

ALGORITMI ȘI PROGRAME DE CALCUL DESTINATE ANALIZEI REGIMURILOR PERMANENTE SIMETRICE DE FUNCȚIONARE ALE SISTEMELOR DE DISTRIBUȚIE FOLOSIND METODELE SEIDEL – GAUSS ȘI NEWTON - RAPHSON

1. Introducere

Analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare reprezintă o componentă indispensabilă în activitățile de exploatare și de planificare a dezvoltării, atât pentru sistemele de distribuție a energiei electrice, cât și a sistemelor electroenergetice. Aceste sisteme se disting prin anumite trăsături specifice, care le deosebesc net de alte sectoare de producție și anume:

- Simultaneitatea producției și consumului de energie electrică, deoarece energia electrică nu poate fi stocată în cantități mari, iar controlul producției trebuie să se adapteze permanent variațiilor cererii de consum.
- Sensibilitatea la perturbații, deoarece orice perturbație apărută într-un anumit loc se propagă, practic, instantaneu, în întreg sistemul, reacționând în funcție de natura, locul și amplitudinea perturbației.
- Avariile grave apărute în aceste sisteme pot conduce la pagube majore, atât la nivelul consumatorilor alimentați, cât și la nivelul economiei naționale.

Calculul regimurilor permanente de funcționare ale sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv ale sistemului electroenergetic, constituie practic punctul de plecare în orice analiză de sistem, fie pentru optimizarea regimurilor permanente de funcționare ale acestora, fie pentru calculul regimurilor perturbatoare.

Analiza regimurilor perturbatoare permanente de funcționare ale acestor sisteme constituie o problemă de mare complexitate, care face apel tot mai mult la concepte și metode dezvoltate de teoria generală a sistemelor și la tehnologii perfecționate de transmitere și prelucrare a informațiilor. Orice analiză de regim are la bază elaborarea modelelor matematice ale fenomenelor studiate, modele de mari dimensiuni și, în general, neliniare, a căror soluționare nu este posibilă fără mijloace adecvate de calcul automat. Evoluția sistemelor de calcul automat, în ultimele decenii, spre performanțe deosebite privind capacitatea de memorie și viteza de calcul, a influențat direct perfecționarea metodelor și algoritmilor de calcul și a impulsionat, în mod deosebit, implementarea conducerii în timp real a proceselor din sistemele de distribuție a energiei electrice, respectiv din sistemul electroenergetic.

Studiul regimurilor permanente simetrice de funcționare poate fi definit ca o analiză a rețelelor electrice trifazate din cadrul sistemelor de distribuție a energiei electrice, în care, fiind cunoscute datele rețelei electrice – impedanțele longitudinale și admitanțele transversale ale laturilor și puterile aparente complexe nodale – se determină parametrii de stare ai regimului permanent analizat și anume tensiunile nodale, în modul și argument. Odată cunoscute valorile tensiunilor nodale, se pot stabili circulațiile puterilor active și reactive, căderile de tensiune și pierderile de putere, pe diferitele elemente ale sistemului.

Pentru a rezolva această problemă, este necesar să se rezolve relațiile de legătură dintre mărimile electrice specifice laturilor și mărimile electrice specifice la nivelul nodurilor sistemului. Atunci când consumatorii și generatoarele se reprezintă prin puteri active și reactive, situație apropiată de realitate, calculele se complică, deoarece relațiile între mărimile electrice sunt neliniare. Utilizarea ecuațiilor sau sistemelor de funcționare în regim permanent simetric ale instalațiilor de transport și

distribuție a energiei electrice, deși sunt totdeauna neliniare, iar rezolvarea lor este mai dificilă, corespunde modului de raționament și experienței energeticienilor.

Algoritmul de calcul al regimului permanent de funcționare a sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv sistemului electroenergetic, cuprinde, în ansamblu, o succesiune de etape individualizate în funcție de mai mulți factori, cum ar fi: modelul matematic de regim permanent, metoda numerică de rezolvare, posibilitățile sistemului de calcul automat etc.

În vederea rezolvării sistemelor de ecuații neliniare, care descriu funcționarea sistemelor de distribuție a energiei electrice, se folosesc, de regulă, *metode iterative* ce permit obținerea soluțiilor (mărimile de stare) după efectuarea unui număr nedeterminat de operații, prin pași succesivi, apropiind rezultatul de valoarea finală. Din această categorie fac parte metodele de tip Seidel-Gauss și metodele de tip Newton-Raphson.

Modelul matematic de regim permanent fiind neliniar poate admite mai multe soluții. Soluția care prezintă interes practic se află, de regulă, într-un domeniu de valori, relativ restrâns, al necunoscutelor. Valorile tensiunilor nodale, în modul, sunt cuprinse într-o bandă admisibilă de tensiune, în jurul tensiunii nominale, iar argumentele au, de regulă, valori mici, apropiate de zero. Din acest motiv, o soluție convenabilă, de primă aproximație, se adoptă atribuind modulelor tensiunilor nodale valorile nominale sau medii și argumentelor, valoarea zero. În programele de calcul, în principiu, prima atribuire pentru soluția de primă aproximație se execută odată cu introducerea datelor nodale.

2. Metoda Seidel-Gauss

Primele programe de calcul automat destinate analizei regimurilor permanente de funcționare ale sistemelor datează din perioada anilor '50, având la bază metodele numerice iterative Jacobi, Seidel-Gauss și variante ale acestora. Metodele menționate au fost preferate datorită simplității algoritmilor, fiind, în același timp, adecvate performanțelor scăzute ale sistemelor de calcul existente în acea perioadă.

Metoda Seidel-Gauss s-a dovedit, însă, mai avantajoasă decât metoda Jacobi, în ceea ce privește viteza de convergență. Metoda Newton, prin convergența sa rapidă, este mult superioară metodei Seidel-Gauss și constituie, în prezent, principala metodă pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv ale sistemelor electroenergetice. Totuși, metoda Seidel-Gauss este utilizată și astăzi, în special la calculul regimurilor mai dificile, apropiate de limita stabilității la mici perturbații sau ca metodă de start la aplicarea algoritmului Newton.

Metodele numerice de rezolvare a sistemelor de ecuații neliniare (1) sunt, de regulă, metode iterative. Acestea folosesc o succesiune de aproximări liniare ale funcției F , respectiv $F_i, i = \overline{1, m}$ și, pentru fiecare iterație, aproximația vectorului necunoscutelor x , respectiv $x_i, i = \overline{1, m}$ se obține prin rezolvarea unui sistem liniar, operație ce se poate realiza cu ajutorul unor metode directe.

$$F(x) = 0$$

sau

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, \quad i = \overline{1, m} \quad (1)$$

Metoda Seidel-Gauss se pot aplica, în anumite condiții, și pentru rezolvarea sistemelor neliniare. În acest scop, este necesar ca sistemul (1) să poată fi scris sub următoarea formă:

$$x = G(x)$$

sau

$$x_i = G_i(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad x_i = \overline{1, m} \quad (2)$$

unde funcția G și componentele sale G_i se definesc și au aceleași proprietăți ca funcțiile F și F_i .

Folosind metoda Seidel-Gauss la calculul aproximației $x^{(p)}$ în iterația p , fiecare componentă $x_i^{(p)}$ odată calculată se introduce în ecuațiile următoare, conform modelului:

$$\begin{cases} x_1^{(p)} = g_1(x_1^{(p-1)}, x_2^{(p-1)}, \dots, x_m^{(p-1)}) \\ x_2^{(p)} = g_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p-1)}, \dots, x_m^{(p-1)}) \\ \vdots \\ x_m^{(p)} = g_m(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_{m-1}^{(p)}, x_m^{(p-1)}) \end{cases} \quad (3)$$

În scopul accelerării convergenței, metoda Seidel-Gauss se poate combina cu o metodă de relaxare. La calculul regimului permanent de funcționare a rețelelor electrice, procedeele de accelerare a convergenței sunt eficiente numai dacă șirul $\{x^{(p)}\}$ este monoton.

Pentru analiza regimului permanent de funcționare a rețelelor electrice, sistemul neliniar de ecuații nodale poate fi adus, fără dificultăți, la următoarea formă recurentă:

$$\underline{U}_i = \frac{I}{\underline{Y}_{ii}} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k + \frac{P_i - jQ_i}{\underline{U}_i^*} \right), \quad i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (4)$$

În cazul utilizării metodei Seidel-Gauss, tensiunile nodale corespunzătoare nodurilor independente într-o iterație $p + 1$, ce urmează iterației p , se calculează cu ajutorul unei formule de iterare având forma următoare:

$$\underline{U}_i^{(p+1)} = \frac{I}{\underline{Y}_{ii}} \left(\sum_{k=1}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} + \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} + \frac{P_i - jQ_i^{(p)}}{\underline{U}_i^{(p)*}} \right), \quad i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (5)$$

În vederea reducerii timpului de calcul, se folosesc relații de accelerare a procesului de convergență, care sunt de forma:

$$\underline{U}_i^{(p+1)} \leftarrow \underline{U}_i^{(p)} + \omega (\underline{U}_i^{(p+1)} - \underline{U}_i^{(p)}), \quad i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (6)$$

unde ω este un coeficient de accelerare a convergenței, a cărui valoare depinde de numărul de noduri și de topologia rețelei analizate ($\omega = 1,4 \div 1,8$). Se recomandă ca la primele iterații coeficientul de accelerare ω să fie egal cu 1, până când valorile tensiunilor intră în zona normală. În continuare, ω se adoptă diferit de 1. La aplicarea corecțiilor (6), se recomandă, în literatura de specialitate, testarea prealabilă a monotoniei șirului de aproximație.

Algoritmul iterativ Seidel-Gauss este simplu de programat și solicită un volum mic de memorie a sistemului de calcul utilizat, deoarece nu recurge la prelucrări de matrice. Prezintă, însă, dezavantajul că este puternic influențat de adoptarea unei aproximații inițiale, cât mai apropiată de soluția căutată și de o viteză mică a procesului de convergență.

Pentru o rețea electrică care conține $N = n - 1$ noduri, dintre care n_{PQ} sunt de tip PQ , n_{PU} sunt de tip PU , iar e este numărul nodului de echilibru ($N = n_{PQ} + n_{PU} = n - 1$) și considerând tensiunea

nodului de echilibru o mărime reală fixată $\underline{U}_e = U_e |0$, se prezintă, în cele ce urmează, algoritmul metodei Seidel-Gauss, care cuprinde următoarele etape:

1. Citirea datelor de intrare (date generale, date nodale și date laturi).
2. Formarea matricei admitanțelor nodale $[\underline{Y}_n]$.
3. Inițializarea procesului iterativ.
 - 3.1 Stabilirea indicelui curent al iterației $p = 0$.
 - 3.2 Stabilirea valorilor inițiale ale tensiunilor nodale:

$$\underline{U}_i^{(0)}, i = \overline{1, n}, i \neq e$$

4. Calculul puterii aparente în nodul de echilibru, folosind valorile inițiale ale tensiunilor nodale:

$$\underline{S}_e^{init} = \underline{S}_e^{(0)} = U_e^2 \underline{Y}_{ee}^* - \underline{U}_e \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq e}}^n \underline{Y}_{ek}^* \underline{U}_k^{(0)*}$$

5. Inițializarea numărului curent al nodurilor: $i = 1$.
6. Dacă nodul i este nod de echilibru ($i = e$), se trece la pasul 11.
7. Dacă nodul i este de tip consumator, se trece la pasul 9.
8. Tratarea nodurilor de tip PU :

- 8.1 Corectarea modulului tensiunii \underline{U}_i :

$$\underline{U}_i^{cor} = \frac{U_i^{impus}}{U_i^{(p)}} \underline{U}_i^{(p)}$$

- 8.2 Calculul puterii reactive în nodul i :

$$Q_i^{(p)} = \text{Im} \left\{ \left(\underline{U}_i^{cor} \right)^2 \underline{Y}_{ii}^* - \underline{U}_i^{cor} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i, e}}^{i-1} \underline{Y}_{ik}^* \underline{U}_k^{(p+1)*} - \underline{U}_i^{cor} \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \neq i, e}}^n \underline{Y}_{ik}^* \underline{U}_k^{(p)*} \right\}$$

- 8.3 Dacă $Q_i^{min} \leq Q_i^{(p)} \leq Q_i^{max}$, pentru nodul i se stabilește $\underline{U}_i^{(p)} = \underline{U}_i^{cor}$ și se trece la pasul 8.7.
- 8.4 Dacă $Q_i^{(p)} < Q_i^{min}$, se stabilește $Q_i^{(p)} = Q_i^{min}$ și se trece la pasul 8.6.
- 8.5 Dacă $Q_i^{(p)} > Q_i^{max}$, se stabilește $Q_i^{(p)} = Q_i^{max}$ și se trece la pasul 8.6.
- 8.6 Se consideră nodul i fiind de tip consumator, cu tensiunea nodală $\underline{U}_i^{(p)}$ necorectată.
- 8.7 Puterea aparentă la nodul i este de forma:

$$\underline{S}_i^{(p)} = P_i + jQ_i^{(p)}$$

9. Determinarea tensiunii nodului i , cu relația:

$$\underline{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\underline{Y}_{ii}} \left(\sum_{k=1}^{i-1} \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k^{(p+1)} + \sum_{k=i+1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k^{(p)} + \frac{P_i - jQ_i^{(p)}}{\underline{U}_i^{(p)*}} \right)$$

10. Accelerarea procesului iterativ de convergență, prin folosirea corecțiilor:

$$\underline{U}_i^{(p+1)} \leftarrow \underline{U}_i^{(p)} + \omega \left(\underline{U}_i^{(p+1)} - \underline{U}_i^{(p)} \right)$$

11. Dacă $i < n$, se stabilește $i = i + 1$ și se revine la pasul 6.
12. Calculul puterii aparente în nodul de echilibru, folosind valorile tensiunilor nodale din iterația $p + 1$:

$$\underline{S}_e^{final} = \underline{S}_e^{(p+1)} = U_e^2 \underline{Y}_{ee}^* - \underline{U}_e \sum_{k \neq e}^n \underline{Y}_{ek}^* \underline{U}_k^{(p+1)*}$$

13. Dacă $|\underline{S}_e^{final} - \underline{S}_e^{init}| \leq \varepsilon$, se trece la pasul 15.
14. Se stabilește $\underline{S}_e^{init} = \underline{S}_e^{final}$, se crește cu o unitate indicele curent al iterației ($p = p + 1$) și se trece la pasul 5.

