

CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN

SPECIFIC POWER CIRCUITS FOR TRANSILIEN SERIES BB 27000 ELECTRIC LOCOMOTIVES

George DUMITRU¹, Mircea DUMITRESCU², Radu Teodor COSTACHE³,
Mirel UNGUREANU⁴, Elisabeta CRĂCIUN BOJE⁵, Alexandru BADEA⁶

¹Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România
e-mail autor: George DUMITRU: george.dumitru.cfr@gmail.com

²SNTFC „CFR Călători” SA - B-dul. Dinicu Golescu, nr. 38, CP 010873, București,
România, e-mail: Mircea DUMITRESCU: mrc_dumitrescu@yahoo.com.

³Rail Cargo Carrier România SRL - str. „Calea Bucureștilor”, nr. 21-25, Otopeni, România:
e-mail Radu Teodor COSTACHE: radu.teodor.costache@gmail.com

⁴Deutsche Bahn Cargo România SRL, str. „sergent Nuțu Ion”, nr. 44, clădirea „One Cotroceni
Park Office”, corpul A, etajul 6, CP 050762, sectorul 5, București, România, e-mail autor:
Mirel UNGUREANU: Mirel.Ungureanu@deutschebahn.com;

⁵Autoritatea de Siguranță Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București,
România: Elisabeta CRĂCIUN BOJE: elisabetacraciunboje@afer.ro

⁶Universitatea Politehnica București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România
e-mail: Alexandru BADEA: alexsiniaia@yahoo.com

Rezumat: Circuitul de stingere intervine pe durata procesului de comutație, în rest este separat de circuitele principale, bobinele de stingere nefiind străbătute de curenți de sarcină, eliminându-se astfel, pierderi energetice considerabile. Condensatoarele de stingere sunt conectate între faze, punctele de legătură cu fazele fiind între diode și tiristoare. Stingerea tiristoarelor inverterului este asigurată prin aprinderea tiristorului care urmează să preia conducția. Condensatoarele de stingere se încarcă datorită trecerii prin ele a curentului motorului de tracțiune. Inverterul trifazat de tensiune cu circuit comun de stingere, prezintă caracteristica de stingere a tiristoarelor sale la momente de timp distinct alese, ceea ce face posibilă o reglare a tensiunii de ieșire a inverterului prin împărțirea timpului afectat conducerii tiristoarelor, într-o succesiune de conducerii urmate de pauze de întrerupere, raportul dintre timpul de conducție și timpul de pauză, determinând mărimea tensiunii de ieșire a inverterului.

Cuvinte cheie: Inverter, tiristor, condensator, asincron, trifazat, comutație, frecvență..

Abstract: The extinguishing circuit intervenes during the switching process, otherwise it is separated from the main circuits, the extinguishing coils not being crossed by load currents, thus eliminating considerable energy losses. The extinguishing capacitors are connected between the phases, the connection points with the phases being between diodes and thyristors. The switching off of the thyristors of the inverter is ensured by the ignition of the thyristor that is to take over the conduction. The quenching capacitors are charged due to the passage of the traction motor current through them. The three-phase voltage inverter with a common extinguishing circuit has the characteristic of extinguishing its thyristors at distinctly chosen moments of time, which makes it possible to regulate the output voltage of the inverter by dividing the time affected by the conduction of the thyristors, in a sequence of conduction followed of interruption pauses, the ratio between conduction time and pause time, determining the magnitude of the inverter output voltage.

Keywords: inverter, thyristor, capacitor, asynchronous, three-phase, commutation, frequency.

1. INTRODUCERE

Motorul electric de tracțiune care dotează locomotivele electrice seria BB 27000 (figura 1), este un echipament de tip mașină electrică rotativă de curent alternativ, asincron trifazat [1], fiind mecanic o structură portantă suspendată parțial pe cadrul boghiului și parțial pe osia montată (acționare cu suspensie pe nas). Motorul este dependent de regimul de funcționare al invertorului de tensiune care poate prelua pe lângă funcția de modificare a frecvenței și pe aceea de modificare a tensiunii, lucrând în acest caz, în regim pulsant [18] cu frecvența de tact care nu trebuie să depășească limitele de $300 \div 400$ de [Hz], în mod normal acesta funcționând la frecvența fundamentală a tensiunii de ieșire. De asemenea, ambele tipuri de invertoare trifazate se pretează fără modificări și la transferul energiei de frânare, funcționând ca generator spre rețeaua catenară, în regim de frânare recuperativă [2]. Din punct de vedere al dependenței factorului de utilizare a puterii instalate de frecvența de lucru, invertorul de curent este mai avantajos decât cel de tensiune, întrucât lucrează cu frecvența fundamentalei curentului de ieșire.

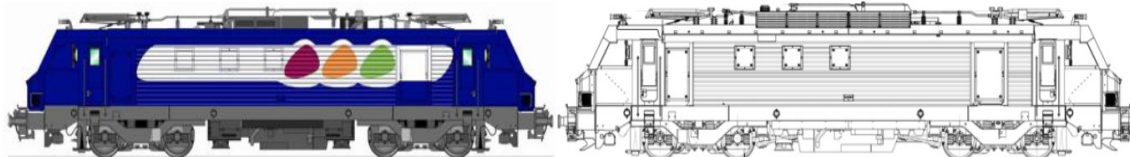


Fig. 1. Schema locomotivei electrice seria BB 27000 Transilien

Invertorul trifazat de tensiune cu condensator de stingere divizat poate funcționa cu o comutație a tiristorului principal în fiecare interval de conducție corespunzător unei alternanțe a tensiunii de ieșire, de frecvență dată sau cu intervalul de conducție fragmentat corespunzător unei legi de modulație impuse, precum cea sinusoidală [16]. Invertorul are asigurată stingerea independentă a tiristoarelor principale, în conducție iar procesul de stingere este declanșat prin comanda de amorsare a tiristorului de stingere corespunzător, care închide circuitul de stingere. În decursul procesului de stingere pe poartă [3], trecerea unui tiristor principal în stare blocată se realizează prin anularea curentului care-l străbate și aplicarea concomitentă a unei tensiuni de blocare, reprezentând căderea de tensiune în sens direct pe dioda de recuperare, curentul de sarcină pe timpul comutării fiind asigurat de circuitul de stingere [4].

