

Capitolul 3 - Determinarea intensității curentului prin corp în cazul atingerilor accidentale

Mărimea intensității curentului care se stabilește prin conductorul electrobiologic depinde de rezistența acestuia, între cele două puncte de contact de pe corp, și de mărimea diferenței de potențial între punctele de contact.

Diferența de potențial, ca mărime, depinde de tipul rețelei, de regimul în care funcționează neutrul acesteia, în raport cu pământul, și de modul în care este intercalat omul în circuitul electric. Relativ la ultimul parametru, *atingerea poate fi directă sau indirectă*, dar, mai important este faptul că *atingerea poate fi unipolară sau bipolară*.

Atingerea unipolară constă în atingerea simultană a două puncte, dintre care unul este pământul, iar atingerea bipolară constă în atingerea simultană a două puncte izolate față de pământ. Tot atingere unipolară se consideră și atingerea în cazul în care, concomitent cu atingerea elementului aflat sub tensiune, se atinge un obiect conductor aflat în contact electric cu pământul, așa cum sunt conductele de apă, carcasa utilajelor legate la pământ sau la nul etc.

Cea mai mare valoare a intensității curentului prin corpul uman apare în cazul atingerilor bipolare. În acest caz, la o valoare U a tensiunii rețelei și la o valoare R_h a rezistenței corpului, mărimea intensității curentului care trece prin om este dată de relația:

$$I_h = \frac{U}{R_h}, \quad (3.1)$$

neexistând nici un element de limitare a curentului ce se închide prin corp, pe care să se producă o anumită cădere de tensiune. Astfel, atingerea bipolară este cea mai periculoasă pentru om. Totuși, statistica evenimentelor arată că majoritatea accidentelor se datorează atingerilor unipolare. Din acest motiv, în aprecierea pericolului pe care îl prezintă o anumită instalație electrică se consideră doar cazul atingerilor unipolare.

Gravitatea efectelor unei atingeri unipolare depinde mai ales de tipul rețelei și de regimul în care funcționează rețeaua în raport cu pământul. Astfel, relativ la tipul rețelei, în rețelele de curent alternativ circulă curenți capacitivi, care nu circulă în rețelele de curent continuu. În cazul în care neutrul rețelei este izolat față de pământ, acești curenți capacitivi pot avea o pondere foarte mare în curentul total care circulă prin corp.

În cazul în care se urmărește verificarea eficienței măsurilor de protecție împotriva atingerilor directe se consideră că rezistența corpului uman este $R_h = 1000 \Omega$,

Electrosecuritate

situație mai defavorabilă decât în cazul atingerii indirecte, caz în care se consideră că rezistența medie a corpului uman este $R_h = 3000 \Omega$.

3.1. Determinarea intensității curentului prin corpul uman la atingere directă

Pentru a evidenția pericolozitatea unei anumite categorii de instalații electrice, este suficient să fie analizate următoarele cazuri:

- rețele electrice simple de curent continuu și rețele electrice monofazate de curent alternativ, izolate față de pământ;
- rețele electrice simple, având un pol legat la pământ;
- rețele electrice trifazate, având neutrul izolat;
- rețele electrice trifazate, având neutrul direct legat la pământ.

3.1.1. Rețele electrice simple izolate față de pământ

Rețelele simple pot fi rețele bipolare de curent continuu sau monofazate de curent alternativ. Pentru simplificare, analiza atingerii de către om a unui conductor al unei astfel de rețele poate fi făcută în anumite condiții în ipoteza neglijării capacităților față de pământ.

A. Ipoteza neglijării capacităților rețelei față de pământ

Dacă se consideră o rețea simplă, izolată față de pământ, în cazul atingerii de către om a unui conductor al rețelei, schema electrică echivalentă simplificată, valabilă pentru o astfel de situație este prezentată în figura 3.1.

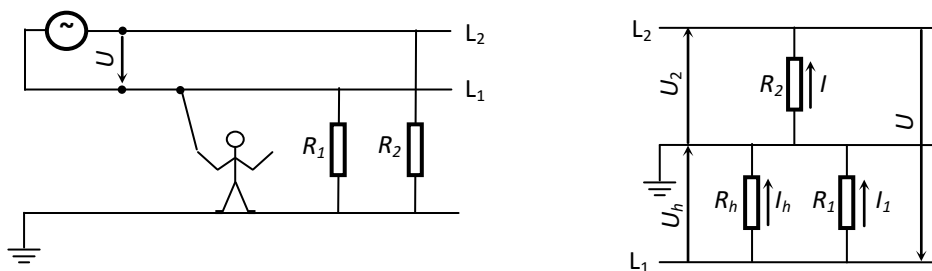


Fig. 3.1. Schema electrică echivalentă la atingere directă în rețele simple izolate față de pământ

În schema echivalentă din figura 3.1, cu R_h s-a notat rezistența omului intercalat în circuit, iar cu R_1 și R_2 rezistențele de izolație față de pământ corespunzătoare celor

Electrosecuritate

doi poli ai rețelei. În cazul general, aceste rezistențe de izolație se referă la liniile electrice și la toate echipamentele și instalațiile conectate la acestea, astfel încât, în realitate, curentul I_h care trece prin om circulă prin pământ, închizându-se prin rezistența de izolație față de pământ a întregii rețele. Prin izolația față de pământ se înțelege izolația conductoarelor de alimentare, a utilajelor, izolația înfășurărilor motoarelor electrice, izolația bornelor de legătură ale utilajelor, motoarelor și tablourilor electrice, izolația aparatelor de comandă, măsură și semnalizare etc.

Pentru alegerea și/sau dimensionarea corespunzătoare a mijloacelor de protecție împotriva electrocutării, este necesară determinarea tensiunii la care este supus corpul uman, U_h , dar mai ales a curentului care se stabilește prin acesta, I_h .

În acest sens, valoarea curentului ce se stabilește prin corpul uman se poate determina cu ajutorul următoarei expresii:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} \quad (3.2)$$

în care tensiunea U_h se calculează astfel:

$$U_h = U - U_2 = U - R_2 \cdot I \quad (3.3)$$

În expresia anterioară, I este curentul total prin circuit, care se deduce prin aplicarea legii lui Ohm, conform relației:

$$I = \frac{U}{R_{ech}} \quad (3.4)$$

unde, R_{ech} reprezintă rezistența echivalentă a întregului circuit ce se obține prin gruparea tuturor rezistențelor din circuitul analizat, relația de calcul fiind următoarea:

$$R_{ech} = R_2 + \frac{R_h \cdot R_1}{R_h + R_1} = \frac{R_h \cdot R_1 + R_1 \cdot R_2 + R_h \cdot R_2}{R_h + R_1} \quad (3.5)$$

Înlocuind expresia (3.5) în (3.4) se obține relația de calcul a curentului total din circuit, sub forma:

$$I = \frac{U \cdot (R_1 + R_h)}{R_h \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} \quad (3.6)$$

Înlocuind expresia curentului total din circuit, (3.6), în relația de calcul a tensiunii la care este supus omul, (3.3), iar pe aceasta din urmă în expresia (3.2) se obține relația de calcul a curentului ce se stabilește prin corpul uman după cum urmează:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} = \frac{R_1}{R_h \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} \cdot U \quad (3.7)$$

Electrosecuritate

În ipoteza în care rezistențele de izolație ale celor doi poli ai rețelei sunt egale, $R_1 = R_2 = R_{iz}$, expresia intensității curentului prin corpul uman devine de forma:

$$I_h = \frac{U}{R_{iz} + 2 \cdot R_h} . \quad (3.8)$$

Expresia (3.8) arată influența pe care o are rezistența de izolație a rețelei în limitarea curentului prin corpul uman și, implicit, în realizarea protecției împotriva tensiunilor accidentale. Astfel, dacă se consideră că valoarea maximă admisă a intensității curentului ce trece prin corpul uman, fără pericol de accident de natură electrică, este de 10 mA, în cazul unei rețele de curent alternativ, rezultă că pentru a asigura protecția personalului, rezistența de izolație a acelei rețele trebuie să satisfacă relația:

$$R_{iz} \geq \frac{U}{0,01} - 2 \cdot R_h . \quad (3.9)$$

Exemple numerice:

*În cazul atingerii directe a unei rețele izolate de **curent alternativ** având tensiunea $U = 230 \text{ V}$, rezistența de izolație a rețelei trebuie să fie întotdeauna mai mare de **21 k Ω** , pentru a asigura protecția completă împotriva atingerilor directe.*

*În cazul rețelilor de **curent continuu**, se poate considera ca fiind nepericulos curentul având **intensitatea mai mică de 50 mA**, astfel încât, la un același nivel de tensiune, rezistența minimă de izolație a rețelei poate fi de numai **2600 Ω** .*

Cazul particular al transformării atingerii unipolare în atingere bipolară

Transformarea atingerii unipolare în atingere bipolară situație poate să apară atunci când rețeaua funcționa, înaintea atingerii directe, în regim de simplă punere la pământ sau în cazul în care acest defect se produce chiar în timpul în care omul este intercalat în circuit. Astfel, dacă atingerea directă are loc atunci când $R_2 = 0$ (fig. 3.1), atunci relația (3.7) capătă forma particulară:

$$I_h = \frac{U}{R_h} . \quad (3.10)$$

Exemplu numeric:

Electrosecuritate

În aceste condiții, similare atingerii bipolare, dacă rezistența corpului uman este $R_h = 1000 \Omega$ – specifică calculelor de dimensionare a protecției la atingere directă, iar tensiunea aplicată este $U = 230 \text{ V}$, rezultă un curent prin corpul uman având intensitatea $I_h = 230 \text{ mA}$, valoare ce depășește cu mult pragul la care electrocutarea are efecte grave, ireversibile.

