



Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

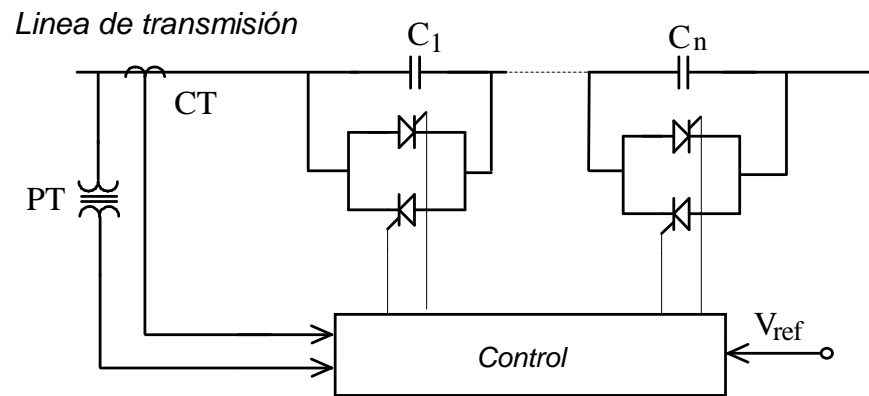


Fig. 3.20

Los dos esquemas básicos de compensación serie son: el condensador conmutado a tiristor (TSC) y el condensador serie controlado a tiristor (TCSC) mostrados en la Fig. 3.20 y Fig. 3.21 respectivamente.

En el esquema del TSC el grado de compensación es controlado aumentando o disminuyendo el número de bancos conectados en serie. Para hacer esto, cada banco es insertado o cortocircuitado por el arreglo de tiristores (compensación discreta de potencia reactiva).

Para minimizar los problemas de conmutación, la operación de disparo de los tiristores es coordinado con los cruce por cero de la tensión de los condensadores.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

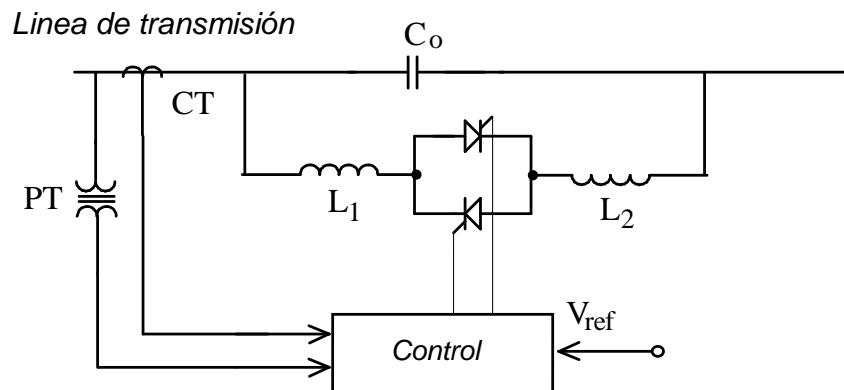


Fig. 3.21

En los TCSC (Fig. 3.21) el grado de compensación serie en la región de operación capacitiva es aumentada (ó disminuida) aumentando (o disminuyendo) el ángulo de disparo de los tiristores, y por lo tanto la corriente en los reactores.

La compensación serie máxima es alcanzada cuando los reactores, del TCR, están en circuito abierto. El TCR puede ser proyectado para tener capacidad para limitar la tensión sobre el condensador durante fallas y otras contingencias que afecten al sistema.

La característica P versus δ (ver Fig. 2.5) indica que, además del control del flujo de potencia en régimen permanente, el TCSC puede ser eficaz para mejorar la estabilidad transitoria, amortiguar las oscilaciones de potencia y balancear el flujo de potencia en las líneas paralelas.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

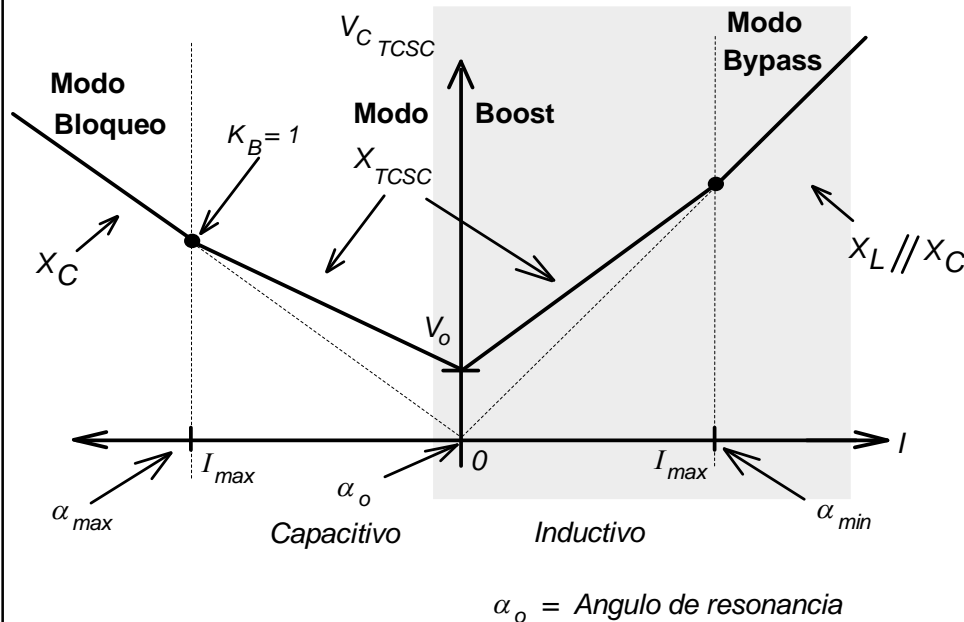


Fig. 3.22

3.3.1 - Característica régimen permanente de un TCSC

La característica del TCSC depende de las reactancias del banco capacitivo $X_{Co} = -1/\omega C_o$ y de la reactancia del inductor del TCR dada por $X_{Lo} = \omega L_o$.

La frecuencia resonante del circuito formado por la inductancia fija en el TCR y la capacitancia del banco fijo es dada por:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_o \cdot C_o}} = \omega \cdot \sqrt{\frac{X_{Co}}{X_{Lo}}} \quad (3.28)$$

El parámetro ' λ ' es definido como el cociente de la frecuencia resonante de los parámetros fijos (C_o y L_o) y la frecuencia de la red (ω), luego:

$$\lambda = \frac{\omega_o}{\omega} = \sqrt{\frac{X_{Co}}{X_{Lo}}} \quad (3.29)$$

Donde: X_{Co} y X_{Lo} son las reactancias de C_o y L_o respectivamente. De la Fig. 3.22 se desprende que el TCSC tiene tres zonas de operación, que son: modo bypass, modo bloqueo y modo Boost, se resalta la zona no utilizada.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

3.3.2 - Operación del TCSC en régimen permanente

Para una mayor relevancia del concepto de reactancia equivalente se define el factor Boost, que es la reactancia equivalente del TCSC en por unidad, en la expresión dada por (3.30) [11]:

$$K_B = \frac{X_{TCSC}}{X_{C_o}} = \frac{C_o}{C_{TCSC}(\alpha)}, \text{ siempre es mayor que 1.} \quad (3.30)$$

El TCSC puede operar en 3 modos de operación, en los cuales se tienen diferentes valores de reactancias. Basado en este contexto se define la reactancia equivalente dada por (3.31), cuyos valores representan los fasores de tensión en la capacitancia equivalente y la corriente de línea circulante por el sistema. A continuación, se describen los 3 modos teóricos en los que puede trabajar el TCSC, modo bypass, modo Boost y modo bloqueo. Cabe notar que el modo de operación normal del TCSC es el llamado modo Boost capacitivo.

