

# PARTICULARITĂȚI DE ALEGERE A PARAMETRILOR DE ACȚIONARE A PROTECȚIEI DIRECȚIONALE HOMOPOLARE A LEA CU COMPENSARE LONGITUDINALĂ ȘI TRANSFORMATOR CU DECALAJ DE FAZĂ

Chiorsac M.<sup>1</sup>, Turcuman L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universitatea Tehnică a Moldovei, <sup>2</sup> Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

**Abstract:** *In articol este prezentată metoda generală de calcul a curenților de scurtcircuit (s.c.) monofazat și bifazat la pământ pe o linia electrică aeriană (LEA) cu compensare capacitivă longitudinală și transformator cu decalaj de fază (CCL-TDF). Este efectuată analiza dependenței curenților homopolari de s.c. monofazat de locul de s.c., unghiurile de sarcină  $\delta$  și unghiul  $\Theta$  a transformatorului cu decalaj de fază pentru LEA cu CCL-TDF 500 kV și analizate particularitățile de calcul a curenților de pornire a protecției direcționale homopolare prin rele.*

**Cuvinte cheie:** *LEA cu CCL-TDF, metoda de calcul, scurtcircuit monofazat și bifazat la pământ, protecția direcțională homopolară prin rele.*

## Introducere

În ultimul timp un interes deosebit se acordă cercetărilor în domeniul elaborării sistemelor flexibile de transmitere a curentului alternativ, așa numitelor FACTS controlere (Flexible Alternating Current Transmission System) [1]. O variantă a acestor sisteme o prezintă linia electrică aeriană cu compensare capacitivă longitudinală (CCL) în paralel cu transformatorul cu decalaj de fază (TDF), fig.1. [2]

Principalele avantaje ale acestei variante față de altele o constituie folosirea instalațiilor electrotehnice cunoscute (CCL și TDF) în locul elementelor electronice de putere costisitoare folosite în instalațiile FACTS clasice și posibilitatea a reglării independente a fluxurilor de putere activă și reactivă transmise.

Una din problemele ce necesită să fie rezolvate la elaborarea și implementarea în practică a LEA cu CCL-TDF o constituie protecția prin rele.

În lucrarea prezentă sunt analizate în baza calculărilor curenților de scurtcircuit la pământ specificul de funcționare a protecției direcționale homopolare a LEA cu CCL-TDF.

## Particularitățile de calcul a curenților de scurtcircuit la pământ

Intercalarea în secțiunea LEA a instalației CCL-TDF se reflectă și asupra specificului de calcul a curenților de scurtcircuit. Calcularea curenților de scurtcircuit este preferabil de-a fi efectuată direct în coordonatele de fază A, B, C. LEA poate fi împărțită în trei porțiuni, ce reprezintă trei hexapoluri echivalente: începutul liniei – instalația CCL-TDF (LEAI), instalația CCL-TDF (II) și instalația CCL-TDF – sfârșitul liniei (LEAII).

Hexapolurile I și III nu se deosebește cu nimic de hexapolurile echivalente ale LEA obișnuite de tensiune înaltă cu circuit dublu și parametrii uniform distribuiți. Hexapolul II prezintă unite în paralel două hexapoluri, al CCL și al TDF.

La calcularea curenților de scurtcircuit se folosește forma H și forma Y de prezentare a porțiunilor respective.

Pentru hexapolurile I și III:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{J}_{in} \end{bmatrix} = [H] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix}; \quad (1)$$
$$\begin{bmatrix} \dot{J}_{in} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} = [Y] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{U}_{ies} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_A & \dot{Y}_B \\ \dot{Y}_C & \dot{Y}_D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{U}_{ies} \end{bmatrix}.$$

unde  $\dot{J}_{in}, \dot{U}_{in}$  și  $\dot{J}_{ies}, \dot{U}_{ies}$  - matricele coloană ale curenților și tensiunilor la intrarea și ieșirea hexapolului;

H – matricea pătrată de transfer de dimensiunile 6x6, care se împarte în patru matrice  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$  și  $\dot{D}$ ;

