

DETERMINACIÓN DE LAS INDUCTIVIDADES DE LAS RAMAS DE METRO CON VTC

Por

*Ioan Bele**

*Liviu Sevastian Bocîi***

1. Introducción

Para ser competitivo y muy rentable, el parque de metros tiene que ser perfeccionado por especialistas, subiéndole al nivel alto sus parámetros técnicos. Los medios técnicos para realizar la mayoría de los vehículos eléctricos de tracción se han cambiado mucho durante los últimos 20 años.

Al accionamiento mediante la maquina eléctrica de corriente continua y la regulación de la velocidad con VTC (variador de tensión continua) aparecen una serie de componentes suplementarias como son *las inductividades de la entrada* y del motor. Estos componentes conducen a la ampliación del peso del vehículo, así como de su volumen, motivo para que la determinación exacta de sus valores tenga que constituir una permanente preocupación para las especialistas.

El condensador del filtro de la red (el de la entrada) permite el funcionamiento del VTC con los impulsos de corriente, teniendo, en este modo, un papel de deposito de energía. El VTC reduce las supertensiones de los bornes del variaor en unos limites aceptables.

La inductancia del circuito de entrada reduce las ondulaciones de corriente en la línea de alimentación a una amplitud suficientemente bajada para no perturbar otros consumidores.

2. Calculo para dimensionar el filtro de entrada

A continuación se hacen las siguientes notaciones:

T – periodo de tacto del VTC;

f = 1/T– frecuencia de trabajo del VTC;

T_c – periodo de conducción del VTC;

$a = \frac{T_c}{T}$ – raporto de conducción del VTC;

$f_0 = \frac{1}{2\delta \sqrt{L_F C_F}}$ – frecuencia propia del filtro de la red;

U_{min} = 525 V – tensión mínima admisible a la línea de corriente continua en explotación;

* Prof.dr.ing. Facultad de Ingeniería, Universidad „Aurel Vlaicu” de Arad

** Prof.dr.ing. Facultad de Ingeniería, Universidad „Aurel Vlaicu” de Arad

$I_{\max} = 540 \text{ A}$ – corriente máximo tomado por VTC al principio;
 $\ddot{A}U_{C0 \max} = (0,1 \dots 0,2) U_{\min}$ – ondulación máxima de la tensión;
 $\ddot{A}I_{L0 \max} = (0,01 \dots 0,05) I_{\max}$ – ondulación máxima de la corriente;
 ($\ddot{A}U_{C0 \max}$ y $\ddot{A}I_{L0 \max}$ son valores recomendados en practica)[6].

El principal problema es la elección de la frecuencia de trabajo del variador. Una frecuencia muy baja conduce a una gama de regulación grande, creciendo muchísimo el filtro de entrada y la inductancia conectada en serie con el motor de tracción.

De conformidad con la metodología de calculo [2], las ondulaciones máximas de la tensión y de la corriente elegidas, según las recomendaciones de la practica, serán las siguientes:

$$\Delta U_{C0 \max} = 0,2U_{\min} = 0,2 \times 525 = 105 \text{ V} \quad (1)$$

$$\Delta I_{L0 \max} = 0,05I_{\max} = 0,05 \times 540 = 27 \text{ A} \quad (2)$$

El variador de tensión continua propuesto tiene las siguientes características:

$f = 400 \text{ Hz}$;
 $a_{\min} = 5\%$
 $a_{\max} = 98\%$
 $I_{\max} = 540 \text{ A}$

El motor de tracción utilizado tiene las características nominales:

$U_n = 750 \text{ V}$
 $P_n = 185 \text{ KW}$
 $I_n = 270 \text{ A}$
 $I_p = 360 \text{ A}$
 $L_{\text{motor}} + E_{\text{excitación}} = 11 \cdot 10^{-3} \text{ H}$
 $\ddot{A}I_M = 30 \text{ A}$

Las ecuaciones de calculo son las siguientes [6]:

$$(\Delta U_{C0})_{\max} = \frac{I_{\max}}{4C_0} \cdot \frac{1}{f} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f} \right); \quad (3)$$

$$(\Delta I_{L0})_{\max} = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_0 L_0} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^3 \right]. \quad (4)$$

En estas relaciones, (3) y (4), C_0 , L_0 y f_0 son: la capacidad del condensador- filtro, la inductividad del filtro y frecuencia propia del filtro.