$$X_{Ceq} = X_{TCSC} = \text{Im} \left\{ \frac{V_{C_o}}{I_L} \right\} \quad (3.31)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Para mostrar cada uno de los modos se realizaron simulaciones en lazo abierto, con las especificaciones dadas a continuación, **considerando que la corriente de línea es constante y totalmente sinusoidal**. La figura 3.23 muestra el circuito equivalente utilizado, a modo de ejemplo se toman los siguientes parámetros:

$$C_o = 212.205[\mu F]$$

$$X_{C_o} = 15[\Omega]$$

$$L_o = 8.1506[mH]$$

$$X_{L_o} = 2.54[\Omega]$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{15}{2.54}} = 2.4203$$

$$i(\omega t) = \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50$$

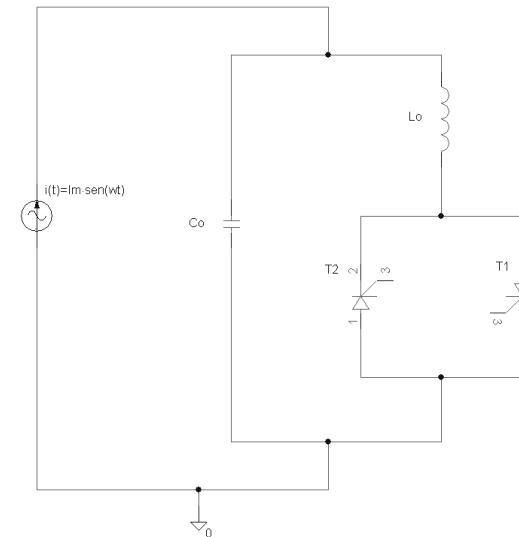


Fig. 3.23

a) Operación del TCSC en modo Bypass

Si los tiristores son disparados en 90° , es decir está en conducción continua, el TCSC se comporta como una conexión paralela entre el banco de condensadores, C_o , con la inductancia, L_o , de la rama de los tiristores lo cual se muestra en la figura 3.24. El factor Boost de este modo de operación se obtiene de la definición y se muestra en la expresión siguiente:

$$K_B = \frac{X_{C_o} \cdot X_{L_o}}{X_{C_o} - X_{L_o}} \cdot \frac{1}{X_{C_o}} = \frac{1}{\lambda^2 - 1} \quad (3.32)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

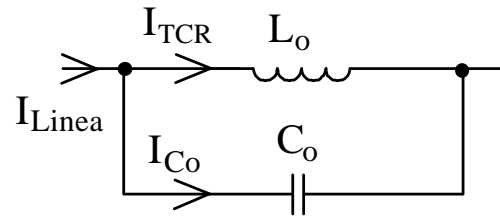


Fig. 3.24

Las formas de onda más importantes para esta región en régimen permanente obtenidas por simulación son mostradas en la figura 3.25. Figura superior se muestra la tensión en el condensador. Figura inferior corrientes por el TCR, línea y condensador fijo.

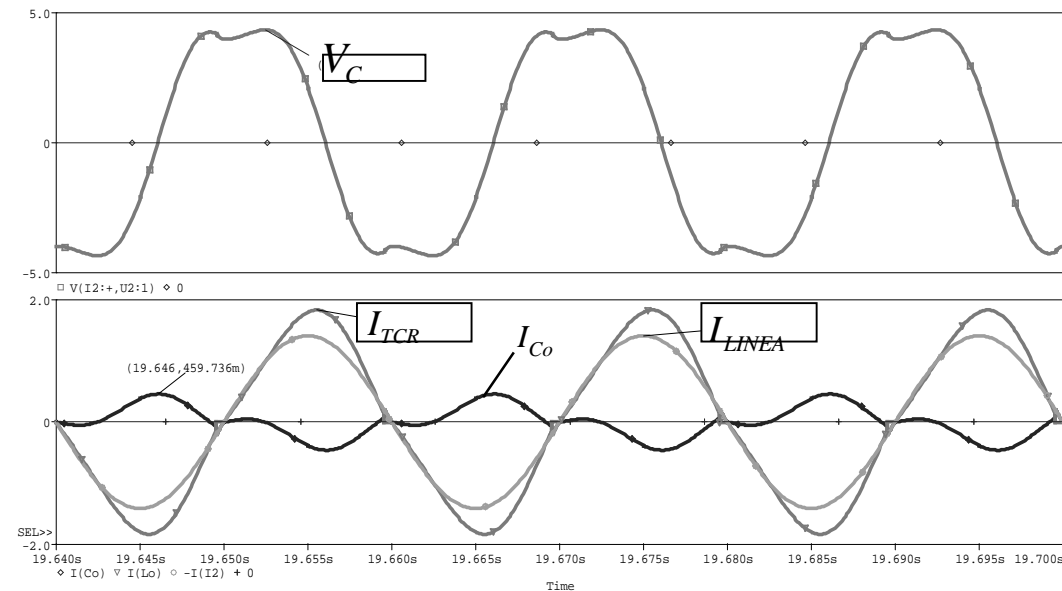


Fig. 3.25

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

b) Operación del TCSC en modo Capacitivo

Para un rango de ángulos de disparo variables, en los cuales el tiempo de conducción a través de los tiristores es controlable, la rama del TCR se comporta como una inductancia variable, la cual asociada en paralelo con el banco fijo de condensadores, C_o , mostrados en la figura 3.26, se obtiene un condensador equivalente, de capacitancia variable, $C_{TCSC}(\alpha)$. El factor Boost para este modo de operación es dado por (3.33), **el factor Boost es obtenido considerando pérdidas despreciables y se asume además que la corriente de línea permanece totalmente sinusoidal, constante en magnitud y fase.** Usualmente el ángulo de control (β) del TCSC oscila entre 0° y 40° , o de forma equivalente α varía entre 140° a 180° , este rango de variación depende netamente del parámetro λ .

$$K_B = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{2 \cdot \cos^2(\beta)}{\lambda^2 - 1} \cdot [\lambda \tan(\lambda\beta) - \tan(\beta)] - \beta - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right] \quad (3.33)$$

Con: $\beta_{bloq} < \beta < \beta_o$ y, $\beta = \pi - \alpha$, β_o = ángulo de resonancia, dado por: $\beta_o = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}$

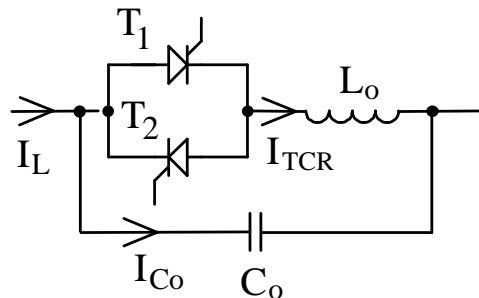


Fig. 3.26

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

La expresión dada por (3.33) es mostrada en forma grafica por la figura 3.27a con $\lambda=2.5$, donde puede ser observado que la misma expresión genera también operación en modo inductivo, el cual no es utilizado ya que significa que en este modo la línea disminuye aún más su capacidad de transmisión.

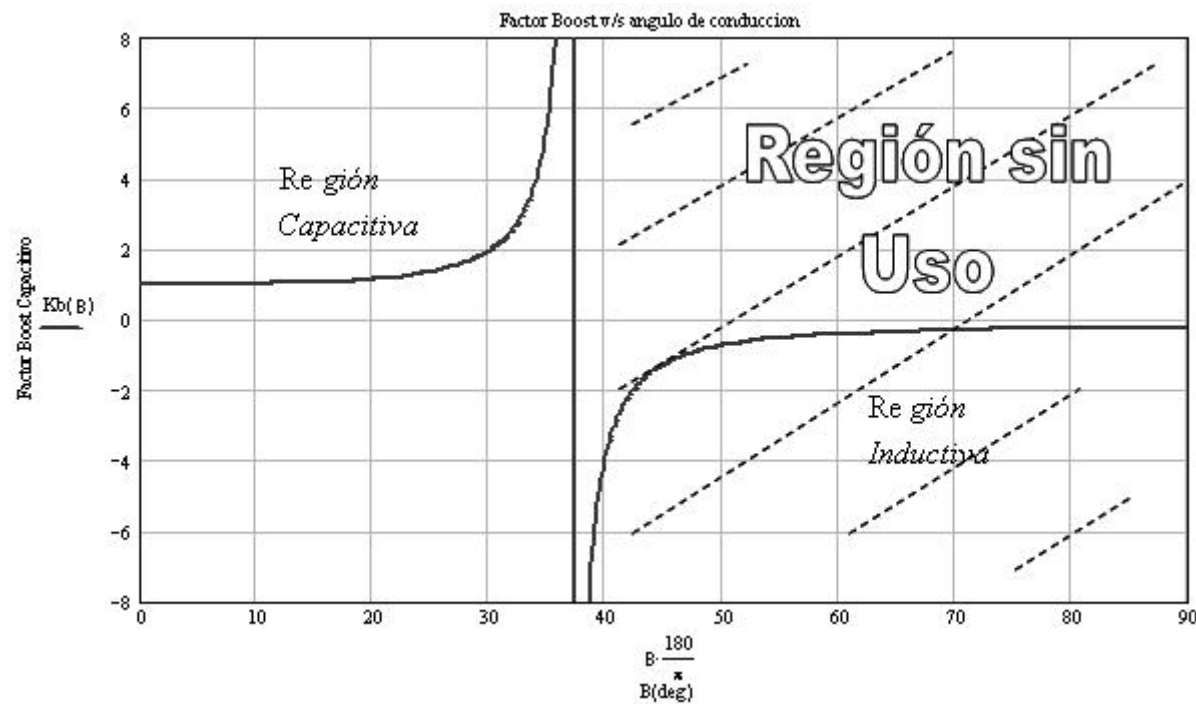


Fig. 3.27a

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

La expresión dada por (3.33) es mostrada nuevamente, para operación capacitiva, por la figura 3.27b para diferentes valores de λ .

