

## CAP.12. INSTALAȚII DE LEGARE LA PĂMÂNT

### 12.1. GENERALITĂȚI

Instalațiile de legare la pământ se folosesc pentru asigurarea unei exploatari normale, fără pericole a instalațiilor și echipamentelor electrice.

Funcțiunile instalației de legare la pământ sunt:

a) asigurarea siguranței personalului de deservire și ale persoanelor care pot atinge părțile metalice ale instalațiilor electrice care în funcționare normală nu sunt sub tensiune, dar în mod accidental pot fi puse sub tensiune, și a persoanelor care circulă în apropierea acestora;

b) legarea la pământ a punctelor neutre ale unor rețele trifazate;

c) realizarea unor circuite de întoarcere prin pământ a curenților nominali de lucru în rețelele electrice de tracțiune electrică;

d) realizarea protecției împotriva supratensiunilor atmosferice sau de comutație (interne);

e) legarea la pământ temporară a unor elemente ce fac parte din căile de curent, pentru a proteja personalul ce face revizii și reparații, împotriva electrocutărilor produse prin descărcarea unor sarcini capacitive, sau apariția unor tensiuni neprevăzute în instalația respectivă.

Având în vedere cele menționate instalațiile de legare la pământ se clasifică astfel:

1. instalații de legare la pământ funcționale, de lucru;
2. instalații de legare la pământ de protecție împotriva electrocutărilor.;
3. instalații de legare la pământ de protecție împotriva supratensiunilor atmosferice.
4. instalații de legare la pământ folosite în comun, dimensionate pentru protecția împotriva electrocutării.

### 12.2. INSTALAȚII DE LEGARE LA PĂMÂNT ÎMPOTRIVA TENSIUNILOR DE ATINGERE PERICULOASE

#### 12.2.1. Efectele curentului electric asupra organismului uman

Curentul electric produce, în anumite condiții asupra corpului omenesc două categorii de efecte :

- *Șocuri electrice:*
  - comoțiile;
  - pierderea auzului, vederii sau a cunoaștinței;
  - oprirea respirației;
  - fibrilația inimii;

- stopul cardiac.
- *Electrotraumatismele:*
  - arsurile;
  - metalizarea pielii;
  - leziunile.

Pericolul de electrocutare depinde de o serie de factori:

- a) *Rezistența electrică a corpului omenesc*, este reprezentată schematic mai jos și nu depășește de regulă:  $1000 \div 3000 \Omega$ . [23]

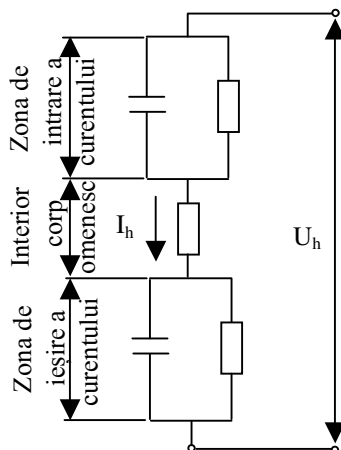


Fig. 12.1. Schema echivalentă a corpului omenesc

- b) *Intensitatea curentului electric* care trece prin corpul omenesc devine periculoasă pentru valori ce depășesc 10 mA în curent alternativ și 50 mA în c.c.
- c) *Valorile minime ale curentului* perceput de om se obțin în jurul frecvenței de  $50 \div 100$  Hz.

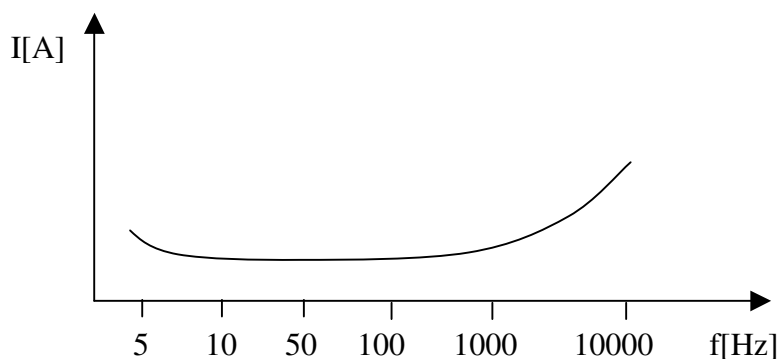


Fig.12.2. Variația curentului perceput de om cu frecvența

- d) *Calea de trecere a curentului prin corp* influențează asupra gravității accidentului, fapt demonstrat de datele statistice.

