

Modelo digital de tracción del Metro de Medellín para análisis de cortocircuitos

Digital model of Medellin Metro traction system for short-circuit analysis.

Jorge Lara L.¹, Jorge González S.², Luis Castrillón A.³, Idi Isaac M.⁴, Hugo Cardona R.⁵, Gabriel López J.⁶
Ingeniería Eléctrica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia

jlara275@gmail.com

jorgew.gonzalez@upb.edu.co

L.Castrillon@metrodemedellin.gov.co

Resumen— Debido a la necesidad global de construir sistemas de transporte masivo, en especial del tipo eléctrico y dado que no se disponen de suficientes experiencias o modelos que permitan planear los comportamientos de los mismos, el presente artículo describe el proceso de obtención de un modelo digital del sistema de tracción de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Limitada – Metro de Medellín Ltda., utilizando el programa ATPDraw. Se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones de cortocircuitos en el nivel de 1500 VDC, ante diversas topologías del sistema y en especial se analiza el caso referente al acople de barras entre las líneas A y B del mencionado sistema.

Palabras clave— Sistemas Metro, Modelos Digitales, Análisis de cortocircuitos, ATP.

Abstract— Due to the global need to build mass transit systems, especially of the electric type, and since there are not enough experiences or models to plan these systems, this paper describes the process to build a digital model of the Medellín Metro System using the program ATPDraw. The results obtained during the simulation of short circuits of 1500 VDC under different topologies of the system are shown. There is special analysis of the connection between Metro lines A and B

Key Word — Metro Systems, Digital Models, Short-circuit Analysis, ATP.

I. INTRODUCCIÓN

El Metro de Medellín es la primera implementación del tipo de transporte masivo eléctrico en Colombia. Por sus características peculiares, la tracción eléctrica presenta retos y problemas especiales para el estudio de sistemas eléctricos de potencia, más aún que el Metro de Medellín

se alimenta directamente de fuentes de corriente directa (DC) de potencia [1].

El uso de modelos digitales que permitan simular diversas condiciones y fallas en un sistema como el Metro de Medellín, se convierten en herramientas de gran ayuda para predecir comportamientos y tomar medidas pertinentes, que aseguren continuidad en el servicio, buen desempeño de equipos y seguridad de las personas que tienen alguna relación con el sistema en el rol de usuarios o de personal de la empresa de transporte masivo.

Los sistemas de tracción tipo metro de DC cuentan generalmente con subestaciones encargadas de rectificar las señales de corriente alterna y alimentar los vehículos movidos por motores de DC, los cuales son utilizados por las ventajas que presentan en el control de velocidad. Para este proceso se utilizan diversos tipos de rectificadores, que introducen algunas interferencias y armónicos, aumentado las exigencias al sistema. Por lo anterior, es común el uso de transformadores trifásicos, que presentan características favorables para la reducción del rizado de la onda de DC resultante [1] [2] [3].

La correcta identificación de las corrientes de cortocircuito ante fallas cercanas o remotas y su diferenciación con las corrientes de arranque de los trenes, representa otro desafío para estos sistemas, siendo necesarios sistemas de protecciones con ajustes muy precisos y cuyos parámetros estén definidos por un gran número de pruebas y evaluaciones del sistema. Lo anterior es básico ya que el cálculo de las corrientes de cortocircuito es esencial para dimensionar el sistema. Sin embargo, la modelación de corrientes de cortocircuito en redes de DC, para aplicaciones ferroviarias, es un área poco estudiada en el ámbito de la ingeniería [2] [3] [4], una razón pueden ser las pocas aplicaciones que se tienen en el mundo. De otro lado, esta es un área de particular interés, ya que los países en desarrollo, como

¹ Ingeniero Electricista

² Ingeniero Electricista, PhD

³ Ingeniero Electricista

Fecha de Recepción: 14 de Septiembre de 2012

Fecha de Aceptación: 30 de Diciembre de 2013

⁴ Ingeniero Electricista, PhD

⁵ Ingeniero Electricista, MSc

⁶ Ingeniero Electricista, MSc

Colombia, hacen actualmente esfuerzos por mejorar la movilidad mediante la construcción de sistemas masivos de transporte tipo Metro.

Modelar los fenómenos transitorios durante la ocurrencia de cortocircuitos en estos sistemas es un reto que puede ser afrontado desde diversas posiciones, utilizando herramientas computacionales y modelos matemáticos según las necesidades. Por ejemplo, la incidencia de la característica magnética no lineal de los rieles usados para el retorno de corriente se debe evadir utilizando algún modelo matemático que implemente transformaciones en el dominio de la frecuencia, evitando que la impedancia se muestre variable en el tiempo debido al efecto piel que se presenta en los rieles en la etapa inicial de la falla. El fenómeno anterior no será tenido en cuenta en el presente trabajo, al igual que la característica de impedancia riel a tierra, puesto que estos elementos presentan una menor incidencia en la obtención de los valores finales de cortocircuito y en los fenómenos transitorios que se presentan en el suministro, los cuales son el objetivo principal del presente estudio [5] [6] [7].