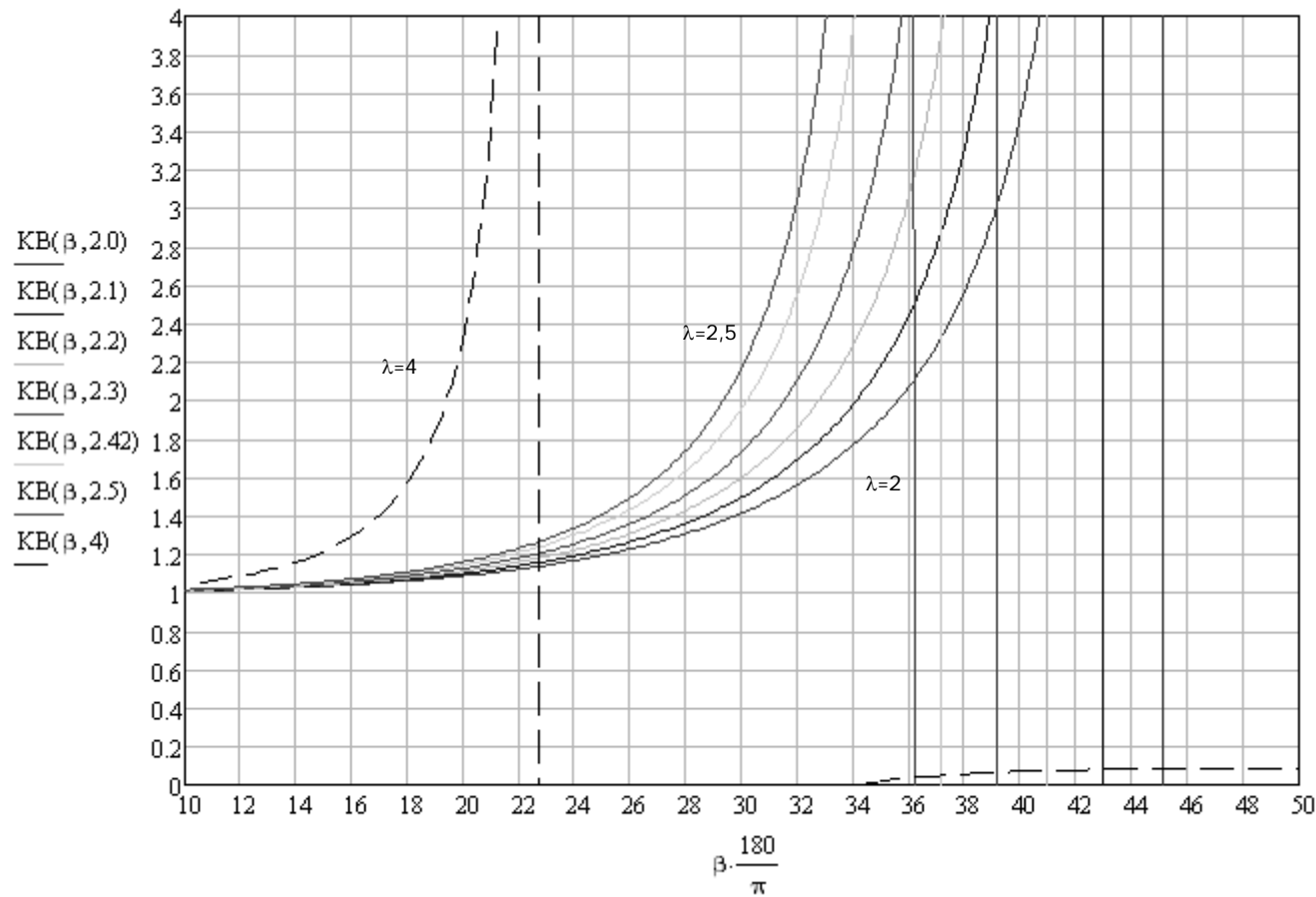


Fig. 3.27b

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Obsérvese que para λ mayores que 4 el comportamiento es muy no lineal, disminuyendo el rango de variación del ángulo β , y con ello el rango de variación de la reactancia equivalente.

Gráficamente, el retardo con el cual son disparados los tiristores es mostrado en la figura 3.28, si bien el ángulo α es referido al cruce por cero del voltaje en el condensador, en la práctica la información de la fase que dará el sincronismo de disparo es obtenido desde la corriente de línea, debido a que la tensión sobre el condensador fijo tiene armónicas.

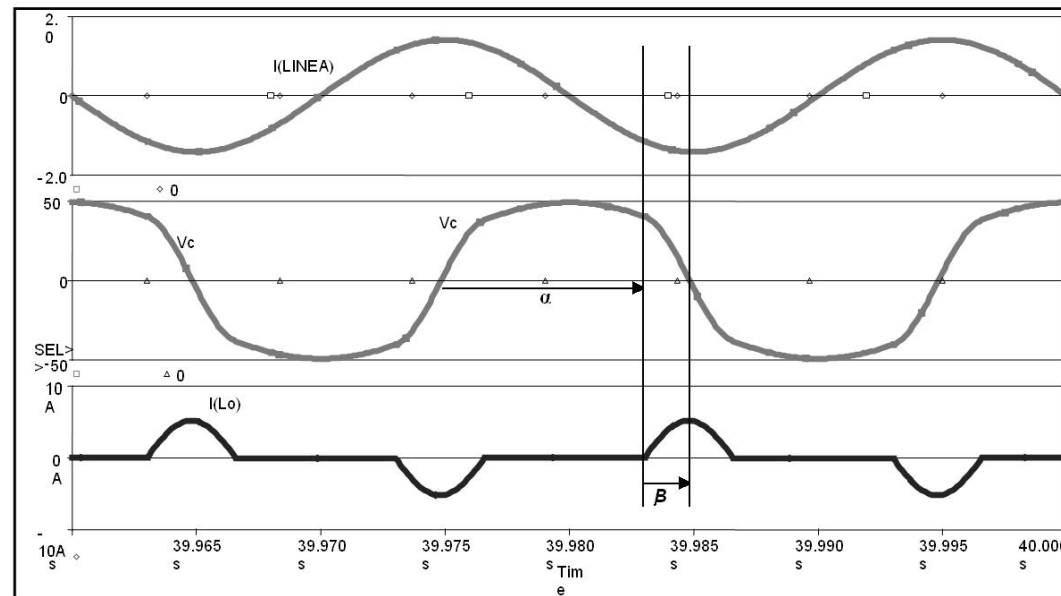


Fig. 3.28

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Las formas de ondas más importantes operando en modo Boost capacitivo con un ángulo de disparo $\alpha=147.78^\circ$ ó $\beta=32.22^\circ$ son mostradas por la figura 3.29. En la figura superior se tiene la tensión en el condensador fijo (V_C). La figura inferior muestra las corrientes por : el TCR (I_{TCR}) y por la línea (I_{LINEA}).

El voltaje en el condensador tiene un valor máximo aproximado de 48.798[V]. De acuerdo al ángulo de disparo de los tiristores, el compensador está actuando con un factor Boost equivalente de 2.6513 veces por tanto, la reactancia equivalente del TCSC, es aproximadamente 39.8[Ω].