C_0 y L_0 se pueden determinar sin tener en cuenta el segundo termino del paréntesis:

$$C_0 = \frac{I_{\max}}{4(\Delta U_{C0})_{\max} \cdot f} = \frac{540}{4 \cdot 105 \cdot 400} = 3,2142 \cdot 10^{-3} \text{ F.}$$

$$L_0 = \frac{I_{\max}}{32f^2 C_0 (\Delta I_{L0})_{\max}} = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3} \cdot 27} = 1,2153 \cdot 10^{-3} \text{ H.}$$

La frecuencia propia del filtro será:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,2153 \cdot 10^{-3} \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3}}} = 80,52 \text{ Hz}.$$

Haciendo los cálculos mediante las relaciones (3) y (4) completas, obtendremos:

$$(\Delta U_{C_0})_{\text{real}} = \frac{I_{\text{max}}}{4C_0} \cdot \frac{1}{f} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f}\right) = \frac{540}{4 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{400} \cdot \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{80,52}{400}\right) = 96,3 \text{ V};$$

$$(\Delta I_{L_0})_{\text{real}} = \frac{I_{\text{max}}}{32f^2 C_0 L_0} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{f_0}{f}\right)^3\right]$$

$$(\Delta I_{L_0})_{\text{real}} = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 3,2142 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2153 \cdot 10^{-3}} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{80,52}{400}\right)^3\right] = 28,42 \text{ A}$$

Estos valores sustituidos en las relaciones (3) y (4) permitirán el cálculo muy preciso del condensador y de la inductividad filtro de la red.

$$C_F = \frac{I_{\text{max}}}{4f(\Delta U_{C_0})_{\text{max}}} \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{f_0}{f}\right) = \frac{540}{4 \cdot 400 \cdot 105} \left(1 - \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{80,52}{400}\right) = 2,9482 \cdot 10^{-3} \text{ F}.$$

$$L_F = \frac{I_{\text{max}}}{32f^2 C_F (\Delta I_{L_0})_{\text{max}}} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{f_0}{f}\right)^3\right]$$

$$L_F = \frac{540}{32 \cdot 400^2 \cdot 2,9482 \cdot 10^{-3} \cdot 27} \left[1 + \frac{5\pi^3}{24} \cdot \left(\frac{80,52}{400}\right)^3\right] = 1,3948 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F \cdot C_F}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,3948 \cdot 10^{-3} \cdot 2,9482 \cdot 10^{-3}}} = 78,48 \text{ Hz}.$$

La modificación de los valores de la inductividad del filtro L_F y de la capacidad del condensador - filtro C_F , en función de la ondulación máxima de la tensión y la de la corriente recomendadas en practica, calculadas mediante las relaciones anteriores, son presentadas en las tablas 1÷6 y en las figuras 1 y 2.

Cada curva de variación corresponde a una ondulación de la corriente $\Delta I_{L_0 \text{max}}$, las notaciones de las figuras siendo:

- 1 - $\Delta I_{L_0 \text{max}} = 0,01 \cdot I_{\text{max}} = 5,4 \text{ A}$
- 2 - $\Delta I_{L_0 \text{max}} = 0,02 \cdot I_{\text{max}} = 10,8 \text{ A}$
- 3 - $\Delta I_{L_0 \text{max}} = 0,03 \cdot I_{\text{max}} = 16,2 \text{ A}$
- 4 - $\Delta I_{L_0 \text{max}} = 0,04 \cdot I_{\text{max}} = 21,6 \text{ A}$
- 5 - $\Delta I_{L_0 \text{max}} = 0,05 \cdot I_{\text{max}} = 27 \text{ A}$

Determinación de las ΔU_{C0max} , C_0 ,

Tabla 1.