Impulsurile de comandă de la invertor sunt formate prin compunerea unei tensiuni auxiliare, „triunghiulare”, având tensiunea de comandă modulată sinusoidal [19]. Frecvența tensiunii de comandă este determinată de viteza unghiulară a turației motorului electric de tracțiune [5], la care se adaugă frecvența de alunecare, care este dependentă de cuplul motoarelor de tracțiune.

2. DETERMINAREA ECUAȚIILOR INTENSITĂȚII CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC DIN ÎNTREFIERUL MOTOARELOR ELECTRICE DE TRACȚIUNE

Pentru determinarea ecuațiilor *Laplace* [25] ale intensității câmpului electromagnetic din întrefierul motorului electric de tracțiune asincron trifazat al locomotivei, se pleacă de la premisa că invertorul trifazat de curent cu stingere autonomă poate fi considerat ca o sursă de curent alternativ cu frecvența și amplitudinea variabile, fiind lipsit de tiristoarele auxiliare de stingere [6]. Elementele componente ale invertorului sunt șase tiristoare T_1, \dots, T_6 , șase diode

**CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR
ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN**

D_1, \dots, D_6 , care realizează decuplarea celor șase condensatoare de stingere C_1, \dots, C_6 de înfășurările motorului asincron de tracțiune. În ajutorul realizării acestor calcule se pot utiliza și produse software ingineresti ce conduc la ușurarea aplicării algoritmilor [20]. O caracteristică a procesului de comutație [7-10] constă în faptul că tensiunea pe condensatoarele de stingere își schimbă polaritatea, iar energia înmagazinată în inductanța de scăpări a motorului (în absența diodelor de recuperare), va determina supraîncărcarea condensatoarelor de stingere, care vor prelua (sine die) această energie [11]. Comutarea curentului dintr-o fază în alta se face printr-un proces oscilant determinat de circuitul format din condensatoarele de stingere și inductanțele mașinii electrice rotative de tracțiune, frecvența proprie a acestui circuit având expresia:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L'C}}, L' = L_1 + \frac{L_m L_2'}{L_m + L_2'} \quad (1)$$

unde: L_1 este inducția statorică, L_m este inducția de magnetizare, iar L_2' este inducția rotorică, iar tensiunea maximă la care se încarcă condensatorul de stingere este $u_{c, \max}$:

$$u_{c, \max} = \frac{u \sin \varphi}{2I_d} + I_d \quad (2)$$

Valoarea timpului de blocare este:

$$t_b = \frac{3Cu \sin \varphi}{2I_d} + \sqrt{3L'C} \quad (3)$$

unde: u este tensiunea pe fază a motorului, iar I_d este intensitatea curentului electric din circuit. Am considerat prin ipoteză că sursa câmpului magnetic inductor în întrefierul δ prezintă alunecarea: $s = (v_1 - v)/v_1$ și are pulsația ω_1 a tensiunii primare de alimentare, iar unda progresivă [22] a densității de curent inductoare este dependentă de numărul polilor magnetici ai armăturii mașinii electrice rotative de curent alternativ trifazat (care acționează independent și concomitent câte una din fiecare osie a locomotivei) deci de cuplele de materiale utilizate [12].

Înfășurarea trifazată inductoare este reprezentată printr-o pânză de curent iar densitatea acestei pânze de curent inductoare are o singură componentă, de forma unei unde progresive alunecătoare care se propagă în sensul pozitiv al axei ox cu viteza de sincronism:

$$v_1 = \frac{\omega_1}{k} = 2f_1 \tau \quad (4)$$

Totodată, am considerat prin ipoteză că la nivelul câmpului învârtitor magnetic inductor în întrefier, are doar o armonică fundamentală [23] corespunzătoare pulsației ω_1 , aceeași viteză de sincronism v_1 și același pas polar τ , având conductivitatea electrică superficială echivalentă σ_3 , iar curenții induși de câmpul magnetic învârtitor din întrefierul δ , având expresia următoare pentru densitatea unei progresive:

$$\underline{J}_{S2} = J_{Sm2} e^{j(kx - s\omega_1 t)} \Rightarrow J_{S1}(x, t) = J_{Sm1} \sin(kx - \omega_1 t), k = \frac{\pi}{\tau, \omega_1} = 2\pi f_1 \quad (5)$$

unde: J_{Sm1} reprezintă amplitudinea densității pânzei de curent iar τ este pasul polar al înfășurării trifazate inductoare.

Intensitatea câmpului electromagnetic se raportează la un referențial inerțial triortogonal, rectangular, cartezian (o, x, y, z) și este progresivă și nenulă [18] numai în

întrefier, acolo unde sunt satisfăcute ecuațiile complexe [19-21] următoare:

$$\operatorname{div} \underline{B} = \mu_0 \operatorname{div} \underline{H} = 0 \rightarrow \frac{\partial \underline{H}_x}{\partial x} + \frac{\partial \underline{H}_y}{\partial y} = 0 \text{ și } \operatorname{rot} \underline{H} = 0 \rightarrow \frac{\partial \underline{H}_y}{\partial y} - \frac{\partial \underline{H}_x}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Prin derivare succesivă în raport cu x și cu y , sistemul de ecuații anterior pentru componentele tangențială \underline{H}_x și \underline{H}_y normală ale câmpului magnetic progresiv din întrefier, devine:

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_x}{\partial y^2} = 0 \text{ și } \frac{\partial^2 \underline{H}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_y}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