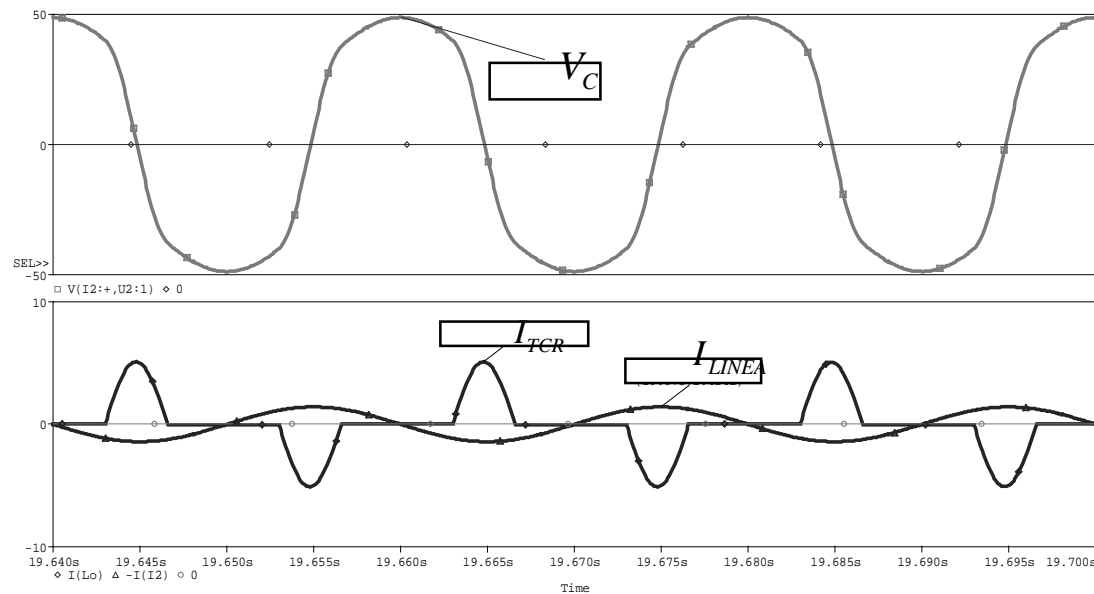


Fig. 3.29

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

c) Operación del TCSC en modo Bloqueo

Cuando los tiristores son disparados sobre 180° y los tiristores se mantienen en estado de no conducción el TCSC está operando en modo de Bloqueo. La corriente de línea circula sólo a través del banco de condensadores. La reactancia equivalente en este modo de operación esta dada por este banco fijo, el diagrama equivalente para este modo de operación es mostrada por la figura 3.30.

El factor Boost para el modo de bloqueo es sencillo de obtener y está dado por la expresión (3.34).

$$K_B = \frac{X_{C_o}}{X_{C_o}} = 1 \quad (3.34)$$

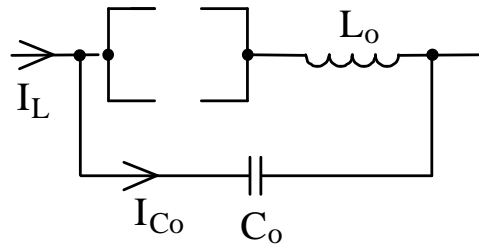


Fig. 3.30

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Como se observa en la figura 3.31, parte inferior, la corriente que circula por la rama del reactor controlado a tiristor es cero, por tanto la corriente de línea circula completamente por la rama donde se encuentra el condensador.

Para el modo de bloqueo la reactancia capacitiva del TCSC es fija y dada por el valor del condensador C_o .

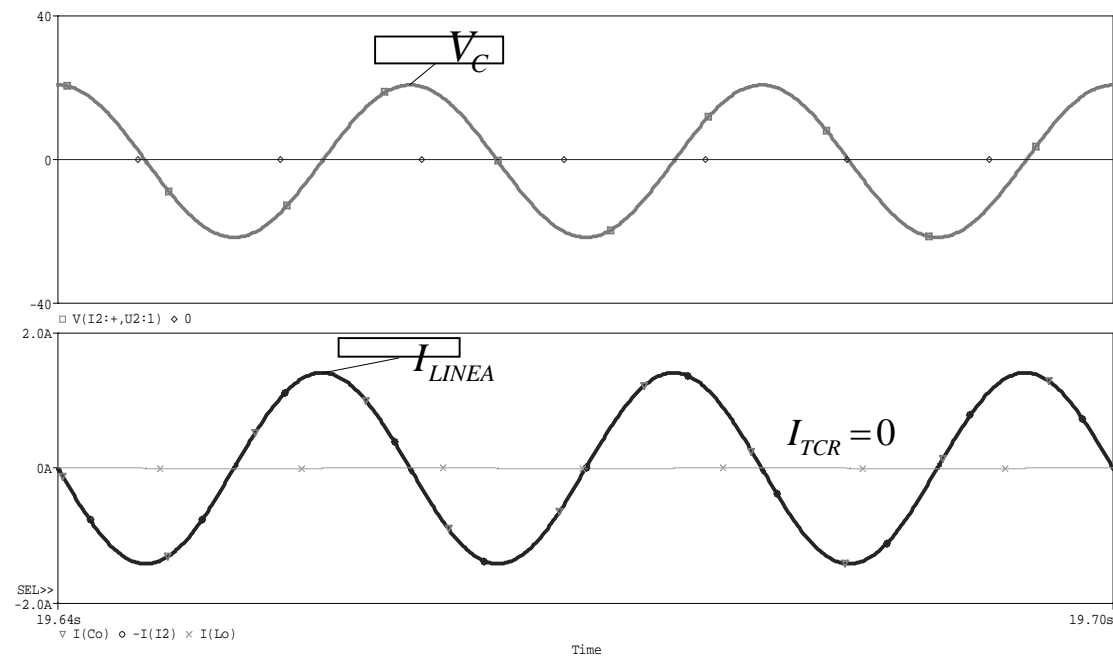


Fig. 3.31

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

3.3.3.- Parámetros del Compensador

a) Obtención de la capacitancia fija 'C_o'

Como el TCSC es el circuito dual del SVC, el calculo de 'C_o' es realizado para mínima demanda del sistema (δ_{min}), es decir, para cuando el sistema está en el limite entre el modo bloqueo y el modo Boost capacitivo. Por tanto la obtención de la capacitancia total necesaria es realizada para mínima compensación serie (k_{smin}) se sabe que:

$$k_{smin} = \frac{X_{Cmin}}{X_L} \quad (3.35)$$

De donde:

$$X_{Cmin} = k_{smin} \cdot X_L \quad (3.36)$$

O,

$$C_o = \frac{I}{\omega \cdot k_{smin} \cdot X_L} \quad (3.37)$$

b) Obtención de la inductancia fija 'L_o'

Para la obtención de 'L_o', se realiza a través de la definición de λ , ya que es un dato de entrada. Se sabe que:

$$\lambda^2 = \frac{X_{Co}}{X_{Lo}} = \frac{I}{\omega^2 \cdot L_o \cdot C_o} \quad (3.38)$$

Como ya fue calculado 'C_o' se obtiene 'L_o':

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

$$L_o = \frac{I}{\lambda^2 \cdot \omega^2 \cdot C_o} \quad (3.39)$$

c.2) Compensación para un punto de operación dado.

Sea k_{sop} el grado de compensación serie nominal para algún punto de operación. Se puede determinar la capacitancia equivalente requerida para la compensación a través de:

$$k_{sop} = \frac{X_{Cop}}{X_L} \quad (3.40)$$

Desde donde se obtiene:

$$X_{Cop} = k_{sop} \cdot X_L \quad (3.41)$$

O,

$$C_{eqop}(\beta) = \frac{I}{\omega \cdot k_{sop} \cdot X_L} \quad (3.42)$$

Para obtener β se realiza:

$$\overline{K}_{Bpu} = \frac{C_o}{C_{eqop}(\beta)} - 1 \quad (3.43)$$

Y sabiendo que:

$$\overline{K}_{Bpu} = \frac{2 \cdot \lambda^2}{\pi \cdot (\lambda^2 - 1)} \cdot \left[\frac{2 \cdot \cos^2(\beta)}{(\lambda^2 - 1)} \cdot (\lambda \cdot \tan(\lambda\beta) - \tan(\beta)) - \beta - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right] \quad (3.44)$$

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Ahora la ecuación (3.44) depende solo de β (λ es dado como parámetro de entrada yendo, en la figura, de 2.0 a 2.3) y $K_{Bpu}(\beta)$ es la capacitancia equivalente del TCSC normalizada. Con lo anterior se puede utilizar esta ecuación para obtener el valor del ángulo de disparo buscado. La Fig. 3.32 muestra la ecuación (3.44) gráficamente.