La modelación de sistemas eléctricos de diversa índole es un uso bastante recurrente en mundo entero, buscando la comprensión de los sistemas de este tipo y los fenómenos que en ellos se presentan, sin embargo la documentación referente a modelos digitales de sistemas de tracción eléctrica no es abundante, situación que empeora cuando se trata de analizar cortocircuitos en corriente directa.

Es común y diversa la bibliografía sobre sistemas de tracción, cortocircuitos en sistemas de tracción en corriente alterna, análisis de armónicos en sistemas de tracción, mediciones de las radiaciones emitidas por estos sistemas, etc., y no obstante el creciente interés de investigadores asiáticos en el tema, se encuentran muy pocos documentos que sustenten el análisis de cortocircuitos en corriente directa para sistemas de tracción por medio software especializado. La mayoría de los modelos utilizan MATLAB/Simulink © Simulink [8] [9] [10] y solo C.S. Chang en [10] sugiere la implementación de EMTP-ATP para tal fin.

ATPDraw es un preprocesador gráfico del programa ATP-EMTP, ampliamente utilizado en simulación de sistemas eléctricos y los fenómenos transitorios que les afectan. Permite la construcción de modelos digitales correspondientes a sistemas eléctricos, con base en una amplia gama de modelos estandarizados que permiten ajustar parámetros según las características requeridas [11].

Por razones particulares de la operación del Metro de Medellín, y para dar valor agregado al modelo desarrollado, se incluirá en este trabajo el caso especial del acople de dos barras de DC entre las denominadas líneas A y B del sistema de 1500 VDC (para implementar por

primera vez el modelo obtenido). Sin embargo, el modelo se implementó para cualquier configuración del sistema. Para el caso particular de estudio, es necesaria la evaluación de las ventajas y desventajas que presenta habilitar de manera constante el acople entre ambas líneas, por tanto se consideran casos críticos que indiquen qué situaciones afectarían la línea A o los equipos que posibilitan el acople.

II. SISTEMA DE TRACCIÓN DEL METRO DE MEDELLÍN

El sistema de tracción del Metro de Medellín cuenta con tres estaciones alimentadoras conectadas a la red de 110 kV de EPM (Empresas Públicas de Medellín), encargadas de disminuir el nivel de tensión y alimentar dos sistemas de cables a 13,8 kV, con los cuales se energizan las nueve subestaciones de tracción que conforman el sistema. Los vehículos con los cuales se presta el servicio se alimentan por medio de un sistema de catenarias a 1500 V_{DC}, con retorno de corriente a través de los rieles sobre los que reposa el vehículo [12]. La figura 1 muestra el diagrama unifilar del sistema

A. SUBESTACIONES DE ALIMENTACIÓN (SE)

Las SE con las que cuenta la red se conectan al sistema de 110 kV perteneciente a EPM, y poseen transformadores de 31,5/40 MVA marca Trafo-Union de SIEMENS, con relación de transformación de 110 kV a 13,8 kV [13]. Las barras a 13,8 kV de las SE se encargan de alimentar las subestaciones de tracción utilizando los sistemas de cables a 13,8 kV.

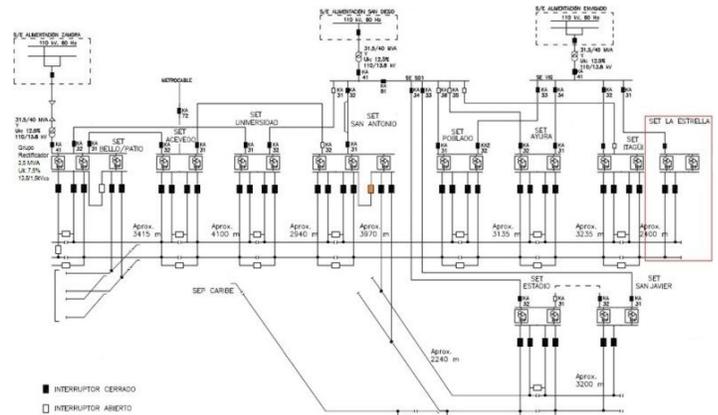


Figura 1. Unifilar sistema de tracción del Metro de Medellín.

B. SUBESTACIONES DE TRACCIÓN (SET)

El sistema cuenta con nueve subestaciones de tracción, encargadas de reducir y rectificar la señal de 13,8 kV y entregar los 1500 V_{DC} con los cuales se energiza el sistema de catenarias que alimenta los vehículos con que opera el sistema.

La rectificación de la onda se realiza utilizando dos grupos transformador/rectificador en cada SET (tres grupos en las SET San Antonio y Bello, en Bello el tercer grupo alimenta Patio y

en San Antonio alimenta la línea B), cada grupo posee un transformador tridevanado, dos rectificadores de seis pulsos (un rectificador a la salida de cada devanado secundario del transformador) y un sistema de filtros ubicado a la salida de los rectificadores.

Los transformadores tridevanados son secos tipo GEAFOL de 3,5 MVA marca SIEMENS, con relación de transformación 13,8 kV a 1,22 kV [14]. Cada devanado secundario presenta una disposición diferente, por lo cual las señales resultantes presentan entre sí un desfase de 30 grados, que es aprovechado para la reducción del rizado de la onda resultante.

