

# Sintonización de reactores de neutro en líneas de 500 kV del sistema eléctrico ecuatoriano

Dután, Luis<sup>1</sup>

Dután, Walter<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CELEC EP TRANSELECTRIC

E-mail: [luis.dutan@celec.gob.ec](mailto:luis.dutan@celec.gob.ec)

<sup>2</sup>UNIVERSIDAD DE CUENCA

E-mail: [walter.dutan@ucuenca.edu.ec](mailto:walter.dutan@ucuenca.edu.ec)

**Resumen**—En este trabajo, basados en la metodología de sintonización del reactor de neutro propuesta por E. W. Kimbark para recierres monofásicos de líneas de transmisión en Extra Alto Voltaje, se presenta la sintonización de los reactores de neutro conectados a los bancos de reactores de compensación de la línea San Rafael – El Inga a 500 kV. Se realiza la sintonización perfecta de los reactores de neutro y se pone de manifiesto sus desventajas en la implementación, lo que inmediatamente sugiere la necesidad de desintonizar a los reactores de neutro y permitir cierto valor de corriente de arco secundario. Usando el software libre *Maxima* se desarrolló una plantilla de cálculo que permite realizar sensibilidades para diferentes valores del reactor de neutro y cuyo objetivo es establecer sus valores límites inferior y superior. Además, los valores del primer pico del voltaje transitorio de recuperación post arco secundario se obtuvieron mediante simulación en el software libre *Alternative Transients Program*. Los resultados de este trabajo validaron el método de sintonización del reactor de neutro usado durante la etapa de planeamiento y diseño del primer sistema de transmisión en Extra Alto Voltaje del Ecuador.

**Palabras clave**—Recierres monofásicos, corriente de arco secundario, reactor de neutro, voltaje transitorio de recuperación.

## I. INTRODUCCIÓN

EN estados iniciales de un sistema de Extra Alto Voltaje (EAV), como es el caso ecuatoriano, es necesario implementar recierres monofásicos en sus líneas de transmisión ante fallas monofásicas; con esto se logra mantener la estabilidad del sistema, se incrementa su confiabilidad y se mantiene la continuidad en el abastecimiento de la demanda eléctrica. Cuando se produce la falla monofásica se desarrolla la corriente de arco primario ( $I_{ap}$ ) y los relés de protección emitirán la orden de apertura únicamente a los interruptores ubicados en los extremos de la fase fallada, las otras fases permanecen cerradas. Una vez abierta, esta fase queda acoplada con las fases sanas de manera electrostática (acoplamiento capacitivo) y electromagnética (acoplamiento inductivo), siendo la primera la que tiene mayor influencia. El acoplamiento capacitivo se produce a través de las capacitancias mutuas entre fases e hilos de guarda y es la

causa directa que siga circulando una corriente de falla conocida como corriente de arco secundario ( $I_{as}$ ). Esta corriente se autoextinguirá naturalmente en pocos ciclos y el principal índice que determina si se autoextingue o no es su magnitud que depende, principalmente, del nivel de voltaje y longitud de la línea de transmisión. Cuando la corriente de arco secundario se autoextingue, inmediatamente aparecerá en el conductor abierto un voltaje transitorio de recuperación (TRV por sus siglas en inglés) el cual actuará sobre el camino dejado por el arco secundario; si el valor del primer pico supera cierto límite se producirá el reencendido del arco secundario y seguirá durante un tiempo ciclos de apagado y reencendido del arco. Esta situación no debe producirse.

Una vez que los interruptores de la fase se han abierto quedan en ese estado un determinado tiempo (conocido como *tiempo muerto*) de, aproximadamente, 500 ms antes de proceder con el recierre; durante este *tiempo muerto* se espera que el arco secundario se haya autoextinguido y que no se haya producido reencendidos de arco para que el recierre resulte exitoso, caso contrario el recierre encontrará una falla monofásica y los sistemas de protección, en el caso del sistema de EAV del Ecuador, provocarán una apertura trifásica de la línea de transmisión. Este evento no es deseado, especialmente cuando la línea está con altos valores de carga.

Lo que provoca la corriente de arco secundario es el acoplamiento capacitivo entre las fases sanas y la fase abierta, por lo que el objetivo principal consiste en neutralizar su efecto mediante reactores; en principio es posible obtener un valor nulo de corriente de arco secundario. Normalmente, las líneas de transmisión en EAV poseen reactores de compensación en cada fase ( $X_l$  o  $b_l$ ), conectados de forma *Y neutro a tierra*, para reducir el voltaje cuando la línea está en vacío (efecto Ferranti) o muy poco cargada; esto implica que el valor de su reactancia es calculado únicamente para este propósito. Es posible usar estos reactores de fase adicionando un cuarto reactor (reactor de neutro  $X_n$ ) que será conectado desde el punto neutro a tierra y cuyo valor de reactancia inductiva debe ser sintonizado (ajustado) de tal manera que con este esquema de cuatro reactores se logre la neutralización del acoplamiento capacitivo. En la práctica esta sintonización no es perfecta o se vuelve necesario desintonizar, lo que lleva

a aceptar un valor de corriente de arco secundario que, en base a experiencias internacionales en sistemas de EAV, se considera que se autoextinguirá antes del tiempo muerto esperado para producir el recierre.

Durante la etapa de planeamiento del sistema de EAV ecuatorialiano, realizado por la empresa CESI, el valor de  $X_n$  fue calculado en base a las relaciones  $X_n = (X_0 - X_1)/3$  y  $X_0/X_1=1.75$ , donde  $X_0$  y  $X_1$  son las reactancias de secuencia cero y positiva del banco de reactores de compensación de la línea de transmisión. En este trabajo, basados en la metodología propuesta en [1], mediante cálculos analíticos y simulaciones sencillas realizadas con el software *Alternative Transients Program* (ATP) usando modelos simplificados de líneas de transmisión, cuyos valores de reactancia inductiva y capacitiva se calculan a frecuencia industrial (60 Hz), se validan los valores de los reactores de neutro obtenidos en las etapas de planeamiento (CESI) y diseño (Harbin Electricity International – HEI). Además, este trabajo permitirá a los operadores del Sistema Nacional de Transmisión (SNT) tomar decisiones sobre la posición del *tap* del reactor de neutro y servirá como punto de partida para realizar estudios donde se analicen eventos como la dinámica del arco secundario, métodos adaptativos que indiquen la extinción del arco secundario, ajuste de protecciones y el efecto de la apertura monofásica en los generadores de la central Coca Codo (CCS).