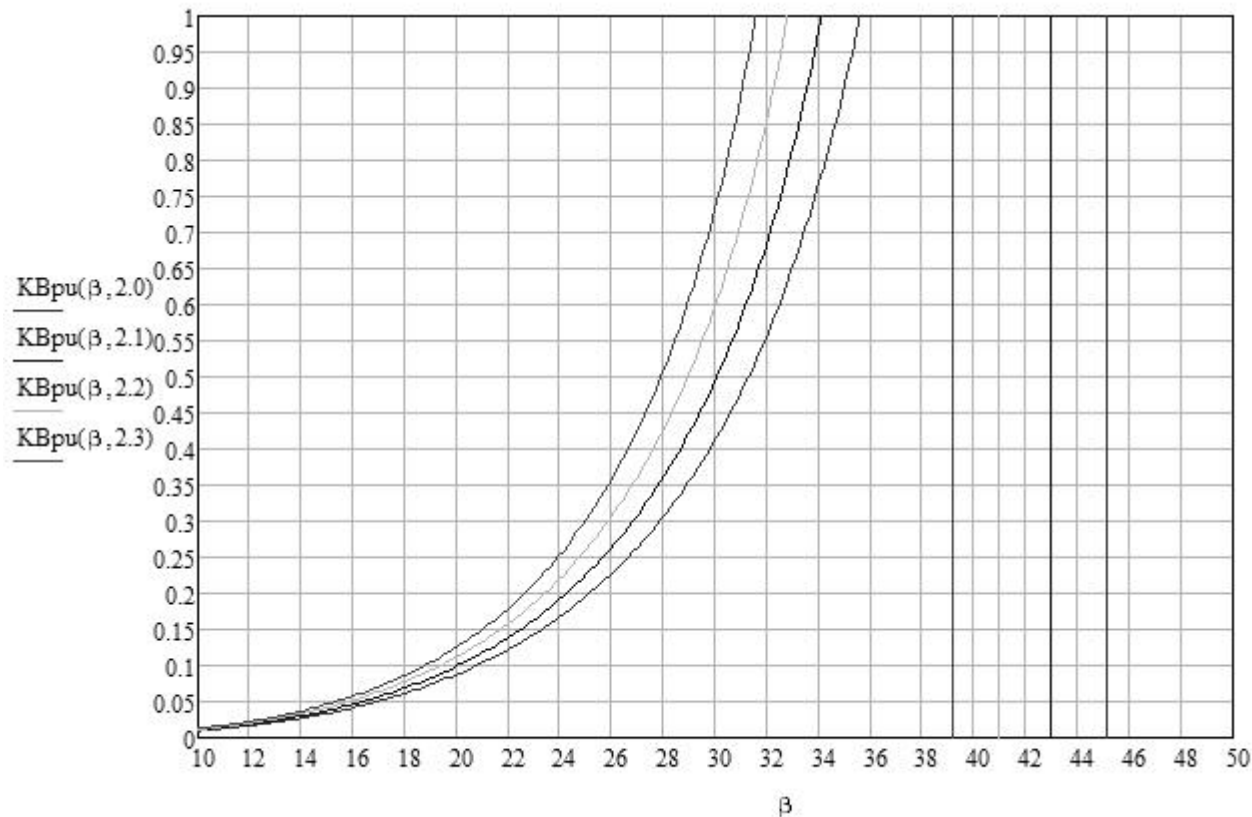


Fig. 3.32

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

3.3.3 – Control de un TCSC

El TCSC puede tener diferentes modos de control, estos pueden ser implementados para modificar el flujo de potencia en régimen permanente o para modificar la reactancia de línea y proveer amortiguamiento a diferentes modos de oscilación del sistema, incrementado así la estabilidad transitoria cuando se presenta alguna perturbación.

3.3.3.1 - Modos de control del TCSC.

El buen desarrollo del TCSC será principalmente debido al control, en estos apuntes se empleara un modo de control bastante utilizado y considerado optimo. Este control es realizado de modo que el lazo empleado sea lo suficiente rápido, y estable, ante perturbaciones transitorias, sean estas de partida así como de operación, y además que mantenga el error en régimen permanente dentro de una tolerancia aceptable. Los modos de control están definidos por las ecuaciones dadas en (3.45), donde la señal de disparo a los tiristores será totalmente dependiente del tipo de control elegido. El modo de control por corriente y por reactancia son normalmente los más usados debido a que la corriente de línea se mantiene en régimen permanente aproximadamente sinusoidal y puede usarse perfectamente como referencia para el ángulo de disparo.

$$\text{Control por factor Boost: } K_{Bref} - K_{Bmed} = 0$$

$$\text{Control de Potencia : } P_{ref} - P_{med} = 0$$

$$\text{Control por corriente: } I_{ref} - I_{med} = 0$$

$$\text{Control por ángulo de transmisión : } \delta_{ref} - \delta_t = 0$$

(3.45)

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Si bien la tensión que cae sobre el TCSC podría usarse como referencia, esto no es hecho debido a que el voltaje sobre el compensador presenta distorsión armónica, lo cual lo hace inestable como un modo de control, sobre todo para cuando hay necesidad de gran compensación. Sin embargo, el controlar directamente la reactancia del compensador minimiza estos problemas y da un método de control casi natural. Por todo esto el modo de control empleado para realizar el análisis es control por el factor Boost o control por reactancia.

3.3.3.2 - Esquema de control del TCSC proyectado.

La figura 3.33 muestra el esquema de control basado en el factor Boost, el cual describe la relación entre la reactancia equivalente dada por el TCR y la reactancia del banco fijo de condensadores, X_c . Los pulsos de disparo de los tiristores son obtenidos de la siguiente manera; la tensión que cae en el TCSC y la corriente que circula a través de él, son ambas sensadas, estas dos señales pasan por un filtro pasa bajos de manera de atenuar las armónicas contenidas en ellas. En régimen permanente la corriente es aproximadamente sinusoidal, no así la tensión la cual tiene distorsión armónica debido al funcionamiento del TCR. Estas señales pasan por un bloque donde se obtiene su valor eficaz, para luego, a continuación, obtener la relación entre voltaje y corriente eficaces con lo que resulta la reactancia fundamental. Luego la reactancia fundamental pasa por un bloque divisor, dividiéndose con la reactancia del banco fijo de condensadores obteniéndose el factor Boost medido, que deberá ser comparado con el factor Boost de referencia que previamente ha sido ajustado respecto al grado de compensación que se desee.

Finalmente el error de estas dos señales pasan por un compensador PI que entregara una señal de control, la cual entra al bloque modulador donde se generaran los pulsos de disparo de los tiristores.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