ΔU_{C0max}	$0,10 \cdot U_{min}$	$0,12 \cdot U_{min}$	$0,14 \cdot U_{min}$	$0,16 \cdot U_{min}$	$0,18 \cdot U_{min}$	$0,20 \cdot U_{min}$
U [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
C_0 [mF]	6,4	5,4	4,6	4	3,6	3,2

Determinación de las ΔI_{L0max} , f_0 , f_{oreal}

Tabla 2.

ΔI_{L0max}	$0,01 \cdot I_{max}$	$0,02 \cdot I_{max}$	$0,03 \cdot I_{max}$	$0,04 \cdot I_{max}$	$0,05 \cdot I_{max}$
I [A]	5,4	10,8	16,2	21,6	27
ΔI_{L0real} [A]	5,42	10,94	16,59	22,41	28,42
f_0 [Hz]	36,01	50,92	62,37	72,02	80,52
f_{oreal} [Hz]	35,92	50,59	61,62	70,70	78,48

Determinación de la L_0

Tabla 3.

ΔU_{C0max}	$0,10 \cdot U_{min}$	$0,12 \cdot U_{min}$	$0,14 \cdot U_{min}$	$0,16 \cdot U_{min}$	$0,18 \cdot U_{min}$	$0,20 \cdot U_{min}$
ΔI_{L0max}	L_0 [mH]					
$0,01 \cdot I_{max}$	3,0382	3,6458	4,2535	4,8611	5,4687	6,0764
$0,02 \cdot I_{max}$	1,5191	1,8229	2,1267	2,4306	2,7344	3,0382
$0,03 \cdot I_{max}$	1,0127	1,2153	1,4178	1,6204	1,8229	2,0255
$0,04 \cdot I_{max}$	7,5955	9,1146	1,0634	1,2153	1,3672	1,5191
$0,05 \cdot I_{max}$	6,0764	7,2917	8,5069	9,7222	1,0937	1,2153

Determinación de la ΔU_{C0real}

Tabla 4.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	ΔU_{C0real} [V]					
5,4	50,55	60,66	70,77	80,89	91	101,11
10,8	49,75	59,70	69,65	79,60	89,55	99,50
16,2	49,13	58,96	68,78	78,61	88,44	98,26
21,6	48,61	58,33	68,05	77,78	87,50	97,22
27	48,15	57,78	67,41	77,04	86,67	96,30

Determinación de la C_F

Tabla 5.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	C_F [mF]					
5,4	6,1906	5,1588	4,4218	3,8691	3,4392	3,0953
10,8	6,0920	5,0766	4,3514	3,8075	3,3844	3,0460
16,2	6,0163	5,0136	4,2974	3,7602	3,3424	3,0082
21,6	5,9525	4,9605	4,2518	3,7203	3,3070	2,9763
27	5,8964	4,9136	4,2117	3,6852	3,2758	2,9482

Determinación de la L_F

Tabla 6.

ΔU_{C0max} [V]	52,5	63	73,5	84	94,5	105
ΔI_{L0max} [A]	L_F [mH]					
5,4	3,1699	3,8039	4,4378	5,0718	5,7058	6,3398
10,8	1,6244	1,9493	2,2742	2,599	2,9239	3,2488
16,2	1,1086	1,3304	1,5521	1,7738	1,9955	2,2173
21,6	0,85122	1,0215	1,1917	1,362	1,5322	1,7024
27	0,6974	0,8368	0,9763	1,1158	1,2553	1,3948