$\dot{J}$  – matricea pătrată a conductibilităților nodale 6x6, care se împarte în patru matrice  $\dot{Y}_A, \dot{Y}_B, \dot{Y}_C, \dot{Y}_D$ ;

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{J}_{in} \end{bmatrix} = [H] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{J}_{in} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} = [Y] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{U}_{ies} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_A & \dot{Y}_B \\ \dot{Y}_C & \dot{Y}_D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{U}_{ies} \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned} \dot{A} &= E + Z \cdot Y; \\ \dot{B} &= Z; \\ \dot{C} &= 2\dot{Y} + Y \cdot Z \cdot Y; \\ \dot{D} &= \dot{E} - \dot{Y} \cdot Z. \end{aligned} \quad (3)$$

Aici E prezintă matricea unitară 6x6; Z și Y – matricele impedanțelor și conductibilităților porțiunii LEA respective a LEA.

Hexapolul II reprezintă instalația CCL–TDF cu parametrii longitudinali nedistribuiți sub forma H:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{in} \\ \dot{J}_{in} \end{bmatrix} = [H] \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_e & \dot{B}_e \\ \dot{C}_e & \dot{D}_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{ies} \\ \dot{J}_{ies} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Aici

$$\begin{aligned} \dot{A}_e &= (\dot{B}_T^{-1} + \dot{B}_C^{-1}) \cdot (-\dot{B}_T^{-1} \cdot \dot{A}_T - \dot{B}_C^{-1} \cdot \dot{A}_C); \\ \dot{B}_e &= (\dot{B}_T^{-1} + \dot{B}_C^{-1})^{-1}; \\ \dot{C}_e &= (\dot{C}_T - \dot{D}_T \cdot \dot{B}_T^{-1} \cdot \dot{A}_T + \dot{C}_C \cdot \dot{D}_C \cdot \dot{B}_C^{-1} \cdot \dot{A}_C) - \\ & - (\dot{D}_T \cdot \dot{B}_T^{-1} + \dot{D}_C \cdot \dot{B}_C^{-1}) \cdot (\dot{B}_T^{-1} \cdot \dot{A}_T - \dot{B}_C^{-1} \cdot \dot{A}_C)^{-1}; \\ \dot{D}_e &= (\dot{D}_T \cdot \dot{B}_T^{-1} + \dot{D}_C \cdot \dot{B}_C^{-1}) \cdot (\dot{B}_T^{-1} + \dot{B}_C^{-1})^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

unde  $\dot{A}_e, \dot{B}_e, \dot{C}_e, \dot{D}_e$  și  $\dot{A}_T, \dot{B}_T, \dot{C}_T, \dot{D}_T$  reprezintă matricele  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$  ale CCL și TDF.

Luând în considerație că  $\dot{A}_C = \dot{A}_T = E$ ;  $\dot{B}_C = \dot{Z}_C$  și  $\dot{B}_T = \dot{Z}_T$ ,  $\dot{C}_C = \dot{C}_T = 0$  și  $\dot{D}_C = \dot{D}_T = E$ , unde E este matricea unitară pătrată 6x6,  $Z_C$  și  $Z_T$  - matricele impedanțelor CCL și TDF. Expresiile (4) pot fi retranscrise în felul următor:

$$\begin{aligned} \dot{A}_e &= (\dot{Y}_T + \dot{Y}_C)^{-1} \cdot (-\dot{Y}_T \cdot E - \dot{Y}_C \cdot E); \\ \dot{B}_e &= (\dot{Y}_T + \dot{Y}_C)^{-1}; \\ \dot{C}_e &= (-E \cdot \dot{Y}_T \cdot E - E \cdot \dot{Y}_C \cdot E) \cdot (E \cdot \dot{Y}_T + E \cdot \dot{Y}_C); \\ \dot{D}_e &= (E \cdot \dot{Y}_T + E \cdot \dot{Y}_C) \cdot (\dot{Y}_T + \dot{Y}_C)^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

$\dot{Y}_C = Z_C^{-1}$  și  $\dot{Y}_T = Z_T^{-1}$  - matricele conductibilităților respective ale CCL și TDF.

