

EL 67J

**FENOMENOS DINAMICOS
EN REDES ELECTRICAS**

**Análisis de la Acción Directa e
Inversa de Transformadores
con Taps**

Prof. Luis Vargas

Agosto 2005

Indice

1.0 Introducción	1
2.0 Modelo de un Transformador sin Taps	2
2.1 Circuito Equivalente Básico en Unidades Físicas	2
2.2 Circuito Equivalente en por Unidad	2
3.0 Modelo de un Transformador con Taps.....	4
3.1 Modelo del Transformador con Taps Referido al Enrollado Primario	4
3.2 Modelo del Transformador con Taps Referido al Enrollado Secundario	5
3.3 Circuito Equivalente π de un Transformador con Taps.....	6
4.0 Aplicación de los Transformadores OLTC en Sistemas de Transmisión.....	9
4.1 Regulación de Voltaje en Sistemas de Distribución	9
4.1.1 Regulación en una subestación	10
4.1.2 Regulación del consumo.....	10
4.1.3 Regulación suplementaria	10
4.2 Tipos de Reguladores de Consumo.....	10
4.2.1 Regulador de voltaje de inducción	10
4.2.2 Regulador de tipo paso (SRV)	11
4.3 Modelamiento y Análisis de un Sistema de Control de un Transformador OLTC	13
4.3.1 Descripción del Sistema	13
4.3.2 Deducción del Modelo del Sistema	14
5.0 Análisis de Acción Directa e Inversa del OLTC	17
5.1 Modelo π Básico de un Sistema Eléctrico	17
5.2 Análisis de Acción Directa	20
5.3 Análisis de Acción Inversa	23
6.0 Comentarios	27
7.0 Bibliografía.....	28

Índice de Figuras

Figura 1: Circuito equivalente básico de un transformador de 2 enrollados	2
Figura 2: Circuito equivalente en por unidad	3
Figura 3: Modelo de un transformador con taps.....	4
Figura 4: Transformador referido al secundario.....	5
Figura 5:.....	6
Figura 6: Esquema de un regulador de inducción	11
Figura 7: Esquema de un regulador de voltaje de paso	11
Figura 8: Mecanismo de control SVR	12
Figura 9: Diagrama de bloques genérico de un sistema de control de un transformador OLTC	14
Figura 10: Modelo del sistema de control del OLTC	15
Figura 11: Modelo básico de un sistema eléctrico.....	17
Figura 12:.....	17
Figura 13:.....	18
Figura 14: Modelo π básico de un sistema eléctrico	19

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Voltaje V_2 v/s Taps	22
Gráfico 2: Voltaje V_2 v/s Tiempo.....	22
Gráfico 3: Potencia Reactiva Q_1 v/s Tiempo	23
Gráfico 4: Taps v/s Tiempo	23
Gráfico 5: Voltaje V_2 v/s Taps	24
Gráfico 6: Voltaje V_2 v/s Tiempo.....	25
Gráfico 7: Potencia Reactiva Q_1 v/s Tiempo.....	25
Gráfico 8: Taps v/s Tiempo	26

1.0 Introducción

Los transformadores permiten la transformación de diferentes niveles de voltaje a través de un sistema. Desde el punto de vista de la eficiencia y de la capacidad en la transferencia de potencia, la transmisión de voltaje debe ser alta, pero por otra parte no es prácticamente factible generar y consumir potencia a esos voltajes. En sistemas eléctricos de potencia modernos, la potencia transmitida pasa por 4 o 5 transformaciones de voltaje entre el generador y el último consumidor. En consecuencia, el total de MVA nominales de todos los transformadores en un sistema de potencia es cerca de 5 veces el total de MVA nominales de todos los generadores.

Sumado a la transformación de voltaje, los transformadores son usados a menudo para el control de voltaje y flujo de potencia reactiva, lo que requiere el cambio en la razón de transformación. Por esto, prácticamente todos los transformadores usados en transmisión y un número considerable de distribución poseen taps en uno o más enrollados para cambiar la razón de vueltas. Los taps normalmente permiten un cambio de variación de transformación de voltaje en el rango de un 10% a un 15% (tanto positivos como negativos).

Se disponen de dos formas de cambio de taps: cambio de taps sin carga y cambio de taps bajo carga (OLTC). Para el cambio de taps sin carga se requiere que el transformador sea desenergizado para cambiar la razón de vueltas. Estos transformadores se utilizan cuando la razón de vueltas a cambiar sólo necesita compensar en forma aproximada pequeñas variaciones de voltaje debido al aumento de la carga, la expansión del sistema, o en general cuando la red no experimenta cambios significativos de tipo estacionario. Los OLTC se usan cuando los cambios en la razón de transformación se necesitan con mayor frecuencia, por ejemplo, frente a variaciones diarias significativas de tensión debido a cambios en las condiciones del sistema.

Aparte de modificar la razón de transformación entre el primario y el secundario, a veces se requiere modificar también la cantidad de potencia que fluye por el transformador. Esto se logra mediante un cambio de fase entre ambos terminales del transformador, y en este caso se denomina comúnmente transformador desfasador. Otra aplicación importante son los autotransformadores, los cuales se construyen a partir de una misma bobina o devanado. En estos dispositivos, además del acoplamiento magnético, existen conexiones metálicas entre circuitos del lado del primario y del secundario. Estos dos tipos de transformador quedan fuera del alcance de este capítulo.

2.0 Modelo de un Transformador sin Taps

2.1 Circuito Equivalente Básico en Unidades Físicas

El circuito de la figura 1, representa el circuito equivalente básico de un transformador de 2 enrollados con todas sus cantidades en unidades físicas.

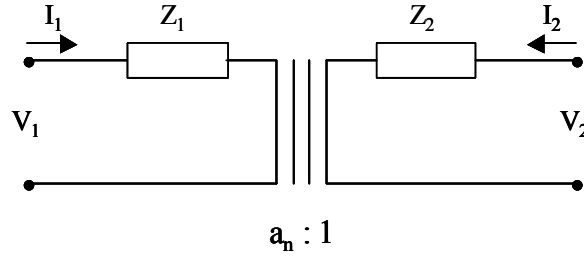


Figura 1: Circuito equivalente básico de un transformador de 2 enrollados

El subíndice 1 y 2 se refieren a las cantidades del primario y secundario, respectivamente. La reactancia de magnetización X_{mp} es muy grande y es usualmente despreciada. Las impedancias Z_1 y Z_2 se representan en $[\Omega]$, y a_n corresponde a la razón de transformación nominal, $\frac{V_{n1}}{V_{n2}}$.

En unidades físicas, despreciando X_{mp} se tiene que:

$$Z_{T1} = Z_1 + a_n^2 Z_2 \quad (1)$$

$$Z_{T2} = Z_2 + \frac{Z_1}{a_n^2} \quad (2)$$

es decir:
$$\frac{(1)}{a_n^2} \Rightarrow \frac{Z_{T1}}{a_n^2} = \frac{Z_1}{a_n^2} + Z_2 = Z_{T2} \Rightarrow Z_{T1} = a_n^2 Z_{T2}$$

, donde Z_{T1} es la impedancia del transformador vista desde el primario, y Z_{T2} es la impedancia del transformador vista desde el secundario.