Rectificadores de seis pulsos, construidos con puentes de diodos de silicio, se conectan a cada devanado secundario de los transformadores tridevanados y se disponen en paralelo. Esto y el desfase de 30 grados entre las señales de los devanados secundarios, origina una tensión continua de 12 pulsos en cada grupo transformador/rectificador [12].

Por último los grupos transformador/rectificador con los que cuenta cada SET (excepto los terceros grupo presentes en San Antonio y Bello), se encuentran en paralelo, y entre los nodos de salida se ubica el sistema de filtrado de la señal. La figura 2 muestra la disposición de los grupos transformador/rectificador de manera detallada, mostrando un segmento del sistema en el cual se muestra la SET San Antonio con sus tres grupos.

C. SISTEMA DE CABLES Y CATENARIAS

El sistema tiene dos grupos de cables a 13,8 kV y el tendido de catenarias a 1500 VDC; cada nivel de tensión exige características diferentes de los conductores. Los grupos de 13,8 kV se encargan de alimentar las SET, dándole dos vías de alimentación a cada SET [12]. Las catenarias que alimentan los vehículos se disponen en secciones tendidas entre dos SET adyacentes, cuentan con una línea de alimentación para la vía ascendente y otra para la vía descendente. La figura 2 muestra el unifilar estándar según el cual se disponen los segmentos de catenaria.

III. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA MODELADO

ATP brinda múltiples opciones y modelos que permiten la caracterización de los elementos pertenecientes al sistema. La caracterización de cada elemento se define por los parámetros ingresados en las opciones del modelo.

Los transformadores se caracterizarán con la opción SATTRAFO del ATP, que permite implementar gran variedad de modelos, incluso se puede habilitar un tercer devanado. Los parámetros de impedancias, resistencias y características electromagnéticas del transformador se

toman de las hojas de datos provistas por sus fabricantes. Los rectificadores constituidos por puentes de diodos de silicio se construyen con los modelos de diodos disponibles en ATP.

Se obtiene un modelo muy confiable del sistema utilizando puentes de diodos en el modelo, sin embargo el tamaño del sistema y el número de elementos que le constituyen, ocasiona que los límites de almacenamiento permitidos por el programa sean sobrepasados por del número de diodos e interruptores que tiene.

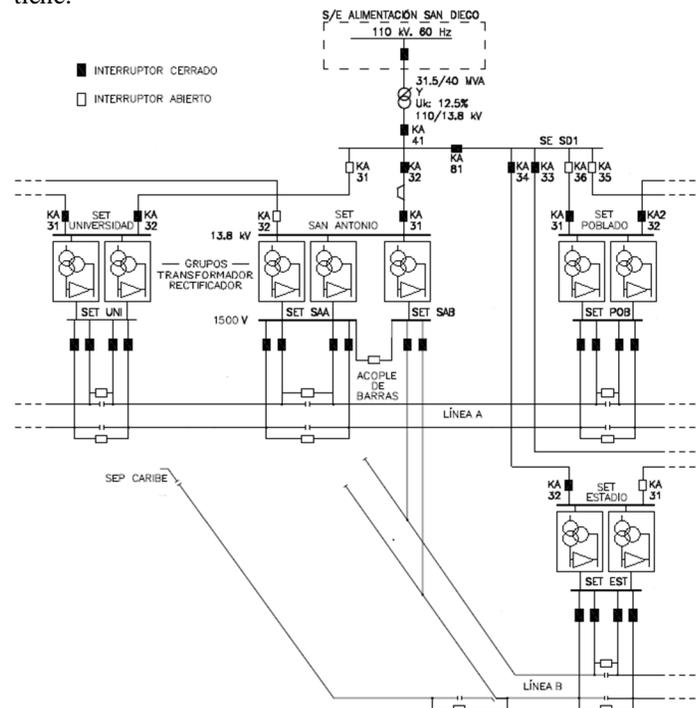


Figura 2. Unifilar de segmento del sistema mostrando la disposición de los grupos transformador/rectificador.

Listsiz.dat es el archivo en el cual se consignan los límites de las tablas de datos y cálculos, con los que se procesan las simulaciones del ATP. El modelo obtenido utilizando el modelo de diodo de ATP no sobrepasa el límite impuesto por *list 6* o *LSWTCH*, archivo que define cuántos interruptores, diodos y tiristores puede tener la red, sin embargo, el número de elementos de este tipo es multiplicado por cinco en un vector en la etapa de procesamiento, generando conflictos con *list 6* e imposibilitando la compilación del modelo [15]. Algunos ejecutables personalizados de ATP, según los requerimientos del caso fueron desarrollados por los expertos del ATP: Tsu-huei Liu y W. Scott Meyer y remitidos a la UPB. Sin embargo, los resultados arrojados por éstos no fueron satisfactorios y no pudieron ser utilizados.