Cazul particular al utilizării echipamentului individual de protecție, respectiv al existenței mijloacelor electroizolante față de pământ

În situațiile analizate anterior nu au fost luate în considerare alte măsuri suplimentare de protecție, precum utilizarea echipamentului individual de protecție sau existența unor mijloace de protecție electroizolante față de pământ.

Daca la locul producerii atingerii directe există o pardoseală cu proprietăți electroizolante (situație des întâlnită după cum rezultă din statisticile unor astfel de evenimente), rezistența acestei pardoseli electroizolante este inseriată, în schema electrică echivalentă, cu rezistența corpului uman, la fel ca și rezistența echipamentului individual de protecție. Astfel, dacă aceste rezistențe se notează cu R_i , relația (3.7) devine de forma:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} = \frac{R_1}{(R_h + R_i) \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} \cdot U, \quad (3.11)$$

efectul limitator pe care îl are această rezistență fiind evident atât în cazul în care rețeaua funcționează în regim normal, cât și în cazul în care rețeaua funcționează temporar în regim de simplă punere la pământ.

Rezistență electrică semnificativă au pardoselile realizate din lemn, cauciuc sau din asfalt, motiv pentru care acestea pot fi utilizate ca măsură suplimentară de protecție, foarte eficientă.

Exemplu numeric:

O pardoseală de asfalt având **grosimea de 30 mm**, pentru o suprafață echivalentă cu aceea de așezare a tălpilor (35x35 cm) are o rezistență de ordinul a **0,5 ÷ 1 MΩ**. În aceste condiții, dacă omul atinge un element al unei rețele de **500 V**, în cea mai defavorabilă situație, în care celălalt pol al rețelei este în contact galvanic cu pământul, curentul care trece prin corpul uman este **mai mic de 1 mA**, acțiunea acestuia putând să treacă neobservată.

CONCLUZII:

Electrosecuritate

- rezistența de izolație a rețelei are rol de limitare a curentului prin corpul uman, și în realizarea protecției împotriva tensiunilor accidentale;
- în situația apariției unei simple puneri la pământ înaintea atingerii directe sau în timpul acesteia, atingerea unipolară se transformă în atingere bipolară, intensitatea curentului prin corpul uman depășind cu mult valoarea de la care efectele electrocutării sunt ireversibile;
- utilizarea echipamentului individual de protecție, respectiv existența unui mijloc de protecție electroizolant față de pământ (ex: pardoseală electroizolantă din lemn, cauciuc sau asfalt) reduce în mod semnificativ intensitatea curentului prin corpul uman atât în cazul în care rețeaua funcționează în regim normal, cât și în situația funcționării temporare în regim de simplă punere la pământ.

B. Ipoteza considerării capacităților rețelei față de pământ

Calcululele anterioare sunt făcute în ipoteza neglijării capacităților față de pământ ale rețelei și, implicit, a curentului capacitiv care ar putea circula prin omul intercalat în circuit. Această ipoteză simplificatoare nu introduce erori majore în calculele efectuate în rețele scurte, cu linii aeriene de joasă tensiune. În cazul în care rețeaua este realizată din linii de cablu, chiar și la lungimi mici ale acestora, ponderea cea mai mare în curentul total ce se închide prin corpul uman o poate avea curentul capacitiv al rețelei. Cum rețelele urbane și industriale sunt realizate, practic în totalitate, din linii de cablu, componenta capacitivă a curentului prin corpul uman nu poate fi neglijată.

Pentru a evidenția pericolul pe care îl prezintă componenta capacitivă a curentului, poate fi neglijată rezistența de izolație a rețelei, rezultând schema echivalentă din figura 3.2.

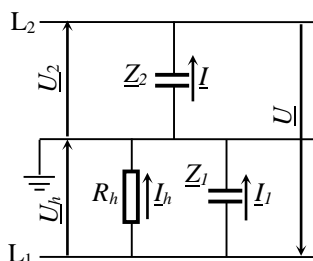


Fig. 3.2. Schema electrică echivalentă la atingere directă în rețele simple de curent alternativ, izolate față de pământ

Electrosecuritate

Schema electrică echivalentă din figura 3.2 corespunde cazului intercalării omului, prin atingere directă, într-o rețea monofazată de curent alternativ, izolată față de pământ, în ipoteza în care aceasta are o izolație ideală:

$$R_1 = R_2 = R_{iz} \rightarrow \infty .$$

Impedanța echivalentă a circuitului este dată de relația:

$$\underline{Z}_{ech} = \underline{Z}_2 + \frac{R_h \cdot \underline{Z}_1}{R_h + \underline{Z}_1} = j \cdot X_2 + R + j \cdot X , \quad (3.12)$$

în care:

$$R = \frac{R_h \cdot X_1^2}{R_h + X_1^2} , \text{ iar } X = \frac{R_h^2 \cdot X_1}{R_h^2 + X_1^2} . \quad (3.13)$$

În relațiile anterioare, X_1 și X_2 reprezintă reactanțele capacitive ale celor doi poli ai rețelei, în raport cu pământul.

În modul, intensitatea curentului total prin circuit este dată de relația:

$$I = \frac{U}{Z_{ech}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X + X_2)^2}} , \quad (3.14)$$

iar tensiunea la care este supus omul:

$$U_h = U - X_2 \cdot I = U \cdot \left(1 - \frac{X_2}{\sqrt{R^2 + (X + X_2)^2}} \right) . \quad (3.15)$$

Conform legii lui Ohm, intensitatea curentului prin corpul uman se obține prin raportarea tensiunii U_h la rezistența corpului uman, R_h , din relațiile (3.13) și (3.15) rezultând următoarea expresie:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h} = \frac{X_1}{\sqrt{R_h^2 \cdot (X_1 + X_2)^2 + X_1^2 \cdot X_2^2}} \cdot U . \quad (3.16)$$

Dacă rețeaua este perfect simetrică, atunci:

$$X_1 = X_2 = X_p = \frac{1}{\omega \cdot C_p} ,$$

iar relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman capătă forma particulară dată de expresia:

Electrosecuritate

$$I_h = \frac{U}{X_p \cdot \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{R_h^2}{X_p^2}}} \text{ sau } I_h = \frac{\omega C_p \cdot U}{\sqrt{1 + 4 \cdot R_h^2 \cdot \omega^2 \cdot C_p^2}}. \quad (3.17)$$

Dacă în calculul intensității curentului prin corpul uman nu se introduc ipoteze simplificatoare, atunci curentul va avea atât o componentă capacitivă, cât și una activă

$$I_h = \sqrt{I_{h \text{ activ}}^2 + I_{h \text{ capacitiv}}^2}, \quad (3.18)$$

în cazul ideal al rețelei perfect simetrice și în cazul în care se consideră rezistența echipamentului individual de protecție și/sau a pardoselii electroizolante, cele două componente ale curentului total fiind date de relațiile:

$$I_{h \text{ activ}} = \frac{U}{2 \cdot (R_h + R_t) + R_{iz}} \text{ și } I_{h \text{ capacitiv}} = \frac{\omega C_p \cdot U}{\sqrt{1 + 4 \cdot (R_h + R_t)^2 \cdot \omega^2 \cdot C_p^2}}. \quad (3.19)$$

CONCLUZIE: *din relația (3.19) se poate observa că rezistența de izolație a rețelei limitează doar componenta activă a curentului, singura protecție eficientă, la nivelul curentului total, periculos pentru organism, fiind aceea dată de echipamentul individual de protecție și de pardoselile electroizolante.*

Rețelele simple izolate față de pământ pot prezenta pericol de electrocutare și după deconectare, dacă omul atinge, bipolar, conductoarele acesteia. Astfel, după deconectare, capacitatea rețelei rămâne încărcată cu o anumită sarcină electrică reziduală, sarcină ce se descarcă pe rezistența de izolație a rețelei și, mai ales, pe utilajele de lucru conectate la aceasta. Dacă utilajele sunt deconectate de la rețeaua de alimentare, iar rezistența de izolație a liniilor este de bună calitate, acest proces de descărcare a sarcinii reziduale este lent. Dacă omul este izolat față de pământ și atinge bipolar conductoarele liniei de alimentare, prin el va circula curentul de descărcare a sarcinii electrice înmagazinate în capacitatea dintre conductoarele rețelei deconectate.