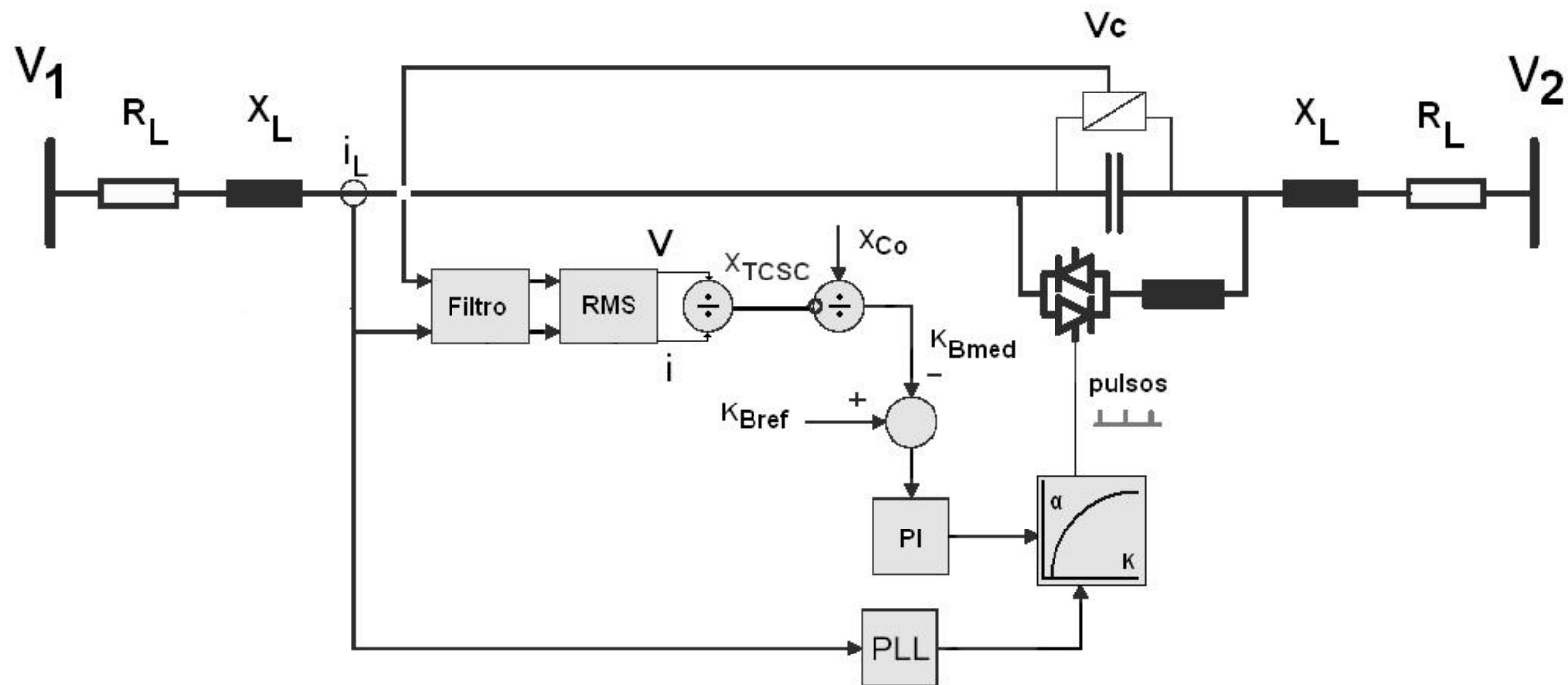


Fig. 3.33

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

3.3.3.3 - Simulaciones en Lazo Cerrado.

Son realizadas diferentes simulaciones para la compensación de una línea corta, el TCSC es insertado en serie con el sistema con tensiones máximas de 12kV, las simulaciones son ejecutadas con el programa Pspice, y el circuito de potencia final de simulación se muestra en la figura 3.34, los parámetros de la línea son descritos a continuación.

$$V_S = 8485 \angle 0^\circ [V] \quad V_R = 8485 \angle -8^\circ [V] \quad R_L = 10 [\Omega] \quad L = 382.669 [mH]$$

Se procederá a compensar un sistema simple de dos máquinas, el cual tendrá un grado mínimo de 12,47% de compensación, es decir $k_{Smin}=0.1247$, y se pide en operación nominal $K_b=2$, dado un $\lambda=2.4203$, realizando los cálculos básicos necesarios para proyectar el compensador, se tiene:

$$X_L = 382.669 [mH] \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 120.22 [\Omega]$$

$$X_{C_o} = 0.1247 \cdot 120.22 = 15 [\Omega]$$

$$C_o = 212.205 [\mu F]$$

$$L_o = 8.1506 [mH]$$

$$X_{L_o} = \frac{15}{2.4203^2} = 2.56 [\Omega]$$

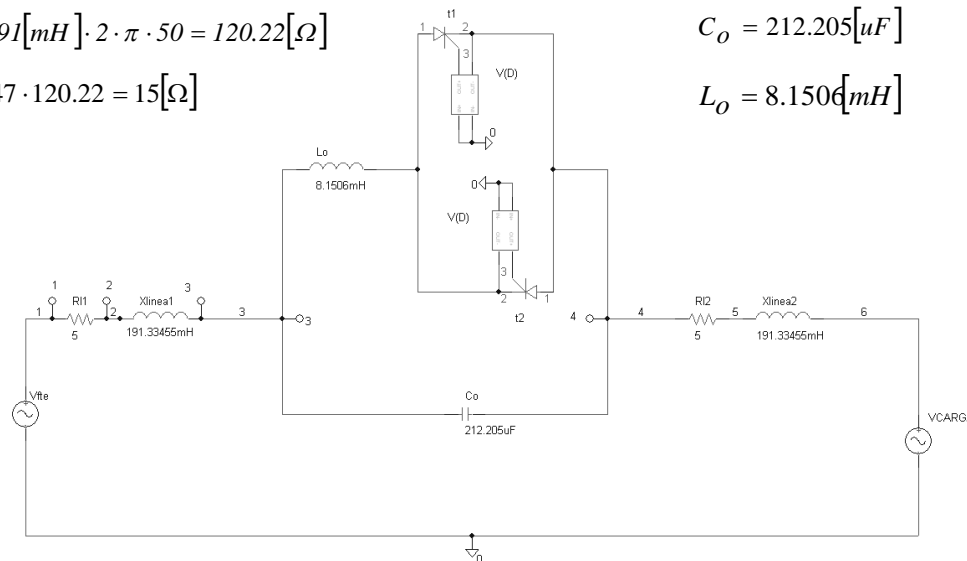


Fig. 3.34

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

(a) Simulación del sistema sin compensación.

De manera de verificar la incidencia del compensador serie aumentando el flujo de potencia a través de la línea de transmisión, se mostraran las formas de onda más importantes del sistema no compensado para contrastarlas con el sistema compensado en lazo cerrado. Mostrándose en la figura superior las tensiones envueltas en el sistema y en la inferior la corriente de línea.

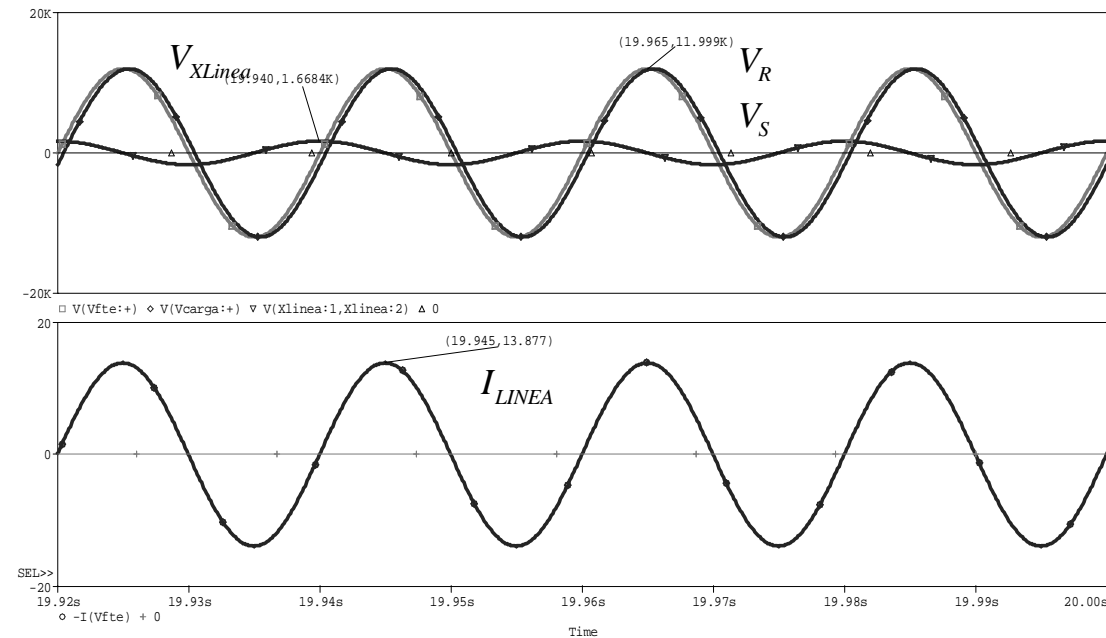


Fig. 3.35

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

(b) Simulación para factor Boost igual a 2

Para este sistema trabajar con un K_b igual a 2 significa tener un factor de compensación serie (k_s) igual a 0,249554. La figura 3.36 muestra las señales de referencia y medida para el factor Boost así como la tensión del condensador desde el transitorio de partida hasta régimen permanente, para este caso el factor de referencia es $K_b=2$, que se cumple según una tensión de control de 5V.

