

Universitatea Politehnica Timișoara
Departamentul de Bazele Fizice ale Ingineriei

ing. Iulia CĂȚA

Analiza influenței parametrilor liniilor electrice
aeriene asupra regimurilor tranzitorii provocate de
avarii în subsisteme electroenergetice

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător științific,
Prof. dr. ing. Dumitru TOADER

2012

Această teză a fost parțial susținută de grantul strategic POSDRU/88/1.5/S/50783, proiect ID50783 (2009), co-finanțat de Fondul Social European - Investește în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

Cuprins

1. Introducere.....	5
1.1. Considerații generale.....	5
1.2. Structura tezei.....	8
1.3. Bibliografie.....	9
2. Model analitic pentru calculul câmpului magnetic creat de curenții din spire înfășurate elicoidal.....	11
2.1. Introducere.....	11
2.2. Calculul intensității câmpului magnetic din medii omogene în regim staționar.....	11
2.3. Calculul intensității câmpului magnetic pentru un conductor multifilar.....	15
2.4. Rezultate numerice.....	21
2.4.1. Spiră elicoidală.....	22
2.4.2. Conductor cu un strat.....	29
2.4.3. Conductor cu două straturi.....	34
2.4.4. Conductor cu trei straturi.....	47
2.5. Concluzii și contribuții.....	54
2.6. Bibliografie.....	56
3. Determinarea caracteristicilor magnetice ale oțelului folosit la conductoare multifilare (LEA).....	59
3.1. Introducere.....	59
3.2. Determinarea curbei de magnetizare a inimii de oțel.....	60
3.2.1. Metoda cu magnetometru.....	60
3.2.2. Metoda cu circuit magnetic deschis.....	62
3.2.3. Metoda cu circuit magnetic închis (metoda torului).....	64
3.3. Concluzii și contribuții personale.....	82
3.4. Bibliografie.....	84
4. Model numeric pentru calculul câmpului magnetic din interiorul conductoarelor LEA.....	87
4.1. Introducere.....	87
4.2. Modelul variațional al câmpului electromagnetic.....	88

4.2.1. Principiul lui Hamilton în teoria macroscopică a câmpului electromagnetic...	88
4.2.2. Modelul variațional al câmpului magnetic în regim cvasistaționar.....	88
4.3. Metoda elementului finit.....	89
4.3.1. Principiul metodei elementului finit.....	89
4.3.2. Element finit spațial tetraedric.....	91
4.4. Modelarea matematică a neliniarităților în analiza numerică a câmpului magnetic	92
4.5. Pachetul Software Vector Fields Opera 13.....	94
4.5.1. Determinarea potențialului scalar.....	97
4.5.2. Determinarea potențialului vector.....	99
4.5.3. Condițiile pe frontieră.....	100
4.6. Influența alegerii tipului de potențial asupra rezultatelor obținute.....	102
4.7. Calculul câmpului magnetic în medii liniare și omogene.....	105
4.8. Calculul câmpului magnetic în medii neomogene și nelineare.....	124
4.9. Determinarea fluxului magnetic din secțiunea conductoarelor LEA.....	140
4.9.1 Determinarea fluxului magnetic utilizând modelul numeric.....	141
4.9.2. Determinarea experimentală a fluxului magnetic	146
4.10. Concluzii și contribuții personale.....	151
4.11. Bibliografie.....	154
5. Inductivitatea liniilor electrice trifazate.....	157
5.1. Considerații generale.....	157
5.1.1. Calculul analitic al inductivității interne.....	157
5.1.2. Calculul analitic al inductivității exterioare.....	157
5.1.2.1. Calculul analitic al inductivității exterioare pentru un conductor.....	158
5.1.2.2. Calculul analitic al inductivității exterioare în cazul unui sistem monofazat.....	158
5.1.2.3. Calculul analitic al inductivității exterioare în serviciu de secvență pozitivă (directă) și negativă (inversă) în cazul unui sistem trifazat	159
5.2. Calculul numeric al inductivității interne	168
5.3. Calculul numeric al inductivității exterioare	172
5.4. Concluzii și contribuții personale	177
5.5. Bibliografie	178
6. Simularea numerică a regimului tranzitoriu într-un subsistem electroenergetic.....	181
6.1. Introducere.....	181
6.2. Simularea numerică a regimurilor tranzitorii provocate de un scurtcircuit trifazat...	183
6.3. Rezultate obținute prin simulare numerică.....	187
6.4. Concluzii și contribuții personale.....	196
6.5. Bibliografie.....	197
7. Concluzii generale și contribuții științifice personale	201
Anexa 1.....	205
Anexa 2.....	219