Calea curentului	Procent de accidente mortale [%]
- mână - mână	- 14%
- mână - picioare	- 17%
- picior - picior	- 2%

e) *Probabilitatea de apariție a fibrilației cardiace* crește considerabil odată cu prelungirea duratei de acțiune a curentului asupra omului.

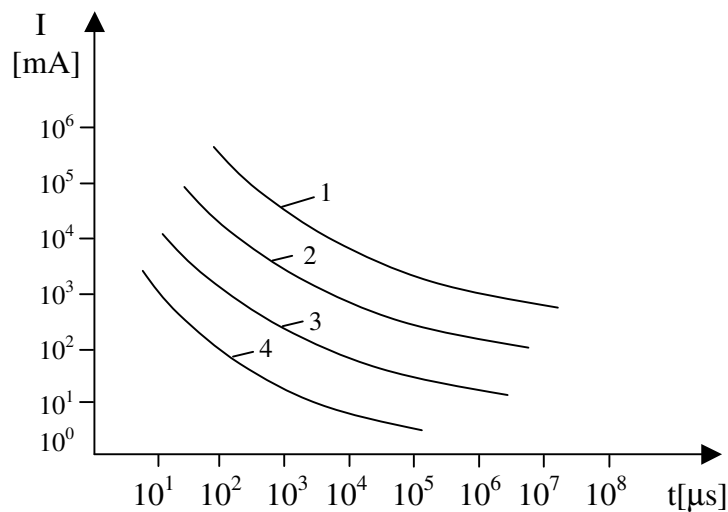


Fig.12.3. Durata de acțiune a curentului

- 1 - efect mortal;
- 2 - efect periculos;
- 3 - curent sub care se produc spasme;
- 4 - curent perceptibil.

Din experiențele făcute până în prezent s-a putut trage concluzia că efectele curentului electric nu sunt mortale pentru o acțiune având durata sub 0,2 s.

## 12.3. CAZURI FRECVENTE DE ELECTROCUTARE

### 12.3.1. Rețea cu două conductoare izolate față de pământ

Este cazul rețelilor de curent continuu cu două conductoare sau de curent alternativ monofazat.

#### 12.3.1.1. Electrocutare prin atingerea simultană a celor două faze

În acest caz pericolul de electrocutare este maxim. Curentul care trece prin corpul omului este dat de relația (12.1).

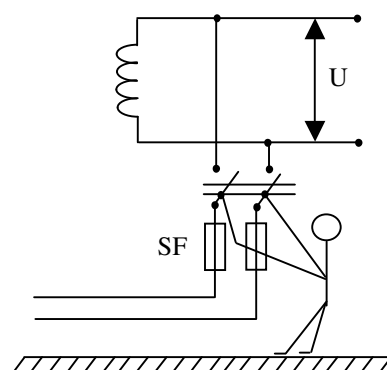


Fig.12.4. Electrocutare prin atingere simultană a două faze [23]

$$I_h = \frac{U}{R_h} \quad (12.1)$$

$$U=220 \text{ V}$$

$$R_h=1000 \ \Omega$$

$$\text{Rezultă: } I_h = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ A} = 220 \text{ mA}$$

12.3.1.2. Contact direct cu o singură fază, circuitul închizându-se prin rezistențele de izolare ale rețelei

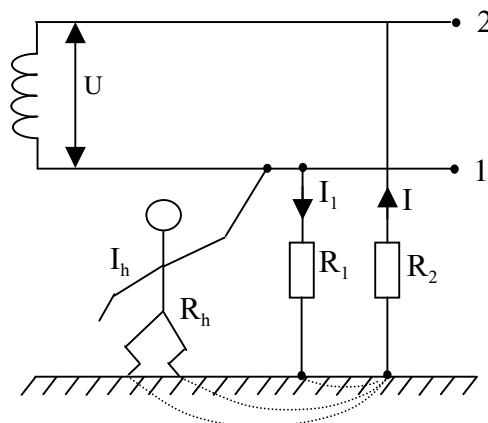


Fig.12.5. Electrocutare prin atingerea unei faze [23]

În pământ se scurg curenții atât prin rezistența de izolație  $R_1$  corespunzătoare conductorului 1 cât și prin om. Întoarcerea curentului se face prin rezistența de izolație  $R_2$  corespunzătoare conductorului 2.

