luego: $Q_C = Q_L - Q_R = 37,5 - (-8,57) \Rightarrow Q_C = 46,07 \text{ MVAR/fase}$. Es decir; se deberían inyectar 138,21 MVar

2.7. Regulación de tensión mediante el uso combinado de TCT e inyección de Potencia Reactiva

Los dispositivos de producción o absorción de potencia reactiva se conectan usualmente al enrollado terciario de transformadores que interconectan redes de transmisión y de distribución. Si el transformador tiene cambiador de tap, es posible regular independientemente los voltajes primario y secundario, inyectando potencia reactiva para controlar uno de ellas y modificando los tap para controlar el otro. La Figura 2.14 muestra un esquema típico, en que las variables se suponen “por fase” y las impedancias referidas al primario.

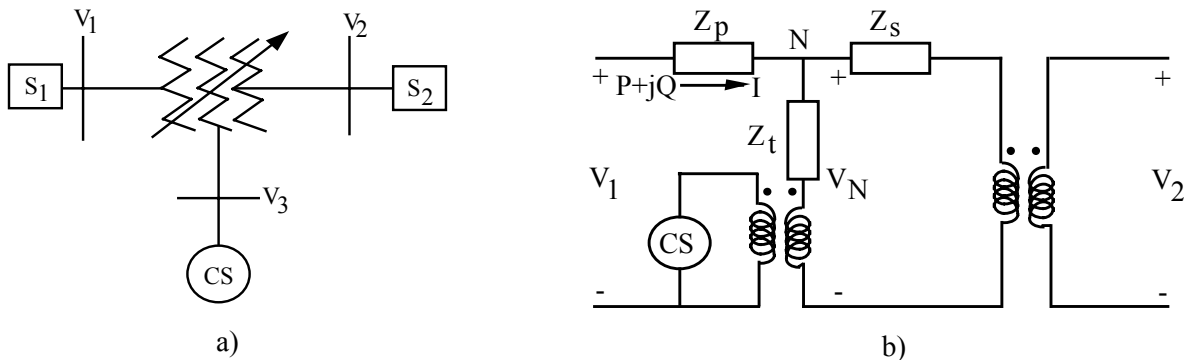


Figura 2.14.- Esquema típico de regulación de tensión combinando TCT e inyección de potencia reactiva. a) Diagrama unilineal, b) Red equivalente por fase

En general, el problema consiste en determinar los cambios de Tap necesarios en el transformador, para ciertas condiciones de potencia reactiva del compensador sincrónico y determinada potencia compleja transferida entre los enrollados primario y secundario, de tal modo que las tensiones V_1 y V_2 estén dentro de ciertos valores especificados. El análisis se efectúa normalmente haciendo las siguientes aproximaciones:

- Se desprecia la potencia activa perdida en el transformador, por lo que Z_p , Z_s y Z_t se suponen sin resistencia
- Las caídas de tensión se calculan por medio de expresiones simplificadas

Sea $P+jQ$, la potencia compleja que llega al nudo N por la rama Z_p . El diagrama fasorial de la Figura 2.15 muestra esta situación, considerando como referencia el fasor de voltaje V_N .

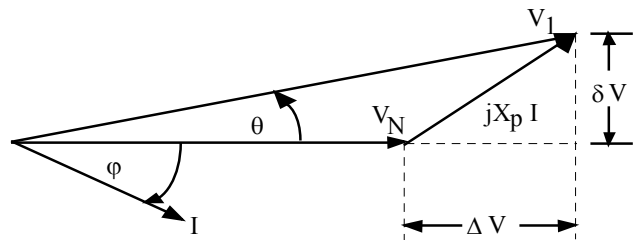


Figura 2.15.- Diagrama fasorial para determinar el voltaje en el nudo N

A partir de esta figura se puede escribir:

$$V_1 - V_N \approx \Delta V = \frac{X_p Q}{V_N} \quad (2.33)$$

$$\delta V = \frac{X_p P}{V_N} \quad (2.34)$$

Por otra parte, en la Figura 2.15 se tiene que:

$$V_1^2 = (V_N + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 \quad (2.35)$$