Asigurarea funcționării stabile a unui sistem electroenergetic sau a unui subsistem de acest tip presupune dotarea acestuia cu sisteme de monitorizare, protecții și automatizare cât mai eficiente. Un element perturbator important în funcționarea corectă a acestor sisteme este reprezentat de avariile (defectele) ce se produc intempestiv. Pentru limitarea consecințelor unei avarii sistemele electroenergetice (elementele din care acestea sunt compuse) sunt prevăzute cu sisteme de protecții [1, 2]. Progresul tehnic și științific din ultimii ani a influențat conceperea, proiectarea și realizarea sistemelor de protecție, astfel s-a ajuns în situația ca decizia de izolare față de sursă a unui element defect să se producă în zeci de milisecunde [1, 2, 3, 4, 5], deci înainte ca regimul tranzitoriu provocat de un defect să ajungă în regim stabilizat (componenta liberă a tensiunilor și curenților nu s-a anulat). Această situație impune o analiză mai precisă a evoluției în timp a tensiunilor și curenților pe durata regimurilor tranzitorii provocate de avarii în sistemele sau subsistemele electroenergetice. Cum componenta liberă a tensiunilor și curenților pe durata regimului tranzitoriu depinde de condițiile de defect și de parametrii elementelor din circuitul electric este evident că un calcul mai precis al evoluției în timp a tensiunilor și curenților impune cunoașterea mai exactă a valorii parametrilor elementelor ideale de circuit ce intervin în schemele echivalente asociate sistemelor și subsistemelor electroenergetice. Elementul cu cea mai mare extensie în sistemele sau subsistemele electroenergetice este reprezentat de liniile electrice, iar în cadrul acestora de liniile electrice aeriene. Din acest motiv în lucrare se abordează problema determinării mai precise a parametrilor longitudinali ai liniilor electrice aeriene. În literatura de specialitate [9, ..., 13] inductivitatea liniilor electrice este descompusă în două componente – inductivitatea externă corespunzătoare fluxului magnetic din exteriorul conductoarelor de fază și inductivitatea internă corespunzătoare fluxului magnetic din interiorul conductoarelor de fază. Calculul inductivității interne a conductoarelor multifilare, în literatura de specialitate [6, ..., 17] se face neglijându-se prezența inimii de oțel (curentul se consideră ca fiind uniform distribuit în zona de aluminiu și cea de oțel) și faptul că firele conductorului sunt înfășurate elicoidal peste inima de oțel (vectorul densitate de curent este considerat ca având direcția identică cu axa inimii de oțel).

Având în vedere complexitatea și extensia acestei probleme teza se limitează la calculul parametrilor de secvență pozitivă (directă), respectiv negativă (inversă) ai liniilor electrice aeriene. Acești parametri nu sunt afectați de existența sau nu a conductoarelor de gardă și nici de caracteristicile solului.

De asemenea, în teză se analizează modul în care parametrii de secvență directă și inversă ai liniilor electrice aeriene influențează evoluția în timp a tensiunilor și curenților liniilor cu defect pe durata regimurilor tranzitorii provocate de scurtcircuite trifazate.

Structura tezei

În **capitolul 1** se prezintă scopul tezei, problematica abordată, structura tezei, o scurtă introducere în domeniul abordat precum și stadiul actual al cercetărilor .

În **capitolul 2** se prezintă un model analitic pentru calculul câmpului magnetic creat de curenții din spire înfășurate elicoidal. Modelul analitic de calcul s-a realizat ținând cont de următoarele ipoteze simplificatoare: domeniul de existență al câmpului magnetic s-a considerat liniar și omogen (s-a neglijat magnetizarea inimii de oțel, deci permeabilitatea acesteia s-a considerat μ_0); firele din aluminiu (conductoare) reale s-au înlocuit cu unele filiforme parcurse de aceiași curenți și plasate în axul celor reale. Modelul analitic conceput s-a implementat în mediul de programare Wolfram Mathematica 7 pentru a putea analiza modul în care structura constructivă a conductoarelor multifilare (un strat, două straturi, trei straturi, lungimea acestora), dimensiunea pasului de înfășurare al straturilor și sensul de înfășurare al straturilor influențează câmpul magnetic din domeniul echivalent inimii de oțel.