Ținând cont de expresia matematică a densității curentului electric inductor în referențialul cartezian o, x, y, z (solidar cu armătura inductoare), soluțiile ecuațiilor diferențiale [23-25] precedente capătă forma următoare:

$$\underline{H}_x(x, y) = (\underline{A}shky + \underline{B}chky)e^{j(kx - \omega t)} \text{ și } \underline{H}_y(x, y) = -j(\underline{A}shky + \underline{B}chky)e^{j(kx - \omega t)} \quad (8)$$

Constantele complexe de integrare A și B , se determină din condiția de salt a componentei tangențiale a intensității câmpului magnetic progresiv la interfața armătură inductoare - întrefier ($y = \delta$) și din condiția de salt a componentei tangențiale a intensității câmpului magnetic progresiv la interfața armătură indusă - întrefier ($y = 0$), conform legii inducției electromagnetice, respectiv:

$$\underline{H}_x(x, \delta) = \underline{J}_{S1} \Rightarrow \underline{A}shk\delta + \underline{B}chk\delta = \underline{J}_{S1} \Rightarrow \underline{H}'_x(x', 0) = \underline{J}_{S2} = \underline{J}_{S2} e^{j(kx' - s\omega t)} \Rightarrow \quad (9)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial}{\partial x'} \left(\frac{1}{\sigma_s} \underline{J}_{S2} \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 \underline{H}'_y(x', 0)) \Rightarrow \underline{B} = -j\sigma_s \mu_0 s v_1 \underline{A} \Rightarrow \quad (10)$$

$$\Rightarrow \underline{A} = \frac{1}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{S1} \text{ și } \underline{B} = \frac{-j\sigma_s \mu_0 s v_1}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{S1} \Rightarrow \quad (11)$$

$$\Rightarrow \underline{H}_x(x, y) = \frac{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chky}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{S1} \text{ și } \Rightarrow \underline{H}_y(x, y) = -\frac{j\sigma_s \mu_0 s v_1 chky - jchky}{shk\delta - j\sigma_s \mu_0 s v_1 chk\delta} \underline{J}_{S1} \quad (12)$$

Din ultimele două expresii ale soluțiilor de câmp, se pot determina forțele electromagnetice cu ajutorul valorii vectoriale a tensorului stării fictive de tensiuni *Maxwell* [13] în câmp magnetic din armătura indusă în care, normala exterioară la suprafața dinspre întrefier a indusului are sensul pozitiv al axei oy , iar versorul \bar{u}_y și vectorul complex \bar{H} al câmpului magnetic progresiv se determină ținând cont de faptul că R_e reprezintă partea reală a unei mărimi complexe, astfel:

$$\begin{aligned} \bar{T}_m &= \operatorname{Re} \left\{ \mu_0 \underline{h}_x(x, 0) \underline{H}_y^*(x, 0) \bar{u}_x + \frac{\mu_0}{2} \left[\underline{H}_y(x, 0) \underline{H}_y^*(x, 0) \right] - \underline{H}_x(x, 0) \underline{H}_x^*(x, 0) \bar{u}_y \right\} = \\ &= T_{mx} \bar{u}_x + T_{my} \bar{u}_y \end{aligned} \quad (13)$$

unde \bar{u}_x : reprezintă versorul de poziție al abscisei ox , din ultima expresie reieșind faptul că efectele dinamice ale câmpului magnetic învârtitor, progresiv din întrefier se manifestă pe două direcții în raport cu armăturile, respectiv pe direcție tangențială prin intermediul forței de

**CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR
ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN**

tracțiune și pe direcție ortogonală, prin forța componenta normală [2].

De asemenea, ambele forțe prezintă caracteristică pulsatorie dependentă de unitatea de timp, având dublul frecvenței f_1 a câmpului magnetic învârtitor progresiv din întrefierul armăturilor mașinii electrice rotative de curent alternativ trifazat, sincron. Totodată, valoarea medie în timp a forței de tracțiune pe lungimea unui pas polar τ și pe lățimea l de referință. Forța de tracțiune depinde de solenația inductoare, de conductivitatea electrică superficială echivalentă σ_s , de viteza de sincronism v_1 , de produsul dintre frecvența de alimentare f_1 și pasul polar τ al armăturii primare, iar valoarea medie în timp a forței normale rezultante pe lungimea unui pas polar τ și pe lățimea l , are expresia:

$$F_n = \frac{1}{2} \mu_0 \tau l T_{my} = \frac{1}{4} \mu_0 \tau l \frac{(1 - \sigma_s^2 \mu_0^2 s^2 v_1^2) J_{Sm1}^2}{sh^2 k \delta - j \sigma_s^2 \mu_0^2 s^2 v_1^2 ch^2 k \delta} \quad (14)$$

Circuitul de forță al invertorului trifazat este puntea, circuitul de comutație fiind compus din tiristoare T_x , condensatorul de stingere C_K , bobine L_Y , diodele D_n de recuperare ale invertorului, conectate direct la plusul și minusul sursei de alimentare. Funcționarea circuitului de comutație este asigurată succesiv prin alternanța polarității condensatorului, inversându-se după fiecare proces de stingere, ramurile superioare și inferioare ale invertorului fiind stinse în mod alternativ. Încărcarea și descărcarea condensatorului de stingere se face de la plusul sursei, prin bobina de comutație L_K și tiristoarele auxiliare, la minimul sursei de alimentare. Ecuațiile tensiunii electrice și intensitatea curentului condensatorului la un moment oarecare de timp T , sunt:

$$\begin{aligned} U_c &= U_d - (U_d - U_{c0}) \cos \omega t + \omega L_K I_0 \sin \omega t \\ i_c &= \omega C (U_d - U_{c0}) \sin \omega t + I_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (15)$$

unde: U_d este tensiunea sursei, U_{c0} , tensiunea cu care a fost încărcat inițial condensatorul în secvența anterioară, I_0 , curentul inițial care parcurge inductanța L_K , iar ω este pulsația curentului oscilant serie, încărcarea completă are loc după timpul t , la fiecare comutare, tensiunea pe condensator schimbându-și polaritatea de la valoarea $+2U_d$, la valoarea $-2U_d$, curentul de vârf prin condensatorul de stingere fiind:

$$i_{c,\max} = 2U_d \sqrt{\frac{L_K}{C_K}} ; \omega = \frac{1}{\sqrt{L_K C_K}} ; t = \pi \sqrt{L_K C_K} \quad (16)$$