Un nuevo modelo equivalente a un rectificador de seis pulsos fue facilitado por el Ing. Leonardo Cardona de Medellín, quien accede a compartir un modelo de tipo USP (*user specified objects*), desarrollado por él mismo (no se tiene referencia). Los modelos de tipo USP son desarrollados por usuarios avanzados

en el lenguaje del ATP-EMTP y aplicados a la operación de un elemento en la interfaz gráfica ATPDraw [11].

Los modelos de rectificador obtenidos con arreglos de diodos y por el equivalente del rectificador de seis pulsos se combinan en un solo conjunto, el modelo obtenido debe ser configurado de acuerdo con el caso particular que se desee simular, de tal manera que las SET más cercanas a la ubicación de los eventos o fallas estén constituidas por puentes de diodos, elementos que dan mayor confiabilidad a la simulación.

Los filtros se ubican a la salida de los rectificadores entre los terminales positivo y negativo, se disponen respetando las condiciones del sistema real y los valores de las medidas tomadas.

Los sistemas de cables se modelan conectando los elementos con una impedancia a cada extremo del tendido, con el objetivo de facilitar la ubicación de fallas. Los valores de las impedancias de líneas en los sistemas de cables provienen del estudio de flujos de carga y cortocircuito realizado por HMV Ingenieros por encargo de la empresa METRO de Medellín Ltda. en el caso de los sistemas de 13,8 kV y del informe de Cálculos de protección para di/dt de 1500 V realizado por SIEMENS para las secciones de catenaria [16] [17]. El modelo obtenido se muestra en la figura 3, se observan los dos tipos de SET que se obtienen.

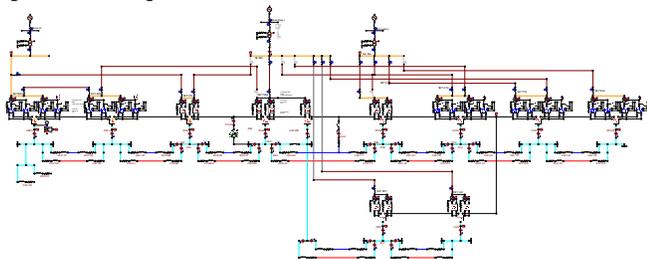


Figura 3. Modelo digital en ATP del sistema de tracción del Metro de Medellín.

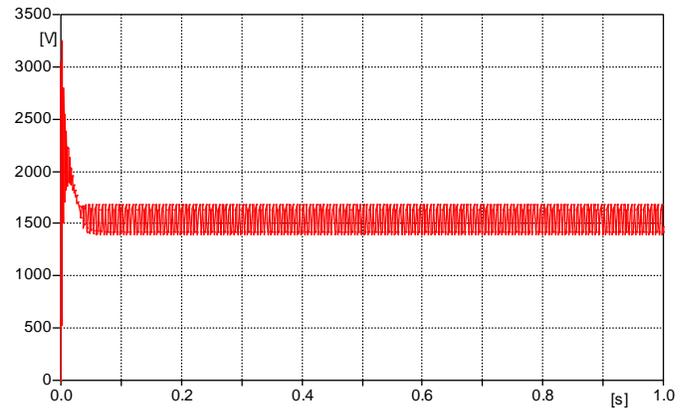
IV. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Se desea analizar el comportamiento del sistema ante fallas cuando el acople de barras entre las líneas A y B al nivel de 1500 VDC se encuentre habilitado, principalmente cuando dichas fallas afectan de manera notoria el enlace y los equipos que hacen parte del mismo. Se procede a simular la ocurrencia de una falla en la sección media de la catenaria que une la SET San Antonio con SET Estadio, que sería el caso de mayor sensibilidad sobre el interruptor en cuestión.

A. FALLA ENTRE SAN ANTONIO Y ESTADIO. ACOPLÉ DESHABILITADO

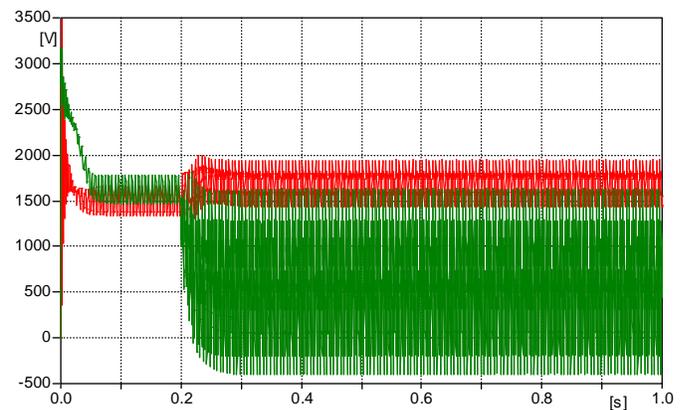
Se supone una falla entre la catenaria y el riel de retorno de corriente en la sección media de una de las secciones que

une estas dos SET, el enlace entre ambas líneas se encuentra abierto, por lo cual no existe conexión con la línea A al nivel de 1500 VDC. Sin embargo, la sección de catenaria donde se presenta la falla se alimenta desde el tercer grupo transformador rectificador de la SET San Antonio y desde la SET Estadio. La figura 4 muestra la tensión en estado estacionario, luego en la figura 5 se observa la tensión ante la ocurrencia de la falla, en ambos casos el acople de barras está deshabilitado.



