

Impacto de la compensación serie en la red de 765 kV del Sistema Eléctrico Nacional

Impact of serial compensation on the 765 kV grid of the National Electric System

Barroso, Alexis

Universidad Católica Andrés Bello y Universidad Central de Venezuela
Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería-CIDI
alexisbarroso@gmail.com
abarroso@ucab.edu.ve

DOI: <https://doi.org/10.53766/CEI/2022.43.03.03>

Resumen

La compensación en serie es un medio eficaz y rentable para mejorar la capacidad de transmisión de un sistema de potencia. Con la colocación condensadores en serie con la reactancia de la línea se puede aumentar considerablemente la capacidad de las líneas existentes, lo que reduce la necesidad de construir nuevas. La instalación de la compensación en serie suele ser menos costosa y requiere menos tiempo que la construcción de nuevas líneas. El documento presenta el estudio en régimen permanente, utilizando el programa NEPLAN Electricity V. 5.5.5, sobre el impacto de compensar algunas líneas del Sistema Eléctrico Nacional en un 25%. Se concluye que la puesta en servicio de la compensación capacitiva serie en líneas a 765 kV Guri - Malena, Malena - San Gerónimo y San Gerónimo - La Arenosa trae beneficios al sistema, incrementando los límites de transmisión de Exportación Guayana e Importación Centro, lo representa un aumento de 600 MW y 570 MW respectivamente.

Palabras clave: Compensación serie, límite de transmisión, capacitancia, reactancia.

Abstract

Series compensation is an efficient and cost-effective means of improving the transmission capacity of a power system. By placing capacitors in series with the line reactance, the capacity of existing lines can be increased considerably, reducing the need to build new ones. Installing series compensation is typically less expensive and time consuming than building new lines. The document presents the study in permanent regime, using the NEPLAN Electricity V. 5.5.5 program, on the impact of compensating some lines of the National Electric System by 25%. It is concluded that the commissioning of series capacitive compensation in lines at 765 kV Guri - Malena, Malena - San Gerónimo and San Gerónimo - La Arenosa brings benefits to the system, increasing the transmission limits of Guayana Exportation and Central Importation, represents an increase of 600 MW and 570 MW respectively.

Keywords: Series compensation, transmission limit, capacitance, reactance.

1 Introducción

En un sistema eléctrico de potencia la construcción de nuevas líneas de transmisión puede no ser la mejor manera para aumentar la capacidad de transporte de energía (Grünbaum y col., 2010), ya que los costos son considerables, además de estar sujetas a restricciones medioambientales. Por ello, una alternativa es la compensación serie.

Dicha compensación consiste en reducir la reactancia equivalente de una línea, esto se logra con incorporación de una reactancia capacitiva en serie con la reactancia inductiva de la misma. Lo que trae como beneficio que la capacidad de transporte de energía eléctrica pueda incrementarse.

Por lo tanto, cuando se insertan condensadores en serie en el sistema de transmisión la cargabilidad de la línea aumentará debido a la disminución de la impedancia. Para estos proyectos el valor de la reactancia capacitiva no puede exceder el 50% de la total de la línea, ya que para grados de compensación superiores la corriente y la potencia transferidas serían extremadamente altos y sensibles a cambios. Consecuentemente, operar en dichas condiciones sería potencialmente riesgoso e inestable. Además, un grado alto de compensación aumenta la posibilidad de la aparición del fenómeno de resonancia subsincrónica y complica considerablemente la coordinación de protecciones (Quiroz y col., 2018; Anderson y col., 1996).

En tal sentido, debido a la exigencia creciente en la red troncal de transmisión del Sistema Eléctrico Nacional, SEN, se busca alternativas rápidas y económicas que favorezcan una mayor transferencia de energía desde Guayana al resto del país. Estas alternativas son: construcción de nuevas líneas a 765 kV, instalación de plantas térmicas al norte del país y compensación serie de las líneas existentes a 765 kV. Las dos primeras alternativas son costosas y requieren tiempo para su ejecución, siendo la compensación serie una alternativa interesante a analizar. Dicho análisis se enfoca en el impacto en el incremento en la transmisión de potencia.