15. Calculul circulațiilor de puteri în laturile rețelei electrice, folosind următoarele relații :
 - pentru laturile care conțin linii :

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= U_i^2 \underline{y}_{ik_0}^* + \underline{U}_i (\underline{U}_k - \underline{U}_i)^* \underline{y}_{ik}^* \\ \underline{S}_{ki} &= U_k^2 \underline{y}_{ki_0}^* + \underline{U}_k (\underline{U}_i - \underline{U}_k)^* \underline{y}_{ik}^* \end{aligned}$$

- pentru laturile ce conțin transformatoare cu reglaj longitudinal și raport real de transformare:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= \underline{U}_i [(\underline{U}_k - N_{i'i} \underline{U}_i) \underline{Y}_{ik}]^* \\ \underline{S}_{ki} &= \underline{U}_k [(\underline{U}_i - \underline{U}_k / N_{i'i}) \underline{Y}_{ik}]^* \end{aligned}$$

- pentru laturile care conțin transformatoare cu reglaj longo-transversal și raport complex de transformare :

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= \underline{U}_i [(\underline{U}_k - N_{i'i} \underline{U}_i) \underline{Y}_{ik}]^* \\ \underline{S}_{ki} &= \underline{U}_k [(\underline{U}_i - \underline{U}_k / N_{i'i}) \underline{Y}_{ki}]^* \end{aligned}$$

16. Calculul pierderilor de putere activă și reactivă pe laturile rețelei, ca sumă a circulațiilor de puteri de la extremitățile laturii, cu ajutorul următoarei relații :

$$\Delta \underline{S}_{ik} = \Delta P_{ik} + j \Delta Q_{ik} = \underline{S}_{ik} + \underline{S}_{ki}$$

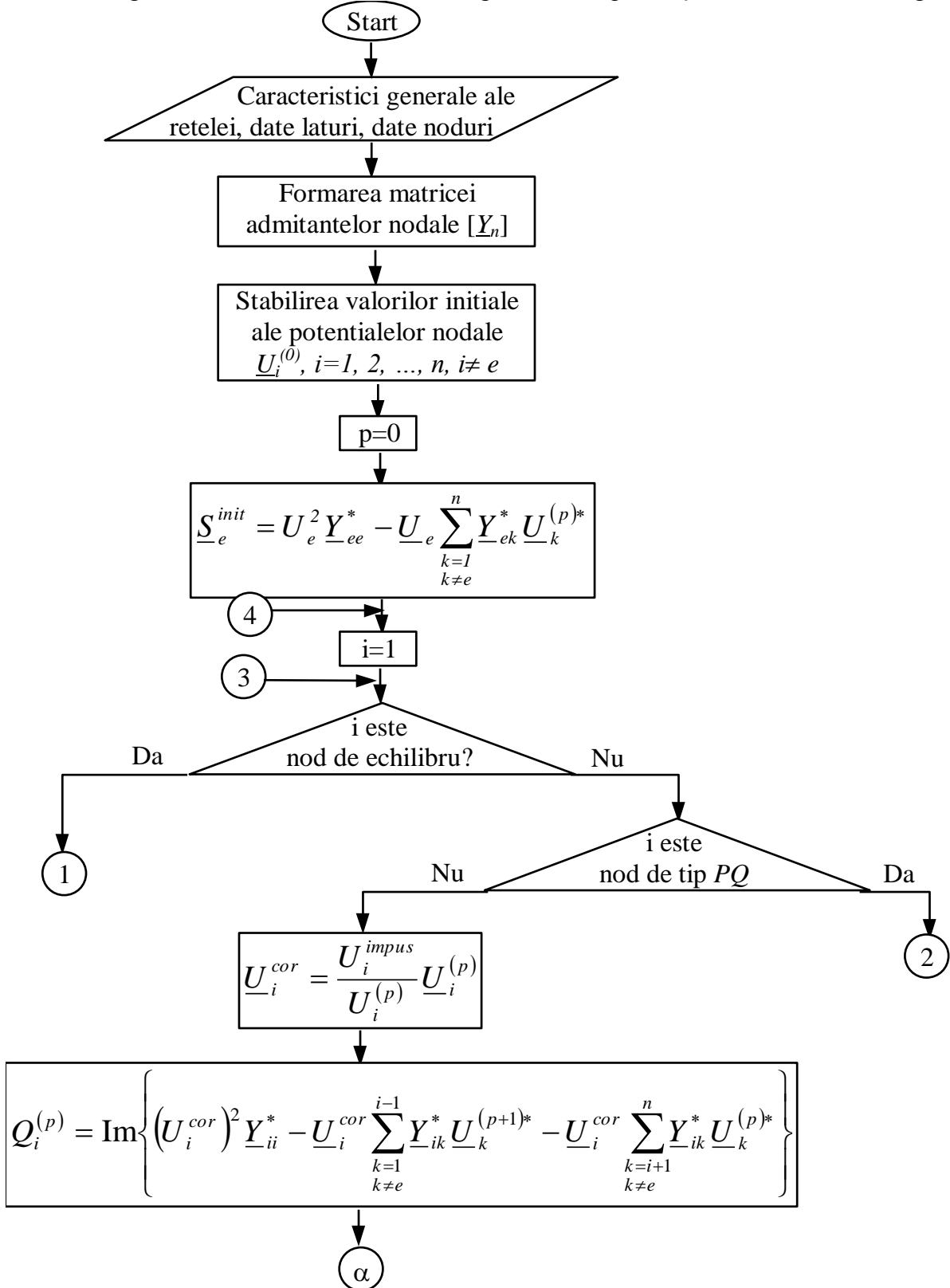
17. Tipărirea rezultatelor calculului de regim permanent.

Schema logică pentru calculul regimului permanent într-o rețea electrică, care aparține sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv sistemului electroenergetic, folosind metoda Seidel-Gauss, este prezentată în Figura 1. Datele de intrare, constituite din datele generale, datele nodale și datele laturilor, au aceeași structură cu cele prezentate în cadrul metodei tensiunilor nodale.

În situația când formarea și soluționarea iterativă a modelului de regim permanent al sistemelor, folosind metoda Seidel-Gauss, din care rezultă, cu o precizie impusă, necunoscutele de bază și anume tensiunile nodale în modul și argument, numărul iterațiilor necesare, în condiții de precizie rezonabilă, crește odată cu dimensiunea problemei analizate. În plus, trebuie făcută mențiunea că, în ce privește convergența calculelor de regim permanent, aceasta este influențată negativ de restricțiile impuse necunoscutelor, care rezultă din modul de tratare a nodurilor de tip PU sau a nodurilor de tip PQ, cu tensiune reglată. Convergența procesului de calcul iterativ este influențată, în cazul utilizării acestei metode, și de alți factori, cum sunt topologia rețelei analizate și modul de alegere a nodului de echilibru. Astfel, numărul de iterații este mai mare în cazul unei rețele slab

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

buclate. De asemenea, dacă există mai multe variante sau posibilități de alegere a nodului de echilibru, se recomandă alegerea nodului cu cele mai multe legături, în scopul creșterii vitezei de convergență.



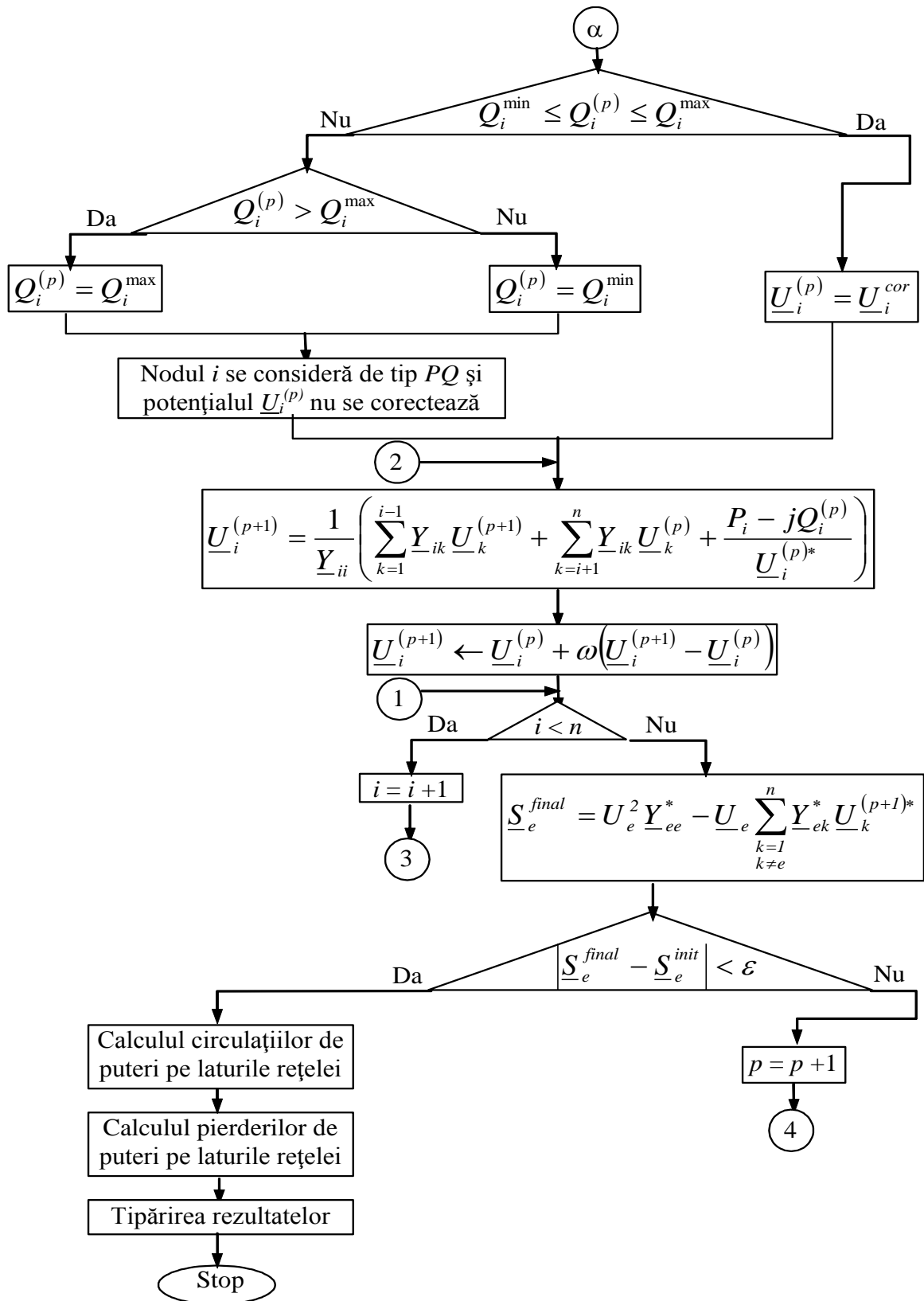


Figura 1 Schema logică de calcul a regimului permanent prin metoda Seidel-Gauss

3. Metoda Newton-Raphson

Metoda Newton-Raphson, prin convergența sa rapidă privind procesul de calcul, este mult superioară metodei Seidel-Gauss și constituie, în prezent, principala metodă utilizată pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv ale sistemelor electroenergetice. Deși solicită mai mult memoria sistemelor de calcul și necesită, în cadrul unei iterații, un volum mai mare de operații, metoda Newton-Raphson s-a impus datorită unor avantaje deosebite, dintre care se pot menționa: viteza rapidă de convergență a procesului iterativ de calcul determină un timp de calcul redus; numărul de iterații necesar a fi efectuate nu depinde de dimensiunea sistemului și nu este influențat de alegerea nodului de echilibru.

