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 I-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

1. Introducere

În cadrul acestei lucrări, se prezintă cea mai folosită metodă de determinare a regimurilor tranzitorii în instalaţiile de transport şi distribuţie a energiei electrice.

Lovirea conductorului activ de trăsnet are loc, mai aproape sau mai departe de staţie, undeva în deschiderea unei linii electrice aeriene. Canalul de trăsnet atinge conductorul activ şi generează două unde de tensiune ce se propagă pe linie, de o parte şi de alta a punctului de impact. Unda care se depărtează de staţie nu prezintă importanţă. Unda care se îndreaptă spre staţie, ajunge la stâlpul următor şi în funcţie de amplitudinea undei şi de caracteristicile izolaţiei care echipează faza, are sau nu are loc conturnarea izolaţiei liniei la nivelul stâlpului respectiv. În fine, unda ajunge la descărcătorul de linie, pentru liniile de 20 kV, unde are, sau nu are loc, amorsarea acestuia,

pentru descărcătoarele clasice, sau, pentru descărcătoarele cu oxizi metalici, se stabileşte un anumit curent prin acesta.

În continuare, în funcţie de configuraţia staţiei, unda de supratensiune se reflectă şi se transmite la fiecare nod întâlnit, se propagă mai departe pe barele staţiei, pe celulele celorlalte linii, pe celula de transformator etc.

Mai trebuie precizat că, în tot acest proces de propagare, undele de tensiune suferă atenuări, mai mult sau mai puţin importante, datorită descărcării corona şi disipărilor ce au loc în elementele rezistive ale echipamentelor.

2. Modelul arcului electric

Modelul arcului electric, pentru reprezentarea conturnării izolaţiei liniei, este format dintr-o rezistenţă variabilă în timp, pornind de la o valoare mare, la $t = 0$ şi scăzând, relativ repede la o valoare redusă, de 0,5 Ω care rămâne constantă pe toata durata arderii arcului de conturnare. În serie cu rezistenţa arcului, se află inductivitatea arcului de conturnare, care a fost estimată, pe baza datelor din literatura de specialitate, la 1 μH. Momentul amorsării arcului de conturnare inversă, este modelat printr-un întreruptor ideal, comandat în tensiune, având tensiunea de închidere egală cu valoarea rezultată din încercările de laborator.

3. Fundamentarea metodei de analiză

Metoda utilizată permite determinarea comportării în timp a reţelelor mono- sau multifazate. Numărul nodurilor anumitor scheme face necesară folosirea calculatoarelor numerice şi ca urmare, mărimile de stare ale schemei, tensiuni şi curenţi, nu pot fi calculate continuu ci doar la intervale de timp Δt. Acest pas de timp poate fi acelaşi pentru toată durata de calcul sau se poate modifica după un criteriu prestabilit.

Discretizarea ecuaţiilor impune manevrarea cu atenţie a ecuaţiilor de stare, deoarece pot apare erori de trunchiere care, în anumite condiţii, pot genera instabilitate numerică. Se ştie că regula de integrare prin metoda trapezelor a ecuaţiilor diferenţiale ordinare pentru inductivităţi şi capacităţi este simplă, convergentă din punct de vedere numeric şi suficient de precisă pentru scopuri inginereşti. De aceea s-a ales această metodă pentru discretizarea ecuaţiilor de funcţionare asociate elementelor cu parametrii concentraţi.

Tratarea elementelor cu parametrii uniform distribuiţi se face cu

metoda caracteristicilor, sau metoda lui Bergeron, [1, 2]. Înseamnă că R_0 şi G_0, rezistenţa şi respectiv, conductanţa lineică, sunt nule iar L_0 şi C_0, inductanţa şi respectiv, capacitatea lineică, sunt independente de frecvenţă (ulterior se va ţine seama de dependenţa lor de frecvenţă). Aproximaţia $G_0 = 0$ este în general acceptată deoarece este verificată în foarte bună măsură de practică. Singura excepţie este cazul apariţiei descărcării corona care trebuie tratat separat, având în vedere faptul că procesul este caracterizat de un prag de apariţie şi dispariţie.