Prin  $R_2$  va trece un curent  $I$  care este suma curenților  $I_h$  și  $I_1$ .

$$I=I_h + I_1 \quad (12.2)$$

Schema echivalentă este:

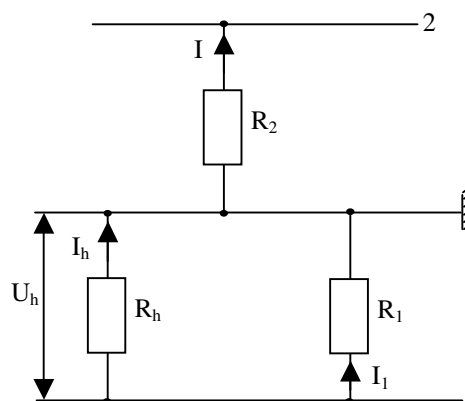


Fig.12.6. Schema echivalentă

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} \quad (12.3)$$

$$U_h = I \cdot R_e = I \cdot \frac{R_1 R_h}{R_1 + R_h} \quad (12.4)$$

$$I = \frac{U}{R_2 + \frac{R_1 R_h}{R_1 + R_h}} = \frac{U}{\frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{R_1 + R_h}} \quad (12.5)$$

$$I_h = \frac{1}{R_h} \frac{U}{\frac{R_1 R_2 + R_h (R_1 + R_2)}{R_1 + R_h}} \cdot \frac{R_1 R_h}{R_1 + R_h} \quad (12.6)$$

$$I_h = \frac{U R_1}{R_h (R_1 + R_2) + R_1 R_2} \quad (12.7)$$

În ipoteza că  $R_1 = R_2 = R_{iz}$

Rezultă:  $I_h = \frac{U}{2R_h + R_{iz}} \quad (12.8)$

Expresia obținută arată influența rezistenței de izolație a conductoarelor și rezistența de izolație a omului față de pământ (inclusă în  $R_h$ ) asupra protecției împotriva tensiunilor accidentale.

Ex:  $I_h = 10 \text{ mA}$  admis

$U = 220 \text{ V}$

$$R_{iz} = \frac{U}{I_h} - 2R_h = \frac{220}{0,01} - 2000 = 22000 - 2000 = 20000 \Omega = 20 \text{ k}\Omega$$

Rezultă:  $R_{iz} \geq 20 \text{ k}\Omega$

### 12.3.1.3. Contact direct cu o singură fază, circuitul închizându-se prin capacitățile față de pământ ale fazelor

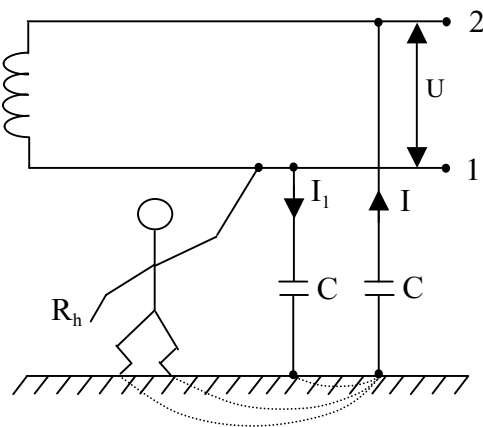


Fig.12.7. Schema de principiu [23]

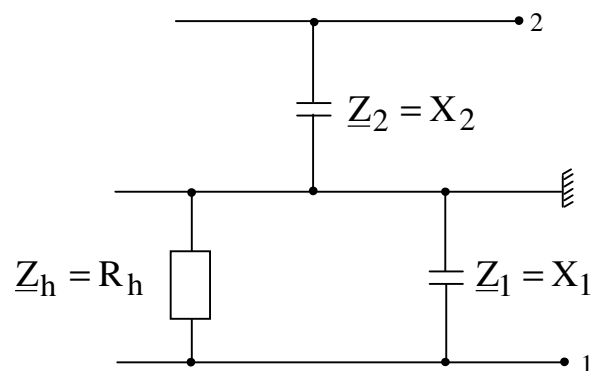


Fig.12.8. Schema echivalentă

În exemplul anterior am presupus capacitatea rețelei foarte mică și am considerat numai componenta activă a curentului.