El trabajo escrito, en su introducción, realiza una breve descripción del arco secundario. Posteriormente, se determinan las ecuaciones de acoplamiento capacitivo y su circuito equivalente en secuencia cero y positiva. Usando un esquema de cuatro reactores, se presenta la sintonización perfecta del reactor de neutro y sus desventajas, lo que lleva a usar un análisis de sensibilidad para desintonizar al reactor de neutro admitiendo cierto valor de corriente de arco secundario. Los resultados obtenidos validan los valores de diseño de los reactores de neutro de la línea San Rafael – El Inga.

En este documento, los voltajes y corrientes presentados en ecuaciones y tablas de resultados corresponden a valores *rms*, excepto para el TRV cuyo valor es *pico*. Además, los voltajes  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  y  $V$  son *fase-neutro*. Las ecuaciones se formulan usando susceptancias capacitivas para el acoplamiento capacitivo ( $B$  mayúscula) y susceptancias inductivas para los reactores de compensación y neutro ( $b$  minúscula), pero los resultados del reactor de neutro y su sensibilidad se evalúan mediante reactancias inductivas.

## II. SINTONIZACIÓN USANDO CUATRO REACTORES

### A. Circuitos equivalentes de capacitancias

En el SNT las líneas de transmisión a 500 kV son trifásicas simple circuito (haz de conductores por fase) y dos hilos de guarda. Por tanto, la matriz de acoplamiento será del orden 5x5, no obstante se la redujo a una matriz  $C_{abc}$  del orden 3x3 manteniendo el efecto de los hilos de guarda [2].

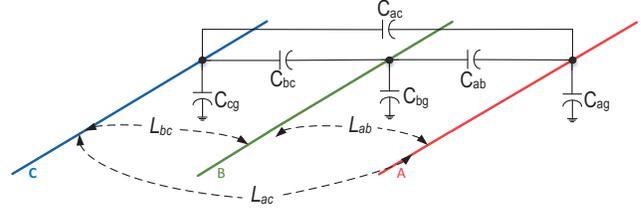


Fig. 1. Acoplamientos inductivos y capacitivos en una línea de transmisión trifásica.

Para estudios analíticos de sintonización del reactor de neutro los acoplamientos inductivos entre fases y la inductancia y resistencia propia de la línea pueden ser despreciados ya que tienen poca influencia, pero pueden ser considerados mediante simulaciones usando programas del tipo ATP. Un cálculo del efecto del acoplamiento inductivo se puede encontrar en [3].

La matriz reducida de capacitancias de la línea se indica en (1).

$$C_{abc} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

$$C_{aa} = C_{bb} = C_{cc} = C \quad (2)$$

$$C_{ab} = C_{ba} = C_{ac} = C_{ca} = C_{bc} = C_{cb} = -C_m \quad (3)$$

Es posible cambiar (1) a una matriz de componentes de secuencia 012, para obtener una matriz desacoplada, mediante la matriz de transformación  $T_s$  que está formada por los vectores característicos de  $C_{abc}$  [4]; el resultado se muestra en (4).

$$C_{012} = \begin{bmatrix} C - 2C_m & 0 & 0 \\ 0 & C + C_m & 0 \\ 0 & 0 & C + C_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde:

$$C_0 = C - 2C_m \quad (5)$$

$$C_1 = C_2 = C + C_m \quad (6)$$

Usando (5) y (6) se puede obtener (7) y (8).

$$C = \frac{2C_1 + C_0}{3} \quad (7)$$

$$C_m = \frac{C_1 - C_0}{3} \quad (8)$$

De acuerdo a (3) y (8) se establece que las capacitancias de acoplamiento mutuo entre fases en componentes de secuencia es igual a  $(C_1 - C_0)/3$ . En forma de susceptancia es (9) cuya representación gráfica se muestra en la Fig. 2 incluyendo las susceptancias a tierra.

$$B_m = \frac{B_1 - B_0}{3} \quad (9)$$

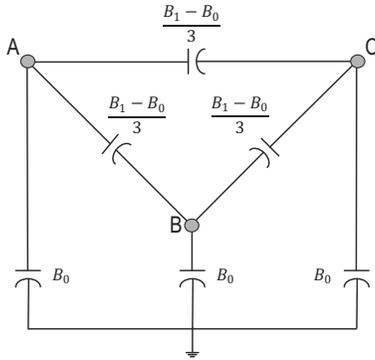


Fig. 2. Acoplamiento capacitivo entre fases en función de las susceptancias de secuencia cero y positiva.

De la Fig. 2 se observa que el circuito formado entre las fases ABC corresponde a una conexión en delta ( $\Delta$ ) que puede ser transformado a una conexión en Y no aterrada, dando lugar a dos circuitos tal como se muestra en la Fig. 3.

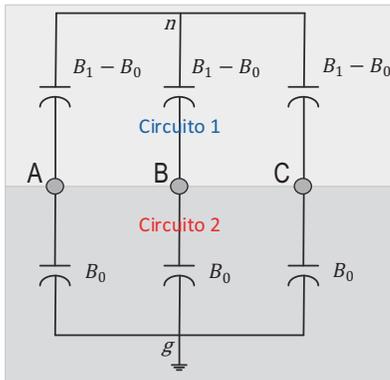


Fig. 3. Circuitos con conexión en Y de acoplamiento capacitivos entre fases y fase-tierra.

