

## **La modernización de la tracción eléctrica de un tren metropolitano con regulación reostática**

*Ioan Bele\* y Liviu Sevastian Bocî\**

(Recibido el 16 de octubre de 2001)

### **Resumen**

El sistema actual de accionamiento de los trenes metropolitanos es con la máquina de corriente eléctrica continua y la regulación de la velocidad de marcha de modo reostático.

En el presente trabajo se propone el mantenimiento del mismo sistema de accionamiento eléctrico, modernizándolo con el fin de aumentar la fiabilidad, la reducción de los gastos de mantenimiento, explotación y reparación, y el aumento de la comodidad de los pasajeros.

Las principales acciones que se van a seguir para alcanzar el objetivo propuesto son las siguientes:

- La modernización del motor eléctrico de tracción.
- La simplificación del cableo de potencia y su reducción cuantitativa.
- El perfeccionamiento de la unidad de control automático de mando que regula la velocidad.
- El perfeccionamiento de las instalaciones eléctricas auxiliares del metro y la utilización de unos componentes fiables.

Mediante la solución propuesta por los autores las modificaciones constructivas de la carrocería del metro son mínimas y esta solución se puede aplicar inmediatamente cuando se hagan las reparaciones principales.

----- *Palabras clave:* tracción eléctrica, tren metropolitano, regulación reostática, control.

---

\* Universidad "Aurel Vlaicu" de Arad, Rumania, cancelar.uav@inext.ro

## **Modernization of the electric traction of the subway, with reostatic regulation**

### **Abstract**

The actual electric drive system of the subway is with direct current electric machine and reostatic adjustment of speed.

In this work we propose to keep the electric drive but to modernize it in order to increase its fiability and passengers' confort and to reduce the expenses for maintenance, exploitation and repairs.

The main directions for the modernization of the subway drive system are the following:

- Modernization of electric traction engine.
- Simplifying power cabling and its quantitative reduction.
- Improving the automatic control unit for speed adjustment.
- Improving the subway auxiliary electric wiring and the use of fiable components.

The solution proposed by the authors doesn't suposse major constructive modifications of the subway carriage, being applicable while mayor repairs are made.

----- *Key words:* Electric traction, subway, reostatic regulation, automatic control.

## Introducción

En Rumania el sistema de accionamiento eléctrico del tren metropolitano es con corriente eléctrica continua y también la regulación de la velocidad es con modo reostático. Sin embargo el sistema actual presenta numerosas desventajas.

El descubrimiento y la aplicación de unas soluciones más económicas y más fiables en la acción eléctrica del metro necesitan en primer lugar el conocimiento detallado de las soluciones ya existentes, de todas las modificaciones que se han producido a lo largo del tiempo y de los mejoramientos, así como el estado al que han llegado todas las compañías constructoras de metros que hay en el mundo.

Todos los inconvenientes y desventajas resultantes del sistema de accionamiento actual (la regulación de la velocidad en niveles, el gran consumo de energía, las grandes dimensiones y volúmenes de los accesorios, la imposibilidad del freno recuperativo y la fiabilidad reducida), imponen el cambio a otro sistema de accionamiento, a otra variante, por razones funcionales, económicas y de comodidad.

La introducción de una nueva solución implica el diseño y la realización de un modelo experimental y del prototipo, y su seguimiento durante el uso, además, todo eso necesita un período más largo de tiempo, y por tanto, un costo más elevado. Por estas razones, para los vehículos que ya existen, se impone su modernización de manera que la fiabilidad crezca a un costo lo más reducido posible.

### La clásica tracción eléctrica

El cuadro eléctrico del metro está accionado por 4 motores eléctricos de tracción de corriente continua con excitación en serie y una potencia de 185 KW para cada motor. La línea de alimentación con energía eléctrica a tensión de 750 Vcc se ejecuta por el tercer riel en el túnel y, en los depósitos, por una catenaria aérea.

La unidad de mando es alimentada a las tensiones 24 Vcc y 110 Vcc, de las baterías de los

acumuladores, mantenidos a su alrededor, con el apoyo del convertidor rotativo.