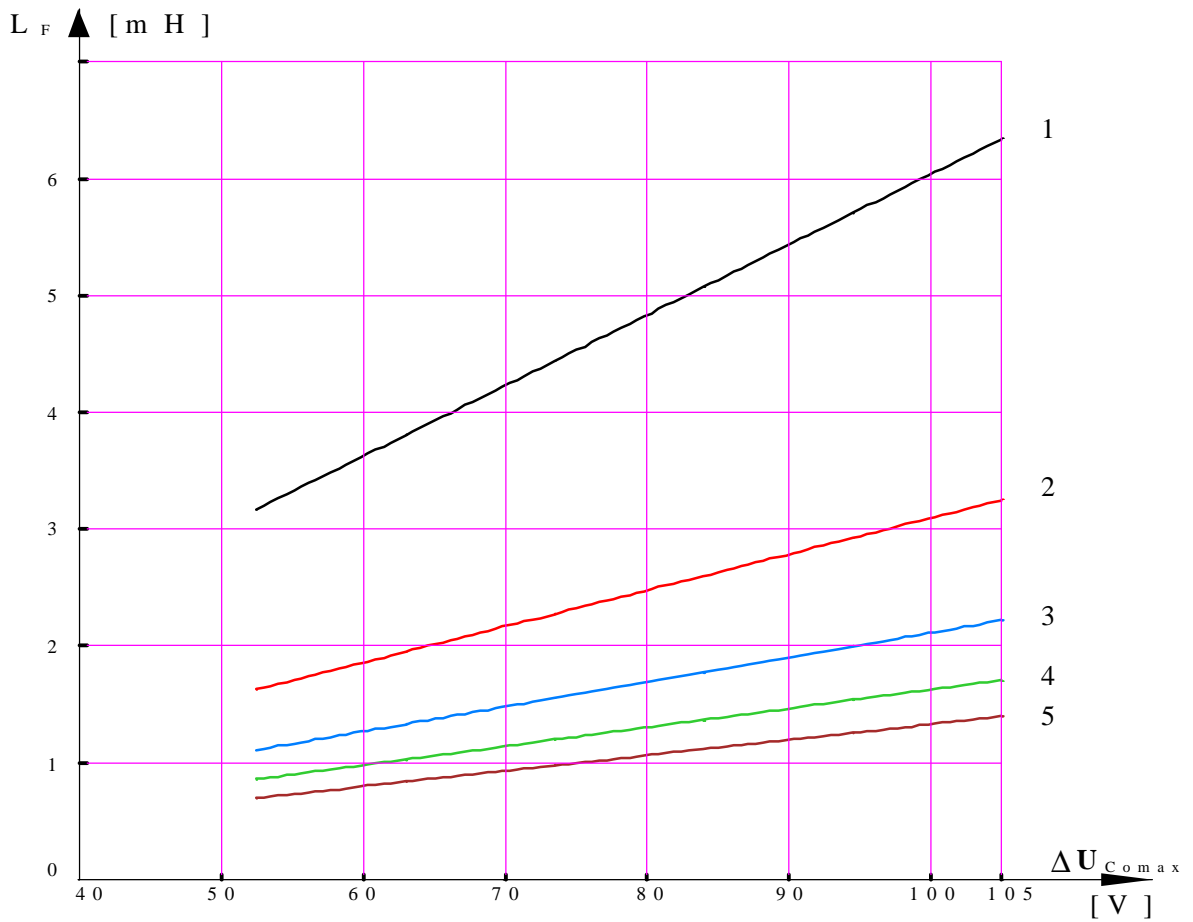


Figura 1. La modificación del valor L_F en función de las ondulaciones máximas de la tensión y las de la corriente recomendadas

