

PROCEDEU DE CALCULUL AL REGIMULUI STAȚIONAR A REȚELEI ELECTRICE ARBORESCENTE

Dumitru VIERU, Ivan TATIAN, Sveatoslav POSTOTONCA

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei

Rezumat: În lucrare se prezintă esența procedurii de calcul a regimului staționar în circuite arborescente cu multiple sarcini complexe și surse de generare distribuită racordate la rețea. Ca particularitate a procedurii propus se poate considera aplicarea unui algoritm unic și flexibil de calcul a curenților și profilului tensiunii în întreaga rețea prin aplicarea metodei matriciale de calcul a curenților în ramurile transversale a schemei echivalente. Sarcinile se prezintă prin impedanțe, iar sursele de generare prin tensiunea electromotoare și impedanța internă a lor. Algoritmii de calcul al regimului staționar permite efectuarea calculelor pentru diferite topologii a circuitului fără a fi modificat. Modificarea topologiei schemei echivalente de calcul se face prin atribuirea valorilor respective a impedanțelor în punctele de racord a rețelei.

Cuvinte cheie: Curent, tensiune, matrice, profil tensiune, echivalare a ramificărilor rețelei.

1. Introducere

Rețelele de distribuție asigură livrarea energiei electrice consumatorilor, care sunt amplasați aleator în aria de alimentare. Cel mai frecvent, în acest scop se utilizează rețelele electrice cu linie principală (schema radială), care adesea are ramificații laterale. Linia principală și porțiunile ei ramificate prezintă un circuit cu parametri distribuiți, având sarcini cu parametri concentrați. Deoarece dimensiunile longitudinale ale liniei principale și ale ramificațiilor privind punctele de racordare ale sarcinilor cu parametri concentrați sunt neglijabile în comparație cu lungimea undei electromagnetice, reiese că și aceste porțiuni se pot prezenta în schema echivalentă ca componente cu parametri concentrați. Urmare a acestei ipoteze, schema electrică echivalentă a porțiunii dintre punctele de racord n și $n+1$ a rețelei arborescente se poate prezenta ca lanțul din cuadripoli diport (schemă de tip cascadă). Cuadripolii includ două componente: elementul longitudinal $Z_{n,n+1}$ și elementul transversal $Z_{S,n+1}$. Calculul rețelelor prezentate prin scheme de substituție prin cuadripoli diport inserați este descris în literatura de specialitate [1-3]. În realitate, parametrii ramurii transversale prezintă sarcini racordate la linie, care variază în limite largi, de la regimul de scurtcircuit până la regimul de mers în gol. Aceasta creează dificultăți la efectuarea calculelor, deoarece de fiecare dată este necesar de recalculat parametrii cuadripolilor. În acest context, se mai poate indica o particularitate condiționată de conexiunea la rețelele de distribuție a surselor de generare de putere mică, fie că acestea sunt centrale electrice fotovoltaice, eoliene sau sisteme de stocare și injecție în rețea a energiei electrice [4,5]. Autorii de obicei se limitează cu examinarea influenței doar a unei surse de energie conectată la circuit [4] sau cel mult două surse de generare [5].

Particularitățile enumerate, fie că vorbim despre dependența parametrilor cuadripolurilor de variațiile de sarcină în punctele de racordare la rețea, fie de existența a racordărilor multiple ale surselor distribuite de generare la rețea, creează dificultăți la calcularea regimului în astfel de circuite.

2. Formularea problemei investigației

Fie că avem un fider de alimentare a consumatorilor cu topologie arborescentă și multiple sarcini distribuite atât pe lungimea liniei principale, cât și pe ramificațiile de la această linie. Totodată la această rețea sunt conectate surse de generare, ce asigură injectarea puterii în rețea în nodurile de racord. Sarcina constă în elaborarea și argumentarea unui procedeu de calcul a regimului staționar în acest fider, care ar avea o un grad ridicat de flexibilitate privind evoluțiile valorilor sarcinilor surselor de generare distribuită în acest tip de circuit.

3. Metoda de calcul a regimului

În lucrarea [6] se prezintă conceptual metoda de calcul a regimului staționar în linia radială cu sarcini și surse de generare distribuite, care sunt racordate la linie. Esența metodei constă în faptul, că sau separat

mărimile ce caracterizează linia și mărimile ce se referă la sarcini și la sursele de energie distribuită racordate la linie.