Spre deosebire de cazul atingerii monofazate, existența unei pardoseli electroizolante nu reprezintă o măsură de protecție, acest proces având loc tocmai în condițiile în care omul este izolat față de pământ. Singura măsură de protecție este aceea a utilizării echipamentului individual de protecție (mănuși electroizolante).

3.1.2. Rețele electrice simple legate la pământ

Dacă se consideră o rețea unipolară de curent continuu sau o rețea monofazăată scurtă de curent alternativ, la intercalarea omului în circuit, schema electrică echivalentă devine de forma celei prezentate în figura 3.3.

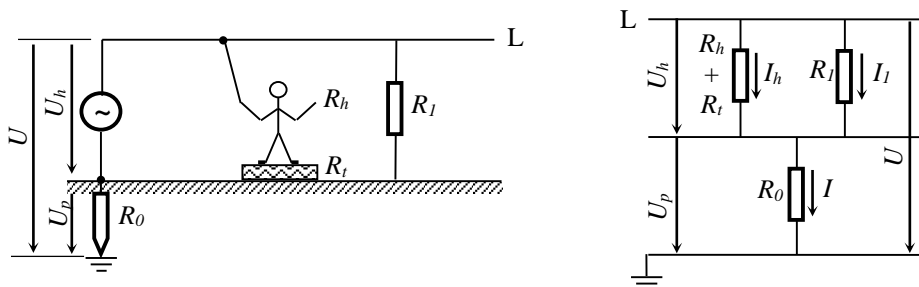


Fig. 3.3. Schema electrică echivalentă la atingere directă în rețele simple legate la pământ

Dacă se neglijează capacitatea față de pământ a rețelei, atunci relația de calcul a intensității curentului ce se închide prin corpul uman rezultă, conform legii lui Ohm, de forma:

$$I_h = \frac{U_h}{R_h + R_t} = \frac{U - U_p}{R_h + R_t}, \quad (3.20)$$

în care U este tensiunea de serviciu a rețelei, U_p este căderea de tensiune pe instalația de legare la pământ a sursei, de rezistență R_0 , în regimul în care omul se află în atingere directă, $R_h = 1000 \Omega$ este rezistența corpului uman, valoare de calcul pentru atingere directă, R_t este rezistența echipamentului individual de protecție și a pardoselii electroizolante, iar R_l rezistența de izolație în raport cu pământul a întregii rețele.

Conform schemei echivalente din figura 3.3, căderea de tensiune pe instalația de legare la pământ a sursei este dată de relația:

$$U_p = U \cdot \frac{R_0}{R_0 + \frac{R_l \cdot (R_h + R_t)}{R_l + R_h + R_t}}. \quad (3.21)$$

Relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman rezultă de forma:

$$I_h = U \cdot \frac{R_l}{(R_h + R_t) \cdot (R_l + R_0) + R_l \cdot R_0}. \quad (3.22)$$

Instalațiile de legare la pământ a neutrilor surselor sunt realizate astfel încât suma dintre rezistența de dispersie a prizei de pământ și aceea a conductoarelor de legătură este foarte mică, astfel încât rezistența R_0 poate fi neglijată, fără a se introduce

Electrosecuritate

erori semnificative în calculul intensității curentului. În această ipoteză, relația (3.22) devine de forma:

$$I_h = \frac{U}{R_h + R_t}. \quad (3.23)$$

CONCLUZIE:

Din relația (3.23) se observă că, în cazul rețelelor legate la pământ, rezistența de izolație nu mai are un rol de limitare a curentului prin corpul uman, singurul element care poate asigura protecția împotriva electrocutării fiind rezistența echipamentului individual de protecție sau rezistența unei pardoseli electroizolante. Dacă aceste elemente protectoare lipsesc, iar omul atinge solul umed, caracterizat prin rezistivitate specifică mică, sau un circuit conductor, așa cum sunt șinele pentru căile de rulare sau țevile de apă, atingerea unipolară este practic identică cu atingerea bipolară.

3.1.3. Rețele electrice trifazate izolate față de pământ

Dacă se consideră o rețea trifazată de tensiune alternativă având neutrul izolat, la atingerea directă, de către om, a unui conductor activ al acestei rețele, schema electrică echivalentă devine de forma celei prezentate în figura 3.4, în care impedanțele Z ale fazelor sunt formate din capacitățile naturale față de pământ, C_p , și rezistența de izolație în raport cu pământul, R_{iz} .

Atingerea concomitentă a unui element aflat sub tensiune și a pământului sau a unui element conductor aflat în contact cu pământul, va determina circulația prin corpul uman a unui curent care se închide prin impedanțele transversale corespunzătoare celorlalte două faze.

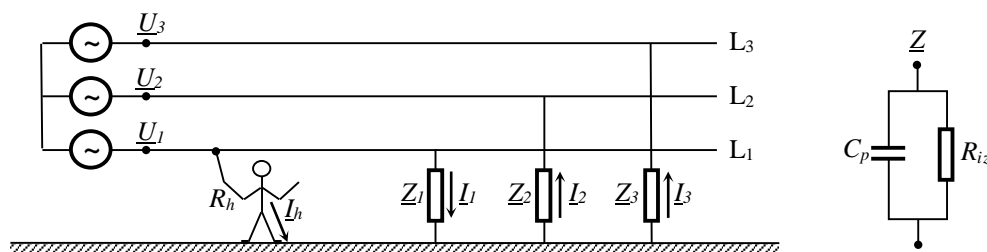


Fig. 3.4. Schema electrică corespunzătoare atingerii directe a unui conductor de lucru din rețele trifazate izolate față de pământ

Electrosecuritate

Dacă se face ipoteza simplificatoare a considerării impedanței \underline{Z} ca fiind un element concentrat de circuit și nu uniform distribuit, așa cum este ea în realitate, atunci expresia de calcul a acestei impedanțe este de forma:

$$\underline{Z} = \frac{R_{iz} \cdot \frac{1}{j\omega \cdot C_p}}{R_{iz} + \frac{1}{j\omega \cdot C_p}} = \frac{R_{iz}}{1 + \omega^2 C_p^2 R_{iz}^2} - j \cdot \frac{\omega C_p R_{iz}^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_{iz}^2}. \quad (3.24)$$

Atâta timp cât sistemul este simetric, potențialul punctului neutru al sursei, în raport cu pământul, este nul. În momentul în care intervine o modificare, sub aspectul simetriei circuitului sau tensiunilor, sistemul se dezechilibrează, punctul neutru având un potențial \underline{U}_0 față de pământ. Atingerea de către om a unei faze introduce o nesimetrie în schemă, rezistența R_h a omului fiind conectată între faza atinsă și pământ.

Dacă se presupune că înaintea intercalării omului în circuit rețeaua este perfect simetrică și alimentată cu un sistem echilibrat de tensiuni, atunci, între parametrii circuitului există următoarele relații:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0; & \underline{U}_0 = 0 \\ \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0; & \underline{I}_0 = 0 \\ \underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1; & \underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2; & \underline{U}_3 = \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z} \end{cases}, \quad (3.25)$$

în care \underline{U}_1 , \underline{U}_2 și \underline{U}_3 sunt tensiunile de fază, \underline{U}_0 este tensiunea de deplasare a neutrulei, iar curenții \underline{I}_1 , \underline{I}_2 și \underline{I}_3 sunt curenții transversali de scurgere prin volumul și pe suprafața dielectricilor și prin capacitățile transversale ale elementelor rețelei.

