

Artículo Original

Energización de la Línea de Transmisión de 500kV Ayolas – Villa Hayes desde la central hidroeléctrica Yacyretá. Estudios de transitorios electromagnéticos y electromecánicos Energization of the 500kV Transmission Line Ayolas - Villa Hayes from the hydroelectric power station Yacyretá. Studies of electromagnetic and electromechanical transients

© **Fariña Martínez, R.D.^{1,2}; Rodríguez Buzarquis, E.E.^{1,2}; Delgado Alcaraz, L.E.^{1,2}; Alonso Cardozo R.F.^{1,3}**

¹Administración Nacional de Electricidad (ANDE), España n°1268, B° Las Mercedes, Asunción, Paraguay

²Universidad del Cono Sur de las Américas (UCSA). España c/ Brasil, Asunción, Paraguay

³Universidad Nacional de Itapúa (UNI), Abg. Lorenzo Zacarías N° 255, Encarnación, Paraguay

RESUMEN

Este trabajo técnico presenta un resumen de los estudios de energización en "Régimen Transitorio y Dinámico" considerando la puesta en servicio de la Línea de Transmisión de 500kV entre las Estaciones AYOLAS y VILLA HAYES con 350km de extensión (sin contar con reactores en el extremo VHA). Con la puesta en servicio de esta Línea de Transmisión de 500kV, se pretende interconectar bloques de carga -previamente energizados en niveles de 220kV-, alimentados desde la Central Hidroeléctrica YACYRETÁ (compartida entre Paraguay y Argentina).

Palabras clave: Transitorios Electromagnéticos; Transitorios Electromecánicos; Efecto Ferranti; Sobretensiones Temporarias.

ABSTRACT

This technical work presents a summary of the energization studies in "Transient and Dynamic Regime" considering the commissioning of the 500kV Transmission Line between AYOLAS and VILLA HAYES Stations with 350km extension (without reactors at the HAV end). With the commissioning of this 500kV Transmission Line, it is intended to interconnect load blocks - previously energized at 220kV levels -, fed from the YACYRETÁ Hydroelectric Power Plant (shared between Paraguay and Argentina).

Keywords: Electromagnetic Transients; Electromechanical Transients; Ferranti Effect; Temporary Overvoltages.

INTRODUCCIÓN

Cuando es proyectada la expansión de la operación de un sistema eléctrico, este debe acompañar el desarrollo de una nación. Cada elemento que conforma el sistema a expandir debe ser adjuntado con los respectivos estudios que justifiquen la inclusión del mismo.

***Autor Correspondiente: Liz Delgado.** Administración Nacional de Electricidad (ANDE), España n°1268, B° Las Mercedes, Asunción, Paraguay
Correo electrónico: lizada15@gmail.com

Fecha de recepción: Diciembre 2019 Fecha de aceptación: Abril 2020



Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons

Cuando una Línea de Transmisión (LT) es proyectada, la puesta en marcha de esta, en términos de energización, operación, protección y aspectos energéticos o económicos, deben justificar el alcance de la misma. Los estudios (inherentes a la energización y operación) de régimen permanente, transitorios electromagnéticos y electromecánicos, deben predecir el comportamiento y el rendimiento de la operatividad de la LT. En algunos casos debido a asuntos políticos, económicos, insuficiencia de tiempo o situaciones fuera del contexto técnico, no permiten completar todos los trabajos asociados a la puesta final en servicio de la obra principal. Independientemente de las situaciones mencionadas con anterioridad, por cuestiones técnicas es necesario energizar y operar el equipo en esa etapa provisional.

La LT 500kV AYO-VHA y sus elementos asociados, emergió como un nexo para la integración de los sistemas eléctricos de Argentina, Brasil y Paraguay. Estudios de tal interconexión energética regional, se encuentran en desarrollo. No obstante, la LT puede ser operada en su condición transitoria, para obtener el mayor provecho de la misma en el sistema de potencia de Paraguay. Este estudio aporta información importante y relevante para la operación de la LT dentro del sistema de potencia de la ANDE.

Finalmente, en este trabajo técnico se presentan los resultados de los estudios de la energización y operación (desde la CH-YAC), de la LT de 500kV AYO-VHA, con una extensión aproximada de 350 km, inyectando en su extremo terminal alrededor de 350MVAR, debido principalmente al efecto Ferranti.

1. LT DE GRANDES EXTENSIONES Y EFECTO FERRANTI

En condiciones donde una LT está operando en antena o en periodos de carga leve (valle), la tensión en el terminal receptor podría ser mucho más elevada que la del emisor. Este fenómeno es denominado efecto Ferranti, convierte a una LT en una especie de "generadora de potencia reactiva" no lineal en función de la tensión [1].

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c} \quad (1)$$

La ecuación (1) describe que la Potencia reactiva capacitiva (VAr) es igual al cociente entre el cuadrado de la Tensión (Volts) y la reactancia capacitiva (ohm) de la LT.