Introduciendo (2.33) y (2.34) en (2.35) y despejando V_N se obtiene:

$$V_N^2 = \frac{V_1^2 - 2X_p Q}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{V_1^2 (V_1^2 - 4X_p Q) - 4(X_p P)^2} \quad (2.36)$$

En algunos cálculos más simplificados, la tensión V_N se determina despreciando δV , con lo que resulta una expresión más sencilla que (2.36).

A partir del valor de V_N , se puede determinar el tap en que debe quedar el transformador utilizando, por ejemplo, la expresión (2.18).

Ejemplo 2.5. El TTTE de la Figura 2.16 tiene conectado en el terciario un compensador síncrono. La potencia de la carga es de $(75+j30)$ MVA y los voltajes V_1 y V_2 deben permanecer en 225 y 70 kV respectivamente. Las reactancias del TTTE son: $X_{ps}=11,5\%$; $X_{pt}=19,2\%$; $X_{st}=7,5\%$, todas en base común 75 MVA. Determinar, despreciando X_s , el campo de regulación del cambiador de TAP en carga, si se sabe que el compensador síncrono funciona: a) en vacío; b) Como condensador síncrono (40 MVAR).

Solución:

Parámetros del transformador de 3 enrollados:
Sólo interesa el valor de X_p :

$$X_p = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{pt} - X_{st}) = 0,116 \text{ (pu)}, \quad \text{como:}$$

$$Z_{Bl} = \frac{220^2}{75} = 645,33 \text{ ohm}$$

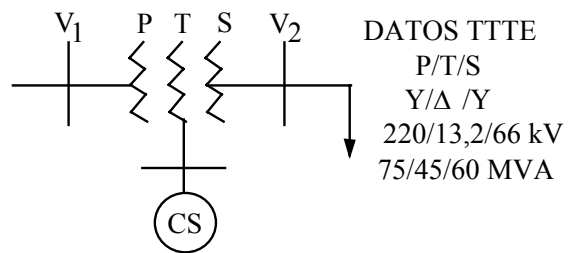


Figura 2.16

Se tiene que: $X_p=74,86 \text{ ohm/fase}$. ($X_s=-0,001 \text{ pu}$)

Usando la ecuación (2.36) y considerando el circuito equivalente de la Figura 2.14 b), se tiene que:

a) Compensador en vacío $\Rightarrow P=25 \text{ MW/fase}$; $Q=10 \text{ MVAR/fase}$; $V_1=225/\sqrt{3} \text{ kV/fase}$; $V_2=70/\sqrt{3} \text{ kV/fase}$. Reemplazando valores en la ecuación (2.36) se obtiene:

$V_{N1}=\pm 122,92 \text{ kV/fase}$ y $V_{N2}=\pm 16,4 \text{ kV/fase}$ (No válida); por lo tanto; $V_N=122,92 \text{ kV/fase}$ y:

$$a' = \frac{122,92 * \sqrt{3}}{70} = 3,0415. \quad \text{Además: } a_N = \frac{220}{66} = 3,3333. \quad \text{Entonces:}$$

$$t_a = \frac{a'}{a_N} = \frac{3,0415}{3,3333} = 0,9125$$

b) Compensador entregando 40 MVAR $\Rightarrow Q=30-40= -10$ MVar; es decir, $Q= -10/3$ MVar/fase. Reemplazando valores en la ecuación (2.36) se obtiene:

$V_{N1}=\pm 131,021$ kV/fase y $V_{N2}=\pm 14,41$ kV/fase (No válida); por lo tanto; $V_N=131,021$ kV/fase y:

$$a'' = \frac{131,021 * \sqrt{3}}{70} = 3,2419. \text{ Además: } a_N = \frac{220}{66} = 3,3333. \text{ Entonces:}$$

$$t_b = \frac{a''}{a_N} = \frac{3,2419}{3,3333} = 0,9726. \text{ Es decir, el tap debe variar entre } 0,9125 \text{ y } 0,9726$$