În momentul în care omul se intercalează în circuit, impedanța fazei atinse, în raport cu pământul, devine de forma:

$$\underline{Z}' = \frac{R_h \cdot \underline{Z}}{R_h + \underline{Z}}. \quad (3.26)$$

Această nesimetrie afectează steaua tensiunilor de fază, fără a afecta și triunghiul tensiunilor de linie, așa cum se poate observa din diagrama fazorială reprezentată în figura 3.5.

Punctul neutru al sarcinii se deplasează în punctul O' , astfel încât punctul neutru al sursei, O , va avea în raport cu pământul potențialul U_0 .

Dacă sunt cunoscute tensiunile de fază ale rețelei, înaintea intercalării omului în circuit, și valorile impedanțelor complexe ale acesteia, atunci tensiunile de fază, din regimul dezechilibrat, se calculează cu relații de forma:

Electrosecuritate

$$\begin{cases} \underline{U}'_1 = \underline{U}_1 - \underline{U}_0 \\ \underline{U}'_2 = \underline{U}_2 - \underline{U}_0 \\ \underline{U}'_3 = \underline{U}_3 - \underline{U}_0 \end{cases} \quad (3.27)$$

iar intensitățile curenților de fază, în formă simbolică, cu relații de forma:

$$\begin{cases} \underline{I}'_1 = \frac{\underline{U}'_1}{\underline{Z}_1}; & \underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}'_2}{\underline{Z}_2}; & \underline{I}'_3 = \frac{\underline{U}'_3}{\underline{Z}_3} \\ & & \underline{I}'_h = \frac{\underline{U}'_1}{R_h} \end{cases} \quad (3.28)$$

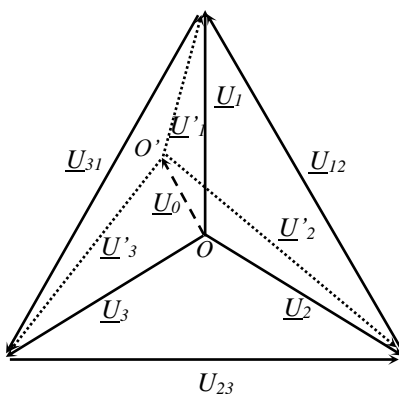


Fig. 3.5. Diagrama fazorială a tensiunilor la atingere directă într-o rețea trifazată izolată

Legea I-a a lui Kirchoff, aplicată în raport cu nodul pământ, este de forma:

$$\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_3 + \underline{I}'_h = 0. \quad (3.29)$$

Din relațiile (3.25), (3.27), (3.28) și (3.29) rezultă expresia:

$$\frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{\underline{Z}} + \frac{\underline{U}_2 - \underline{U}_0}{\underline{Z}} + \frac{\underline{U}_3 - \underline{U}_0}{\underline{Z}} + \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_0}{R_h} = 0, \quad (3.30)$$

prin a cărei dezvoltare se obține:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_1 \cdot \frac{\underline{Z}}{3R_h + \underline{Z}}. \quad (3.31)$$

Introducând relația (3.31) în relația de calcul a curentului prin corpul uman, se obține expresia:

$$\underline{I}'_h = \frac{3\underline{U}_1}{3R_h + \underline{Z}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{U}}{3R_h + \underline{Z}}, \quad (3.32)$$

Electrosecuritate

în care U este tensiunea de linie a rețelei în care a avut loc atingerea directă.

Dacă în relația (3.32) se înlocuiește impedanța complexă \underline{Z} prin propria relația de calcul, (3.24), relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman devine:

$$I'_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{3R_h + \frac{R_{iz}}{1 + j\omega C_p R_{iz}}} . \quad (3.33)$$

Modulul intensității curentului prin corpul uman rezultă ca fiind egal cu:

$$I'_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{\sqrt{9R_h^2 + \frac{R_{iz} \cdot (6R_h + R_{iz})}{1 + \omega^2 C_p^2 R_{iz}^2}}} \text{ sau } I'_h = \frac{U}{\sqrt{3}R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{iz} \cdot (6R_h + R_{iz})}{9R_h^2(1 + \omega^2 C_p^2 R_{iz}^2)}}} . \quad (3.34)$$

Dacă rețeaua are capacitate transversală neglijabilă sau dacă aceasta este o rețea de curent continuu, intensitatea curentului prin corpul uman se obține particularizând relația (3.34) pentru $C_p = 0$, obținându-se relația:

$$I'_{h(C_p=0)} = \frac{U}{\sqrt{3}R_h + \frac{R_{iz}}{\sqrt{3}}} , \quad (3.35)$$

CONCLUZII:

Din relația anterioară rezultă, evident, rolul limitator pe care îl are rezistența de izolație a rețelei asupra intensității curentului prin corpul uman.

Astfel, dacă prin anumite măsuri, de ordin tehnic, este menținută rezistența de izolație a rețelei la valori mari, atingerea directă a unei faze a unei rețele trifazate izolate, dar de capacitate mică, poate fi complet inofensivă. Aceste valori ale rezistenței de izolație, care asigură protecția, sunt:

- 63 k Ω , pentru rețele având tensiunea nominală de 0,4 kV;
- 35 k Ω , pentru rețele având tensiunea nominală de 230 V;
- 19 k Ω , pentru rețele având tensiunea nominală de 127 V.

Datorită faptului că rezistența de izolație a rețelelor izolate față de pământ are un rol important în protecția împotriva electrocutării, asemenea rețele sunt utilizate pentru alimentarea utilajelor din zonele periculoase. (Astfel, în subteran, la exploatarea miniere, unde condițiile de deservire a utilajelor sunt deosebit de grele, datorită umidității și căldurii excesive, se utilizează numai rețele izolate față de pământ. De asemenea, utilajele electrice portabile, utilizate în medii periculoase și foarte periculoase, pot fi alimentate prin intermediul unor transformatoare de separație având conexiune în triunghi, pe partea consumatorilor.)

Electrosecuritate

Cazul particular al apariției unui defect de izolație

Trebuie subliniat, însă, că menținerea rezistenței de izolație la valori ridicate nu elimină riscul producerii electrocutărilor, deoarece nici riscul producerii accidentale a unui defect nu este nul. Riscul de electrocutare la atingere directă a unei faze, funcționând temporar în regim de simplă punere la pământ - efect al producerii unui defect de izolație, rezultă evident dacă relația (3.35) se generalizează pentru cazul în care rezistențele de izolație ale celor trei faze sunt diferite, astfel:

$$I'_{h(C_p=0)} = \frac{U \cdot R_1 \cdot \sqrt{R_2^2 + R_2 \cdot R_3 + R_3^2}}{R_h \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1) + R_1 \cdot R_2 \cdot R_3} \quad (3.36)$$

Atât din relația (3.36), cât și din reprezentarea grafică dată în figura 3.6 se poate observa că dacă una dintre fazele rețelei are izolația complet deteriorată sau este pusă la pământ accidental, atingerea directă a oricăreia dintre fazele sănătoase este identică cu o atingere bipolară, omul fiind supus tensiunii de linie. Intensitatea curentului prin corpul uman este dată de relația:

$$I_h = \frac{U}{R_h} \quad (3.37)$$

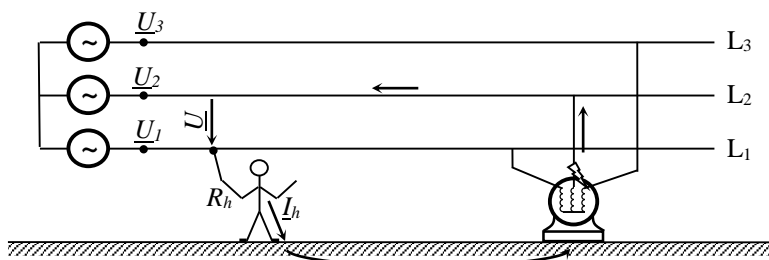


Fig. 3.6. Schema electrică corespunzătoare atingerii directe a unei faze sănătoase a unei rețele trifazate izolate funcționând în regim de simplă punere la pământ

CONCLUZII:

- *dacă una dintre fazele rețelei are izolația complet deteriorată sau este pusă la pământ accidental, atingerea directă a oricăreia dintre fazele sănătoase este identică cu o atingere bipolară, omul fiind supus tensiunii de linie, conform relației (3.37);*
- *în sistemele cu neutrul izolat, pericolul punerii la pământ a unei faze este punctul cel mai slab al acestui gen de distribuție și, în consecință, acesta poate fi un motiv al legării punctului neutru al sursei la pământ. Evident, în*

Electrosecuritate

aceste condiții trebuie adoptate o serie de alte măsuri de protecție împotriva electrocutării.