În momentul blocării tiristoarelor, curentul reactiv al sarcinii motorului electric asincron de tracțiune va circula prin diodele de recuperare [14]. Tiristoarele în conducție trebuie să se stingă în timpul cât tensiunea la bornele porții invertorului se inversează, datorită comandării circuitului de stingere [1, 27], acest timp fiind mai mare decât timpul de revenire t_q al tiristoarelor:

$$\frac{\pi \sqrt{L_K C_K}}{2} \triangleright t_q \quad (17)$$

Comutarea curentului electric dintr-o fază în alta se face printr-un proces oscilant care este determinat de circuitul format din condensatoarele de stingere și inductanțele mașinii de tracțiune, circuit a cărui frecvență proprie este descrisă de ecuația:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L C}}, L = L_1 + \frac{L_m L_2}{L_m + L_2} \quad (18)$$

unde: L_1 , L_m și L_2 reprezintă inductanțele statorice, de magnetizare și rotorice.

De asemenea, expresia matematică a tensiunii maxime până la care poate fi încărcat condensatorul de stingere, este:

$$u_{c,\max} = \frac{u \sin \varphi}{2I_d} + I_d \quad (19)$$

unde: u reprezintă tensiunea pe fază a motorului, dependentă de inductanțele de dispersie ale motorului electric iar I_d este intensitatea curentului din circuit.

Totodată, motorul asincron de tracțiune cu rotorul în colivie [15], alimentat de la un astfel de inverter de curent, produce cupluri oscilante (sau pendulare) cu efecte nedorite îndeosebi la frecvențele joase, la alimentarea motorului cu blocuri (dreptunghiulare), iar cuplurile oscilante pot fi eliminate ori diminuate printr-o fragmentare a blocului de curent cu o treime de perioadă, în mod analog modulației în durată a impulsurilor invertoare de tensiune, făcându-se și fragmentarea blocului de curent.

Corespunzător regimului de tracțiune la funcționarea în sarcină totală a motorului electric, pe caracteristica mecanică (de regim permanent) a mașinii asincrone de tracțiune, se disting două zone de lucru din care una, de cuplu constant respectiv de flux magnetic al mașinii, constant, pentru frecvențe statorice f_1 subnominale iar cealaltă, cealaltă de putere constantă, respectiv de flux magnetic slăbit pentru frecvențe f_1 supranominale. Expresia analitică a acestei caracteristici mecanice se poate obține în baza ecuației cuplului electromagnetic pentru regimul permanent al mașinii electrice asincrone:

$$M_e = \frac{3p}{\omega_1} \cdot \frac{R_2^2}{s} \cdot I_2^2 \Rightarrow I_2^2 = \left| \frac{jX_m}{(R_2/s) + (X_m + X_{\omega_2})} \right| I_1^2 \Rightarrow \quad (20)$$

$$\Rightarrow \frac{M_e(I_1, \omega_2) = 3pR_2^2 L_m^2 I_1^2 \omega_2}{R_2^2 + \omega_2^2 L_2^2} \Rightarrow \quad (21)$$

$$\Rightarrow M_m(s) = \frac{3pR_2^2 L_m^2 \omega_2}{R_2^2 \omega_2^2 L_2^2 \cdot U_d^2 (\pi/3\sqrt{6})^2 / \left[(\pi^2/18) R_d + \Re\{Z_{-e}\} \right]^2} = \quad (22)$$

$$= \frac{\pi^2}{18} pR_2^2 L_m^2 U_d^2 \left[R_2^2 + (s\omega_1 L_2^2) \right] \cdot \left\{ R_{1e} \left[R_2^2 + (s\omega_1 L_2)^2 \right] + s\omega_1 L_m^2 R_2^2 \right\}^2$$

unde: $R_{1e} = (\pi^2/18)R_d + R_1$ iar Z_{-e} reprezintă impedanța complexă echivalentă a mașinii asincrone, a cărei parte imaginară este anulată de condensatorul variabil CI al inverterului de curent.

Dacă se impune condiția de extrem:

$$\frac{\omega M_e(s)}{\omega s} = 0 \Rightarrow (\omega_1^2 L_2^2 - R_2^2) (\omega_1^2 R_2^2 L_2^2 s^2 - \omega_1^2 L_m R_2^2 s + R_{1e}^2 R_2^2) = 0 \Rightarrow \quad (23)$$

$$\Rightarrow s_{K_1}^{(a)}, s_{K_1}^{(b)} = \pm \frac{R_2}{\omega_1 L_2} \quad s_{K_1}^{(c)}, s_{K_1}^{(d)} = \frac{L_m R_2^2}{2R_{1e}} \left[1 + \sqrt{\left((1 - 2R_{1e}) / \omega_1 L_m^2 \right)^2} \right] \quad (24)$$

Ultimele două ecuații reprezintă soluțiile (rădăcinile) alunecărilor critice ale mașinii de

CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN

curent alternativ asincrone funcționând în regim motor, căruia îi corespund trei valori extreme ale cuplului. Schimbarea sensului de rotație al mașinilor asincrone de tracțiune se obține prin inversarea ordinii impulsurilor de comandă ale inverterului trifazat de curent, prin intermediul căruia se modifică pulsația statorică ω_1 a mașinilor asincrone de tracțiune.