Din studiul realizat au rezultat următoarele concluzii mai importante:

a) Modelul matematic conceput pentru calculul câmpului magnetic din interiorul conductoarelor multifilare care înlocuiește firele conductoare reale cu unele filiforme parcurse

de aceeași curenți și poziționate în axul firelor reale permite analiza câmpului magnetic în medii omogene, liniare și izotrope indiferent de structura conductorului multifilar.

b) Intensitatea câmpului magnetic din cilindrul peste care sunt înfășurate firele conductoare depinde de valoarea curentului din fiecare fir conductor, dar depinde și de numărul de straturi, de sensul de înfășurare al acestora și de pasul de înfășurare. La aceeași valoare a curentului intensitatea câmpului magnetic este maximă în cazul conductoarelor LEA cu un strat când pasul de înfășurare are valoarea minimă.

d) În cazul conductoarelor cu două straturi valoarea intensității câmpului magnetic în cilindrul peste care acestea sunt înfășurate este mult mai mică dacă cele două straturi sunt înfășurate în sens contrar decât atunci când cele două straturi au același sens de înfășurare. Valoarea minimă a intensității câmpului magnetic se obține atunci când pasul de înfășurare este maxim atât pentru stratul interior cât și pentru cel exterior.

e) În cazul conductoarelor cu trei straturi pentru a reduce valoarea intensității câmpului magnetic din interiorul cilindrilor peste care acestea sunt înfășurate stratul din mijloc trebuie să fie înfășurat în sens contrar decât stratul interior și exterior. Valoarea minimă se obține atunci când pasul de înfășurare pe fiecare din cele trei straturi are valoarea maximă.

i) Intensitatea câmpului magnetic din cilindrul peste care sunt înfășurate firele din aluminiu depinde de lungimea conductorului. Dacă conductorul conține mai mult de trei spire se poate accepta o valoare constantă pentru intensitatea câmpului magnetic în lungul conductorului exceptând prima și ultima spirală.

În **capitolul 3** s-au determinat caracteristicile magnetice ale oțelului folosit la conductoare multifilare (LEA). Inima de oțel a conductoarelor utilizate în construcția liniilor electrice aeriene (LEA) are rolul de a asigura rezistența mecanică necesară pentru ca solicitările mecanice la care conductoarele sunt supuse (greutate proprie, condiții meteo, ș.a.) să nu ducă la ruperea lor. Restricțiile impuse în dimensionarea inimii de oțel a acestor conductoare sunt determinate în principal de condițiile atmosferice și de mediu în care funcționează linia electrică [6, 10]. Din aceste motive fabricanții de conductoare LEA pun la dispoziția utilizatorilor, în ceea ce privește inima de oțel, doar caracteristici de natură mecanică și termică [7].

Determinarea parametrilor electrici ai conductoarelor LEA necesită cunoașterea constantelor de material de natură electrică și magnetică ale inimii de oțel. Deoarece pentru inima de oțel a conductoarelor multifilare LEA nu sunt furnizate în literatura de specialitate [18,..., 23] constantele magnetice de material a fost necesară determinarea lor experimentală.

Obiectivul acestui capitol a fost de a determina curba de magnetizare $B(H)$ a materialelor utilizate în construcția inimii de oțel a conductoarelor LEA. Pentru aceasta s-a folosit metoda torului, metoda circuitului magnetic deschis și magnetometrul cu probă vibrantă. S-a determinat curba $B(H)$ pentru inima de oțel a conductoarelor LEA având secțiunea 35 mm^2 , respectiv a celor cu secțiunea 50 mm^2 . Măsurătorile s-au efectuat în Laboratorul de Lichide Complexe al Academiei Române Filiala Timișoara, în Laboratorul de Nanomateriale a Facultății de Fizică din Universitatea de Vest Timișoara și în laboratoarele Departamentului de Bazele Fizice ale Ingineriei din Universitatea Politehnica Timișoara.

În cazul folosirii metodei torului s-au realizat două circuite magnetice din inima de oțel a conductoarelor LEA având secțiunea 35 mm^2 , respectiv a celor cu secțiunea 50 mm^2 peste care s-au plasat 3 bobine și anume: o înfășurarea de excitație distribuită uniform în lungul torului, o înfășurarea de măsură (1) distribuită uniform în lungul torului, o înfășurarea de măsură (2) concentrată.