Problemas propuestos

2.1. En el sistema de la Figura 2.17, el generador no tiene regulador de voltaje y $S_B=100$ MVA. Antes de energizar la línea, la tensión en el punto A es del 100%. Determinar:

- Las tensiones en ambos extremos de la línea después de ser energizada (sin carga).
- La capacidad del reactor necesario a conectar en "B" para que la tensión en este punto sea del 100%.
- La tensión en "A" con el reactor conectado.

2.2. En el terciario del Transformador Trifásico de Tres Enrollados (TTTE) de la Figura 2.18, hay un condensador síncrono que tiene por objeto mantener la tensión de la carga en 100%. Cuando la carga es de $(40+j15)$ MVA, el condensador síncrono (CS) está en vacío. Determinar la potencia reactiva que entrega el CS cuando la carga aumenta a $(80+j30)$ MVA. El generador no tiene regulador de voltaje, la potencia base es de 100 MVA y los parámetros del transformador son: $X_p=13,1\%$; $X_s=-1\%$; $X_t=8\%$

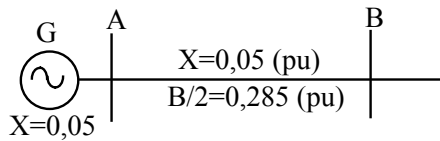


Figura 2.17

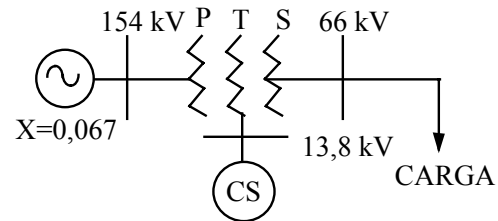


Figura 2.18

2.3. Una línea corta de transmisión que tiene una impedancia serie de $(0,02+j0,1)$ pu ($S_B=100$ MVA), alimenta una carga de 200 MVA, Factor de Potencia 0,8 inductivo. En el extremo receptor existe un compensador que permite que con 220 kV en el extremo transmisor, el voltaje en el extremo receptor sea de 225 kV. Considerando que el desfase entre ambos voltajes es pequeño y que el voltaje en el extremo transmisor se mantiene constante, Determinar:

- La capacidad (MVar) del compensador síncrono que está conectado en el extremo receptor.
- El voltaje que aparece en el extremo receptor al desconectar la carga.

2.4. El esquema de la Figura 2.19, muestra un diagrama simplificado de la Central Termoeléctrica Bocamina. Los coeficientes $(\partial P/\partial V)$ y $(\partial Q/\partial V)$ en la barra de 66 kV son respectivamente: -130 [MW/kV] y $-56,5$ [MVar/kV]. La tensión en dicha barra es de 67,3 kV, cuando está la carga de 4 MVA conectada, a Factor de Potencia 0,9 (inductivo). En estas condiciones se pretende hacer partir un motor de inducción tipo Jaula de Ardilla, que mueve las bombas de la caldera, sabiendo que la tensión mínima de partida del motor es del 90% y que durante la partida consume 5 veces la corriente nominal con $\cos \phi=0,3$. Determinar si es posible hacer partir el motor en estas condiciones.

2.5. Los sistemas de la Figura 2.20, están unidos a través de un autotransformador regulador cuyo rango es $V_N \pm 15 \times 1,25\%$. Cuando está en su derivación nominal y las tensiones son $V_1=1,1$ (pu); $V_2=0,9$ (pu), el

Sistema 1 entrega $(100 + j80)$ MVA. Determinar la derivación en que se debe ajustar el regulador para que la potencia reactiva que entregue el Sistema 1 no sea superior a 30 MVAR (V_1 y V_2 constantes). Considerar $S_B=100$ MVA.

