

# **DEFECTE TRANSVERSALE SCURTCIRCUITUL**

## **CURS 12**

PTDEE - Curs 12- prof. R.  
TIRNOVAN

### ***Cauze:***

- ❖deteriorarea izolației instalației electrice;
- ❖ruperea conductoarelor liniilor sub acțiunea sarcinilor mecanice;
- ❖atingerea conductoarelor neizolate (LEA) de către păsări sau animale;
- ❖manevre greșite în timpul exploatării, etc.

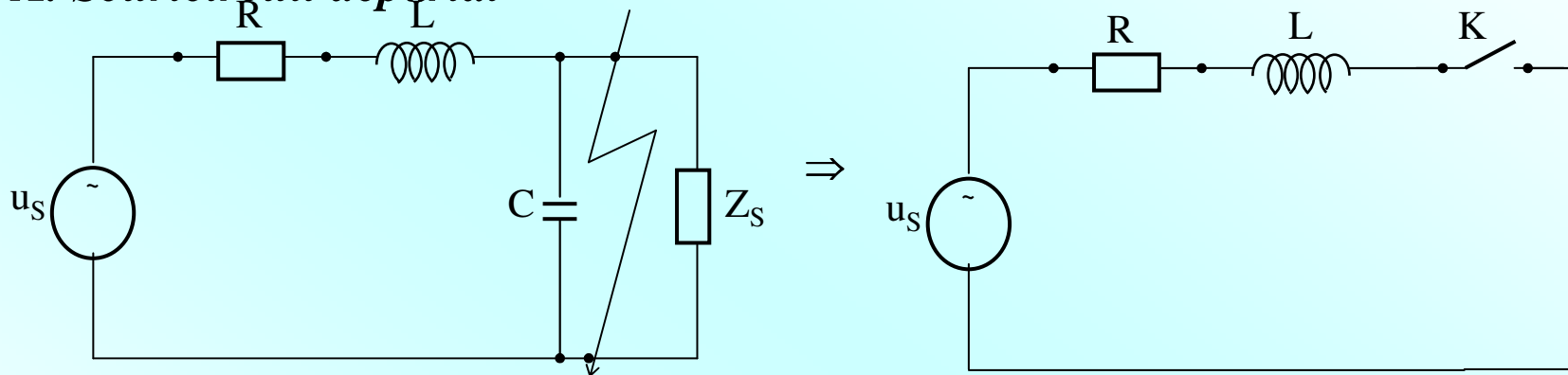
### ***Valoarea curenților de scurtcircuit depinde de:***

- ❖puterea surselor care alimentează scurtcircuitul;
- ❖distanța dintre sursă și locul de scurtcircuit
- ❖timpul scurs de la momentul apariției scurtcircuitului;
- ❖tipul scurtcircuitului: monofazat, bifazat, bifazat la pământ, trifazat.