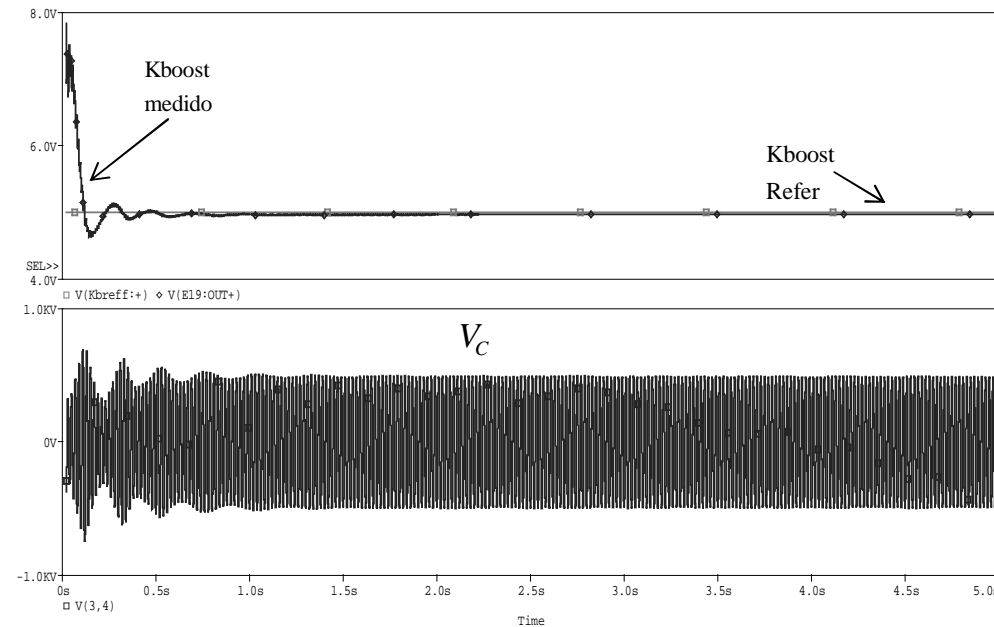


Fig. 3.36

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

La figura 3.37, se muestran en la parte superior un acercamiento al factor Boost medido y al de referencia observándose la existencia de un pequeño error en régimen permanente de 0.44%, la figura inferior muestra la tensión sobre el condensador fijo, que es la misma de toda la rama del TCR.

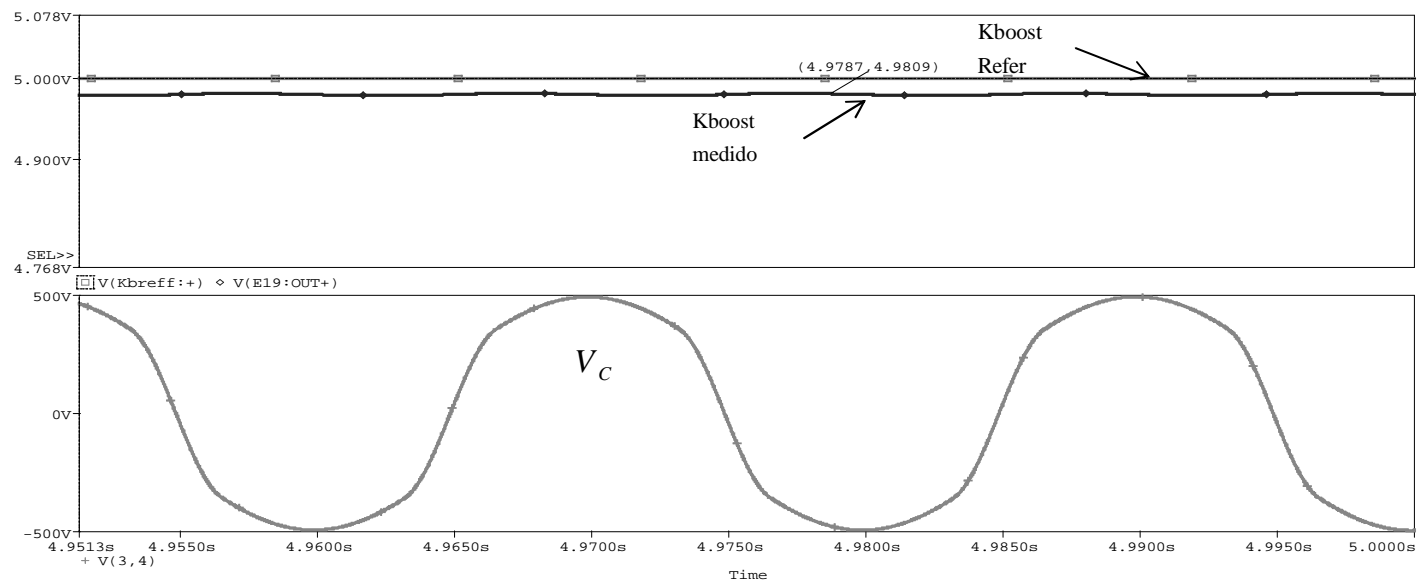


Fig. 3.37

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

La figura 3.38, es un resumen con las formas de onda de más interés en el TCSC en régimen permanente: tensión en el compensador (V_C), la corriente de línea ($I_{\text{Línea}}$) y la corriente que circula a través de la rama del TCR (I_{TCR}).

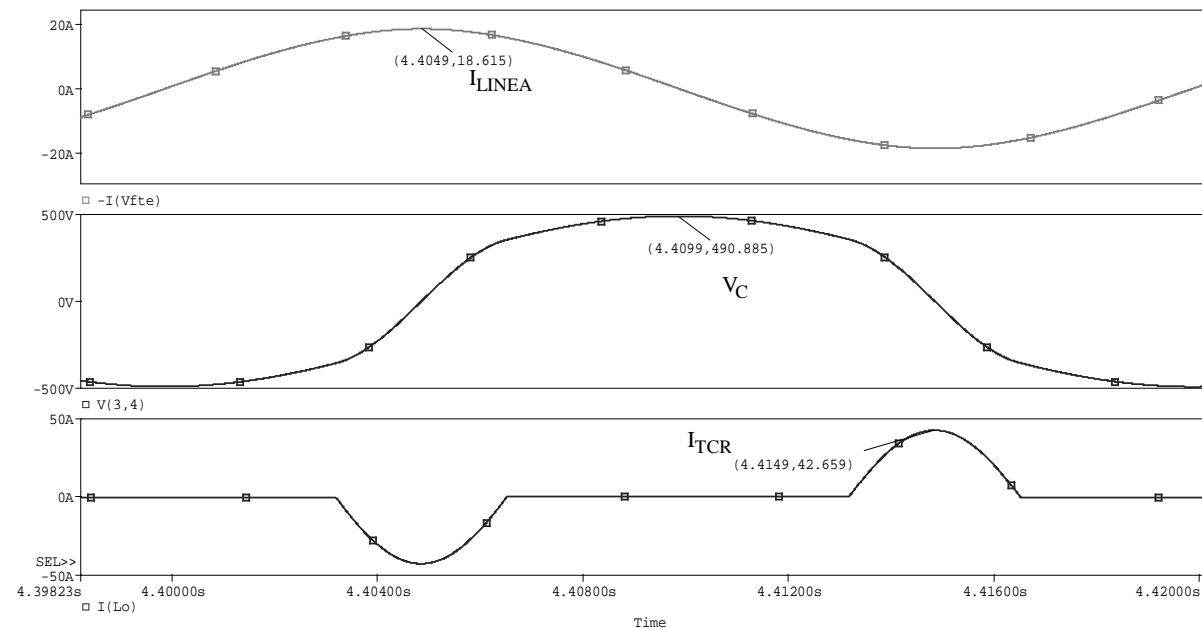


Fig. 3.38

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

La figura 3.39, muestra el espectro en frecuencia de la corriente de línea circulante, hasta este punto sin armónicas. También muestra, la corriente en la rama del TCR que es la fuente de generación de armónicas del compensador serie y la tensión del condensador la cual tiene los mismos armónicos del TCR atenuados. Normalmente el TCSC opera en el modo Boost capacitivo, por lo tanto bajo estas circunstancias sólo el orden de más bajas armónicas son inyectadas en el sistema, tales como la 3^{era} (solo para este caso de diagrama unilineal), 5^{ta} y 7^{ma} armónica, tienen una relevante importancia. [07]