În realitate, chiar la o funcționare normală a rețelei, nu este posibil ca, întotdeauna, rezistența de izolație a rețelei să fie menținută la o valoare suficient de mare încât trecerea curentului prin corpul uman să fie nepericuloasă. Chiar dacă rezistențele de izolație ale tuturor echipamentelor și liniilor de alimentare se încadrează în valorile normate, rezistența de izolație a întregii rețele poate să scadă sub valoarea care ar limita curentul la un nivel nepericulos, în cazul atingerii monofazate.

De asemenea, dacă capacitatea față de pământ a rețelei este mare, astfel încât reactanța capacitivă transversală să nu poată fi neglijată, riscul producerii electrocutării la atingere directă crește, datorită creșterii componentei capacitive a curentului ce se închide prin corpul uman. În astfel de condiții electrocutarea poate avea loc chiar și atunci când rezistența de izolație a rețelei se păstrează în limite normale.

Pentru a evidenția acest aspect, se poate considera situația limită în care rezistența de izolație a rețelei este șuntată de reactanța capacitivă a acesteia. În aceste condiții, intensitatea curentului prin corpul uman este dată de relația:

$$I_{h (R_{iz} \rightarrow \infty)} = \frac{\sqrt{3}\omega C_p}{\sqrt{1 + 9\omega^2 C_p^2 R_h^2}}. \quad (3.38)$$

Exemplu numeric:

*În cazul general în care prin corpul uman circulă și o componentă activă și una componentă capacitivă, într-o rețea cu tensiunea nominală de **0,4 kV**, având o capacitate relativ mică în raport cu pământul, de numai **1 μF**, și o rezistență de izolație globală, față de pământ, de **10 kΩ**, prin corpul uman circulă un curent a cărui intensitate este de **140 mA**, valoare ce se încadrează în domeniul curenților foarte periculoși pentru om. În exploatarea minieră se întâlnesc frecvent rețele având capacități transversale de ordinul a **5 μF**, riscul producerii electrocutării la atingere directă fiind unul major.*

CONCLUZII:

- *rețelele izolate față de pământ prezintă avantaje față de rețelele având neutrul legat la pământ, în ceea ce privește riscul electrocutării, însă nu poate fi evitat riscul producerii unui accident numai pe baza rezistenței de izolație a rețelei.*
- *întotdeauna este necesară respectarea măsurilor tehnice de protecție împotriva electrocutării prin atingere directă.*

Electrosecuritate

- pentru ca rețeaua să-și păstreze avantajele, este exclusă utilizarea neutrului pentru scopuri de exploatare.

3.1.4. Rețele electrice trifazate legate la pământ

Majoritatea utilajelor electrice sunt alimentate din rețele trifazate având neutrul legat la pământ, deoarece aceste rețele prezintă o serie de avantaje în exploatare, în raport cu rețelele izolate și, mai ales, în raport cu rețelele monofazate.

Legătura fermă la pământ a punctului neutru al sursei de alimentare se stabilește prin intermediul unei instalații de legare la pământ, numită *instalație de legare la pământ de exploatare*, iar punctul neutru legat direct la o instalație de legare la pământ de exploatare poartă denumirea de *punct de nul al rețelei* sau *nulul rețelei*.

La atingerea directă de către om a unui element activ al rețelei, schema echivalentă corespunzătoare circulației curentului prin corpul uman este reprezentată în figura 3.7.

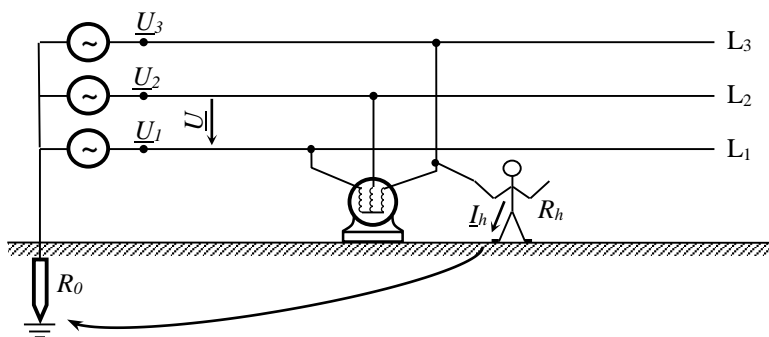


Fig. 3.7. Schema electrică la atingerea directă într-o rețea trifazată legată la pământ

Așa cum se poate observa din figura 3.7, omul este supus tensiunii de fază, iar curentul care circulă prin corpul său se închide prin pământ și prin rezistența instalației de legare la pământ de exploatare, R_0 . Intensitatea acestui curent se calculează, conform legii lui Ohm, cu relația:

$$I_h = \frac{U_3}{R_h + R_0} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (R_h + R_0)}. \quad (3.39)$$

Rezistența instalației de legare la pământ de exploatare este, în condiții normale, mai mică de 4Ω , astfel încât aceasta poate fi neglijată în raport cu rezistența de calcul a corpului uman, la atingere directă, care are valoare de 1000Ω , astfel încât se obține:

$$I_h = \frac{U_3}{R_h + R_0} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R_h}. \quad (3.40)$$

Electrosecuritate

Rezultă, deci, că la atingerea unei părți a instalației care face parte din circuitul curenților de lucru, omul este supus întregii tensiuni de fază, rezistența de izolație a rețelei neavând un rol limitator, ca în cazul rețelelor zolate față de pământ.

Exemplu numeric:

Atingerea unei faze a unei rețele de 0,4 kV va determina circulația prin corpul uman a unui curent având intensitatea de calcul de 230 mA, valoare ce depășește, cu mult, nivelul la care apare decesul prin electrocutare.

În cazul în care omul atinge o fază sănătoasă a unei rețele trifazate legate la pământ, în condițiile în care una dintre faze este în scurtcircuit și în intervalul de timp de până la deconectarea rețelei prin sistemul de protecții al acesteia, el este supus, de asemenea, tensiunii de fază a rețelei și nu tensiunii de linie, ca în cazul rețelelor trifazate izolate față de pământ.

În toate cazurile de atingere a unui singur element aflat sub tensiune, pericolul electrocutării poate fi eliminat dacă omul este izolat față de pământ sau față de elementul activ atins. Acest gen de izolare îl asigură echipamentul individual de protecție și pardoselile electroizolante. Dacă se notează rezistența acestora cu R_t , relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman devine de forma:

$$I_h = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (R_h + R_t)} . \quad (3.41)$$

Dacă se consideră limita curentului nepericulos, în rețele de curent alternativ, de 10 mA, rezistența minimă a echipamentului de protecție sau a pardoselii electroizolante se calculează cu relația:

$$R_t > \frac{U}{0,01 \cdot \sqrt{3}} - R_h , \quad (3.42)$$

în cazul în care tensiunea de fază a rețelei este de 230 V, această rezistență trebuind să fie mai mare de 22 k Ω .

CONCLUZII:

- *datorită rezistențelor mici ale circuitului, intensitatea curentului care circulă prin corpul uman, la atingere directă în rețele trifazate legate la pământ, este mare.*

Electrosecuritate

- *acest dezavantaj, din punctul de vedere al electrosecurității, nu poate constitui însă un motiv care să determine renunțarea la utilizarea distribuției de joasă tensiune prin rețele trifazate având neutrul legat la pământ, avantajele tehnice și economice ale acestora fiind importante.*
- *în această categorie de rețele, este foarte importantă, însă, folosirea mijloacelor individuale de protecție împotriva electrocutării, la deservirea instalațiilor electrice.*
- *rețelele din această categorie pot fi prevăzute cu sisteme de protecție care determină deconectarea rapidă în cazul atingerilor accidentale, așa cum sunt cele realizate cu relee diferențiale de curent rezidual.*

3.2. Determinarea intensității curentului prin corpul uman la atingere indirectă

Atingerea indirectă reprezintă atingerea unui element conductor al unei instalații electrice care, în mod normal, nu este potențializat, dar care, datorită unui defect sau a unei manevre greșite, este pus temporar sub tensiune.

De exemplu, stelajul metalic al unui tablou electric, carcasa unui motor electric, carcasa unui aparat electrocasnic, carcasa unei mașini unelte sau carcasa unor utilaje tehnologice nu se află, în mod normal, sub tensiune. La producerea unui defect, în principal de izolație, acestea sunt puse sub tensiune și, astfel, la atingerea lor de către om, care are picioarele pe un suport conductor aflat în contact cu pământul, prin acesta va trece un curent electric de o anumită intensitate.