## 12.1. Modelarea Procesului de Scurtcircuit

*Are o impedanță relativ mică și un pronunțat caracter inductiv ( $X \gg R$ ).*

### A. Scurtcircuit depărtat



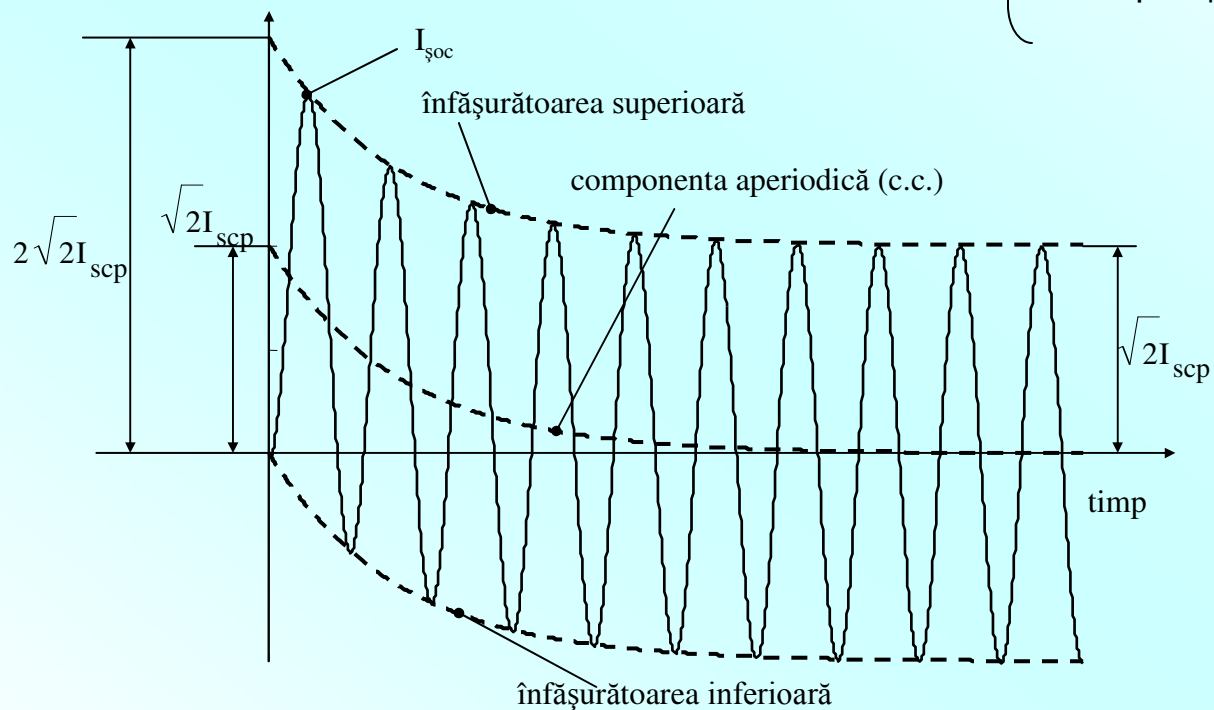
**Fig.12.1.** Modelarea scurtcircuitului.

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \psi) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (12.1)$$

- $\Psi$  unghiul electric măsurat de la trecerea tensiunii sursei prin zero;
- $R$  și  $L$  sunt rezistența, respectiv inductivitatea echivalentă a căii de scurtcircuit.

$$i(t) = \sqrt{2}I_p \left\{ (\sin(\omega t - \alpha) + \sin \alpha e^{-\frac{t}{T}}) \right\} \quad (12.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_p = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} \\ T = L/R \\ \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \\ \alpha = \varphi - \psi \end{array} \right.$$



**Fig.12.2.** Variația curentului de scurtcircuit în cazul unui defect departe de generator.

următoarele cazuri particulare  $\alpha=0$ , sau  
 $\alpha=\psi$ :

$$i(t) = \sqrt{2}I_p \sin \omega t \quad (12.3)$$

$$i_{soc} = \sqrt{2}I_p (e^{-\frac{\pi R}{X}} + 1), \omega t = \pi, \quad (12.4)$$

$$(e^{-\frac{\pi R}{X}} + 1) = K_{soc} \quad (12.5)$$

## ***B. Scurtcircuit apropiat***

În valoarea impedanței totale de scurtcircuit ponderea reactanței generatorului este preponderentă.

Pe parcursul desfășurării scurtcircuitului, generatorul va participa prin reactanțele tranzitorii și sincronă. Aceasta face ca pe perioada regimului tranzitoriu al scurtcircuitului componenta alternativă a curentului de scurtcircuit să fie variabilă în timp (regim de scurtcircuit cu componentă alternativă variabilă, descrescătoare - with AC decay period). Neglijarea acestui fenomen conduce la o supraevaluare a curentului de scurtcircuit care este acceptată.