Si a las fases del circuito de la Fig. 3 aplicamos una fuente trifásica de secuencia positiva las corrientes de cada fase se dirigirán hacia los nodos  $n$  (sin conexión a tierra) y  $g$ , tal como se observa en la Fig. 4, donde se anularán debido a que las fases están balanceadas; esto implica que el circuito 1 y el circuito 2 están en paralelo y es posible obtener una susceptancia equivalente por fase cuyo valor se da en (10).

$$(B_1 - B_0) \parallel B_0 = (B_1 - B_0) + B_0 = B_1 \quad (10)$$

En cambio, de la misma Fig. 4 se observa que si se aplica una fuente trifásica de secuencia cero se generan corrientes que no podrían anularse en el nodo  $n$  debido a que tienen un mismo ángulo (las corrientes de secuencia cero están en fase); por lo tanto, no existe una circulación de corriente hasta el nodo  $n$ . El único camino es hacia el nodo  $g$  que está conectado a tierra y la única impedancia vista por la fuente de secuencia cero es  $B_0$ . Para la secuencia cero no existe el circuito 1.

En la Fig. 5 se presenta un circuito equivalente al de la Fig. 4 que funciona de manera similar ante fuentes de secuencia cero y positiva. Cuando se aplica una fuente trifásica de secuencia positiva las corrientes se anulan en  $n$  y la única

impedancia vista por la fuente para cada fase es  $B_1$ , tal como se indica en (10). A su vez, para una fuente trifásica de secuencia cero las corrientes de cada fase convergerán en  $n$  y de allí hacia tierra con un valor de tres veces la corriente de fase; según la Fig. 4 la impedancia vista para cada fase hacia tierra es  $B_0$ , por lo que resulta necesario que, tomando como referencia a la Fig. 5, se adicione una susceptancia capacitiva desde el nodo  $n$  hacia tierra ( $g$ ) de tal manera que su valor en serie con  $B_1$  sea igual a  $B_0$ . A esta susceptancia la denominamos  $B_n$  y por ella atravesará una corriente igual a  $3I_{a\_sec0}$ .

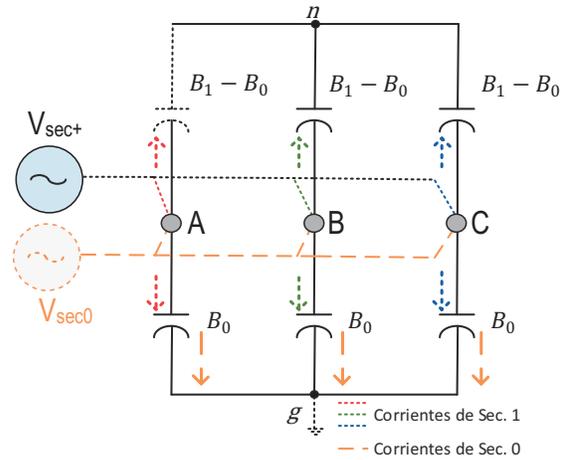


Fig. 4. Circulación de corrientes de secuencia cero y positiva.

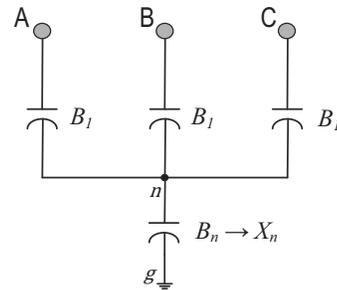


Fig. 5. Circuito equivalente de capacitancias con conexión Y a tierra a través de una susceptancia de neutro.

Para una sola fase, el circuito a analizar es el que se presenta en la Fig. 6 que indica a  $B_1$  en serie con  $B_n/3$ . El objetivo se lo consigue con (11).

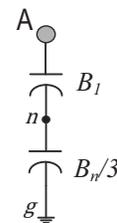


Fig. 6. Circuito equivalente de capacitancias para una sola fase.

$$B_0 = \frac{B_1 B_n}{B_1 + \frac{B_n}{3}} \quad (11)$$

Despejando  $B_n$  de (11) se obtiene la ecuación que permite evaluarla en función de las susceptancias capacitivas de secuencia cero y positiva de la línea de transmisión, tal como se muestra en (12).

$$B_n = \frac{3B_0B_1}{B_1 - B_0} \quad (12)$$

**B. Compensación reactiva de líneas de transmisión**

Usualmente en líneas de transmisión de EAV es necesario instalar bancos de reactores de compensación por cada fase, como se muestra en la Fig. 7, para controlar altos valores de voltaje cuando la línea está en vacío (efecto Ferranti) o con poca carga; el valor de la reactancia inductiva  $X_l$  es determinado únicamente para este propósito y depende del grado de compensación de potencia reactiva que se desee aplicar a la línea que, normalmente, se obtiene a través de flujos de potencia.

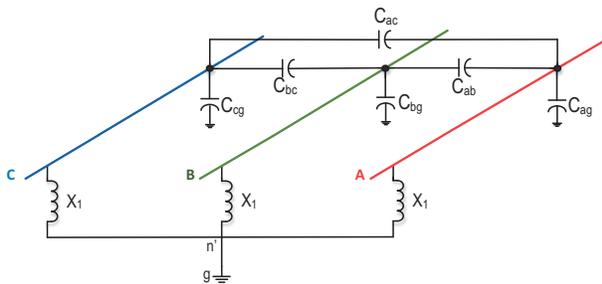


Fig. 7. Conexión Y a tierra de reactancias inductivas para compensación de líneas de transmisión en EAV.

El esquema de conexión de los reactores de compensación es parecido al esquema equivalente de susceptancias capacitivas de la Fig. 5, lo que permite deducir que si instalamos un cuarto reactor desde el punto  $n'$  hacia tierra y lo ajustamos con un determinado valor es posible neutralizar las capacitancias de acoplamiento de la Fig. 3.

**C. Esquema de cuatro reactores**

Teniendo en cuenta que el circuito capacitivo de la Fig. 5 es equivalente al de la Fig. 3 y con la ayuda de los bancos de reactores de fase que necesariamente deben ser instalados en las líneas de EAV para control de voltaje, se adiciona a estos últimos un cuarto reactor formando un esquema de cuatro reactores tal como se muestra en la Fig. 8.

