

Estudios del sistema eléctrico uruguayo para la especificación de la Estación Convertora de Frecuencia de Melo

C.Alonso,M.Artenstein,G.Calzolari,M.Croce y F.Rabin

Abstract—En este trabajo se describen los principales estudios del sistema eléctrico uruguayo realizados como parte de la ingeniería básica asociada al proyecto de la Estación Convertora de frecuencia de Melo.

Se describe asimismo cómo se han aplicado los resultados de los estudios a la especificación de la instalación.

Palabras clave—Convertora de frecuencia-Estudios eléctricos..

I. INTRODUCCIÓN

La Estación Convertora de frecuencia de Melo permitirá el intercambio de hasta 500 MW de potencia entre los sistemas eléctricos uruguayo y brasileño, a nivel de sus redes de Trasmisión de Extra Alta Tensión.

De lado uruguayo, la Estación Convertora se conectará al sistema de 500 kV existente a través de una línea de aproximadamente 300 km hasta la Estación San Carlos. (Ver Fig.1)

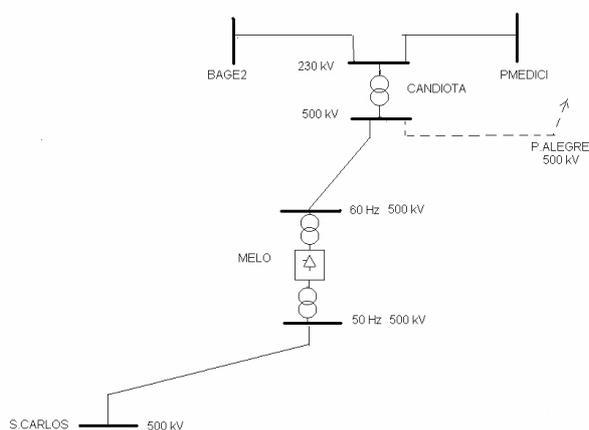


Fig. 1. Esquema de la interconexión Uruguay Brasil en EAT

Como parte de las actividades de ingeniería básica previas a su especificación fue necesario realizar una serie de estudios de

sistemas eléctricos ,tanto del lado brasileño como del lado uruguayo.

En este trabajo se describen los principales estudios del sistema eléctrico uruguayo realizados en la etapa previa a la especificación de la Estación Convertora.

Los estudios descritos son los siguientes:

- la evaluación de los niveles de cortocircuito máximo y mínimo en barras de la Convertora
- el cálculo de los límites aceptables de intercambio de potencia reactiva entre la Convertora y el sistema uruguayo
- el dimensionado de reactores para la compensación de la línea San Carlos-Melo
- el estudio de trasposiciones de la línea San Carlos-Melo
- el cálculo de los “locus” de impedancias armónicas vistos desde la Convertora hacia el sistema uruguayo.

Para cada uno de estos estudios se describen en forma sintética el objeto del estudio, los modelos y las herramientas de cálculo utilizados, así como los principales resultados obtenidos.

Se indica para cada estudio, asimismo, cómo se aplicaron los resultados obtenidos a la especificación de la Estación Convertora y al prediseño de sus características principales por parte de los potenciales fabricantes.

II CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS

A. Objeto, modelo y herramientas de cálculo

Se calcularon los niveles de cortocircuito trifásico mínimos y máximos previstos en barras de 500 kV, 50 Hz de la Estación Convertora ,para diversos escenarios de carga y generación del sistema en los años 2009 y 2012.

Para la evaluación de los niveles de cortocircuito mínimo se consideraron asimismo escenarios de contingencia “n-1” en el sistema.

El cálculo se hizo mediante métodos convencionales, haciendo uso del programa PSS/E [1]

B. Principales resultados y aplicación a las especificaciones

La relación $SCR = \text{Potencia de cortocircuito mínima} / \text{Potencia nominal de la Convertora}$ es un parámetro relevante para la definición de ciertas características básicas de la Estación Convertora.

C.Alonso,M.Artenstein,G.Calzolari y F.Rabin trabajan en la Gerencia de Estudios y Proyectos de UTE,Uruguay.

M.Croce trabaja en la Gerencia de Electrónica de Potencia y Telecontrol de UTE,Uruguay.

