

Mitigation of secondary arc current in monopolar recloser operation in single and double Extra High Voltage lines with application in Ecuador - Perú Interconnection 500 kV

Mitigación de corrientes de arco secundario en re-cierres monofásicos de líneas simple y doble circuito de Extra Alto Voltaje con aplicación en la Interconexión Ecuador – Perú 500 kV

J.J. Saavedra¹ H.N. Arcos²

¹CELEC EP - TRANSELECTRIC

E-mail: jhery.saavedra@celec.gob.ec

²ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

E-mail: hugo.arcos@epn.edu.ec

Abstract

In the occurrence of a single-phase fault in a transmission line, the existence of two currents is considered: the first one the Primary Arc Current resulting from the failure and the second one, the Secondary Arc Current that may arise from the opening of the phase in failure by automatic protections action.

Mitigation of Secondary Arc Current (SAC) is a task of great incidence to obtaining a successful monopolar recloser operation in extra high voltage (EHV) lines. This research explores the main technologies and the methodology to mitigate the secondary arc current. After, the ideal technologic solutions, based on the Ecuadorian System characteristics, are selected and studied. As part of the research, the mathematical formulation to characterize the capacitive couplings and their neutralization through parallel inductive compensation and reactors (inductors) in the neutral of banks of three-phase reactors is presented.

A suitable methodology is established to achieve the goal of mitigating or reducing SAC in the event of a single-phase failure. In order to evaluate the results and verify the benefits of the procedure, the future interconnection double circuit Ecuador - Peru 500 kV has been selected as application example.

Index Terms—primary arc current (PAC), secondary arc current (SAC), single pole auto reclosing, transient recovery voltage (TRV), high speed reclosing, high speed ground switching (HSGS), neutral reactor, circuit breaker (CB).

Resumen

En la ocurrencia de una falla monofásica en una línea de transmisión, se considera la existencia de dos corrientes: la primera la Corriente de Arco Primario fruto de la falla y la segunda, la Corriente de Arco Secundario que puede surgir de la apertura de la fase en falla por acción de protecciones automáticas.

La mitigación de Corrientes de Arco Secundario (SAC), es una tarea de gran incidencia en la obtención de re-cierres monopolares exitosos en líneas de extra alto voltaje (EAV). Esta investigación explora las principales tecnologías y la metodología para mitigar la corriente de arco secundario. Luego, se seleccionan y estudian las soluciones tecnológicas ideales, basadas en las características del sistema ecuatoriano. Como parte de la investigación, se presenta la formulación matemática para caracterizar los acoplamientos capacitivos y su neutralización mediante compensación inductiva paralela y reactores (inductores) en el neutro de bancos de inductores trifásicos.

Se establece una metodología adecuada para lograr el objetivo de mitigar o reducir la SAC en caso de una falla monofásica. Para evaluar los resultados y verificar los beneficios del procedimiento, se utiliza como ejemplo de aplicación la futura interconexión doble circuito Ecuador - Perú 500 kV.

Palabras clave—corriente de arco primario (PAC), corriente de arco secundario (SAC), re-cierre automático monopolar, voltaje transitorio de recuperación (TRV), re-cierre de alta velocidad, seccionador de puesta a tierra de alta velocidad (HSGS), inductor de neutro, interruptor (CB).

Recibido: 31-05-2019, Aprobado tras revisión: 23-07-2019

Forma sugerida de citación: Saavedra, J.; Arcos, H. (2019). "Mitigación de corrientes de arco secundario en re-cierres monofásicos de líneas simple y doble circuito de Extra Alto Voltaje con aplicación en la Interconexión Ecuador – Perú 500 kV". Revista Técnica "energía". No. 16, Issue I, Pp. 26-34

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. RE-CIERRES MONOPOLARES EN BASE A EXTINCIÓN DE CORRIENTE DE ARCO SECUNDARIO

Las metodologías de extinción de SAC buscan mitigar la magnitud de la corriente, disminuir el tiempo de auto-extinción y lograr una re-conexión exitosa. Se indican a continuación las técnicas comúnmente utilizadas [1]:

- Inductores de fase y neutro (reactor de 4 brazos)
- Seccionador de puesta a tierra rápido (HSGS)
- Capacitores serie conectados en la fase con falla

De las alternativas antes indicadas, la tecnología de compensación serie resulta la más costosa y de mayor complejidad [2]. En la Tabla 1.1, tomada de CIGRÉ [3], se hace una comparación de las dos primeras alternativas de mitigación:

Tabla 1.1. Comparación de Esquema de 4 Inductores vs. HSGS [3]

REACTOR DE 4 BRAZOS	HSGS
Especialmente efectivo para fallas monofásicas que son las más comunes	Para extinción rápida de SAC para todo tipo de fallas
En el caso de la construcción de una subestación en el medio de una línea, puede ser requerido sustituir un reactor o banco ya instalado	En el caso de la construcción de una subestación en el medio de una línea, no hay afectación con este esquema
Es innecesario un control especial para extinción de SAC	Es necesaria una secuencia de control tal como: detección de falla > CB abre > HSGS abre > CB cierra.
El reactor shunt o paralelo de 4 brazos es apropiado para líneas de transmisión las cuales requieren reactores para control de voltaje, mientras HSGS serían económicos para líneas sin reactores shunt.	

Para el caso de estudio abordado se consideran líneas en EAV con longitud mayor a 100 km para las que en primera instancia se realizan simulaciones con la aplicación de inductores de fase y neutro y HSGS.