El comportamiento de este arreglo ante fuentes de secuencia positiva y cero es similar al comportamiento de las capacitancias de la Fig. 5: Cuando se aplica una fuente trifásica de secuencia positiva las corrientes se anularán en el nodo  $n'$  y las únicas impedancias que verán son aquellas que sirven para el control de voltaje ( $b_l$ ); cuando el sistema se encuentra desbalanceado (falla o fase abierta) y, por lo tanto, con presencia de secuencia cero, las corrientes se dirigirán hacia tierra a través del reactor de neutro. En el caso de una fase abierta durante el tiempo muerto antes que se produzca el recierre monofásico, tal como se muestra en la Fig. 9; si el

objetivo es obtener una corriente de arco secundario de valor cero este reactor deber ser sintonizado de tal manera que neutralice el acoplamiento capacitivo entre fases sanas y la fase abierta de la línea de transmisión.

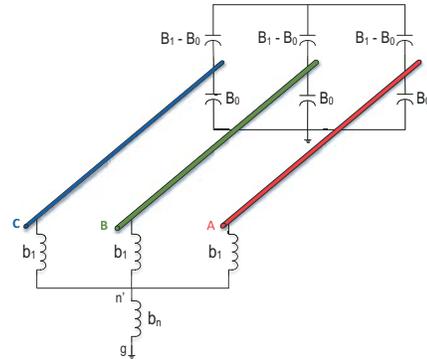


Fig. 8. Conexión Y a tierra mediante reactor de neutro de reactancias inductivas para compensación de líneas de transmisión en EAV.

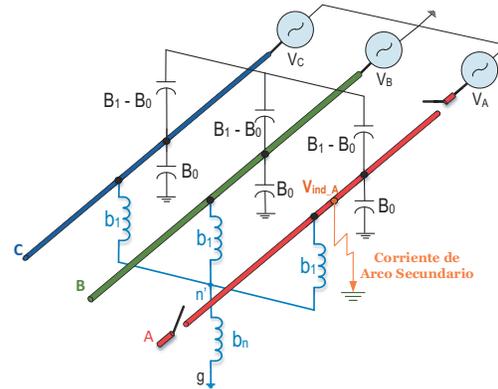


Fig. 9. Circuitos equivalentes de alimentación (parte capacitiva) y neutralización (parte inductiva) de la corriente de arco secundario.

El circuito equivalente es el que se presenta en la Fig. 10.

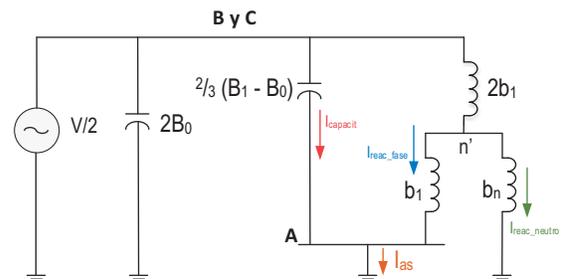


Fig. 10. Circuito equivalente para neutralización del arco secundario durante el tiempo muerto previo al recierre monofásico.

El arreglo serie-paralelo inductivo debe ser igual en magnitud (neutraliza) al elemento capacitivo que provoca el acoplamiento entre las fases sanas (B y C) y la fase en falla (A). La tarea consiste en determinar  $b_n$ .

La susceptancia capacitiva  $B_l$  provoca la generación de potencia reactiva de la línea y la susceptancia inductiva  $b_l$  da el grado de compensación para mantener adecuados perfiles de

voltaje [5]. Si se iguala las magnitudes de  $B_1$  y  $b_1$  la línea estará compensada al 100%, pero esta situación no es deseada [6] por lo que se debe escoger grados de compensación menores. Si definimos a  $k$  como el grado de compensación, entonces  $b_1$  estará dado por (13).

$$b_1 = kB_1 \quad (13)$$

Por otro lado, el voltaje inducido en la fase abierta ( $V_{ind_A}$ ) por las fases sanas debe ser anulado según (14).

$$b_1 - b_0 = B_1 - B_0 \quad (14)$$

Si se despeja  $b_0$  de (14) y usando (13), se obtiene (15).

$$b_0 = B_0 - (1 - k)B_1 \quad (15)$$

La sintonización perfecta resulta de igualar  $b_n$  con  $B_n$ , entonces  $b_n$  puede ser expresado mediante (16).

$$b_n = \frac{3b_0b_1}{b_1 - b_0} \quad (16)$$

Que de acuerdo a (13) y (15) quedaría determinada según (17).

$$b_n = \frac{3b_1(B_0 - B_1 + b_1)}{B_0 - B_1} \quad (17)$$

Del numerador de la ecuación (17) también se puede deducir que existe un valor mínimo de compensación dado por (18).

$$k_{min} = \frac{B_1 - B_0}{B_1} \quad (18)$$

Según [1], valores de compensación por debajo del mínimo indican que  $b_n$  no es necesaria y que el banco de reactores de fase debe tener conexión *Y no aterrada*.

El voltaje en el nodo  $n'$  del circuito de la Fig. 10 estará dado por (19)

$$V_{n'} = \frac{V}{2} \frac{2b_1}{3b_1 + b_n} \quad (19)$$

La corriente desde el nodo  $n'$  hacia la fase  $A$  se evalúa usando (20), mientras que la corriente debido al acoplamiento capacitivo por (21).

$$I_{react\ fase} = V_n b_1 \quad (20)$$

$$I_{capacit} = \frac{-V}{2} \frac{2}{3} (B_1 - B_0) \quad (21)$$

La corriente de arco secundario se calcula usando (22).

$$I_{as} = |I_{capacit} + I_{react\ fase}| \quad (22)$$

donde:

$I_{react\ fase}$  es la corriente que atraviesa la susceptancia  $b_1$  de la Fig. 10.