En particular, para valores de SCR inferiores a 3 (sistemas AC/DC “débiles”) puede ser necesario implementar soluciones especiales en el diseño de potencia y en los sistemas de control de las Conversoras convencionales para resolver aspectos tales como la inestabilidad de tensión del lado inversor, las altas sobretensiones temporarias en caso de bloqueo del convertidor, y el incremento en la cantidad de fallas de conmutación [2].

La Potencia de cortocircuito mínima obtenida en Melo 500 kV, 50 Hz, es de aproximadamente 1250 MVA (SCR=2,5), por lo que la Estación Conversora debe ser diseñada para un sistema AC/DC “débil” del lado uruguayo.

Cabe destacar que se ha encontrado un escenario muy particular (demanda mínima, importando toda la demanda uruguaya desde Argentina y Brasil) en el cuál una contingencia crítica (salida de servicio de la línea Montevideo I-San Carlos 500 kV) lleva el nivel de cortocircuito mínimo a valores del orden de 400 MVA.

Se entiende que no será posible transferir 500 MW por la Conversora en estos casos especiales, por lo que el Sistema de Control de la Conversora impondrá una reducción inmediata de la potencia a transferir cuando esta línea salga de servicio.

Los valores de potencia de cortocircuito máxima se utilizan de la misma manera que en estaciones a.c convencionales, a los efectos del dimensionado de los equipos y materiales de potencia y de partes de la infraestructura civil de la Estación. Al igual que en los casos de las estaciones convencionales, se aplican a los valores calculados factores de seguridad de al menos 3 a los valores previstos en los horizontes habituales de planificación (inferiores a 10 años), para evitar el cambio de equipos e infraestructura costosa durante la vida útil de la instalación.

En el caso particular de la Estación Conversora de Melo lado 50 Hz, el valor especificado de corriente de cortocircuito a.c máxima para el diseño de los equipos de costo más sensible (válvulas y transformadores convertidores) es de 15 kA r.m.s.

III DIMENSIONADO DE REACTORES PARA LA COMPENSACIÓN DE LA LÍNEA SAN CARLOS-MELO

A Objeto, modelos y herramientas de cálculo

La energización en vacío de la línea San Carlos-Melo, de aproximadamente 300 km de longitud, impondrá (por efecto Ferranti) altas tensiones de régimen a lo largo de la línea, en las estaciones terminales, y en el resto del sistema cercano.

Estas altas tensiones se darán también en regímenes de carga leve, cuando la potencia transmitida es inferior a la potencia característica de la línea.

Se requerirá, por lo tanto, la instalación de reactores “shunt” en San Carlos y Melo a efectos de no superar las tensiones de diseño, tanto del sistema existente como de las instalaciones proyectadas, así como para poder manejar adecuadamente los recursos de reactiva del sistema.

En una primera etapa se analizó el comportamiento del sistema en régimen, con la línea San Carlos-Melo energizada en vacío desde San Carlos.

Estos estudios se hicieron mediante el programa LTP [5], que permite calcular las condiciones en los extremos de la línea (tensiones, corrientes, potencia activa y reactiva, desequilibrios de tensión y corriente) así como los perfiles de tensiones y corrientes a lo largo de la misma, para diversos tipos de compensación y ciclos de trasposición.

Una vez obtenidos valores preliminares de los reactores a instalar, se simuló asimismo diversos escenarios de importación y exportación de potencia a través de la Conversora, a efectos de observar las tensiones del sistema en condiciones de transferencia. Dado que aun no se conocen algunos parámetros de diseño de la Conversora relevantes para esta simulación (configuración de filtros, consumo de reactiva de la Conversora, mecanismos de regulación de tensión, etc.) se asumió factor de potencia unitario en la Conversora, y no se consideraron eventuales mecanismos adicionales de control de tensión en la propia Conversora.

Se observaron asimismo los perfiles de tensión a lo largo de la línea para algunos casos escogidos de importación y exportación.

La interacción de la línea con el sistema se analizó para diversos escenarios de carga y generación en los años 2009 y 2012 mediante flujos de carga convencionales, haciendo uso del programa PSS/E.