El efecto "Ferranti" describe el extraño fenómeno de que bajo ciertas condiciones de frecuencia y longitud de línea se puede observar un aumento de tensión en una línea de transmisión con extremo abierto, en relación con una tensión de entrada sinusoidal. El efecto fue descubierto a fines del siglo XIX durante la instalación de un sistema de distribución de sistemas de CA con niveles de media tensión y transformadores reductores. En un sistema de transmisión de CA, Ferranti observó que al agregar secciones de distribución adicionales, es decir, al aumentar la longitud total de la línea de transmisión, la tensión en la línea aumentaba localmente (Figura 1). De hecho, el fenómeno fue primeramente observado en la LT Deptford - London, que en algunas lámparas de fibra de carbono aumentaron la luminosidad cuando fueron agregados secciones en la distribución. Debe tenerse en cuenta que el sistema tenía una carga de solo un par de bombillas de bajo consumo mientras que la potencia del

generador excedía ligeramente los 935 kW. Así, Ferranti determinó que el efecto se acentuaba con la LT abierta en su extremidad [2].



Figura 1: LT entre nodos 'A' y 'B', separadas por una distancia eléctrica 'd'.

2. TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

El análisis transitorio (o simplemente transitorios) de los circuitos eléctricos es tan importante como el análisis de estado estacionario. Cuando ocurren estos transitorios, las corrientes y los voltajes en algunas partes del circuito pueden exceder varias veces los valores de comportamiento normal, y en consecuencia dañar el equipo. El estado transitorio puede ser distinguido de su estado estable, ya que durante los transitorios, magnitudes como corrientes, voltajes, potencia y energía, se modifican en el tiempo, mientras que en estado estacionario permanecen invariables, es decir, constante (en operación de CC) o periódica (en operación de CA) que tienen ángulos de fase y amplitudes constantes. La causa de los transitorios pueden ser cualquier tipo de cambio en los parámetros del circuito y/o en la configuración, que generalmente ocurre debido a la conmutación, cortocircuito y/o circuito abierto, cambios en la operación de las fuentes, etc. Las mudanzas de las corrientes y los voltajes, durante los transitorios no son instantáneas y tienen un tiempo de retardo, a pesar de que son extremadamente rápidos con una duración de milisegundos o incluso microsegundos. Sin embargo, estos cambios rápidos tampoco son instantáneos (o abruptos) ya que los procesos transitorios se logran mediante el intercambio de energía, que generalmente se almacenan en el campo magnético de las inductancias y/o en el campo eléctrico de capacitancias. Cualquier cambio en la energía no puede ser abrupto, de lo contrario dará como resultado una potencia infinita (ya que la potencia es una derivada de la energía, $p = dw / dt$), que está en contraste con la realidad física. Todos los cambios transitorios, que también se llaman respuestas transitorias (o simplemente respuestas), se desvanecen y, después de su desaparición, se establece una nueva operación en estado estacionario. A este respecto, es posible decir que el transitorio describe el comportamiento del circuito entre dos estados estables: uno anterior, que era anterior a los cambios, y uno nuevo, que surge después de los cambios [3].

2.1. ETEmg de la LT 500kV AYO-VHA desde la CH-YAC

Este trabajo, donde se abordan estudios de: energización, estudios de reconexión y rechazo de carga; debe desarrollarse dentro de las actividades del diseño básico de los siguientes objetivos principales [4]:

- Evaluar las sobretensiones transitorias máximas que se impondrán en las subestaciones y los terminales de las líneas de transmisión;

- Evaluar las energías disipadas en los descargadores de línea, considerando el dimensionamiento de dicho equipo desde el punto de vista de la capacidad de absorción de energía (kJ / kV);
- Verificar la adecuación de la coordinación del aislamiento de las estructuras de transmisión de picos de maniobras, con la integración del proyecto básico.

2.2. CONSIDERACIONES PRINCIPALES

Las maniobras de energización de la LT 500kV AYO-VHA, fueron analizadas en las barras de la ES-AYO y ES-VHA, la verificación de posibles sobretensiones temporarias y/o permanentes de los equipos involucrados de la LT siempre con fuente de la CH-YAC, como se muestra en la figura 2. Se supone que los fenómenos analizados cumplan con los requisitos básicos en términos de energización transitoria de líneas de transmisión eléctrica. Los casos de energización de la LT, serán hechos a través de un programa computacional de transitorios electromagnéticos (EMTP – Electromagnetic Transient Program).

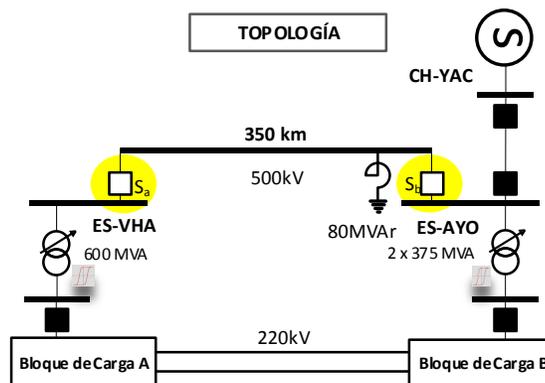


Figura 2: Circuito equivalente utilizado para los ETEmg de la LT 500kV AYO-VHA.

En la Figura 2, se observa el circuito equivalente a ser utilizado en los ETEmg. Se mostrarán los resultados obtenidos de la energización de la LT desde cada extremo terminal a través de los interruptores 'S_a' y 'S_b'.