Inverterul trifazat de curent cu stingere autonomă poate alimenta mașinile electrice de curent alternativ trifazat, asincrone. Dispozitivul de comandă al inverterului calculează pulsația statorică ω_1 din însumarea algebrică a pulsației electrice ω a rotorului (corespunzătoare vitezei instantanee de rotație a mașinii de tracțiune), cu valoarea de referință a pulsației de alunecare ω_2 . Aceste locomotive sunt dotate cu mașini electrice de tracțiune asincrone cu rotor în colivie, tetrapolare care, în regim de tracțiune tiristorul V_2 de comutație tracțiune/frânare este permanent în conducție iar contactorul K , de scurtcircuitare al rezistorului trifazat adițional de frânare R_2 este închis, iar pe durata conducției, tensiunea U_d a circuitului intermediar este pozitivă și egală cu tensiunea UCF pe condensatorul capacitiv CF al filtrului tampon.

Frânarea electrică se obține trecând mașinile asincrone de tracțiune în regim de generator, prin comanda scăderii pulsației statorice ω_1 sub valoarea instantanee a pulsației electrice ω a rotorului, ceea ce revine la comanda schimbării semnului pulsației de alunecare ω_2 . În regimul de frânare electrică al mașinii asincrone, tiristorul V_2 de comutație tracțiune / frânare este blocat, iar contactorul K este deschis la viteze mari de frânare ale locomotivei / trenului remorcat. Pe durata conducției, tensiunea U_d a circuitului intermediar este nulă, curentul debitat de mașinile asincrone de tracțiune, funcționând ca generatoare autoexcitate în scurtcircuit și fiind transferat de inverterul de curent, care este la rândul lui funcțional ca redresor comandat în circuitul intermediar.

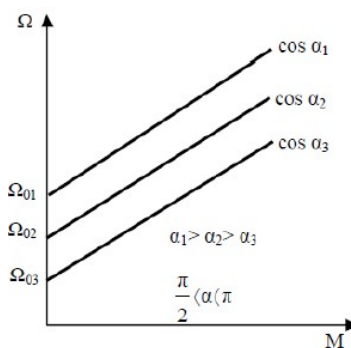


Fig. 2. Caracteristicile mecanice la frânarea recuperativă a locomotivei

La frânarea electrică recuperativă (figura 2) respectiv reostatică, tensiunea U_d a circuitului intermediar are polaritatea inversată iar curentul din circuitul intermediar, își menține sensul prin bobina de netezire L_n și descrește dependent de diferența dintre tensiunile UCF care au la rândul lor polaritățile inversate. Reglarea frânării reostatice se face prin variația curentului de excitație al mașinilor de tracțiune [16].

Pentru determinarea caracteristicilor mecanice în regim de frânare recuperativă, se pleacă de la expresia tensiunii redresorului în regim de inverter respectiv:

$$U_i = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \Rightarrow I = \frac{E - U_i}{R_t} \Rightarrow M_f = -\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{(K\phi)}{R_t} \Omega \Rightarrow M_f = K\phi I \quad (25)$$

unde: M_f reprezintă expresia matematică a cuplului de frânare, iar vitezele la care dispare cuplul de frânare se determină cu ecuația următoare:

$$\Omega_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_2}{K\phi} (\cos \alpha) \Rightarrow \alpha = \arccos \frac{(K\phi)\Omega - M_f * R_t / K\phi}{(2\sqrt{2} / \pi) \cdot U_2} \quad (26)$$

unde: α reprezintă valoarea unghiului necesar de modificat pentru menținerea constantă a cuplului de frânare la o valoare impusă M_f^* pe tot timpul frânării.

3. DETERMINAREA VALORII TENSIUNII ELECTROMOTOARE ȘI A CARACTERISTICILOR MECANICE LA PORNIREA LOCOMOTIVEI CU MOTOARE ASINCRONE TRIFAZATE, ALIMENTATE PRIN PUNTE NECOMANDATĂ

Locomotivele seria BB 27000 sunt dotate cu punți necomandate, valoarea minimă a tensiunii în secundarul transformatorului asigurând cuplul de pornire maxim fără nici o rezistență suplimentară:

$$M_p K\Phi I_p = 2M_N \quad (27)$$

În timpul pornirii, cuplul motor se modifică între valoarea sa nominală (minim) și de două ori valoarea nominală (maxim), interval de timp în care mașina electrică asincronă lucrează saturat iar cuplul are o variație liniară cu curentul indusului, în condițiile în care valoarea maximă a curentului de pornire este:

$$I_{p,\max} = \frac{2M_N}{(K\phi)_2} \Rightarrow U_d = R_M I_{p,\max} \Rightarrow \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_d = R_M \frac{2M_N}{(K\phi)_2} \Rightarrow U_{2,\min} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{R_M}{(K\phi)_2} M_N \quad (28)$$

unde: $(K\phi)_2$ reprezintă fluxul prin mașina electrică asincronă la pornire, atunci când tensiunea electromotoare indusă prin rotație este nulă.

Dacă se înlocuiește tensiunea medie redresată U_d în funcție de tensiunea din secundarul transformatorului, atunci valoarea minimă a tensiunii în secundarul transformatorului (corespunzătoare valorii prizei pentru pornire), se comută transformatorul pe următoarea priză de tensiune în care reprezintă fluxul prin mașina la curent nominal (figura 3).

