

Sistemas de alimentación eléctrica a sistemas de transporte masivo tipo metro *

Electric Feed Systems for Subway-like Massive Public Transportation Systems **

Sistemas de alimentação elétrica a sistemas de transporte em massa tipo metrô ***

Ricardo Moreno-Chuquén ****

Mario Alberto Ríos-Mesías *****

Gustavo Andrés Ramos-López *****

Eduardo Quintero-Restrepo *****

* Fecha de recepción: 15 de octubre de 2008. Fecha de aceptación para publicación: 27 de julio de 2009. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Modelos para el planeamiento de sistemas de distribución con alimentación a sistemas de transporte eléctrico masivo*, por parte de Colciencias y Codensa S. A. ESP, financiado por Colciencias, el Sena y Codensa S. A. ESP, mediante el contrato de cofinanciación 017-2007, celebrado con la Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia (ACAC).

** Submitted on October 15, 2008. Accepted on July 27, 2009. This article derives from the research project called *Planning Models for Electric Feed Systems for Massive Public Transport Systems*, carried out by Colciencias and Codensa S.A. ESP, financed by Colciencias, Sena, and Codensa S. A. ESP, and Co-financed Under Contract 017-2007 by Asociación Colombiana para el Avance de la Ciencia (ACAC).

*** Data de recepção: 15 de outubro de 2008. Data de aceitação para publicação: 27 de julho de 2009. Este artigo deriva do projeto de pesquisa denominado *Modelos para o planejamento de sistemas de distribuição com alimentação a sistemas de transporte elétrico em massa*, por parte de Colciencias e Codensa S. A. ESP, financiado por Colciencias, Sena e Codensa S. A. ESP, mediante o contrato de co-financiamento 017-2007, celebrado com a Associação Colombiana para o Progresso da Ciência (ACAC).

**** Ingeniero electrónico. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Estudiante doctoral, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ri-moren@uniandes.edu.co.

***** Ingeniero eléctrico. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Doctor en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Institute Nationale Polytechnique de Grenoble, Francia. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Correo electrónico: mríos@uniandes.edu.co.

***** Ingeniero electricista, Universidad Nacional, sede Manizales, Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica. Doctor en Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Correo electrónico: gramos@uniandes.edu.co.

***** Ingeniero electricista, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: je.quintero251@uniandes.edu.co.

Resumen

Por lo general, los sistemas de transporte masivo que usan energía eléctrica se han desarrollado simultáneamente con los sistemas de distribución de electricidad; sin embargo, este no ha sido el caso de Colombia, en especial de los grandes centros urbanos como Bogotá, donde la red de distribución eléctrica se encuentra desarrollada para atender a sus actuales usuarios. Surge así el interrogante de cuáles serán los requerimientos de los sistemas de tracción/transporte eléctrico que serán solicitados al operador de red de un sistema de distribución de electricidad. Este artículo presenta una revisión general del estado actual de los sistemas de alimentación de energía eléctrica a sistemas de transporte masivo, como el metro y el tren de cercanías, hoy de gran importancia en el desarrollo de Bogotá. El sistema de alimentación a un sistema de tracción tipo metro, incluidos los sistemas de trenes de cercanías, se caracteriza por el tipo de alimentación, la tensión, la configuración de la red del sistema de alimentación, el tipo de conductor de alimentación (catenaria, tercer riel, conductor rígido aéreo) y la magnitud de la potencia de las subestaciones. Este artículo presenta las características generales de estos sistemas de alimentación.

Palabras clave

Sistemas de energía eléctrica-planeación, tracción eléctrica, transporte público.

Abstract

Electric mass rapid transit systems have been developed simultaneously with electric distribution systems in different cities around the world. However, it is not the case of Colombia, particularly in urban cities such as Bogotá, where the electric distribution system is focused on the current traditional clients. Thus, the question that rises is what electric traction system requirements will be expected from the electricity network operator. This work presents a general approach to state-of-the-art electrified distribution systems for rapid transit systems such as subways and commuter railroads, which have high topical relevance for Bogotá. Electrified systems depend on characteristics such as: voltage level, configuration of the electric network, type of feeding conductor, and power rating of the traction substations. This article presents the general characteristics of the feeding system.

Key words

Electric power systems-planning, electric driving, public transport.