Los criterios de tensión adoptados fueron:

- En barras de 500kV, para sobretensiones transitorias de maniobra (SIL), se admite un nivel de aislamiento de 1.175kV con un margen del 15%, es decir, los valores máximos de pico obtenidos en las simulaciones de maniobras no deben superar los 999kV.
- En barras de 220kV, se admite un SIL de 1.050kV con un margen del 15%, es decir, los valores máximos de pico no deben superar los 892kV.
- Los voltajes máximos de régimen permanente deben ser inferiores a 1.100 p.u. en barras cercanas a la generación.

- En los casos de estudio de energización de la LT fueron abordados energizaciones sistemáticas, estadísticas y finalmente determinísticas para obtener las mayores solicitaciones de tensión en las barras involucradas.

Secuencia de energización de los ETEmg de los diferentes estados:

- Las energizaciones son realizadas de forma secuencial y separada.
- Los casos de estado estacionario son análogos a los del régimen transitorio.
- El sistema es alimentado desde la CH-YAC (Figura 2).
- La LT 500kV AYO-VHA es energizada desde el interruptor ' S_a '.
- La LT 500kV AYO-VHA es energizada desde el interruptor ' S_b '.
- Los Bloques de Carga ' A ' y ' B ' son interconectados a través de los interruptores S_a y S_b .

Condiciones iniciales de los casos de flujo de potencia

- La CH-YAC alimenta al Sistema Argentino de Interconexión (SADI) y al Sistema Interconectado Nacional de Paraguay (SIN) antes de la energización de la LT.
- La tensión de pre-energización en barras de 500kV de la CH-YAC está en el orden de los 0,950 p.u. (475kV).
- Los bloques de carga ' A ' y ' B ' se encuentran previamente energizados a niveles de 220kV a través de los Transformadores de 500/220kV de 375 MVA c/u de la ES-AYO alimentando al Sub-sistema Sur y parte del Sub-sistema Metropolitano.
- El extremo terminal de la LT en la ES-AYO cuenta con reactor de neutro de 80MVA y está conectado a la barra de 500kV en dicha Estación.
- El Transformador de 500/220kV de 600MVA de la ES-VHA se encuentra previamente energizado desde el lado de 220kV y con tensión en el lado de 500kV para el posterior cierre de anillo de la LT de 500kV AYO-VHA.
- Todos los elementos de control de tensión se encuentran operando en condiciones normales y con el sistema de potencia preparado para la energización con fuente de la CH-YAC.

2.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ETEmg.

A continuación, son presentados los resultados obtenidos de los ETEmg de las energizaciones de la LT desde el terminal de AYO y desde el terminal de VHA. Los resultados son presentados en términos de tensión en las barras de 500kV de las EESS VHA y AYO, y la energía disipada por los descargadores de sobretensión de las barras análogas a VHA y AYO.

ES-VHA - 500kV (kV / pu) - Lado de la CH-YAC					
Antes de energizar la LT		Mayor pico de tensión		Post-energización de la LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
457	0,914	713	1,427	625	1,251

ES-AYO - 500kV (kV / pu) - Terminal de la LT					
Antes de energizar la LT		Mayor pico de tensión		Post-energización de la LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
0	0,000	744	1,488	655	1,310

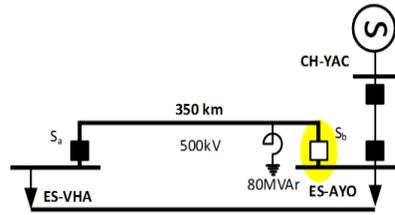


Figura 3: Energización de la LT desde VHA y abierto en el terminal de AYO. Resultados obtenidos del "ANAREDE".
 La Figura 3 muestra las tensiones de las barras de VHA y AYO, cuando la LT es energizada desde el interruptor "S_a". No se observan sobretensiones temporales que se encuentren fuera de los criterios normales, sin embargo las tensiones de post-energización arrojan valores que superan los 1,100 pu., establecidos (efecto Ferranti).

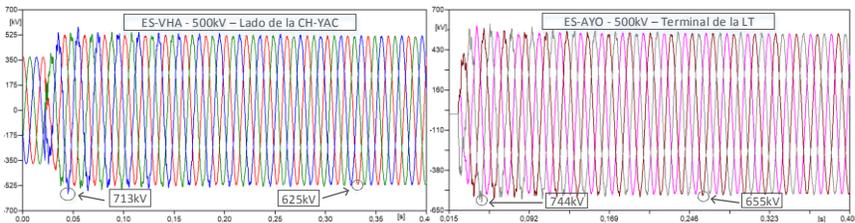


Figura 4: Tensiones en barras de VHA y AYO 500kV. Salida Gráfica del ATP-EMTP.

De la "Figura 4" se extrae la siguiente información:

- Máxima sobretensión transitoria en la "ES-AYO", 744 kV (f-f) $RMS \cong 607$ kV (f-n) $PEAK \ll 999$ kV (f-n) $PEAK$.
- Voltaje de establecimiento a 1 s, 378 kV (f-n) $RMS > 318$ kV (f-n) RMS , es decir, 1.310 pu. $\gg 1,100$ pu., 19% más de lo establecido en los criterios.