1.1. Simulaciones con el programa ATP

Se toma como caso de estudio una línea doble circuito de 120 km a 500 kV. Se establece un escenario de operación de demanda mínima con bajas transferencias y se simula en ATP un evento de falla monofásica al 50% de uno de los circuitos con la siguiente secuencia de eventos mostrada en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2. Eventos y tiempos

• Falla 1F-t en fase A al 50%:	0.1117 s	(inicia PAC)
• Despeje de Falla 1F-t:	0.2117 s	(abren CBs)
• Fin de Arco Primario (PAC):	0.2117 s	(fin PAC)
• Inicio Arco Secundario (SAC):	0.2114 s	(inicia SAC)
• HSGS cierra:	0.3114 s*	(cierra fase)
• Fin Arco Secundario (SAC):	0.4114 s	(fin SAC)
• HSGS abre:	0.6114 s*	(abre fase)

*Solo en el caso de utilización de seccionadores de puesta a tierra en el sistema modelado.

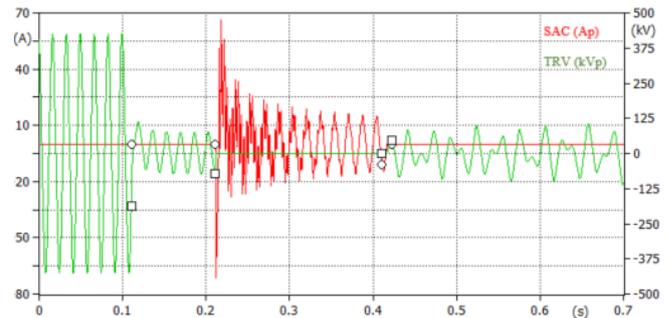


Figura 1.1: Corriente y Voltaje de arco secundario (Mitigación de SAC en base a inductores)

En la Fig. 1.1 se aprecia la existencia de una SAC de alrededor de 60 Ap en su primer pico e igual a 14.28 Ap en su último pico antes de la extinción del arco, el voltaje que se produce inmediatamente en el punto de falla (fase A), alcanza los 47.36 kVp en su primer pico. En estas condiciones, el sistema estaría listo para un re-cierre monofásico al contar con voltajes adecuados en barras (dentro de la banda del +/- 5% de acuerdo a normativa) y al no existir presencia de falla o al no existir una evidencia de reencendido del arco en el lapso de 0.41 a 0.70 segundos.

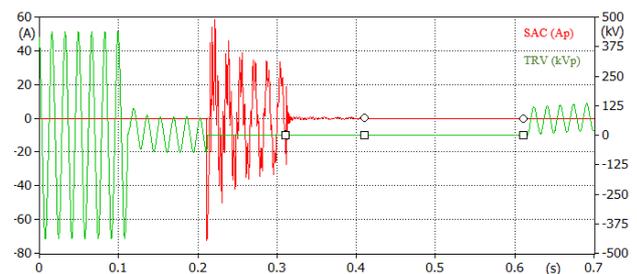


Figura 1.2: Corriente y Voltaje de arco secundario (Mitigación de SAC en base a HSGS)

En la Fig. 1.2 se evidencia un pico máximo de SAC alrededor de 58 Ap, que decrece a 20.5 Ap una vez que se cierra el HSGS a los 0.3114 s para finalmente llegar a cero. Se aprecia un valor significativo de voltaje en el punto de falla una vez que el HSGS abre, llegando a 119 kVp. Si bien no se verifica en la simulación una condición de corriente de falla o arco a partir de los 0.4117 s, el re-cierre monofásico no puede efectuarse sino hasta la apertura del HSGS, posterior a los 0.6117 s. Se corrobora la necesidad de un esquema de control y protecciones especializado para así contar con un re-cierre monofásico exitoso.

De este análisis preliminar de metodologías de mitigación de SAC se determina como mejor alternativa para el caso de líneas en EAV la aplicación de esquemas de compensación inductiva en base a inductores shunt con un inductor en su punto neutro, razón por la cual en lo que sigue, el análisis se concentra en este esquema de mitigación de SAC.

2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE COMPENSACIÓN INDUCTIVA

Para claridad en la notación se designará como BC a toda susceptancia capacitiva y BL a toda susceptancia inductiva. En forma equivalente para las reactancias, se trabajará con la notación XC y XL respectivamente.

2.1. Compensación inductiva en líneas simple circuito

Para el análisis de fallas a tierra, supresión de arco a través de inductores shunt y re-cierres monopoles se toma como base el desarrollo hecho por Edward Kimbark [4] y [5]. Para una línea de transmisión simple circuito trifásico, la matriz equivalente reducida de capacitancias C_{abc} es:

$$C_{abc} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Las capacitancias propias y mutuas se pueden considerar similares respectivamente en una configuración de línea perfectamente simétrica, por lo tanto se puede asumir que:

$$\begin{aligned} C_{aa} &= C_{bb} = C_{cc} = C \\ C_{ab} &= C_{ba} = C_{ca} = C_{ac} = C_{bc} = C_{cb} = -C_h \\ C_g &= C_0 \quad \text{Solo existe en ramas a tierra} \end{aligned}$$

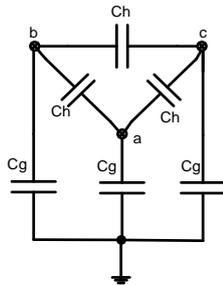


Figura 2.1. Circuito en red representando capacitancias shunt para línea simple circuito balanceada [5]

Es necesario convertir la matriz C_{abc} en una matriz de componentes de secuencia 0, 1, 2. Obtenida la matriz de capacitancias y susceptancias, se puede obtener los equivalentes de reactancias y susceptancias inductivas.