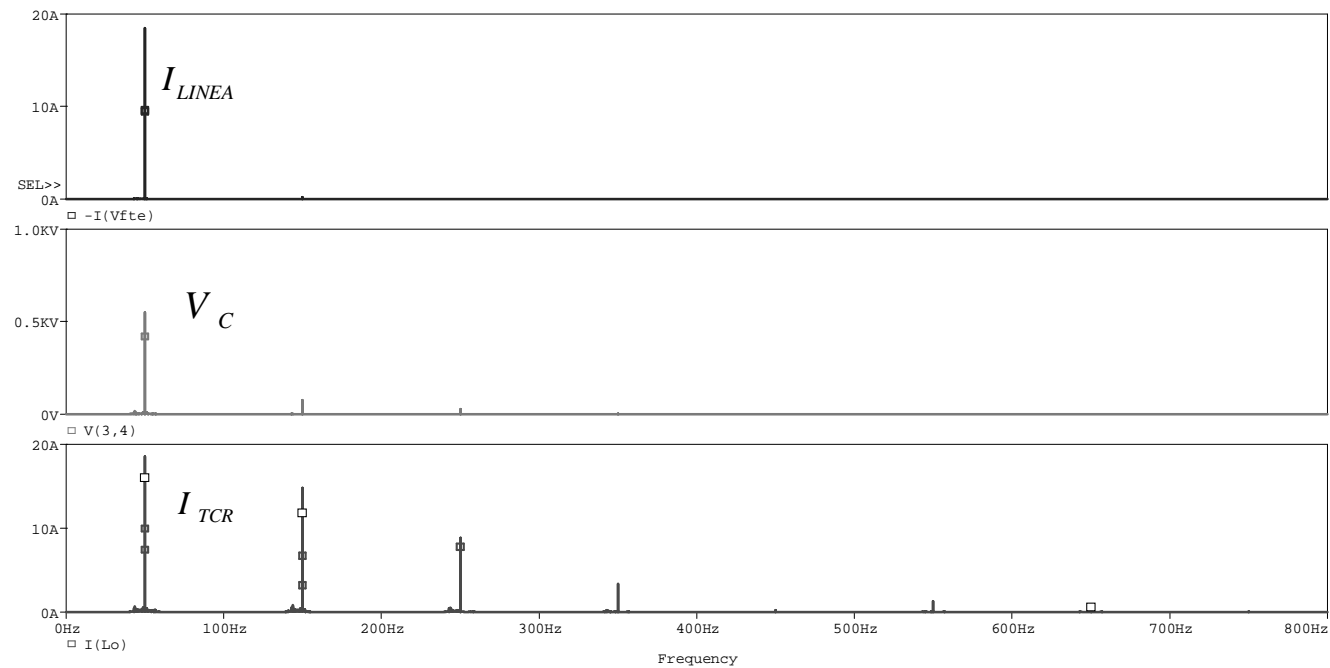


Fig. 3.39

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

El factor Boost establecido como referencia, es en este caso 2 veces la reactancia del banco fijo de condensadores del compensador. Por otro lado, como una forma de comprobar si el TCSC esta realmente en este punto de operación, se puede calcular el ángulo de disparo, β , desde la corriente que circula a través de la rama del TCR, tal como lo muestra la figura 3.40. Y con este ángulo se evalúa la función teórica del factor Boost. Mostrado en la tabla 6.

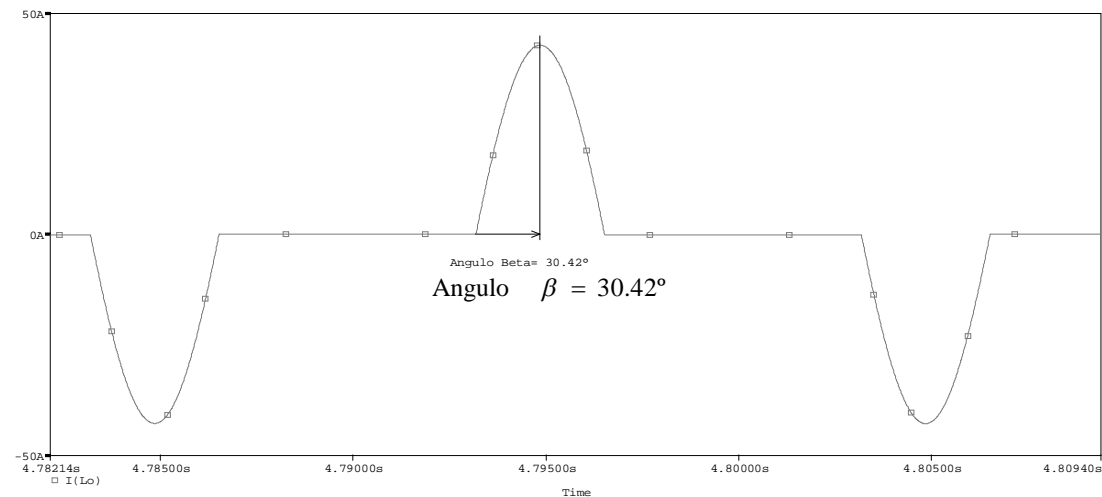


Fig. 3.40

Tabla 6

Angulo Beta	K_{boost} medido	$K_{\text{boost}}(\beta)$ calculado	K_{boost} de referencia
30.42°	1.9912	2.0077	2

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

3.3.4 – Ecuaciones del TCSC en régimen permanente, desde el punto de vista del SEP.

Los modos de bloqueo y bypass son modos de operación límites. Por tanto el único modo de operación válido es el modo Boost capacitivo.

- **Modo Boost capacitivo**

Para este modo de funcionamiento en régimen permanente, la estructura de TCSC es el mismo dado por la red de compensación (Fig. 3.33). Sin embargo, la impedancia (o susceptancia) equivalente del TCSC en la frecuencia de la red (ω) es más apropiadamente representada asumiendo **una corriente total régimen permanente sinusoidal en vez de una tensión sinusoidal**. En este caso la impedancia equivalente es obtenida desde (3.30) y (3.33), y dado por:

$$X_{TCSC}(\beta) = X_{Co} \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \left[\frac{2 \cdot \cos^2(\beta)}{\lambda^2 - 1} \cdot [\lambda \tan(\lambda\beta) - \tan(\beta)] - \beta - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right] \right\} \quad (3.46)$$

Observando la ecuación anterior se puede observar que X_{TCSC} se indefiniría para $\lambda=1$, es decir, cuando se está en la frecuencia de resonancia del inductor y condensador fijos ($\omega = \omega_o$), esto es evitado escogiendo un λ distinto de uno, por dato de proyecto, de modo a prevenir grandes corrientes internas que pueden dañar el controlador, así como evitar una interrupción de línea.

Finalmente, la operación del TCSC en el modo boost inductivo es atípica, ya que esto sería equivalente a reducir la capacidad de transmisión del sistema, produciendo tensiones con alto contenido armónico.

Capítulo 3

Controladores **FACTS**: Basados en Impedancias Variables

3.3 – Condensador Serie Controlado a Tiristor (TCSC)

Entonces los limites en régimen permanente para los ángulos de disparo en este caso pueden ser definidos como $\alpha_o < \alpha < 180$ (ó, $\beta_o < \beta < 0$), donde α_o es el ángulo de disparo en la frecuencia de resonancia entre el inductor equivalente del TCR y el condensador fijo con la red, siendo diferente de aquella que da el λ . Sin embargo un valor de ángulo inicial, α_R tiene que ser determinado de modo que no quede muy cerca de α_o , además debe proveer una partida robusta para un amplio rango de condiciones de carga.

La representación del TCSC en régimen permanente, conectado entre las barras 'k' y 'm' se muestra en la Fig. 3.41. El modelo del controlador FACTS es sin pérdidas, es decir, la potencia activa P en la barra 'k' es la misma que en la barra 'm'.

De esta forma el comportamiento en régimen permanente de este controlador puede ser modelado por las siguientes ecuaciones:

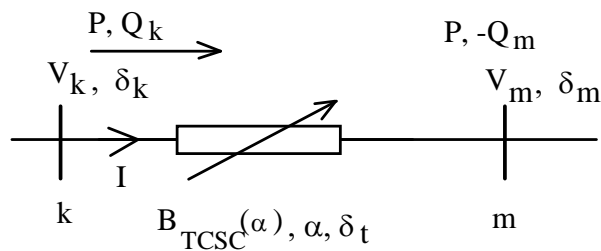


Fig. 3.41

Donde $B_{TCSC} = 1/X_{TCSC}$ dado por (3.33).

$$\left. \begin{aligned} P + V_k \cdot V_m \cdot B_{TCSC} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) &= 0 \\ -V_k^2 \cdot B_{TCSC} + V_k \cdot V_m \cdot B_{TCSC} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) - Q_k &= 0 \\ -V_m^2 \cdot B_{TCSC} + V_k \cdot V_m \cdot B_{TCSC} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) - Q_m &= 0 \\ \sqrt{P^2 + Q_k^2} - I \cdot V_k &= 0 \\ \delta_k - \delta_m - \delta_t &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$