Principala trăsătură caracteristică a metodelor de tip Newton-Raphson, care le deosebește de restul metodelor destinate rezolvării sistemelor de ecuații neliniare, în particular, a sistemelor de ecuații neliniare care caracterizează regimul permanent de funcționare al rețelelor electrice, o reprezintă utilizarea derivatelor parțiale ale funcțiilor F_i , $i = \overline{1, n}$ ce definesc problema analizată. Cel mai frecvent se folosesc numai derivatele parțiale de ordinul întâi. Variantele în care se utilizează și derivatele parțiale de ordin superior sunt, de regulă, mai rar folosite, datorită volumului mare de calcule pe care le necesită.

Metodele de tip Newton-Raphson sunt destinate rezolvării sistemelor de ecuații neliniare, având următoarea formă:

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots \\ F_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Pornind de la o aproximație inițială $x^{(p)} = \{x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}\}$, se urmărește determinarea corecțiilor $\Delta x^{(p)} = \{\Delta x_1^{(p)}, \Delta x_2^{(p)}, \dots, \Delta x_n^{(p)}\}$ care, aplicate aproximației inițiale, conduc la stabilirea soluției exacte: $x^{(p+1)} = \{x_1^{(p)} + \Delta x_1^{(p)}, x_2^{(p)} + \Delta x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)} + \Delta x_n^{(p)}\}$.

În aceste condiții, sistemul de ecuații neliniare (7) capătă forma următoare:

$$\begin{cases} F_1(x_1^{(p)} + \Delta x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)} + \Delta x_n^{(p)}) = 0 \\ F_2(x_1^{(p)} + \Delta x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)} + \Delta x_n^{(p)}) = 0 \\ \dots \\ F_n(x_1^{(p)} + \Delta x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)} + \Delta x_n^{(p)}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Prin liniarizarea sistemului de ecuații (8), se obține:

$$\begin{cases} F_1(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) + \frac{\partial F_1}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_1}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} = 0 \\ F_2(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) + \frac{\partial F_2}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_2}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} = 0 \\ \dots \\ F_n(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) + \frac{\partial F_n}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_n}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

sau :

$$\begin{cases} -F_1(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) = \frac{\partial F_1}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_1}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} \\ -F_2(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) = \frac{\partial F_2}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_2}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} \\ \dots \\ -F_n(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) = \frac{\partial F_n}{\partial x_1}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_1^{(p)} + \dots + \frac{\partial F_n}{\partial x_n}(x_1^{(p)}, \dots, x_n^{(p)})\Delta x_n^{(p)} \end{cases} \quad (10)$$

Sistemul de ecuații (10) se poate scrie compact sub formă matriceală, astfel:

$$[-F^{(p)}] = [J^{(p)}] \cdot [\Delta x^{(p)}] \quad (11)$$

unde $[J^{(p)}]$ reprezintă Jacobianul sistemului de ecuații și are următoarea formă:

$$[J^{(p)}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x_1} & \frac{\partial F_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Prin rezolvarea sistemului de ecuații liniare (11), se determină corecțiile $\Delta x^{(p)} = \{\Delta x_1^{(p)}, \Delta x_2^{(p)}, \dots, \Delta x_n^{(p)}\}$ și soluția $x^{(p+1)} = \{x_1^{(p)} + \Delta x_1^{(p)}, x_2^{(p)} + \Delta x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)} + \Delta x_n^{(p)}\}$. Datorită neglijării termenilor de rang superior în liniarizarea (9), $x^{(p+1)}$ nu mai reprezintă soluția exactă, ci o nouă aproximație, în principiu, mai bună decât $x^{(p)}$. Calculul continuă cu determinarea unei noi corecții $\Delta x^{(p+1)}$ și a unei noi aproximații $x^{(p+2)}$, procesul repetându-se iterativ până când corecțiile Δx devin suficient de mici.

În cazul calculului regimurilor permanente de funcționare ale sistemelor de distribuție a energiei electrice, respectiv ale sistemelor electroenergetice, sistemul de ecuații neliniare, care caracterizează regimul permanent de funcționare al acestora, se construiește pornind de la bilanțul puterilor aparente nodale, scris sub forma :

$$\underline{S}_i^{impus} - \underline{S}_i(\underline{U}_1, \dots, \underline{U}_n) = \Delta \underline{S}'_i(\underline{U}_1, \dots, \underline{U}_n), i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (13)$$

unde : n - numărul total de noduri din rețea; e - nodul de echilibru.

Prin dezvoltarea în serii Taylor a ecuațiilor neliniare (13) și neglijarea termenilor de rang superior, se obține următorul sistem de ecuații liniare:

$$-\Delta \underline{S}'_i(\underline{U}_1, \dots, \underline{U}_n) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \underline{S}_i}{\partial \underline{U}_k} \Delta \underline{U}_k, i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (14)$$

care are ca necunoscute abaterile tensiunilor nodale $\Delta \underline{U}_i$ ($i = \overline{1, n}, i \neq e$).

Separând părțile reale și imaginare ale abaterilor puterilor nodale: $P_i^{impus} - P_i = -\Delta P_i = \Delta P_i$ și $Q_i^{impus} - Q_i = -\Delta Q_i = \Delta Q_i$ și folosind reprezentarea tensiunilor nodale în varianta polară $\underline{U}_i = U_i e^{j\delta_i}$, sistemul (14) devine de forma:

$$\begin{aligned} \Delta P_i(U_1, \dots, U_n, \delta_1, \dots, \delta_n) &= \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_i}{\partial U_k} \Delta U_k + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k \right), i = \overline{1, n}, i \neq e \\ \Delta Q_i(U_1, \dots, U_n, \delta_1, \dots, \delta_n) &= \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial Q_i}{\partial U_k} \Delta U_k + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k \right), i = \overline{1, n}, i \neq e \end{aligned} \quad (15)$$

Noul sistem de ecuații are ca necunoscute abaterile modulelor, respectiv argumentelor tensiunilor nodale. Pentru nodurile de tip PU se calculează numai abaterile puterilor active.

În vederea simplificării expresiilor elementelor Jacobianului, în ecuațiile (15) derivatele $\partial P_i / \partial U_k$, respectiv $\partial Q_i / \partial U_k$ se înmulțesc, iar abaterile ΔU_k se împart la modulul tensiunii U_k , rezultând un sistem de forma următoare:

$$\begin{aligned} \Delta P_i(U_1, \dots, U_n, \delta_1, \dots, \delta_n) &= \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial P_i}{\partial U_k} U_k \frac{\Delta U_k}{U_k} + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k \right), i = \overline{1, n}, i \neq e \\ \Delta Q_i(U_1, \dots, U_n, \delta_1, \dots, \delta_n) &= \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial Q_i}{\partial U_k} U_k \frac{\Delta U_k}{U_k} + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} \Delta \delta_k \right), i = \overline{1, n}, i \neq e \end{aligned} \quad (16)$$

Pentru noua formă a sistemului de ecuații (16), necunoscutele sunt $\Delta U_i / U_i$ și $\Delta \delta_i$. Acest sistem poate fi scris compact, sub formă matriceală, în felul următor:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \dots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & N_{11} & \dots & H_{1k} & N_{1k} & \dots \\ J_{11} & L_{11} & \dots & J_{1k} & L_{1k} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{k1} & N_{k1} & \dots & H_{kk} & N_{kk} & \dots \\ J_{k1} & L_{k1} & \dots & J_{kk} & L_{kk} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta U_1 / U_1 \\ \dots \\ \Delta \delta_k \\ \Delta U_k / U_k \\ \dots \end{bmatrix} \quad (17)$$

Determinarea elementelor Jacobianului, pentru sistemul de ecuații (17), se realizează plecând de la expresia puterilor aparente nodale, de forma :

$$\underline{S}_i = \underline{U}_i \underline{J}_i^* = \underline{U}_i \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik}^* \underline{U}_k^*, i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (18)$$

Dacă în relația (18) se folosesc notațiile: $\underline{Y}_{ik} = G_{ik} + j B_{ik}$, respectiv $\underline{U}_i = U_i e^{j \delta_i}$, se pot scrie următoarele două expresii alternative pentru puterea aparentă nodală:

$$\underline{S}_i = \sum_{k=1}^n (G_{ik} - j B_{ik}) U_i U_k e^{j(\delta_i - \delta_k)} \quad (19)$$

$$\underline{S}_i = U_i^2 (G_{ii} - j B_{ii}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (G_{ik} - j B_{ik}) U_i U_k [\cos(\delta_i - \delta_k) + j \sin(\delta_i - \delta_k)], i = \overline{1, n}, i \neq e \quad (20)$$

După separarea părților reală și imaginară ale expresiei (20), rezultă expresiile puterilor nodale active și reactive, de forma următoare:

$$\begin{aligned} P_i &= G_{ii} U_i^2 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)], i = \overline{1, n}, i \neq e \\ Q_i &= -B_{ii} U_i^2 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) - G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)], i = \overline{1, n}, i \neq e \end{aligned} \quad (21)$$

Prin derivarea expresiilor (21), corespunzătoare puterilor active și reactive nodale, se obțin elementele Jacobianului având următoarea formă :

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [-B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = -Q_i - B_{ii} U_i^2$$

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = P_i - G_{ii} U_i^2$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} U_i = 2G_{ii} U_i^2 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = P_i + G_{ii} U_i^2$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} U_i = -2B_{ii} U_i^2 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_i U_k [B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) - G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = Q_i - B_{ii} U_i^2$$

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = U_i U_k [B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) - G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)]$$

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = U_i U_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = -N_{ik}$$

$$N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k} U_k = -U_i U_k [G_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + B_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)]$$

$$L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} U_k = U_i U_k [B_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) - G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] = H_{ik}$$

Pentru o rețea electrică care conține $N = n - 1$ noduri, dintre care n_{PQ} sunt de tip PQ , n_{PU} sunt de tip PU , iar e este numărul nodului de echilibru ($N = n_{PQ} + n_{PU} = n - 1$) și considerând tensiunea nodului de echilibru o mărime reală fixată $\underline{U}_e = U_e | \underline{0}$, se prezintă, în cele ce urmează, algoritmul metodei Newton-Raphson, care cuprinde următoarele etape:

1. Citirea datelor de intrare (date generale, date nodale și date laturi).
2. Stabilirea aproximațiilor inițiale pentru tensiunile nodale:

$$\underline{U}_i^{(0)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad i \neq e$$

3. Pentru nodurile de tip PU , se corectează modulul potențialului $\underline{U}_i^{(0)}$, conform valorii impuse:

$$\underline{U}_i^{cor} = \frac{U_i^{impus}}{U_i^{(0)}} \underline{U}_i^{(0)}$$

și se verifică încadrarea puterii reactive între limitele impuse $Q_i^{\min} \leq Q_i^{(0)} \leq Q_i^{\max}$, unde $Q_i^{(0)}$ se calculează cu o relație de forma (21).