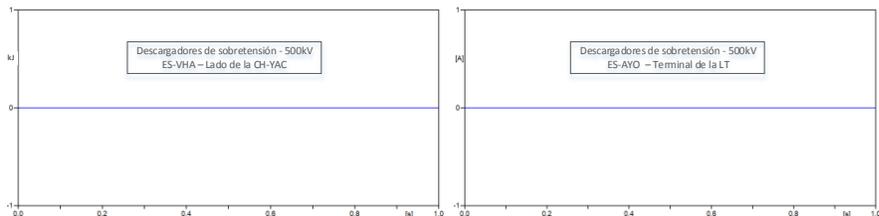


Figura 5: Energía disipada por los Descargadores de sobretensión de VHA y AYO 500kV.

Salida Gráfica del ATP – EMTP.

Con respecto al rendimiento de los descargadores de sobretensión ZNO de 500kV, la "Figura 5" muestra la siguiente observación:

No se establece la excitación de los ZNO en los terminales de la "ES-VHA" y "ES-AYO".

ES-VHA - 500kV (kV / pu) - Terminal de la LT					
Antes de energizar la LT		Mayor pico de tensión		Post-energización de la LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
0	0,000	998	1,990	563	1,125

ES-AYO - 500kV (kV / pu) - Lado de la CH-YAC					
Antes de energizar la LT		Mayor pico de tensión		Post-energización de la LT	
kV	pu	kV	pu	kV	pu
493	0,987	859	1,718	524	1,048

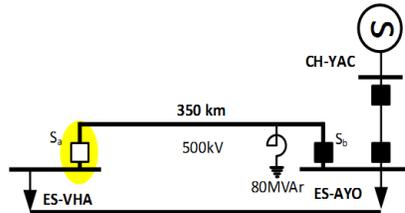


Figura 6: Energización de la LT desde AYO y abierto en el terminal de VHA.

Resultados obtenidos del "ANAREDE".

La Tabla 6 muestra los voltajes de las barras de la ES-VHA y ES-AYO, cuando la LT es energizada desde el interruptor "S_b". Se debe tener en cuenta que no se observan sobretensiones temporales que estén fuera de los criterios normales. No se han observado tensiones de post-energización que excedan los 1,100 pu., para régimen permanente.

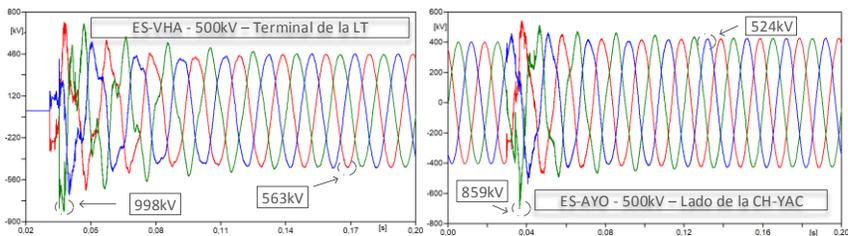


Figura 7: Tensiones en barras de VHA y AYO 500kV. Salida Gráfica del ATP – EMTP.

De la "Figura 7" puede observarse lo siguiente:

- Máxima sobretensión transitoria en la "ES-VHA", 998kV (f-f) $RMS \cong 815kV$ (f-n) $PEAK < 999kV$ (f-n) $PEAK$.
- Voltaje de establecimiento a 1 s, 302 kV (f-n) $RMS < 318 kV$ (f-n) RMS , es decir, 1,048 pu. $\ll 1,100$ pu., mucho menor de lo establecido en los criterios.

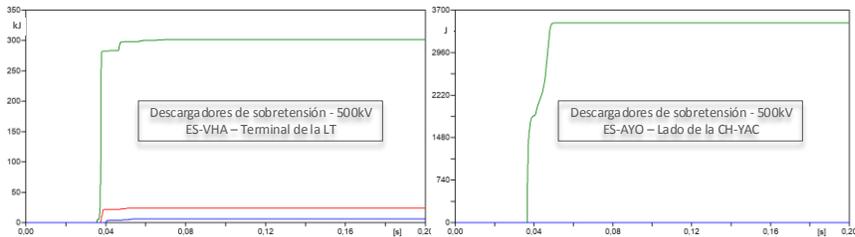


Figura 8: Energía disipada por los Descargadores de sobretensión de VHA y AYO 500kV.

Salida Gráfica del ATP – EMTP.

Con respecto al rendimiento del descargador de sobretensiones ZNO de 500kV, la "Figura 8" se extrae las siguientes observaciones:

- Se observa la excitación de los descargadores de sobretensión ZNO de la "ES-VHA", con una disipación de energía en el orden de los 300 kJ, inferior al 3276 kJ establecido como criterio.
- En cuanto al descargador de sobretensión de la "ES-AYO", se observa una disipación de energía en el orden de 3,7 kJ (barra más cercana a la CH-YAC) y muy inferior a 3276 kJ establecido como criterio.

3. TRANSITORIOS ELECTROMECAÑICOS

En esta sección del trabajo, se abordará la teoría bibliográfica de los fenómenos electromecánicos asociados a la energización de la LT de 500kV AYO-VHA; y la explicación de los resultados obtenidos en términos dinámicos del sistema de potencia. El objetivo de estos estudios es el de complementar y respaldar los resultados obtenidos previamente en estudios de régimen permanente y de transitorios electromagnéticos. También, se pretende barrer todas las variantes posibles de los fenómenos que podrían arrojar como resultado de la energización de la LT.

