A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2013

ANALIZA ANUMITOR SOLICITĂRI ÎN REŢEAUA DE MEDIE TENSIUNE

Partea a II-a

Bogdan NICOARĂ, Gabriela NICOARĂ

EQUIPEMENT STRESSES ANALYSIS IN MV NETWORKS

The paper presents a method for computing transients in power systems and practical results regarding the stresses on different equipment caused by lightning strokes on the phase conductor of a 20 kV distribution line.

Cuvinte cheie: regimuri tranzitorii, solicitări cu front rapid
Keywords: transitional schemes, solicitations to the front quickly

Atragem atenţia cititorului că numerotarea paragrafelor, a figurilor, a formulelor şi a tabelelor este făcută în continuarea părţii I-a a lucrării.

3.2 Bobina ideală

Circuitele electrice ale sistemului electroenergetic conţin nenumărate echipamente care prezintă cuplaje magnetice: generatorul sincron, transformatorul, fazele unei linii electrice trifazate etc. De aceea, in majoritatea cazurilor bobinele apar cu cuplaje mutuale. Există, totuşi, situaţii în care bobinele apar necuplate magnetic: bobine de compensare monofazate, bobine utilizate la tratarea neutrului, echipamente din instalaţiile de înaltă tensiune continuă (bobine de netezire, bobine anodice, părţi din filtre), inductanţele din schema echivalentă Thévenin pentru sistemul electroenergetic la o anumită

bară, elemente ale cuadripolilor prin care se aproximează linii electrice sau transformatoare, părţi din modelul consumatorului, modelarea caracteristicii dinamice a unui descărcător cu rezistenţă variabilă etc.

Pentru o bobină ideală caracterizată de inductanţa *L*, conectată între nodurile *k* şi *m*, se scrie următoarea ecuaţie de funcţionare:

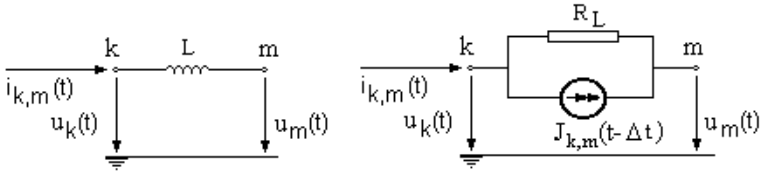

Fig. 3 Bobina ideală şi schema ei echivalentă

$$u_k(t) - u_m(t) = L \cdot \frac{di_{k,m}(t)}{dt} \tag{11}$$

Ecuaţia de mai sus se integrează între momentul *t- ∆t*, la care starea sistemului este cunoscută, şi momentul *t*, cu stare necunoscută. Rezultă:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} \left[u_k(y) - u_m(y)\right] dy = L \cdot \left[i_{k,m}(t) - i_{k,m}(t-\Delta t)\right] \tag{12}$$

Folosind, în relaţia (12), metoda trapezelor, se obţine:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{R_L} \cdot \left[u_k(t) - u_m(t)\right] + J_{k,m}(t-\Delta t) \tag{13}$$

unde:

$$J_{k,m}(t-\Delta t) = \frac{1}{R_L} \cdot \left[u_k(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)\right] + i_{k,m}(t-\Delta t) \tag{14}$$

iar:

$$R_L = \frac{2 \cdot L}{\Delta t} \tag{15}$$

Relaţia (13), care este un caz particular al teoremei I-a a lui Kirchhoff, conduce la schema echivalentă din figura 3.

Este important de subliniat că termenul $J_{k,m}(t-\Delta t)$ dat în relaţia (14) mai poate fi scris sub forma:

$$J_{k,m}(t-\Delta t) = \frac{2}{R_L} \cdot \left[u_k(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)\right] + J_{k,m}(t-2\Delta t) \tag{16}$$

Relaţia (14) este potrivită pentru scrierea condiţiilor iniţiale, iar relaţia (16) este bine a fi utilizată în bucla de timp deoarece, în acest fel, se

fac mai puţine operaţii decât dacă s-ar utiliza prima relaţie. Excepţie face cazul când se cere determinarea mărimii $i_{k,m}(t)$.