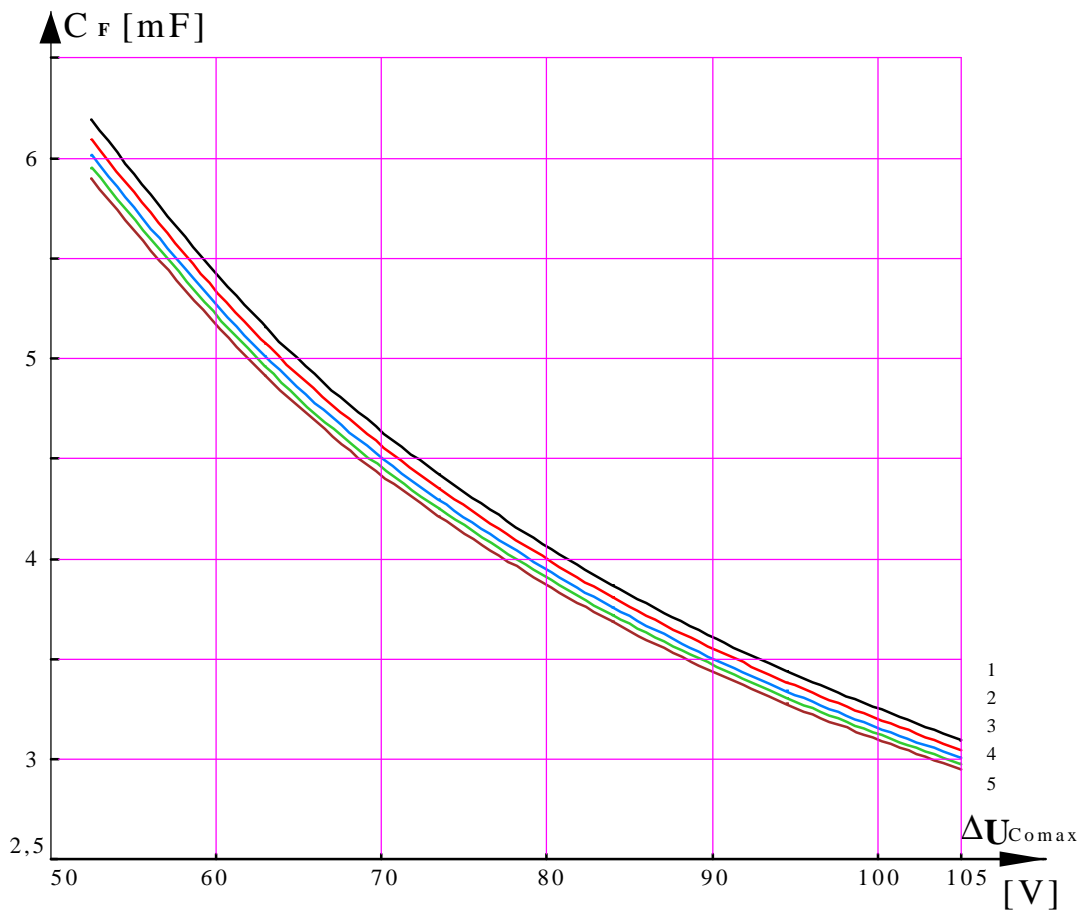


Figura 2. La modificación del valor C_F en función de las ondulaciones máximas de la tensión y las de la corriente recomendadas

3. Conclusiones

Analizando los diagramas de las figuras 1 y 2 resuelta:

- **la inductividad** del filtro L_F se modifica muchísimo en función de la ondulación de la tensión ΔU_{C0max} a las ondulaciones pequeñas de la corriente, pero se modifica poco a las ondulaciones grandes de la corriente ΔI_{L0max} .

- **la capacidad** del condensador - filtro C_F se modifica muchísimo en función de las ondulaciones de la tensión ΔU_{C0max} , pero poco con las ondulaciones de la corriente ΔI_{L0max} , la variación siendo no lineal.

En función de necesidades se van a elegir los coeficientes óptimos de manera que las dimensiones de la inductividad sean mínimas, y el resuelto que sea máximo.

4. Bibliografía

- [1] Bele, I. – *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, mai 1999.
- [2] Bele, I. – *Contribuciones con respecto a la elección y la optimización de los sistemas de accionamiento eléctrico al metro*, Tesis doctoral Universidad Politécnica de Timișoara 1999.
- [3] Bele, I; Bocîi, L. – *Etude sur le changement du système d'actionnement électrique au métro en Roumanie*, Boletín Científico de la Universidad "Politécnica" de Timisoara, sección Mecánica 2001.
- [4] Bele, I; Bocîi, L. – *L'importance des essais expérimentaux au système d'actionnement en courant continu avec VTC pour le métro*, Boletín Científico de la Universidad "Politécnica" de Timisoara, sección Mecánica 2001.
- [5] Bocîi, L.S. - *Contribuciones a la frenada de los vagones de viajeros de alta velocidad* Tesis doctoral, Timișoara 1997;
- [6] Străinescu, I. – *Variadores estáticos de tensión continua*, Edición Técnica, Bucarest 1983.
- [7] *Documentación técnica de ejecución del metro de Bucarest*.
- [8] *** – *Libro técnico del metro 239 Vol. I – Vol. VII*, Arad 1988.