Defectele cele mai frecvente, care conduc la astfel de situații nedorite, sunt:

- *desprinderea unui sau a mai multor conductoare de fază din circuitele electrice, datorită unor solicitări mecanice dinamice sau accidentale;*
- *defecte de izolație ale conductoarelor de fază.*

Cauzele unor astfel de defecte sunt:

- *îmbătrânirea izolației (fenomen natural ce poate fi, însă, accelerat de către suprasolicitățile repetate la care sunt supuse conductoarele în timpul exploatării);*
- *distrugerea izolației în unul sau în mai multe locuri, ca efect al acțiunii mecanice (loviri, tasări ale construcției sau acțiunea rozătoarelor);*
- *defecte de execuție din procesul de fabricație, și care nu au fost observate, nici la producătorul de echipament, nici la montarea echipamentului, sau care pot proveni din procesul de transport și de montare a echipamentelor.*

Electrosecuritate

Dacă omul atinge o astfel de carcasă și, simultan, cu o altă parte a corpului se află în contact cu pământul, prin corpul său se va închide un curent al cărui traseu de circulație mai cuprinde: transformatorul de alimentare al rețelei de joasă tensiune, conductoarele fazei defecte, carcasa receptorului la care s-a produs defectul, omul, elementele conductoare de construcție, solul, priza de pământ de exploatare a transformatorului, bobinajul fazei transformatorului pe care s-a produs defectul. Cu cât impedanța acestui traseu este mai mică, cu atât curentul care trece prin om este mai mare și, în mod evident, efectele lui sunt mai grave.

Dacă neutrul rețelei este izolat față de pământ, acest curent se închide prin impedanțele în raport cu pământul ale fazelor sănătoase, rezultând că, indiferent de tipul rețelei, există pericol de electrocutare, la atingerea unui element conductor intrat accidental sub tensiune.

Spre deosebire de atingerile directe, atingerile indirecte nu pot fi decât unipolare și, ca și în cazul atingerii directe, gravitatea efectelor unei atingeri depinde de tipul rețelei și de regimul în care funcționează rețeaua în raport cu pământul. Spre deosebire, însă, de cazul atingerii directe, în cazul atingerii indirecte prezintă o importanță deosebită modul în care funcționează echipamentele și aparatele de la utilizator, în raport cu pământul. Astfel, dacă neutrul sursei poate funcționa, în scheme de tip **IT**, izolat sau tratat cu impedanță de valoare mare, carcasa conductoare ale tablourilor electrice și ale tuturor aparatelor și utilajelor sunt legate, într-un mod sau altul la pământ (scheme de tip **IT**, **TT**, **TN-C**, **TN-S** sau **TN-C-S**).

În cazul în care se urmărește verificarea eficienței măsurilor de protecție împotriva atingerilor indirecte, se consideră că rezistența corpului uman este $R_h = 3000 \Omega$.

3.2.1. Rețele electrice simple izolate față de pământ

Cazul atingerii indirecte într-o rețea simplă izolată față de pământ care se caracterizează printr-o capacitate transversală mică este reprezentat prin schema echivalentă din figura 3.8.

În figura 3.8, în plus față de situația în care s-a tratat cazul atingerii directe într-o rețea similară, R_{def} reprezintă rezistența defectului, iar R_p este rezistența instalației de legare la pământ sau la nul, de la consumator.

Intensitatea curentului care circulă prin om se poate determina din relația de calcul a tensiunii aplicate acestuia, și anume:

$$U_h = R_h \cdot I_h = R_p \cdot I_p = U - R_2 \cdot I - R_{def} \cdot I_2 \quad (3.43)$$

Electrosecuritate

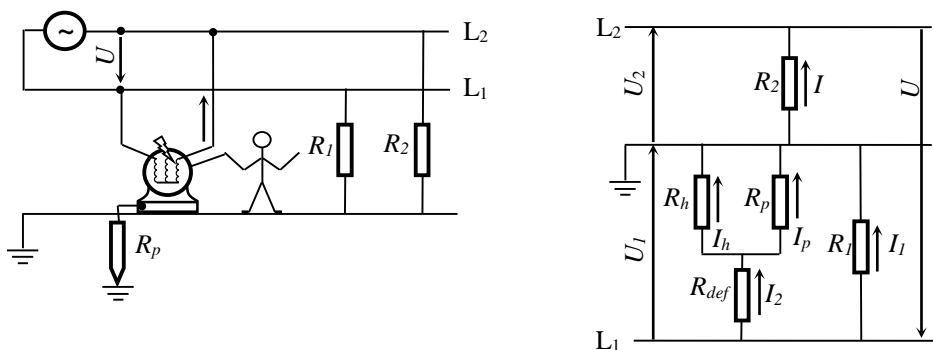


Fig. 3.8. Schema electrică echivalentă la atingere indirectă într-o rețea simplă, de mică extindere, izolată față de pământ

Aplicând legea lui Ohm, se poate determina intensitatea curentului total:

$$I = \frac{U}{R_{ech}}, \quad (3.44)$$

în care rezistența echivalentă a circuitului este dată de relația:

$$R_{ech} = R_2 + \frac{R_1 \cdot \left(R_{def} + \frac{R_h \cdot R_p}{R_h + R_p} \right)}{R_1 + R_{def} + \frac{R_h \cdot R_p}{R_h + R_p}}. \quad (3.45)$$

Deoarece tensiunea totală pe instalația de legare la pământ de protecție este egală cu tensiunea aplicată omului, iar suma curenților prin această instalație și prin om este egală cu intensitatea curentului care circulă prin rezistența de defect (conform legii I a lui Kirchhoff), rezultă o relație de calcul a acestui ultim curent de forma:

$$I_2 = \left(1 + \frac{R_h}{R_p} \right) \cdot I_h. \quad (3.46)$$

Din relațiile (3.43), (3.44) și (3.46), se obține relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman, astfel:

$$I_h = U \cdot \frac{1 - \frac{R_2}{R_{ech}}}{R_h + R_{def} \cdot \left(1 + \frac{R_h}{R_p} \right)}. \quad (3.47)$$

Dacă relațiile (3.45) și (3.47) se particularizează pentru cazul rețelei perfect simetrice, în care $R_1 = R_2 = R_{iz}$, R_{iz} reprezentând rezistența de izolație în raport cu

Electrosecuritate

pământul a unui pol al rețelei, iar defectul se consideră metalic ($R_{def} = 0$) – cea mai defavorabilă situație din punctul de vedere al gravității atingerii indirecte, relația de calcul a intensității curentului prin corpul uman devine de forma:

$$I_h = U \cdot \frac{R_p}{R_{iz} \cdot (R_h + R_p) + 2 \cdot R_h \cdot R_p}. \quad (3.48)$$

Dacă se compară intensitățile curenților date de relațiile (3.48) și (3.8) se poate observa că atingerea indirectă, în condițiile existenței unei legături la pământ a carcasei utilajului, este mai puțin periculoasă decât atingerea directă. Această observație este mult mai evidentă dacă relația (3.48) se particularizează pentru cazul în care $R_p \ll R_h$, situație în deplină concordanță cu realitatea, deoarece rezistența instalației de legare la pământ de protecție este, de obicei, mai mică de 4Ω , în condițiile în care rezistența de calcul a corpului uman, la atingere indirectă, este de 3000Ω :

$$I_h = U \cdot \frac{R_p}{R_h \cdot (R_{iz} + 2 \cdot R_p)} = U \cdot \frac{1}{R_h \cdot \left(2 + \frac{R_{iz}}{R_p}\right)}. \quad (3.49)$$

Exemplu numeric:

Astfel, dacă se consideră o rețea cu tensiunea nominală de 230 V, având rezistența de izolație în raport cu pământul de 20 kΩ, dacă instalația de legare la pământ de protecție are o rezistență de 4 Ω, rezultă o intensitate a curentului prin corp de:

$$I_h = 230 \cdot \frac{4}{3000 \cdot (20 \cdot 10^3 + 2 \cdot 4)} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ A},$$

intensitate mult mai mică decât valoarea nepericuloasă de 10 mA.

Dacă instalația de legare la pământ de protecție este discontinuă, ca urmare a unei intervenții greșite sau ca efect al suportării unui șoc mecanic, intensitatea curentului prin corpul uman se determină particularizând relația (3.48) pentru $R_p \rightarrow \infty$:

$$I_h = U \cdot \frac{1}{R_{iz} + 2 \cdot R_h}, \quad (3.50)$$

relația identică cu aceea obținută în cazul atingerii directe, în rețele simple izolate față de pământ.