3.3 Condensatorul ideal

Este un dipol caracterizat printr-o capacitate care apare în schemele echivalente ale diferitelor echipamente:

- condensatoare serie sau derivaţie;
- capacităţi din cuadripolii ce modelează liniile electrice lungi;
- capacităţile diferitelor înfăşurări (transformatoare, generatoare, bobine de compensare, bobine de tratare a neutrului) mai ales în cazul fenomenelor tranzitorii rapide unde reactanţele inductive ωL devin atât de mari încât rezultatele ar fi eronate dacă nu s-ar introduce, în modele, capacităţile parazite;
- transformatoare de măsurare capacitive şi acele divizoare de tensiune ce cuprind condensatoare;
- generatoare de impuls de tensiune;
- echipamente din staţiile de convertoare, fie la utilizatori, fie legat de transportul la înaltă tensiune continuă;
- diferitele structuri metalice nelegate la pământ.

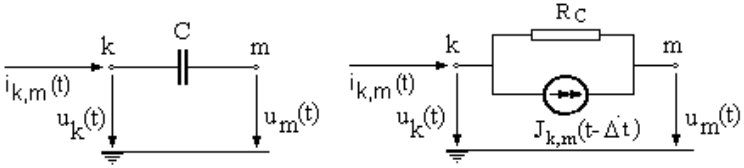

Fig. 4 Condensatorul ideal şi schema lui echivalentă

Fie un condensator ideal caracterizat de capacitatea *C*, conectat între nodurile *k* şi *m*. Ecuaţia lui de funcţionare este:

$$i_{k,m}(t) = C \cdot \frac{d\left[u_k(t) - u_m(t)\right]}{dt} \tag{17}$$

Ecuaţia de mai sus se integrează între momentul t- Δt, la care starea sistemului este cunoscută, şi momentul t, cu stare necunoscută. Rezultă:

$$\int_{t-\Delta t}^{t} i_{k,m}(y)dy = C \cdot \left[u_k(t) - u_m(t) - u_k(t-\Delta t) + u_m(t-\Delta t)\right] \tag{18}$$

Folosind, în relaţia (18), metoda trapezelor, se obţine:

$$i_{k,m}(t) = \frac{1}{R_C} \cdot \left[u_k(t) - u_m(t)\right] + J_{k,m}(t - \Delta t) \tag{19}$$

unde:

$$J_{k,m}(t - \Delta t) = -\frac{1}{R_C} \cdot \left[u_k(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)\right] - i_{k,m}(t - \Delta t) \tag{20}$$

și

$$R_C = \frac{\Delta t}{2 \cdot C} \tag{21}$$

Relaţia (19), care este un caz particular al teoremei 1 Kirchhoff, conduce la schema echivalentă din figura 4.

Este important de subliniat, ca şi în cazul bobinei ideale, că termenul $J_{k,m}(t - \Delta t)$ dat în relaţia (20) mai poate fi scris sub forma:

$$J_{k,m}(t - \Delta t) = -\frac{2}{R_C} \cdot \left[u_k(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)\right] - J_{k,m}(t - 2\Delta t) \tag{22}$$

Relaţia (20) este potrivită pentru scrierea condiţiilor iniţiale, iar relaţia (22) este bine a fi utilizată în bucla de timp deoarece, în acest fel, se fac mai puţine operaţii decât dacă s-ar utiliza prima relaţie. Excepţie face cazul când se cere determinarea mărimii $i_{k,m}(t)$.

3.4 Stabilirea ecuaţiilor nodale

În continuare se prezintă modul de stabilire a unei ecuaţii nodale, pentru determinarea regimului tranzitoriu în reţele electrice, cu ajutorul unui exemplu. O parte a schemei electrice este dată în fig.5; sunt reprezentate toate laturile incidente la nodul 1.

Ecuaţia nodală corespunzătoare nodului 1 este:

$$i_{1,2}(t) + i_{1,3}(t) + i_{1,4}(t) + i_{1,5}(t) = i_1(t) \tag{23}$$

Pentru elementele cu constante concentrate, ecuaţiile de funcţionare sunt date în continuare.

Pentru rezistorul ideal:

$$i_{1,2}(t) = \frac{1}{R} \cdot \left[u_1(t) - u_2(t)\right] \tag{24}$$

Pentru bobina ideală:

$$i_{1,3}(t) = \frac{1}{R_L} \cdot \left[u_1(t) - u_3(t)\right] + J_{1,3}(t - \Delta t) \tag{25}$$

$$J_{1,3}(t-\Delta t)=\frac{1}{R_L}\cdot\left[u_1(t-\Delta t)-u_3(t-\Delta t)\right]+i_{1,3}(t-\Delta t)$$