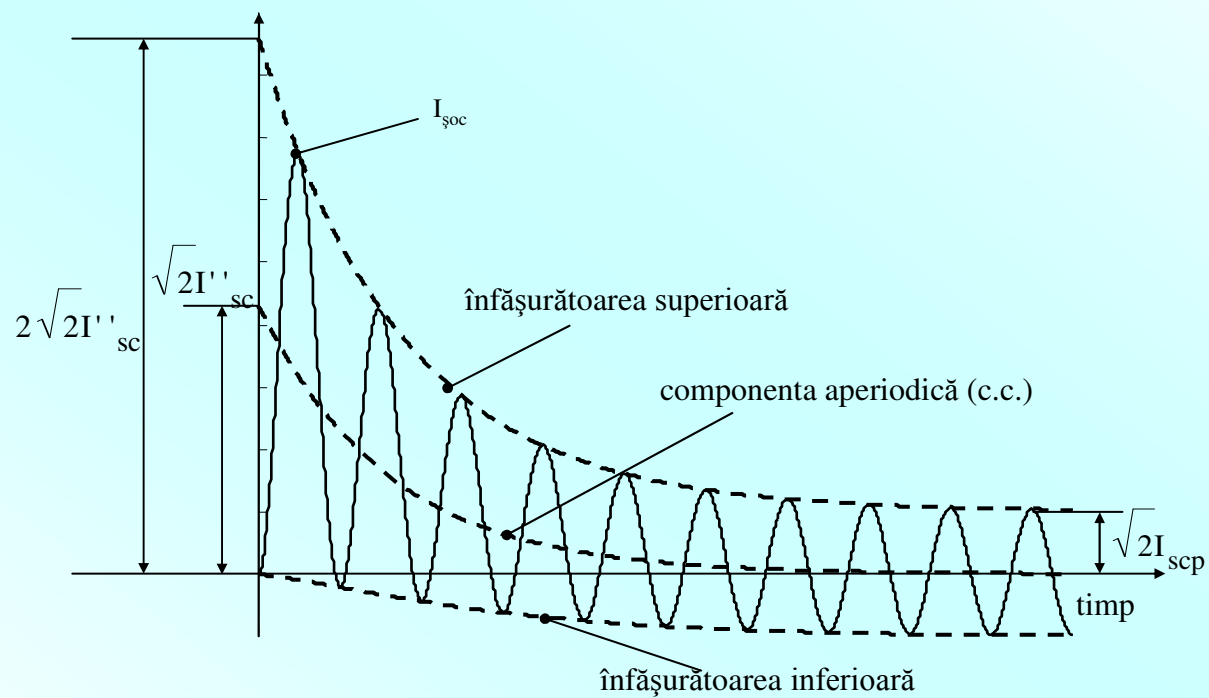
În prima etapă se anulează curenții din înfășurarea de amortizare, care are o constantă de timp mai mică. După aceea se anulează curenții din înfășurarea rotorică, care are o constantă de timp mai mare. Aceasta face ca componenta de curent alternativ a curentului de scurtcircuit să se amortizeze în două etape, cu două constante de timp  $T_1$  și  $T_2$ , corespunzătoare regimului supratranzitoriu și tranzitoriu. Componenta aperiodică se amortizează cu constanta de timp  $T_0$ . În această situație, expresia curentului total de scurtcircuit, aproape de generator este:

$$i(t) = \sqrt{2} \left\{ (I_l - I_a) \sin(\omega t - \alpha) e^{-\frac{t}{T_1}} + (I_a - I_d) \sin(\omega t - \alpha) e^{-\frac{t}{T_2}} + \right. \\ \left. + I_d \sin(\omega t - \alpha) + I_l \sin \alpha e^{-\frac{t}{T_0}} \right\} \quad (12.6)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \left\{ I_l e^{-\frac{t}{T_0}} - \left[ (I_l - I_a) e^{-\frac{t}{T_1}} - \right. \right. \\ \left. \left. - (I_a - I_d) e^{-\frac{t}{T_2}} - I_d \right] \cos \omega t \right\}, \alpha = \pi/2, \text{asimetrie maxima}, \quad (12.7)$$

Scurtcircuit la bornele generatorului:

$$I_l = I''; I_a = I'; I_d = I_S.$$



**Fig.12.3.** Variația curentului de scurtcircuit în cazul unui scurtcircuit aproape de generator (reprezentare schematică).



Componenta	Valoarea instantanee a curentului	Valoarea efectiva a curentului
Alternativă, periodică	$i_p = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \sin(\omega t - \alpha)$	$I_p = \frac{V}{Z}$
Aperiodică	$i_{ap} = \frac{\sqrt{2}U}{Z} \sin \alpha e^{-\frac{t}{T}}$	
Curentul total de scurtcircuit	$i(t) = i_p(t) + i_{ap}(t)$	$I(t) = \sqrt{I_p^2 + I_{ap}^2}$ <p>în cazul asimetriei maxime:</p> $I(\tau) = K(\tau) I_p$

## 12.2. Tipuri de scurtcircuit. Factorii care afectează severitatea scurtcircuitului

Modul de tratare a neutrului transformatorului	Tipuri de scurtcircuit	Simbol
1. Trafo cu neutrul legat la pământ:	Trifazat; Bifazat; Bifazat cu pământare; Monofazat.	$I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2p)}$ ; $I_K^{(1)}$ .
2. Rețele alimentate din trafo cu neutrul izolat:	Trifazat; Bifazat	$I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2)}$ .