Resumo

Geralmente, os sistemas de transporte em massa que usam energia elétrica foram desenvolvidos simultaneamente com os sistemas de distribuição de eletricidade; entretanto, este não é o caso da Colômbia, em especial dos grandes centros urbanos como Bogotá, onde a rede de distribuição elétrica encontra-se desenvolvida para atender a seus usuários atuais. Surge assim a pergunta de quais serão os requerimentos dos sistemas de tração/transporte elétrico que serão solicitados ao operador de rede de um sistema de distribuição de eletricidade. Este artigo apresenta uma revisão geral do estado atual dos sistemas de alimentação de energia elétrica a sistemas de transporte em massa, como o metrô e o trem de suburbano, hoje de grande importância no desenvolvimento de Bogotá. O sistema de alimentação a um sistema de tração tipo metrô, incluídos os sistemas de trens suburbanos, caracteriza-se pelo tipo de alimentação, a tensão, a configuração da rede do sistema de alimentação, o tipo de condutor de alimentação (terceiro trilho, condutor rígido aéreo) e a magnitude da potência das subestações. Este artigo apresenta as características gerais destes sistemas de alimentação.

Palabras chave

Sistemas de energia elétrica, planejamento, tração elétrica, transporte público.

Introducción

La selección, diseño y evaluación del tipo de alimentación en un proyecto de transporte eléctrico masivo como el metro es de fundamental importancia, porque permite prever el impacto sobre la red de distribución eléctrica. El metro es un medio de transporte eléctrico masivo urbano que deriva su nombre de las palabras inglesas *metropolitan railway*. Es un sistema que moviliza grandes cantidades de pasajeros y cuenta con un gran número de estaciones a distancias relativamente cortas, comparadas con sistemas de transportes interurbanos, como el tren de cercanías. Los tramos de circulación pueden ser bajo la tierra, por sectores elevados a cinco o seis metros del suelo o a nivel del suelo. Emplea un sistema de tracción en corriente continua DC (Oura *et al.*, 1998; Hill, 1994a; Jiang y Ekstrom, 1997).

El sistema de alimentación de un sistema de tracción tipo metro, incluido el sistema de trenes de cercanías, se caracteriza por el nivel de tensión, la configuración de la red del sistema de alimentación, el tipo de conductor de alimentación (catenaria, tercer riel o conductor rígido aéreo) y la magnitud de la potencia de las subestaciones.

De los diferentes sistemas de transporte eléctrico masivo alrededor del mundo se observa que las redes de DC empleadas para el suministro de energía utilizan niveles de tensión que están entre los 600 y los 1.500 Vdc para líneas cercanas a los 100 km de longitud. Se encuentran también sistemas de gran tamaño (longitud) que operan a 3.000 Vdc, en países como Estados Unidos, Italia, Polonia, entre otros (Hill, 1994b).

Hoy en día, la utilización de dispositivos electrónicos, como transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, por su sigla en inglés), *gate turn-off thyristors* (GTO) y microprocesadores simplifican el control sobre los motores de tracción en los trenes alimentados con AC. Anteriormente al desarrollo de estas tecnologías, la realización del control sobre los motores de tracción cuando se empleaba alimentación AC representaba un desafío mucho mayor que cuando

se alimentaban los trenes con DC; de ahí que desde el origen de los sistemas de transporte masivo eléctrico la utilización de sistemas en DC fuera tan popular alrededor del mundo (Hill, 1994a).

En esta introducción ya se presentaron las características básicas de los sistemas de alimentación en DC y sus diferentes configuraciones. En la primera sección se trata la alimentación en AC en sus diferentes configuraciones y características; mientras en la segunda se hace una breve explicación sobre los diferentes tipos de sistemas conductores de los cuales el tren puede tomar la energía (catenaria o tercer riel, por ejemplo). Por último, se concluye.

1. Alimentación con corriente continua

La energía que consume todo el sistema de tracción se alimenta a través de un conjunto de subestaciones rectificadores AC/DC. Cada subestación suministra en un sector determinado una porción de la energía total requerida por el sistema. Cada una de las subestaciones alimenta un sector de la línea de tracción.

La red de tracción que alimenta a los trenes de una línea de metro o de tren de cercanías se conforma de dos líneas de alimentación conectadas en paralelo y divididas en secciones eléctricas separadas por aislamientos de superposición. Uno de los factores más importantes en el diseño de estas redes es la confiabilidad y disponibilidad del suministro, razón por la cual cada sección debe conectarse (alimentarse) a las secciones adyacentes para tener respaldo de alimentación eléctrica en caso de presentarse algún tipo de falla en el sistema de alimentación principal, y de esta forma prevenir la ausencia de suministro eléctrico en las diferentes partes que conforman la línea (Hill, 1994b).

Por otra parte, se puede encontrar la utilización de fuentes de generación exclusivas para alimentar los sistemas eléctricos de transporte urbano, como es el caso de Japón (Oura *et al.*, 1998).

1.1 Rectificación AC/DC

La rectificación de la tensión AC proveniente del sistema de distribución se realiza en las subestaciones que alimentan la red de tracción. Este procedimiento se realiza por medio de puentes rectificadores de 6, 12, 24 o más pulsos. El orden de los armónicos inyectados en la red de AC es proporcional al número de pulsos, es decir, entre mayor sea el número de pulsos, mayor será el orden de los armónicos introducidos en la red de AC. Un orden alto de los armónicos presentes representará una distorsión armónica total (THD) baja, lo cual representa, a su vez, una mayor calidad de la potencia (Jiang y Ekstrom, 1997).