(file SISTEMAHIBRIDO.pl4; x-var t) v:VSAA1

Figura 4. Señal de tensión en San Antonio en estado estacionario. Acople de barras deshabilitado.



(file SISTEMAHIBRIDO.pl4; x-var t) v:VSAA v:VSAB

Figura 5. Señales de tensión en San Antonio y Estadio ante la falla. Acople de barras deshabilitado.

Se muestra que ante falla cae la tensión en SET Estadio, al punto de cambiar de polaridad, mientras la SET San Antonio A, encargada de alimentar la línea A presenta una sobretensión debido a que la falla busca arrastrar el nodo negativo hacia cero. Por tanto, el nodo positivo incrementa el valor de tensión buscando mantener la diferencia de potencial entre ambos nodos, como puede verse en la figura 6.

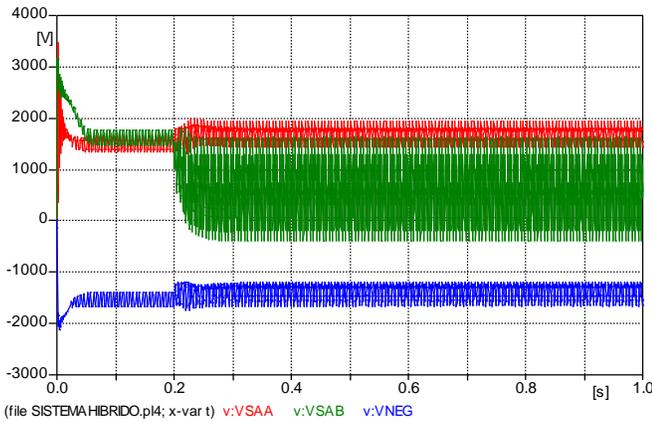


Figura 6. Señales de tensión en los nodos positivo y negativo. Acople de barras deshabilitado.

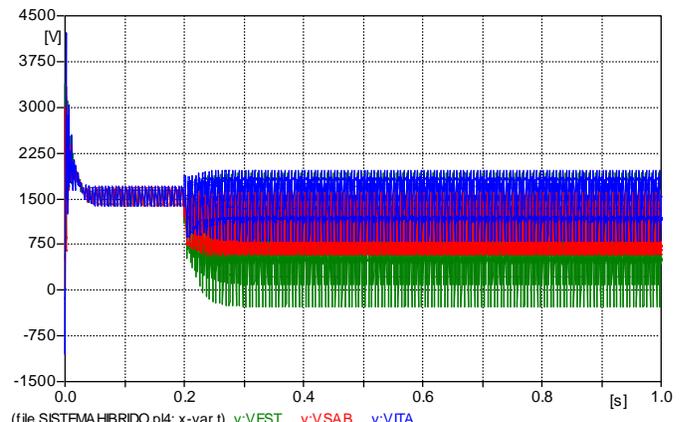


Figura 8. Señales de tensión en San Antonio, Estadio e Itagiú ante la falla. Acople de barras habilitado.

La figura 7 muestra la corriente de falla; ésta alcanza los 36,7 kA. Además, se observan los aportes de las SET aledañas. La corriente que fluye a través del acople de barras entre las líneas es nula al estar abierto el interruptor, impidiendo que desde la línea A se presenten aportes a la falla. La SET San Antonio, a través de su tercer grupo transformador/rectificador, hace el mayor aporte a la corriente de falla, cerca de un 50%.

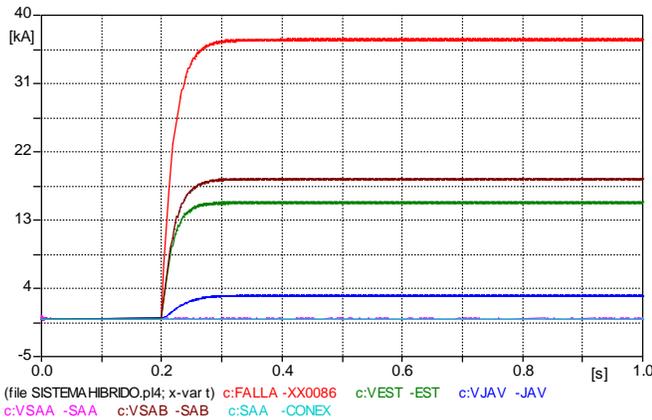


Figura 7. Corriente de falla y aportes de SET cercanas. Acople de barras deshabilitado.

B. FALLA ENTRE SAN ANTONIO Y ESTADIO ACOPLE HABILITADO

En esta simulación se repiten las mismas consideraciones de falla utilizadas en el inciso anterior, pero en este caso se habilita el acople de barras entre las líneas A y B. La figura 8 muestra las señales de tensión ante falla en las SET San Antonio (rojo), Estadio (verde) e Itagiú (azul). Se observa la caída de tensión en las tres SET, aunque es menos evidente en Itagiú, donde el rizado de la onda se incrementa y la caída se da en el valor RMS, ya que el rizado muestra puntos en los cuales el valor de la tensión posterior a la falla sobrepasa al valor de estado estable.