Modul de tratare a neutrului transformatorului	Tipuri de scurtcircuit	Simbol
1. Trafo cu neutrul legat la pământ:	Trifazat; Bifazat; Bifazat cu pământare; Monofazat.	$I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2p)}$ ; $I_K^{(1)}$ .
2. Rețele alimentate din trafo cu neutrul izolat:	Trifazat; Bifazat	$I_K^{(2)}$ ; $I_K^{(2)}$ .

❖ *sursele de alimentare* - aceasta condiție se referă la numărul și dispoziția generatoarelor din sistem, incluzând și alte surse cum ar fi punctele/barele de interconectare cu alte sisteme. În general, condițiile de minim și maxim a surselor/generatoarelor sunt cele corespunzătoare regimurilor de sarcină minimă și maximă.

❖ *configurația sistemului electric* - este determinată de schema de conexiuni și caracteristicile electrice ale elementelor componente: generatoare electrice, transformatoare/autotransformatoare, reactoare etc., care se consideră a fi conectate în momentul efectuării calculului de scurtcircuit. Pe durata scurtcircuitului, configurația sistemului se poate schimba, fapt ce are o mare influență asupra mărimii curenților de scurtcircuit și a distribuției acestora în sistem.

❖ *sistemul de pământare* - important este numărul punctelor de pământare în rețeaua în studiu și modul de pământare - neutru legat direct la pământ sau printr-o rezistență/impedanță de pământare. impedanța de pământare este folosită în scopul limitării valorii curenților de punere la pământ.

## 12.3. Calculul curentilor de scurtcircuit in retele trifazate

Nivelul de scurtcircuit se poate exprima în amperi (A), sau în puteri aparente, MVA, corespunzător tensiunii nominale de la locul de scurtcircuit. Nu trebuie însă neglijat faptul că în anumite situații curentul de scurtcircuit monofazat maxim, în sistemele cu neutrul legat direct la pământ, poate depăși valoarea curentului de scurtcircuit trifazat simetric. În general, în țările industrializate, nivelul de scurtcircuit variază de la cca 22 MVA în rețelele de 0,4 kV la cca 22.000 MVA în rețelele de 400 kV, unde valoarea curentului de scurtcircuit poate să atingă valori de cca 20000 A pentru scurtcircuite trifazate și de cca 60000 A pentru scurtcircuite monofazate. Durata totală de eliminare a unui scurtcircuit depinde de tipul protecției și a întreruptorului și de filozofia protecției adoptate, și poate varia de la mai puțin de o sutime de secundă la o secundă.

### 12.3.1. Elementele necesare pentru calculul curenților de scurtcircuit

In schema monofilară a circuitelor primare ale instalației se vor indica:

- ❖ tipurile surselor de alimentare;
- ❖ denumirea și tipul generatoarelor electrice;
- ❖ valorile nominale ale tensiunilor;
- ❖ parametrii electrici ai echipamentului electric, după cum urmează:

1) Generatoare electrice:

- Puterea activă nominală, în MW;
- Factorul de putere nominal;
- Reactanța supratranzitorie longitudinală în ohmi sau în procente;
- Tensiunea electromotoare a generatorului supratranzitorie, u.r.

Daca lipsesc datele pentru generatoare, se pot folosi următoarele valori:

a.) pentru reactanțele supratranzitorii longitudinale  $X_d''$ :

- pentru turbogeneratoare cu  $S \leq 22$  MVA 12,2 %;
- pentru turbogeneratoare cu  $20 < S < 72$  MVA 12,2 %;
- pentru hidrogeneratoare cu  $100 < S < 200$  MVA 19,2 %;
- pentru hidrogeneratoare cu înfășurări de amortizare 20 %;

- pentru hidrogenatoare fără înfășurări de amortizare 27 %;
- pentru generatoare Diesel 18 %.

b.) Pentru t.e.m.  $E''$ , în unități relative:

- pentru turbogeneratoare 1,08 %;
- pentru hidrogenatoare cu înfășurări de amortizare 1,12 %;
- pentru hidrogenatoare fără înfășurări de amortizare 1,18 %.