În rezultatul utilizării teoremelor lui Kirhhgoff pentru circuitul radial și transformărilor ulterioare s-a obținut ecuația matricială care permite calcularea curenților în sarcini și curenților injectați în linie de către sursele distribuite. Flexibilitatea procedurii este determinată de faptul, că includerea sau excluderea din circuit a unor componente se poate ușor efectua prin atribuirea componentelor excluse a unor valori mari a impedanțelor. De asemenea, în același mod se poate realiza și regimul staționar de scurt circuit în orice punct al liniei radiale prin modificarea valorii respective a unei impedanțe transversale ce prezintă sarcina racordată la linie în acest nod. Menționăm, că urmare a acestora algoritmul de calcul a curenților și tensiunilor în nodurile rețelei rămâne fără schimbare.

În figura 1 este prezentată schema echivalentă a fiderului cu sarcini și surse de generare distribuite, utilizată în scopul elucidării esenței metodei de calcul a regimului staționar în astfel de circuite.

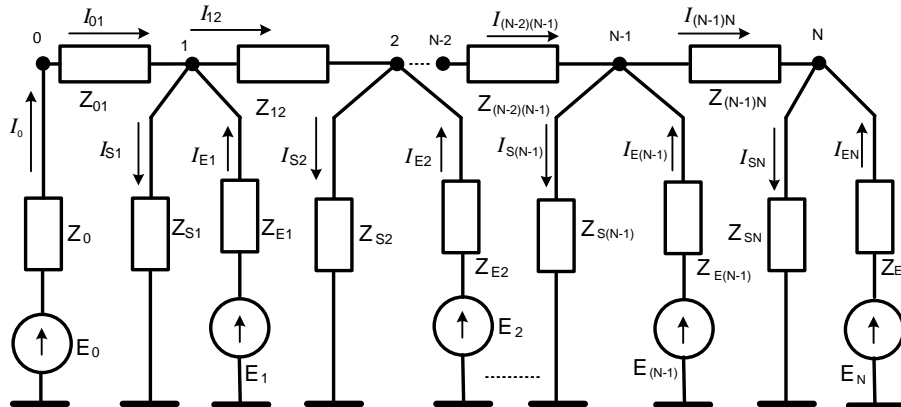


Fig.1. Schema echivalentă a rețelei radiale cu N consumatori și M surse de generare distribuite.

Ecuția matricială pentru rețeaua din figura 1, conform [6] este următoarea:

$$XB = Y, \quad (1)$$

în care: $X = (I_{S1}; I_{S2}; \dots; I_{S(N-1)}; I_{SN}; I_{E1}; I_{E2}; I_{E3}; \dots; I_{E(N-1)}; I_{EN})^T$ - matricea transponată a variabilelor necunoscute;

$B = \begin{bmatrix} A_{IS} & B_{IE} \\ C_{IS} & D_{IE} \end{bmatrix}$ - matricea pătrată a coeficienților de pe lângă mărimile necunoscute; $A_{IS} = |a_{ij}|$

și $C_{IS} = |c_{ij}|$ - matrice pătrate a coeficienților a_{ij} și c_{ij} din sistemul matricial de ecuații (1) de pe lângă mărimile necunoscute; I_{Sk} - curentul în sarcinile liniei; $B_{IS} = |b_{ij}|$ și $D_{IE} = |d_{ij}|$ - matrice pătrate a coeficienților de pe lângă mărimile necunoscute I_{Ek} , ce prezintă curenții sursele de generare distribuite.

Valorile coeficienților pe diagonalele principale ale matricelor pătrate A_{IS} , B_{IE} , C_{IS} și D_{IE} se determină de către relațiile: $a_{ij} = a_{kk} = Z_0 + Z_{0k} + Z_{Sk}$; $c_{ij} = c_{kk} = -Z_{Sk}$; $b_{ij} = b_{kk} = -(Z_0 + Z_{0k})$ și $d_{ij} = d_{kk} = -Z_{Ek}$, deci pentru cazul că se îndeplinește condiția $i = j = k$.

Coeficienților c_{ij} și d_{ij} a matricelor C_{IE} și D_{IE} pentru care este valabilă condiția $i \neq j$ li se atribuie valorile zero, deci $c_{ij} = d_{ij} = 0$.

Coeficienții matricei a_{ij} , situați deasupra diagonalei principale și pentru care se îndeplinește condiția $i \neq j$; $i = k$ și $j = k + 1, k + 2, \dots, N$ se determină din relația $a_{ij} = Z_0 + Z_{0i} = Z_0 + Z_{0k}$. Coeficienții a_{ij} plasați în coloana j din rândul i , situați deasupra diagonalei principale a matricei A_{ij} se determină cu relația $a_{ij} = Z_0 + Z_{0k}$ pentru cazul îndeplinirii condițiilor $i \neq j$; $j = k + 1, k + 2, \dots, N$ și $i = k$.