Los puentes de rectificación se pueden realizar a partir de diferentes tipos de conexiones, dependiendo del número de pulsos que se requieran. El rectificador de 12 pulsos consta de un transformador tridevanado, cuyos bobinados secundarios están uno en estrella y el otro en delta, para producir un desfase de 30 grados entre las dos ondas de tensión (Singh *et al.*, 2008). En algunos casos, el número de pulsos empleados en la rectificación de la tensión se determina a partir del tipo de transformadores disponibles.

1.2 Características de las subestaciones

La potencia de las subestaciones de alimentación de tracción, generalmente, varía entre 1,5 y 10 MW; mientras que la distancia entre subestaciones es aproximadamente de 3 km para 600 V, 10 km para 1,5 kV y 20 km para 3 kV (Hill, 1994b). Los valores de la tensión son 600 o 750 Vdc (Oura *et al.*, 1998). Con frecuencia, el tercer riel es empleado para valores de hasta 1.000 Vdc. Valores de tensión mayores emplean alimentación aérea por catenaria (Singh *et al.*, 2008).

Las líneas de alimentación aéreas como la catenaria, generalmente empleadas en sistemas de trenes de cercanías, proveen una resistencia de alrededor de 35 a 90 m Ω /km; mientras que el tercer riel presenta una resistencia de 8 a 20 m Ω /km (Hill, 1994b). Sin embargo, la configuración con tercer riel ha tendido a desaparecer en los sistemas de alimentación eléctrica a sistemas tipo metro.

Una subestación típica dentro de un perímetro urbano funciona a 4 MW, 750 Vdc y suministra entre 2 y 4 kA. Esto, teniendo en cuenta la variación de la carga y que cada tren está compuesto entre 3 y 6 carros. Una subestación con estas características de potencia y tensión (4 MW y 750 Vdc) posee capacidades de sobrecarga de 150%, 300% y 450% del rango de la corriente para una hora, un minuto y diez segundos, respectivamente (Hill, 1994b).

Dependiendo de las condiciones de demanda y de la densidad de tráfico requeridas de las subestaciones alimentadoras, estas se pueden ubicar con una separación de 2 a 9 km. La ubicación de las subestaciones de alimentación depende de varios factores que se deben considerar. Entre más demanda y mayor distancia de recorrido, será mejor emplear niveles de tensión altos, con el objetivo de reducir las pérdidas en las líneas. En el caso de niveles de tensión elevados (1.500 o 3000 Vdc), se emplea la catenaria para evitar el riesgo de accidente en las personas (Singh *et al.*, 2008), dado que el riesgo de electrocución debido al tercer carril es muy alto. También se recomienda la catenaria elevada para tensiones inferiores a 1.500 Vdc.

Un ejemplo de la relación entre la distancia entre subestaciones y el nivel de voltaje a un costo razonablemente económico es el siguiente (Hill, 1994b):

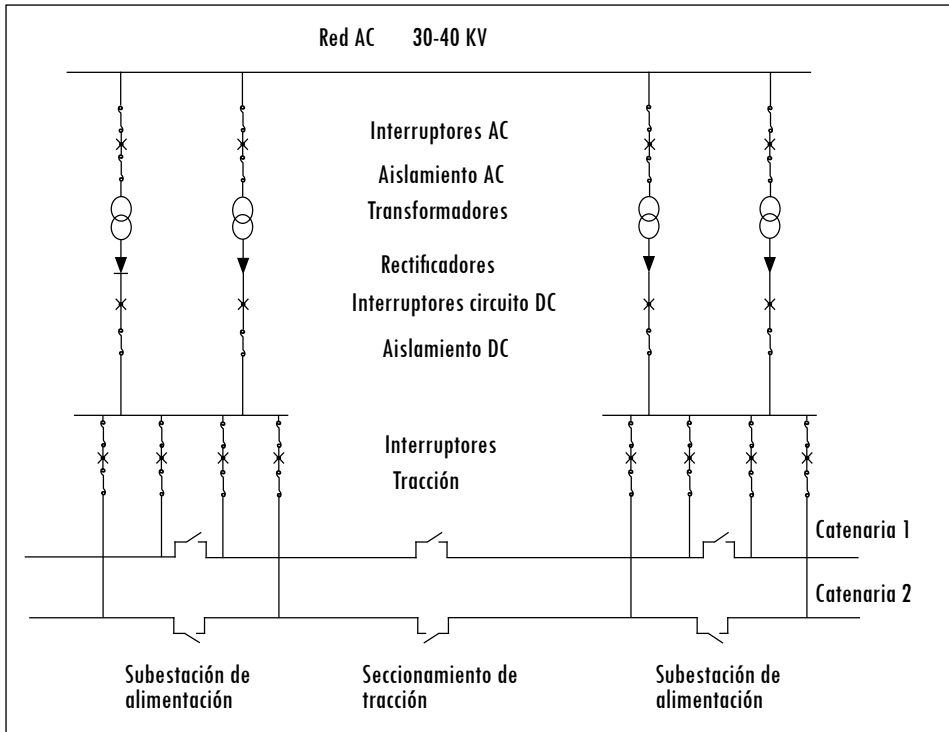
- 2 a 4 km para 600 Vdc.
- 5 a 6 km para 750 Vdc.
- 8 a 13 km para 1.500 Vdc.
- 20 a 30 km para 3.000 Vdc.