2.2 Circuito Equivalente en por Unidad

Con cantidades base apropiadas sobre los lados del primario y secundario, el circuito equivalente puede ser simplificado mediante la eliminación del transformador ideal. Expresando Z_{T1} y Z_{T2} en valores en por unidad (utilizando bases nominales), tenemos:

$$Z_{T1}(pu) = \frac{Z_{T1}}{Z_{n1}} = \frac{(Z_1 + a_n^2 Z_2)}{Z_{n1}} \quad (3)$$

$$Z_{T2}(pu) = \frac{Z_{T2}}{Z_{n2}} = \frac{(Z_2 + \frac{Z_1}{a_n^2})}{Z_{n2}} = \frac{(a_n^2 Z_2 + Z_1)}{a_n^2 Z_{n2}} \quad (4)$$

Sabemos que:

$$a_n = \frac{V_{n1}}{V_{n2}}$$

$$Z_{n1} = \frac{V_{n1}^2}{S_n}$$

$$Z_{n2} = \frac{V_{n2}^2}{S_n} \quad , \text{ entonces:}$$

De (3) =>

$$Z_{T1}(pu) = \frac{(Z_1 + a_n^2 Z_2) S_n}{V_{n1}^2}$$

De (4) =>

$$Z_{T2}(pu) = \frac{(a_n^2 Z_2 + Z_1) S_n}{a_n^2 V_{n2}^2} = \frac{(Z_1 + a_n^2 Z_2) S_n}{V_{n1}^2} = Z_{T1}(pu)$$

, luego:

$$Z_{T1}(p.u.) = Z_{T2}(p.u.) = Z_T(p.u.)$$

La figura 2 muestra el circuito equivalente en por unidad, donde la impedancia Z_T (dada en p.u.) es única:

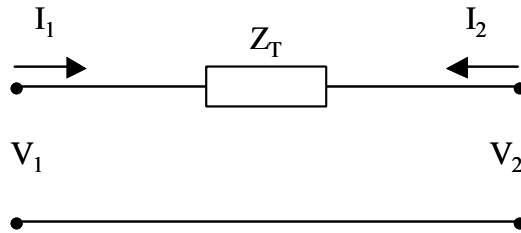


Figura 2: Circuito equivalente en por unidad

3.0 Modelo de un Transformador con Taps

En el modelo de un transformador sin taps, asumimos que ambas reactancias, X_1 y X_2 , y las resistencias de los enrollados del transformador son proporcionales al cuadrado del número de vueltas. Esta suposición es generalmente válida para las reactancias, pero no para las resistencias. Siempre que las resistencias sean mucho menores que las reactancias, y siempre que la variación de la razón de vueltas actual de la razón de vueltas nominal sea grande, el resultado de la aproximación es aceptable. Para transformadores con taps, la razón de transformación a_t es diferente de la razón de transformación nominal a_n .

Definamos $t = \frac{a_t}{a_n} (pu)$ como la razón de transformación en por unidad. Dependiendo de la referencia utilizada, ya sea el modelo referido desde el primario o del secundario del transformador, se pueden analizar dos modelos.

3.1 Modelo del Transformador con Taps Referido al Enrollado Primario

La figura 3 muestra el modelo de un transformador con taps, cuya impedancia Z_T es vista desde los terminales del primario.

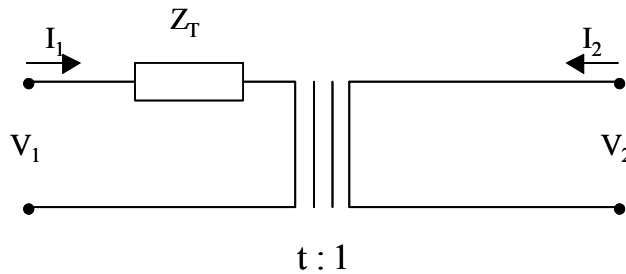


Figura 3: Modelo de un transformador con taps

De la anterior, podemos encontrar las siguientes ecuaciones:

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (5)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (6)$$

, donde las admitancias Y_{ij} corresponden a:

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= \frac{I_1}{V_1} (V_2 = 0) \\
Y_{12} &= \frac{I_1}{V_2} (V_1 = 0) \\
Y_{21} &= \frac{I_2}{V_1} (V_2 = 0) \\
Y_{22} &= \frac{I_2}{V_2} (V_1 = 0)
\end{aligned} \tag{7}$$

, de donde se obtiene de acuerdo a la figura 3, que:

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= \frac{1}{Z_T} \\
Y_{12} &= Y_{21} = \frac{-t}{Z_T} \\
Y_{22} &= \frac{t^2}{Z_T}
\end{aligned} \tag{8}$$

3.2 Modelo del Transformador con Taps Referido al Enrollado Secundario

La figura n°4 muestra el modelo de un transformador con taps, cuya impedancia Z_T es vista desde los terminales del secundario.

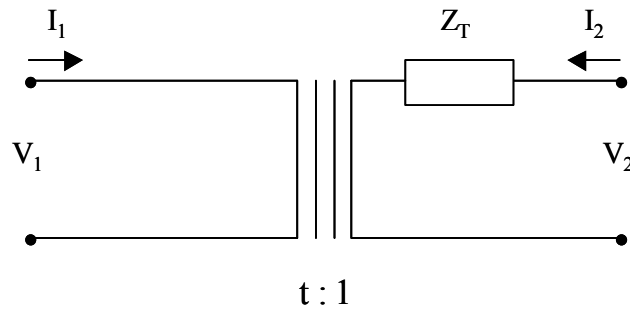


Figura 4: Transformador referido al secundario

Al igual que en el caso 3.1, con Z_T vista desde los enrollados del primario, las expresiones (5), (6) y (7) son válidas para este caso. Ahora, de acuerdo a la figura 4, se obtienen:

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= \frac{1}{t^2 Z_T} \\
Y_{12} = Y_{21} &= \frac{-1}{t Z_T} \\
Y_{22} &= \frac{1}{Z_T}
\end{aligned} \tag{9}$$

3.3 Circuito Equivalente π de un Transformador con Taps

Para análisis computacionales de flujos de potencia, los circuitos de las figuras 3 y 4 se representan en un modelo π , como se observa en la figura n°5:

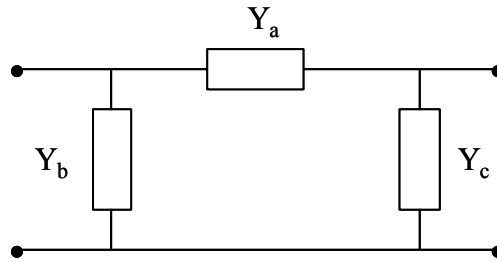


Figura 5:

Según encontramos en la ecuación 7, estas expresiones asociadas al modelo π se muestran de acuerdo a:

$$\begin{aligned}
Y_{11} &= Y_a + Y_b \\
Y_{12} &= -Y_a \\
Y_{21} &= -Y_a \\
Y_{22} &= Y_a + Y_c
\end{aligned} \tag{10}$$

Si despejamos los valores de Y_{11}, Y_{12}, Y_{21} e Y_{22} en términos de Y_a, Y_b e Y_c :

$$\begin{aligned}
Y_a &= -Y_{12} \\
Y_b &= Y_{11} + Y_{12} \\
Y_c &= Y_{22} + Y_{21}
\end{aligned} \tag{11}$$

Luego, para los casos 3.1 y 3.2, el circuito equivalente π para cada caso dependerá de la configuración de la figura 5 y de los valores de Y_a, Y_b e Y_c , según:

Modelo de un transformador con taps referido al enrollado primario:

$$\begin{aligned} Y_a &= \frac{t}{Z_T} \\ Y_b &= \frac{(1-t)}{Z_T} \\ Y_c &= \frac{t(t-1)}{Z_T} \end{aligned} \quad (12)$$

Modelo de un transformador con taps referido al enrollado secundario:

$$\begin{aligned} Y_a &= \frac{1}{tZ_T} \\ Y_b &= \frac{(1-t)}{t^2Z_T} \\ Y_c &= \frac{(t-1)}{tZ_T} \end{aligned} \quad (13)$$

De acuerdo a ambos análisis anteriores, dependiendo de la referencia de los enrollados primario y secundario, los valores de Y_a, Y_b , e Y_c dados por las ecuaciones 12 y 13 no son equivalentes.

Ahora, el valor de $Z_T = R_T + jX_T$, donde supusimos que $X_T \gg R_T$, es decir: $Z_T = jX_T$.

Con esto, podemos ver que Z_T puede corresponder, ya sea a un elemento inductivo o capacitivo. ¿Dé qué dependerá que sea una u otra cosa?. La respuesta es el valor que alcance el taps en cierto caso, independiente si el modelo del transformador lo estamos considerando desde el primario o desde el secundario. Si recordamos las ecuaciones encontradas en 12 y 13, tenemos lo siguiente:

Caso a:

$$\text{Si } t = 1 \Rightarrow Y_a = \frac{1}{Z_T} (\text{inductancia})$$

$$Y_b = Y_c = 0 \quad \text{y como } t = \frac{V_1}{V_2} = 1, \text{ significa que } V_1 = V_2$$

Luego, el OLTC no aportará reactivos al sistema.

Caso b:

Si $t > 1 \Rightarrow Y_a$ y Y_c representan una inductancia, y Y_b representa un condensador.

Además $V_2 < V_1 (t > 1)$, lo cual se justifica pues Y_b es un elemento capacitivo el cual inyecta reactivos en la barra 1 (lado del primario).

Caso c:

Si $t < 1 \Rightarrow Y_a$ y Y_b representan una inductancia, y Y_c representa un condensador.