Matricea

$$\dot{Y}_C = Z_C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_C} & & \\ & \frac{1}{Z_C} & \\ & & \frac{1}{Z_C} \end{bmatrix},$$

unde  $Z_C = r_c + \frac{1}{j\omega c}$  - impedanța conductoarelor incluse consecutiv în fazele LEA.

Matricea  $\dot{Y}_T = Z_T^{-1}$  depinde de schema și conexiunile înfășurărilor TDF. Pentru schema TDF sub forma de hexagon, fig.2 conform [3]:

$$\dot{Y}_T = Z_T^{-1} = \begin{bmatrix} Z_I & Z_{I-II} \\ Z_{II-I} & Z_{II} \end{bmatrix}.$$

Matricele

$$Z_I = Z_{II} = \begin{bmatrix} -Z_M & Z_1 + 2M & Z_1 + 2M \\ Z_2 + 2M & -2M & Z_1 + Z_M \\ Z_1 + 2M & Z_2 + 2M & -Z_M \end{bmatrix};$$

$$Z_{I-II} = \begin{bmatrix} 4Z_M^2 - Z_1 & 2Z_2 \cdot Z_M + Z_1^2 & 2Z_1 \cdot Z_M + Z_2^2 \\ 2Z_1 \cdot Z_M + Z_2^2 & 4Z_M^2 - Z_1 \cdot Z_2 & 2Z_2 \cdot Z_M + Z_1^2 \\ 2Z_2 \cdot Z_M + Z_1^2 & 2Z_1 \cdot Z_M + Z_2^2 & 4Z_M^2 - Z_1 \cdot Z_2 \end{bmatrix};$$

$$Z_{II-I} = \begin{bmatrix} 4Z_M & -2Z_1 & -2Z_2 \\ -2Z_2 & 4Z_M & -2Z_1 \\ -2Z_1 & 2Z_2 & 4Z_M \end{bmatrix}$$

Aici,  $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ ,  $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ ,  $Z_M = j\omega k \cdot L_1 \cdot L_2$ , unde k – coeficientul de inducție mutuală dintre înfășurările și L1 și L2 – inductanțele înfășurărilor H1 și H2.

La calcularea curenților de scurtcircuit LEA cu CCL–TDF se prezintă prin hexapoluri echivalente de la schemele de alimentare S1 și S2 până la locul defectat ce includ unite consecutiv hexapoluri de porțiuni de LEA și CCL–TDF.

Matricele echivalente sumare ale parametrilor LEA cu CCL-TDF de la sursele (sistemele) echivalente de alimentare S1 și S2 până la locul defectat se calculează în felul următor:

$$[H_\Sigma] = \begin{bmatrix} A_\Sigma & B_\Sigma \\ C_\Sigma & D_\Sigma \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{NR} (H_i), \quad (6)$$

unde  $H_i$  – matricele hexapolurilor respective unite consecutiv de la sistema S1 (sau S2) până la locul defectat. Matricele sumare ale conductibilităților nodale de la schemele S1 și S2 până la locul defectat:

$$[Y_\Sigma] = [H_\Sigma]^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{HA} & Y_{HB} \\ Y_{HC} & Y_{HD} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} [Y_{HA}] &= \dot{D}_H \cdot B_H^{-1}; \\ [Y_{HB}] &= \dot{C}_H - \dot{D}_H \cdot B_H^{-1} \cdot \dot{A}_H; \\ [Y_{HC}] &= B_H^{-1}; \\ Y_{HD} &= -B_H^{-1} \cdot \dot{A}_H. \end{aligned}$$

Modelarea scurtcircuitelor nesimetrice se efectuează în felul următor:

- Scurtcircuitul monofazat la pământ a fazei „i” la începutul sau sfârșitul liniei:  $\dot{U}_{in_i} = 0$ .
- Scurtcircuitul monofazat la pământ în orișice punct al liniei:  $Y_{ii} = C_{ii} = 1 + j\theta$ .
- Scurtcircuite bifazate dintre orișice „i” sau „j” faze în orișice punct al liniei:  $Y_{Fij} = 1 + j\theta$ .