En general, la selección de los niveles de tensión y la disposición de las subestaciones de alimentación a lo largo del sistema, además de las tecnologías empleadas, son resultado de un estudio detallado de las características de demanda y tamaño del sistema de metro. Cada nivel de tensión y tipo de conexión tiene ciertas características que pueden ser aprovechadas de la mejor forma para tener un desempeño óptimo tanto del sistema de metro como de la red de distribución que suministra la energía al sistema (Singh *et al.*, 2008).

La Figura 1 muestra el esquema de una conexión típica a 1,5 kVdc desde un par de subestaciones de alimentación adyacentes, donde se destacan los elementos principales que caracterizan cada subestación. En cada subestación hay dos conjuntos de transformación/rectificación que alimentan a la red de tracción del sistema. La existencia del doble conjunto de alimentación obedece a la necesidad de aumentar la confiabilidad y la disponibilidad del sistema de tracción, ya que en caso de fallas o rutinas de mantenimiento, los conjuntos de alimentación se respaldan entre sí y, a su vez, ofrecen respaldo a las subestaciones adyacentes en una línea (Hill, 1994b). Los componentes principales de una subestación rectificadora son:

- Transformadores de potencia, que proveen la tensión a los puentes rectificadores al nivel adecuado.
- Interruptores AC, para proteger contra fallas.
- Seccionadores aisladores, para la selección de las barras alimentadoras, transformadores, etc., en caso de emergencia y acciones de mantenimiento.
- Puentes rectificadores de IGBT o diodos de 6 o 12 pulsos, conectados en paralelo o en serie.
- Seccionadores aisladores DC, para seleccionar puentes rectificadores en caso de cualquier eventualidad.
- Interruptores DC de alta velocidad, para proteger las secciones de las líneas y de los trenes mismos. Son costosos, pero necesarios, ya que es difícil abrir secciones de líneas cuando se trata con altas corrientes DC en un circuito inductivo.

Figura 1. Esquema típico de conexión de un sistema DC a 1,5 kV

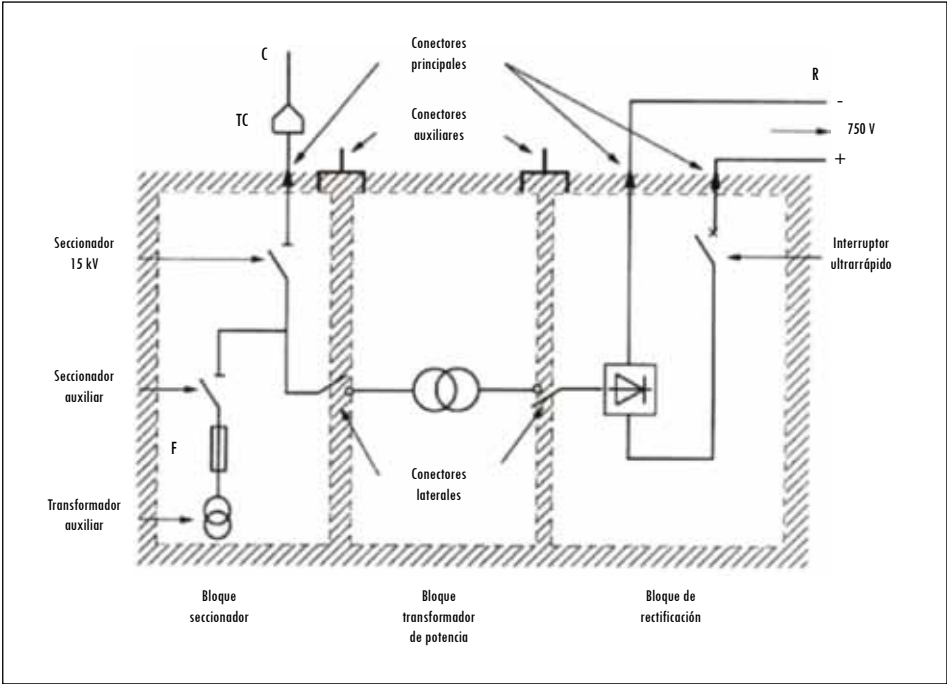


Fuente: Hill, 1994b.