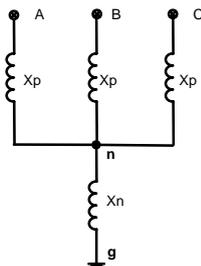


Figura 2.2. Configuración en Y de compensación inductiva para LT Simple Circuito Balanceada [5]

El grado de compensación F de la línea (denominado h o k en algunos textos) se presenta como referencia valiosa para relacionar el acoplamiento capacitivo y la compensación inductiva para una LT. Para el caso de secuencia positiva, se cuenta con la siguiente expresión:

$$F_1 = -\frac{B_{L1}}{B_{C1}} \quad (2.2)$$

Una vez definido F1 y considerando que el objetivo es mitigar el arco secundario, se busca neutralizar el acoplamiento entre fases representado por la susceptancia B_{ch} , obteniéndose:

$$B_{Lh} = -B_{Ch} \quad (2.3)$$

Dado que:

$$\begin{aligned} B_{L1} &= -F_1 \cdot B_{C1} \\ \Rightarrow -F_1 \cdot B_{C1} - B_{L0} &= -(B_{C1} - B_{C0}) \\ \Rightarrow B_{L0} &= -[B_{C0} - (1 - F_1) \cdot B_{C1}] \end{aligned} \quad (2.4)$$

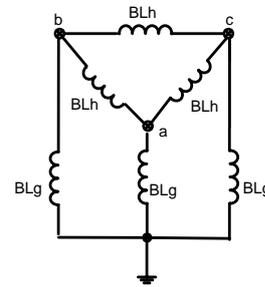


Figura 2.3. Circuito simétrico de reactancias, equivalente a Figura 2.1 [5]

En caso de una falla monofásica, con despeje de la misma por acción de las protecciones, la presencia de un inductor entre el neutro y tierra es fundamental para buscar neutralizar el efecto de acoplamiento capacitivo de las fases sanas sobre la fase en falla. La sintonización perfecta (arco secundario igual a cero) resultará al igualar BC_n y BL_n , por lo tanto es necesario conocer la ecuación característica de BL_n :

$$B_{Ln} = \frac{3B_{L1}(B_{C0} - B_{C1} - B_{L1})}{B_{C0} - B_{C1}} \quad (2.5)$$

Se presenta un diagrama trifilar referencial con el detalle de aplicación de compensación inductiva incluyendo un inductor de neutro para neutralizar acoplamientos capacitivos.

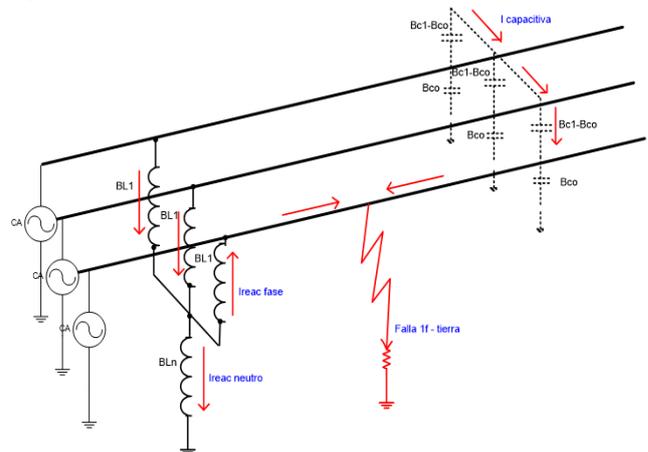


Figura 2.4. Compensación inductiva de 4 inductores - distribución de corrientes en caso de falla monofásica a tierra

La acción de protecciones de línea en EAV ocasionará el disparo de la de fase en falla, instantáneamente existirá una corriente de arco secundario (I_{arc_sec} o SAC) con los mismos aportes que tenía la corriente de arco primario, que se auto-extinguirá naturalmente y finalmente se tendrá un re-cierre monofásico automático (de estar habilitado).

$$I_{arc_sec} = I_{reactor\ fase} + I_{capacitiva} \quad (2.6)$$

2.2. Compensación inductiva en líneas doble circuito

Una línea doble circuito posee 6 fases con conductores simples o en haz de conductores, 6 capacitancias fase-tierra y un total de $(6 \times 5) / 2 = 15$ capacitancias entre conductores, las cuales podrían ser todas diferentes [5]. El propósito en este caso es buscar la anulación de los acoplamientos capacitivos para lo cual se recurre a técnicas como las de transposición de fases para buscar equalizar los acoplamientos y con ello reducir el número de capacitancias representativas. Los métodos de compensación inductiva usualmente utilizados para neutralizar el efecto de las capacitancias en líneas doble circuito, se basan en inductancias en disposición simétrica en forma de árbol con 7, 8, 9 y 10 inductores.

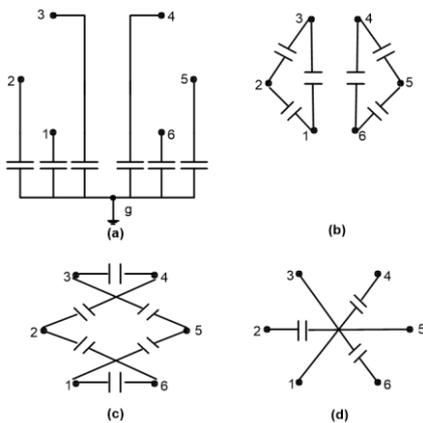


Figura 2.5. Capacitancias shunt de línea doble circuito: (a) conductor a tierra (b) entrefases (c y d) entrecircuitos [5]