Trecerea de la valorile tensiunilor și curenților exprimate în coordonatele de fază A, B, C la coordonatele simetrice 0, 1, 2 și invers se efectuează cu ajutorul matricei de transfer:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_3 & 0 \\ 0 & \dot{S}_3 \end{bmatrix},$$

unde

$$\dot{S}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$a = e^{j120^\circ}, \quad a^2 = e^{j240^\circ}$$

### Alegerea parametrilor și funcționarea protecției direcționale homopolare

Alegerea parametrilor protecției direcționale homopolare se bazează pe calculul curenților de pornire și temporizarea treptelor de acționare. Temporizarea treptilor de reacționare a protecției direcționale homopolare se efectuează în mod obișnuit.

Curentul de pornire a primei trepte netemporizate a protecției se alege din condiția de desensibilitate față de valoarea întreită a curentului de secvență homopolară ce trece prin locul instalării protecției [4]:

- scurtcircuit la pământ la barele de tensiune a stației opuse de transformatoare;
- în procesul tranzitoriu de nesimetrie ce poate avea loc la conectarea fazelor LEA în ciclul RAR (reanclanșarea automată a rezervei);
- în regim nesimetrie cauzat de funcționarea RAR monofazată a LEA protejate.

Conform primei condiții, curentul de pornire a primei trepte netemporizate a protecției se alege după expresia:

$$\dot{I}_{op}^I \geq k \cdot 3\dot{I}_{om}^I, \quad (8)$$

unde  $3\dot{I}_{om}^I$  - valoarea maximală întreită a componentei periodice a curentului de secvență homopolară ce trece prin locul de instalare a protecției la scurtcircuit monofazat la pământ la barele stației de transformatoare opuse;  $k$  – coeficientul de desensibilitate ce ține cont de erorile releelor, calculului și influența componentei aperiodice a curentului de scurtcircuit.

În fig.3 sunt prezentate curbele curenților de scurtcircuit monofazat  $3I_0$  ce curge de la sistemul de alimentare S1 spre locul defectat la plasarea locului defectat în lungul LEA cu CCL-TDF de 500 kV cu lungimea de 600 km în diferite regimuri de funcționare: la mersul în gol ( $\delta = 0^\circ$ ) și sarcină maximă ( $\delta = 60^\circ$ ) și decalajul de fază  $\theta = 0$  și  $\theta = 25^\circ$ . Aici  $\delta$  este unghiul de sarcină dintre tensiunile de la capetele LEA;  $\dot{U}_{in} = |U_{in}|$  și  $\dot{U}_{ies} = |U|e^{-j\delta}$  la transmiterea energiei electrice de la sistemul S1 către sistemul S2;  $\theta$  - unghiul exercitat de TDF a tensiunilor aplicate la capetele CCL.

Din fig.3 se vede, că la unghiul de decalaj a fazelor tensiunilor aplicate la capetele CCL  $\theta = 0^\circ$  indiferent

de unghiul  $\delta$ , adică în toate regimurile de funcționare a liniei de la mersul în gol ( $\delta = 0^\circ$ ) până la sarcina maximă ( $\delta = 60^\circ$ ) curentul  $3\dot{I}_{om}$ , ce trebuie luat în considerație după expresia (8), are valoarea maximă la scurtcircuit monofazat la pământ în punctul K-3. Aceasta se lămurește prin faptul, că compensarea capacitivă longitudinală (CCL) în acest caz este „scoasă” din funcțiune, deoarece căderea de tensiune de la capetele ei este egală cu zero.

La mersul în gol ( $\delta = 0^\circ$ ) și  $\theta = 25^\circ$  are loc compensarea parțială a inductanței liniei, impedanța sumară echivalentă a CCL–TDF, având caracter pronunțat inductiv, ce cauzează o diminuare a curentului  $3\dot{I}_{om}$  la defectare în punctul K-4.