2) Pentru transformatoare și autotransformatoare:

- Puterea nominală aparentă, în MVA;
- Tensiunea de scurtcircuit, în procente,  $u_{sc} \%$ .

3) Pentru linii electrice:

- Lungimea liniei, în km;
- Reactanțele specifice de secvență directă, inversă și homopolară, pe unitatea de lungime.

4) Pentru bobinele de reactanță:

- Tensiunea nominală a bobinei, în kV;
- Curentul nominal al bobinei, în A;
- Reactanța procentuală,  $X_B$ , în procente.

### 12.3.2. Aproximații și premize de calcul

Liniile electrice și cablurile sunt reprezentate prin scheme echivalente în “ $\pi$ ”. Deoarece valoarea impedanțelor șunt este mult mai mică decât cea a impedanțelor serie, în calculele practice de scurtcircuit se utilizează reprezentarea liniilor electrice numai prin impedanța longitudinală.

Impedanțele transformatoarelor și mașinilor sincrone au un predominant caracter inductiv, cu un raport  $X/R > 10$  (în calculele practice se neglijează componenta rezistivă a impedanțelor). Sarcinile sunt neglijate în majoritatea calculelor practice. Aceasta conduce la o subevaluare a puterii de scurtcircuit. Neglijarea sarcinilor conduce însă la erori mari în cazul studierii regimurilor de funcționare cu o fază întreruptă.

În calculele practice de scurtcircuit reactanțele de secvență directă și inversă se consideră egale. Aceasta conduce de asemenea la o subevaluare a puterii de scurtcircuit.

Elementele componente ale rețelei sunt considerate simetrice. Tensiunile electromotoare aplicate rețelei aparțin sistemului de secvență directă, păstrându-se constante, egale între ele în mărime și fază pe toată durata scurtcircuitului. Aceste aproximații conduc la subestimarea aportului generatoarelor la scurtcircuit.

### 12.3.3. Metode de calcul în analiza scurtcircuitelor

Metoda de calculul depinde de tipul scurtcircuitului:

- ❖ scurtcircuit simetric/echilibrat - este scurtcircuitul trifazat;
- ❖ scurtcircuit nesimetric/dezechilibrat este reprezentat prin scurtcircuitul monofazat, bifazat sau bifazat cu pământare.

Calculul se poate efectua prin una din următoarele metode:

- ❖ *metoda unităților fizice* - în acest caz, parametrii întregii rețele se raportează la un singur nivel de tensiune, care este tensiunea de la locul de scurtcircuit. Această metodă este recomandată în cazul rețelelor electrice cu o configurație simplă și cu una sau doua trepte de tensiune;
- ❖ *metoda unităților relative (per unit method)* - se recomandă în cazul rețelelor cu mai multe nivele de tensiune. Este metoda general aplicată în analiza rețelelor electrice.

Într-o analiza a curenților de scurtcircuit se cere calculul curenților de scurtcircuit la locul de scurtcircuit și la anumite intervale de timp de la apariția scurtcircuitului, circulațiile de curenți prin laturile rețelei și valorile reziduale ale tensiunilor în nodurile rețelei.



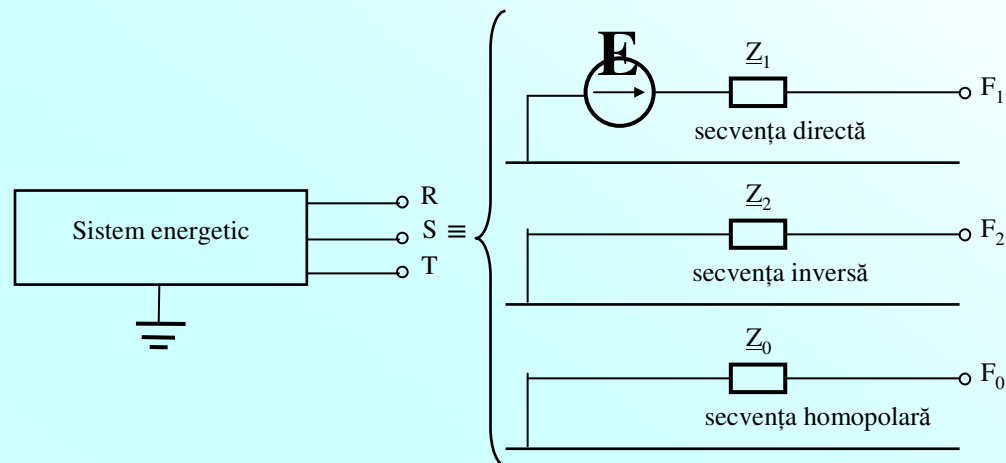
Analiza regimului de scurtcircuit este o parte componentă importantă în analiza rețelelor electrice și se poate obține prin mai multe metode alternative, și anume:

- ❖ soluționarea directă a ecuațiilor rețelei în studiu, folosind o metodă nodală de analiză sau metoda curenților de buclă;
- ❖ reducerea rețelei, determinarea curenților la locul de scurtcircuit și calculul înapoi pentru determinarea circulațiilor de curent - contribuția la defect;
- ❖ soluționarea pe modele dinamice de sistem, analizoare dinamice de rețea.

Metoda de calcul aleasă depinde de scopul calculului, mărimea și complexitatea rețelei în studiu, volumul de informații la dispoziție și de disponibilitățile de calcul. Indiferent de metoda de calcul aplicată sau de tipul de scurtcircuit, calculul curenților de scurtcircuit presupune:

- ❖ identificarea locului și a tipului de scurtcircuit;
- ❖ întocmirea schemei/schemelor electrice echivalente;
- ❖ calculul parametrilor din schema echivalentă;
- ❖ calculul propriu-zis al curenților de scurtcircuit.

În calculul curenților de scurtcircuit este convenabilă reprezentarea simplificată a fiecărei rețele printr-o tensiune electromotoare  $E$  – în serie cu o impedanță echivalentă ce reprezintă întreaga rețea „văzută” dinspre locul de defect.



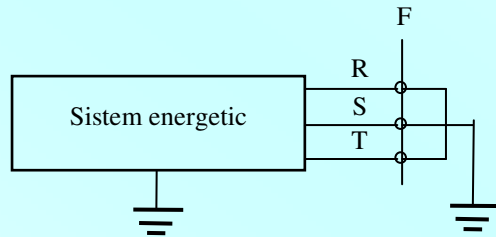
**Fig.12.4.** Scheme de secvență.

Această analiză permite evidențierea următoarelor aspecte importante în proiectarea și exploatarea sistemului energetic:

- ❖ alegerea configurației rețelei de transport și distribuție;
- ❖ determinarea sarcinii și raportului de scurtcircuit al generatoarelor;
- ❖ alegerea capacității de rupere a întrerupătoarelor și verificarea aparatajului;
- ❖ proiectarea și reglarea protecțiilor și automaticii de sistem;
- ❖ alegerea condițiilor de funcționare ale sistemului sub aspectul siguranței;
- ❖ analiza condițiilor de defecte ce au loc în exploatare;
- ❖ determinarea condițiilor de funcționare ale liniilor de telecomunicații în cazul defectelor în rețeaua de înaltă tensiune.

### 12.3.4. Calculul curenților de scurtcircuit

#### A. Scurtcircuit trifazat



Condițiile la locul de defect „F”:

$$\begin{cases} \underline{V}_R = \underline{V}_S = \underline{V}_T = \underline{V} \\ \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0 \end{cases} \quad (12.8)$$

**Fig.12.5.** Scurtcircuit trifazat.

$$(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) + (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) + (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0) = 0$$

$$\underline{I}_0 = 0 \quad (12.9)$$

$$\begin{cases} \underline{V}_R = \underline{E} - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{V} \\ \underline{V}_S = a^2 \underline{E} - a^2 \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{V} \\ \underline{V}_T = a \underline{E} - a \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a^2 \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{V} \end{cases} \quad \underline{V}_R = \underline{V}_S = \underline{V}_T = 0$$