Principalele concluzii rezultate în urmă efectuării determinărilor experimentale pentru a stabili caracteristicile magnetice ale oțelului utilizat la conductoarele LEA au fost:

a) Utilizând magnetometrul cu probă vibrantă pentru determinarea caracteristicilor magnetice, în Laboratorul de Lichide Complexe al Academiei Române Filiala Timișoara și în Laboratorul de Nanomateriale al Facultății de Fizică din cadrul Universității de Vest din Timișoara, s-au obținut aceleași rezultate. Probele au fost de formă cilindrică cu diametrul 2,7

mm, respectiv lungime de 3,2 mm și 4mm. Determinările experimentale au evidențiat ca fiind foarte slab fenomenul de magnetizare, permeabilitatea relativă având valoarea maximă 5,544. De asemenea, determinările experimentale au evidențiat faptul că probele nu prezintă ciclu de histerezis.

b) Determinarea experimentală a caracteristicilor magnetice în circuit magnetic deschis utilizând o probă de formă cilindrică cu diametru 2,7 mm și lungime 119,4 mm cu ajutorul instalației calibrate având o eroare de maxim 1% din Laboratorul de Nanomateriale a Facultății de Fizică din Universitatea de Vest Timișoara, care folosește un câmp magnetic cu variație sinusoidală în timp și frecvența 50 Hz a condus la cu totul alte rezultate decât cele obținute cu magnetometrul. Proba din oțel prezintă ciclu de histerezis, având inducția magnetică remanentă $B_r = 1,26$ T și intensitatea câmpului magnetic coercitiv $H_c = 2,25$ kA/m. Permeabilitatea magnetică relativă are valoarea maximă $\mu_{r_max} = 308,5$ și se obține la intensitatea a câmpului magnetic de $H = 2,67$ kA/m, iar permeabilitatea magnetică relativă are valoarea minimă $\mu_{r_min} = 65,04$ care se obține la intensitatea a câmpului magnetic de $H = 0,27$ kA/m. Aceste caracteristici au aratat că oțelul utilizat în construcția conductoarelor LEA se încadează în categoria materialelor magnetice moi.

c) Comparând caracteristicile magnetice ale oțelului obținute cu ajutorul magnetometrului cu probă vibrantă, cu cele din regim variabil, în circuit deschis la 50 Hz, s-a constatat comportamentul diferit al oțelului. Fenomenul de magnetizare este mult mai pronunțat în regim variabil astfel magnetizația $M = 1500$ kA/m se obține în primul caz pentru $H = 625$ kA/m, iar în regim variabil dinamic pentru $H = 20$ kA/m.

d) Comparând între ele curbele de magnetizare determinate considerând înfășurarea de măsură distribuită și concentrată pentru circuitul magnetic realizat din inima de oțel a conductorului multifilar LEA cu secțiunea 35 mm^2 și pentru circuitul magnetic realizat din inima de oțel a conductorului multifilar LEA cu secțiunea 50 mm^2 rezultă că nu sunt diferențe mari. Deci pentru determinarea curbei de magnetizare poate fi utilizată înfășurarea de măsură concentrată. Comparând în schimb aceste curbe de magnetizare cu cea determinată în circuit deschis, având inima de oțel a conductorului multifilar LEA cu secțiunea 35 mm^2 , se constată diferențe acceptabile din punct de vedere tehnic.

e) Pentru determinarea curbei de magnetizare a oțelului utilizat în construcția conductoarelor LEA poate fi utilizată cu succes metoda torului, iar bobina de excitație și de măsură pot fi concentrate. Aceste bobine se realizează mult mai ușor, și pot fi folosite pentru mai multe circuite magnetice realizate din oțelul utilizat în construcția conductoarelor LEA.

f) Oțelul utilizat în construcția conductoarelor LEA fiind un material magnetic nelinear trebuie să se cunoască curba de magnetizare pentru a putea calcula inductivitatea internă a acestor conductoare, deoarece în regim de avarie valorile curenților prin conductoarele de fază pot crește foarte mult, deci se pot modifica parametri acestora în limite largi.

În **capitolul 4** s-a analizat numeric câmpul magnetic din interiorul conductoarelor multifilare (LEA), cu ajutorul pachetului de programe, utilizând metoda elementelor finite, Vector Fields Opera. S-a calculat câmpul magnetic din interiorul conductoarelor LEA fără a lua în considerare prezența inimii de oțel (s-a considerat permeabilitatea magnetică a acesteia μ_0), iar rezultatele obținute s-au comparat cu cele determinate utilizând modelul analitic, (capitolul 2 – programul de calcul în mediul de programare Wolfram Mathematica). Această analiză s-a făcut cu scopul de a constata în ce măsură ipoteza simplificatorie folosită pentru stabilirea modelului analitic de calcul al câmpului magnetic în cazul conductoarelor înfășurate elicoidal, și anume înlocuirea firelor reale cu unele filiforme plasate în axul celor reale și parcurse de aceiași curenți, este acceptabilă pentru calculul câmpului magnetic în situația precizată. În modelul numeric de calcul al câmpului magnetic s-a ținut cont de dimensiunile reale ale firele conductoare.