Valoarea maximă a curentului  $3\dot{I}_{om}$  în expresia (8) are loc la scurtcircuitul monofazat în punctul K-3.

În regim de funcționare LEA cu CCL–TDF la o sarcină maximă ( $\delta = 60^\circ$ ) și decalaj de fază  $\theta = 25^\circ$ , valoarea maximă a curentului  $3\dot{I}_{om}$ , ce trebuie să fie luat în considerație în (8), are loc la scurtcircuit monofazat în punctul K-4. În acest caz impedanța sumară echivalentă a instalației CCL–TDF are un caracter capacitiv, reducând impedanța sumară (inductanța) LEA de la sistemul S1 până la locul defectat K-4, ceea ce cauzează majorarea curentului  $3\dot{I}_{om}$ . În unele cazuri curentul  $3\dot{I}_0$  la defectarea în punctul K-4 poate chiar depăși valoarea pe care o are la defectarea în punctul K-2.

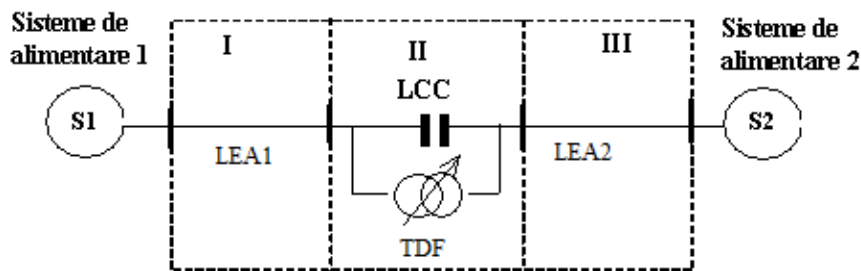


Figura 1 LEA cu baterie de condensatoare de compensație longitudinală (CCL) și transformator cu decalaj de fază (TDF)

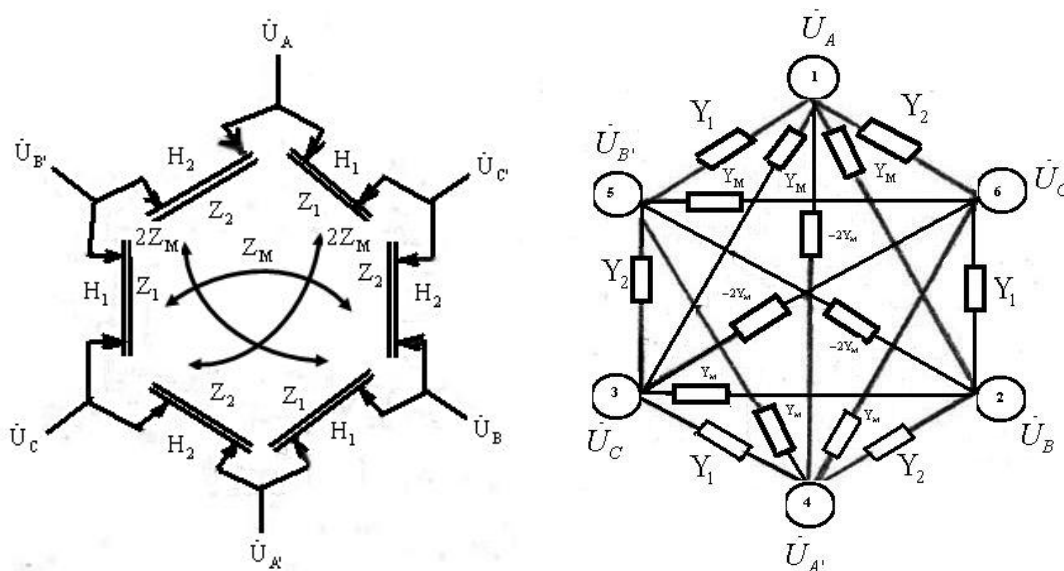


Figura 2 Schema principală (a) și echivalentă de calcul (b) a TDF.

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  - tensiunile fazelor la intrare;

$\dot{U}_{A'}, \dot{U}_{B'}, \dot{U}_{C'}$  - tensiunile fazelor la ieșire.