B Criterios de diseño

Los criterios de diseño utilizados para seleccionar los reactores fueron los siguientes:

- Tensión en San Carlos y Melo no superior a 525 kV, que es la clase de tensión de los equipos existentes en San Carlos.
- Para conseguir esta tensión no debe requerirse conectar generadores adicionales a los que ya están alimentando la demanda en el escenario en estudio..
- Compensación fija (reactores de línea) suficientemente lejos del valor de resonancia paralelo con la capacidad de la línea; a efectos de poder implementar eventualmente reenganche monofásico en la línea San Carlos-Melo [3]
- Compensación fija adecuada para los escenarios de exportación hacia Brasil (tensión en las barras 500 kV no inferior a 475 kV).
- Compensación maniobrable dimensionada para no provocar una variación de tensión superior al 5 % luego de la maniobra.
- Compensación fija preferentemente “simétrica” (iguales reactores de línea en San Carlos y Melo) a efectos de poder intercambiar fases de repuesto de los reactores
- Se aceptan tensiones ligeramente superiores a 525 kV “en el medio” de la línea.

C. Principales resultados y aplicación a las especificaciones

La aplicación de los criterios anteriores a los casos analizados dio como resultado la selección de una compensación formada

por un reactor fijo de 100 MVar en cada extremo de la línea (grado de compensación de aproximadamente 65 % para una línea de 300 km) y un reactor maniobrabable en Melo de 70 MVar.

Con esta compensación se obtuvieron valores de tensión de régimen en el “medio” de la línea algo superiores a los 525 kV fijados para las estaciones terminales, lo cual se tuvo en cuenta como parámetro de diseño de la línea.

La información de los reactores seleccionados se utilizó, en particular, para evaluar los límites de intercambio de reactiva entre la Conversora y el sistema a.c de 50 Hz, de acuerdo a lo que se describe más abajo.

IV LÍMITES DE INTERCAMBIO DE REACTIVA ENTRE LA CONVERSORA Y EL SISTEMA URUGUAYO

A Objeto, modelos y herramientas de cálculo

Tomando como parámetro la potencia reactiva consumida o suministrada en la Estación Conversora, se evaluaron los límites de intercambio de reactiva entre la Conversora y el sistema uruguayo, a efectos de no violar los límites de tensión establecidos para el sistema.

Los estudios se hicieron en diversos escenarios de generación y carga en los años 2009 y 2012, tanto con el sistema completo como en condiciones de contingencia, y para diversos niveles de exportación e importación de potencia activa a través de la Conversora.

Los estudios se hicieron mediante flujos de carga convencionales, haciendo uso del programa PSS/E.

B Criterios de diseño

Se determinaron los límites de intercambio de reactiva necesarios para mantener las tensiones del sistema de Trasmisión dentro de los límites reglamentarios [4]

C Principales resultados y aplicación a las especificaciones

Los límites de intercambio de reactiva le permiten al fabricante elegir o verificar algunos de los parámetros básicos de diseño del convertidor que condicionan su consumo de reactiva (rango de ángulos de disparo de los tiristores, estrategia de movimiento de tomas del conmutador bajo carga del transformador convertidor, etc.), verificar las estrategias de maniobra de filtros, y diseñar los equipos de compensación de reactiva adicionales que puedan ser necesarios.

La información de los límites de reactiva se incluyó en las especificaciones a través de curvas como la indicada en la Fig.2

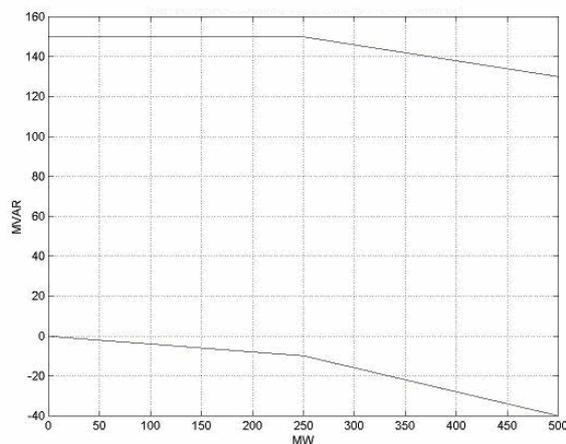


Fig. 2. Límites de intercambio de reactiva lado Uruguay, con flujo de Brasil a Uruguay

Nota: En este diagrama la potencia reactiva se asume positiva si la Conversora absorbe potencia reactiva de la red.