Además $t < 1 \Rightarrow V_2 > V_1$, lo cual se justifica pues en la barra 2 (lado del secundario), Y_c representa un condensador el cual inyecta reactivos a esta barra.

4.0 Aplicación de los Transformadores OLTC en Sistemas de Transmisión

Los transformadores con cambio de taps tienen una enorme importancia en el control de voltaje en los sistemas de potencia, para controlar distintos tipos de niveles. Veamos como los transformadores se utilizan para el control de voltaje y de potencia reactiva, en ciertos niveles para un sistema de potencia.

Los autotransformadores utilizados para cambiar niveles de voltaje de un subsistema a otro (por ejemplo, 500KV a 230 KV) están equipados incluso para variaciones de taps bajo carga (OLTC). Estos pueden ser controlados ya sea mecánica o manualmente. Normalmente, hay algunos transformadores cuyos taps están dispuestos de tal manera de tener un adecuado sistema de control. Esta variación de taps puede utilizarse para controlar desde límites de voltaje hasta la minimización de pérdidas de potencia activa y reactiva.

El control de un transformador causará cambios en los voltajes de sus terminales. Además, influye sobre el flujo de potencia reactiva a través de él. El efecto resultante sobre los voltajes y los demás terminales dependerá de la configuración de la red de generación y distribución de carga.

El control coordinado de los cambiadores de taps de todos los transformadores interconectados a los subsistemas, requiere de un cambio de nivel genérico de voltaje. Durante condiciones de carga elevadas, los voltajes minimizan los requerimientos de potencia reactiva y aumenta la efectividad de las pérdidas en las capacitancias shunt.

Los transformadores con cambio de taps bajo carga ayudan también a mantener ciertos rangos de voltajes. Mientras que los OLTC son utilizados para bruscas variaciones que ocurren en los sistemas, los transformadores con taps fijo deben escogerse cuidadosamente dependiendo a grandes rasgos de variaciones debidas a expansiones del sistema, aumento de la carga, o cambios estacionarios. Para análisis de flujos de potencia óptimo, se disponen de métodos convenientes para determinar cambios de taps apropiados.

4.1 Regulación de Voltaje en Sistemas de Distribución

La regulación de voltaje automática de sistemas de distribución se disponen mediante uno o más de los siguientes métodos:

- Regulación en una subestación
- Regulación de consumo individual en una subestación
- Regulación suplementaria a través de consumos

4.1.1 Regulación en una subestación

Los transformadores de distribución en una subestación normalmente presentan cambiadores de taps, y están equipados de manera de cambiar el voltaje en el secundario de modo automático. Como alternativa, la subestación puede tener un regulador de voltaje separado del trafo que regule el voltaje en los terminales del secundario. Esta regulación generalmente emplea unidades trifásicas, por lo tanto reguladores trifásicos se podrían utilizar en aplicaciones donde la fase de los voltajes presentan un desbalance significativo.

4.1.2 Regulación del consumo

Los reguladores de voltaje del consumo controlan el voltaje de cada consumo. Pueden ser utilizados para unidades trifásicas o monofásicas, siendo las primeras la más comunes. Los reguladores de voltaje monofásicos son necesarios cuando las fases individuales satisfacen diversas formas de carga. Los reguladores trifásicos pueden disponer de la misma cantidad de controles que los monofásicos, cuando las fases están similarmente cargadas y cuando el voltaje suministrado es balanceado. Si hay distintos consumos abastecidos por una subestación, los consumos de características similares se pueden agrupar, y un regulador en común se puede utilizar para controlar los voltajes de cada grupo de consumidores.

4.1.3 Regulación suplementaria

En aplicaciones donde los consumos son muy extensos, los reguladores adicionales y las capacitancias shunt localizadas en ciertos puntos sobre los consumos, disponen de regulación suplementaria. Un transformador convencional con cambiadores de taps realiza dos funciones: transformación de voltaje y control de voltaje. Los reguladores de voltaje de consumos sólo desarrollan la última función, o sea, ellos varían el voltaje sin cambiar la razón de vueltas básicas.

4.2 Tipos de Reguladores de Consumo

Existen dos tipos básicos de reguladores de voltaje en consumos: de tipo inducción y de tipo paso (SVR). Lo siguiente es una breve descripción de sus principios de operación.

4.2.1 Regulador de voltaje de inducción

La figura 6 muestra un esquema de un regulador de voltaje de inducción.

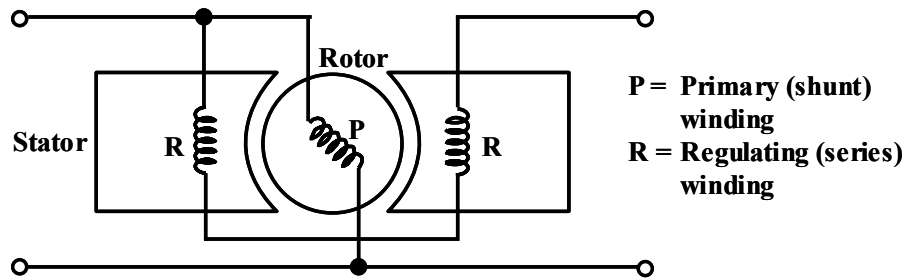


Figura 6: Esquema de un regulador de inducción

Este consiste de dos grupos de enrollados: (a) el enrollado del primario apoyado sobre el rotor y conectado a través de la línea, y (b) el enrollado del regulador apoyado sobre el estator y conectado en serie con la línea.

El voltaje inducido en el enrollado serie regulado está agregado al enrollado del primario entregando el voltaje de salida. La magnitud y la polaridad del voltaje inducido dependen de la orientación relativa de los enrollados regulados con respecto a los enrollados del primario. Mediante cambios en la posición del rotor, el voltaje de salida puede ser variado entre límites mínimos y máximos. La posición del rotor es controlada mediante un motor eléctrico el cual responde a una señal de control.

El regulador de tensión dispone de un control exacto y continuo, y de ejecución confiable. Varios reguladores antiguos de servicio son de este tipo. Estos, sin embargo, debido a su alto costo han sido reemplazados por reguladores de tipo paso.

4.2.2 Regulador de tipo paso (SRV)

El regulador de voltaje de tipo paso es básicamente un autotransformador con taps o pasos en los enrollados serie, como lo muestra la figura 7.

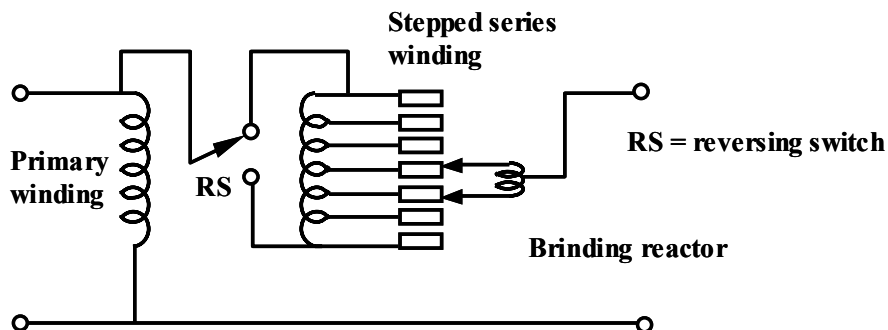


Figura 7: Esquema de un regulador de voltaje de paso

Sin embargo, es puramente un dispositivo de control de voltaje; esto es, este no es usado para transmisión de voltaje.

El voltaje inducido en los enrollados serie están, ya sea, adicionados o restados de forma que el voltaje del primario depende de la polaridad de los enrollados serie. Un reversing switch (RS) se dispone para cambiar esta polaridad. Las magnitudes de los voltajes de salida en los enrollados serie son variadas mediante el cambio de posición de tap, los cuales pueden actuar bajo carga.

Típicamente, los SVR son requeridos para corrección de voltajes mediante más o menos 10% en unos 32 pasos, cada paso representando un $5/8\%$ del cambio en el voltaje. Esto se alcanza mediante taps en los enrollados serie en ocho partes iguales, con cada parte dispuesta 1 a 8 de 10% en el cambio de voltaje. El terminal de salida es conectado para que el tap del centro del puente reactor esté asociado con el mecanismo del cambio de taps. Esto, en efecto, permite que se divida cada paso en dos partes iguales, dando un total de 16 pasos de $5/8\%$ cada uno. El reversing switch (RS) permite al regulador aumentar como también disminuir la salida de voltaje, cubriendo un rango de más o menos un 10% de regulación de voltaje en un total de 32 pasos.