- 3.1 Dacă $Q_i^{\min} \leq Q_i^{(0)} \leq Q_i^{\max}$, nodul rămâne nod de tip PU , pentru tensiunea nodală adoptându-se valoarea corectată $\underline{U}_i^{(0)} = \underline{U}_i^{cor}$;
- 3.2 Dacă $Q_i^{(0)} < Q_i^{\min}$, nodul se transformă în nod de tip PQ , cu puterea reactivă $Q_i^{(0)} = Q_i^{\min}$, tensiunea nodală păstrându-și valoarea necorectată $\underline{U}_i^{(0)}$;
- 3.3 Dacă $Q_i^{(0)} > Q_i^{\max}$, nodul se transformă în nod de tip PQ , cu puterea reactivă $Q_i^{(0)} = Q_i^{\max}$, tensiunea nodală păstrându-și valoarea necorectată $\underline{U}_i^{(0)}$;

4. Se calculează puterile active și reactive nodale cu relația (21) și se determină abaterile acestora față de valorile impuse :

$$\begin{cases} \Delta P_i(0) = P_i^{impus} - P_i(0) & i = \overline{1, n}, i \neq e \\ \Delta Q_i(0) = Q_i^{impus} - Q_i(0) & \text{numai pentru noduri de tip PQ} \end{cases}$$

5. Dacă $\Delta P_i^{(0)} < \varepsilon$ și $\Delta Q_i^{(0)} < \varepsilon$ pentru $i = \overline{1, n}, i \neq e$, procesul iterativ de calcul privind potențialele nodale în modul și argument s-a încheiat și se trece la pasul 9.
6. Se calculează elementele Jacobianului.
7. Se rezolvă sistemul de ecuații liniare (17) și se determină corecțiile tensiunilor nodale, sub formă de corecții ale modulelor și argumentelor, pentru nodurile de tip PQ, respectiv corecții ale argumentelor, pentru nodurile de tip PU.
8. Se calculează noile aproximații ale tensiunilor nodale :

$$\begin{cases} U_i(1) = U_i(0) + \Delta U_i(0), i = \overline{1, n}, i \neq e \\ \delta_i(1) = \delta_i(0) + \Delta \delta_i(0), i = \overline{1, n}, i \neq e \end{cases}$$

și procesul de calcul se reia de la pasul 3, folosind ca aproximații inițiale ale tensiunilor nodale valorile nou calculate $\underline{U}_i^{(0)} \equiv \underline{U}_i^{(1)}$, $i = \overline{1, n}, i \neq e$.

9. Calculul circulațiilor de puteri în laturile rețelei electrice, folosind următoarele relații :
- pentru laturile care conțin linii :

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= U_i^2 \underline{y}_{ik_0}^* + \underline{U}_i (\underline{U}_k - \underline{U}_i)^* \underline{y}_{ik}^* \\ \underline{S}_{ki} &= U_k^2 \underline{y}_{ki_0}^* + \underline{U}_k (\underline{U}_i - \underline{U}_k)^* \underline{y}_{ik}^* \end{aligned}$$

- pentru laturile ce conțin transformatoare cu reglaj longitudinal și raport real de transformare:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= \underline{U}_i [(\underline{U}_k - N_{i'i} \underline{U}_i) \underline{Y}_{ik}]^* \\ \underline{S}_{ki} &= \underline{U}_k [(\underline{U}_i - \underline{U}_k / N_{i'i}) \underline{Y}_{ik}]^* \end{aligned}$$

- pentru laturile care conțin transformatoare cu reglaj longo-transversal și raport complex de transformare :

$$\begin{aligned} \underline{S}_{ik} &= \underline{U}_i [(\underline{U}_k - N_{i'i} \underline{U}_i) \underline{Y}_{ik}]^* \\ \underline{S}_{ki} &= \underline{U}_k [(\underline{U}_i - \underline{U}_k / N_{i'i}) \underline{Y}_{ki}]^* \end{aligned}$$

10. Calculul pierderilor de putere activă și reactivă pe laturile rețelei, ca sumă a circulațiilor de puteri de la extremitățile laturii, cu ajutorul următoarei relații :

$$\Delta \underline{S}_{ik} = \Delta P_{ik} + j \Delta Q_{ik} = \underline{S}_{ik} + \underline{S}_{ki}$$

11. Tipărirea rezultatelor calculului de regim permanent.

În Figura 2 se prezintă schema logică a procesului de calcul pentru analiza regimului permanent de funcționare al rețelelor electrice, folosind metoda Newton-Raphson.

Metoda Newton-Raphson decuplată

Datorită dependenței slabe care există la nivelul sistemelor electroenergetice între componentele $P-U$ și $Q-\delta$, se poate proceda la separarea (decuplarea) ecuațiilor $P-\delta$, respectiv $Q-U$. În aceste condiții, se neglijează conductanțele $G_{ik} \approx 0$, iar diferențele argumentelor tensiunilor între două noduri vecine fiind foarte mici, se poate considera $\sin(\delta_i - \delta_k) \approx 0$, astfel încât se neglijează elementele

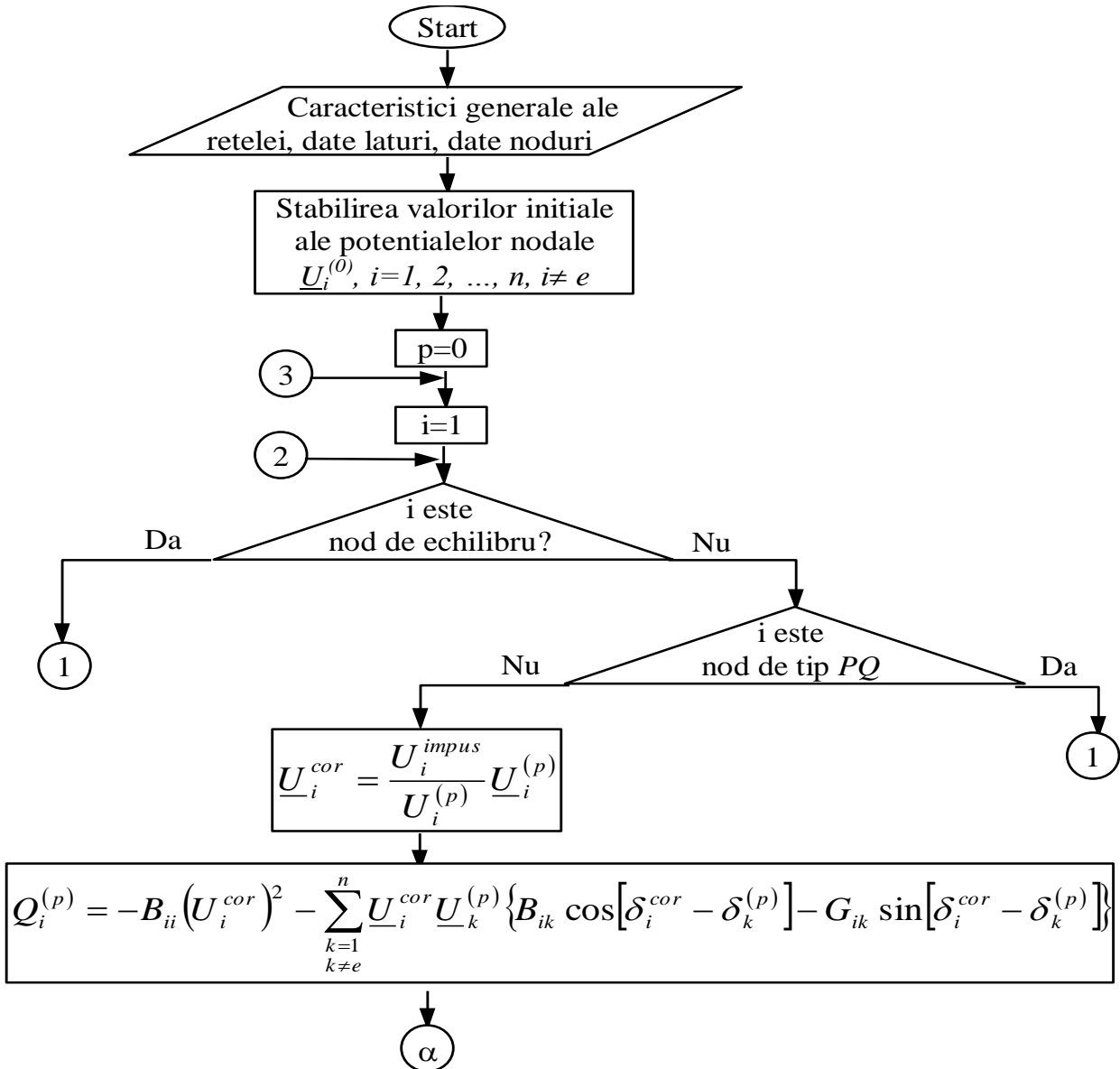
J_{ik} și N_{ik} din Jacobianul sistemului de ecuații, restul elementelor (H_{ik} și L_{ik}) calculându-se fără considerarea acestor aproximații, cu aceleași relații ca în cazul metodei Newton-Raphson.

Metoda Newton-Raphson rapidă decuplată.

Această metodă adoptă aproximații suplimentare față de metoda Newton-Raphson decuplată, și anume: $\cos(\delta_i - \delta_k) \approx 1$, $G_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) \ll B_{ik}$, respectiv $Q_i \ll B_{ii} U_i^2$. În aceste ipoteze, elementele Jacobianului capătă valorile:

$$\begin{aligned} H_{ii} &= -B_{ii} U_i^2; & H_{ik} &= B_{ik} U_i U_k; & N_{ii} &= 0; & N_{ik} &= 0; \\ J_{ii} &= 0; & J_{ik} &= 0; & L_{ii} &= -B_{ii} U_i^2; & L_{ik} &= B_{ik} U_i U_k \end{aligned}$$

În ambele variante ale metodei Newton-Raphson, decuplată și rapidă decuplată, algoritmul și schema logică a procesului de calcul sunt aceleași cu cele prezentate anterior pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor electrice, folosind metoda Newton-Raphson.



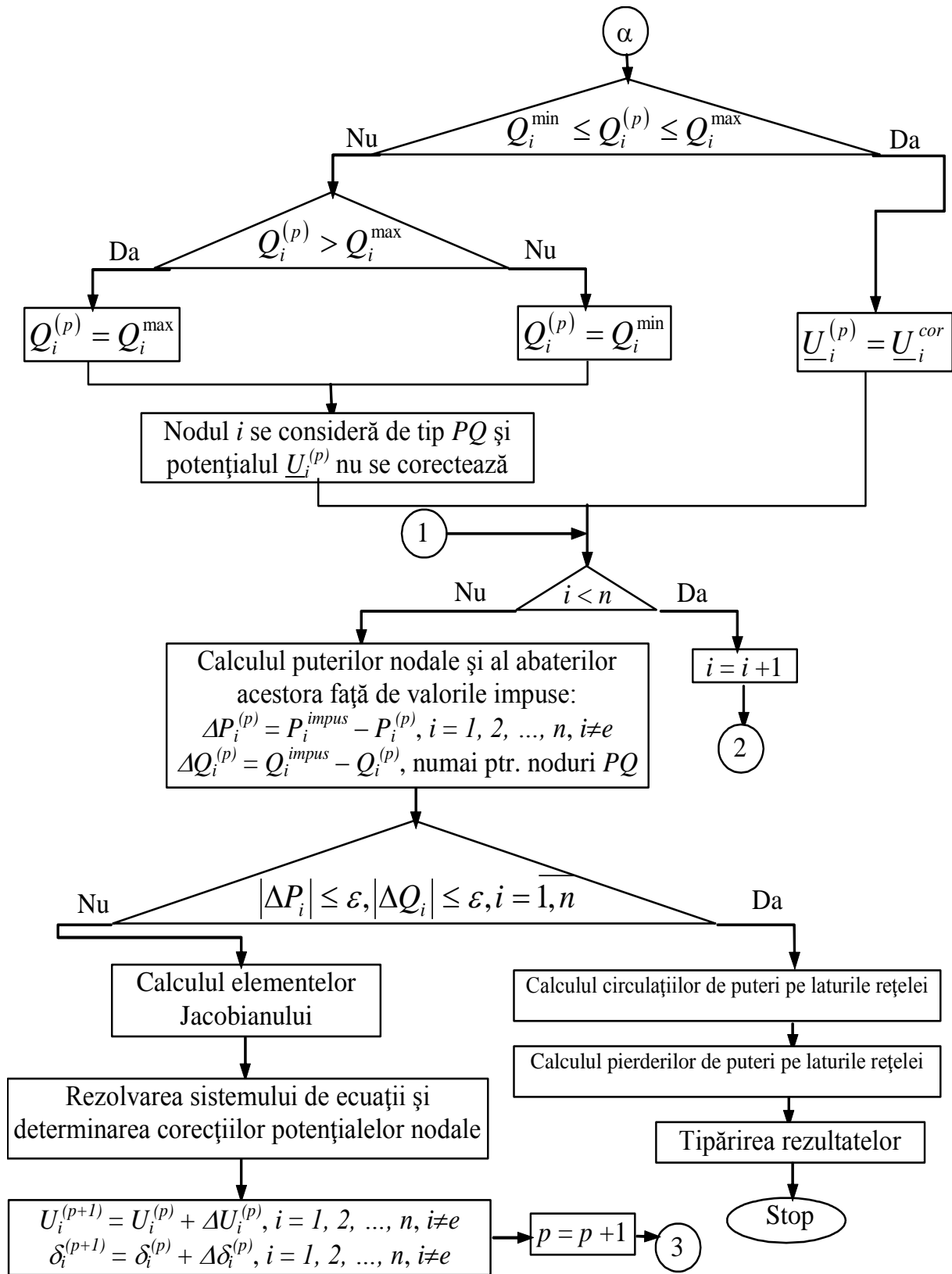


Figura 2 Schema logică a procesului de calcul pentru analiza regimului permanent de funcționare a rețelelor electrice, folosind metoda Newton-Raphson

4. Program de calcul pentru analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor electrice folosind metoda Newton-Raphson

Power Education Toolbox (PET) este un program de calcul accesibil utilizatorilor, acesta fiind conceput la Universitatea A&M din Texas, ca un instrument eficient în vederea analizei regimurilor de funcționare ale rețelelor electrice care aparțin sistemului electroenergetic. Programul de calcul este proiectat pentru utilizarea cu ușurință a unor funcții comune aplicabile pentru schemele de conexiuni folosite în mod curent în rețelele electrice. Fereastra principală a programului permite utilizatorului să construiască o rețea electrică și să selecteze o aplicație dorită pentru rețeaua creată. Ferestrele de dialog ale elementelor componente (nod, linie, transformator) vor fi înlocuite conform aplicației dorite. Utilizatorii pot alege introducerea datelor pentru una sau mai multe aplicații din rețeaua analizată. În cazul în care o linie a rețelei electrice studiate este deconectată, toate datele asociate ei, care au fost deja introduse, vor fi restabilite. Acest lucru va permite utilizatorului să comute aplicațiile și să le execute pentru aceeași rețea electrică în cazul aceleiași ferestre. PET permite, de asemenea, generarea automată a unor date ale unei aplicații, utilizând o altă aplicație. În acest sens, pot fi menționate următoarele exemple: estimarea stărilor sau inițializarea studiilor de stabilitate tranzitorie, cât și analize complete ale stării rețelelor electrice, prin folosirea rezultatelor circulațiilor de puteri pentru rețeaua analizată.