Considerando las 15 capacitancias mutuas y las 6 capacitancias a tierra de la línea doble circuito, se puede establecer una matriz equivalente C_{abcd} 6×6 asumiendo simetría y transposición de líneas tal como:

$$C_{abcd} = \begin{bmatrix} C & C_h & C_h & C_j & C_i & C_i \\ C_h & C & C_h & C_i & C_j & C_i \\ C_h & C_h & C & C_i & C_i & C_j \\ C_j & C_i & C_i & C & C_h & C_h \\ C_i & C_j & C_i & C_h & C & C_h \\ C_i & C_i & C_j & C_h & C_h & C \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

La obtención de la matriz equivalente de componentes simétricos para la LT Doble Circuito, se basa en la matriz equivalente correspondiente para LT Simple Circuito. En este caso se considera además de la secuencia 0, 1 y 2, la existencia de secuencias de fase 3, 4 y 5 en el segundo circuito, con valores de la misma magnitud pero desplazados 180° . Este procedimiento se conoce como la metodología de las seis secuencias, y considera al igual que en el simple

circuito, la aplicación de fuentes de voltaje de secuencia entre los conductores y tierra; siendo los valores representativos los correspondientes a la secuencia 0, 1 y 3 [5].

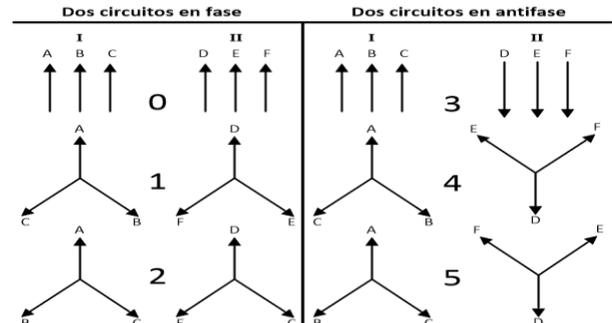


Figura 2.6. Método de seis secuencias para líneas doble circuito [6]

Si se aplica:

$$C_{0123} = T^{-1} * C_{abcd} * T$$

Realizando los cálculos correspondientes en forma analítica o a través de una herramienta que facilite el cálculo paramétrico, se obtiene la parte real de la Matriz de Componentes Simétricas C_{0123} donde los elementos de la diagonal principal son:

$$\begin{aligned} C_0 &= C - 2C_i - 2C_h - C_j \\ C_1 &= C + C_i + C_h - C_j \\ C_2 &= C + C_i + C_h - C_j \\ C_3 &= 2C_i + C - 2C_h + C_j \\ C_4 &= C - C_i + C_h + C_j \\ C_5 &= C - C_i + C_h + C_j \end{aligned} \quad (2.8)$$

Se debe notar que en las componentes simétricas o de secuencia de la ecuación número 2.8, las capacitancias C_1 , C_2 , C_4 y C_5 resultarían idénticas.

En forma gráfica, se puede identificar los elementos representativos de acoplamiento de una línea doble circuito simétrica, en términos de susceptancia: B_{co} o B_{cg} , B_{ci} y B_{ch} . La componente B_{cj} se puede considerar idéntica a B_{ci} para simplificar el análisis.

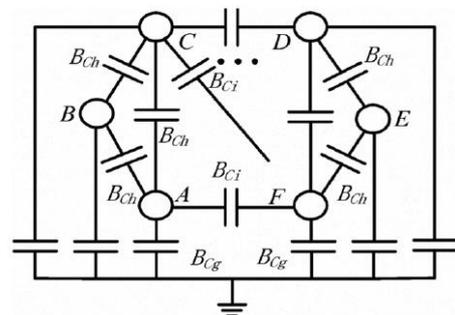


Figura 2.7. Susceptancias capacitivas LT Doble Circuito [6]

Con lo indicado, se pueden deducir las expresiones respectivas en términos de susceptancia.

2.3. Sintonización en líneas simple circuito

Se trata de obtener los valores de reactancia de neutro que permitan neutralizar o minimizar la corriente de arco

secundario. Se busca lograr valores en el orden de las decenas de amperios [1] y se toma como referencia los valores de SAC y TRV obtenidos en trabajos experimentales realizados por la consultora internacional CESI y en estudios efectuados por el consorcio HARBIN - CEPRI (China Electric Power Research Institute) que se muestran en las tablas 2.1 y 2.2 respectivamente.

Tabla 2.1. Valores máximos de tiempo muerto, I arco (SAC) y TRV arco según CESI [6]

Tiempo Muerto [ms]	SAC [A]	TRV [kV]	Xo/X1
300 -500	25	50	1.5 -2.75
>500	50	50	

Tabla 2.1. Gradiente de TRV, corriente de arco (SAC) y tiempos máximos según CEPRI [7]

Compensación Línea	TRV [kV/m]	SAC [A]	t* [s]	Velocidad viento	Probabilidad éxito [%]
No	10/16.8	18,4	0.25-0.4/ 0.5-0.7	1.5 - 2.5	90
Sí	20	35	0,2	1.5 - 2.5	90

* Tiempo límite de autoextinción de SAC

Ante la diferencia de los valores límites presentados entre una y otra referencia (CESI y HARBIN - CEPRI) se define utilizar la más restrictiva correspondiente a la Tabla 2.1. Posteriormente a la sintonización del inductor de neutro para un valor de SAC igual a cero (sintonización perfecta), es necesario ajustar el valor de reactancia (en ohms) para evitar problemas de sobrevoltajes en el punto de falla (TRV), preservando los límites establecidos en la tabla 2.1. Adicionalmente, se verifica que el voltaje máximo en el inductor de neutro, no sea mayor a 72 kV rms, valor adoptado del actual sistema de 500 kV [7].