El principal sistema eléctrico de alimentación de los motores eléctricos en régimen de tracción se presenta en la siguiente figura, donde se han hecho las anotaciones:

*IA*– interruptor automático principal.

*K1, K2, K3*– contactores de línea.

*K4*– contactor para el paso por puente del motor de tracción (MT).

*KS*– contactores para la conexión serie del MT.

*KP*– contactor para la conexión paralela del MT.

*RxA, RxB*– reóstatos para arranque-freno.

*Sh1, 2, 3, 4*– shunts para medir la corriente que pasa por el MT.

*M1, 2, 3, 4*– motores eléctricos de tracción.

*m1, 2, 3, 4*– envolvimientos de excitación de los motores eléctricos.

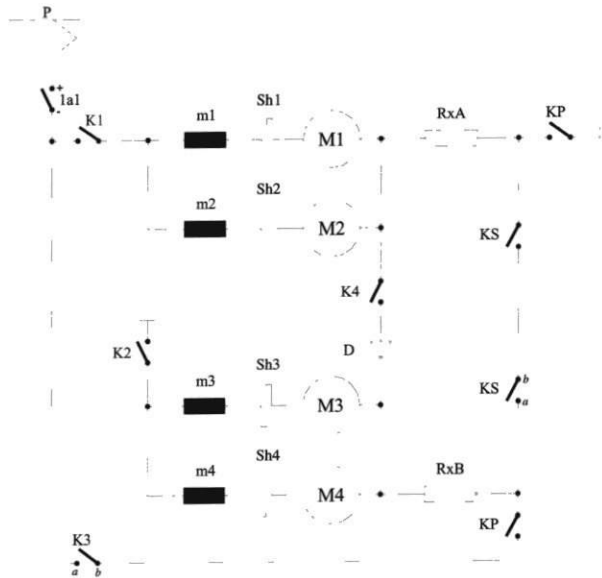
*D*– diodo de sentido para el paso por puente del MT.

La conexión de los motores es serie-paralelo y paralelo, y el tránsito de una conexión a otra se realiza por el puente. La modificación de la velocidad se hace de modo resistivo, con la ayuda del reóstato de arranque y del controlador de marcha que ejecuta 25 niveles resistivos (de los cuales 16 niveles son para la conexión serie-paralelo y 9 para la conexión paralelo) y 3 niveles de atenuación del campo.

El freno de servicio del metro es un freno eléctrico, que consiste en el paso de la máquina eléctrica del régimen de motor (o el régimen “lanzado”) al régimen de generador con excitación independiente, con consumo de la energía eléctrica en el reóstato de freno (el mismo que el de arranque).

En la proximidad de la velocidad de 10 km/h (cuando el freno eléctrico ya no es eficiente), se hace la conmutación automáticamente a un freno electroneumático. En el caso en que se quiera fre-

nar el vehículo y éste no empiece a funcionar (lo que es registrado por una corriente de mínimo 100 A en cada máquina eléctrica que se ha convertido en generador), se ejecuta la conmutación automática en el freno electroneumático (por la introducción de aire comprimido en el cilindro de freno).



**Figura 1** Sistema principal del circuito eléctrico en régimen de tracción

Si dentro de un período de tiempo muy corto desde el mando electroneumático del freno no se observa la presencia de la presión del aire comprimido en los cilindros de freno, se manda de manera automática al freno neumático de emergencia, mientras que el frenado es ejecutado por los distribuidores Knorr de cada vagón de metro.

### La instalación de tracción propuesta

En el presente trabajo se propone el mantenimiento del mismo sistema de accionamiento eléctrico, pero también su modernización. Cualquier perfeccionamiento de la actual solución es deseable, y a continuación se enumeran estas posibilidades:

### La modernización del motor eléctrico de tracción

Los grandes problemas que presenta el uso del actual motor de tracción nos permite considerar

y afirmar que, en la presente construcción, este no se debe utilizar más en la tracción eléctrica de los trenes metropolitanos. Por esta razón, una de las soluciones sería la construcción de un motor también de corriente continua, pero con una realización tecnológica mucho mejor y modernizada, con un peso y volumen más reducidos (el motor actual pesa casi 1.500 kg a una potencia de 185 KW), e incorporando materiales que permitan la clase H de aislamiento (cuando la temperatura puede llegar 180 °C).