4.1 Descrierea meniului principal

Programul folosește o interfață grafică care permite utilizatorilor să creeze schemele rețelelor electrice, să introducă datele atribuite fiecărui element de rețea și să analizeze circulațiile de puteri, estimarea stărilor, optimizarea circulațiilor de puteri, analiza stabilității tranzitorii și analiza scurtcircuitelor, utilizând aceeași fereastră de lucru.

Pentru executarea programului de calcul PET, se va da dublu click pe executabilul *PowerEducationToolbox.exe*, din fișierul în care a fost instalat, deoarece acesta activează sub Windows. După ce se deschide programul, fereastra principală a acestuia are o structură conform celor reprezentate în Figura 3. Meniul cu opțiunile disponibile, specifice programului PET va fi descris, în detaliu, în continuare, pentru o mai bună familiarizare a utilizatorului cu programul de calcul.

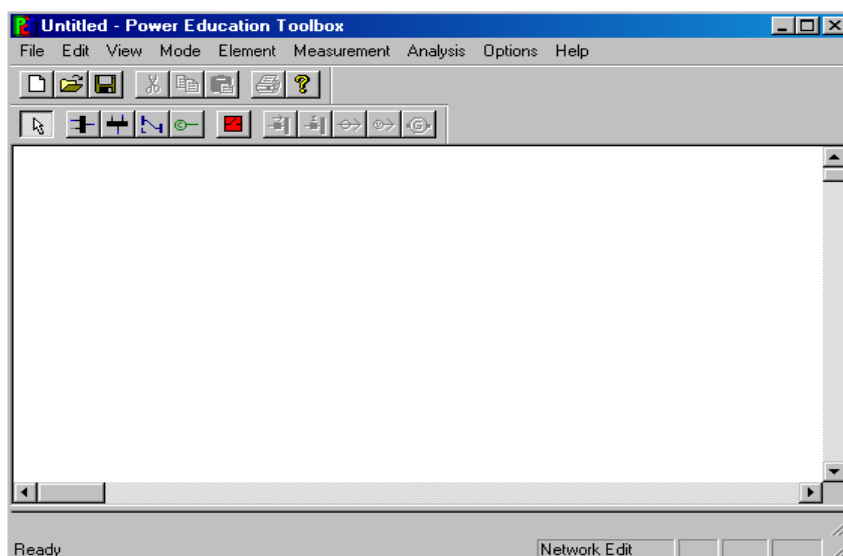


Figura 3 Fereastra principală a programului PET

4.1.1 Meniul Fișier

Open

Prin convenție, programul crează fișiere cu extensia ".pet", pentru reprezentarea schemelor rețelelor electrice, cu ajutorul datelor asociate acestora. Astfel, prin selectarea opțiunii *Open* din meniul principal, programul de calcul PET va deschide toate fișierele cu extensia ".pet".

Crearea unui fișier IEE

Odată ce schema monofilară a rețelei electrice a fost creată, la fiecare rulare a aplicațiilor privind circulațiile de puteri, programul va genera un fișier numit *pf.imput* cu extensia ".dat", care va conține datele despre circulațiile de puteri într-un fișier cu numele IEEE (CDF). Dacă utilizatorul dorește să salveze acest fișier sub un nume diferit, se va permite acest lucru fără a ieși din fereastra principală a programului de calcul.

Crearea unui fișier de măsură

Odată ce schema monofilară a rețelei electrice a fost creată, la fiecare rulare a aplicației pentru estimarea stărilor, programul va genera un fișier numit *measure* cu extensia ".dat", acesta conținând datele măsurate. Opțiunea respectivă va permite utilizatorului să creeze un fișier separat și să salveze aceleași date măsurate sub un nume diferit, în același format.

Exit

Această opțiune permite utilizatorului să închidă programul de calcul (PET). În acest caz, utilizatorii vor fi avertizați pentru salvarea datelor și a rezultatelor obținute, înainte de a ieși definitiv din program.

4.1.2 Meniul Mod

Acest meniu setează fereastra de lucru pentru diferite moduri de execuție ale aplicațiilor specifice programului PET. Inițial, programul are selectat modul pentru editarea rețelei (*Network Edit*). Opțiunile din meniul mod sunt următoarele :

- *Network Edit* (editarea rețelei) ;
- *Power Flow* (circulații de puteri) ;
- *State Estimation* (estimarea stărilor) ;
- *Optimal Power Flow* (optimizarea circulațiilor de puteri) ;
- *Transient Stability Analysis* (analiza regimului tranzitoriu) ;
- *Short Circuit Studies* (studiul scurtcircuitelor).

4.1.3 Meniul Element

Meniul conține o gamă variată de elemente necesare construirii schemelor de conexiuni a sistemelor electrice. Acest lucru este permis doar în opțiunea "*Network Edit*". Elementele și parametrii lor vor fi descriși în cele ce urmează. Astfel, elementele cu care se operează sunt :

- *Nod* :
 - Orizontal
 - Vertical
- *Linie (transformator)*
- *Condensator*

De menționat faptul că mai există și un element component al sistemului numit *generator*, dar acesta este accesibil doar în cazul când se dorește analiza optimizării circulațiilor de puteri, precum și analiza regimurilor tranzitorii.

4.1.4 Meniul Măsurări

Meniul conține diferite opțiuni ce reprezintă tipuri de măsurători, utile elementelor componente ale sistemului energetic. Acestea sunt necesare în cazul folosirii aplicației estimarea stărilor (*State Estimation*). Parametrii fiecărui tip de măsurare vor fi descriși, în detaliu, într-un paragraf viitor. Tipurile de măsurători specifice programului PET sunt următoarele :

- ✓ *Circulațiile de puteri pe laturi.*
- ✓ *Injecții de puteri în noduri.*
- ✓ *Amplitudinea tensiunii în noduri.*

Meniul de măsurare conține și două opțiuni suplimentare :

- *Utilizarea rezultatelor analizei circulațiilor de puteri* – opțiune care actualizează valorile măsurărilor inițiale cu rezultatele provenite din analiza circulațiilor de puteri ;
- *Măsurarea costului (Metter Cost)* – această opțiune permite introducerea unui cost al măsurării pentru a selecta măsurarea optimă, folosind algoritmul amplasării aparatelor de măsură (*meter placement algorithm*).

4.1.5 Meniul Analiza

- *Analiza aplicației* – această opțiune permite execuția aplicațiilor posibile pentru *Modul* ales.
- *Ștergerea rezultatelor* – folosind această opțiune, pot fi șterse rezultatele numerice cele mai recente ale aplicațiilor programului de calcul.

4.1.6 Meniul Opțiuni

Aceste opțiuni explică utilizatorului parametrii și indicatorii diferitelor aplicații ale programului. Opțiunile existente depind de selectarea modului de operare din meniul principal, fiind descrise individual în continuare:

- *Modul editare rețea*:
 - *Absența parametrilor pe linii* – când utilizatorul dă click pe o linie, se deschide fereastra de dialog a liniei respective, cu valorile parametrilor pentru tipul selectat (linie sau transformator). Utilizatorul alege între modificarea și acceptarea parametrilor deja existenți. Opțiunea permite și scrierea parametrilor care lipsesc pentru orice valoare de referință.
- *Modul circulații de puteri (Power Flow)*:
 - *Modelarea parametrilor (simulation parameters)*:

- *Numărul maxim de iterații* – specificarea limitei numărului de iterații; aplicația se va termina în cazul depășirii numărului de iterații specificat.
- *Dereglări ale puterii active* – specificarea numărului maxim de dereglări ale puterii active între iterații.
- *Dereglări ale puterii reactive* – specificarea numărului maxim de dereglări ale puterii reactive între iterații.
- *Limitele puterii reactive* – specificarea limitelor maxim și minim în Mvar, în fereastra de dialog a liniei. Utilizatorul poate interveni în corectarea soluțiilor circulațiilor de puteri prin indicarea acestor *Q-limits* la toate nodurile de tip PU. Dacă nu sunt controlate de utilizator, aplicațiile circulațiilor de puteri vor ignora aceste limite ale nodurilor de tip PU.
- *Dereglări ale puterii active* – specificarea numărului maxim de dereglări ale puterii active între iterații.
- *Puterea de bază (MVA base)*: utilizatorul are posibilitatea să indice puterea de bază, în vederea raportării circulațiilor de puteri.
- *Display settings (afișare)*:
 - *Display bus voltages* – afișarea tensiunii și defazajului analizei circulațiilor de puteri. Aceste valori sunt afișate în apropierea liniilor.
 - *Display bus generation* – afișarea puterii active și reactive produse pe perioada analizei circulațiilor de puteri, valori afișate în apropierea nodurilor de tip PU sau a nodurilor de echilibru.
 - *Display line flows* – afișarea circulațiilor de putere activă și reactivă prin liniile electrice, la sfârșitul analizei circulațiilor de puteri. Valorile vor fi afișate la extremitățile liniilor.
 - *Voltage limits* – valorile limită ale tensiunii impuse de utilizator. Valorile care depășesc aceste limite (inferioară sau superioară) sunt afișate în roșu.
- *Modul estimarea stărilor (State Estimation)*:
 - *Erorile de măsurare ale abaterii standard (default values for the measurement error standard deviations)* – în timpul rulării *State Estimation*, datele de măsurare sunt stocate în fișierul *measure.dat*. Acesta conține erorile de măsurare ale abaterilor standard, care pot fi modificate dând un click pe măsurarea respectivă. Folosind această opțiune, se pot introduce valorile asociate erorilor abaterii standard, ale diferitelor tipuri de măsurări, de către utilizator.
 - *Modelarea parametrilor (simulation parameters)*:
 - *No Noise (fără zgomot)* – simulare cu toate erorile.
 - *Gaussian Noise (zgomot gaussian)* – simulare, prin adăugarea aleatoare a erorilor admise, prin intermediul împărțirii la 0 a gaussianului și specificarea abaterii standard de măsurare.
 - *Max. Iteration* – numărul maxim de iterații. Dacă se depășește numărul de iterații impus, execuția programului se finalizează.
 - *Convergence tolerance* – toleranțele trebuie să fie satisfăcute de valorile tensiunii și unghiului de fază, pentru ca programul să se termine cu succes.
 - *Display settings (afișare)*:

- *Display Z-estimates* – afișarea valorilor măsurării la sfârșitul execuției *State Estimation*, lângă măsurarea făcută. Mai mult, dând un click pe o măsurare, aceasta va fi afișată în colțul din stânga jos al ecranului.
 - *Display V-estimates* – afișarea valorilor tensiunii în noduri la sfârșitul execuției *State Estimation*, aceasta realizându-se lângă nod. Mai mult, dând un click pe un nod, aceasta va fi afișată în colțul din stânga jos al ecranului.
 - *Display normalized residuals ,WLS only,(pierderile standard)* – afișarea măsurărilor pierderilor standard, la sfârșitul execuției aplicației *State Estimation*. Valorile pierderilor standard sunt afișate în apropierea măsurării, iar dând un click pe măsurarea respectivă, acestea vor fi afișate în colțul din stânga jos al ecranului. Pentru k cele mai mari valori ale pierderilor standard, valorile sunt afișate în roșu, pentru o recunoaștere ușoară. Se poate introduce un prag, iar dacă cea mai mare valoare a pierderii standard este mai mică decât pragul, nu se va mai afișa nici o valoare în roșu.
- *Modul optimizarea circulațiilor de puteri (Optimal Power Flow - OPF):*
- *Modelarea parametrilor (simulation parameters):*
 - *Numărul maxim de iterații* – specificarea limitei numărului de iterații; aplicația se va termina în cazul depășirii numărului de iterații specificat.
 - *Constraints (constrângeri)* – specific, dacă OPF consideră constrângerea a fi o soluție.
 - *Cost Tolerance* – specifică toleranța maximă a costului funcției; OPF va finaliza calculul dacă costul funcției va fi mai mic decât toleranța.
 - *Display settings (afișare):*
 - *Display bus voltages* – afișarea tensiunii și defazajului analizei OPF. Aceste valori sunt afișate în apropierea liniilor.
 - *Display bus generation* – afișarea puterii active și reactive produse pe perioada analizei OPF, valorile fiind afișate în apropierea nodurilor de tip PU sau a nodurilor de echilibru, iar costul de producere, lângă sursă sau generator.
 - *Display line flows* – afișarea circulațiilor de putere activă și reactivă prin linii, la sfârșitul analizei OPF. Valorile vor fi afișate la extremitățile liniilor.
 - *Voltage limits* – această opțiune setează limitele tensiunii de constrângere.