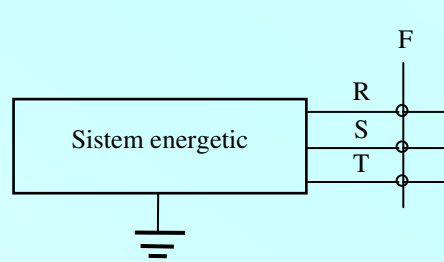
$$\underline{V}_R - a \underline{V}_S = (a^2 - 1) \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = (1-a) \underline{V} = 0 \quad \underline{I}_2 = 0 \quad (12.10)$$

$$\begin{cases} \underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1} \\ \underline{I}_2 = 0 \\ \underline{I}_0 = 0 \end{cases} \quad (12.11)$$

$$\boxed{\underline{I}_R^{3K} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1}; \underline{I}_S^{3K} = a^2 \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1}; \underline{I}_T^{3K} = a \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1}} \quad (12.12)$$

## B. Scurtcircuit bifazat fara pamant

Condițiile la locul de defect „F”:



**Fig.12.6.** Scurtcircuit bifazat  
fără pământ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{I}_R = 0; \quad \underline{I}_R = (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) = 0 \\ \underline{I}_S + \underline{I}_T = 0; \\ \underline{I}_S + \underline{I}_T = (a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0) + \\ \quad + (a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0) = 0 \\ \underline{V}_S = \underline{V}_T = \underline{V} \end{array} \right. \quad (12.13)$$

$$\underline{I}_S + \underline{I}_T = -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 + 2 \underline{I}_0 = 0; \quad \underline{I}_R + \underline{I}_S + \underline{I}_T = 3 \underline{I}_0 = 0 \Rightarrow \underline{I}_0 = 0$$

$$\underline{I}_R - (\underline{I}_S + \underline{I}_T) = 2 \underline{I}_1 + 2 \underline{I}_2 = 0 \Rightarrow \underline{I}_1 = -\underline{I}_2$$

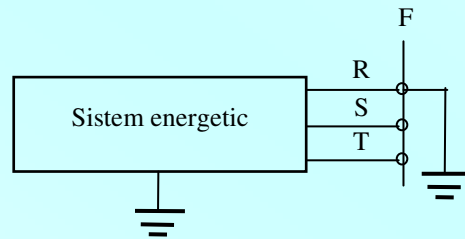
$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_S = a^2 \underline{E} - a^2 \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{V} \\ \underline{V}_T = a \underline{E} - a \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a^2 \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = \underline{V} \end{array} \right. \quad \underline{V}_S - \underline{V}_T = (a^2 - a) \underline{E} - (a^2 - a) \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - (a^2 - a) \underline{I}_2 \underline{Z}_2 = 0$$

$$\underline{V}_R = 2 \frac{\underline{Z}_1 \underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \underline{V}_S = - \frac{\underline{Z}_1 \underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \underline{V}_T = \frac{\underline{Z}_1 \underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (12.14)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_2 = \frac{-\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \quad \underline{I}_0 = 0.$$

$$\underline{I}_R^{2K} = 0; \underline{I}_S^{2K} = \frac{-j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \underline{I}_T^{2K} = \frac{j\sqrt{3}\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \quad (12.15)$$

### C. Scurtcircuit monofazat



**Fig.12.7.** Scurtcircuit monofazat.

Condițiile la locul de defect „F”:

$$\begin{cases} \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0 \\ \underline{V}_R = 0 \end{cases} \quad (12.16)$$

$$\underline{I}_S - \underline{I}_T = (a^2 - a) \underline{I}_1 + (a - a^2) \underline{I}_2 = 0$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \quad (12.17)$$

$$\underline{I}_S + \underline{I}_T = -\underline{I}_1 - \underline{I}_2 + 2 \underline{I}_0 = 0 \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 \quad (12.18)$$

$$\underline{V}_R = \underline{E} - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0 \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \quad (12.19)$$

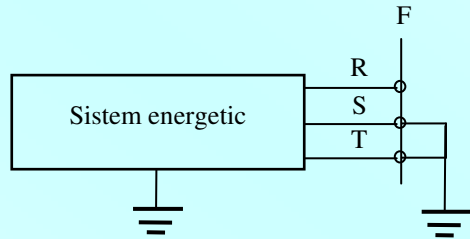
$$\boxed{\underline{I}_R = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}; \underline{I}_S = \underline{I}_T = 0} \quad (12.20)$$

$$\boxed{\begin{cases} \underline{V}_R = 0; \\ \underline{V}_S = \frac{[(a^2 - a)Z_2 + (a^2 - 1)Z_0]E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)}; \\ \underline{V}_T = \frac{[(a - a^2)Z_2 + (a - 1)Z_0]E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \end{cases}} \quad (12.21)$$