La dimensión volumétrica y el peso serían más reducidos si se reemplazara también el enfriamiento natural del motor de tracción, con un enfriamiento forzado. Al mismo tiempo la transferencia de calor en la máquina se puede intensificar sustancialmente por enfriamiento forzado.

Con estas transformaciones y con un control riguroso de la corriente en régimen de tracción y freno, y mejorando la fiabilidad del motor de tracción, aumentaría la seguridad en su uso y se reducirían muchísimo los costos de su mantenimiento.

### La simplificación del cableo de potencia y su reducción cuantitativa

Las corrientes grandes del circuito de los motores de tracción (450 A) llevan al empleo en los sistemas eléctricos de potencia, de conductores de sección grande que llegan actualmente, hasta 70 ó 90 mm<sup>2</sup>. Sin embargo, estas secciones no se pueden disminuir a causa del calentamiento excesivo que se produce durante el funcionamiento del vehículo. Por otra parte, las longitudes de los conductores de enlace se pueden reducir con un diseño que racionalice las trayectorias y el reemplazo para los accesorios de potencia que permitan al final un consumo mínimo.

El mayor consumo de los conductores está favorecido por la regulación resistiva de la potencia del vehículo (para la ejecución de los vínculos eléctricos entre cada nivel del reóstato y los contactos de los controladores), el controlador de marcha y freno (o los contactores de regulación de los niveles de velocidad).

Por esta razón, además de las racionalizaciones propuestas más arriba, hace falta también el reemplazo del emplazamiento de resistencias de arranque en el mismo vagón cerca del controlador de marcha.

### ***El perfeccionamiento de la unidad automática de mando de la regulación de la velocidad***

El sistema actual de mando está dotado con una máquina que permitió hasta un cierto nivel y, junto con los accesorios de potencia, determinar la regulación de la velocidad en niveles, sin sobrepasar un cierto límite de corriente en los motores de tracción.

El más moderno medio de automatización del manejo y regulación de la velocidad de este vehículo es el *autómata programable* con microprocesador, construido con tecnología moderna, que funciona con base en un programa bien establecido, que puede ser modificado muy fácilmente si es necesario.

Dentro de éste deben entrar todos los datos que se refieren al estado de los conductores del sistema, el estado de los distintos botones de accionamiento de los puestos de manejo, los valores de los parámetros de las dimensiones eléctricas y no eléctricas, así como de los que se refieren a la velocidad pedida por la persona que maneja el vehículo, por los transductores inductivos y la velocidad efectiva.

El reconocimiento de la instalación eléctrica antes de la conexión al *autómata programable* con microprocesador para vehículos fabricados recientemente, se puede hacer con un dispositivo especial construido con este propósito [3]. Este puede disminuir, por ejemplo, el número de las horas para pruebas de 800 a 40, para una unidad de metro.

### ***La perfección de las instalaciones eléctricas auxiliares del metro y el uso de unos componentes fiables***

#### ***El reemplazo de unos aparatos y accesorios auxiliares y de potencia***

El gran porcentaje de los defectos aparecidos en la operación es resultado también de la menor

fiabilidad de los componentes y accesorios utilizados en las instalaciones eléctricas tanto de mando, como de potencia.

*Contactores de mando.* Debido al gran número de conexiones o desconexiones, debido a las grandes vibraciones introducidas por suspensión e irregularidades de las vías de rodaje, la fiabilidad de estos aparatos es muy reducida, lo que causa averías y hace sacar de la circulación los vehículos, con perturbaciones significativas del tráfico. Por esta causa, estos deben ser reemplazados por contactores resistentes a las vibraciones y con muchísimas conexiones garantizadas.

*Contactores de potencia.* En este caso también el número de los encajamientos es muy significativo, la fiabilidad reducida, las dimensiones en volumen y peso son muy grandes, y el funcionamiento defectuoso a menudo produce incendios.