CONCLUZII:

- în condițiile deteriorării sau realizării necorespunzătoare a instalației de legare la pământ de protecție, atingerea indirectă într-o astfel de rețea este la fel de periculoasă ca și o atingere directă unipolară, caz în care singurul element ce poate asigura protecția împotriva electrocutării este echipamentul individual de protecție și/sau existența unei pardoseli electroizolante, de bună calitate.
- observațiile anterioare rămân perfect valabile și în cazul rețelelor de curent alternativ de mai mare extindere, atunci când componenta capacitivă a curentului are o pondere semnificativă în curentul total care se închide prin corp.

3.2.2. Rețele electrice trifazate izolate față de pământ

În cazul rețelelor trifazate izolate față de pământ, schema electrică echivalentă corespunzătoare unei atingeri indirecte este de forma celei prezentate în figura 3.9.

Pentru a simplifica abordarea analitică, schema electrică echivalentă corespunde situației în care poate fi neglijată capacitatea transversală a rețelei, fiind luată în considerare doar rezistența de izolație ale acesteia în raport cu pământul. Se consideră că omul atinge, simultan cu carcasa echipamentului defect, un punct din zona de potențial nul, iar rezistența de izolație se consideră, de asemenea, în raport cu pământul de referință. R_{def} reprezintă rezistența defectului, R_p rezistența instalației de legare la pământ de protecție, iar R_{iz} este rezistența de izolație a fazelor sănătoase în raport cu pământul.

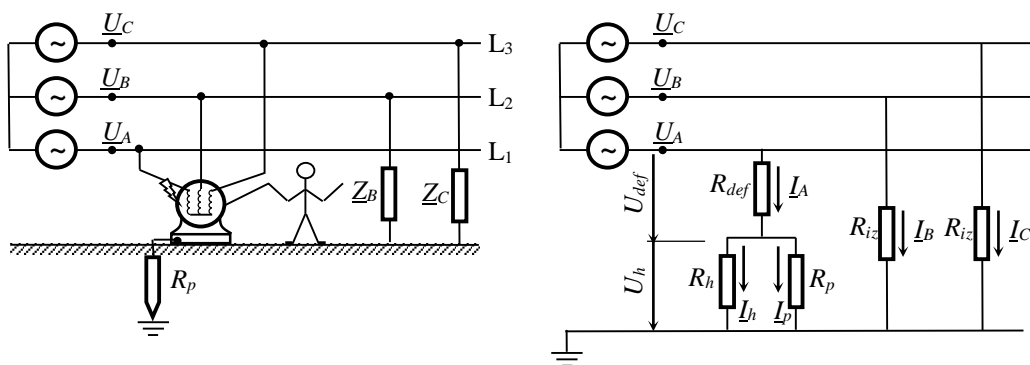


Fig. 3.9. Schema electrică echivalentă la atingere indirectă într-o rețea trifazată, de mică extindere, având neutrul izolat

Electrosecuritate

Dacă rețeaua trifazată se consideră simetrică și este alimentată cu un sistem echilibrat de tensiuni, atunci, în regimul permanent de defect și în condițiile în care omul este intercalat în circuit prin atingere indirectă, poate fi scris următorul sistem de ecuații, care va permite determinarea intensității curentului de fază, în circuitul în care este intercalat omul:

$$\begin{cases} \underline{U}_A - \underline{U}_B = R_{ech} \cdot \underline{I}_A - R_{iz} \cdot \underline{I}_B \\ \underline{U}_A - \underline{U}_C = R_{ech} \cdot \underline{I}_A - R_{iz} \cdot \underline{I}_{CB} , \\ \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \end{cases} \quad (3.51)$$

în care rezistența echivalentă a circuitului de pe faza A este dată de relația:

$$R_{ech} = R_{def} + \frac{R_h \cdot R_p}{R_h + R_p} . \quad (3.52)$$

Sistemul (3.51) se rezolvă prin metoda substituției, rezultând relațiile de calcul ale curenților de fază ai fazelor sănătoase, sub forma:

$$\underline{I}_B = \frac{R_{ech} \cdot \underline{I}_A + \underline{U}_B - \underline{U}_A}{R_{iz}} \quad \text{și} \quad \underline{I}_C = \frac{R_{ech} \cdot \underline{I}_A + \underline{U}_C - \underline{U}_A}{R_{iz}} , \quad (3.53)$$

și a curentului de fază al fazei cu defect:

$$\underline{I}_A = \frac{3 \cdot \underline{U}_A}{R_{iz} + 2 \cdot R_{ech}} \quad \text{sau} \quad I_A = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{R_{iz} + 2 \cdot R_{ech}} , \quad (3.54)$$

în care U reprezintă tensiunea de linie a rețelei trifazate considerate.

Deoarece tensiunea accidentală are aceeași valoare, atât la nivelul omului, cât și la nivelul instalației de legare la pământ de protecție, rezultă că intensitățile celor doi curenți din ramurile circuitului de defect se află în relația:

$$U_h = R_h \cdot I_h = R_p \cdot I_p \Rightarrow I_p = \frac{R_h}{R_p} \cdot I_h . \quad (3.55)$$

Dacă se aplică legea I a lui Kirchhoff în circuitul cu defect și se utilizează și relația (3.55), se obține relația de calcul a intensității curentului ce se închide prin om:

$$I_h = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{R_p}{(R_{iz} + R_{def}) \cdot (R_h + R_p) + R_h \cdot R_p} . \quad (3.56)$$

În situația ce mai defavorabilă, a defectului metalic ($R_{def} = 0$), relația (3.56) devine de forma:

Electrosecuritate

$$I_h = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{R_p}{R_{iz} \cdot (R_h + R_p) + R_h \cdot R_p}, \quad (3.57)$$

Dacă instalația de legare la pământ de protecție este corect dimensionată și nu a suferit deteriorări, atunci rezistența totală a acesteia este mult mai mică decât rezistența corpului uman, astfel încât relația (3.57) poate fi scrisă sub forma:

$$I_h = \sqrt{3} \cdot U \cdot \frac{R_p}{R_{iz} \cdot R_h}, \quad (3.58)$$

relație valabilă în condițiile în care rezistența de izolație a fazelor sănătoase se încadrează în limitele normale de exploatare.

Exemplu numeric:

Astfel, dacă se presupune că defectul se produce într-o rețea având tensiunea nominală de 0,4 kV, în condițiile în care rezistența de izolație a fazelor sănătoase ale rețelei este de ordinul a 20 kΩ, o instalație de legare la pământ de protecție având rezistența totală de 4 Ω limitează curentul prin corpul uman la valori de ordinul zecilor de μA, valori mult inferioare celor ce pot fi sesizate de către om.

Dacă, în schimb, instalația de legare la pământ de protecție este întreruptă, intensitatea curentului ce se stabilește prin om se calculează cu relația:

$$I_h = \frac{\sqrt{3} \cdot U}{R_{iz} + R_h}, \quad (3.59)$$

atingerea indirectă fiind similară atingerii directe, în astfel de rețele.

CONCLUZII:

- *efectul de limitare a curentului prin corpul uman într-o astfel de rețea este mai important decât în cazul atingerii directe;*
- *în condițiile în care rezistența de izolație a fazelor sănătoase se încadrează în limitele normale de exploatare intensitatea curentului prin corpul uman este limitată la valori de ordinul zecilor de μA, practic insesizabile;*
- *acesta este motivul pentru care utilizarea surselor cu neutrul izolat față de pământ se poate constitui într-un mijloc de protecție de bază împotriva electrocutării în cazul utilajelor portabile.*
- *dacă instalația de legare la pământ de protecție este întreruptă atingerea indirectă devine similară atingerii directe.*

3.2.3. Rețele electrice simple legate la pământ

În cazul rețelelor simple legate la pământ, schema electrică echivalentă corespunzătoare unei atingeri indirecte este de forma celei prezentate în figura 3.10. Ca și în figura 3.10, R_{def} reprezintă rezistența defectului, R_p rezistența instalației de legare la pământ de protecție, iar R_l este rezistența de izolație a fazei în raport cu pământul. R_0 este rezistența instalației de legare la pământ de exploatare.

Schema electrică echivalentă este valabilă pentru cazul când omul atinge, simultan cu carcasa echipamentului defect, un punct din zona de potențial nul, iar rezistența de izolație se consideră, de asemenea, în raport cu pământul de referință.