La figura 8 muestra la mayoría de los elementos de un mecanismo de control SVR.

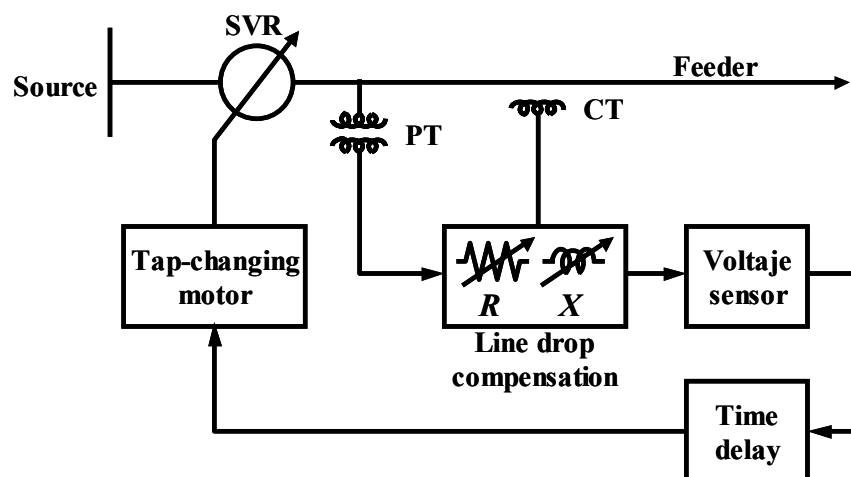


Figura 8: Mecanismo de control SVR

El SVR es un dispositivo que ocupa un voltaje constante (dentro de un rango estrecho) en sus terminales del secundario, o en los mismos puntos seleccionados sobre el consumo que se determinó mediante las variaciones de R y X (ver figura) de un compensador de pérdida en la línea. El sensor de voltaje compara el voltaje de entrada con un voltaje de referencia. Si el voltaje de entrada varía de un punto más allá de una tolerancia o amplitud para un cierto tiempo, el motor cambiador de taps opera el mecanismo cambiador de taps en una dirección como para llevar el voltaje a un rango no muy estrecho. Este rango se llama "ancho de banda", y es típicamente un 2% de variación sobre la referencia. El tiempo de retardo, el cual es ajustable, impide que el regulador entregue una respuesta temporal o corrija a sí mismo variaciones de voltaje. El tiempo que ocupa el movimiento del primer tap puede estar en un rango de 30 a 60 segundos; típicamente el cambio es de 30 segundos.

El tiempo tomado por el mecanismo cambiador de taps, por cada movimiento de tap adicional está en un rango de 2 a 8 segundos, llegando a ser 6 segundos un rango típico. De este modo, el cambio por la posición de taps, en promedio dura cerca de 2 minutos.

4.3 Modelamiento y Análisis de un Sistema de Control de un Transformador OLTC

Consideraremos ahora el problema de modelación y análisis de un sistema de control de un transformador con taps bajo carga. Nos referiremos a un sistema de control no lineal, de acuerdo al control de voltaje y de flujo de potencia reactiva, aplicaciones de los OLTC para consideraciones dinámicas y el comportamiento de un sistema de potencia en estado estable.

El modelo se verifica con un ejemplo de un transformador OLTC de distribución, usado para el control de voltaje.

Los sistemas de potencia modernos presentan distintas plantas generadoras y un número extremadamente alto de consumidores, que utilizan una variedad de voltajes en transmisión y distribución. Actualmente, ellos cubren un territorio geográfico extenso y tienen un número de puntos de interconexión y distribución a través de los cuales la energía eléctrica es transmitida o distribuida. En algunos puntos, donde se requiere un cambio en el nivel de voltaje, los transformadores deben actuar. Tales transformadores normalmente son construidos con una razón de vueltas fija, o algunos de ellos son equipados con taps para controlar la razón de vueltas. Los cambiadores de taps necesitan de tales controles, mediante los cuales resulta un cambio de voltaje y un cambio en el flujo de potencia reactiva a través del transformador. La operación de los cambiadores de taps puede ser de dos formas: en estado desenergizado, o bajo carga. La segunda opción requiere que el cambiador de taps se manipule de tal manera que no exista interrupción de servicio. Aquellas manipulaciones requieren de algunos dispositivos adicionales que van unidos a los cambiadores de taps del transformador.

En los sistemas donde se utilizan transformadores con cambio de taps bajo carga, junto a todos los dispositivos de control, el cerebro de este sistema corresponde al regulador de voltaje automático. Su rol es el de detectar variaciones de voltaje comparados con un valor de voltaje de referencia (o variaciones en el flujo de potencia reactiva a través del transformador), iniciando la operación gracias al manejo de un motor que va asociado al cambiador de taps, mediante un relé.

Además del regulador de voltaje y del motor del sistema de control, existen equipamientos auxiliares (relés, switches, transformadores de medida de potencial y de corriente, compensadores, etc.), que rodean al transformador OLTC.

4.3.1 Descripción del Sistema

El control automático de un transformador OLTC se muestra en un diagrama de bloques general, de la figura 9:

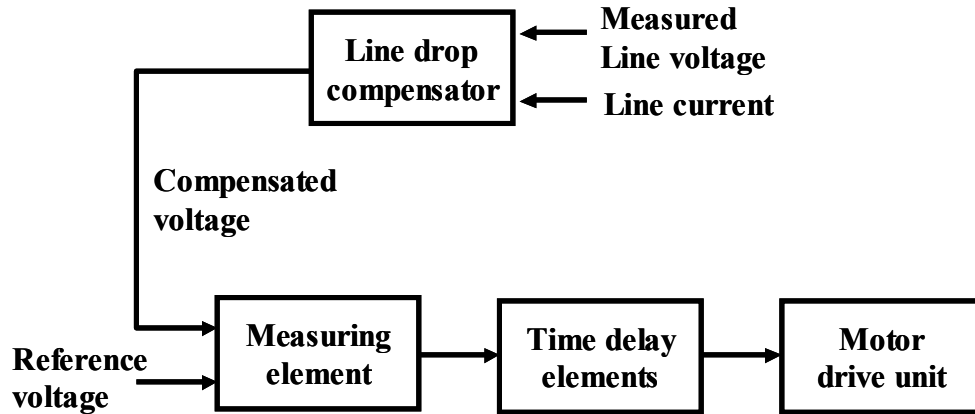


Figura 9: Diagrama de bloques genérico de un sistema de control de un transformador OLTC

Este consiste de distintos componentes que se describen a continuación:

Mecanismo cambiador de taps manejado por medio de un motor,
 Regulador de voltaje que consiste de elementos de medida en tiempo discreto,
 Compensador de pérdidas en líneas

4.3.2 Deducción del Modelo del Sistema

Una visión general del diagrama de bloques del sistema que se observa en la figura 9, muestra los roles que ejercen cada uno de sus componentes. El modelamiento del sistema de control para un transformador OLTC se puede realizar mediante el desarrollo de modelos matemáticos de los distintos elementos que forman el sistema, de acuerdo a la conexión que presentan cada uno de ellos.

La función que realiza el compensador de pérdidas de línea es el de regular el voltaje en zonas remotas a través de la línea o consumidores. El voltaje en puntos remotos es simulado por un computador a través de la impedancia ($R_c + jX_c$). La magnitud del voltaje compensado viene dado por:

$$V_c = |V_t^- + (R_c + jX_c)I_t^-|$$

, donde V_t^- y I_t^- son las medidas de los fasores de voltaje y corriente del transformador en el lado del secundario, respectivamente.

Los elementos de medida del regulador de voltaje consisten de ancho de banda de un relé con histéresis. La entrada al regulador es el error de voltaje. La figura 10 muestra el diagrama de bloques del sistema de control del OLTC de acuerdo a los estudios del sistema.