Por otra parte, las subestaciones de rectificación pueden tener dos esquemas de funcionamiento: esquemas de conexión en multigrupos o esquemas de conexión en monogrupos (Perrin y Venard, 1991). El primero se basa en alimentar la sección de rectificación por medio de dos o más subestaciones de transformación. Esto quiere decir que el puente rectificador que alimenta una sección del sistema de tracción es alimentado por dos o más subestaciones de transformación de media tensión. Este tipo de esquema permite tener un menor número de subestaciones, ya que estas pueden ubicarse a mayor distancia entre ellas; pero, de la misma forma, deben tener mayor confiabilidad y disponibilidad para tener, al menos, dos puntos de conexión diferentes con la red del sistema, tanto geográfica como eléctricamente (Perrin y Venard, 1991).

El esquema de conexión monogrupo, mostrado en la Figura 2, requiere un mayor número de subestaciones, lo cual permite llevar a cabo rutinas de mantenimiento con el respaldo de las otras subestaciones rectificadoras (Perrin y Venard, 1991).

Figura 2. Esquema de rectificación monogruppo



C: Conductores 15 kV llegada de fuente HT; R: Alimentación a corriente de tracción; F: Fusible; TC: Caja de conexión de conductores
Fuente: Perrin y Venard, 1991.

Para un sistema de transporte tipo metro, en el cual se requiere el menor intervalo posible entre trenes y la menor tasa de fallas de energía posibles, este tipo de esquema es el más adecuado (Perrin y Venard, 1991).

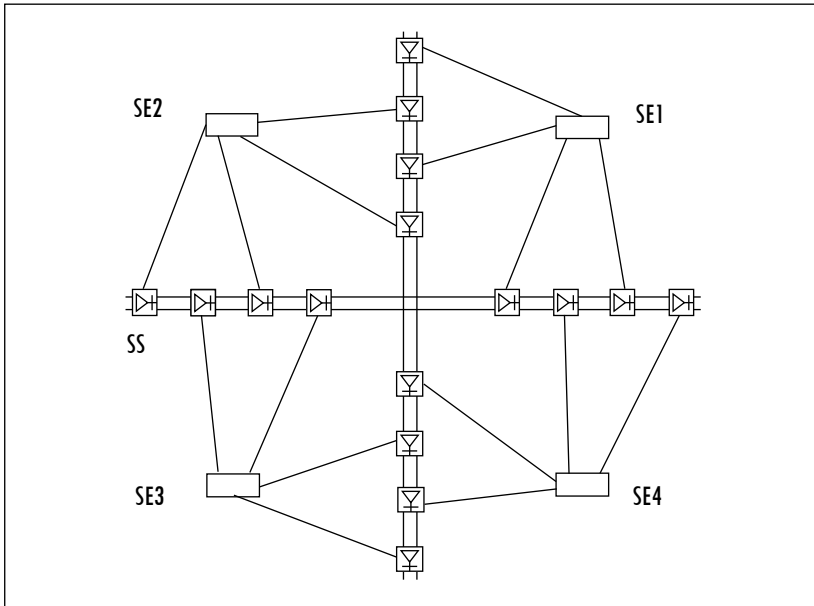
1.3 Ejemplo de sistemas alimentados con DC

El metro de París funciona a 750 Vdc, 4 MW por subestación y emplea el sistema de configuración monogruppo para las subestaciones de rectificación (Perrin y Venard, 1991). El sistema de metro de París se alimenta del sistema de distribución a diferentes niveles de tensión en el lado de AT (380 kV, 225 kV, 63 kV). Estos niveles de tensión son llevados a un valor de 15 kV en cada una de las subestaciones, y a partir de allí se tienden redes de MT que alimentan a las subestaciones rectificadoras. En estas, la tensión es rectificada para alimentar el circuito de tracción a 750 Vdc (Perrin y Venard, 1991).

La Figura 3 ilustra el esquema de alimentación de las subestaciones rectificadoras a partir de las subestaciones de interconexión AT/MT. Cada subestación

de rectificación (monogrupa) se alimenta por una sola subestación de transformación. Las subestaciones de alimentación de MT se intercalan de manera que una misma subestación de MT no alimente dos secciones de rectificación consecutivas. Esto, con el fin de brindar redundancia al sistema y, así mismo, aumentar la disponibilidad y confiabilidad del sistema (Perrin y Venard, 1991).

Figura 3. Esquema de rotación de fuentes de alimentación de MT



SS: estaciones de rectificación; SE1, SE2, SE3, SE4: estaciones de transformación, HT/MT.