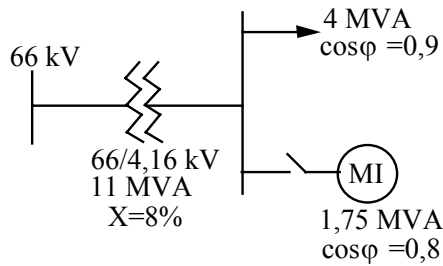


Figura 2.19

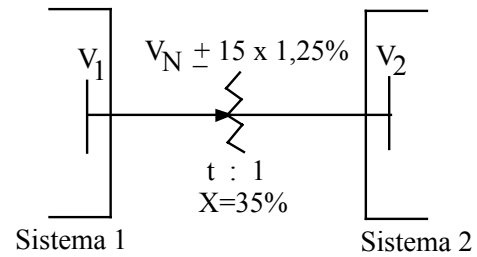


Figura 2.20

2.6. En el sistema de la Figura 2.21, los generadores 1 y 2 tienen reguladores de tensión que mantienen constante la tensión en bornes. El transformador de 154/69 kV tiene cambiador de TAP bajo carga en el lado de 69 kV con 19 derivaciones en pasos de 1,25% y con el valor nominal en la derivación central. El cambiador de TAP es comandado por un sistema de control que trata de mantener constante la tensión en barras de 69 kV y que reacciona cuando la tensión varía en más de 1,5% del valor de ajuste. La tensión en barra de 69 kV es la nominal y el cambiador se encuentra en la posición $(69+4 \times 1,25\%)$. En ese instante se conecta un banco de condensadores de 6 MVAR a la barra de 69 kV. ¿Cómo reacciona el sistema de regulación? ¿En qué valor queda la tensión en la barra de 69 kV después que ha reaccionado el sistema de regulación? Todos los valores en % están en base propia.

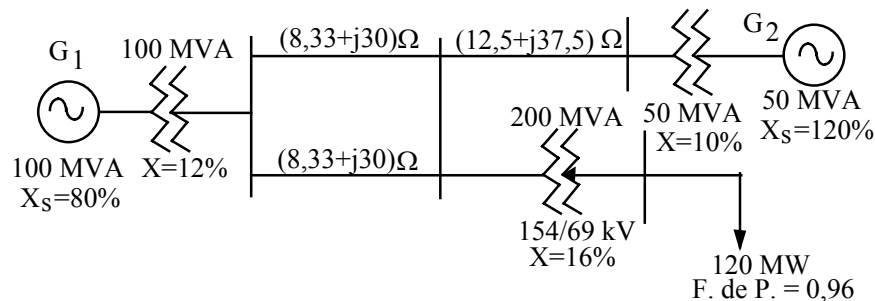


Figura 2.21

2.7. En el sistema de la Figura 2.22, la potencia en el consumo puede variar del siguiente modo: $(0 - j3) \leq \dot{S}_C \leq (30 + j20)$ MVA. Considerando que la tensión en el extremo transmisor V_T se mantiene constante en 12 kV y que la del extremo receptor V_R no debe variar en más de $\pm 5\%$; determinar si es necesario inyectar o absorber potencia reactiva en el extremo receptor y a partir de que valor o valores de la potencia del consumo. Valores en porcentaje en base 100 MVA.

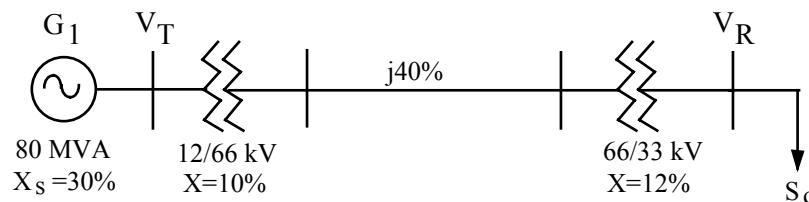


Figura 2.22