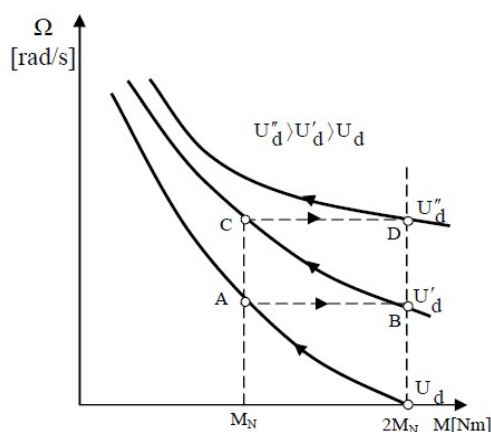


Fig. 3. Caracteristicile mecanice la pornirea locomotivei cu motoare asincrone trifazate, alimentate prin punte necomandată

Prin înlocuirea tensiunii medii redresate minime U_d în funcție de tensiunea în secundarul transformatorului, se obține valoarea vitezei la care se comută transformatorul

**CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR
ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN**

respectiv:

$$\Omega_A = \frac{2\sqrt{2}}{\pi(K\phi)_1} - \frac{R_M}{(K\phi)_1^2} M_N \Rightarrow U'_d = E_A + R_M \frac{2M_N}{(K\phi)_2} \Rightarrow \quad (29)$$

$$\Rightarrow \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2^1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2d}^1 + R_M \left[\frac{2}{(K\phi)_2} - \frac{1_1}{(K\phi)_1} \right] M_N \Rightarrow \quad (30)$$

$$\Rightarrow U_2^1 = U_2 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot R_M \left[\frac{2}{(K\phi)_2} - \frac{1_1}{(K\phi)_1} \right] M_N \quad (31)$$

În regim de mers, motorul electric de tracțiune asincron trifazat al locomotivei este alimentat de la o rețea de tensiune alternativă monofazată, printr-o punte necomandată iar curentul prin mașină are o componentă continuă și una alternativă [17]. Componenta alternativă a curentului are efecte negative determinând pulsații în cuplu și înrăutățind comutația. Pentru netezirea fluxului, înfășurarea de excitație a motorului electric de tracțiune este șuntată de rezistențe.

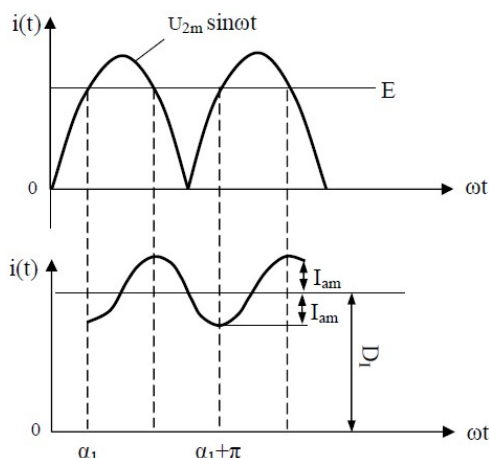


Fig. 4. Variațiile tensiunii electrice redresate și ale intensității curentului prin motor la alimentarea prin punte necomandată

În cazul circuitului electric format din înfășurarea secundară a transformatorului de alimentare și circuitul rotor, expresia matematică a stabilității electrice în circuit este:

$$U_2 = E + R_t i + L_t \frac{di}{dt} \quad (32)$$

Această ecuație diferențială admite următoarele soluții:

$$e^{-\frac{\omega t \cdot R_t}{X_t}} \text{ și } i(t) = \frac{U_{2m}}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \sin(\omega t - \rho) - \frac{E}{R_t} + A \quad (33)$$

unde: R_t reprezintă rezistența totală a circuitului și L_t este inductivitatea totală a circuitului iar:

$$U_2 = U_{2m} \sin \omega t \quad (34)$$

Constanta de integrare A se determină prin impunerea condiției ca la unghiul α_1 precum și la defazajul $\alpha_1 + \pi$, intensitatea curentului electric să aibă aceleași valori, situație în care constanta A capătă expresia următoare:

$$A = \frac{2U_{2m} \sin(\alpha_1 - \rho)}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \cdot \frac{e^{\infty_1}(R_t / X_t)}{-(\pi R_t / X_{t-1})} \Rightarrow \quad (35)$$

$$\Rightarrow i(t) = \frac{2U_{2m} \sin(\alpha_1 - \rho)}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \cdot \frac{-(\omega t - \alpha_1)(R_t / X_t)}{-(R_t / X_t)} + \frac{U_{2m}}{\sqrt{R_t^2 + X_t^2}} \sin(\omega t - \rho) - \frac{E}{R_t} \Rightarrow \quad (36)$$

$$\Rightarrow S_i = \frac{I_{am}}{I_a}$$

unde: I_a reprezintă coeficientul de pulsație al intensității curentului electric, de unde rezultă:

$$i(t) = I_a + I_{am} \sin \omega t \Rightarrow U_d = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \gamma) \text{ și } \cos \gamma = 1 - \frac{2X_d \cdot I_d}{U_{2m}} \quad (37)$$

Considerând curentul electric redresat definit de suma dintre componenta sa continuă I_a și componenta sa sinusoidală de frecvență dublă față de frecvența liniei de contact, atunci tensiunea medie redresată depinde de unghiul de suprapunere γ și de reactanța echivalentă X_d de dispersie raportată la secundarul transformatorului, respectiv de curentul mediu redresat I_d .

De reținut este faptul că în intervalul de comutație σ' , tensiunea redresată este nulă, motiv pentru care, din cauza fenomenului de suprapunere, tensiunea redresată, furnizată motorului, scade.

În cazul utilizării unei punți semicomandate sau a unei punți complet comandate, atunci reglarea tensiunii redresate [18] se face prin modificarea unghiului α de intrare în conducție al tiristoarelor, situație în care transformatorul de rețea nu mai necesită priză, tensiunea medie redresată (la curent rotoric neîntreput), pentru puntea complet comandată căpătând expresia următoare:

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \Rightarrow \quad (38)$$

$$\Rightarrow U_d = \frac{m}{\pi} U_{2m} \sin \frac{\pi}{m} \frac{1 + \cos \alpha}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \eta_2 (1 + \cos \alpha)$$