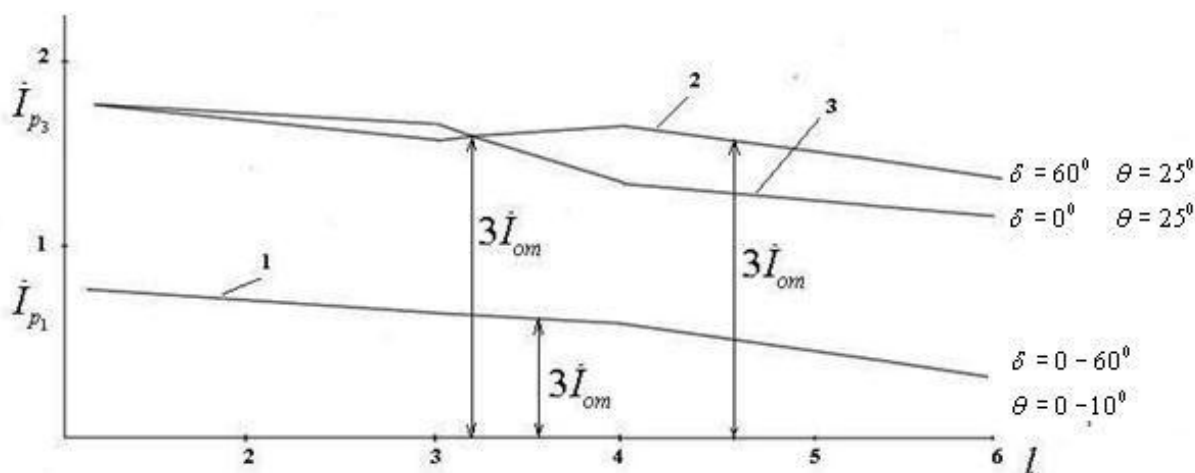
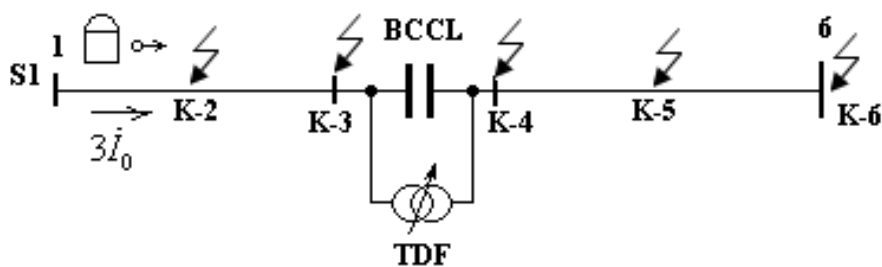


Figura 3 Dependența curenilor de scurtcircuit monofazat la pământ  $3I_0$  de locul deplasării defectiunii în lungul LEA cu CCL–TDF

### Concluzii

Din cele expuse anterior deduce următoarele concluzie: curentul de pornire sau lungimea porțiunii LEA protejate de către treapta întâia netemporizată a protecției depinde de regimurile de funcționare a liniei. La aceeași sarcină, de unghiul de decalaj  $\theta$  (gradul de compensare) a inductanței LEA de către instalația CCL–TDF.

### Bibliografie

1. IEEE Power Engineering Society / CIGRE, FACTS Overview, Publication 95TP108, IEEE Press, New York, 1995
2. M. Kiorsak, V. Soldatov, D. Zaitsev, L. Kalinin *Ghibkie linii elektroperedachi s prodolino-emkostnoi kompensatsiei i fazopovorotnym transformatorom*. Kishinev, 1997. 213 pag. (In Russian)
3. V. Soldatov, L. Kalinin, M. Chiorsac, D. Zaitsev “Computational technique for the equivalent circuit parameters of transformer with a complex voltage ratio”. – report of meeting IEEE FACT WG GEC, USA, New York, 1995.
4. “Rukovodeaschie ukazania po releinoi zaschite”. Vypusk 13b. Moskva: Energoatomizdat, 1985. (In Russian)