Para un extremo de la LT, con un solo banco de inductores con inductor de neutro, las principales expresiones son:

$$\begin{aligned} X_{L1} &= X_p \\ X_{L0} &= X_p + 3X_n \\ X_{Ln} &= \frac{X_{L0} - X_{L1}}{3} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Para inductores en ambos extremos de la LT se tendrá:

$$X_p = 2X_{L1} \quad (2.10)$$

De igual forma para el inductor de neutro:

$$X_{Ln} = \frac{2(X_{L0} - X_{L1})}{3} \quad (2.11)$$

2.4. Sintonización en líneas doble circuito

Muchos de los criterios considerados en simple circuito, son plenamente aplicables para líneas doble circuito, con la diferencia sustancial de que en el caso de la segunda configuración se contabilizan un total de 15 capacitancias entre conductores [5]. Estas capacitancias deberán ser compensadas mediante inductancias shunt para lograr el objetivo de mitigar el SAC al máximo (sintonización). En este caso la transposición de líneas es un factor de peso para poder reducir la cantidad de capacitancias diferentes entre fases y entre circuitos.

Para los diferentes esquemas de 7, 8, 9 y 10 inductores se toma como base las ecuaciones de susceptancias previamente desarrolladas en base al método de las seis secuencias [6].

$$\begin{aligned} B_{L0} &= B_{L1} + 3(B_{Ch} + B_{Ci}) \\ B_{L1} &= -F_1[B_{Co} + 3(B_{Ch} + B_{Ci})] \\ B_{L3} &= B_{L1} + 3(B_{Ch} - B_{Ci}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Se desarrolla la formulación respectiva en diferentes esquemas de compensación con el objetivo de alcanzar el dimensionamiento del inductor de neutro que servirá tanto para la sintonización como para una posterior desintonización (ajuste de inductor de neutro), de una línea doble circuito.

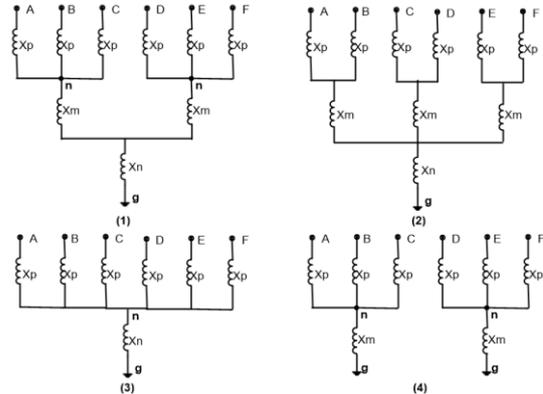


Figura 2.8. Esquemas de compensación analizados (Xp y Xn) [6]

3. APLICACIÓN PRÁCTICA

A continuación, se presenta la aplicación de la formulación desarrollada al sistema de interconexión Ecuador – Perú.

3.1. Aplicación en futura Interconexión 500 kV

La futura interconexión Ecuador – Perú está prevista con líneas de transmisión de 500 kV que conectarán la Subestación Chorrillos en Ecuador con la Subestación La Niña en Perú con una longitud total aproximada de 634 km. En este enlace también está previsto contar con dos nuevas subestaciones fronterizas denominadas Pasaje 500/230 kV en Ecuador y Piura Nueva 500/220 kV en Perú [8].

En la Fig. 3.1 se presenta un esquema unifilar correspondiente al caso de estudio planteado.

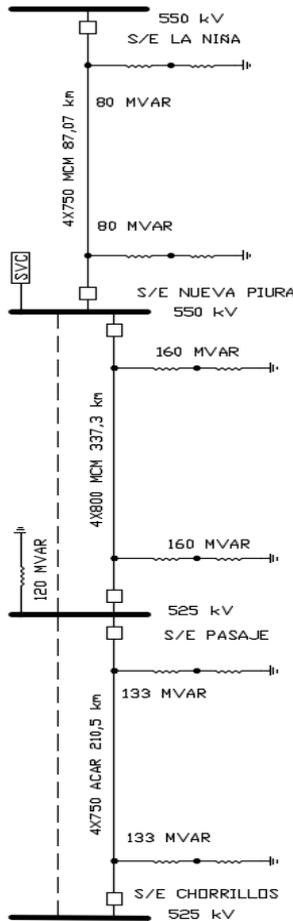


Figura 3.1. Configuración Unifilar Estudio de Anteproyecto Ecuador – Perú 500 kV [9]

Para fines prácticos se analiza la peor condición operativa en el sistema y que corresponde a los valores de transferencia en demanda máxima y mínima del período de estiaje (260 MW y 625 MW) según se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Transferencias tentativas Ecuador – Perú - Año 2020

Escenario de Demanda	Máximas Transferencias		
	Perú --> Ecuador	Ecuador --> Perú	
	Avenida (Perú) [MW]	Estiaje (Perú) [MW]	
Mínima	550	300	625
Media	520	200	250
Máxima	460	250	260

3.1.1. Alternativas de Compensación

Se aplica la formulación para la obtención de los valores de impedancia de inductores de fase y valores de sintonización de inductor de neutro, considerándose para el análisis esquemas de compensación inductiva de 4 inductores para líneas simple circuito; y, de 7, 8, 9 y 10 inductores para líneas doble circuito.