Ultima ecuație reprezintă expresia tensiunii redresate specifică punții semicomandate, în care U_2 este valoarea efectivă a tensiunii secundare. Reglajul tensiunii redresate se face prin controlul de fază [27], care are consecințe nefaste precum defazarea fundamentalei curentului de linie față de tensiunea aplicată, consecința directă fiind că redresorul absoarbe de la rețea putere activă P , putere reactivă Q și putere deformantă D . Luând în considerare factorul K de putere totală sau de regim deformant al redresorului reprezintă raportul dintre puterea activă și puterea aparentă, iar δ , factorul de distorsiune, atunci:

$$K = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \rho \cdot \frac{3U_1 I_1}{3U_1 I_1, ef} \quad (39)$$

$$\text{Dacă: } \delta = \frac{I_{1,ef}}{I} \Rightarrow K = \cos \varphi \cdot \frac{1}{\delta}, \text{ admițând că: } \psi = \alpha.$$

Alimentarea motoarelor de tracțiune ale acestui tip de locomotivă se face prin

**CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR
ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN**

înserierea mai multor punți redresoare comandate succesiv [1], utilizând în componenta punții redresoare, tranzistoare de putere denumite tiristoare cu stingere pe poartă (GTO) prin intermediul cărora se obține un factor de putere unitar [19]. Tensiunea de comandă a redresorului se determină cu expresia:

$$U_d = E + R_M \cdot I \quad (40)$$

unde: $E = K\Phi\Omega$ iar $K\Phi = K_e \cdot I$.

La pornirea locomotivei se asigură creșterea vitezei mașinii asincrone cu menținerea constantă a raportului U_1 / f_1 , astfel că fluxul magnetic al mașinii se păstrează nemodificat [6]. Prin însumarea frecvenței rotorice (de alunecare) cu frecvența de rotație a mașinii asincrone se obține frecvența statorică, iar cu tensiunea de comandă corespunzătoare se generează funcția de comandă a redresorului astfel încât, raportul dintre tensiunea de ieșire și frecvență să se mențină constant [10-14]. După atingerea valorilor nominale ale tensiunii și ale frecvenței, reglarea vitezei de translație (de deplasare) a locomotivei se realizează la tensiune constantă [9], prin modificarea frecvenței, iar la creșterea frecvenței se produce diminuarea fluxului în mașina asincronă iar prin menținerea constantă a frecvenței rotorice, caracteristicile mecanice ale mașinii asincrone devin elastice [13].

Cuplul electromagnetic M_2 al mașinii asincrone în funcție de frecvența rotorică f_2 depinde hiperbolic e cuplul electric M_e și turația mașinii asincrone n :

$$M_2 = \frac{3pR_2'U_1^2}{2\pi f_2 \left\{ R_1^2 + \frac{2R_1R_2'}{f_2}(np + f_2) + \left[\frac{R_2'}{f_2^2} + 4\pi^2(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}) \right] (np + f_2)^2 \right\}} \Rightarrow \quad (41)$$

$$M_e = \frac{3pR_2'U_1^2}{k\omega_r \left\{ \left[R_1 + (k+1)\frac{R_2'}{k} \right]^2 + \omega_r^2(k+1)^2(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2})^2 \right\}} \quad (42)$$

Dacă rotorul se învârtește cu viteza unghiulară $\Omega \triangleleft \Omega_1$ în sensul câmpului învârtitor, în înfășurarea rotorică se va induce tensiunea electromotoare de frecvența f_2 și de valoare U_{ers} :

$$f_2 = \frac{p_1(\Omega_1 - \Omega)}{2\pi} = sf_1 \Rightarrow U_{ers} = \frac{f_2}{f_1} U_{er} = sU_{er} \quad (43)$$

unde: U_{er} este tensiunea indusă în secundar când rotorul este în repaus iar U_{ers} este tensiunea efectivă când există alunecarea s .

CONCLUZII

Atunci când locomotiva funcționează în regim de motor, la alimentarea mașinii asincrone de propulsie, de la o sursă de energie electrică (de curent alternativ) cu un sistem de tensiuni trifazat simetric, înfășurarea statorică este parcursă de un sistem trifazat simetric de curenți de pulsație ω_1 care vor produce un câmp magnetic învârtitor cu viteza unghiulară de sincronism Ω_1 [5]. În rotorul aflat în repaus câmpul învârtitor induce în înfășurarea trifazată

rotorică un sistem trifazat simetric de tensiuni iar prin scurtcircuitare, înfășurările rotorice vor fi parcurse de un sistem simetric de curenți rotorici care produc un câmp magnetic învârtitor de reacție [8], care față de rotor va avea o viteză unghiulară distinctă.

Câmpul magnetic inductor statoric [20] și câmpul magnetic de reacție al rotorului [21] au aceeași viteză unghiulară față de stator, cele două câmpuri compunându-se și rezultând un câmp magnetic învârtitor rezultat care interacționează cu curenții din înfășurările rotorice, producând un cuplu electromagnetic care acționează asupra rotorului în sensul câmpului învârtitor și imprimă acestuia o mișcare de rotație de viteză unghiulară Ω , în condițiile în care asupra statorului acționează cuplul electromagnetic în sens opus câmpului magnetic învârtitor.

În timpul funcționării mașinii electrice asincrone a locomotivei, viteza unghiulară a rotorului Ω este diferită de viteza unghiulară Ω_1 a câmpului învârtitor iar mărimea care caracterizează diferența dintre viteza unghiulară Ω_1 (turația n_1) a câmpului învârtitor și viteza unghiulară Ω (turația n) a rotorului se numește alunecare, producându-se astfel un cuplu electromagnetic ce tinde să aducă rotorul la turația de sincronism, atunci când mașina electrică funcționează în regim de motor care se stabilizează la o viteză subsincronă [1] iar cuplul dezvoltat de mașină echilibrează cuplul rezistent la axul motorului și în mașină se produce conversia puterii electrice primare la bornele primare în putere mecanică la axul mașinii. În acest caz mașina preia de la sursă o putere reactivă Q necesară magnetizării circuitului magnetic. În mod similar, atunci când rotorul este antrenat din exterior la o viteză suprasincronă [26], mașina electrică asincronă poate debita energie electrică în rețea în regim de frânare recuperativă. Astfel, dacă rotorul mașinii asincrone este antrenat în sens invers câmpului învârtitor al statorului, alunecarea s devine supraunitară [25] și mașina funcționează în regim de frână electrică sau reostatică.