Adicionalmente, es necesario determinar el voltaje en el punto  $n'$  durante la falla. Según [1], la relación  $Z_0/Z_1$  en el punto de falla puede ser de 1, 2 y 3. El voltaje durante el cortocircuito se calcula mediante (23).

$$V_{n'cc} = V_0 \frac{2b_1}{2b_n + 3b_1} \quad (23)$$

donde:

$$V_0 = V \frac{\frac{Z_0}{Z_1}}{2 + \frac{Z_0}{Z_1}} \quad (24)$$

La potencia más elevada desarrollada por el reactor de neutro durante la falla ocurre cuando la falla es cercana al reactor y se evalúa según (25).

$$Q_{n,cc} = V_{n'cc}^2 b_n \quad (25)$$

Debido a que existe la posibilidad que el sistema opere desbalanceado, se asume que circulen corrientes permanentes por el reactor de neutro y, por lo tanto, se vuelve necesario determinar la potencia del reactor de neutro en operación continua. Este cálculo se lo realiza tomando como base la máxima corriente que circulará por el reactor durante la falla ( $I_{10s}$ ) o durante el arco secundario; este valor debe ser multiplicado por un factor de 1.5 (50% de margen de seguridad) y luego dividido para 10. Esto significa que se asume, para fines de diseño, que en operación continua va a circular una corriente igual a la décima parte de la corriente de falla afectada por un margen de seguridad.

La potencia en operación continua estará dada por (26).

$$Q_{n,op} = I_{n,op}^2 \frac{1}{b_n} \quad (26)$$

donde:

$$I_{n,op} = I_{10s} \frac{1.5}{10} \quad (27)$$

*D. Corriente de arco secundario que puede ser autoextinguida.*

Según [1], se asume que la corriente de arco secundario neutralizado se reduce al 20% de su valor no neutralizado; entonces, los máximos valores de corriente de arco secundario y las máximas longitudes de líneas a 500 kV para esquemas no neutralizado y neutralizado, se muestran en la Tabla I.

TABLA I  
MÁXIMA CORRIENTE PERMITIDA DE ARCO  
SECUNDARIO [1]

	Longitud		Ias
	[Mi]	[km]	[A]
Línea sin neutralización	45	72,42	9
Línea con neutralización	1800	2896	75

Durante la etapa de planeamiento del sistema de 500 kV, la consultora CESI sugirió los límites de corriente de arco secundario mostrados en la Tabla II y que el voltaje máximo del reactor de neutro sea de 72.5 kV; estos valores se basan en sus experimentos y en sistemas ya en operación. En cambio, durante la etapa de diseño del sistema de 500 kV, la empresa HEI trabajó con los límites mostrados en la Tabla III.

TABLA II  
MÁXIMA CORRIENTE DE ARCO SECUNDARIO Y TRV POST-ARCO SEGÚN CESI

Tiempo muerto [ms]	I <sub>as</sub> [A]	TRV <sub>arco</sub> [kV]	X <sub>0</sub> /X <sub>1</sub> *
300 - 500	25	50	1,5-2,75
>500	50	50	

\* Se selecciona valores bajos de la relación X<sub>0</sub>/X<sub>1</sub>.

TABLA III

MÁXIMA CORRIENTE PERMITIDA DE ARCO SECUNDARIO SEGÚN HEI

	TRV [kV/m]	I <sub>as</sub> [A]	t** [s]	Velocidad viento [m/s]	Probabilidad de éxito [%]
Línea sin compensación	10 / 16,8*	18,4	0,25-0,4 / 0,5-0,7	1,5-2,5	90
Línea con compensación	20	35	0,2	1,5-2,5	90

\* Se puede diseñar con dos valores: 10 kV/m o 16,8 kV/m

\*\* Tiempo límite de autoextinción del arco secundario

### III. SINTONIZACIÓN PERFECTA DE LOS REACTORES DE LA LÍNEA SAN RAFAEL – EL INGA

El sistema de EAV del Ecuador, está formado por las líneas de transmisión que se muestran en la Tabla IV.

TABLA IV  
SUCEPTANCIAS DE LÍNEAS A 500 kV

Conexión S/E a 500 kV	Longitud [km]	B0 [μS/km]	B1 [μS/km]	Compensación total conectada a la línea [MVar]
Coca Codo - San Rafael	8	3,126	4,65	—
San Rafael - El Inga	120	3,126	4,65	60
El Inga - Tisaleo	140	3,128	4,44	120
Tisaleo - Chorrillos	200	3,128	4,44	150

#### A. Estudio detallado para la línea San Rafael – El Inga

Según estudios de flujos de potencia, esta línea de transmisión necesita una compensación de 60 MVar para controlar el valor del voltaje cuando se encuentra en vacío. El grado de compensación se evalúa de acuerdo a (28).

$$k = \frac{Q_{compensación}}{Q_{línea}} \quad (28)$$

donde:

$Q_{línea}$ : Potencia reactiva [MVar] generada por el efecto capacitivo de la línea.

$Q_{compensación}$ : Potencia reactiva [MVar] total de compensación.

Conforme a (28),  $k = 0.417$ . Este valor se mantendrá fijo para todos los análisis posteriores. Con este grado de compensación, los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla V.

TABLA V

SINTONIZACIÓN REACTOR DE NEUTRO  
LÍNEA SAN RAFAEL - EL INGA

X <sub>n</sub> [Ω]	V <sub>n</sub> [kV]	V <sub>n_cc</sub> [kV]	I <sub>reac_fase</sub> [A]	I <sub>x_n</sub> [A]	I <sub>acop_cap.</sub> [A]	I <sub>as</sub> [A]	Q <sub>n_cc</sub> * [kW]	Y <sub>1</sub> /Y <sub>0</sub>
6038	86	76	20,65	14,25	-20,65	0	1900	5,3

\* Calculada para Z<sub>0</sub>/Z<sub>1</sub> = 2,2

Los valores presentados en la Tabla V muestran que usando un solo banco de reactores de fase para compensación, con impedancia inductiva  $X_I = 4166.66 \Omega$  por fase y conectados en Y a tierra a través de un reactor de neutro con valor de reactancia inductiva  $X_n = 6038 \Omega$  se obtiene una corriente de arco secundario de valor cero (sintonización perfecta). El mayor voltaje de neutro se produce cuando existe la corriente de arco secundario y su valor de 86 kV está por encima del máximo valor sugerido por CESI. Además, se observa que si no existiera compensación inductiva ni banco de reactores, se tendría una corriente de arco secundario de valor 20,65 A, que es mayor a los 9 A necesarios para no implementar el reactor de neutro. La relación  $Y_1/Y_0$  (igual a  $X_0/X_I$ ) está fuera del rango de diseño usado por CESI (1.5 – 2.75).