Para la sintonización del inductor de neutro (con susceptancia BL_n) se procede a determinar un valor tal que el valor de SAC y TRV puedan ser minimizados en caso de falla monofásica a tierra. En este contexto es importante verificar que el valor

de sobrevoltaje en el inductor de neutro no supere su valor de diseño de aislamiento y para todos los casos se considera que este valor no deberá ser mayor a 72 kV RMS de acuerdo a las recomendaciones de HARBIN - CSEPMI - CEPRI [7].

3.1.2. Análisis de Transitorios Electromagnéticos

Este análisis, que se realiza con el software ATP, permite desintonizar los valores de X_n o X_m (inductor de neutro). Se realiza en primer lugar el análisis de mitigación de SAC para la línea Chorrillos – Pasaje y Pasaje – Piura 500 kV considerándola en configuración simple circuito. A continuación se presentan los resultados de oscilación de corriente durante una falla monofásica a tierra en la fase A, al 50% de la línea en respuesta a la siguiente secuencia de eventos:

- Cortocircuito fase A a tierra: $t = 0.1126$ seg. (t de cruce por cero de V_a)
- Despeje de falla 100 ms después: $t = 0.2126$ seg. (fin arco primario)
- Inicio de corriente de arco secundario a $t = 0.2124$ seg.
- Autoextinción de arco secundario a $t = 0.4124$ seg. (fin arco secundario)
- Sistema listo para re-cierre contando con un TRV primer pico < 50 kV rms [6]

En la Figura 3.2 para la SAC se considera que la falla monofásica ha sido despejada y en consecuencia el arco secundario finaliza a $t = 0.41$ s, tiempo cercano al cruce de la señal de corriente por cero para tener enseguida su auto-extinción en forma natural al siguiente cruce por cero.

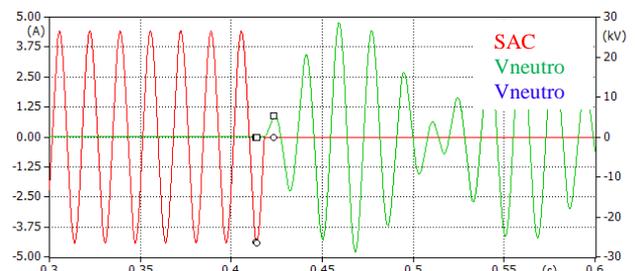


Figura 3.2. SAC (rojo) y TRV (verde) en fase A (LT Chorrillos - Pasaje). SAC fase A-tierra (último pico): 4.39 Ap; TRV fase A-tierra (primer pico): 5.39 kVp

En la gráfica 3.3 se verifica que los mayores voltajes en el inductor de neutro se tendrán varios ciclos después de la extinción de SAC (alrededor de los 0.458 s) y por tanto cuando el SAC es igual a cero amperios.

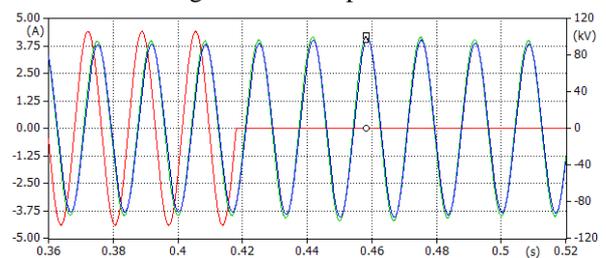


Figura 3.3. SAC (en rojo) debido a falla en fase A (LT Chorrillos - Pasaje). V_{neutro} máximo: 101.32 kVp

En la Tabla 3.2 se muestran los principales resultados de sintonización

Tabla 3.2. Resultados de sintonización para líneas simple circuito en EAV

LT Chorrillos - Pasaje 1 C					
No. Reactores	Xp	Xn	SAC	TRV	V _{máx} neutro
	[Ω]	[Ω]	[A rms]	[kV rms]	[kV rms]
4	2500	1700	3,10	3,81	71,64
LT Pasaje - Piura 1 C					
No. Reactores	Xp	Xn	SAC	TRV	V _{máx} neutro
	[Ω]	[Ω]	[A rms]	[kV rms]	[kV rms]
4	1562	1100	2,86	2,22	68,79

Con validación de SAC, TRV y voltajes de neutro, en la Tabla 3.3 se presenta el resumen de resultados de desintonización.

Tabla 3.3. Resultados de desintonización para inductor de neutro en esquema de 4 inductores (Líneas simple circuito en 500 kV)

LT SIMPLE CIRCUITO	Ubicación	Capacidad trifásica (MVAR)	Reactancia de reactor fase Xp (Ω)	Reactancia de reactor neutro Xn (Ω)	las o SAC (A rms)
Chorrillos - Pasaje	Extremo de línea Chorrillos	100	2500	800	16.80
210.5 km	Extremo de línea Pasaje	100	2500	800	
Pasaje - Piura	Extremo de línea Pasaje	160	1563	600	19.37
337.3 km	Extremo de línea Piura	160	1563	600	

Para la línea Chorrillos – Pasaje y Pasaje – Piura 500 kV considerándola en configuración **doble** circuito y para esquemas de compensación con 7, 8, 9 y 10 inductores por extremo, se modela y simula la aparición y extinción de arco secundario, registrándose los principales resultados en la Tabla 3.4.

Al igual que en el caso de simple circuito, se verifica que no se logra una sintonización perfecta (SAC igual a cero amperios) en ningún esquema de compensación aplicado. Pese a lo indicado, se verifica que se consiguen valores de SAC menores a 25 A rms (35.36 Ap) y valores de TRV menores a 50 kV rms (70.71 kVp), ésto con la configuración de 7, 8 y 9 inductores en extremos de las líneas. Estos valores avalan los resultados de sintonización del inductor de neutro con la formulación matemática propuesta.