Determinarea valorii tensiunii electromotoare și a caracteristicilor mecanice la pornirea locomotivei cu motoare asincrone trifazate [3], alimentate prin punte necomandată s-a realizat folosind relații matematice consacrate și algoritmi specifici calculelor inginerești [26-27] care pot fi foarte utile specialiștilor din acest domeniu. Valorile rezultatelor acestor calcule matematice complexe pot fi folosite pentru a reduce riscurile tehnice în exploatarea acestor tipuri de locomotive contribuind la siguranța traficului feroviar.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Udriște, O., Jidveianu, V., „Locomotive diesel electrice și locomotive electrice”, București, Centrul de documentare și publicații tehnice, M.C.F., 1966.
- [2] Dumitru George, „Dinamica Locomotivelor”, ISBN 978-606-25-0770-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [3] Dumitru George, „Locomotive Electrice”, ISBN 978-606-25-0769-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [4] Dumitru George, „Locomotive Diesel”, ISBN 978-606-25-0768-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [5] Dumitru George, „Mecanica Trenurilor”, ISBN 978-606-25-0484-7, Editura MatrixRom, București, 2019.
- [6] Dumitru George ș.a., „Modele matematice pentru calculul structurii locomotivelor seria BR 189 ES 64 F4 Siemens”, Revista MID-CF, ISSN 1841-1207, pp. 25 - 32, nr. 1 / 2011.
- [7] Neacșa A., Stoica D. B., „Aspects concerning the software applications in order to determine the technological systems reliability”, MOCM The 13th International Conference of Fracture Mechanics, 4 (13), 2007.

**CIRCUITE DE FORȚĂ SPECIFICE LOCOMOTIVELOR
ELECTRICE SERIA BB 27000 TRANSILIEN**

- [8] **Boșianu Liviu, Popa Gabriel**, „*Locomotive și trenuri electrice - Îndrumar de laborator*”, Litografia UPB, 1991.
- [9] **Dumitru George ș.a.**, „*Regimurile de funcționare ale ansamblului pantograf - fir de contact*”, Revista MID-CF, ISSN 1841-1207, pp. 13 - 25, nr. 1 / 2011.
- [10] **Dumitru George ș.a.**, „*Fenomene dinamice de contact specifice locomotivelor*”, Simpozionul Național de Material Rulant de Cale Ferată / Ediția a VIII - a, UPB, ISSN 1843-9888, pp. 95 - 101, 26-27 Noiembrie, 2010.
- [11] **Dumitru George et autres**, „*Caracteristiques dynamiques spécifique des locomotives serie BR 182 Siemens 64 U2 ES 1116 Taurus*”, Proceedings Of The International Scientific Conference CIBv, Vol. 2, ISSN 1843-6617, pp. 269 - 275, 12-13 November, 2010.
- [12] **Dumitru George ș.a.**, „*Sisteme moderne de forță pentru acționarea în curent alternativ specifice locomotivelor BR 187 Dach, BB 36000 Astride și HXo 30000*”, Simpozionul Național de Material Rulant de Cale Ferată - UPB, ISSN 1843-9888, București, 27-28 Noiembrie 2015.
- [13] **Dumitru George & others**, „*Power Characteristics Of Electrical Machines For Motor Vehicles Atlantique 27000 Class*”, Bulletin of the Transilvania University of Brașov - 2015, Series I: Engineering Sciences.
- [14] **Dumitru George & others**, „*Features Of Hunting Oscilations For BR 101 Locomotive Series*”, Bulletin of the Transilvania University of Brașov - 2013, Series I: Engineering Sciences.
- [15] **Dumitru George ș.a.**, „*Particularități dinamice specifice locomotivei electrice BR 185*”, Simpozionul Național de Material Rulant de Cale Ferată / Ediția a XII - a, UPB, ISSN 1843-9888, pp. 292 – 298, 21 - 22 Noiembrie, 2014.
- [16] **Gauss Johann Carl Friedrich**, „*Summatio serierum quarundam singularium*”, Göttingen, 1811.
- [17] **Dumitru George ș.a.**, „*Determinarea vectorilor de orientare directă în câmp pentru regimul real de funcționare al motoarelor locomotivelor electrice*”, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată (Synthesis of Theoretical & Applied Mechanics), nr. 13(1), 2022.
- [18] **Germain Sophie**, „*Memoir on the Vibrations of Elastic Plate (Referat privind vibrațiile plăcilor elastice)*”, Paris, 1816.
- [19] **Sturm Jacques Charles François**, „*Mémoire sur la résolution des équations numériques - Disertație privind rezolvarea ecuațiilor numerice*”, Paris, 1835.
- [20] **Riemann Georg Friedrich Bernhard**, „*Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse - Funcții cu numere prime*”, Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1859.
- [21] **Runge Carl David Tolmé**, „*Vorlesungen über Numerisches Rechnen - Prelegeri despre calcul numeric*”, Berlin, 1924.
- [22] **Hamilton William Rowan**, „*Theory of Systems of Rays*”, Cambridge, 1828.
- [23] **Hilbert David**, „*Methoden der Mathematischen Physik*” - Vol. 1, 1924 / Vol. 2, 1937.
- [24] **Lagrange Joseph-Louis**, „*Suite des réflexions sur la résolution algébrique des équations - Reflecții continue asupra rezoluției algebrice a ecuațiilor*”, 1771.
- [25] **Laplace Pierre Simon**, „*Philosophical Essay on Probabilities. Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences*”, 1825.
- [26] **Kawahira K. & others**, „*AC Motors Drive System For Electircal Vehicles*”, Toshiba Review (1989) pp. 14-19.
- [27] **Condacse Nicu**, „*Locomotive și trenuri electrice*”, E.D.P., București, 1980.