Elementele matricei B_{IE} , situate sub diagonala principală la îndeplinirea condițiilor $i \neq j$; $i = k$ și $j = k + 1, k + 2, \dots, N$ se calculează cu relația $b_{ij} = b_{kk} = Z_0 + Z_{0i} = Z_0 + Z_{0k}$. Elementele b_{ij} plasate în coloana j și în rândul i sub diagonala principală a matricei B_{IE} se determină cu ajutorul relației

$b_{ij} = Z_0 + Z_{0k}$ la respectarea condițiilor $i \neq j$; $j = k + 1, k + 2, \dots, N$ și $i = k$. Coeficienții b_{ij} plasați în spațiul de sub diagonala principală formată din coeficienții b_{kk} a matricei B_{ij} au valorile egale cu elementele matricei A_{ij} pentru cazul că se îndeplinește condiția $i > k$.

Partea dreapta a ecuației matriciale (1) prezintă un vector transponat al tensiunilor electromotoare din circuitul examinat $Y = (E_{01}; E_{02}; E_{03}; \dots; E_{0(N-1)}; E_{0N}; -E_1; -E_2; -E_3; \dots; -E_{(N-1)}; -E_N)^T$. Deoarece linia electrică este alimentată de la sursa cu tensiunea electromotoare E_0 , care este determinată de rețeaua electrică centralizată, se va îndeplini condiția $E_{01} = E_{02} = E_{03} = \dots = E_{0(N-1)} = E_{0N} = E_0$.

Valorile curenților în circuitul examinat se face utilizând metoda Cramer de calculare a necunoscutelor din ecuația matricială (1), deci, valorile curenților în sarcinile racordate la linie se calculează cu relațiile:

$$I_{S1} = \frac{D_{Is1}}{D} = \frac{B_{Is1}}{B}, \quad I_{S2} = \frac{D_{Is2}}{D} = \frac{B_{Is2}}{B}, \dots, I_{S(n+1)} = \frac{D_{Is(n+1)}}{D} = \frac{B_{Is(n+1)}}{B}, \quad I_{S(N+1)} = \frac{D_{IsN}}{D} = \frac{B_{IsN}}{B}, \quad (2)$$

iar valorile curenților injectați de către sursele de generare distribuită în line se face cu aplicarea următoarelor expresii:

$$I_{E1} = \frac{D_{IE1}}{D} = \frac{B_{IE1}}{B}, \quad I_{E2} = \frac{D_{IE2}}{D} = \frac{B_{IE2}}{B}, \dots, I_{E(M+1)} = \frac{D_{IE(M+1)}}{D} = \frac{B_{IE(M+1)}}{B}, \quad I_{EM} = \frac{D_{IEM}}{D} = \frac{B_{IEM}}{B}. \quad (3)$$

Menționăm, că valorile calculate ale curenților sunt mărimi complexe. Deoarece impedanțele sarcinilor și a surselor din circuit se consideră mărimi cunoscute, avem posibilitatea de a determina profilul tensiunii în linie prin înmulțirea curentului la impedanța sarcinii:

$$U_k = I_{Sk} Z_{Sk} \quad (4)$$

4. Calcularea regimului rețelei arborescente

Vom determina valoarea curentului injectată de rețeaua centralizată în linia radială. Pentru aceasta ne vom folosi de prima teoremă a lui Kirhhgoff. Deoarece cunoaștem valorile curenților în porțiunile transversale ale circuitului este ușor de demonstrate, că valoarea curentului I_0 la intrarea în linie prezintă suma curenților în sarcini și a curenților injectați de către sursele distribuite de generare:

$$I_0 = \sum_{k=1}^n I_{Sk} + \sum_{p=1}^m I_{Ep} \quad (5)$$

Impedanța de intrare a liniei, considerând cunoscută tensiunea pe bare, se va determina din relația:

$$Z_{\text{int}} = \frac{E_0 - I_0 Z_0}{I_0} \quad (6)$$

iar tensiunea la intrarea liniei se va calcula cu ajutorul expresiei:

$$U_{\text{int}} = I_0 Z_{\text{int}}. \quad (7)$$

În caz, că de la linia principală pleacă ramificații, care de asemenea includ sarcini și surse de generare distribuită, acest circuit se poate echivala cu o linie cu topologie radială. Pentru aceasta se poate propune următorul algoritm de calcul al rețelei arborescente:

1. Considerăm, că în nodurile de ramificare cunoaștem valoarea tensiunii U_{nod} , cărui îi atribuim valoarea tensiunii rețelei de alimentare $U_{\text{int}} = E_0 = U_{\text{nod}}$.
2. Calculăm valoarea impedanței de intrare $Z_{\text{int.nod}}$ a ramificațiilor, utilizând formulele (1)-(7). Astfel în nodul de ramificare, paralel cu impedanța sarcinii Z_s și circuitul echivalent al sursei de generare

E_{nod} și impedanța internă $Z_{E_{nod}}$ a sursei de energie, apare o ramură suplimentară formată din impedanța $Z_{int.nod}$.