La determinación de los límites de transferencia de potencia es un análisis esencial dentro del estudio de los grandes sistemas eléctricos de potencia, ya que permite establecer las fronteras entre puntos de operación seguros y confiables y puntos de operación que pongan en riesgo la integridad del sistema eléctrico.

Objetivo del trabajo es Analizar el impacto de la compensación serie en líneas a 765 kV, sobre los límites de transmisión estáticos del sistema eléctrico nacional.

2 Marco Teórico

La transferencia de potencia activa a través de una línea de transmisión puede ser expresada mediante la ecuación (1) (Kundur 1994):

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_L} \cdot \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \quad (1)$$

Donde:

P_{ij} es el flujo de potencia activa en la línea

V_i es la tensión del extremo emisor

V_j es la tensión del extremo receptor

X_L es la reactancia de la línea de transmisión

$\text{sen}(\delta_i - \delta_j)$ es el seno de la diferencia de ángulo entre los extremos de la línea.

Al reducir la reactancia del nexo se puede aumentar la potencia transmitida por una línea, al colocar una capacitancia X_c a dicho nexo. De esta forma se evita la necesidad de invertir en nuevas líneas de transmisión (Grünbaum y col., 2010), lo que lleva a una nueva ecuación de transferencia de potencia de la forma como se presenta en (2) (Anderson y col., 1996):

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_L - X_c} \cdot \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

2.1 Descripción del Sistema Eléctrico Bajo Estudio

El Sistema Eléctrico Nacional interconecta los sistemas de generación de las diferentes regiones a través de la Red Troncal de Transmisión (RTT), Figura 1, conformada principalmente por líneas de 765 kV, 400 kV y 230 kV, destacándose el enlace Guayana-Centro Occidente de 765 kV, que permite la exportación de energía desde la Región de Guayana al resto del país.

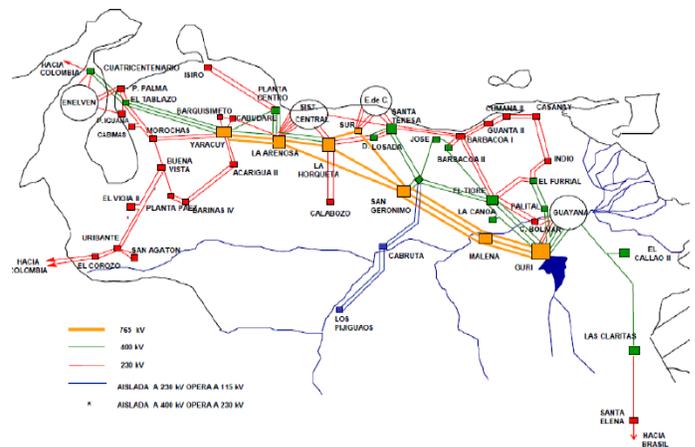


Fig. 1: Red Troncal de Transmisión del SEN (MPEE, 2013)

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) está dividido en ocho áreas operativas, definidas por las regiones en las que operaban las distintas empresas públicas y privadas que luego pasaron a formar parte de CORPOELEC, las cuales se caracterizan por disponer de recursos de generación y transmisión propios, así como nexos de interconexión entre ellas. La gestión y operación coordinada del sistema es realizada a través de los despachos de carga regionales, bajo la responsabilidad y dirección general del Centro Nacional de Despacho (CND) (MPEE, 2013).

Para el final del año 2013, según indicadores del “Anuario Estadístico del Sector Eléctrico Venezolano”, se disponía de una capacidad de generación de energía eléctrica instalada de 30.291 MW, de los cuales 14.879 MW pertenecen a plantas hidráulicas, 15.301 MW a plantas térmicas y los 111 MW restantes a sistemas de fuentes alternas de energía (térmicas aisladas, centrales micro hidroeléctricas, parques eólicos, sistemas fotovoltaicos, etc.) que sirven a zonas aisladas o no conectadas al SEN; razón por la cual estos últimos no forman parte del SIN (MPEE, 2013).

3 Procedimiento Experimental

La determinación de límites de transferencia de energía eléctrica es una tarea fundamental para garantizar la operación segura de un sistema eléctrico de potencia. Para evaluar el impacto de la compensación serie en el Sistema Eléctrico Nacional esta investigación se basó en un conjunto de simulaciones realizadas a partir del software de sistemas de potencia NEPLAN Electricity versión 5.5.5, una herramienta para análisis de sistemas eléctricos usada en planificación de redes de transmisión y distribución, sistemas de energías renovables, smart grids y plantas industriales y de generación.