Existen muchas maneras de dividir y categorizar la metodología analítica de los estudios e investigación de fenómenos de naturaleza dinámica en sistemas eléctricos de potencia. Si bien se puede obtener una cantidad sustancial de información sobre el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia mediante la experiencia en pruebas de equipos individuales, las prácticas operativas de grandes sistemas interconectados pueden entenderse mejor si ésta experiencia está vinculada a un modelo matemático. Aunque las técnicas de simulación analógica tienen un lugar importante en el estudio de la dinámica del sistema, la capacidad y la flexibilidad; han convertido a la simulación digital en el principal método de análisis. Existen varias divisiones principales en el estudio de la dinámica y la estabilidad del sistema de potencia. **Se clasifican los procesos dinámicos como tres categorías**[5]:

- Máquinas eléctricas y sistemas dinámicos,
- Operación de sistemas y control de generación,
- Suministro de potencia, dinámica y control de la máquina primaria.

La misma referencia clasifica los estudios dinámicos según cuatro conceptos:

- El periodo de la condición del sistema: pasado, presente o futuro.
- El intervalo de tiempo de estudio: microsegundos, a través de la respuesta del tiempo.
- La naturaleza del sistema en estudio: nueva estación, nueva línea, etc.

- *La importancia técnica del estudio: análisis de fallas, deslastre de carga, resonancia sub-síncrona, etc.*

Los estudios de estabilidad electromecánica de los sistemas eléctricos están relacionados con el análisis del comportamiento de 'éstos' después de las perturbaciones. El tipo de perturbación y la naturaleza de los fenómenos a analizar definen el grado de detalle y las características del modelado que debe usarse en la representación del sistema eléctrico. Como resultado de estas perturbaciones, que generalmente se deben a cambios estructurales repentinos en la red eléctrica, el sistema deja el punto de funcionamiento estable en el que se encontraba y tiende a establecerse en otro punto de operación. Las unidades generadoras están sujetas a aceleraciones y desaceleraciones de tal intensidad que ciertas unidades o grupos de unidades pueden perder sincronismo entre ellos o con el sistema. Dependiendo de la naturaleza y duración de la perturbación, el comportamiento del control electromecánico de las unidades generadoras puede ser amortiguado o no, terminando en un nuevo punto de funcionamiento estable o en el colapso del sistema [6].

Posiblemente, la clasificación más importante del fenómeno dinámico es el rango del tiempo de respuesta natural. La calificación típica se muestra en la Figura 9. El concepto similar se presentó en [7].

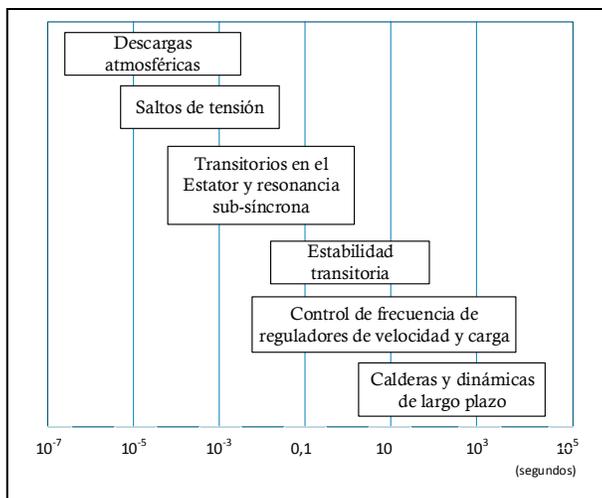


Figura 9: Rango de tiempos del fenómeno Dinámico. Adaptado de [7]

3.1. ETEmc de la LT 500kV AYO-VHA desde la CH-YAC

En la siguiente sección, se analizarán las dos condiciones topológicas cuando la LT 500kV AYO-VHA es energizada desde la CH-YAC con el objetivo de determinar el comportamiento dinámico del sistema de potencia.

Se han elaborado todos los modelos dinámicos del sistema de potencia estudiado, como centrales eléctricas, compensadores estáticos de potencia reactiva y otros parámetros eléctricos (transformadores, LT, cargas, condensadores, etc.).

3.2. CONSIDERACIONES PRINCIPALES

- Los bloques de carga se encuentran previamente energizadas en niveles de 220kV con fuente de la CH-YAC.
- La energización de la LT desde los interruptores "**S_a**" y "**S_b**" son hechas de forma separada.
- La LT es energizada a través del interruptor "**S_a**". Luego los bloques de carga "**A**" y "**B**" son interconectados a través del interruptor "**S_b**" (Figura 3).
- La LT es energizada a través del interruptor "**S_b**". Luego los bloques de carga "**A**" y "**B**" son interconectados a través del interruptor "**S_a**" (Figura 6).
- Todos los casos dinámicos son análogos a los casos de régimen permanente y transitorios electromagnéticos.
- Mediante el uso de un programa de ETEmc, se llevaron a cabo los análisis de sobretensiones temporales a frecuencia fundamental (TOV). Siendo así, los principales resultados obtenidos a frecuencia industrial son presentados a continuación. Todos los resultados obtenidos son respaldados por los ya obtenidos en los estudios de RP y de ETEmg.