Calculul câmpului magnetic în interiorul conductoarelor LEA având în vedere prezența inimii de oțel nu poate fi făcut folosind modelul analitic, prezentat în capitolul 2, motiv pentru care s-a utilizat modelul numeric. Analiza câmpului magnetic în medii

neomogene și neliniare cu ajutorul pachetului de programe Vector Fields Opera a necesitat cunoașterea curbei de magnetizare a oțelului din interiorul conductoarelor multifilare (LEA), determinată în capitolul 3.

În acest capitol s-a calculat inducția magnetică, respectiv fluxul magnetic din interiorul conductoarelor LEA având secțiunea 35 mm^2 , 50 mm^2 , 120 mm^2 , ținând cont de pașii de înfășurare reali ai firelor conductoare, iar pentru a valida modelul numeric de calcul al câmpului magnetic, rezultatele obținute s-au comparat cu cele determinate experimental.

Principalele concluzii ce au rezultat în urma studiului realizat sunt:

a) Comparând rezultatele obținute utilizând modelul numeric de calcul al câmpului magnetic implementat în pachetul de programe Vector Field Opera cu cele obținute utilizând modelul analitic pentru calculul câmpului magnetic implementat în mediul de programare Wolfram Mathematica în medii omogene și liniare, au rezultat diferențe mici între cele două metode de calcul a câmpului magnetic. Diferențe mai mari s-au obținut în punctele situate în apropierea firelor din aluminiu. Deci înlocuirea firelor de aluminiu a conductoarelor LEA cu unele filiforme plasate în axul celor reale este acceptabil pentru calculul câmpului magnetic cu excepția zonei din apropierea firelor din aluminiu. Analizând câmpul magnetic în funcție de raza cilindrului s-a obținut o diferență de aproximativ 19% la suprafața cilindrului, eroare care a apărut din cauză că în modelul analitic implementat în mediul de programare Wolfram Matematica s-au considerat firele de aluminiu filiforme, folosind pentru calculul câmpului magnetic relația lui Biot-Savart-Laplace, pe când în modelul numeric în element finit spațial implementat în pachetul de programe Vector Fields Opera s-a luat în considerare grosimea reală a firelor de aluminiu.

b) Din analiza câmpului magnetic în funcție de lungimea conductorului s-a constatat că valoarea câmpului magnetic crește la începutul și la sfârșitul conductorului și rămâne constantă în rest, de unde rezultă că dacă conductorul conține mai mult de trei spire intensitatea câmpului magnetic din axul cilindrului se poate considera constantă în raport cu lungimea conductorului, exceptând prima și ultima spirală.

c) În cazul conductorului cu un strat influența pasului de înfășurare asupra câmpului magnetic din interiorul conductorului multifilar este semnificativă, valoarea intensității câmpului magnetic în axul cilindrului când lungimea pasului este minimă (81 mm) și firele din aluminiu sunt distribuite pe un strat este cu 39,85% mai mare decât atunci când pasul de înfășurare este maxim. Rezultatele obținute cu cele două modele de calcul (numeric și analitic) sunt practic identice.

d) Din comparația fluxului magnetic din interiorul conductorului determinat experimental cu cel calculat utilizând modelul numeric implementat în pachetul de programe Vector Fields Opera au rezultat diferențe mici (maxim 4,79% în cazul conductorului cu secțiunea 35 mm^2 , maxim 8,08% în cazul conductorului cu secțiunea 50 mm^2 , maxim 7,43% în cazul conductorului cu secțiunea 120 mm^2). Acest rezultat ne permite să afirmăm că modelul numeric implementat în pachetul de programe Vector Field Opera poate fi utilizat cu succes în calculul câmpului magnetic din interiorul conductoarelor multifilare cu inimă de oțel sau fără când firele sunt înfășurate elicoidal.