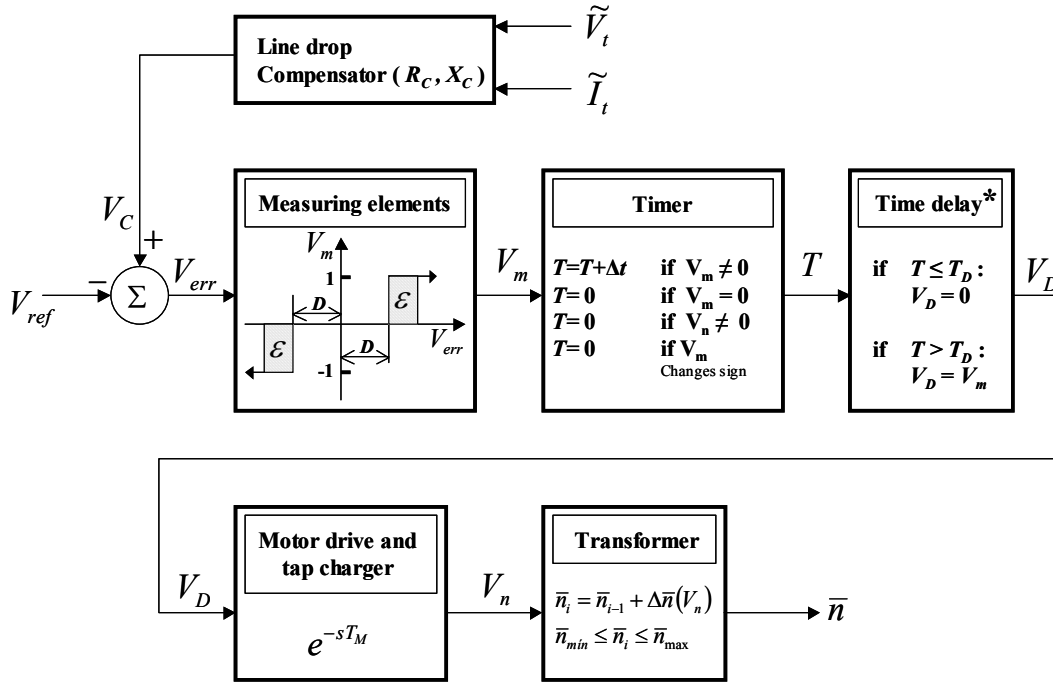


Figura 10: Modelo del sistema de control del OLTC

La salida de los elementos de medida es V_m , el cual toma valores de 0, 1, o -1, dependiendo de la entrada V_{err} . Con un regulador de ancho de banda D y una banda de histéresis ϵ , la salida es:

$$V_m = \begin{cases} 0 & \text{for } -D \leq V_{err} \leq +D \\ 0 & \text{for } D < V_{err} \leq D + \epsilon \quad ; \quad V_{err} \text{ increasing} \\ 0 & \text{for } -D - \epsilon \leq V_{err} < -D \quad ; \quad V_{err} \text{ decreasing} \\ +1 & \text{for } V_{err} > D + \epsilon \\ +1 & \text{for } D < V_{err} \leq D + \epsilon \quad ; \quad V_{err} \text{ decreasing} \\ -1 & \text{for } V_{err} \leq -D - \epsilon \\ -1 & \text{for } -D - \epsilon \leq V_{err} < -D \quad ; \quad V_{err} \text{ increasing} \end{cases}$$

El elemento de tiempo discreto es usado para cambios de taps innecesarios de variaciones de voltaje de una respuesta transiente, e introduce el tiempo deseado antes que ocurra el movimiento de taps. El tiempo determina la duración del voltaje error (V_{err}) excedido del ancho de banda. El tiempo es adelantado si V_{err} se encuentra fuera del ancho de banda. Este funciona de nuevo si V_{err} está dentro del ancho de banda, si hay un movimiento de tap (V_n distinto de 0), o si V_{err} oscila hacia arriba y abajo del ancho del banda. La salida V_D del tiempo discreto unitario es normalmente cero. Si el tiempo excede a T_D , entonces V_D toma el valor de V_m (i.e., 1 o -1), de donde se envía una señal al motor cambiador de taps para que se mueva ya sea hacia arriba o hacia abajo.

El tiempo T_D es igual a T_{D0} para el primer movimiento de tap. Algunos reguladores tienen un tiempo característico inverso, en cuyos casos el tiempo característico es inversamente proporcional al error del voltaje:

$$T_D = \frac{T_{D0}}{V_{err} / D}$$

Para los siguientes movimientos de taps el tiempo T_D es igual a T_{D1} . Este permite introducir un tiempo intencional entre movimientos de taps consecutivos, si así se desea.

El manejo del motor y del mecanismo de cambio de taps, mediante un simple tiempo T_M , es independiente del equipamiento. La señal de salida V_n representa un incremento en el cambio en por unidad de la razón de vueltas. La razón de vueltas en por unidad después de la i -ésima operación es:

$$n_i^- = n_{i-1}^- + \Delta n^-(V_n)$$

, donde Δn^- representa los cambios en la razón de vueltas en por unidad correspondiente al cambio en la posición del tap mediante un paso.

Lo anterior asume que el terminal controlado está sobre el lado del secundario. Si el terminal controlado está sobre el lado del primario, tendremos:

$$n_i^- = n_{i-1}^- - \Delta n^-(V_n)$$

5.0 Análisis de Acción Directa e Inversa del OLTC

En este capítulo veremos las acciones directa e inversa del OLTC. Para ello veremos cómo se relaciona el voltaje en el lado del secundario en función del tap t , al variar el voltaje V_1 y, además veremos la relación que liga la potencia reactiva demandada en la barra 1 y el valor del tap, en un sistema eléctrico básico.

5.1 Modelo π Básico de un Sistema Eléctrico

La figura 11 corresponde a un modelo π básico de un sistema eléctrico, donde al OLTC se le asocia un consumo de potencia $S_2 = P_2 + jQ_2$ y una barra de voltaje V_1 la cual la une una línea de transmisión al lado primario del transformador, cuya impedancia está dada por Z_1 .

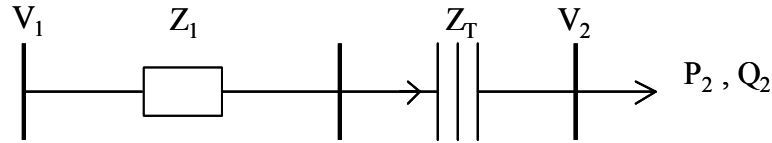


Figura 11: Modelo básico de un sistema eléctrico

De acuerdo al modelo del transformador con taps referido a los enrollados del primario, el circuito de la figura 11 se convierte en el siguiente:

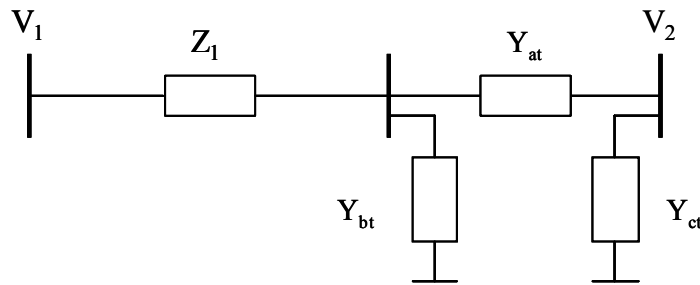


Figura 12:

Recordemos que las admitancias del OLTC mostradas en la figura 12, vienen dadas por la ecuación 12 anterior, con $Y_{at} = Y_a, Y_{bt} = Y_b$ e $Y_{ct} = Y_c$.

Como queremos llegar a un modelo π básico, realicemos una transformación delta a estrella entre las barras 1 y 2 (sin modificar Y_{ct}), como se muestra en la figura nº13:

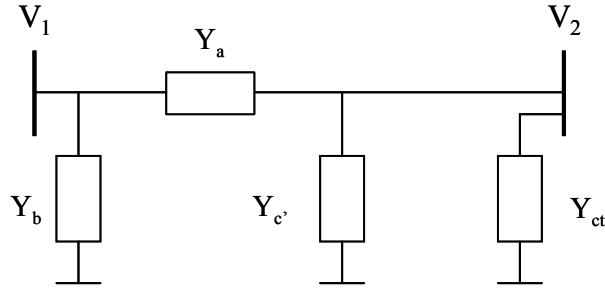


Figura 13:

De acuerdo a la transformación realizada, los valores de Y_a, Y_b e $Y_{c'}$ corresponden a los siguientes:

$$\begin{aligned} Y_a &= \frac{1}{M \cdot Y_{bt}} \\ Y_b &= \frac{1}{M \cdot Y_{at}} \\ Y_{c'} &= \frac{Z_1}{M} \end{aligned} \tag{14}$$

, donde:

$$M = \frac{Z_1}{Y_{at}} + \frac{1}{Y_{at}Y_{bt}} + \frac{Z_1}{Y_b}$$

Utilizando los valores de Y_{at}, Y_{bt} y Y_{ct} , y tomando $Y_c = Y_{c'} + Y_{ct}$, se llega al siguiente modelo π básico de un sistema eléctrico, como el de la figura 14:

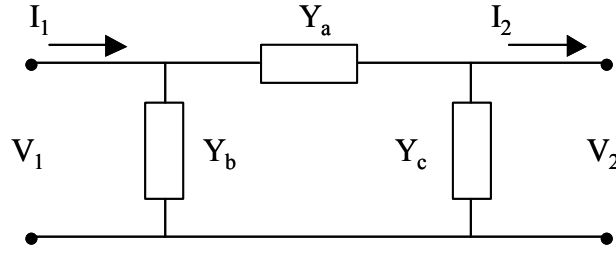


Figura 14: Modelo π básico de un sistema eléctrico

Los valores de Y_a, Y_b e Y_c de la figura 14 vienen dados por:

$$\begin{aligned} Y_a &= \frac{t}{Z_T + Z_1} \\ Y_b &= \frac{(1-t)}{Z_T + Z_1} \\ Y_c &= \frac{t(t-1)}{Z_T + Z_1} \end{aligned} \quad (15)$$

El circuito mostrado en la figura 14 puede utilizarse para determinar la relación entre el voltaje en la barra 2 y la potencia reactiva demandada en la barra 1, en función del tap del OLTC. Para esto, consideraremos conocidos los valores de las impedancias del transformador y de la línea, como también el consumo de potencia S_2 .

De la figura 14, si fijamos la barra 1 como slack se tiene que:

$$\begin{aligned} I_2 &= I_a - I_c = Y_a(V_1 - V_2) - Y_c V_2 \\ \Leftrightarrow I_2 &= \frac{(V_1 - V_2)t}{Z_1 + Z_T} - \frac{t(t-1)V_2}{Z_1 + Z_T} = \frac{t(V_1 - V_2 t)}{Z_1 + Z_T} \end{aligned} \quad (16)$$

Luego tenemos: $S_2 = P_2 + jQ_2 = V_2 I_2^* = \frac{V_2 t (V_1 - V_2 t)^*}{Z_1 + Z_T}$

, pero:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_1 \angle 0 \text{ y } V_2 = V_2 \angle \alpha \\ \Rightarrow P_2 + jQ_2 &= \frac{(V_2 \cos \alpha + jV_2 \sin \alpha)t}{Z_1 + Z_T} (V_1 - V_2 t \cos \alpha - jV_2 t \sin \alpha) \end{aligned}$$

Separando parte real e imaginaria se llega a:

$$(Z_1 + Z_T)P_2 = tV_1V_2 \cos \alpha - t^2V_2^2 \cos^2 \alpha + t^2V_2^2 \sin^2 \alpha \quad (17)$$

$$(Z_1 + Z_T)Q_2 = tV_1V_2 \sin \alpha - t^2V_2^2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (18)$$

, desarrollando y reduciendo se encuentra una relación para V_2 (en módulo) y el tap t , dada por:

$$V_2 = \frac{\sqrt{0.5[A + \sqrt{A^2 - 4B}]}}{t}$$

$$\text{con : } A = V_1^2 - 2Q_2(X_1 + X_T) \quad (19)$$

$$B = (P_2^2 + Q_2^2)(X_1 + X_T)^2$$

Por otro lado, del circuito de la figura 14, la potencia inyectada en la barra 1 viene dada por $S_1 = V_1 I_1^*$, y el consumo por $S_2 = V_2 I_2^*$. Ahora queremos determinar la potencia reactiva en la barra 1; para esto se realiza un análisis similar al anterior pero ahora considerando la barra 2 como barra slack:

$$\Rightarrow P_1 = P_2 = \frac{-V_1V_2t \sin \alpha}{X_1 + X_T} \quad y$$

$$Q_1 = \frac{-V_1V_2t \cos \alpha + V_1^2}{X_1 + X_T}$$

Reemplazando y basándose en las ecuaciones anteriores llegamos a:

$$Q_1 = Q_2 + \frac{(P_2^2 + Q_2^2)(X_1 + X_T)}{V_2^2 t^2} \quad (20)$$

, donde V_2 viene dada por la ecuación 19.

5.2 Análisis de Acción Directa

El análisis de acción directa consiste en la variación que sufre el voltaje en la barra 2, V_2 , frente a variaciones del voltaje V_1 dado por el cambio de taps del OLTC. El voltaje V_2 es mantenido a un nivel mayor que su límite inferior permitido e inferior de su máximo permitido. Para el estudio tomaremos los siguientes parámetros:

$$X_T = X_1 = 0.1(p.u.)$$

$$P_2 = 1.0(p.u.)$$

$$Q_2 = 0(p.u.)$$

$$V_1 = 1.0(p.u.)$$

Estos valores convierten a las ecuaciones 19 y 20 en:

$$V_2 = \frac{\sqrt{0.5[V_1^2 + \sqrt{V_1^4 - 0.16}]}}{t} \quad (21)$$

$$Q_2 = \frac{0.2}{V_2^2 t^2} \quad (22)$$

Además para el OLTC:

Valor tap máximo, $t_{\text{máx}} = 1.2$ [p.u.]

Valor tap mínimo, $t_{\text{mín}} = 0.8$ [p.u.]

Valor del tap, $t = 1 + 0.025N$ [p.u.]

, donde N corresponde al paso del tap en [p.u], con $N = 0, \dots, 12$

Tiempo de operación = 10 [s]

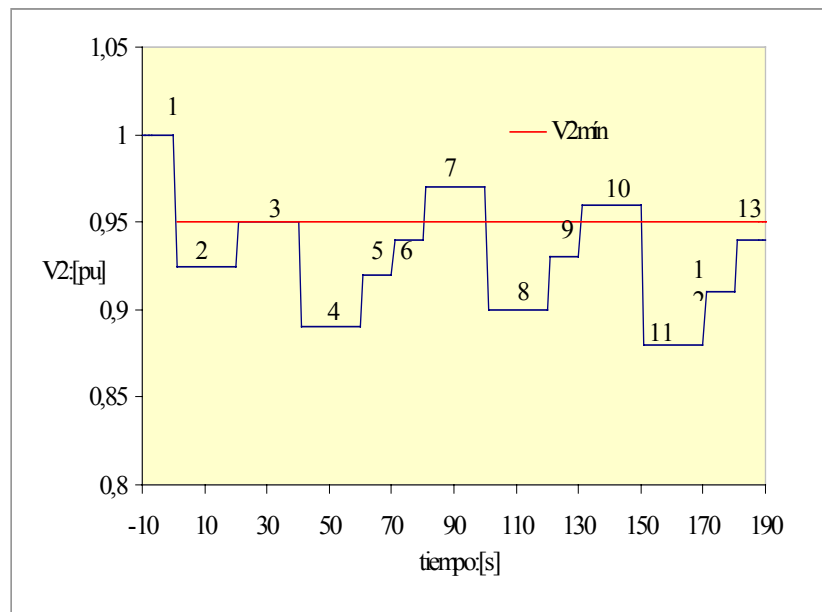
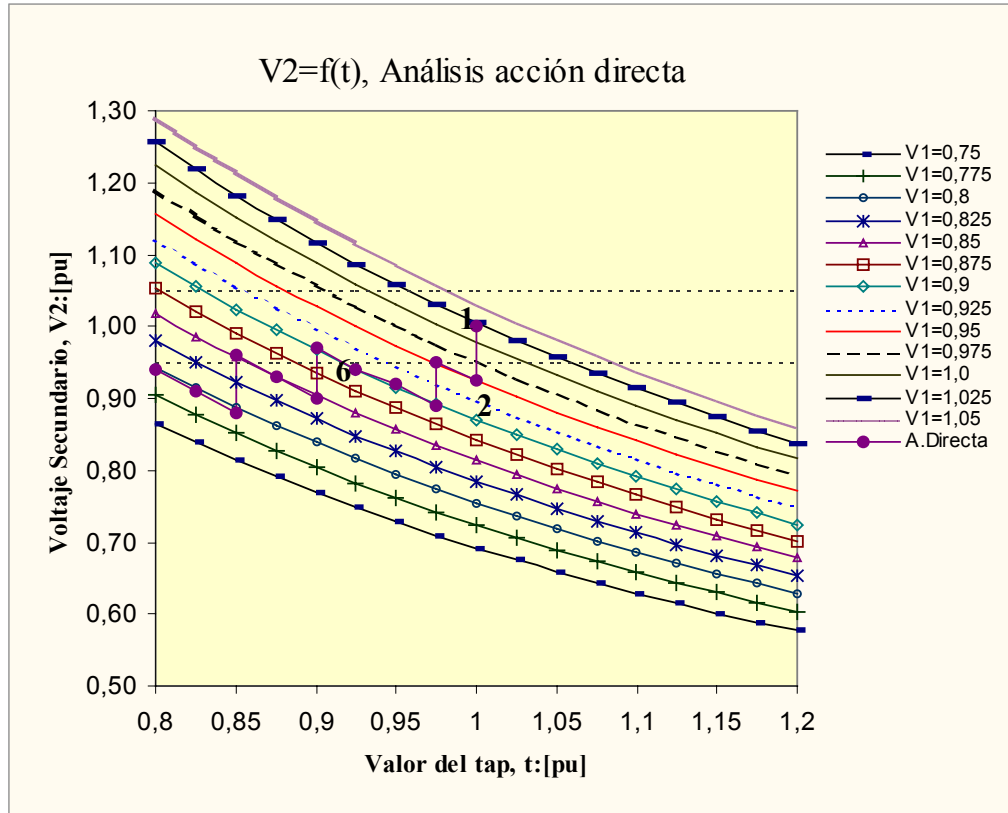
Tiempo de retardo = 20 [s]