En cuanto al Sistema Eléctrico Nacional en la Figura 2 se puede observar cómo se encuentran distribuidas las regiones operativas del país y los principales intercambios asociados a las regiones Guayana (Exportación Guayana) y Centro (Importación Centro), donde se define cada una de ellas y sus puntos de interconexión entre las distintas áreas.

Se puede observar que el sistema a 765 kV está compuesto por siete subestaciones y trece líneas de transmisión que interconectan las dos regiones operativas antes mencionadas. Además, de un subsistema a 400 y 230 kV. Guri es la subestación más al sur, donde se interconectan las plantas Guri, Caruachi y Macagua. Desde dicha subestación se inicia la transmisión hacia el norte y centro del país.

Los intercambios de potencia Exportación Guayana e Importación Centro posee unos límites máximos de transferencia de potencia, sin la compensación serie son de 7.875 MW y 5.360 MW respectivamente (Quiroz y col., 2018).

Estos límites de transmisión son definidos en base a los criterios mínimos de estabilidad establecidos por la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC) y dependen directamente de la demanda presente y de la cantidad de unidades de generación operando en la región Centro del país (Quiroz y col., 2018).

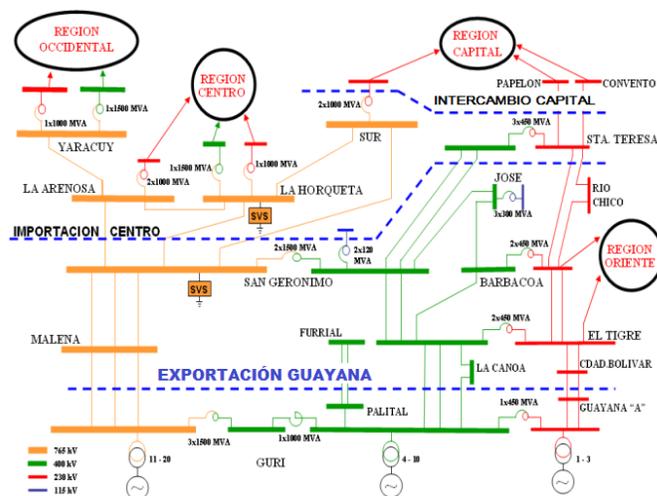


Fig. 2: Intercambios principales potencia del SEN (Caraballo y col., 2012)

En condiciones normales y emergencia, la máxima variación de tensión nominal permitida es de 5 % en niveles de tensiones mayores o iguales a 230 kV y menor estricto para el nivel de 765 kV. Además, no se permite sobrecargas de ningún elemento del sistema de potencia, ni tampoco sobrecargas en líneas de transmisión por encima de su capacidad térmica (IEEE Std 738 2002).

La cargabilidad de una línea de transmisión indica la capacidad de potencia que puede transmitir bajo condiciones de operación aceptables. La operación coordinada del SEN está destinada a cumplir objetivos de seguridad y economía mediante la realización de las siguientes funciones:

- Operación de la RTT a escala nacional (765, 400 y 230 kV).
- Coordinación de la operación de las unidades de generación y asignación de la reserva.
- Control de los niveles de voltaje.
- Coordinación de los trabajos de mantenimiento en la RTT.
- Programación, control y facturación de los intercambios de potencia y energía entre las empresas.
- Realizar acciones correctivas en situaciones de emergencia.

Las condiciones con las que se determinó el incremento del límite de transmisión de Exportación Guayana e Importación Centro a 765 kV en las líneas Guri - Malena, Malena - San Gerónimo y San Gerónimo - La Arenosa fueron:

- La evaluación de la máxima transferencia desde la fuente principal, Guayana, hacia el resto del sistema interconectado nacional se basa en maximizar el intercambio definido como Exportación Guayana e Importación Centro, definido con aquel punto donde deja de convergen el flujo de carga.