Pierderile longitudinale se pot aproxima astfel: se împarte linia în două tronsoane egale, considerate fără pierderi, înseriindu-se câte un sfert din rezistenţa electrică totală a liniei la fiecare extremitate.

În acest fel, circuitul electric primar se transformă într-o schemă ce conţine numai rezistenţe, surse ideale de tensiune, surse ideale de curent şi întreruptoare ideale. Se consideră un pas de timp constant, Δt, ales în funcţie de cele mai ridicate frecvenţe ce pot apare în regimul tranzitoriu ce urmează a fi calculat. La momentul $t = 0$ sistemul se găseşte în starea iniţială care se determină cu metode specifice regimurilor permanente sau cu metoda prezentată aici (în funcţie de situaţia concretă). Urmează să se calculeze starea sistemului (potenţialele nodurilor independente) la momentele de timp Δt, $2\ \Delta t$, $3\ \Delta t$,... până la un t_{max} dorit. Pentru determinarea stării sistemului la momentul de timp t este nevoie de starea sistemului la momente de timp anterioare $t- \Delta t$, $t-2\ \Delta t$,... dar numai parţial şi anume:

- pentru linii - pe o durată egală cu durata de propagare pe linie,
- pentru inductivităţi şi capacităţi - valorile de la pasul anterior.

Metoda caracteristicilor şi regula trapezelor pot fi cu uşurinţă utilizate împreună într-un algoritm, cu caracter general, care să permită determinarea regimurilor tranzitorii într-o schemă oarecare alcătuită din elemente cu parametrii uniform distribuiţi şi elemente cu parametrii concentraţi [3].

3.1 Linia electrică monofazată fără pierderi (aeriană sau subterană)

Pentru o linie electrică cu parametrii uniform distribuiţi, considerată fără pierderi la această etapă a analizei, conectată între nodurile k şi m; într-un punct aflat la distanţa x de originea considerată, tensiunea dintre conductor şi pământ şi intensitatea curentului din conductor sunt legate prin relaţiile:

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = L_o \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = C_o \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \tag{1}$$

Originea spaţiului este considerată la nodul *k*, iar *x* = *l* la nodul *m*. Soluţia generală, dată de d'Alembert, se poate pune sub forma:

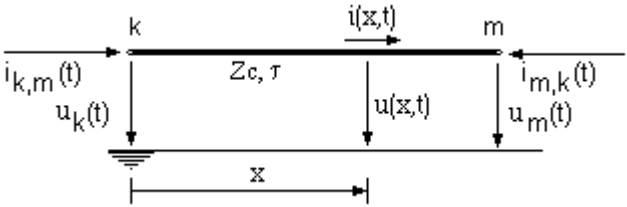

Fig. 1 Linia electrică monofazată

$$u(x,t) = f_1(x - v \cdot t) + f_2(x + v \cdot t) \tag{2}$$

şi

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_c}\left[f_1(x - v \cdot t) - f_2(x + v \cdot t)\right] \tag{3}$$

unde:

- f_1 şi f_2 sunt funcţii ce se determină din condiţiile de la extremităţi;
- $v = \frac{1}{\sqrt{L_o \cdot C_o}}$ - viteza de fază;
- $Z_c = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}}$ - impedanţa caracteristică.

Relaţiilor (2) şi (3) li se poate da următoarea interpretare: $f_1(x - v \cdot t)$ este o undă de tensiune ce se propagă, cu viteza *v*, în sensul crescător al axei *x*, iar $f_2(x + v \cdot t)$ este o undă de tensiune ce se propagă, cu viteza *v*, în sensul descrescător al axei *x*. Relaţiile (2) şi (3) se pot pune sub forma:

$$u(x,t) + Z_c \cdot i(x,t) = 2 \cdot f_1(x - v \cdot t) \tag{4}$$

şi

$$u(x,t) - Z_c \cdot i(x,t) = 2 \cdot f_2(x + v \cdot t) \tag{5}$$

Dacă în relaţia (4) se consideră *x-vt* = constant, atunci $u+Z_c\, i$ este constant. Altfel spus, pentru un observator fictiv, care se deplasează în sensul crescător al axei *x* cu viteza *v,* cantitatea *x-v t* este constantă şi deci şi $u+Z_c\, i$ este constantă. Dacă *l* este lungimea