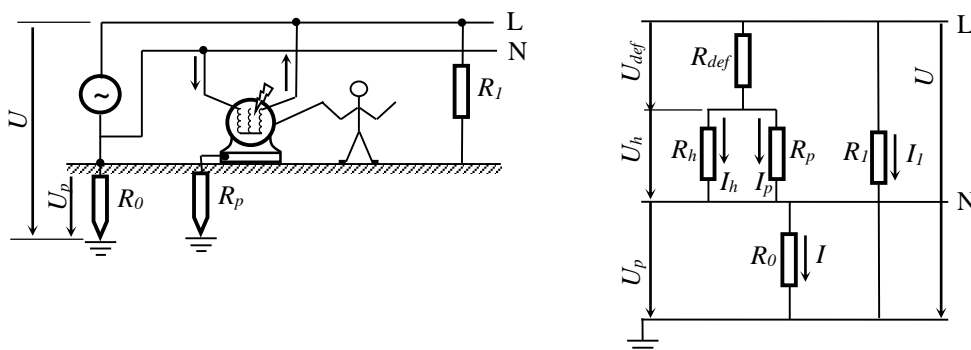


Fig. 3.10. Schema electrică echivalentă la atingere indirectă într-o rețea simplă, de mică extindere, având neutrul legat la pământ

Calculul pot fi efectuate la fel ca și în cazul anterior, al rețelei simple izolate față de pământ, însă din schema echivalentă redată în figura 3.10 rezultă, cu evidentă, că rezistența corpului uman este șuntată de rezistența mult mai mică a instalației de legare la pământ de protecție. Deci, dacă acest sistem de protecție este corect dimensionat și perfect funcțional, atingerea indirectă este mult mai puțin periculoasă decât atingerea directă, datorită rapidei deconectări a rețelei.

Întreruperea legăturii la instalația de legare la pământ de protecție, în condițiile cele mai defavorabile ale defectului metalic ($R_{def} = 0$), face ca intensitatea curentului prin corpul uman, la atingere indirectă, să fie la fel de mare cu aceea corespunzătoare atingerii directe. Practic, în absența unei pardoseli electroizolante ($R_l = 0$) și la tensiunea uzuală din rețelele de furnizare a energiei electrice, curentul care se închide prin corpul uman se încadrează în domeniul curenților mortali.

3.2.4. Rețele electrice trifazate legate la pământ

În cazul rețelelor trifazate având neutrul legat la pământ, schema electrică echivalentă corespunzătoare unei atingeri indirecte este de forma celei prezentate în figura 3.11.

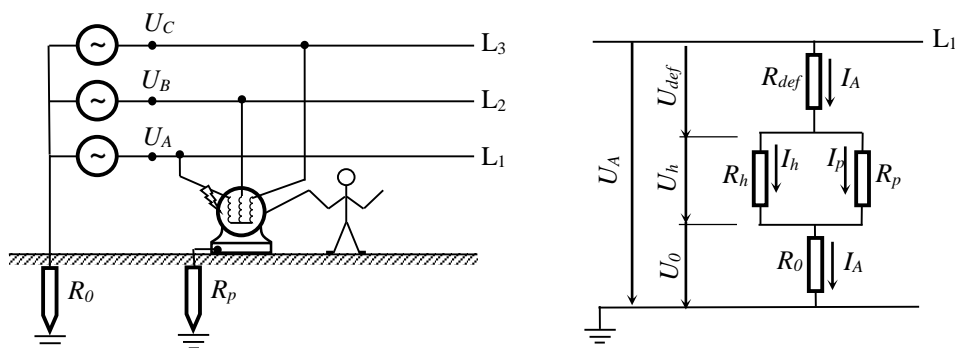


Fig. 3.11. Schema electrică echivalentă la atingere indirectă într-o rețea trifazată, de mică extindere, având neutrul direct legat la pământ

Ca și în cazul rețelelor trifazate izolate față de pământ, pentru a simplifica abordarea analitică, rețeaua considerată este de extindere suficient de mică încât să poată fi neglijată capacitatea transversală a acesteia.

Schema echivalentă corespunde situației în care omul atinge, simultan cu carcasa echipamentului defect, un punct din zona de potențial nul. R_{def} reprezintă rezistența defectului, R_p rezistența instalației de legare la pământ de protecție, iar R_0 este rezistența instalației de legare la pământ de exploatare.

La producerea unui defect de izolație, intensitatea curentului prin circuitul cu defect, circuit în care intră și conductorul electrobiologic, este dată de legea lui Ohm:

$$I_A = \frac{U_A}{R_{ech}}, \quad (3.60)$$

în care rezistența echivalentă a circuitului, R_{ech} , este:

$$R_{ech} = R_{def} + R_0 + \frac{R_p \cdot R_h}{R_p + R_h}. \quad (3.61)$$

Deoarece căderea de tensiune pe corpul uman și pe instalația de legare la pământ de protecție este aceeași, rezultă că relația dintre curenții corespunzători celor două ramuri ale circuitului este de forma:

Electrosecuritate

$$U_h = R_h \cdot I_h = R_p \cdot I_p \Rightarrow I_p = \frac{R_h}{R_p} \cdot I_h. \quad (3.62)$$

Conform legii I a lui Kirchoff,

$$I_A = I_h + I_p, \quad (3.63)$$

și utilizând relația (3.62) se obține relația de calcul a curentului prin corpul uman:

$$I_h = U_A \cdot \frac{R_p}{R_0 \cdot (R_p + R_h) + R_p \cdot R_h}. \quad (3.64)$$

Dacă instalația de legare la pământ de protecție este corespunzător proiectată și în stare normală de funcționare, atunci $R_p \ll R_h$, relația (3.64) devenind de forma:

$$I_h = U_A \cdot \frac{R_p}{R_h \cdot (R_p + R_0)}, \quad (3.65)$$

și dacă și instalația de legare la pământ de exploatare este perfect funcțională ($R_0 \approx R_p$), relația de calcul a curentului prin corpul uman este:

$$I_h = \frac{U_A}{2 \cdot R_h}. \quad (3.66)$$

Exemplu numeric:

*Într-o rețea uzuală de joasă tensiune, având $U_A = 230$ V, atingerea indirectă a carcasei unui echipament la care s-a produs un defect metalic poate determina circulația prin corpul uman a unui curent de **38 mA**, mai mare decât curentul nepericulos de 10 mA.*

Pe de altă parte gravitatea electrocutării depinde atât de intensitatea curentului cât și de durata de trecere a acestuia prin corpul uman. Ori, realizarea instalației de legare la pământ de protecție crează o cale de circulație a unui curent intens, care să determine deconectarea rapidă a zonei de rețea cu defect, de către elementele de protecție la supracurenți, instalate în rețea. Astfel, pentru schema echivalentă din figura 3.11 și în cazul particular al defectului metalic, rezultă expresia:

$$I_p = I_A - I_h = U_A \cdot \frac{R_h - R_p}{R_h \cdot (R_0 + R_p)} \approx \frac{U_A}{R_0 + R_p}. \quad (3.67)$$

*Pentru aceeași rețea de joasă tensiune, dacă rezistențele instalațiilor de legare la pământ de exploatare și de protecție sunt de **4 Ω**, rezultă o intensitate a curentului prin instalația de legare la pământ de protecție de **28,75 A**.*

Electrosecuritate

Față de cele arătate anterior, trebuie menționat faptul că, de obicei, omul nu atinge simultan echipamentul defect și un element aflat în contact cu zona de potențial nul, în circuit intercalându-se rezistențele unor elemente de mai mică conductivitate. În aceste condiții, curentul prin corpul uman poate fi nepericulos chiar și atunci când deconectarea nu este foarte rapidă.

CONCLUZII:

- *intensitatea curentului prin corpul uman în cazul atingerii indirecte într-o astfel de rețea poate depăși valoarea curentului nepericulos, chiar și atunci când instalația de legare la pământ este corect proiectată și stare normală de funcționare;*
- *cu toate acestea, intensitatea curentului ce se închide prin instalația de legare la pământ este mult mai mare decât curentul ce se închide prin corpul uman, conducând astfel la funcționarea protecției la supracurent ce va întrerupe alimentarea circuitului într-un timp foarte scurt.*
- *în aceste condiții dimensionarea și reglarea corectă a protecției la supracurent are o importanță vitală;*
- *situația întreruperii legăturii la pământ de protecție este foarte periculoasă, curentul ce va parcurge corpul uman într-o astfel de situație fiind mai mare decât cel admisibil, insuficient însă pentru a determina și deconectarea circuitului.*