La figura 9 muestra la corriente de falla (rojo) y los aportes de las SET cercanas a la falla, además se puede observar la corriente que fluye a través del interruptor del acople entre las líneas A y B (color aguamarina).

La corriente presenta un incremento cercano al 9%, con respecto a la corriente de falla sin el interruptor del acople, llegando a 40 kA. Los mayores aportes provienen de la SET Estadio (color verde, 36,5%), San Antonio A (color fucsia, 27,5%); es decir, los dos grupos transformador/rectificador que se encuentran en paralelo y que en condiciones regulares solo alimentan a la línea A y San Antonio B (color café, 14,4%), y el grupo transformador/rectificador que alimenta constantemente la línea B.

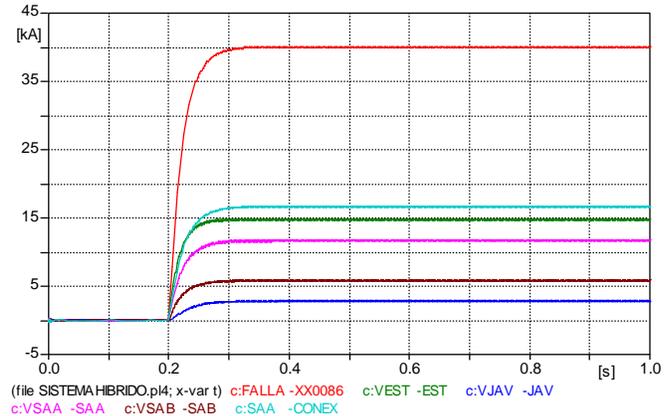


Figura 9. Corriente de falla y aportes de SET cercanas. Acople de barras habilitado.

El acople de barras se ve sometido a un gran flujo de corriente a través de él. En la figura 9 se puede constatar que aproximadamente el 41% de la corriente de falla (16,7 kA, color aguamarina), atraviesa el interruptor de acople entre las líneas A y B.

El interruptor del acople no solo soporta la corriente que aporta San Antonio A a la falla, si no que también es el camino de las corrientes que aportan a la falla todas las SET de la línea A, que

en menor o mayor grado contribuyen tal como muestra en la figura 10.

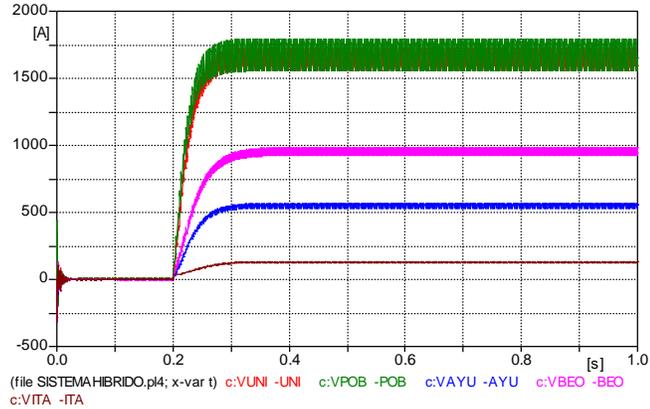


Figura 10. Aportes de corriente de SET lejanas a la falla. Acople de barras habilitado.

Estos aportes aumentan la capacidad de cortocircuito y la tasa de incremento de corriente respecto al tiempo di/dt . Los altos valores que soporta el interruptor y la tasa de crecimiento de corriente a través de él, pueden ser riesgosos para el sistema y especialmente para los equipos que hacen parte de dicho enlace.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El acople de las líneas A y B, representa ventajas operativas, principalmente en la línea B. La configuración según la cual las catenarias de la línea A forman un solo hilo conductor energizado, da gran fortaleza seguridad y confiabilidad eléctrica, que no son compartidas con la línea B en la cual suelen presentarse sobretensiones a causa del frenado regenerativo de los vehículos. Habilitar el enlace entre las dos líneas mejoraría el desempeño de la línea B, dándole una mayor fortaleza y menor sensibilidad ante fenómenos transitorios leves, aumentaría la confiabilidad y seguridad del sistema y representaría una mejoría en la calidad de la señal de tensión entregada a los vehículos.

Los riesgos y desventajas que enfrenta el sistema en caso de habilitar el enlace entre las líneas, exigen la toma de medidas cautelares que prevengan la ocurrencia de daños en los equipos, vehículos o personas que integren o visiten el sistema. Las altas corrientes de cortocircuito a través del enlace, el preocupante di/dt y las altas temperaturas que ello implica en los conductores, son problemas que deben evadirse.