liniei; rezultă că durata de propagare pe linie este: $\tau = l/v$. Pentru perechile *(0,t- τ)* şi *(l,t)*, se deduce că *x-vt* = constant şi deci rezultă:

$$u(0,t-\tau)+Z_c\cdot i(0,t-\tau)=u(l,t)+Z_c\cdot\left(-i\ \ (l,t)\right) \qquad (6)$$

sau:

$$i_{m,k}(t)=\frac{1}{Z_c}\cdot u_m(t)+J_m(t-\tau) \qquad (7)$$

unde:

$$J_m(t-\tau)=-\frac{1}{Z_c}\cdot u_k(t-\tau)-i_{k,m}(t-\tau) \qquad (8)$$

Un raţionament similar cu cel de mai sus, făcut pentru unda ce se propagă în sensul descrescător al axei *x*, conduce la relaţiile:

$$i_{k,m}(t)=\frac{1}{Z_c}\cdot u_k(t)+J_k(t-\tau) \qquad (9)$$

unde:

$$J_k(t-\tau)=-\frac{1}{Z_c}\cdot u_m(t-\tau)-i_{m,k}(t-\tau) \qquad (10)$$

Relaţiile (7) şi (9) reprezintă teorema I-a a lui Kirchhoff pentru schema electrică din figura 2:

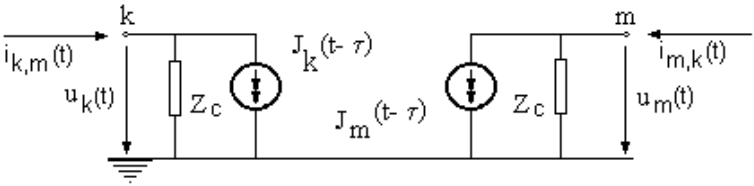

Fig. 2 Schema echivalentă a liniei fără pierderi

Din punct de vedere topologic nodurile la care este conectată linia nu mai sunt legate; starea nodului *k* se reflectă la nodul m prin intermediul sursei ideale de curent $J_m(t-\tau)$, după τ secunde.

Observaţie: Relaţiile (8) şi (10) mai pot fi scrise:

$$J_m(t-\tau)=-\frac{2}{Z_c}\cdot u_k(t-\tau)-J_k(t-2\tau)$$

$$J_k(t-\tau)=-\frac{2}{Z_c}\cdot u_m(t-\tau)-J_m(t-2\tau)$$

În această formă, sunt mai potrivite în bucla de timp, câtă vreme sub forma (8) şi (10), la iniţializarea calculelor în situaţia în care se porneşte de la condiţii iniţiale nenule ce nu se calculează prin program.

Modelul liniei conductor-pământ, fără pierderi, este utilizat de multă vreme la studiul regimurilor provocate de loviturile de trăsnet în conductorul de protecţie, în conductorul activ sau în vârful stâlpului. Utilizarea unui model simplu în aceste cazuri este justificată deoarece:

- este necesară analizarea doar a fazei lovite de trăsnet; tensiunile induse în fazele nelovite sunt mult mai mici;
- ipotezele făcute privind lovitura de trăsnet sunt discutabile, nejustificându-se modele complexe, rafinate pentru linie;
- riscul de conturnare al izolaţiei din staţiile electrice este cel mai mare pentru loviturile directe de trăsnet ce au loc în apropierea staţiei (până la aprox. 2 km). În aceste cazuri, undele de tensiune şi curent modale, corespunzătoare unei linii multifazate, sunt puţin distorsionate şi nici nu apar decalaje spaţiale importante între ele. Se justifică, astfel, modelarea doar a fazei lovite. De asemenea, se poate face abstracţie de rezistenţa conductorului deoarece, foarte probabil, atenuarea undelor va fi determinată de descărcarea corona de impuls şi nu de rezistenţa conductorului.

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 staţia electrică Chitila 110 / 20 kV. Au fost considerate diferite situaţii, s-au determinat regimurile tranzitorii corespunzătoare şi s-au calculat supratensiunile în punctele importante ale staţiei şi intensităţile curenţilor prin diferite laturi ale schemei electrice.

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