- Determinăm valoarea echivalentă a impedanțelor Z_S și $Z_{int.nod}$ pentru toate nodurile de ramificare. Prin aceasta revenim la topologia circuitului prezentată în figura 1.
- Pentru circuitul liniei cu topologie radială (a vedea fig.1), calculăm pentru schema echivalentă curenții în circuitele sarcinilor, inclusiv și în sarcinile echivalente a nodurilor de ramificare, utilizând relațiile (1)-(3). Utilizând formula (4) calculăm valorile complexe ale tensiunilor în punctele de record ale sarcinilor în schema echivalentă radială, inclusive și pentru nodurile de ramificare. Astfel, obținem valori mai precise ale tensiunilor în nodurile de record a liniei principale.
- Cunoscând valorile mai precise a tensiunilor U_{nod} în nodurile de ramificare, repetăm calculele pentru porțiunile ramificate ale circuitului, utilizând formulele (1)-(3). La efectuarea acestor calcule considerăm, că în formula (1) forța electromotoare $E_0 = U_{int.k}$, unde $U_{int.k}$ - este valoarea calculată cu formula (4) a tensiunii la prima iterație a procesului de calculare.
- Cunoscând valorile precizate a curenților în sarcinile circuitelor ramificate se determină o nouă valoare a curentului de intrare în porțiunile ramificate cu formula (5), iar impedanța de intrarea a ramificării se calculează cu formula $Z_{int.k} = \frac{U_{nod.k}}{\sum_{i=1}^{n_k} I_{Si} + \sum_{i=1}^{m_k} I_{Ei}}$, în care I_{Si} și I_{Ei} sunt valorile curenților în sarcinile și sursele de generare racordate la porțiunea ramificată a liniei.
- La următorul pas se repetă calculele conform pct.4 și pct.5. Astfel se obțin valorile mai precise ale curenților și profilului de tensiune în linia principală și în ramificările de la această linie principală.
- La necesitate, privind obținerea unui calcul mai precis, se pot efectua mai multe iterații consecutive de echivalare a circuitului rețelei arborescente după algoritmul prezentat de calcul.

5. Concluzie.

- S-a propus un procedeu unificat de calcul a regimului staționar în rețelele electrice cu topologie arborescentă, bazat pe descrierea schemei echivalente cu ecuația matricială în care în calitate de variabile independente sunt curenții în sarcinile și sursele de generare distribuită racordate la linie.
- Procedeu propus permite determinarea impedanțelor de intrare a porțiunilor ramificate a circuitului și urmare a acestora se simplifică schema echivalentă de calcul până la structura liniei radiale.
- Ridicarea preciziei calculării regimului staționar în rețeaua arborescentă se poate face prin promovarea a mai multora iterații ale calculării regimului (în ciclu) privind determinarea profilului tensiunii în linia principală și majorarea preciziei calculării regimului staționar, inclusiv a regimului staționar de avarie condiționat de scurtcircuit în diferite puncte ale liniei.
- Modificarea topologiei rețelei, inclusiv, a numărului de sarcini și surse de generare distribuită se face foarte ușor prin modificarea parametrilor sarcinilor și impedanțelor interne ale surselor de generare conectate la rețea.

Bibliografie

- БЕССОНОВ Л.А. *Теоретические основы электротехники. Электрические цепи*. Издание девятое переработанное и дополненное. М.: Высшая школа, 1996.-638с.
- http://www.energ.pub.ro/fisiere/audit%20electro/Cap_4.pdf. CAP. 4. *Regimuri de funcționare a instalațiilor electroenergetice*. pp.116-148.
- IACOBESCU Gh., IORDĂNESCU I., ȚENOVICI R. *Rețele electrice*. <http://www.electrotehnica.ecalificat.ro/wp-content/uploads/2012/11/pg-1-79.pdf>
- NEAGOE Andrei-Costin, ȘTEFANA Andreea-Georgiana. *Probleme de calitate a energiei la conectarea centralelor electrice fotovoltaice*. Energetica, nr.6/2014, Vol.62, ISSN 1453-2360. - pp.224-226.
- MANDIȘ A., LEONIDA T. *Influența generării distribuite asupra calității energiei electrice în rețelele electrice de distribuție*. Energetica, nr.6/2014, Vol.62, ISSN 1453-2360. - pp.227-231.
- BERZAN V., TIRSU M., ILIESCU P., POSTOLACHE P. *Calculation of Electric Circuit rules of Sources and Distributed Loads*. ICHQP 2014 16th International Conference on HARMONICS AND QUALITY OF POWER, Bucharest, Romania, 25-28 May, 2014.