Presupunerea este valabilă numai pentru rețele aeriene până la 1000 V. În rețelele din cabluri până la 1000 V însă, unde capacitatea față de pământ este mare, chiar pentru tensiuni și lungimi de conductoare mici există preponderent curent capacitiv, deci capacitatea conductoarelor trebuie luată în considerație.

Valoarea curentului prin om poate fi obținută prin analogie cu expresia pentru componenta activă a curentului.

$$I_h = \frac{U}{2R_h + R_{iz}} \quad (12.9)$$

$$\text{și anume: } \underline{I}_h = \frac{U}{\underline{Z}} \quad (12.10)$$

$$\text{dar } \underline{Z} = 2R_h - j\frac{1}{\omega C} \quad (12.11)$$

$$\text{de unde: } \underline{I}_h = \frac{U}{2R_h - j\frac{1}{\omega C}} \quad (12.12)$$

$$\text{În valoare absolută: } I_h = \frac{U}{|\underline{Z}|} \quad (12.13)$$

$$|\underline{Z}| = \sqrt{(2R_h)^2 + \left(-j\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{\sqrt{4R_h^2\omega^2C^2 + 1}}{\omega C} \quad (12.14)$$

$$I_h = \frac{U \cdot \omega \cdot C}{\sqrt{4R_h^2\omega^2C^2 + 1}} \quad (12.15)$$

În cele mai multe cazuri însă, este necesar să se rezolve ecuația curentului în forma ei generală, considerând că curentul care trece prin om se închide atât prin rezistența de izolație a rețelei față de pământ, componenta activă, cât și prin capacitățile față de pământ ale conductoarelor, componenta reactivă, respectiv:

$$R_1 = R_2 = R_{iz} \neq \infty$$

$$X_1 = X_2 = X_p \neq \infty$$

#### 12.3.1.4. Contact direct cu o singură fază, circuitul închizându-se atât prin rezistențele de izolație cât și prin capacitățile față de pământ

Curentul ce trece prin corpul omului se obține tot prin analogie cu cazul anterior.

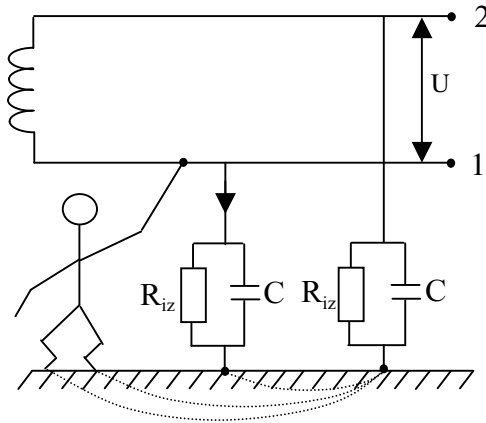


Fig.12.9. Schema de principiu

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} \quad (12.16)$$

$$\underline{Z} = 2R_h + \frac{R_{iz} \left( -j \frac{1}{\omega C} \right)}{R_{iz} - j \frac{1}{\omega C}} = 2R_h + \frac{-jR_{iz}}{\frac{R_{iz}\omega C - j}{\omega C}} = 2R_h + \frac{R_{iz}}{1 + jR_{iz}\omega C} \quad (12.17)$$

$$\underline{Z} = \frac{(2R_h + R_{iz}) + jR_{iz}\omega C \cdot 2R_h}{1 + jR_{iz}\omega C} \quad (12.18)$$