Fuente: Perrin y Venard, 1991.

Otro ejemplo, más cercano al entorno local, es el metro de Medellín, el cual se alimenta de una red de 110 kV, emplea 1.500 Vdc y cada subestación de tracción cuenta con un transformador de servicios auxiliares de 50 kVA, 13,8 kV/208 V-120 V (Metro de Medellín, 2007).

Desde cada una de las subestaciones de alimentación que tienen transformadores de 31,5/40 MVA se alimentan dos diferentes sistemas de conductores a 13,8 kV, mediante los cuales se suministra energía a todas las subestaciones tanto de tracción como a las estaciones de pasajeros (Metro de Medellín, 2007).

Cada una de las subestaciones que componen el sistema de alimentación del metro está en capacidad de alimentar al sistema durante un tiempo determinado en caso de que falle la otra (Metro de Medellín, 2007). Igualmente, los circuitos

de MT funcionan de manera tal que al presentarse una falla en uno de ellos, el sistema puede seguir en funcionamiento empleando el circuito de respaldo.

Las subestaciones de tracción están ubicadas a una distancia de 3 a 4 km. Existen 9 subestaciones equipadas idénticamente con los mismos dispositivos. Cada subestación cuenta con un conjunto transformador/rectificador de 7 MVA (2×35 MVA) al lado trifásico y 6,3 MW ($2 \times 3,15$ MW) al lado de DC. Las subestaciones de tracción pueden cargar con un 150% de su carga nominal durante 2 horas y 300% de su carga nominal durante un minuto (Metro de Medellín, 2007).

La alimentación eléctrica de los trenes se realiza por medio de catenaria. Las catenarias para la tracción eléctrica están divididas en 19 zonas o secciones eléctricas, 14 para la línea A y 5 para la línea B, incluida la vía de enlace (Metro de Medellín, 2007). Cada subestación de tracción está conectada a dos circuitos independientes de 13,8 kV, los cuales permiten que sean alimentadas por alguna de las subestaciones adyacentes. Cada uno de estos circuitos está provisto de dos clases de protecciones: una protección principal, que consta de un relé diferencial de estado sólido para cables, y una protección de respaldo, consistente en un relé de sobrecorriente (Metro de Medellín, 2007).

2. Tipos de estructuras conductoras

Hay tres tipos de configuraciones para la conexión al tren: catenaria, tercer riel y conductor rígido aéreo.

2.1 Línea aérea o catenaria

La línea aérea es un conductor suspendido de estructuras que están a lo largo de la vía por donde transita el tren. Este último se alimenta de la catenaria por medio de un dispositivo llamado pantógrafo, que conduce la corriente eléctrica al interior del tren para alimentar los motores y los diferentes sistemas eléctricos (Oura *et al.*, 1998).

Por medio del sistema conductor aéreo es posible transmitir tanto en DC como en AC. En el Shinkansen, en Japón, el sistema emplea tres conductores que van a lo largo de la vía, a diferencia de la mayoría de sistemas en Europa, que utiliza una fuente de alimentación monofásica. En metros y tranvías no se utiliza normalmente la alimentación en alterna, debido a la necesidad de incorporar amplias “zonas muertas” para cambios entre fases y por tener que incorporar grandes transformadores a bordo de los trenes.

2.2 Tercer riel

Este sistema de conductor se emplea en corriente continua y cuenta con la ventaja de estar poco expuesto a daños por condiciones atmosféricas y medioambientales. Se emplea en servicios urbanos con niveles de tensión de entre 600 y 750 V. Está sustentado sobre aisladores instalados cada 2,5 a 5 m. La velocidad está restringida a 70 km/h para trenes que utilizan este tipo de alimentación. Es un sistema que se puede encontrar en los metros que tienen pasos subterráneos, y muy pocas veces se utiliza cuando el tren circula a nivel del suelo, porque puede provocar lesiones a los transeúntes. Cada día se utiliza menos este tipo de conductor para los sistemas eléctricos de transporte masivo.

2.3 Conductor rígido aéreo

Este tipo de conductor fue desarrollado para conexiones entre metros y transportes suburbanos y emplea poco espacio y previene conductores rotos u otros accidentes, sobre todo en las secciones del metro subterráneo. La velocidad máxima que se puede alcanzar con este tipo de conductor es de 110 km/h, por ejemplo, para el metro de Madrid. Por lo general, el sistema se utiliza a partir de 600 Vdc, con el fin de permitir las conexiones con los sistemas suburbanos (Lee *et al.*, 2006).

3. Conclusiones

Este artículo ha presentado una revisión general de la situación actual de los sistemas de alimentación de energía eléctrica a sistemas de transporte masivo, como el metro. La selección, diseño y evaluación del tipo de alimentación permite analizar el impacto en la red de distribución eléctrica.