3.3. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ETEmg.

Energización de la LT 500kV AYO-VHA desde el terminal de la ES-VHA

Los siguientes análisis corresponden a la energización a través del interruptor '**S_a**' con fuente de la "CH-YAC".

La "Figura 10" muestra que para esta condición de energización se observan tensiones por encima de los criterios normales de operación ya vistos en resultados de régimen permanente, en consecuencia (desde el punto de vista de este análisis) no es aconsejable energizar la LT desde el terminal de la ES-VHA. Además, como consecuencia de estos altos niveles de tensión, existen altas posibilidades de que los equipos de control de tensión queden fuera de servicio, lo que aumenta esta condición.

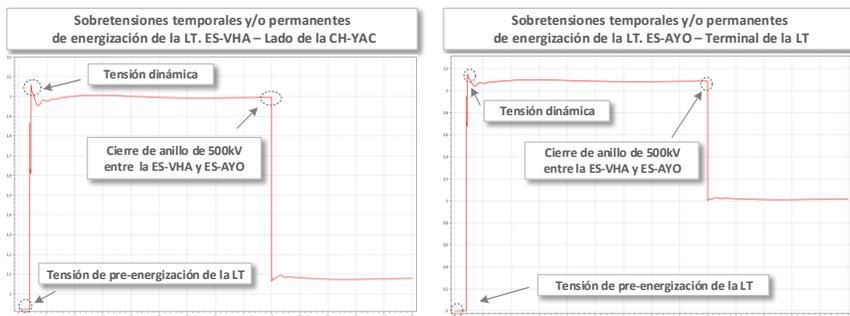


Figura 10: TOV en barras de la ES-VHA y la ES-AYO con posterior cierre de anillo. Salida Gráfica del ANATEM.

La "Figura 11", a la izquierda, muestra la Tensión en barras de 500kV de la CH-YAC. Se observan tensiones en el orden de los 1,040 pu. (520 kV) de corta duración, no representando valores que estimulen anomalías al control de los generadores de la central. En la misma figura a la derecha, se muestran las tensiones temporales y/o permanentes en barras de 220kV de varias

subestaciones del sistema analizado. Obsérvese que aparecen Tensiones sostenidas por encima de los 2 pu. (440 kV) principalmente en barras de 220kV del Sub-sistema Metropolitano durante varios segundos, donde los controles de tensión se encuentran agotados y apeligrando la aislación de los componentes del sistema eléctrico; en consecuencia la energización desde la ES-VHA hace que sea inviable.

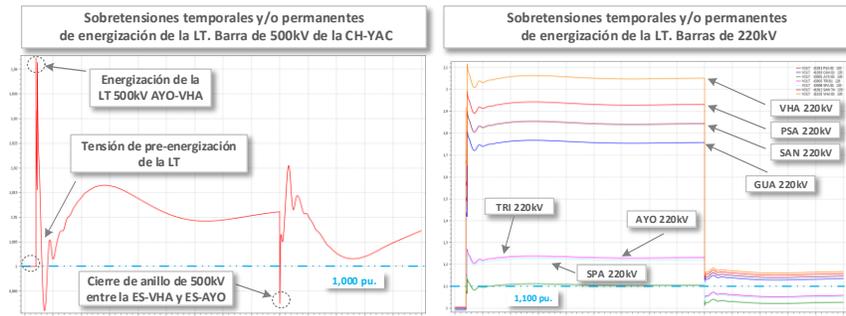


Figura 11: A la izquierda TOV en barras de 500kV de la CH-YAC. A la derecha TOV en barras de 220kV de varias subestaciones. Energización de la LT desde el terminal de VHA. Salida Gráfica del ANATEM.

Energización de la LT 500kV AYO-VHA desde el terminal de la ES-AYO

Los siguientes análisis corresponden a la energización a través del interruptor 'S_b' con fuente de la "CH-YAC".

Para las condiciones de operación estudiadas, energización de la LT 500kV AYO-VHA desde el terminal de la ES-AYO con fuente de la CH-YAC, se observan tensiones dinámicas y de post-energización dentro de los criterios establecidos como se muestran en la "Figura 12". Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores de las tensiones de régimen permanente en las barras de la "ES-VHA" y "ES-AYO" se encuentran cercanos a 1,100 pu. (Límite de tensión de régimen permanente en emergencia).

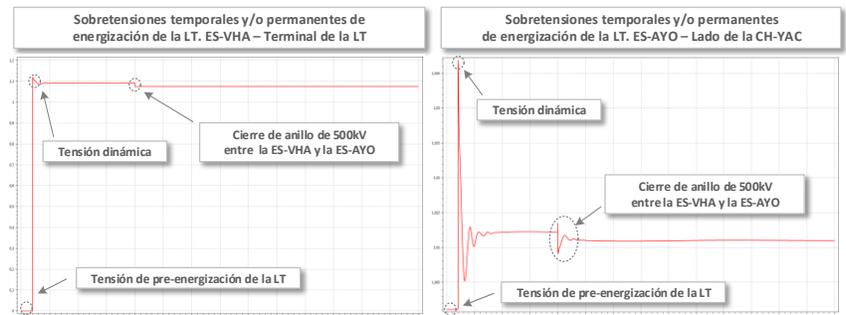


Figura 12: TOV en barras de la ES-VHA y la ES-AYO con posterior cierre de anillo. Salida Gráfica del ANATEM.