În **capitolul 5** s-a calculat numeric, folosind pachetul de programe în element finit Vector Fields Opera, inductivitatea internă și exterioară în serviciu de secvență directă și inversă a liniilor electrice aeriene și s-au comparat rezultatele obținute cu cele analitice. În literatura de specialitate [6, 9, ..., 12], pentru calculul inductivității conductoarelor LEA fluxul magnetic total se împarte în două componente și anume componenta din interiorul conductorului (internă), respectiv cea din exteriorul conductorului (exterioară). Corespunzător celor două componente ale fluxului magnetic se definesc inductivitatea internă și inductivitatea exterioară a conductorului. Pentru calcul inductivității interne conductoarele multifilare LEA se echivalează cu conductoare omogene de formă cilindrică având raza identică cu cea a conductoarelor reale, în care curentul este uniform distribuit. Considerând

lungimea conductorului 1km, pentru inductivitatea internă se obține valoarea $L_i = 0,05mH / km$.

Pentru calculul numeric al inductivităților exterioare conductoarelor de fază ale liniilor electrice aeriene trifazate s-a utilizat pachetului de programe în element finit Vector Fields Opera și s-au considerat trei tipuri de coronamente [6, 11] având conductoarele de fază dispuse în vârfurile unui triunghi isoscel, în vârfurile unui triunghi oarecare, respectiv dispuse orizontal. În literatura de specialitate [6, 9,..., 12] la calculul inductivităților exterioare conductoarelor de fază ale unei linii electrice aeriene trifazate se consideră dispunerea conductoarelor de fază în vârfurile unui triunghi echilateral, iar lungimea laturi este egală cu distanța medie geometrică dintre conductoare.

Din studiul au realizat următoarele concluzii mai importante:

- a) Modelul prezentat în literatură pentru calculul inductivității interne nu ține seama de prezența câmpului magnetic în inima de oțel motiv pentru care utilizarea lui conduce la erori inacceptabile.
- b) Pentru determinarea inductivității interne a conductoarelor multifilare este necesar să se țină seama de faptul că firele conductorului sunt înfășurate elicoidal peste inima de oțel, precum și de caracteristicile magnetice ale materialului din care este realizată inima de oțel. Pentru conductoarele cu două straturi inductivitatea internă poate fi neglijată, iar pentru cele cu trei straturi se poate utiliza pentru inductivitate internă valoarea din literatură.
- c) Comparând inductivitatea de secvență directă (inversă) a LEA determinată analitic cu cea calculată numeric pentru conductorul cu un strat rezultă o eroare de aprox. 19%.
- d) Calculul numeric al inductivității exterioare cu ajutorul modelului implementat în pachetul de programe Vector Fields Opera conduce la valori foarte apropiate de cele obținute cu modelul analitic.
- e) Calculul numeric al inductivității exterioare a conductoarelor de fază nu necesită înlocuirea situației reale (coronament orizontal, triunghi oarecare, triunghi isoscel) cu una echivalentă fictivă (triunghi echilateral) deci se elimină erorile introduse prin echivalare.

În **capitolul 6** s-a simulat numeric utilizând mediul de programare PSpice regimul tranzitoriu provocat de scurtcircuite trifazate pentru a analiza modul în care parametrii longitudinali ai liniilor electrice influențează componenta liberă din curenții de defect.

Analiza modului în care parametrii liniei pe care se produce scurtcircuitul trifazat influențează componenta liberă a curenților de defect impune modificarea acestor parametrii. În studiu s-au considerat pentru lungimea liniei până la locul de defect valorile 5 km, 10 km, 20 km. Pentru fiecare din cele trei situații s-a considerat că inductivitatea liniei are valorile: cea din literatură; majorată cu 18 % față de cea din literatură; majorată cu 36 % față de cea din literatură; micșorată cu 5 % față de cea din literatură.

S-au ales aceste valori pentru inductivitatea liniei deoarece din calculele efectuate (Capitolul 5), în care s-a ținut seama de faptul că firele din aluminiu sunt înfășurate elicoidal peste inima de oțel, a rezultat o creștere a inductivității de maxim 19,7% în cazul conductoarelor cu un strat și o micșorare a inductivității cu maxim 5% în cazul conductoarelor LEA cu două straturi înfășurate în sens contrar.

Verificarea modului în care faza inițială a tensiunii la locul de defect influențează valoarea componentei libere a curenților de defect s-a făcut considerând coeficientul componentei aperiodice $\sin(\varphi - \alpha)$ din expresia curentului [25] de regim tranzitoriu într-un circuit R-L, unde φ reprezintă defazajul dintre tensiune și curent, iar α faza inițială a tensiunii, ca având valorile 0, 0,5, 1.