En la práctica se optó por dividir la compensación de 60 MVar en dos bancos de 30 MVar cada uno, mismos que fueron instalados en los extremos de la línea. Para obtener el valor del voltaje en el punto neutro durante arco secundario la ecuación (19) debe ser modificada debido a la división del banco tal como se muestra en (29). La corriente que neutraliza a la corriente debido al acoplamiento capacitivo se calcula mediante (30).

$$V_n = \frac{V}{2} \frac{2b_1}{3b_1 + 2b_n} \quad (29)$$

donde:  $b_n = 1/X_n$  ( $X_n$  es el reactor de neutro de cada banco).

$$I_{as} = |I_{capacit} + 2I_{reac_fase}| \quad (30)$$

Con este esquema, la impedancia inductiva por fase de cada banco de compensación ( $X_I$ ) es de 8333.33 Ω y los resultados para esta configuración se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI

SINTONIZACIÓN REACTOR DE NEUTRO (DOS BANCOS DE REACTORES DE FASE) LÍNEA SAN RAFAEL - EL INGA

X <sub>n</sub> [Ω]	V <sub>n</sub> [kV]	V <sub>n_cc</sub> [kV]	I <sub>reac_fase</sub> [A]	I <sub>x_n</sub> [A]	I <sub>acop_cap.</sub> [A]	I <sub>as</sub> [A]	Q <sub>n_cc</sub> [kW]	Y <sub>1</sub> /Y <sub>0</sub>
12077	86	90	10,326	7,13	-20,65	0	673	5,33

Nota: Estos valores corresponden a un solo banco de compensación de 30 MVar.

De acuerdo a la Tabla VI, el tener dos bancos de compensación conectados a la línea no ayuda a disminuir el voltaje en el punto neutro; además el valor del reactor de

neutro llega a  $12077 \Omega$ . Lo que disminuye es la corriente a través del reactor de neutro y, por lo tanto, la potencia durante el cortocircuito.

Ante la problemática de tener altos valores de voltaje en el reactor de neutro durante falla monofásica o arco secundario, la solución consiste en desintonizar el reactor de neutro; es decir, permitir que exista una corriente de arco secundario la cual debe estar por debajo de los límites que permiten su autoextinción y que se presentan en las Tablas I, II o III cuando la línea está compensada.

#### IV. DESINTONIZACIÓN DE LOS REACTORES DE NEUTRO DE LA LÍNEA SAN RAFAEL – EL INGA

En la Fig. 11 se presenta la corriente de arco secundario en función del valor de la reactancia inductiva del reactor de neutro. Tal como se estableció anteriormente, con un valor de  $12077 \Omega$  no existe corriente de arco secundario. La desintonización consiste en elegir valores de reactancia del reactor de neutro menores a  $12077\Omega$ . Así, si se elige un valor de  $X_n=2500 \Omega$  la corriente de arco secundario será de 8.7 A que es menor a los límites que se presentan en las Tablas I, II y III. Además, en la Fig. 12 se presenta el voltaje en el punto neutro y se observa que si se desintoniza el reactor de neutro a  $2500 \Omega$  el valor del voltaje en el punto neutro disminuye de 90 kV a 50.5 kV durante arco secundario y 52 kV durante la falla monofásica. Los resultados se presentan en la Tabla VII.

TABLA VII

DESINTONIZACIÓN REACTOR DE NEUTRO (DOS BANCOS DE REACTORES DE FASE) LÍNEA SAN RAFAEL - EL INGA

$X_n$ [ $\Omega$ ]	$V_n$ [kV]	$V_n_{cc}$ [kV]	$I_{\text{reac\_fase}}$ [A]	$I_{x_n}$ [A]	$I_{\text{acop\_cap.}}$ [A]	$I_{\text{as}}$ [A]	$Q_{n\_cc}$ [kW]	$Y_1/Y_0$
2500	50	52,5	6	20	-20,65	8,62	1103	1,9

$Q_{n\_op} = 25 \text{ kVAr}$

Nota: Estos valores corresponden a un solo banco de compensación de 30 MVar.

##### A. Análisis de Sensibilidad

Para evaluar el impacto de desintonizar el reactor de neutro y las posibles posiciones del *tap*, en caso de que lo posea, es necesario analizar la Fig. 11 y la Fig. 12. Además, para poder validar el rango de diseño de  $Y_1/Y_0$  sugerido por CESI, es necesario graficar la relación  $Y_1/Y_0$  en función de  $X_n$ , tal como se muestra en la Fig. 15 y cuyo valor tiene implicación directa con el TRV.

De la Fig. 12 se observa que el límite superior de  $X_n$  estará dado por el máximo valor del voltaje del reactor de neutro según CESI; entonces, para un valor de 72.5 kV el valor de  $X_n$  debe ser alrededor de los  $5000 \Omega$  que corresponde, según la Fig. 13, a una relación  $Y_1/Y_0$  de 2.8.

Para el límite inferior, la Fig. 11 y Fig. 12, aparentemente, sugieren bajos valores de  $X_n$ , pero es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- 1) No es posible prescindir del reactor de neutro porque eso implicaría un esquema no neutralizado y el valor

máximo de corriente de arco secundario es de 9 A, según la Tabla I, mientras que el valor esperado es de 20.65 A. Por lo tanto, es necesario usar un reactor de neutro.