$$|Z| = \frac{|(2R_h + R_{iz}) + j2R_{iz}\omega CR_h|}{|1 + jR_{iz}\omega C|} = \frac{\sqrt{(2R_h + R_{iz})^2 + 4R_h^2 R_{iz}^2 \omega^2 C^2}}{\sqrt{1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{4R_h^2 + 4R_h R_{iz} + R_{iz}^2 + 4R_h^2 R_{iz}^2 \omega^2 C^2}{1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2}} = \sqrt{\frac{4R_h^2 (1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2) + R_{iz} (4R_h + R_{iz})}{1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2}}$$

$$= 2R_h \sqrt{1 + \frac{R_{iz} (4R_h + R_{iz})}{4R_h^2 (1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2)}} \quad (12.19)$$

$$I_h = \frac{U}{2R_h \sqrt{1 + \frac{R_{iz} (4R_h + R_{iz})}{4R_h^2 (1 + R_{iz}^2 \omega^2 C^2)}}} \quad (12.20)$$

## 12.4. REȚEA TRIFAZATĂ IZOLATĂ FAȚĂ DE PĂMÂNT

### 12.4.1. Electrocutare prin atingerea simultană a două faze

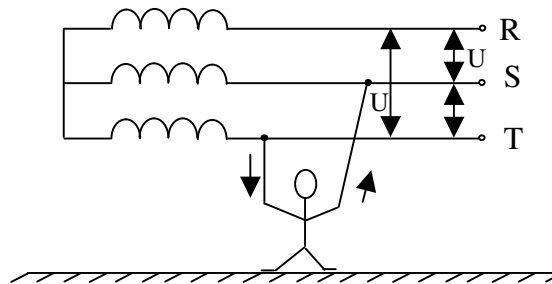


Fig.12.10. Schema de principiu

$$I_h = \frac{U}{R_h}$$

Deoarece  $U$  este tensiunea de linie, valoarea curentului prin corpul omului va fi aproximativ 380 mA. Deci va fi mult mai mare decât valoarea admisă.

12.4.1.1. Electrocutare prin atingerea unei faze, circuitul închizându-se prin rezistențele de izolare față de pământ ale celorlalte două faze

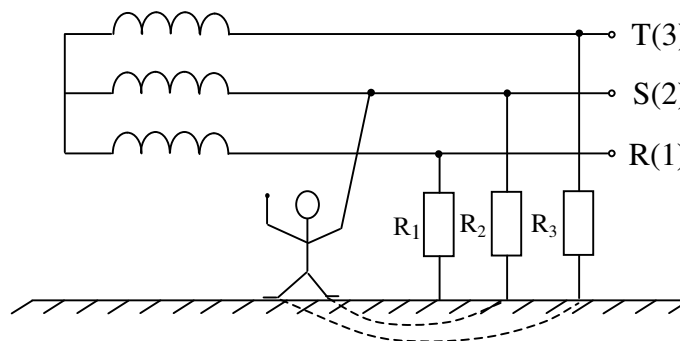


Fig.12.11. Schema de principiu [23]

Schema echivalentă este:

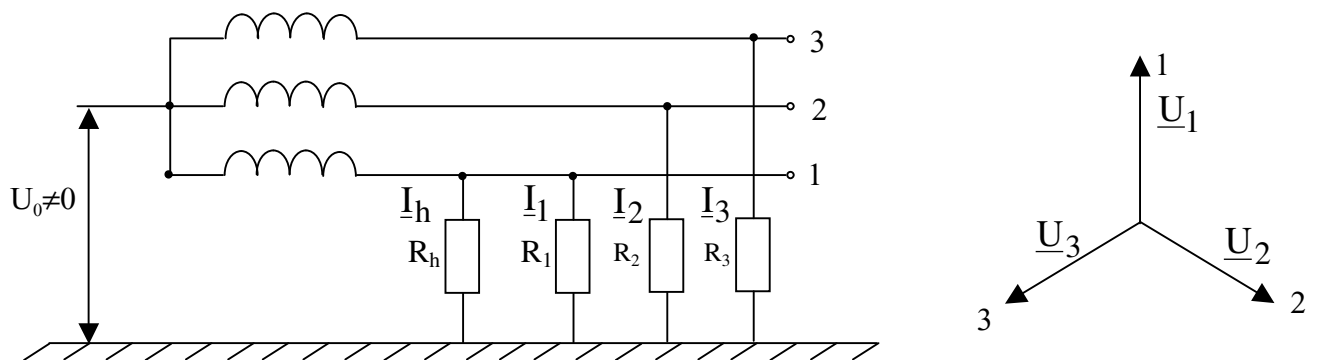


Fig.12.2. Schema echivalentă



În primul moment, când omul nu atinge faza 1, sistemul fiind simetric înseamnă că potențialul punctul neutru (pământul) coincide cu potențialul punctului neutru al sursei.