V ESTUDIO DE TRASPOSICIONES DE LA LÍNEA SAN CARLOS-MELO

A Objeto, modelos y herramientas de cálculo

El objeto de este estudio es determinar las tensiones de secuencia negativa en régimen que aparecen en el extremo Melo de la línea San Carlos-Melo para diversos esquemas de trasposición de la línea.

El valor de estas tensiones de secuencia negativa tiene importancia en relación al cálculo de los armónicos no característicos producidos en el convertidor.

Dado que no se conocían las tensiones de secuencia negativa ya existentes en el sistema uruguayo anteriormente a la inserción de la línea, se optó por un modelo en el cual las tensiones impuestas por el sistema a.c uruguayo en San Carlos se suponen perfectamente equilibradas. Se consigue, de esta forma, obtener una primera aproximación a la influencia que tendrá la nueva línea aérea “por sí sola” en los valores de tensión de secuencia negativa en barras a.c de la Conversora. Los estudios se hicieron mediante el programa de cálculo LTP [5] en diversos escenarios de generación y carga en los años 2009 y 2012, para diversos niveles de exportación e importación de potencia activa a través de la Conversora, y para 4 posibles esquemas de trasposición para la línea San Carlos-Melo.

B. Criterios de diseño

De acuerdo a la literatura, los valores típicos de tensión de secuencia negativa en los Sistemas de Trasmisión son del orden del 0,5 % de la tensión de secuencia positiva. Se adoptó como criterio de diseño cualitativo que el valor de tensión de secuencia negativa obtenida del estudio (que, como

ya se ha dicho, contempla exclusivamente la influencia de la línea San Carlos-Melo) fuera muy inferior a este valor.

C. Principales resultados y aplicación a las especificaciones

En la Fig.3 se muestra una gráfica típica obtenida en el estudio, en que se muestran las tensiones por fase a lo largo de la línea.

En la especificación de la Estación Conversora se indicó que el fabricante debe asumir (dada la ausencia de medidas en campo) una tensión de secuencia negativa máxima de 0,5 % en barras de Melo 50 Hz.

Como se indica más arriba, el fabricante necesita este valor como dato de entrada al cálculo de la generación de armónicos no característicos en el puente convertidor, lo cual es a su vez una de las etapas del diseño de los filtros de armónicas. Para un ciclo doble de trasposición clásico (esquema de longitudes 1/12-1/6-1/6-1/6-1/6-1/6-1/12) en la línea San Carlos-Melo se obtuvieron tensiones de secuencia negativa inferiores al 0,1 %, lo cual se entendió compatible con el objetivo de diseño señalado más arriba.

El tipo de trasposición definida es, a su vez, un dato de entrada para el diseño de la línea San Carlos –Melo.

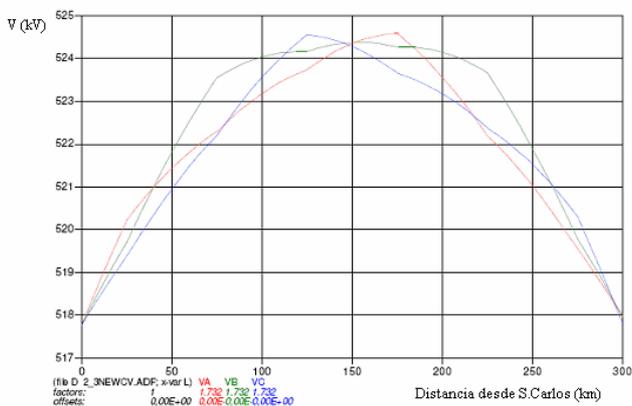


Fig. 3. Tensión en cada fase a lo largo de la línea, 2 ciclos de trasposición de 3 puntos . Uruguay importando 250 MW

VI ESTUDIO DE IMPEDANCIAS ARMÓNICAS EN MELO 50 HZ

A Objeto, modelos y herramientas de cálculo

El objeto de este estudio es definir las impedancias de Thevenin $Z(w)$ “vistas” desde la barra Melo 500 kV, 50 Hz, hacia el sistema uruguayo. El rango de armónicos en que se desea conocer esta información es hasta el orden 50, incluyendo armónicos no enteros (interarmónicos).

Las impedancias $Z(w)$ dependen de los escenarios de red supuestos, por lo que los cálculos se hicieron sobre diversos

escenarios de generación y cargas previstos para los años 2009 y 2012.