- Después, se compensaron en serie, K_{se} , al 25%, de la reactancia de cada una de las líneas Guri - Malena, Malena - San Gerónimo y San Gerónimo - La Arenosa a 765 kV.
- Con el sistema compensado, se evaluó nuevamente la máxima transferencia de potencia para visualizar el comportamiento de la compensación serie en régimen permanente, al ejecutar nuevamente los flujos de carga (Ghahremani y col.,2013).

4 Discusión y Resultados

Para el caso base y el escenario del sistema compensado, se realizaron simulaciones para la condición de carga máxima. El objetivo era evaluar el impacto de la compensación en serie en el flujo de energía en los corredores de 765 kV entre las subestaciones Guri - Malena, Malena - San Gerónimo y San Gerónimo - Arenosa de manera de determinar los intercambios de Exportación Guayana e Importación Centro.

Dichos estudios se llevaron a cabo utilizando el software Neplan vs 5.5.5. Los criterios para el análisis del flujo de carga son que las tensiones deben permanecer en el rango de 0,95 y 1,045 pu para sistemas a 765 kV (IEC, 2009).

Para el sistema sin compensar se llegó a un límite expresado en la Tabla 1, punto crítico donde el flujo de carga deja de converger. Para la convergencia se ajustaron los voltajes de la barra Guri a una tensión de 780 kV, definida como barra de referencia, además de colocar los equipos asociados a los sistemas de compensación capacitiva en derivación o shunt, de manera de aumentar y soportar los voltajes en las subestaciones de 765 kV de la red troncal de transmisión.

Tabla 1: Límites estático del SEN (Elaboración propia)

Límites de Transmisión	No Compensado (MW)
Exportación Guayana	8.602
Importación Centro	5.243

Las tensiones en dicho escenario se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: Tensiones del SEN sin compensación serie (Elaboración propia)

Subestación	V (kV)	V (pu)
Guri B	780	1,02
Malena	774	1,01
San Gerónimo	772	1,01
Arenosa	775	1,01
Horqueta	770	1,01
OMZ	768	1
Yaracuy	768	1

Según las tensiones resultantes, a nivel de operativo, maniobrar en dicho estado no es recomendable, ya que, ante la ocurrencia

de una perturbación, con el sistema de potencia operando por encima de los límites de transmisión de Exportación Guayana e Importación Centro, y sin disponer de suficiente capacidad de regulación de reactivos, se podría originar una inestabilidad o caída del sistema.

Luego, se procedió a compensar las líneas descritas al 25% de la reactancia inductiva correspondiente a cada una de los sistemas descritos anteriormente, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Parámetros de Compensación Serie en Líneas a 765 kV de la RTT del Caso Base con K_{se} al 25 % (Elaboración propia)

Líneas	Longitud (Km)	$X_L \left(\frac{\Omega}{km} \right)$	$X_L (\Omega)$	$X_{cse} (\Omega)$	$C_{se} (\mu F)$
Guri B - Malena 1	161	0,3417	55,01	13,75	192,88
Guri B - Malena 2 y 3	153	0,3417	52,28	13,07	202,97
Malena - San Gerónimo 1	226	0,3417	77,22	19,31	137,41
Malena - San Gerónimo 2 y 3	225	0,3417	76,88	19,22	138,02
San Gerónimo - La Arenosa	270	0,3417	92,25	23,06	115,01

De estas simulaciones se hallaron los límites de Exportación Guayana e Importación Centro del sistema compensado en serie, presentados en la Tabla 4.

Tabla 4: Límites Estáticos del SEN compensado (Elaboración propia)

Límites de Transmisión	Compensado (MW)
Exportación Guayana	9.334
Importación Centro	5.950

El límite estático de Exportación Guayana asciende a 9.334 MW, lo cual corresponde a un incremento de 9% con respecto al límite utilizado en la actualidad. En cuanto al límite de Importación Centro resultante es de 5.950 MW, representando un 13,5% con respecto al límite utilizado actualmente.