La experiencia internacional muestra diferentes esquemas de alimentación implementados en diferentes centros urbanos alrededor del mundo. Considerar los requerimientos de los sistemas de tracción/transporte eléctrico solicitados al operador de red de los sistemas de distribución de electricidad es un punto fundamental para la puesta en marcha de los sistemas de transporte masivo, a efectos de que operen en las condiciones de confiabilidad y seguridad requeridas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación otorgada al proyecto de investigación *Modelos para el planeamiento de sistemas de distribución con alimentación a sistemas de transporte eléctrico masivo*, por parte de Colciencias y Codensa S. A. ESP.

Referencias

- BAE, C. *et al.* *Simulation study of regenerative inverter for DC traction substation. electrical machines and systems.* Korea, 2005, pp. 27-29.
- BAGHZOUS, Y. An overview on probabilistic aspects of harmonics in power systems. *Power Engineering Society General Meeting, IEEE. Proceedings*, 2005, vol. 3, pp. 2394-2396.
- BOLLEN, M. H. J. y ZHANG, L. D. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. *Electric Power System Research*, 2003, vol. 66, núm. 1. pp. 59-69.
- BRUNTON, L. The trolleybus Story. *IEEE Review*, 1992, vol. 38, núm. 2, pp. 57-61.
- BUHRKALL, L. Traction system case study: electric traction system. *The 9th Institution of Engineering and technology Professional Development Course on Electric Traction Systems.* Manchester: Institution of Engineering and technology Professional, 2006.
- CARAMIA, L.; CAROINELLI P. y PROTO, G. Power quality disturbances due to interaction between AC and DC traction systems. *IEEE, Power Electronics, Machines and Drivers.* Italia, 2004, pp. 492-497.
- CASTEREN, J. y GROEMAN, F. Harmonic analysis of rail transportation systems with probabilistic techniques. *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH.* Sweden, 2006, pp. 1-4.
- CAVALLINI, A. y MONTANARI, G. C. Stochastic evaluation of harmonics at network buses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, vol. 10, núm. 3, pp. 1606-1613.
- COLIGNON, P. y CAVENAILE, F. The Brussels tramway 2000 with asynchronous traction. *European Power Electronics Association*, 1993, vol. 5, núms. 13-16, pp. 299-302.
- COMPAÑÍA TROLEBÚS QUITO S. A. *Características técnicas de las subestaciones rectificadoras del trolebús y línea de contacto* [web en línea] <<http://www.trolebus.gov.ec/>>. [Consulta: 15-06-2007]
- COURT, A. *The 3rd Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and System.* Birmingham, UK, 2007.
- DÍAZ, O. Environmental friendly electric transport for large cities: the case of Mexico City. *Industrial Electronics, ISIE'2000.* México, 2000, pp. KL1-KL4.
- DOLECEK, R. y HLAVA, K. Transients effects at power supply system of Czech Railways from EMC viewpoint. *Radioengineering*, 2007, vol. 16, núm. 1. pp. 40-44.
- ELECTRIC TBUS GROUP. *E. I. Irvine: analysis and design of trolley overhead* [web en línea]. <<http://www.tbush.org.uk/article.htm>> [Consulta: 8-04-2007].
- FERNÁNDEZ, R. Tecnologías intermedias de transporte público. *Ciencia Abierta*, 2005, vol. 11, pp. 1-8.
- FILHO, M. *et al.* Evaluation of electromagnetic interference from railway electric power system harmonics. *IEEE, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 1, pp. 437-440.