4.2 Modul *Network Edit* (crearea rețelei)

Inițial, programul de calcul PET deschide fereastra de editare, în care utilizatorul poate construi schema monofilară a rețelei electrice dorite. Astfel, pentru crearea rețelei, programul conține elementele necesare după cum urmează :

- Nod orizontal
- Nod vertical
- Linie sau transformator
- Condensator
- Întrerupător

Aceste elemente pot fi aplicate dând click pe imaginea corespunzătoare sau pe obiectul din meniul *Element* și se plasează prin luarea click-ului de pe element în locația dorită din fereastra principală. Utilizatorii pot să ștergă sau să introducă parametrii atribuiți elementelor, astfel:

- *Ștergerea unui element* – click pe element (pentru un nod sau condensator, va apărea o linie întreruptă în jurul imaginii elementului, iar pentru linie sau transformator elementul își va schimba culoarea), apoi se apasă litera "D".
- *Modificarea sau introducerea datelor elementelor* – se utilizează fereastra de dialog a elementului selectat prin dublu-click.

4.2.1 Nod

Programul de calcul PET atribuie un număr fiecărui nod din rețeaua analizată conform celor reprezentate în Figura 4. Nodul poate fi mutat oricând în fereastra principală, dar nu și în cazul când are o linie conectată la acesta.

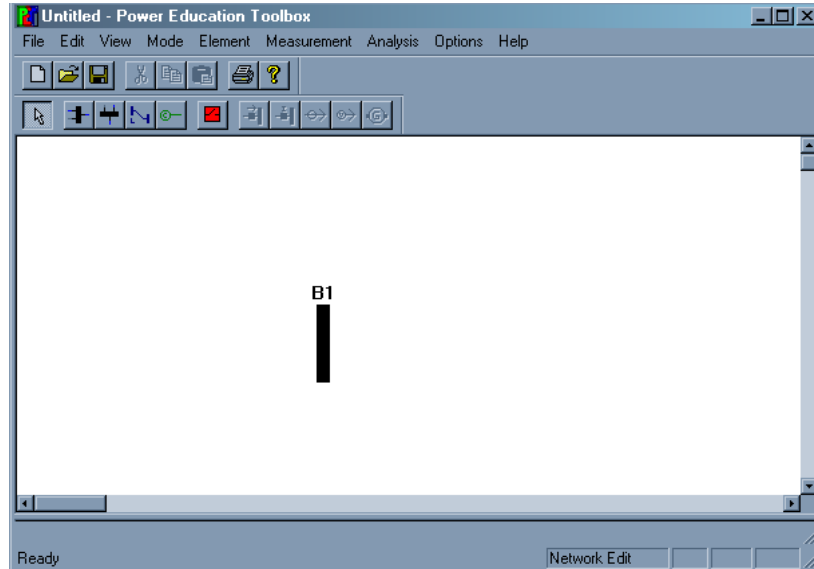


Figura 4 Plasarea nodului în fereastra principală

Dimensiunea, numele, numărul și locația numărului pot fi schimbate, folosind fereastra de dialog reprezentată în Figura 5.

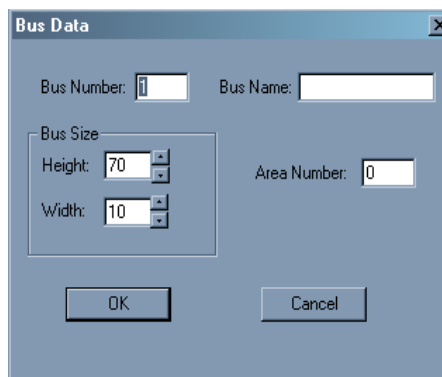


Figura 5 Fereastră de dialog corespunzătoare unui nod

4.2.2 Linie

Spre exemplificare, se consideră o linie (transformator) plasată între nodurile B1 și B2. Se selectează linia din bara de elemente, printr-un click pe imaginea liniei, apoi click pe nodul B1(sau B2), iar, în final, click pe B2 (sau B1). Linia va fi plasată între nodurile B1 și B2 conform celor

reprezentate în Figura 6. Odata ce linia a fost plasată, se deschide fereastra de dialog corespunzătoare liniei, pentru modificarea parametrilor. În fereastra de dialog prezentată în Figura 7 sunt redați parametrii liniei și anume:

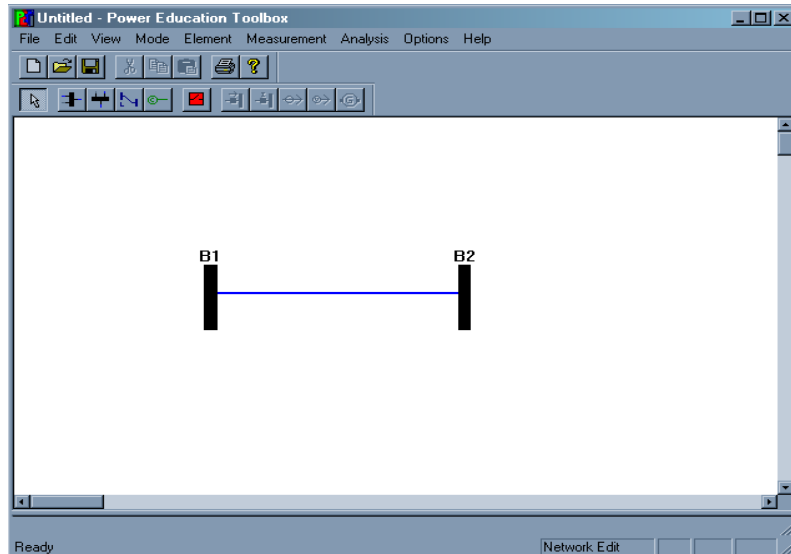


Figura 6 Plasarea liniei între nodurile B1 și B2, în fereastra principală a programului PET

- ✓ *Tipul:* identificarea unei laturi – dacă este linie sau transformator. Astfel, cu albastru este afișată linia și în gri transformatorul, iar imaginea transformatorului este aplicată automat deasupra liniei. Pentru o latură de tip transformator, este necesară precizarea prizei sau plotului de funcționare a acestuia, după cum rezultă din opțiunea conținută în fereastra de dialog.



Figura 7 Fereastră de dialog corespunzătoare unei linii

- ✓ *Datele liniei:*
 - Rezistența liniei
 - Reactanța liniei
 - Susceptanța totală a liniei
 - Priza – activată doar când latura aleasă este transformator, iar acesta este selectat ca "Tap Changer (priză de transformator)"

- *Faza* – pentru schimbarea fazei transformatorului, dacă este ales ca "*Phase Shifter (schimbător de fază)*"
- *Zero Resist.* – secvența 0 a rezistenței liniei
- *Zero React.* - secvența 0 a reactanței liniei
- ✓ *Enable Zero Sec.* – permite accesul la secvența 0. Aceste date sunt folosite doar în modul scurtcircuit, care nu este activ în mod obișnuit.
- ✓ *Line limits* – numărul maxim de MVA pe care linia este capabilă să îi transporte (capacitatea de transport a liniei).
- ✓ *Transformer type* – tipul transformatorului, comutator cu prize cu reglaj (*Tap Changer*) și schimbător de fază (*Phase Shifter*).

4.2.3 Condensator (sau Reactor)

În Figura 8 este reprezentată fereastra principală a programului, care conține un condensator legat la nodul B2. Dacă se dă click pe imaginea condensatorului, aceasta se poate roti cu 90 de grade, de fiecare dată când bara de derulare este apăsată. Astfel, se poate atașa un nod vertical sau orizontal de ambele părți. Dacă se dă dublu click pe condensator, se deschide o fereastră de dialog de tipul celei reprezentate în Figura 9, prin care poate fi modificată susceptanța capacitivă. Susceptanța negativă va fi folosită pentru modelarea reactorului.

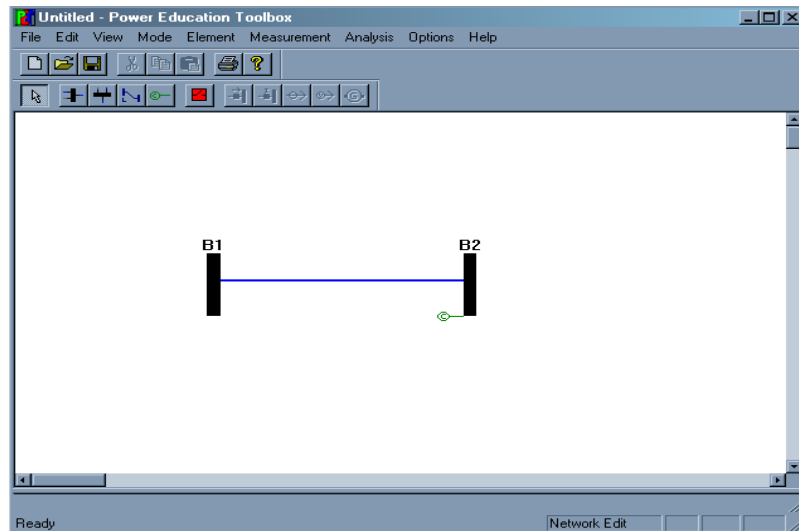


Figura 8 Plasarea unui condensator legat la nodul B2 în fereastra principală a programului PET

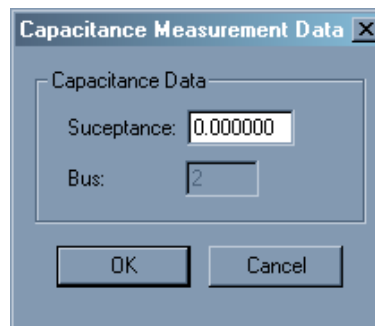


Figura 9 Fereastră de dialog corespunzătoare unui condensator

4.2.4 Întrerupător

Pentru exemplificare, în fereastra din Figura 10 se prezintă un întrerupător amplasat între nodurile B1 și B4. Culoarea întrerupătorului este albastră, când acesta este închis și se modifică în alb la deconectarea sa, operație ce se poate realiza dând dublu click pe imaginea sa.

În Figura 11 este prezentată fereastra principală a programului în care este reprezentată o rețea electrică cu șase noduri. Se observă că laturile care conectează nodurile B4 și B1, respectiv B5 și B2, fiind transformatoare, sunt afișate în culoarea gri. Pentru o mai bună ilustrare a acestor elemente, acestea sunt amplasate deasupra liniilor.

Mai mult, între nodurile B3 și B5 este amplasat un întrerupător de culoare albă, adică întrerupătorul este deschis, deci linia deconectată, iar între nodurile B2 și B5 un întrerupător de culoare albastru, întrerupător închis, deci linia este conectată.