En cuanto a los perfiles de tensión en las barras estudiadas mejoran con respecto al caso base, caso no compensado. Dichas tensiones se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Tensiones del SEN con compensación serie (Elaboración propia)

Subestación	V (kV)	V (pu)
Guri B	793	1,04
Malena	782	1,02
San Gerónimo	787	1,03
Arenosa	785	1,03
Horqueta	782	1,02
OMZ	782	1,02
Yaracuy	779	1,02

5 Conclusiones

Del estudio planteado sobre compensación serie en el sistema de transmisión de 765 kV de la red troncal de transmisión en las líneas Guri – Malena, Malena – San Gerónimo y San Gerónimo - Arenosa se puede concluir:

- La capacidad de transferencia aumenta sin necesidad de construir nuevas líneas.
- La instalación de la compensación en serie suele ser menos costosa y requiere menos tiempo que la construcción de nuevas líneas o sistemas de generación al norte del país.
- Para proporcionar capacidad de transferencia adicional los condensadores en serie podrían ser una solución viable a corto plazo, siempre y cuando no se sobrepase el límite térmico de los elementos del sistema de potencia.
- El perfil de tensiones del sistema compensado mejora con respecto al caso base, ya que el capacitor serie provee potencia reactiva a la línea de transmisión.

Referencias

- Anderson, P; Farmer, R. (1996). *Series Compensation of Power Systems*. California: Pblsh Inc.
- Carballo, J. y Bermúdez, O. (2012). Herramienta Computacional para Monitorear la Estabilidad de Tensión en Sistemas de Potencia Empleando Tecnología de Medición Sincronizada de Fasores. *Ciencia y Tecnología*, 16 (63), pp. 93-103. <http://ve.scielo.org/pdf/uct/v16n63/art03.pdf>
- Commission Internacional of Energy (2009). *IEC 60038 Standard Voltage*. Geneva Switzerland: IEC.
- Dy Liacco, T. (1974). Real - Time Computer Control of Power System. Proceedings of the IEEE, 62 (7), pp. 884 – 891. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1451471&isnumber=31182>
- Grünbaum, R., Halvarsson, P. y Jones, P. (2010). Series Compensation for Extended Utilization of Power Transmission Systems. IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 1(1), pp.1-5. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5727998&isnumber=5727990>
- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. Canada: McGraw Hill.
- Ministerio Popular de Energía Eléctrica. (2013). Plan de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2013-2019 (PDSEN). Caracas, MPEE. <http://mppee.gob.ve/download/planes/PDSEN%20web.pdf>
- Quiroz, A., Orea, E. y Sorrentino, E. (2018). Analysis of Auto-Reclosing Options in Venezuelan 765 kV System Including Series Compensation. *IEEE ANDESCON 2018*, pp. 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8564618&isnumber=8564560>
- Ghahremani, E. y Kamwa, I. (2013). Optimal placement of multiple-type Facts devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. *Power Systems, IEEE Transactions*, 28 (2), pp. 764-778. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6269908&isnumber=6504806>
- Christa, S. y Venkatesh, P. (2007). Application of particle swarm optimization for optimal placement of unified power flow controllers in electrical systems with line outages. *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Computational Intelligence*, 1(1), pp. 119-124. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4426564&isnumber=4426531>
- Electrificación del Caroní C.A. Sistema de Transmisión Troncal e Interconectado. Antigua Web EDELCA: https://web.archive.org/web/20090419055454if_/http://www.edelca.com.ve/transmision/descargas/transmision_troncal.pdf.
- Narain, G. y Hingorani, L. (2000). *UNDERSTANDING FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: IEEE Power Engineering Society.
- Van Cutsem, T. y Vournas, C. (1998). *Voltage Stability of Electric Power Systems*. USA: Springer Science and Business Media Dordrecht.

Recibido: 02 de marzo de 2022

Aceptado: 25 de junio 2022

Barroso, Alexis: Esp. en Sistemas Eléctricos de Potencia (UCV), Maestría en Ingeniería Eléctrica (UCV), Ingeniero Electricista (USB). Ha trabajado como ingeniero de operaciones y planificación en el Centro Nacional de Despacho (CND) y

asesor en el sector eléctrico venezolano. Actualmente profesor investigador CIDI-UCAB y UCV Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Potencia. Correo electrónico: alexisbarroso@gmail.com y abarroso@Ucab.edu.ve. Líneas de investigación: flujos de carga en redes de distribución, estabilidad de voltaje y energías alternativas.



<https://orcid.org/0000-0002-5109-9077>