Sobre cada uno de los casos base considerados se establecieron diversas contingencias y (dado que los resultados obtenidos dependen fuertemente de los equipos de compensación de reactiva presentes en la red) condiciones de compensación de reactiva..

Las impedancias obtenidas se presentan mediante lugares geométricos en el plano R-X que “envuelven” los puntos obtenidos en los diversos escenarios del sistema y contingencias supuestas.

Los modelos utilizados de variación con la frecuencia de las impedancias de los diversos elementos de la red son los descritos en [6].

Se utilizaron programas en ambiente MatLab desarrollados en UTE, tanto para el cálculo de las impedancias armónicas como para el procesamiento de los resultados a fin de obtener los lugares geométricos.

B Principales resultados y aplicación a las especificaciones

Siguiendo las recomendaciones de [7], los lugares geométricos de las impedancias armónicas se presentaron en el plano R-X en la forma de diagramas circulares definidos por:

- una recta de resistencia mínima
- dos rectas por el origen definiendo los ángulos de impedancia máximo y mínimo
- un arco de círculo entre las 2 rectas (Ver Fig.4)

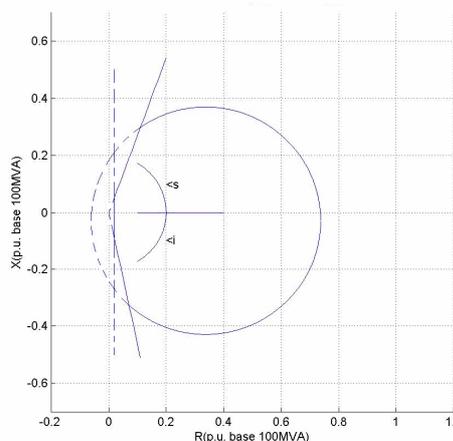


Fig. 4. Lugar geométrico de impedancias armónicas típico

En las especificaciones de la Estación Conversora se incluyeron diagramas circulares individuales para los armónicos 2 a 15 (que suelen ser los que tienen mayor incidencia en el costo del sistema de filtros), y un diagrama circular común para los restantes armónicos (16 a 50). El fabricante de la Estación Conversora utilizará estas representaciones del sistema a.c uruguayo para diseñar su sistema de filtros de armónicas.

VII CONCLUSIONES

En la etapa de ingeniería básica asociada al proyecto de la Estación Conversora de Melo se han realizado por parte de UTE diversos estudios del sistema eléctrico uruguayo. Los resultados de estos estudios, junto con los resultados correspondientes de los estudios del sistema eléctrico brasileño, le han permitido al fabricante definir algunos parámetros básicos de los equipos a suministrar. Los resultados de algunos de estos estudios proporcionaron asimismo a UTE parámetros básicos de diseño para la línea San Carlos-Melo.

Se destacan de los resultados obtenidos, en particular:

- la característica de sistema “débil” que ha surgido del análisis de cortocircuitos
- la evaluación preliminar del perfil de tensiones a lo largo de la línea San Carlos-Melo para la compensación de reactiva seleccionada
- las limitaciones impuestas de intercambio de potencia reactiva entre el sistema a.c uruguayo y la Conversora
- el esquema de trasposiciones seleccionado para la línea San Carlos-Melo
- la caracterización del comportamiento armónico del sistema por medio de los “locus” de impedancia elaborados.

VIII REFERENCIAS

- [1] Siemens-PTI. PSS/E ,Power system simulator for engineering
- [2] “Guide for planning D.C links terminating at A.C systems locations having low short circuit capacities-Part I”-CIGRE Technical Brochure,1992.
- [3] J.H.di Salvo y R.R.Villar - “Estudio de Arco Secundario en Líneas de Extra Alta Tensión de gran longitud “ – Seminario Nacional del CAUE-1997
- [4] URSEA, ”Reglamento de Trasmisión de Energía Eléctrica”, Julio 2002, www.ursea.gub.uy
- [5] C.Saldaña – Transmissão de Energia Elétrica por Sistemas de Transmissão Polifásicos – Dissertação de Mestrado – Itajubá 1990
- [6] “Guide for assessing the network harmonic impedance”, WGCC02 de CIGRE, Electra N° 167, Agosto 1996
- [7] “Guide to the specification and design evaluation of a.c filters for HVDC systems”, IEC PAS 62001, 2004