- FISCHER, I. y BOLTON, G. Auxiliary power systems for rolling stock: electric traction system. *The 9th Institution of Engineering and technology Professional Development Course on Electric Traction Systems*. Manchester: Institution of Engineering and technology Professional, 2006, pp. 167-175.
- GOODMAN, G. Institution of Engineering and Technology (IET). Course on electrical traction system: electric traction system: overview of electrical railway system and the calculation of train performance. *The 9th Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Electric Traction Systems*, Manchester, 2006, pp. 6-10.
- HENSLEY, G.; SINGH, T. y SAMOTYJ, M. Impact of utility switched capacitors on customer systems. Part II: adjustable speed drive concerns. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, vol. 7, núm. 2, pp. 1623-1628.
- HILL, J. DC and AC traction motors: electric traction system. *The 9th Institution of Engineering and technology Professional Development Course on Electric Traction Systems*. Manchester: Institution of Engineering and technology Professional, 2006, pp. 43-53.
- . Electric railway traction. Part 1: electric traction and DC traction motor drives. *Power Engineering Journal*, 1994a, vol. 8, núm. 1, pp. 47-56.
- . Electric railway traction. Part 3: traction power supplies. *Power Engineering Journal*, 1994b, vol. 8, núm. 6, pp. 275-286.
- HILL, J. *et al.* A frequency domain model for 3kV Dc traction DC-side resonance identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, vol. 10, núm. 3, pp. 1369-1375.
- HSIANG, P. y LIN, C. Electric load estimation techniques for high-speed railway (HSR) traction power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2001, vol. 50, núm. 5, pp. 1260-1266.
- HSIANG, P.; LIN, C. y JONG, L. Simulating on-line dynamic voltages of multiple trains under real operating conditions for AC railways. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999, vol. 14, núm. 2, pp. 452-459.
- JIANG, Y. y EKSTROM, A. General analysis of harmonic transfer through converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, vol. 12, núm. 2, pp. 287-293.
- JONG, J. y CHANG, F. Algorithms for generating train speed profiles. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, vol. 6, pp. 356-371.
- . Models for estimating energy consumption of electric trains. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, vol. 6, pp. 278-291.
- KADHI, R.; ALLAN, J. y MELLIT, B. Assessment of A. C. side harmonics of D. C. supplied railways. *Power Electronics and Applications: European Conference*. United Kingdom, 1993, pp. 256-261.
- KNESCHKE, T. Control of utility system unbalance caused by single-phase electric traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1985, vol. IA-21, núm. 6, pp. 1559-1568.
- LEE, H.; KIMK, G. y OH, S. Sae-hyuk: faults of Korean electric railway system. *Electric Power Systems Research*, 2006, vol. 7, núm. 5, pp. 317-326.

- LEÓN, C. y MARTÍNEZ, B. *Estudio de la optimización del diseño de subestaciones para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- MARTIN, P. Train performance & simulation. *1999 Winter Simulation Conference Proceedings*, 1999, vol. 2, pp. 1287-1294.
- METRO DE MEDELLÍN. *Manual de mantenimiento. Anexo 03: suministro eléctrico*. Medellín, 1996.
- NATARAJÁN, R. *et al.* Short circuit currents of the SEPTA's traction power distribution system. *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 1994, vol. 1, pp. 15-21.
- OURA, Y.; MOCHINAGA, Y. y NAGASAWA, H. Railway electric power feeding systems. *Japan Railway & Transport Review*, 1998, vol. 16, pp. 48-58.
- PERRIN, J. P. y VENARD, C. *Transports électriques urbains-Distribution d'énergie. Automatismes de contrôle*, 1991, D5-554. Techniques de L'Ingénieur.
- PUENTE, F. Red eléctrica alimenta la expansión de la red ferroviaria de alta velocidad, potencia en la vía. *Entrelíneas*, 2007, pp. 40-45.
- SHORT, T. *et al.* Site variation and prediction of power quality. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18, núm. 4, pp. 1369-1375.
- SINGH, B.; GAIROLA, S. y CHANDRA, A. Multipulse AC-DC converters for improving power quality: a review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, vol. 23, núm. 1, pp. 260-281.
- SOPOV, V. I. y BIRYKOV, V. V. Increase of efficiency of the power supply system of a trolleybus. *IFOST symposium*, Rusia, 2006, pp. 18-20.
- SOPOV, V. V.; PROKUSHEV, V. I. y EVDOKIMOV. Improving performance of trolleybus power supply system. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, núm. 9, pp. 500-504.
- STEIMEL, A. Electric railway traction in Europe: a survey of the state of art. *Proceedings of the IEEE International Symposium*, 1996, vol. 1, núm. 2, pp. 17-20.
- . Electric railway traction in Europe. *IEEE Industry Applications Magazine*, 1996, vol. 2, núm. 6, pp. 6-17.
- SUTHERLAND, P.; WACLAWIAK, M. y MCGRANAGHAN, M. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115-kV transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21, núm. 2, pp. 837-844.
- TRAMWAY TFS (Grenoble, Rouen et Bobigny) [web en línea]. <<http://pagesperso-orange.fr/florent.brisou/Fiche%20Grenoble.htm>>. [Consulta: 21-07-2007].
- VUCHIC, V. *Urban transit systems and technology*. New Jersey: Willey & Sons, 2007.
- WALCZYNSKA, A. M. y JANISZEWSKI, P. Time domain analysis of harmonic interactions between traction vehicle and DC supply. *International Conference on Electric Railways in a United Europe*, 1995, pp. 186-196.

- WHITE, S. Institution of Engineering and Technology (IET). Course on electrical traction system: AC/DC Railway electrification and protection: electric traction system. *The 9th Institution of Engineering and technology Professional Development Course on Electric Traction Systems*. Manchester: Institution of Engineering and technology Professional, 2006, pp. 6-10.
- ZAMORA, I. *et al.* Influence of faults in electric railway system. The Institution of Electrical Engineers, *2nd International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*. España, 2005, pp. 504-509.