La "Figura 13", a la izquierda, muestra la Tensión en barras de 500kV de la CH-YAC. Se observan tensiones en el orden de los 1,042 pu. (521 kV) de corta duración, no representando valores que estimulen anomalías al control de los generadores de la central. En la misma figura a la derecha, se muestran las tensiones temporales y/o permanentes en barras de 220kV de varias subestaciones del sistema analizado. Obsérvese que aparecen Tensiones sostenidas muy por debajo de los 1,100 pu. (242kV), estos a su vez, muy por debajo de los valores máximos considerados como límites. A los 20 segundos es realizado el cierre de anillo de 500kV entre las barras de VHA y AYO, no observándose tampoco tensiones que violen los límites exigidos. En consecuencia, la energización desde el terminal de la ES-AYO hace que sea más viable que la energización desde el terminal de VHA.

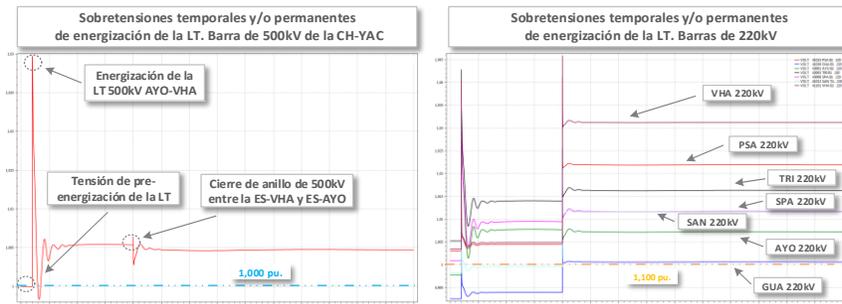


Figura 13. A la izquierda TOV en barras de 500kV de la CH-YAC. A la derecha TOV en barras de 220kV de varias subestaciones. Energización de la LT desde el terminal de AYO. Salida Gráfica del ANATEM.

4. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DE LOS MÉTODOS ANALÍTICOS UTILIZADOS.

4.1.Consideraciones finales de los resultados obtenidos de los ETEmg.

- Los casos base utilizados para la simulación de transitorios electromagnéticos, se realizaron a partir de resultados de varias estipulaciones sistémicas obtenidas en simulaciones de régimen permanente.
- Los equipos de control como reguladores de velocidad y reguladores de tensión de la Central de Generación no fueron modelados para este estudio; y la generación fue establecida como una fuente ideal detrás de impedancias de cortocircuito, barriendo todas las posibilidades de inyección de flujos en nodos eléctricos equivalentes.
- El Centro Estático de Reactivos de Guarambaré (CER-GUA) fue modelado como Susceptancia fija equivalente en el momento de estado estacionario.
- Los reguladores de tensión de los transformadores no fueron modelados dada la esencia del tipo de estudio, inherente a los transitorios electromagnéticos para los fenómenos de energización de líneas de transmisión (transitorios rápidos).

- Los resultados obtenidos fueron complementados y soportados con simulaciones de naturaleza dinámica (transitorios electromecánicos) para tiempos de post-energización.
- No se han observado sobretensiones temporales que excedan los criterios adoptados en la configuración simulada.
- Los equipos asociados al estudio deberían ser capaces de sostener las solicitaciones máximas de tensión impuestas por la energización de la LT y deberían ser coherentes con los límites predefinidos en las simulaciones.
- Es necesario maniobrar previamente los Bancos de Capacitores (BC) del sistema de potencia para mitigar los impactos producidos por la energización de la LT de 500kV, principalmente en situaciones posteriores a la energización. La desconexión recomendada de "BC's" sería el orden de los 350 MVar según estudios previos de régimen permanente.
- Se recomienda tener tensiones en el orden de los 0,950 p.u. (475kV) en barras de 500kV de la CH-YAC en el momento de la energización de la LT. Esta medida está destinada a mitigar los impactos resultantes de la energización de la LT.

*Finalmente, de acuerdo con los resultados obtenidos en simulaciones de análisis de **transitorios electromagnéticos** de la energización de la LT sin reactor, se concluye que cuando es abordada la topología estudiada, **no se recomienda energizar la LT desde el terminal "S_a"**, debido a las altas solicitaciones de tensión provocadas por la ausencia de reactores en las extremidades de la LT (efecto Ferranti) principalmente por altos valores de tensión de post-energización de la LT. Por consiguiente, **la LT de 500kV AYO-VHA solo debe ser energizada y operada desde el interruptor "S_b"**.*

4.2. Consideraciones finales de los resultados obtenidos de los ETEmc.

En los estudios de ETEmc, se consideraron los siguientes criterios [8]:

- Tensión máxima aceptable en el período transitorio en 500 kV superior a 1,400 pu., correspondiente a 3 ciclos.
- Pico de tensión en 500kV hasta 1,200 pu, correspondiente a 500ms.
- Tensión de régimen permanente en emergencia, hasta 1,100 pu.