El acople de barras, entre las líneas A y B del sistema del Metro de Medellín, cuenta con un interruptor rápido de corriente continua 3WV1 marca SIEMENS. Este dispositivo fue diseñado para este tipo de sistemas de tracción eléctrica, y se distingue por la rapidez con la que sus contactos operan (abren) antes que la sobrecorriente llegue a su máximo valor. La calibración del equipo permite despejar la falla antes de

llegar a los máximos valores de corriente, evitando que se alcancen valores críticos para el sistema. La figura 11 muestra la metodología de operación del sistema de disparo por sobrecorriente del interruptor [18]. Este interruptor es utilizado en los alimentadores en secciones de catenaria. Este interruptor soportará corrientes muy similares e incluso superiores a las del interruptor de enlace, teniendo en cuenta que la corriente que fluye a través del mismo aumenta con el aporte del grupo transformador/rectificador de San Antonio B [12].

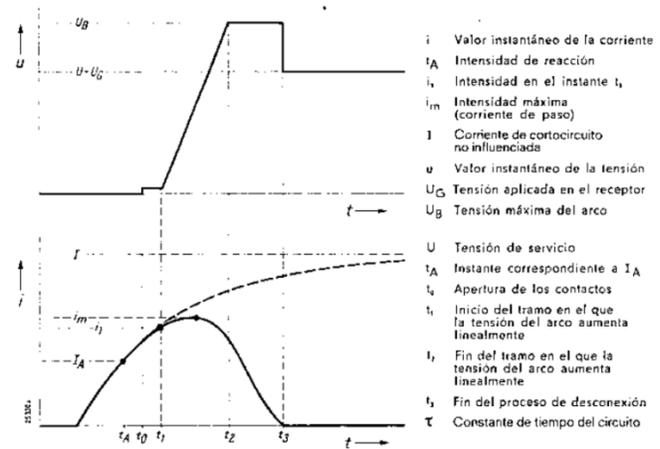


Figura 11. Variación de la corriente y tensión durante un disparo por sobrecorriente del interruptor rápido de corriente continua 3WV1.

El sistema de protección de las celdas alimentadoras de las catenarias debe actuar ante fallas en las catenarias, para ello cuenta con interruptores rápidos de corriente continua 3WV1 marca SIEMENS, relés 3UB51, con protección di/dt , relés SIEMENS DPU96 SITRAS y además con un equipo de prueba de tramo de vía [19].

Esta característica del sistema muestra que los riesgos sobre el interruptor de enlace, son similares a lo que se presenta en otros interruptores que pertenecen al sistema, los cuales con los ajustes y protecciones adecuadas, muestran una operación satisfactoria en el sistema. Unos cálculos precisos de las corrientes de cortocircuito en el nivel de DC son importantes para un correcto ajuste del sistema de protecciones y los equipos de potencia. Cabe anotar que en condiciones de cortocircuito en el nivel de DC, el sistema de alterna percibe la ocurrencia de una falla trifásica balanceada, debido al comportamiento que presentan los puentes de diodos al enfrentar valores de corriente exagerados [20].

La coordinación de protecciones del sistema indica que la protección por sobrecorriente del relé 3UB51 ha reportado operaciones erróneas por disparos injustificados. El disparo di/dt está ajustado en el mayor ajuste posible de la unidad, lo cual puede ser el origen de los disparos injustificados, ya que las pruebas de cortocircuitos realizadas por SIEMENS permiten un mayor valor de ajuste, el modelo puede ofrecer la posibilidad de estudiar las condiciones que favorecen o inducen a estos disparos injustificados, para lo cual sería necesario complementar con información de estudios de detalle. El relé

DPU96 SITRAS posee ajustes para disparo por sobrecorriente, di/dt para fallas cercanas, con un retardo que permite discriminar las corrientes de arranque y la función di/dt aplicada a la detección de fallas remotas [19].

Los ajustes del sistema de protecciones ante falla en las catenarias poseen las condiciones necesarias para detectar e interrumpir el tipo de fallas presentadas. El comportamiento y los valores obtenidos en las simulaciones sobrepasan todos los valores de los ajustes dados a las protecciones, por tanto se considera que el acople se encuentra protegido ante ese tipo de eventos. Sin embargo, se presentan riesgos para los equipos ante fallas en la barra de la SET SAA, por lo cual se considera aconsejable agregar una protección contra sobrecorriente al interruptor del acople entre barras. Las características del interruptor además pueden ser aprovechadas por el sistema, dado que la naturaleza del interruptor ofrece ventajas en la detección y limitación de las corrientes de falla, así un adecuado aprovechamiento de esta característica, complementado con algunos elementos de protección de diferente naturaleza podrían ofrecer una solución a los riesgos que presenta el cierre del enlace, obteniendo los beneficios que esta operación ofrece al sistema.

VI. CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo digital en ATP del sistema completo de tracción eléctrica del Metro de Medellín, que permite simular fallas, analizar fenómenos transitorios y de cortocircuitos. El tamaño del sistema y el gran número de componentes que lo conforman resulta ser un reto importante debido a la necesidad de procesar matrices de gran tamaño, que pueden sobrepasar los límites del programa. Este tipo de modelos son convenientes debido a la necesidad global de construir sistemas de transporte masivo eléctrico y dado que no se disponen de suficientes experiencias o modelos que permitan planear los comportamientos de los mismos. El modelo construido puede adaptarse a cualquier topología para estudiar otros sistemas similares.