Tabla 3.4. Resumen de resultados de sintonización de inductor de neutro para doble circuito

LT Chorrillos - Pasaje 2 C						
No. Reactores	Xp	Xm	Xn	SAC	TRV	V _{máx} neutro
	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[A rms]	[kV rms]	[kV rms]
7	2500	-	700	2,33	2,59	33,27
8	2500	295	-	6,12	6,55	30,43
9	2500	295	655	9,52	10,83	27,00
10	2500	295	655	28,38	33,06	34,39
LT Pasaje - Piura 2 C						
No. Reactores	Xp	Xm	Xn	SAC	TRV	V _{máx} neutro
	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[A rms]	[kV rms]	[kV rms]
7	1500	-	450	6,38	4,31	34,75
8	1500	135	-	17,38	11,80	28,01
9	1500	135	225	6,48	4,54	21,03
10	1500	200	225	40,90	29,30	28,62

En función de los resultados de sintonización de la Tabla 3.4, se establecen los esquemas de compensación inductiva de 7, 8 y 9 inductores como las mejores alternativas para mitigación de SAC. Sin embargo, por confiabilidad y seguridad se descarta la opción de 7 inductores, ya que cuenta con un inductor de neutro común para dos circuitos trifásicos.

Para doble circuito se privilegia el diseño del inductor de neutro que sea compatible con el desarrollo de la primera fase en simple circuito. Se determina entonces, para la desintonización, hacer un primer análisis de sensibilidad para el caso de 8 y 9 inductores, que consiste en la variación del valor del inductor de neutro y la verificación de su efecto en la SAC, el TRV y el voltaje de neutro. Se verifica en estos resultados, que para el caso de 9 inductores, los valores de reactancia Xn y Xm de desintonización son muy pequeños (rango de 35 a 325 Ω para la LT Pasaje – Piura 2C), lo cual dificultaría aprovechar la reactancia prevista de Xn para la primera etapa que se encontraría en un rango de 550 a 1300 Ω para una adecuada mitigación de SAC en el mismo enlace con solo un circuito; se presentan resultados relevantes al respecto en la Tabla 3.5, los valores sombreados no son permitidos.

En función del análisis, se determina que la compensación con 8 inductores es la más práctica y fácil de implementar para el futuro sistema Ecuador – Perú en EAV considerando que:

- El estudio de transitorios define condiciones adecuadas de SAC (< 25 A rms), TRV (< 50 kV rms) y de voltaje de neutro (< 72 kV rms) con 8 inductores por extremo de línea doble circuito.
- Los valores de reactancia de neutro fruto del análisis de sensibilidad con 9 inductores no son adecuados para una primera etapa de desarrollo de la interconexión en simple circuito.
- La configuración de compensación con 7, 9 y 10 inductores determina posibles problemas operativos debido a los enlaces entre circuitos a través de los inductores.

Tabla 3.5. Análisis de sensibilidad (LT Pasaje - Piura 500 kV)

9 REACTORES (2 CIRCUITOS)			8 REACTORES (2 CIRCUITOS)	
Reactancia de reactor Xm	Reactancia de reactor Xn	SAC	Reactancia de reactor neutro Xm	SAC
[Ω]	[Ω]	[A rms]	[Ω]	[A rms]
1	5	42,17	5	41,85
5	25	37,05	35	35,06
35	125	17,59	135	17,38
135	225	6,48	235	6,36
235	325	18,16	335	9,14
335	425	27,50	435	16,38
435	525	34,60	500	20,92
535	625	40,15	535	23,08
635	725	44,60	550	23,50
			600	26,23

3.1.3. Definición de configuración

A continuación se resume los resultados obtenidos del análisis de simulaciones de transitorios electromagnéticos y la definición de valores de inductores de fase y de neutro para mitigación de SAC. Los valores definidos establecen una alta probabilidad de re-cierre monofásico exitoso en un rango de tiempo muerto de 300 a 500 milisegundos (ms).

Simple circuito

Configuración de 4 inductores
(3 inductores de fase y uno de neutro por extremo)

Tabla 3.6. Parámetros de inductores shunt y neutro para LT Simple Circuito 500 kV

LT SIMPLE CIRCUITO	Capacidad trifásica [MVAR]	Reactancia de reactor de fase [Ω]	Reactancia de reactor de neutro [Ω]	Posición de Tap para reactor de neutro	SAC [A rms]	TRV [kV]
Chorrillos - Pasaje	100	2500	800	+20%	13,37	15
				+10%	15,04	17
				0	16,80	19
				+10%	18,90	22
				-20%	21,15	24
Pasaje - Piura	160	1500	550	+20%	16,56	12
				+10%	19,14	14
				0	21,99	16
				-10%	25,14	26

Doble circuito

Configuración de 8 inductores
(6 inductores de fase y dos de neutro por extremo)

Tabla 3.7. Parámetros de inductores shunt y neutro para LT Doble Circuito 500 kV

LT DOBLE CIRCUITO	Capacidad trifásica [MVAR]	Reactancia de reactor de fase [Ω]	Reactancia de reactor de neutro [Ω]	Posición de Tap para reactor de neutro	SAC [A rms]	TRV [kV rms]
Chorrillos - Pasaje 2C	2x100	2500	2x800	+20%	15,60	17,98
				+10%	13,88	15,95
				0	11,99	13,72
				+10%	9,91	11,29
				-20%	7,63	8,65
Pasaje - Piura 2C	2x160	1500	2x550	+20%	29,61	19,52
				+10%	26,92	17,66
				0	23,50	16,86
				-10%	20,68	13,45
				-20%	17,14	11,09

4. CONCLUSIONES

La formulación matemática identifica acoplamientos capacitivos fase - tierra y entre fases para líneas simple circuito en EAV, los cuales pueden ser adecuadamente compensados a través de bancos de 4 inductores (3 de fase y uno de neutro). En el caso de una línea doble circuito en EAV, con consideraciones de simetría perfecta de la línea se consideran 4 grupos de capacitancias (uno entre fases, dos entre circuitos y uno fase a tierra) los cuales deben neutralizarse con los tres tipos de reactancia inductiva que posee usualmente un banco de inductores (Xp, Xm y Xn).