Otras consideraciones abordadas en los casos de ETEmc

- Los casos base utilizados para la simulación de transitorios electromecánicos son análogos a los casos base de transitorios electromagnéticos y se realizaron a partir de resultados de varias estipulaciones sistémicas obtenidas en simulaciones de régimen permanente.
- Todos los elementos electromecánicos del sistema de potencia de Paraguay fueron establecidos en su totalidad con sus respectivos modelos matemáticos, como la CH-YAC (Reguladores de velocidad y de tensión), CER-GUA, etc.
- Los equipos asociados al estudio deberían ser capaces de sostener las solicitaciones máximas de tensión impuestas por la energización de la LT y deberían ser coherentes con los límites predefinidos en las simulaciones.
- Es necesario maniobrar previamente los Bancos de Capacitores (BC) del sistema de potencia para mitigar los impactos producidos por la energización de la LT de 500 kV, principalmente en situaciones posteriores a la energización. La desconexión recomendada de "BCs"

sería el orden de los 350 MVAR según estudios previos de régimen permanente.

- Se recomienda tener tensiones en el orden de los 0,950 p.u. (475kV) en barras de 500kV de la CH-YAC en el momento de la energización de la LT. Esta medida está destinada a mitigar los impactos resultantes de la energización de la LT.

Finalmente, con referencia a los resultados obtenidos en simulaciones de análisis de transitorios electromecánicos de la energización de la LT 500kV AYO-VHA y posterior cierre de anillo entre la ES-VHA y la ES-AYO se concluye que de acuerdo a las condiciones de operación estudiadas, se observan tensiones dinámicas de post-energización dentro de los criterios establecidos cuando la LT es energizada desde el interruptor "**S_b**" y posterior cierre de anillo desde el interruptor "**S_a**". Sin embargo, es importante tener en cuenta que los valores de tensión de régimen permanente en barras de 500 kV están cercanos a los 1,100 pu.

*No se recomienda energizar la LT desde el **terminal de la ES-VHA**, debido a las altas solicitudes de tensión principalmente las de post-energización, arrojadas por la ausencia de reactores en las extremidades de la LT. Por consiguiente, la LT de 500kV solo debe ser energizada y operada desde el interruptor "**S_b**".*

Herramientas e informaciones utilizadas para los análisis y posteriores resultados son los siguientes:

- Simulación de casos de flujos de potencia en "Estado Estable": "Analizador de Redes Eléctricas (ANAREDE)". Paquete de software's de la CEPEL. Electrobras (Paraguay - Brasil).
- Simulación de casos de flujos de potencia y comportamiento electromecánico en "Estado Dinámico": "Analizador de Transitorios Electromecánicos (ANATEM)". Paquetes de software's de la CEPEL. Electrobras (Paraguay - Brasil).
- Simulación de casos de transitorios electromagnéticos en "Estado Transitorio": "ATP-EMTP". (*Alternative Transient Program*) o "*Electro Magnetic Transient Program*".
- Los gráficos y tablas responden a resultados obtenidos en simulaciones de programas aptos para los mismos. Posteriormente, los resultados fueron corroborados en energizaciones reales.
- El periodo de simulación corresponde a la peor situación o de máxima carga de verano del 2.019 del Sistema Interconectado Nacional (SIN) del Paraguay; con cargas equivalentes de los Sistemas brasileiros y argentinos, de Interconexión.
- Análisis y conclusiones de los resultados obtenidos de los programas utilizados.
- Análisis y conclusiones de datos de carga reales despachados por las Centrales de Generación.
- Comparación en base bibliográfica pertinente a los tiempos de exposición de sobretensiones en los nodos eléctricos, a niveles de respuesta electrodinámica del SIN y consecuente análisis de respuesta ante transitorios electromagnéticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gibson Jones, P. (2012). Evaluation of Voltage Instability Countermeasures in Constrained Subtransmission Power Networks. Portland State University. , pp. 24.

- Wllin, J, H. Gibson Jones, P. (2007). On the Ferranti Effect in Data Grade Cables and Channels. International Wire & Cable Symposium. Proceedings of the 56th IWCS. USA. pp.1.
- Shenkman, A. (2005). Transient Analysis of Electrical Power circuits Hand Book. Holon Academic Institute of Technology, Holon, Israel. pp. 15.
- ONS. (2013). Operador nacional do sistema elétrico. Diretrizes para la preparación de proyectos básicos para empresas de transmisión. RJ, Brasil.
- Sauer, P; PAI. (1994). "Power system dynamics and stability. Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champing. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- ONS. (2007). Operador nacional do sistema elétrico. Sub-módulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos. pp. 51.
- Gate, E.G., Hemmaplardh, K., Manke, J.W., and Gelopulos, D.P. (1984). "Time frame notion and time response of the models in transient, mid-term and long-term stability programs". IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-103, 1, Jan. 143-150.
- ONS. Operador nacional do sistema elétrico (2013). Diretrizes para la elaboración de Proyectos Básicos para emprendimientos de Transmisión. RJ, Brasil.
- Resultado de Estudios de Interconexión, con Profesionales Especialistas del Área de Sistemas de Potencia de Paraguay, Argentina y Brasil.