Diagrama vectorială a tensiunilor este cea din fig.12.12.

Din diagramă rezultă:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 = \underline{U}_3; \underline{U}_0 = 0 \quad (12.21)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_3; \underline{I}_0 = 0 \quad (12.22)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1; \underline{U}_2 = \underline{I}_2 R_2; \underline{U}_3 = \underline{I}_3 R_3 \quad (12.23)$$

Unde:  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$ - tensiunile conductoarelor de fază față de pământ;

$U_0$  - tensiunea punctului neutru al sursei față de pământ;

$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$  - curenții de scurgere prin izolația conductoarelor de fază.

Această stare a rețelei în condițiile;  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{iz}$  și  $C_p = 0$  se menține până în momentul atingerii rețelei de către om.

La atingerea fazei 1 de către om, rezistența izolației devine:

$$R'_1 = \frac{R_h R_1}{R_h + R_1}$$

Prin această atingere se strică simetria.

Diagrama vectorială devine:

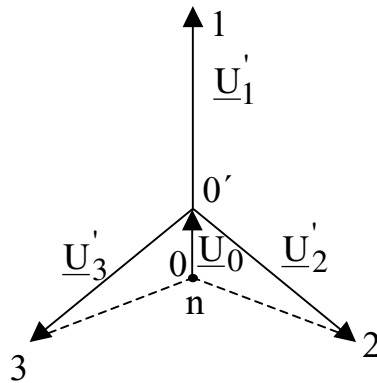


Fig.12.13. Diagrama vectorială după atingerea fazei de către om

Punctul neutru al sursei va avea în raport cu pământul o tensiune oarecare  $\underline{U}_0$ , reprezentată în diagrama vectorială prin  $\overline{OO'}$ .

Tensiunile fazelor vor avea următoarele valori:

$$\underline{U}'_1 = \underline{U}_1 - \underline{U}_0 \quad (12.22)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_2 - \underline{U}_0 \quad (12.23)$$

$$\underline{U}'_3 = \underline{U}_3 - \underline{U}_0 \quad (12.24)$$

$$\text{și } \underline{U}'_2 = \underline{U}'_3 \quad (12.25)$$

$$\text{iar } \underline{U}_0 \neq 0 \quad (12.26)$$

Se pot determina curenții:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_1}; \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_0}{R_2}; \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_0}{R_3}; \underline{I}_h = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_h} \quad (12.27)$$

Toți curenții converg spre un punct comun (pământul) și atunci:

$$\sum \underline{I} = 0 \quad (12.28)$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_h = 0$$

$$\frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_1} + \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_0}{R_2} + \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_0}{R_3} + \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_h} = 0 \quad (12.29)$$

Pentru:  $R_1=R_2=R_3=R_{iz}$

$$\text{Rezultă: } \frac{\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3}{R_{iz}} - \frac{3\underline{U}_0}{R_{iz}} + \frac{\underline{U}_1}{R_h} - \frac{\underline{U}_0}{R_h} = 0 \quad (12.30)$$

Dar:  $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$  alcătuiesc un sistem simetric, deci:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \quad (12.31)$$

$$\text{Rezultă: } \frac{-3\underline{U}_0}{R_{iz}} + \frac{\underline{U}_1}{R_h} - \frac{\underline{U}_0}{R_h} = 0 \quad (12.32)$$

De aici rezultă tensiunea fazei 1 în raport cu pământul.