*El convertidor estático para los servicios auxiliares* [2]. El uso del convertidor rotativo (para alimentar las baterías de acumuladores y la alimentación de los servicios auxiliares), conectado directamente de la red de 750 Vcc, produce muchos inconvenientes para su funcionamiento durante la operación. Su reemplazo por un convertidor estático simplificaría muchísimo la instalación eléctrica del metro. Al ser alimentado directamente a la tensión de la red de 750 Vcc, el convertidor estático produce la tensión de 3 x 380 Vcc, necesaria para el funcionamiento de los motores de corriente alterna trifásica que requieren los ventiladores de enfriamiento de los reóstatos de arranque-freno, las lámparas de iluminación del salón de los pasajeros, el compresor para la preparación del aire comprimido y la instalación de la climatización de las cabinas de manejo (o del salón de pasajeros).

*Conductores eléctricos de enlace.* Estos se dividen en dos grandes categorías:

- Conductores para la alimentación de los circuitos de baja tensión.
- Conductores para la alimentación de los accesorios del sistema eléctrico de potencia.

A la primera categoría pertenecen los conductores cuya sección es muy variada, teniendo los siguientes valores en [mm<sup>2</sup>]: 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70, totalizando una longitud de 25.000 m para una unidad de metro. Estos conductores no son voluminosos y se pueden utilizar más.

Los conductores usados para la alimentación de los accesorios de potencia, además del hecho de que deben resistir a tensiones hasta 3 KV, también deben cumplir otras condiciones como: gran resistencia al fuego, que no echen humo hasta ciertos límites, que no exhalen humo tóxico y que sean flexibles.

Es absolutamente necesaria la optimización de las trayectorias y enlaces eléctricos, de manera que pueda eliminarse una cantidad lo más grande posible de conductores y zapatillas, sobre todo porque un análisis detallado crea la posibilidad de la reducción hasta 30% tanto de los conductores, como de las zapatillas de enlace.

### Conclusiones

Las deficiencias de la actual solución relacionadas con: la presencia del motor eléctrico de tracción de corriente continua, debido a la regulación reostática, el consumo energético resulta ser muy significativo, los gastos de mantenimiento y de operación imponen también la necesidad de sustituirla o modernizarla. En las condiciones concretas de Rumania, por lo menos en el futuro próximo, no es posible el reemplazo total del sistema actual de accionamiento eléctrico del metro.

El accionamiento con la máquina de corriente alterna trifásica y la regulación de velocidades con inversor sería posible, pero aumentaría el costo y crecería el volumen de las modificaciones constructivas.

Por estas causas la solución propuesta por los autores es la descrita, en la que las modificaciones constructivas de la carrocería son mínimas y se puede aplicar inmediatamente con la ocasión de las reparaciones mejores.

### Referencias bibliográficas

1. Bele, Ioan. *La necesidad y el modo de mantenimiento a parámetros elevados del sistema de tracción en corriente continua, alimentado a 750 V*. Sesión de comunicaciones científicas de la Universidad "Aurel Vlaicu" de Arad, sección "La resistencia de los materiales y material rodante" pp. 69-73, mayo de 1994.
2. \_\_\_\_\_. *La sustitución del convertidor rotativo para servicios auxiliares por el convertidor estático al metro*. Sesión de comunicaciones científicas de la Universidad "Aurel Vlaicu" de Arad, el volumen IX "Material rodante" pp. 95-98, octubre de 1997.
3. \_\_\_\_\_. *Stand for the check of the control and drive installation before the coupling to the microprocessor of the trolleybus adjusted to VTC*. Revista UAV Arad, mayo de 1999.
4. \_\_\_\_\_. *Contribuciones con respecto a la selección y optimización de los sistemas de accionamiento eléctrico al metro*. Tesis doctoral de Universidad Politécnica de Timisoara de 1999.
5. \_\_\_\_\_, Bocfi, Liviu Sevastian. *Etude sur le changement du système d'actionnement électrique au métro en Roumanie*. Boletín Científico de la Universidad "Politécnica" de Timisoara, sección Mecánica, 2001.
6. *Documentación técnica de ejecución del metro de Bucarest*.
7. *Libro técnico del metro 239* Vol. I-Vol. VII, Arad, 1988.