Los valores límites en el voltaje secundario son:

Voltaje mínimo, $V_{2\text{mín}} = 0.95$ [p.u.]

Voltaje máximo, $V_{2\text{máx}} = 1.0$ [p.u.]

El análisis de acción directa del OLTC se muestra en los gráficos 1, 2, 3 y 4, donde el taps al variar con el tiempo hace que también varíen con el tiempo el voltaje V_2 y la potencia reactiva Q_1 .



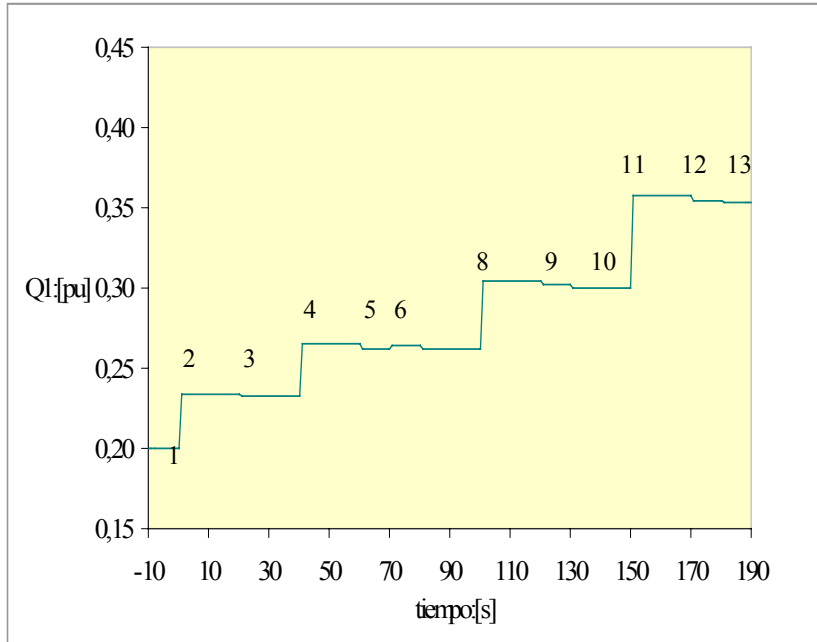


Gráfico 3: Potencia Reactiva Q1 v/s Tiempo

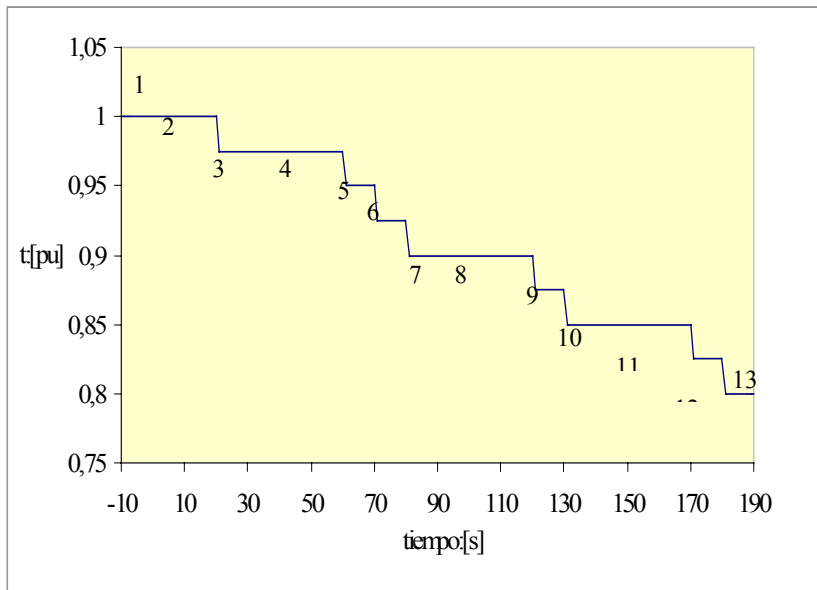


Gráfico 4: Taps v/s Tiempo

5.3 Análisis de Acción Inversa

Si se produce un aumento excesivo de la demanda o debido a una falla en el sistema, el voltaje secundario puede hacerse inestable, aún cuando el OLTC trate de mantener este voltaje dentro de un rango de límites permitidos.

La acción inversa del OLTC consiste en una caída en el voltaje secundario al intentar aumentarlo (para que entre a su banda permitida). Para este estudio tomaremos los mismos parámetros utilizados en el estudio de acción directa del OLTC, incluyendo los mismos límites de voltaje secundario. El análisis de acción inversa del OLTC se muestra en los siguientes gráficos:

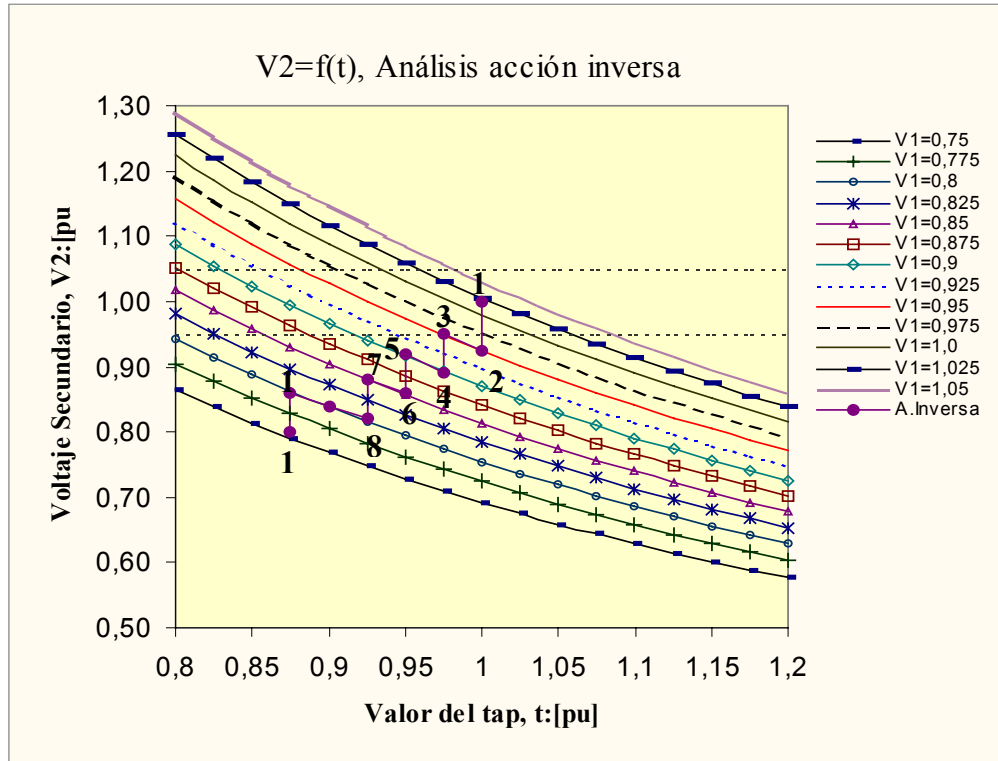


Gráfico 5: Voltaje V2 v/s Taps

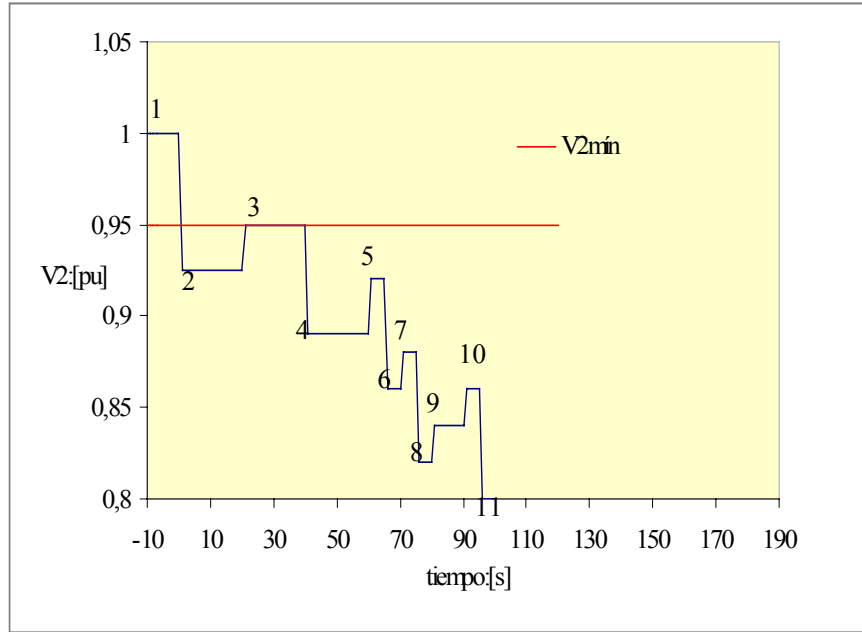


Gráfico 6: Voltaje V_2 v/s Tiempo

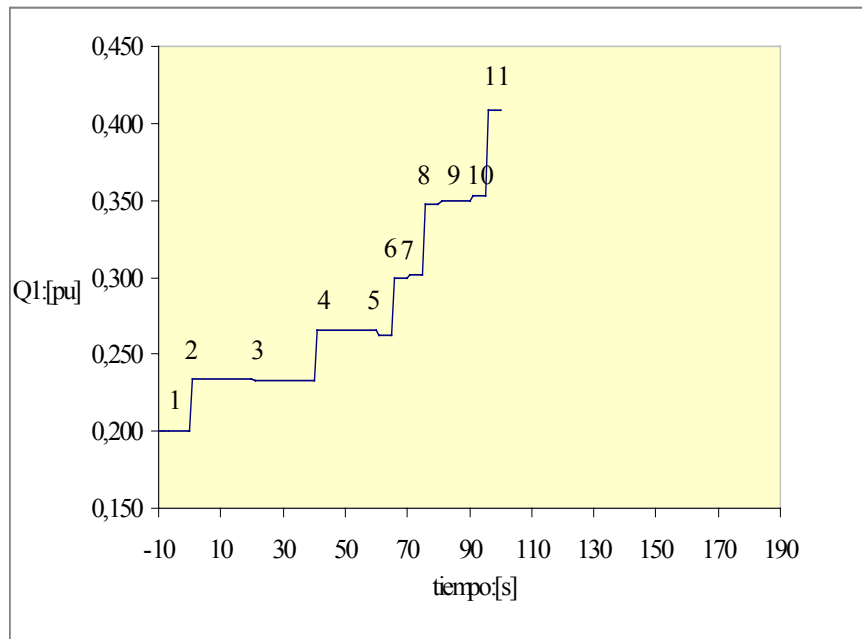


Gráfico 7: Potencia Reactiva Q_1 v/s Tiempo

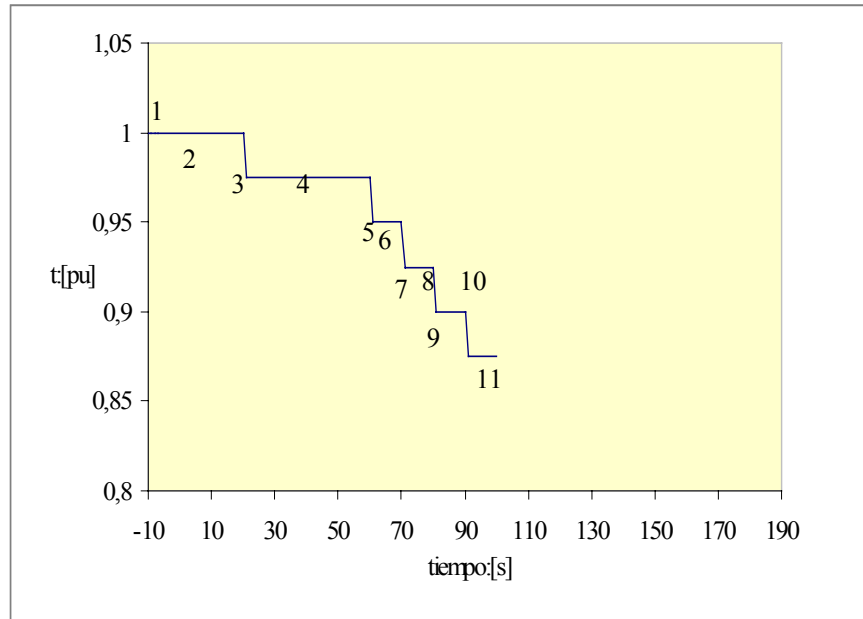


Gráfico 8: Taps v/s Tiempo

6.0 Comentarios

En el gráfico 1, el OLTC permanecerá estable si $V_2 \in [V_{2\min}, V_{2\max}]$.

Si en el resto del sistema ocurre una perturbación que permite disminuir el voltaje V_1 , esto hace que el tap deba variar y comprobar, de acuerdo a la ecuación 21 si el voltaje V_2 permanece en el rango permitido. Si esto ocurre, el OLTC se estabiliza. De no ser así, el OLTC opera disminuyendo nuevamente el tap en un paso (ocupando un tiempo de retardo de 20 [s]) hasta que el voltaje V_2 esté dentro de su rango.

La acción se repite hasta que el OLTC se estabilice o hasta cuando los límites de taps lo permitan.

El gráfico 2 muestra cómo el voltaje V_2 trata de permanecer dentro del rango permitido a través del tiempo.

El gráfico 4 muestra la disminución del tap en el tiempo (hasta su límite inferior de 0.8 (p.u.)). El gráfico 3 indica el aumento de la potencia reactiva Q_1 en el tiempo cuando opera el OLTC en estas condiciones.

Como vimos en la acción directa, cuando el tap disminuía (OLTC opera) el voltaje V_2 aumentaba con respecto al valor anterior (que obviamente era menor a $V_{2\min}$, pues por eso el OLTC actuó), independientemente si este aumento de V_2 quedaba o no dentro del rango aceptado.

El OLTC trabajará en acción directa si *mientras* en su operación (cambio de paso) no ocurre ninguna perturbación. En el caso que ocurra una perturbación del sistema *antes de completarse el tiempo de operación*, al terminar este tiempo varía el tap y vemos que el voltaje V_2 disminuye del valor anterior en lugar de aumentar, se dice que el OLTC actúa de modo inverso.

En el gráfico 5, a diferencia del gráfico 1, se muestra una disminución más acentuada del voltaje secundario al disminuir el tap.

En el gráfico 6, a diferencia del gráfico 2, el voltaje V_2 ya no tiende a permanecer en el rango aceptable cuando se producen perturbaciones antes de completarse el tiempo de operación (acción inversa del OLTC).

En el gráfico 7, la potencia reactiva en el lado primario crece más fuerte comparado con lo acontecido en una acción directa.

7.0 Bibliografia

- Gross, G., Power System Analysis, Jhon Wiley & Sons, 1979
- N. Flatabo, J.A. Foosnaes, and T.O. Berntsen, "Transformer Tap Setting in Optimal Load Flow," IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 6, pp. 1356-1362, June 1985
- M.S. Calovic, "Modelling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems," IEEE Trans., Vol. PAS-103, No. 7. Pp. 1909-1915, July 1984
- M. S. Calovic, "Modelling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformers in Voltage and VAR contropl Applications," Report PAP-TR-83-3, Department of Electrical Enfineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, May 1983
- R. Kilmer, D. Karloski, F. T. Arriola and V. Echave, "Variable Impedance Transformer Models for Use in Real-Time Security Analysis Functions," Proceeding, 13th PICA Conference, Houston, Texas, May 17-20, 1983, pp. 233-238
- T. van Cutsem, C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston/london/Dordrecht, 1998.