Din studiul au rezultat următoarele concluzii mai importante:

- a) Metoda simulării numerice a regimurilor tranzitorii provocate de defectele ce se pot produce în rețelele electrice reprezintă o metodă eficientă de analiză a acestor defecte. Precizia rezultatelor obținute prin simularea numerică a regimului tranzitoriu utilizând mediul de programare PSpice depinde în principal de gradul în care sunt cunoscuți parametrii ce intervin în circuitele electrice echivalente subsistemului electroenergetic analizat.

- b) Faza inițială a tensiunii pe care se produce defectul influențează mult componenta aperiodică ce se manifestă pe durata regimului tranzitoriu, valorile cele mai mari rezultând atunci când faza inițială a tensiunii de fază satisface relația $\alpha - \varphi = \pi/2$, unde φ este defazajul dintre tensiune și curent în regim stabilizat.
- c) Prin modificarea valorii parametrilor ce intervin în schema electrică a simulatorului numeric se poate reproduce orice subsistem electroenergetic, ceea ce conferă o mare flexibilitate simulatorului realizat.
- d) Un rol important în simularea bobinei trifazate cu conexiune zig-zag, utilizată pentru realizarea nului artificial al rețelei electrice de medie tensiune, în mediul de programare PSpice, îl are valoarea coeficientului de cuplaj, deci pentru a reproduce cât mai exact bobina este necesar să se cunoască, cu precizie ridicată, acest coeficient dacă defectul analizat este dezechilibrat (defecte monofazate sau bifazate).
- h) Parametrii de secvență pozitivă și negativă ai liniei electrice aeriene pe care se produce scurtcircuitul trifazat influențează valoarea curentului de șoc, valoarea maximă a curentului în regim stabilizat și durata regimului tranzitoriu cu cât sursa echivalentă este de putere mai mare.

Principalele **contribuții științifice personale** din teză au fost:

- a) Conceperea modelului analitic de calcul al câmpului magnetic creat de curenții ce parcurg firele conductoarelor multifilare în medii magnetice liniare și omogene, și implementarea acestui model în pachetul de programe Wolfram Mathematica.
- b) Analiza dependenței câmpului magnetic, creat de curenții ce parcurg firele conductoarelor multifilare în medii magnetice liniare și omogene, funcție de caracteristicile conductoarelor (pasul de înfășurare, lungimea conductorului, dimensiunile firelor conductoare, coordonatele punctului curent (mobil) din domeniul de existență al câmpului magnetic).
- c) Conceperea modelului de calcul al câmpului magnetic utilizând metoda elementului finit implementat în pachetul de programe Vector Fields Opera.
- d) Analiza câmpului magnetic creat de curenții ce parcurg firele conductoarelor multifilare în medii magnetice neliniare și neomogene de caracteristicile conductoarelor.
- e) Conceperea și realizarea montajului necesar determinării curbei de magnetizare a oțelului utilizat în fabricarea conductoarelor LEA având secțiunea 35 mm^2 , respectiv 50 mm^2 .
- f) Calculul parametrilor de secvență pozitivă (directă) și negativă (inversă) ai conductoarelor de fază ale liniilor electrice aeriene ținând seama de caracteristicile reale ale acestora (dimensiunile firelor din aluminiu, modul de plasare al acestora în straturi, prezența inimii de oțel, pasul de înfășurare al firelor din aluminiu peste inima de oțel și neliniaritatea acesteia, sensul de înfășurare al firelor din aluminiu, lungimea conductoarelor).
- g) Conceperea și implementarea în mediul de programare PSpice a schemei echivalente subsistemului energetic real în vederea analizei regimului tranzitoriu provocat de avarii.
- h) Analiza modului în care parametrii de secvență pozitivă (directă) și negativă (inversă) ai conductoarelor de fază aferente unei linii electrice influențează evoluția în timp a tensiunilor și curenților pe durata regimului tranzitoriu provocat de un scurtcircuit trifazat.

Se impune ca în viitor analiza să fie continuată și pentru parametrii de secvență zero (homopolară) ai liniilor electrice aeriene pentru a putea analiza evoluția în timp a curenților și tensiunilor pe durata regimurilor tranzitorii provocate de defecte nesimetrice (scurtcircuite monofazate, scurtcircuite bifazate, scurtcircuite bifazate cu nul, întreruperi de conductoare). Un element important în stabilirea valorii parametrilor de secvență zero o au pământul și prizele de pământ care intervin în defectele nesimetrice.

Bibliografie - selecție

- [1] Ivașcu C., *Automatizarea și protecția sistemelor electroenergetice*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999.
- [2] Ulianov S. A., *Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice*, Ed. Tehnică București 1967.