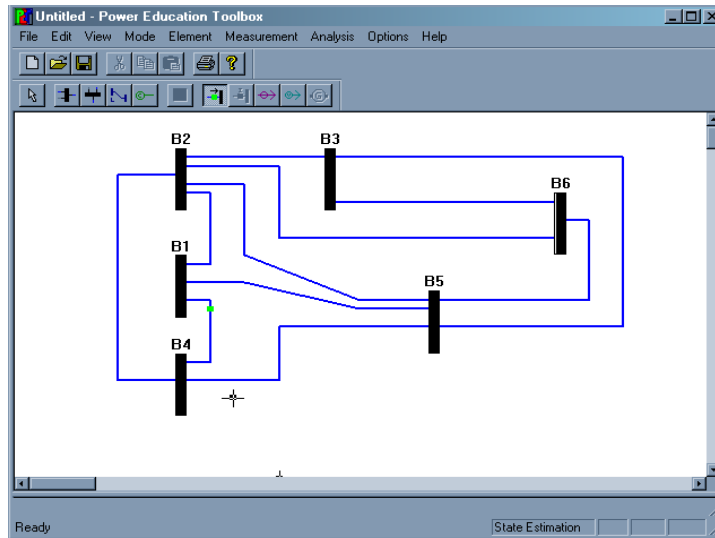


Figura 10 Plasarea unui întrerupător plasat între nodurile B1 și B4 în fereastra principală a programului PET

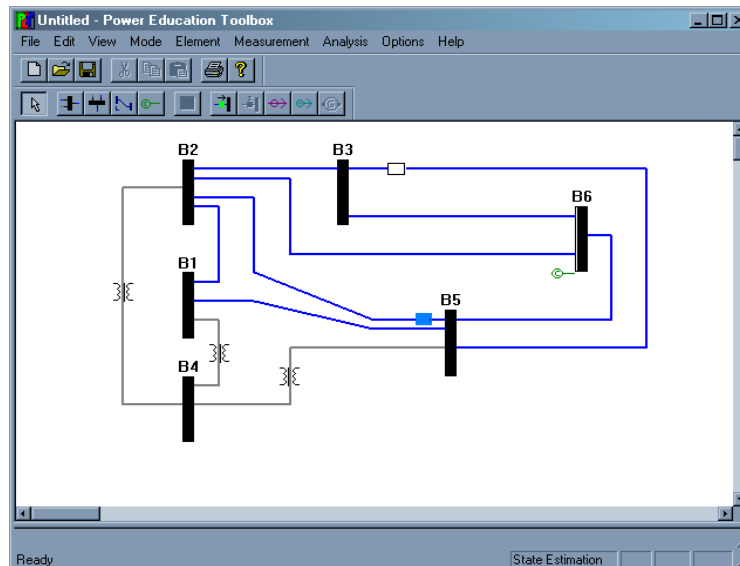


Figura 11 Fereastra principală a programului PET în care este afișată o rețea electrică cu 6 noduri

4.3 Modul *Power Flow* (circulații de puteri)

Dacă se dorește analiza circulațiilor de puteri în rețeaua electrică studiată, se va selecta din meniul *Mode* această opțiune. Se presupune că schema rețelei a fost deja creată în *Network Edit*, cu toate datele elementelor introduse. În vederea efectuării unei astfel de analize, se parcurg următorii pași : introducerea datelor referitoare la noduri, execuția aplicației de calcul a circulației de puteri, afișarea și/sau salvarea rezultatelor și ștergerea lor. Astfel, datele despre noduri se introduc dând dublu click pe un nod, când se deschide o fereastră de dialog a nodului respectiv pentru circulațiile de puteri, conform reprezentării din Figura 12.

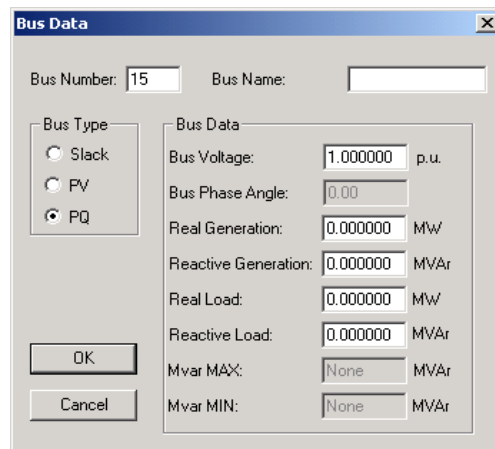


Figura 12 Fereastră de dialog corespunzătoare unui nod privind circulațiile de puteri

Datele referitoare la un nod al rețelei electrice analizate sunt prezentate în cele ce urmează:

- *Bus Type* – nodurile pot fi de tip PU, de tip PQ și de echilibru. Dacă sunt marcate noduri de tip PU sau PQ, programul permite automat un singur nod de echilibru. Când această condiție este încălcată, va apărea un mesaj de avertizare. Pentru o recunoaștere facilă, nodurile de tip PU vor fi afișate în verde, cele de echilibru în albastru, iar cele de tip PQ în negru.
- *Bus Voltage* – tensiunea în nod, specifică nodurilor de tip PU și de echilibru.
- *Bus Phase Angle* – defazajul, opțiune inactivă. Această opțiune este folosită doar în cazul afișării rezultatelor analizei circulațiilor de puteri în grade.
- *Real Generation* – puterea activă disponibilă, în MW.
- *Reactive Generation* – puterea reactivă disponibilă, inactivă. Aceasta este utilizată pentru afișarea rezultatelor în MVar.
- *Real Load* – sarcina activă din nod, în MW.
- *Reactive Load* – sarcina .
- *Max. MVar limit* – limita superioară a puterii reactive, în MVar.
- *Min. MVar limit* – limita inferioară a puterii reactive, în MVar.

4.3.1 Analiza circulațiilor de puteri

După introducerea datelor despre noduri, programul este pregătit pentru execuție. Utilizatorii pot salva în acest moment fișierul cu date, înaintea executării oricărei aplicații. În acest mod, se utilizează algoritmul decuplării rapide a sarcinii, iar analiza poate începe, prin selectarea opțiunii

"Power Flow Analysis" din interiorul meniului de analiză. Utilizatorul trebuie să se asigure dacă opțiunea dorită a fost selectată, dând click pe "Option Menu" și vizualizând opțiunea selectată.

4.3.2 Afișarea rezultatelor

După execuția cu succes a aplicației, rezultatele vor fi afișate automat lângă elementul respectiv. Nu sunt prezente amplitudinea și defazajul tensiunii. Prin accesarea "Display Settings" în meniul opțiuni, vor fi afișate puterile în noduri sau circulațiile prin linii, conform celor reprezentate în Figura 13, în care V_{max} și V_{min} reprezintă limitele de tensiune admisă, date de utilizator.

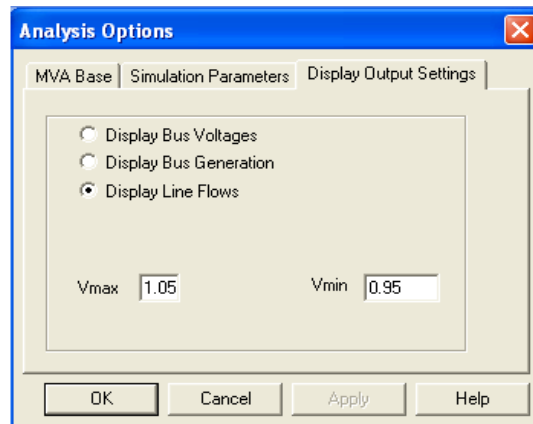


Figura 13 Fereastra opțiunilor de afișare privind analiza circulațiilor de puteri

Rezultatele pot fi vizualizate dând click pe orice element dorit din rețeaua analizată. Valorile vor fi afișate în colțul din stânga jos al ferestrei principale. În plus, în fereastra de jos se va afișa profilul tensiunii. Dacă aceasta depășește limitele de tensiune admisă, valorile vor fi afișate în roșu, dacă nu, în albastru. În Figura 14 este reprezentat modul de afișare al tensiunilor în noduri și defazajul acestora, în ceea ce privește analiza circulațiilor de puteri.

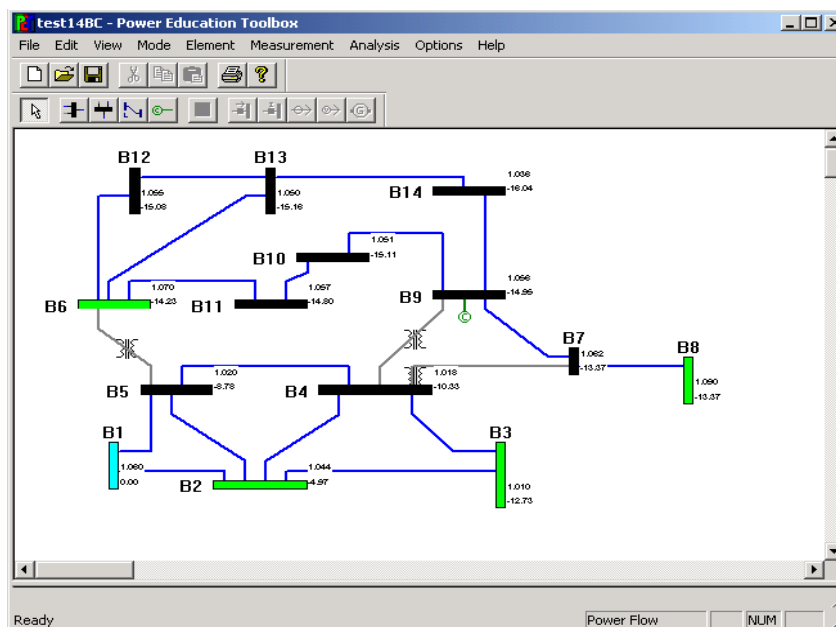


Figura 14 Fereastră a programului PET în care sunt afișate tensiunile în noduri și defazajul, privind analiza circulațiilor de puteri

În urma aplicării unui click pe nod, se vor afișa următoarele rezultate:

- Pentru un nod de tip PQ, vor fi afișate amplitudinea (u.r) și defazajul tensiunii (grade), în mărimi complexe.
 - Pentru un nod de tip PU, pe lângă amplitudinea (u.r) și defazajul tensiunii (grade), se va afișa și puterea reactivă produsă, în MVar.
 - Pentru nodul de echilibru, vor fi afișate amplitudinea (u.r) și defazajul tensiunii (grade), precum și puterea activă și reactivă generată (MW și MVar).
- În urma aplicării unui click pe linie sau transformator, se vor afișa rezultatele următoare:
- Circulațiile de puteri pe laturi se calculează în ambele sensuri. In cazul când linia este supraîncărcată, aceasta va fi notată și afișată în roșu. De exemplu, în Figura 15 sunt prezentate rezultatele privind circulațiile de puteri pe laturile rețelei, precum și supraîncărcarea liniei care leagă nodurile B1 și B2.

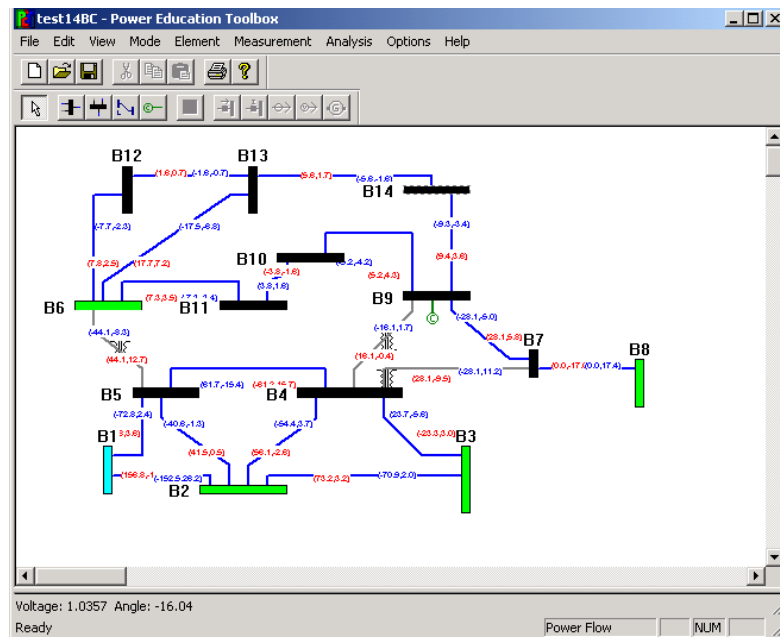


Figura 15 Fereastră a programului PET în care sunt afișate circulațiile de puteri pe laturile rețelei

- Pierderile de putere:
Informațiile privind pierderile de putere, rezultate în urma analizei circulațiilor de puteri pe laturile rețelei, pot fi vizualizate, selectând opțiunea "Power Flow Analysis Losses" din interiorul meniului de analiză. În Figura 16 este prezentată fereastra în care sunt afișate pierderile de putere activă și reactivă. Descrierea pierderilor calculate:
 - *Real Power Loss* – pierderile de putere activă pentru întreaga rețea electrică.
 - *Reactive Power Loss* – diferența dintre puterea reactivă din nodurile PU și sarcina reactivă a tuturor nodurilor.
 - *Line Charging MVARs* – puterea reactivă totală injectată în sistem prin considerarea capacităților liniilor.
 - *Shunt Cap / Reactor MVARs*: puterea reactivă totală injectată în sistem prin oprirea reactoarelor.