## D. Scurtcircuit bifazat la pamant

Condițiile la locul de defect „F”:



**Fig.12.8.** Scurtcircuit bifazat la pământ.

$$\begin{cases} \underline{I}_R = 0 \\ \underline{V}_S = \underline{V}_T = 0 \end{cases} \quad (12.22)$$

$$\begin{cases} \underline{V}_S = a^2 \underline{E} - a^2 \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 \\ \underline{V}_T = a \underline{E} - a \underline{I}_1 \underline{Z}_1 - a^2 \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 \end{cases}$$

$$\underline{V}_S - a \underline{V}_T = (1-a) \underline{I}_2 \underline{Z}_2 - (1-a) \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0 \quad \underline{I}_0 = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_0} \underline{I}_2 \quad (12.23)$$

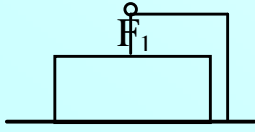
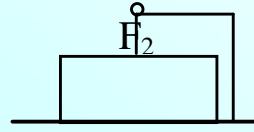
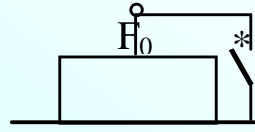
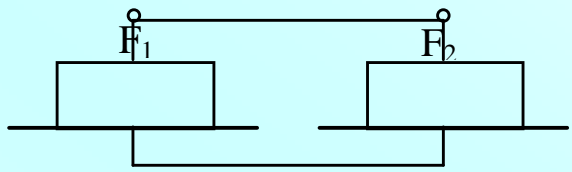
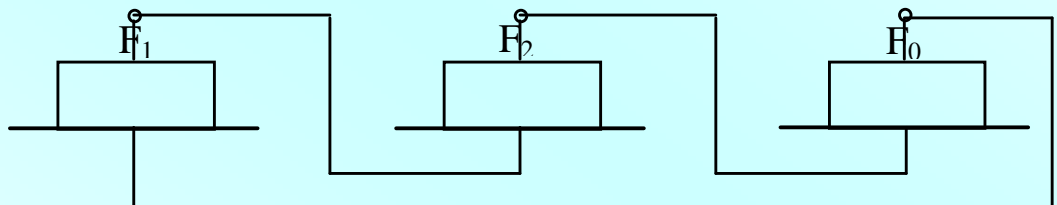
$$\underline{I}_R = \underline{I}_1 + \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0} \underline{I}_2 = 0 \quad \begin{cases} \underline{I}_2 = \frac{-\underline{Z}_0}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_0 = \frac{-\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \underline{I}_1 \end{cases} \quad (12.24)$$

$$\underline{V}_S + \underline{V}_T = -\underline{E} + \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2 + 2 \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{I}_1 = \frac{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0)\underline{E}}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0} \\ \underline{I}_2 = \frac{-\underline{Z}_0 \underline{E}}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0} \\ \underline{I}_0 = \frac{-\underline{Z}_1 \underline{E}}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_0 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_0} \end{array} \right. \quad (12.25)$$

$$\boxed{I_R = 0; I_S = \frac{-j\sqrt{3}E(\underline{Z}_0 - a\underline{Z}_2)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2\underline{Z}_0}; I_T = \frac{j\sqrt{3}E(\underline{Z}_0 - a^2\underline{Z}_2)}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2\underline{Z}_0}} \quad (12.26)$$

$$\boxed{\begin{cases} \underline{V}_R = \frac{3\underline{Z}_1\underline{Z}_0\underline{E}}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_1\underline{Z}_0 + \underline{Z}_2\underline{Z}_0} \\ \underline{V}_S = 0 \\ \underline{V}_T = 0 \end{cases}} \quad (12.27)$$

Tipul de scurtcircuit	Directă	Inversă	Homopolară
Trifazat			* închis la scurtcircuit R-S-T-P 
Bifazat fără pământ			
Monofazat			
Bifazat cu pământare	