El modelo desarrollado permitió estudiar una problemática específica para el enlace entre las líneas A y B del Metro de Medellín. Se encontró que dicho enlace favorece las condiciones de operación de la línea B, fortaleciendo la alimentación del hilo conductor que se forma, sin embargo aumenta la capacidad de cortocircuito y la incidencia que tienen posibles fallas en la línea B sobre las subestaciones de tracción de la línea A. El enlace permite que todos los grupos transformador/rectificador que se encuentran en la subestación San Antonio se conecten en paralelo, disminuyendo los esfuerzos a los que se puede ver sometido el grupo transformador/rectificador que se encarga de alimentar exclusivamente a la línea B desde la

subestación San Antonio cuando el enlace se encuentra deshabilitado. Ante fallas en la línea B, los grupos transformador/rectificador que se encargan de alimentar a la línea A en la configuración actual, aportarán el mayor porcentaje de la corriente que desde allí se transmitirá a la línea B.

El interruptor de enlace entre las líneas A y B, se sometería a esfuerzos extremos ante la ocurrencia de fallas en la línea B. La implementación de dispositivos di/dt y una adecuada coordinación de protecciones es recomendada si se desea habilitar la unión de las líneas. La fortaleza y gran capacidad de la subestación San Antonio proporciona condiciones de riesgo para el interruptor.

RECOMENDACIONES

Se agradece al grupo de investigación TyD de la Universidad Pontificia Bolivariana, a la empresa Metro de Medellín Ltda. por su disposición en la solución de inquietudes y por la documentación facilitada, al grupo, al ingeniero Leonardo Cardona por sus aportes; a los Doctores Tsu-huei Liu y W. Scott Meyer por el interés en desarrollar nuevas aplicaciones, buscando maximizar el potencial del EMTP-ATP para este trabajo. "La responsabilidad científica de este trabajo es exclusiva de los autores".

REFERENCIAS

- [1] R. J. Hill, "Electric Railway Traction. Part 1. Electric Traction and DC Traction Motors Drives," *Power Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 47-56, Febrero 1994.
- [2] R. J. Hill, «Electric Railway Traction. Part 3. Traction Power Supplies,» *Power Engineering Journal*, vol. 8, n° 6, pp. 275-286, Diciembre 1994.
- [3] "Part 2: DC railway electrification supply system," de 2010 *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems*, Manchester, 2010.
- [4] M. Li, J. He, Z. Bo, T. Yip, L. Yu and A. Klimek, "Simulation and algorithm development of protection scheme in DC traction systems," de 2009 *IEE Bucharest Power Tech*, Bucharest, 2009.
- [5] J. C. Brown, J. Allan and B. Mellitt, "Calculation of remote short circuit fault currents for DC railways," *Electric Power Applications, IEE Proceedings B*, vol. 139, no. 4, pp. 289-294, Julio 1992.
- [6] A. Mariscotti, «Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, n° 4, pp. 1422-1432, Octubre 2003.
- [7] L. Yu, J. He, J. Ho, Z. Bo, M. Li, T. Yip y A. Klimek, «Accurate track modeling for fault current on DC railways based on MATLAB/Simulink,» de 2010 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*,

Minneapolis, 2010.

- [8] A. Cozza y B. Démoulin, «On the modeling of electric railway lines for the assessment of infrastructure impact in radiated emission test of rolling stock,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, n° 3, pp. 566-576, Agosto 2008.
- [9] L. Battistelli, M. Pagano, D. Proto, A. Mendola, L. Candurro and A. Pignoti, "Short circuit modelling and simulation of 2x25 kV high speed railways," de *Second Asia International Conference on Modelling & Simulation*, Kuala Lumpur, 2008.
- [10] C. S. Chang, T. Feng, A. M. Khambadkone y S. Kumar, «Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform,» *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, n° 6, pp. 520-526, Noviembre 2000.
- [11] L. Prikler and H. K. Høidalen, ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista. Users' Manual, Trondheim, 2009.
- [12] SIEMENS, "Manual de manejo. Suministro eléctrico," Medellín, 1998.
- [13] Trafo-Union (SIEMENS), Datos Técnicos transformador 31,5/40 MVA.
- [14] SIEMENS, "Manual de mantenimiento. Transformador 3,5 MVA," Medellín, 1995.
- [15] Can/Am EMTP User Group, Rule Book. Alternative Transient Program, 1995.
- [16] HMV ingenieros, "METRO - Estudio de coordinación de protecciones. Estudio de flujos de cargas y cortocircuito.," 2010.
- [17] SIEMENS, "Cálculos de protección para di/dt de 1500 V," Medellín, 1995.
- [18] SIEMENS, Interruptores rápidos de corriente continua, hasta 6300 A y 1500 V. 3WV1-3wV3-3WV5-3WV6.
- [19] HMV Ingenieros, "METRO - Estudio de coordinación de protecciones. Estudio de coordinación de protecciones," 2010.
- [20] J. Zhang, X. Feng, K. Li, J. Zheng y D. Huang, «Mode of short-circuit state operation in 24-pulse uncontrolled bridge rectifier,» de *International Conference on Electrical Machines and Systems 2009*. ICEMS, Tokio, 2009.