- *Line Limits Violation* – indicarea supraîncărcării unei linii (se depășește limita impusă). Liniile supraîncărcate sunt afișate în roșu. Dacă analiza circulațiilor de puteri este executată cu succes, se afișează toate datele din fereastra de dialog a nodului, cu excepția modulului tensiunii nodurilor de tip PU, care vor fi înlocuite cu rezultatele obținute în această analiză.
- *Stergerea rezultatelor* – această opțiune va restarta toate datele circulațiilor de puteri cu valorile lor inițiale, înaintea începerii procesului de calcul. Această opțiune poate fi activată prin selectarea opțiunii "Clear Results" din meniul de analiză.

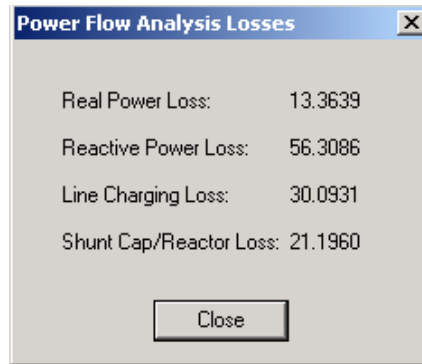





Figura 16 Fereastră a programului PET în care sunt afișate pierderile de puteri în rețeaua electrică analizată

5. Modul de desfășurare a lucrării

➤ Studenții sau utilizatorii trebuie să certifice înțelegerea modelului matematic și a algoritmului de calcul pentru analiza regimurilor permanente simetrice de funcționare ale rețelelor electrice, precum și modul de utilizare a programului de calcul PET (*Power Education Toolbox*). În acest sens, utilizarea respectivului program de calcul impune parcurgerea următoarelor etape:

1. *Editarea grafică a sistemului de transport și distribuție* propus pentru analiză și introducerea datelor de material pentru elementele componente, conform precizărilor din § 4.2.

Pentru început, se configurează programul privind modul de lucru „*editare a rețelei*” (din meniul „*MODE*” se alege opțiunea „*Network Edit*”) și, folosind butoanele  și , se poziționează în fișierul de lucru nodurile rețelei. Între nodurile definite se trasează liniile electrice sau transformatoarele, utilizând butonul . Amplasarea nodurilor și trasarea laturilor sistemului analizat se poate realiza folosind și opțiunile „*Bus*” și „*Line*” din meniul „*ELEMENT*”.

În momentul trasării unei laturi, se inițializează automat fereastra în care trebuie introduse caracteristicile electrice ale acesteia (Figura 7). Trebuie ales tipul laturii (linie sau transformator), apoi se introduc datele de material (rezistența, reactanța și susceptanța), în unitați relative. De asemenea, se indică și încărcarea maximă a laturii, în MVA. Datele introduse se pot modifica oricând pe parcurs, executând dublu click pe linia respectivă.

2. *Introducerea caracteristicilor de consum*. După definirea sistemului de transport și distribuție, programul trece în modul de calcul și analiză al sistemului (opțiunea “*Power Flow*” din meniul “*MODE*”). Pentru fiecare nod, se indică tipul nodului (echilibru, PQ, PU) și, în funcție de tipul ales, mărimile caracteristice (tensiune, puteri active și/sau reactive,

generate și/sau absorbite). Tensiunea trebuie introdusă în unități relative, iar puterile, în MW (Figura 12).

Trebuie menționat faptul că, înainte de efectuarea calculelor, este necesară indicarea mărimilor de bază la care se face raportarea pentru calculul mărimilor relative.

3. *Efectuarea calculelor și afișarea rezultatelor.* Efectuarea calculelor de regim permanent se realizează prin apelarea opțiunii “Run Power Flow Analysis” din meniul “ANALYSIS”. În urma execuției, programul de calcul afișează următoarele rezultate:
 - tensiunile nodale, în valori relative;
 - circulațiile de putere pe laturi, în MW;
 - pierderile totale de putere, în MW.

➤ Folosind programul de calcul *PET*, se cere să se studieze regimul permanent simetric de funcționare al sistemului de transport și distribuție a energiei electrice, a cărui schemă monofilară este prezentată în Figura 17. Sarcinile consumatorilor racordați în nodurile sistemului sunt date sub formă de putere activă și factor de putere, fiind, de asemenea, indicate pe schema monofilară.

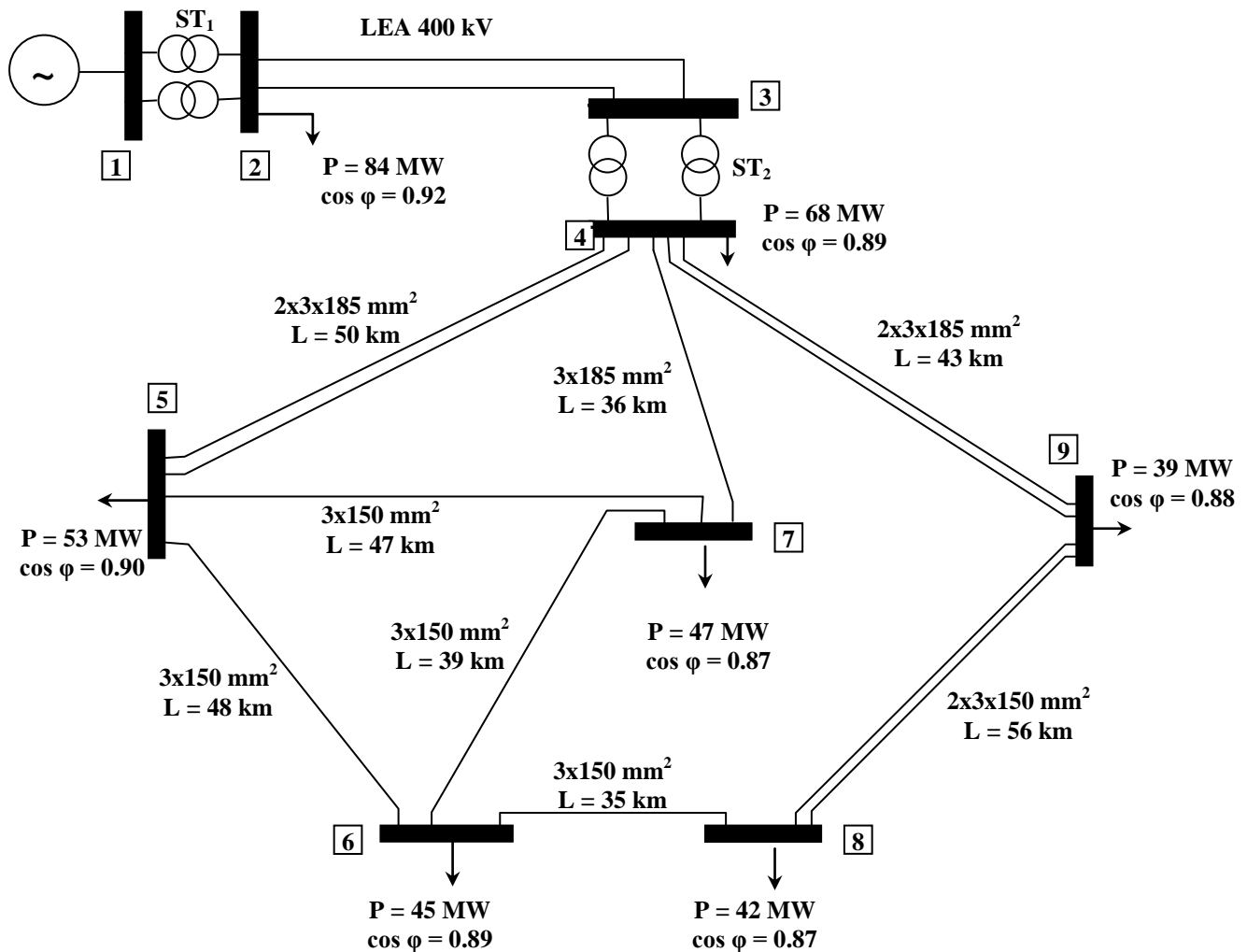


Figura 17 Schema monofilară a sistemului de transport și distribuție a energiei electrice analizat

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

Sistemul propus pentru analiză are nouă noduri, fiind alimentate de la o centrală termoelectrică, care injectează energia electrică în nodul 1 și șapte consumatori complecși, racordați la nodurile 2, 4, 5, 6, 7, 8 și 9. Rețeaua electrică a sistemului de transport și distribuție cuprinde în structura sa o stație de transformare ridicătoare ST_1 , o linie de transport cu tensiunea nominală de 400 kV, o stație de transformare coborâtore ST_2 și opt linii electrice aeriene de repartiție cu tensiunea nominală de 110 kV.

Centrala termoelectrică, care asigură alimentarea cu energie electrică a sistemului, folosește drept combustibil păcură și gaze naturale, fiind echipată cu două grupuri de condensatie G_1 și G_2 , de putere unitară 200 MW, iar consumul propriu tehnologic este de $5 \div 6$ %. Parametrii generatoarelor din centrală sunt prezentați în Tabelul 1.

Stația de transformare ridicătoare ST_1 , respectiv cea coborâtore ST_2 sunt echipate fiecare cu două transformatoare identice, care funcționează în paralel. Datele pentru transformatoare sunt centralizate în Tabelul 2, în care se specifică și următoarele mărimi: IR – înfășurarea reglată; w_n – priza nominală care, în cazul de față, coincide cu priza mediană; w – priza de funcționare; n_t – numărul de transformatoare în paralel.

Linia de transport al energiei electrice cu o lungime de 96 km este o LEA de 400 kV, dublu circuit ($n_c = 2$), echipată cu două conductoare pe fază din OL-Al, cu secțiunea de 450 mm^2 fiecare. Parametrii specifici ai liniei de transport au următoarele valori:

$$r_0 = 0,0337 \Omega/km$$

$$x_0 = 0,324 \Omega/km$$

$$b_0 = 3,555 \cdot 10^{-6} S/km.$$

Rețeaua de repartiție de 110 kV este construită din linii electrice aeriene, simplu și dublu circuit. Stâlpii de susținere utilizați sunt de tip SC 110 102, pentru LEA simplu circuit și de tip SC 110 106, în cazul LEA dublu circuit, iar pentru conductoarele active de fază s-au folosit conductoare bimetalice multifilare din OL-Al, de construcție normală. Lungimile tronsoanelor de linie, în km și secțiunile, în mm^2 , sunt indicate în schema monofilară a sistemului reprezentat în Figura 17. Parametrii specifici corespunzători liniilor de repartiție au următoarele valori:

$$S = 150 \text{ mm}^2 \left\{ \begin{array}{l} r_0 = 0,198 \Omega / km \\ x_0 = 0,409 \Omega / km \\ b_0 = 2,80 \cdot 10^{-6} S / km \end{array} \right.$$

$$S = 185 \text{ mm}^2 \left\{ \begin{array}{l} r_0 = 0,160 \Omega / km \\ x_0 = 0,402 \Omega / km \\ b_0 = 2,85 \cdot 10^{-6} S / km \end{array} \right.$$

Alimentarea cu energie electrică a sistemului propus pentru analiză se realizează din nodul 1, acest nod fiind considerat, pentru calculele de regim, ca nod de echilibru.

Laborator Transportul și distribuția energiei electrice - B. Neagu

Datele generatoarelor sincrone din centrala termoelectrică

Tabelul 1

Grupul	Sn [MVA]	Pn [MW]	Un [kV]	In [kA]	cos φ _n	Reactanțe [%]				Constanta de timp [s]		Timp de lansare [s]
						x _d	x _q	x' _d	x'' _d	T' _{d0}	T'' _{d0}	T _a
G ₁ , G ₂	235	200	15,75	9,06	0,85	185	185	27	19	6,4	0,05	5,8

Datele transformatoarelor trifazate cu două înfășurări din stațiile de transformare

Tabelul 2

Stația	Sn [MVA]	U _n ^{IT} [kV]	U _n ^{JT} [kV]	u _{sc} [%]	ΔP _{sc} [KW]	i ₀ [%]	ΔP _{Fe} [KW]	Reglaj				η _t
								IR	w _n	w	ΔU _p [%]	
ST ₁	400	400	15,75	15,2	920	0,4	350	IT	2	1	5	2
ST ₂	250	400	121	12	500	0,5	230	IT	13	15	1,25	2