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_0(3R_h + R_{iz})}{R_{iz}} \quad (12.33)$$

Tensiunea punctului neutru al sursei de curent în raport cu pământul este:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_1 R_{iz}}{3R_h + R_{iz}} \quad (12.34)$$

Curentul care trece prin corpul omului este:

$$\underline{I}_h = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_h} = \frac{3\underline{U}_1}{3R_h + R_{iz}} \quad (12.35)$$

Dar  $\underline{U}_1 = \underline{U}_f$  (tensiunea de fază)

$$\text{Rezultă: } \underline{I}_h = \frac{3\underline{U}_f}{3R_h + R_{iz}}$$

$$\text{Dar: } U = \sqrt{3}\underline{U}_f \quad (12.36)$$

$$\text{Rezultă: } I_h = \frac{\sqrt{3}U}{3R_h + R_{iz}} \quad (12.37)$$

În consecință, în rețelele cu neutrul izolat, rezistența izolației este un factor important de protecție.

12.4.1.2. Electrocutare prin atingerea unei faze, circuitul închizându-se prin capacitățile celorlalte două faze față de pământ

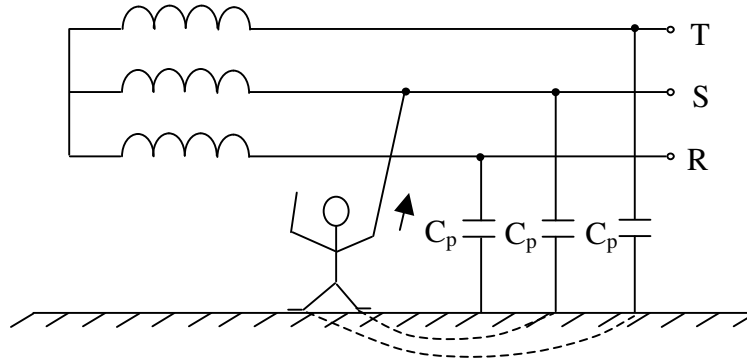


Fig.12.4. Schema de principiu

În sistemele cu neutrul izolat, chiar în cazul izolației ideale, pot apărea în funcție de valoarea capacității conductoarelor față de pământ, curenți periculoși.

În general, curenții capacitivi măresc mult curenții ce trec prin om. Dacă capacitatea față de pământ este foarte mare în raport cu rezistența de izolație față de pământ și  $R_{iz} \gg X_p$ , atunci se poate neglija curentul care se închide prin aceste rezistențe și se consideră numai curentul care se închide prin capacitatea față de pământ a fazelor.

Considerând  $R_1=R_2=R_3=R_{iz}=\infty$  și  $X_1=X_2=X_3=X_p \neq \infty$ , din relația:

$$I_h (C_p \rightarrow 0) = \frac{3U_1}{3R_h + R_{iz}} \quad (12.38)$$

Rezultă prin înlocuirea lui  $R_{iz}$  cu  $X_p$ :

$$I_h (C_p \rightarrow \infty) = \frac{3U_1}{3R_h - j\frac{1}{\omega C}} \quad (12.39)$$

$$X_p = -\frac{j}{\omega C} \quad (12.40)$$

$$I_h = \frac{3U_f}{\sqrt{(3R_h)^2 + X_p^2}} = \frac{3U_f \omega C_p}{\sqrt{9R_h^2 \omega^2 C_p^2 + 1}} \quad (12.41)$$

$$\text{sau; } I_h = \frac{\sqrt{3}\omega C_p U}{\sqrt{1 + 9R_h^2 \omega^2 C_p^2}} \quad (12.42)$$

12.4.1.3. Electrocutare prin atingerea unei faze, circuitul închizându-se atât prin rezistențele de izolație cât și prin capacitățile față de pământ ale celorlalte două faze [23]