Pentru condensatorul ideal:

$$i_{1,4}(t)=\frac{1}{R_C}\cdot\left[u_1(t)-u_4(t)\right]+J_{1,4}(t-\Delta t) \qquad (26)$$

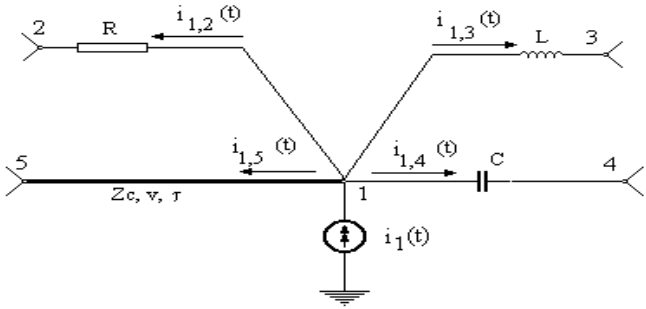

Fig. 5 Schema electrică exemplificatoare

$$J_{1,4}(t-\Delta t)=-\frac{1}{R_C}\cdot\left[u_1(t-\Delta t)-u_4(t-\Delta t)\right]-i_{1,4}(t-\Delta t)$$

Pentru linia electrică cu parametrii uniform repartizaţi, L_o şi C_o, fără pierderi, soluţia exactă de regim tranzitoriu este:

$$i_{1,5}(t)=\frac{1}{Z_c}\cdot u_1(t)+J_1(t-\tau) \qquad (27)$$

unde:

$$J_1(t-\tau)=-\frac{1}{Z_c}\cdot u_5(t-\tau)-i_{5,1}(t-\tau)$$

Introducând relaţiile (24)-(27) în relaţia (23), ecuaţia nodală devine:

$$\left(\frac{1}{R}+\frac{1}{R_L}+\frac{1}{R_C}+\frac{1}{Z_c}\right)\cdot u_1(t)-\frac{1}{R}\cdot u_2(t)-\frac{1}{R_L}\cdot u_3(t)-\frac{1}{R_C}\cdot u_4(t)= \\ =i_1(t)-J_{1,3}(t-\Delta t)-J_{1,4}(t-\Delta t)-J_{1,5}(t-\tau) \qquad (28)$$

Pentru orice tip de reţea cu *n* noduri se poate scrie un sistem de *n* ecuaţii ca cea de mai sus. În notaţie matriceală, sistemul se scrie:

$$[G]\cdot[u(t)]=[i(t)]+[J()] \tag{29}$$

unde: [*G*] este matricea simetrică a conductanţelor nodale, de dimensiune (*n,n*);

[*u(t)*] este vectorul celor *n* potenţiale ale nodurilor independente;

[*i(t)*] este vectorul celor *n* surse de curent la noduri, provenit din excitaţii exterioare;

[*J()*] este vectorul celor *n* surse de curent la noduri, cunoscut din paşii anteriori. Argumentul de timp a fost omis intenţionat, deoarece el nu este acelaşi pentru toate elementele vectorului.

Se consideră nul, potenţialul pământului.

Ecuaţia (29) este partiţionată într-o mulţime ***A*** a nodurilor cu potenţiale necunoscute şi o mulţime ***B***, a nodurilor cu potenţiale cunoscute. Potenţialele necunoscute se găsesc prin rezolvarea unui sistem algebric de ecuaţii lineare:

$$[G_{AA}]\cdot[u_A(t)]=[i_A(t)]+[J_A()]-[G_{AB}]\cdot[u_B(t)] \tag{30}$$

4. Concluzii

Această parte prezintă metoda cea mai utilizată astăzi de analiză a regimurilor tranzitorii în scheme electrice complexe.

În părţile următoare se prezintă aplicaţia metodei la o staţie electrică

BIBLIOGRAFIE

[1] Carson, J.R., *Wave propagation in overhead wires with ground return,* Bell Syst. Techn. Journal, vol.5, pag. 539-554, 1926.

[2] Pollaczek, F., *On the field produced by an infinitely long wire carrying alternating current,* Elektrische Nachrichtentechnik, vol.3, pag.339-359, 1926.

[3] Dommel, H.W., *Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks*. IEEE Trans. on PAS, PAS-88, nr.4, 1969.

Prof.Dr.Ing. Bogdan NICOARĂ
Departamentul de Sisteme Electroenergetice, UP Bucureşti
bnicoara@yahoo.fr
Dr. Gabriela NICOARĂ
director Consultanţă şi inginerie pentru sisteme electroenergetice, Bucureşti