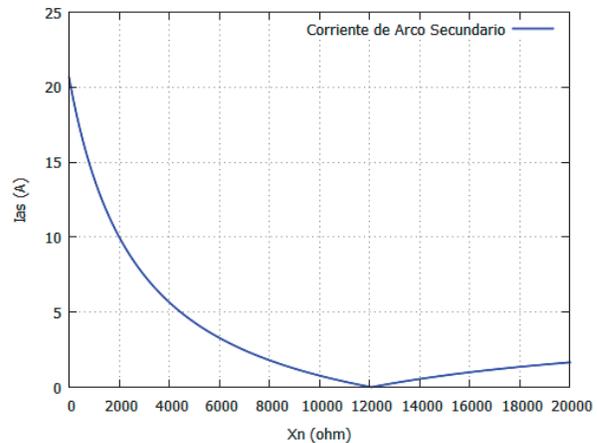


Fig. 11. Corriente de arco secundario en función del valor de la reactancia del reactor de neutro.

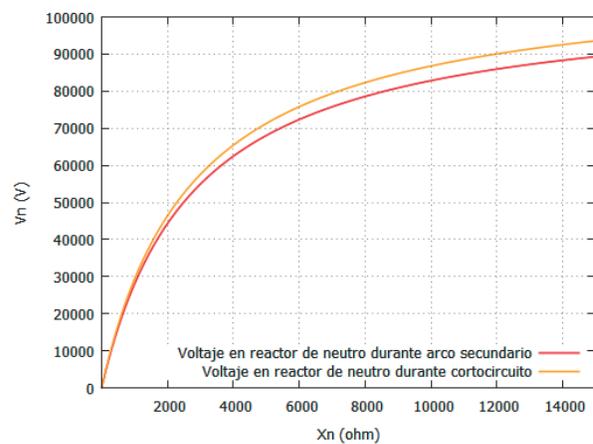


Fig. 12. Voltaje en el reactor de neutro durante cortocircuito monofásico y corriente de arco secundario en función del valor de la reactancia del reactor de neutro.

- 2) Si bien bajos valores de  $X_n$  provocan bajos voltajes en el punto neutro, es necesario tomar en cuenta el TRV que aparece en la fase abierta luego de que se extingue el arco secundario. En la Fig. 13 y Fig. 14 se presenta este voltaje para valores de  $X_n=2500 \Omega$  y  $X_n=1000 \Omega$ , de donde se observa que a medida que disminuye  $X_n$  el primer pico del TRV aumenta de 30.3 kV a 46 kV, respectivamente. Esto permite deducir que a menores valores de  $X_n$  el valor pico del TRV aumenta. Este TRV actuará sobre el camino dejado por la falla cuya capacidad de aislamiento se ha degradado por el calentamiento debido al paso de la corriente inicial de falla y el posterior arco secundario. El valor del primer pico de este voltaje transitorio puede provocar el reencendido del arco secundario por lo que es necesario ajustar  $X_n$  de tal

manera que el primer pico del TRV esté por debajo de los límites establecidos en las Tablas II o III.

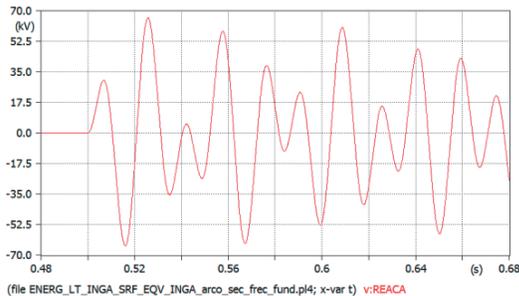


Fig. 13. TRV para un valor de  $X_n = 2500 \Omega$ .

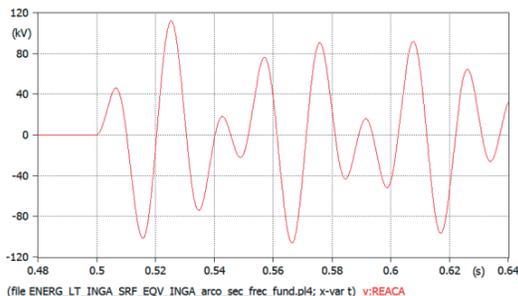


Fig. 14. TRV para un valor de  $X_n = 1000 \Omega$ .

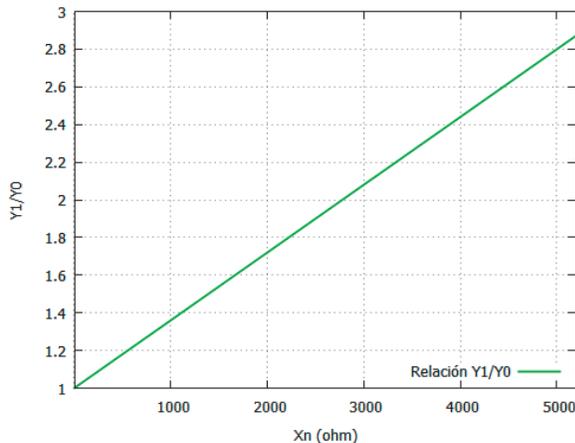


Fig. 15. Relación  $Y_1/Y_0$  en función del valor de la reactancia del reactor de neutro.

En la Tabla VIII se presenta valores del primer pico del TRV para diferentes relaciones  $Y_1/Y_0$ .

Tabla VIII

TRV POST-ARCO SECUNDARIO PARA  
DIFERENTES VALORES DE  $X_n$

$X_n$ [ $\Omega$ ]	TRV [kV]	$Y_1/Y_0$
1000	46	1,35
1800	36,5	1,64
2500	30,3	1,9

De acuerdo a lo desarrollado en este trabajo se comprueba

que el método usado por CESI durante la etapa de diseño para determinar el valor de  $X_n$  de acuerdo a los límites de la relación  $Y_1/Y_0 = 1.5 - 2.75$ , tomando valores cercanos al límite inferior, es adecuado.

Es posible realizar estudios que permitan obtener un valor óptimo de  $X_n$  durante recierres monofásicos [7] y recierres trifásicos [8], pero que es aplicable a líneas de gran longitud.