En función del ejemplo práctico de aplicación para la interconexión Ecuador – Perú 500 kV, se corrobora que los valores de sintonización (reactancias) de inductor de neutro obtenidos, brindan resultados aceptables de mitigación de SAC lo cual se comprueba en los análisis desarrollados en ATP. De estos análisis, se determina que la configuración de 7 inductores, brinda los mejores resultados (corrientes cercanas a cero), le sigue la configuración de 9 inductores, luego 8 inductores y finalmente el esquema de 10 inductores que es una opción prácticamente descartada.

En relación a la conclusión previa, si bien la configuración de 7 inductores es la que brindaría mejores prestaciones de mitigación de SAC (en sintonización), la configuración de 8 inductores es la que presenta mayores facilidades para la implementación y que representaría menores inconvenientes operativos en caso de mantenimientos. En vista que los resultados de este último esquema se encuentran también dentro de los valores esperados y recomendables de SAC (A rms), TRV (kV rms) y voltaje máximo de neutro (kV rms), se concluye que esta es la mejor alternativa para las dos etapas de desarrollo del proyecto de interconexión Ecuador – Perú 500 kV.

El análisis de sensibilidad en cuanto a los valores de reactancia de neutro a utilizarse, determinó la necesidad de definir un esquema de taps, para lo cual se plantea en este



trabajo una configuración de hasta dos pasos para arriba y uno por abajo (10% por paso). Esto es necesario para precautelar cualquier ajuste posterior, debido a variaciones en las longitudes finales de las líneas de transmisión. Esto también se valida considerando que los análisis determinan que los incrementos de longitud de línea afectan en general al incremento de la corriente de arco secundario debido al acoplamiento inductivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CIEEP, Control de Investigaciones Eléctricas y Electrónicas del Perú, “Control de Arco Secundario en Fallas Monofásicas” [online].
- [2] K. Prabha, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Palo Alto, California, Año 2001, Pgs. 200-215, 629-630
- [3] Masayuki Kosakada, Toshiba Corporation, IEEE PES Switchgear Committee, CIGRE, “On behalf of CIGRE WG A3.22/28”, Octubre 2012.
- [4] E.W. Kimbark, “Suppression of Ground Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors”, IEEE, March 1964, Pgs. 285 - 290.
- [5] Edward W. Kimbark, “Selective-Pole Switching on Long Double-Circuit EHV line”, IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, January-February 1976.
- [6] H. Liu, J. Wen, M. Han, H. Zhang, X. Xiao y X. Chen, “Research and Design about the Neutral Reactors Compensation on UHV Double – Circuit Lines”, Proceedings of the 2009 IEEE, International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun China, August 9-12, Pgs. 3050 - 3054.
- [7] L. Dután, W. Dután, “Sintonización de reactores de neutro en líneas de 500 kV del sistema eléctrico ecuatoriano”, Paper EPN – XXVI Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Año 2016.
- [8] Harbin Electric International Co. Ltd. (HARBIN), Central Southern China Electric Power Design Institute (CSEPMI), China Electric Power Research Institute (CEPRI), “Electromagnetic Transient Analysis on 500 kV and 230 kV – Ecuador Transmission Project”, Septiembre 2013, Pgs. 5 – 60.

- [9] Leme Engenharia, CELEC EP TRANSELECTRIC, “Anteproyecto Interconexión Ecuador – Perú 500 kV”, Ministerio de Energía del Perú, Documento No.: 8378-LEME-003, Versión: 1, Abril 2016.

- [10] J.H. di Salvo, R.R. Villar, “Estudio de Arco Secundario en Líneas de Extra Alta Tensión”, CAUE, Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP, Revista Iberoamericana del ATP, Año 2, Vol. 1, Número 1, Marzo 1999.

- [11] E. Nashawati, N. Fischer, B. Le, D. Taylor, “Impacts of Shunt Reactors on Transmission Line Protection”, Oncor Electric Delivery y Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2011, Pg. 1-16.

- [12] CELEC EP TRANSELECTRIC, “Filosofía y Guía de aplicación de Protecciones”, Subgerencia de Operación y Mantenimiento, Gestión de Protecciones Instructivo 01, Marzo 2017, Pg. 1-14.



Jhery Javier Saavedra.- Nació en la ciudad de Loja, Ecuador en 1978. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito en el año 2003 y el de Magíster en Ingeniería Eléctrica en la misma universidad el año 2018. Actualmente trabaja en la empresa pública de transmisión de energía CELEC EP Transelectric en la cual colabora en el Departamento de Planeamiento de Expansión de la Transmisión. Sus campos de especialización son la planificación de redes, estudios eléctricos y análisis técnicos - económicos.



Hugo Neptalí Arcos.- Nació en Quito, Ecuador, en 1972. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en el año 1998, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan – Argentina en 2005. Actualmente trabaja en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional de Quito como Profesor a Tiempo Completo. Sus áreas de especialización son máquinas eléctricas, modelación de sistemas de control de generadores y estudios de estabilidad de sistemas de potencia.