- [3] Pinte N., Nitu C., Munteanu C., Diaconu I., Merdan E., Oltean M., *TIS Cultural Filtration, Implemented within the Directional Relay Structure*, Acta electrotehnica Special ISSUE, 2008, pp 39 - 46.
- [4] Diaconu I., Hațegan I., Pinte N., Toader D., *The Protective Block for Medium Voltage Networks*, Acta electrotehnica Special ISSUE, 2008, pp 91 – 94.
- [5] Toader D., Rușeț P., Deaconu I., Hațegan I., Pinte N., *Selective detection of simple and double grounding in the medium electrical voltage networks with compensated null*. Proceeding of the Power Tech 2009 București, CD.
- [6] Rucăreanu C., Militaru P., Hotoboc V., Chiricescu V., Prioteasa V., *Linii electrice aeriene și subterane*, Editura Tehnică, București, 1989.
- [7] *** IPROEB, *Conductoare neizolate pentru linii electrice aeriene*, 2007.
- [8] SR CEI 61089, *Conductoare pentru linii electrice cu sârme rotunde, cablate în straturi concentrice*, 1996.
- [9] Bercovici N., Arie A., Poeată A.: *Rețele electrice. Calcul electric*, Editura Tehnică București 1974.
- [10] Iacobescu Gh., Iordănescu I., ș.a., *Rețele electrice*, Editura Didactică și Pedagogică București 1981.
- [11] Eremia M, Song Y. H., Buta A., Lustrea B., Nemes M, ș.a., *Electric Power System Vol 1, Electric Networks*, Editura Academiei Române, București 2006.
- [12] Buta A.: *Transportul și distribuția energiei electrice*, Litografia Institutului Politehnic „Traian Vuia” din Timișoara, 1991.
- [13] Poeată A., Arie A., Crișean O., Eremia M., Alexandrescu V., Buta A.: *Transportul și distribuția energiei electrice*, Editura Tehnică, București, 1981.
- [14] Toshiharu T., *Inductance calculation for helical conductors*, Institute Of Physics Publishing Supercond. Sci. Technol. 18 (2005) 214–222.
- [15] Tominaka T., *Analytical field calculations for various helical conductors*, IEEE Transation Applied Superconductor, 14 1838–41, 2004.
- [16] Tominaka T., *Calculations using the helical filamentary structure for current distributions of a six around one superconducting strand cable and a multifilamentary composite*, J. Appl. Phys. 96 5069–80, 2004.
- [17] Chester S., *Formula for the inductance of a helix made with wire of any section*, Scientific papers of the bureau of standards, no. 537, vol. 21, November 10, 1926.
- [18] Chicina s I., *Mărimi magnetice de material*, Editura Casa cărții de știință, Cluj-Napoca, 2002.
- [19] Creț R., Darabant L., Turcu A. *Materiale dielectrice și magnetice*, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 2008.
- [20] Helerea E., *Materiale pentru electrotehnica si electronica*. Editura Matix Rom, București, 2003.
- [21] Popescu Ch., Ifrim A., Cedighian S., Lefter C., Nicolae M., Ichim D., *Materiale electrotehnice. Proprietăți și utilizări*, Editura Tehnică, București, 1976.
- [22] Spaladin N. A., *Magnetic materials*. University Press, Cambridge, 2003.
- [23] *** *Materiale și materiale magnetice*. Institutul Român de Standardizare, București, 1980.
- [24] Șora C., *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [25] Șora C., De Sabata I., Bogoevici N., Daba D., ș.a. *Bazele electrotehnici. Teorie și Aplicații*, Editura Politehnica, Timișoara, 2012.
- [26] Căta I., Păunescu D., Toader D., *Calculation of Magnetic Field Intesity Vector for a Helical* International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE, 27-29 April 2011, Lisabona, Portugalia.
- [27] Căta I., Toader D., *Computation of magnetic flux in a helical multiple conductor with finite element method*, The 2nd International Conference on Mathematical Models for Engineering Science, MMES 2011, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spania, Decembrie 2011.
- [28] Toader D., Haragus St., Deaconu I., Hategan I., Pinte N., Cata I., *Selective detection of simple grounding faults in the medium voltage power networks with resonant earthed neutral*, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE-OPTIM 2010, Moeciu, Brașov, Romania, (CD), Mai 2010.
- [29] Căta I., Arvinti B., Toader D., *The Influence of the Steel Core of a Multiple Conductor on the Internal Inductance*, 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, IEEE-OPTIM 2012, Moeciu, Brașov, Romania, (CD), Mai 2012.