## V. CONCLUSIONES

El intervalo de la relación  $Y_1/Y_0$  para la línea de transmisión San Rafael – El Inga va desde 1.35 hasta 2.8; este intervalo es mayor al propuesto por CESI para líneas de 500 kV que va desde 1.5 hasta 2.75. Durante la etapa de planeamiento CESI usó el valor de 1.75 con lo que la reactancia del reactor de neutro ( $X_n$ ) debe ser 2083.33  $\Omega$ . Para la etapa de diseño HEI decidió que el valor de  $X_n$  sea de 2500  $\Omega$  con la intención de disminuir el TRV y evitar reencendidos del arco secundario. El método usado por CESI es conservativo y puede ser aplicado a otras líneas de transmisión trifásicas simple circuito.

Una sintonización perfecta provoca que no exista corriente de arco secundario, pero el voltaje en el reactor de neutro es superior al límite sugerido para diseño (72.5 kV). Por esta razón, es necesario desintonizar al reactor de neutro y admitir cierto valor de corriente de arco secundario, siempre y cuando esté por debajo de los límites aceptados de diseño. Esta desintonización de  $X_n$ , obviamente, deberá darse para valores menores al de una sintonización perfecta.

No es posible desintonizar para valores muy bajos de  $X_n$  debido a que los valores del primer pico del TRV que aparece en la fase abierta, luego de la extinción del arco secundario, son elevados y pueden provocar el reencendido del arco secundario. Por lo tanto existe un límite inferior para  $X_n$ .

Los resultados de este trabajo toman en cuenta un valor fijo de compensación de la línea de transmisión San Rafael – El Inga. En etapas de planeamiento es necesario variar el grado de compensación y determinar su efecto sobre el valor de la reactancia de neutro. También es necesario realizar sensibilidades con respecto a las longitudes de las líneas de transmisión.

Las ecuaciones presentadas en este trabajo son exclusivamente para líneas de transmisión que tienen un solo circuito trifásico y tomando en cuenta únicamente el acoplamiento electrostático. Si se desea analizar líneas de transmisión doble circuito a 500 kV es necesario deducir ecuaciones que tomen en cuenta al segundo circuito para el acoplamiento capacitivo. Además, cabe recalcar que el acoplamiento electromagnético tiene muy poca influencia y puede ser evaluado en modelos exactos mediante programas del tipo ATP.

La sintonización del reactor de neutro es el punto de partida para la elaboración de modelos avanzados en programas del tipo ATP que permitan analizar y evaluar temas como diámica

del arco secundario, métodos de reconocimiento de extinción de arco secundario, análisis de tiempo muerto, evaluación de protecciones de secuencia negativa de máquinas sincrónicas, entre otros.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP – Unidad de Negocio Transelectric por toda la información brindada para la realización de este trabajo.

#### ANEXO

REACTORES DE NEUTRO DE LÍNEAS A 500 kV					
DISEÑO: HEI					
Conexión S/E a 500 kV	Longitud	Compensación de línea conectada en S/E envío	Compensación de línea conectada en S/E recepción	Xn en lado S/E envío	Xn en lado S/E recepción
S/E envío - S/E recepción	[km]	[MVar]	[MVar]	[Ω]	[Ω]
Coca Codo - San Rafael*	8	..	..	..	..
San Rafael - El Inga*	120	30	30	2500	2500
El Inga - Tisaleo	140	90	30	800	2500
Tisaleo - Chorrillos	200	30	120	2500	500

\* Este enlace es doble circuito en torres separadas. Los resultados se muestran para un solo circuito.

#### REFERENCIAS

- [1] E. W. Kimbark, "Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors," *IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, pp. 285-290, March, 1964.
- [2] Bonneville Power Administration, "Electro-Magnetic Transients Program Theory Book," Portland, Oregon.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee Working Group, "Single Phase Tripping and Reclosing of Transmission Lines – IEEE Committee Report", *IEEE, Transactions on Power Delivery*, vol. 7, No. 1, January, 1992.
- [4] J. H. di Salvo, R. R. Villar, "Estudio de Arco Secundario en Líneas de Extra Alta Tensión de gran longitud," *CAUE, Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP*, Revista Iberoamericana, No. 1, Vol. 1, Marzo, 1999.
- [5] E. Godoy, A. Celaya, H. Altuve, N. Fischer and A. Guzman, "Tutorial on Single-Pole Tripping and Reclosing," *Comisión Federal de Electricidad and Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.* 2012.
- [6] P. Kundur, "Power System Stability and Control," *EPRI*, Palo Alto, California, Ed. McGraw-Hill, 1994.
- [7] M. Tavares and C. Medeiros Portela, "Transmission System Parameters Optimization – Analyzing Secondary Arc Current and Recovery Voltage", *IPST, International Conference on Power System Transients*, New Orleans 2003.
- [8] P. Mestas and M. Tavares, "Neutral Reactor Optimization in order to Reduce Arc Extinction Time during Three-Phase Tripping", Paper submitted to the International Conference on Power System Transients (IPST), Cavtat, Croatia, June, 2015.

Área de Diseño de Subestaciones. Su campo de investigación se encuentra relacionado con transitorios electromagnéticos, equipo primario de subestaciones y coordinación de aislamiento de líneas de transmisión y subestaciones.



**Walter Javier Dután Amay.**- Nació en la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, en 1979. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, y de Magíster en Planificación y Gestión Energéticas de la Universidad de Cuenca. Desde el 2005 hasta 2015 prestó sus servicios en la Empresa Eléctrica Azogues, en las Direcciones Técnica y de Planificación. Actualmente, es profesor en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de

Cuenca. Su campo de investigación se encuentra relacionado con el análisis de sistemas de distribución eléctrica y eficiencia energética.



**Luis Manuel Dután Amay.**- Nació en la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, en 1978. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional donde también ha cursado estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Desde el 2009 es colaborador de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric, en el departamento de

Planificación y desde 2014 en la Subgerencia de Proyectos de Expansión –