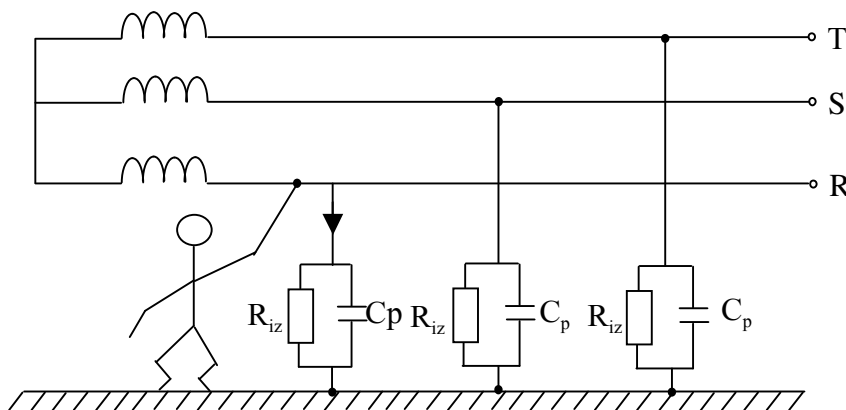


Fig.12.15. Schema de principiu

În general, în sistemele de cabluri cu mai puțin de 1000 V, dar mai lungi de 1-2 Km, există față de pământ și rezistență și capacitate.

În acest caz:  $R_1=R_2=R_3=R_{iz}$

$$\text{și; } X_1=X_2=X_3=X_p = -\frac{j}{\omega C_p}$$

Curentul prin om se obține prin analogie cu cazul anterior.

$$\underline{I}_h = \frac{3\underline{U}_1}{3R_h + \underline{Z}_{iz}} = \frac{\sqrt{3}\underline{U}}{3R_h + \underline{Z}_{iz}} \quad (12.43)$$

$$\underline{Z}_{iz} = \frac{-\frac{j}{\omega C} R_{iz}}{R_{iz} - \frac{j}{\omega C}} \quad (12.44)$$

$\underline{Z}_{iz}$  = valoarea complexă a impedanței față de pământ.

$$\underline{Z}_{iz} = \frac{-jR_{iz}X_p}{R_{iz} - jX_p} = \frac{1}{\frac{1}{R_{iz}} + j\omega C_p} = \frac{R_{iz}}{1 + j\omega C_p R_{iz}} \quad (12.45)$$

Scriind această ecuație în forma  $I_h=A+jB$  și efectuând calculele, se obține expresia:

$$I_h = \frac{U}{\sqrt{3}R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{iz}(6R_h + R_{iz})}{9R_h^2(1 + \omega^2 C_p^2 R_{iz}^2)}}} \quad (12.46)$$

### 12.5. REȚEA TRIFAZATĂ CU NEUTRUL LEGAT LA PĂMÂNT

În exploatarea instalațiilor electrice, uneori, este necesar să se obțină anumite caracteristici funcționale sau tendința de a micșora pericolul provocat de contactul unei faze cu pământul și de a reduce în acest caz tensiunea fazelor în raport cu pământul.

Din aceste motive, de cele mai multe ori se realizează o legătură între punctul neutru al sursei de alimentare și pământ. În acest caz prin corpul omului se stabilește curentul determinat de tensiunea rețelei față de pământ.

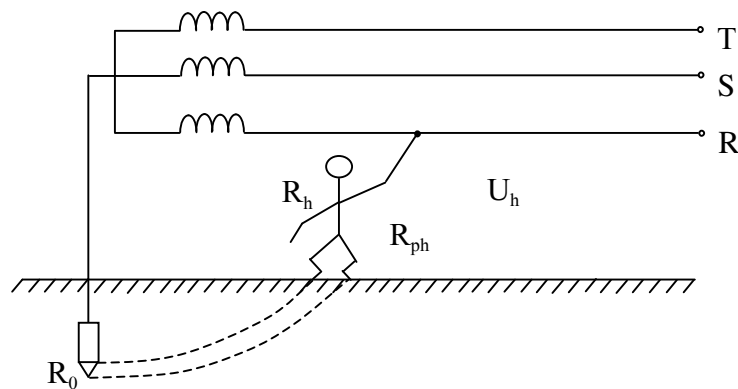


Fig.12.16. Schema de principiu

$$I_h = \frac{U_f}{R_h + R_{ph} + R_0} = \frac{U}{\sqrt{3}(R_h + R_{ph} + R_0)} \quad (12.47)$$

Dacă se consideră că \$R\_0\$ și \$R\_{ph} \ll R\_h\$, acestea se neglijează.

$$R_0, R_{ph} \rightarrow 0 \quad (12.48)$$

$$\text{Deci: } I_h = \frac{U}{\sqrt{3}R_h} \quad (12.49)$$