

Dr. ing. Ioan C. POPA

Profesor la Facultatea de Inginerie electrică
Universitatea din Craiova

ECHIPAMENTE ELECTRICE

Bazele teoretice

Vol. 1



Editura UNIVERSITARIA
Craiova, 2017

Referenți :

Prof. univ. dr. ing. Iuliu DELESEGA, Universitatea POLITEHNICA din Timișoara

Prof. univ. dr. ing. Eugen HNATIUC, Universitatea Tehnică « Gh. Asachi » din Iași

Copyright © 2017, Ioan C. POPA

Toate drepturile rezervate

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

POPA, IOAN

Echipamente electrice : bazele teoretice / dr. ing. Ioan Popa. - Craiova :
Universitaria, 2017-

vol.

ISBN 978-606-14-1245-7

Vol. 1. - 2017. - Conține bibliografie. - ISBN 978-606-14-1246-4

62

Editare și desene : Ioan C. POPA

Coperta : Lucian MANDACHE

Cuvânt înainte

Domnul Profesor Dr. Ing. Ioan C. Popa, de la Facultatea de Electrotehnică a Universității din Craiova, propune o carte intitulată *Echipeamente electrice*, care valorifică atât competențele profesionale ale autorului, după o activitate de peste 40 de ani în acest domeniu, cu cunoașterea lucrărilor din diverse centre universitare din țară sau din străinătate (Montréal, Moscova, Sofia, București, Iași, Timișoara etc.), cât și experiența proprie, acumulată prin valoroasa cercetare științifică desfășurată în tot acest timp.

Structura cărții este organizată de autor în două volume, astfel: volumul I cuprinzând capitolele *Probleme generale ale echipamentelor electrice*, *Procese fundamentale de comutație*, *Solicitări electrodinamice*, *Procese termice*, *Contacte electrice* și respectiv volumul al II-lea, cuprinzând capitolele *Electromagneți*, *Izolația echipamentelor electrice*, *Arcul electric în aparatele de comutație*.

Primul dintre aceste două volume propus acum de autor, destinat prezentării bazelor teoretice ale funcționării și exploatării echipamentelor electrice, are peste 350 de pagini, 5 capitole, două anexe și o utilă și actuală listă de referințe bibliografice, adresându-se studenților, masteranzilor și doctoranzilor facultăților de profil dar și specialiștilor care lucrează în domeniul exploatării, proiectării sau cercetării în domeniul acestor echipamente electrice.

Capitolul 0 prilejuiește autorului acestei cărți prezentarea unor probleme generale, valabile pentru toate echipamentele electrice, cum ar fi locul și rolul echipamentelor electrice în instalațiile electrice, precizând funcțiile respectiv parametrii lor nominali.

Capitolul 1, intitulat *Procese fundamentale de comutație*, este dedicat de Domnul Profesor Doctor Inginer Ioan C. Popa informării cititorilor cu privire la fenomene tipice referitoare la funcționarea echipamentelor în regim normal sau de defect, (cum ar fi procesele de scurtcircuit, tensiunea tranzitorie de restabilire, deconectarea circuitelor în situații speciale de exploatare a rețelelor electrice etc.), precizându-se modul de calcul și mărimile lor caracteristice.

Următorul capitol al cărții propuse, ce se referă la *Solicitări electrodinamice*, precizează metodele de calcul a forțelor electrodinamice și modul de aplicare a metodelor de calcul a forțelor electrodinamice pentru diferite configurații ale căilor de curent, tipice pentru echipamentele electrice, explicitând și noțiunea de stabilitate electrodinamică a echipamentelor electrice. Aplicațiile specifice din acest capitol favorizează o mai bună înțelegere a acestui domeniu.

În Capitolul 3 al lucrării, intitulat *Procese termice*, se abordează fenomenele de încălzire-răcire a căilor de curent în regim normal de funcționare sau în regim de defect, urmărindu-se definirea distribuției spațiale a temperaturii

în regim staționar, a distribuției spațio-temporale ca urmare a propagării câmpului termic, precizându-se în final noțiunea de stabilitate termică a echipamentelor electrice. Aplicațiile care însoțesc acest capitol ajută pe cititor la dobândirea unor competențe specifice utile cu privire la câmpul termic.

Capitolul 4 numit *Contacte electrice* prilejuiește autorului lucrării prezentarea unora dintre cele mai importante componente ale echipamentelor electrice, precizând procesele fizice ce intervin, factorii de influență ce intervin ca și relația dintre căderea de tensiune pe contact și temperatura contactului; se comentează comportarea contactelor echipamentelor electrice în procesele de comutație și importanța eroziunii contactelor pentru exploatarea echipamentelor electrice, anunțând importanța materialelor și a soluțiilor constructive de realizare a contactelor electrice, aplicațiile atașate dovedindu-și deplin utilitatea.

Cartea propusă de Domnul Profesor Doctor Inginer Ioan C. Popa mai cuprinde și două Anexe intitulate *Calculul sistemelor de bare trifazate* și respectiv *Pierderile suplimentare în conductoare masive prin efectele pelicular și de proximitate* care se constituie în instrumente de mare importanță pentru toți cei ce își desfășoară activitatea de cercetare-proiectare în domeniul echipamentelor electrice.

Putem aprecia că această carte de Echipamente electrice volumul I a Domnul Profesor Doctor Inginer Ioan C. Popa reprezintă o apariție editorială remarcabilă, care valorifică experiența personală a autorului dar pune în evidență tradiția școlii de Aparate și Echipamente electrice a facultății de Electrotehnică din Craiova, amintindu-ne de înaintași, profesorii Bercu Herșcovici, Grigore A. Cividjian, Alexandru Peicov.

Așteptăm deci cu interes cel de al doilea volum al lucrării.

Iași, mai 2017

Prof. Univ. Dr. Ing. Eugen Hnatiuc
Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” din Iași



REFERAT

asupra lucrării „**ECHIPAMENTE ELECTRICE, Vol. 1: Bazele teoretice**”

autor prof. univ. dr. ing. Ioan C. Popa

Cadrul tehnologic suport al tuturor minunilor de telecomunicații, de electronică, inclusiv calculatoare, se sprijină pe dispozitivele cu care se conectează sau se deconectează necesarul energiei electrice pentru arii consumatoare de talia unei regiuni, oraș, platformă industrială, sau chiar apartament de unde în final, primesc alimentare directă sau indirectă aceste minuni. Soluțiile materializate în echipamentele, aparatele ce asigură ținerea ușoară, sigură în frâu, fără riscul de a fi trântit la pământ, prăjit sau orbit de megawații ce sosesc, au însă importanță deosebită, dându-ți seama mai ales atunci când nu funcționează cum trebuie.

Calculule fundamentale ale principalelor procese și fenomene fizice ce au loc în echipamentele și aparatele electrice reprezintă tematica prezentei cărți, sintetizate în vederea familiarizării cu aceste noțiuni a celor care studiază echipamentele electrice, studenți, masteranzi și doctoranzi de curenți tari.

În capitolul 0 de probleme generale, după descrierea intuitivă a transformărilor suferite de energia electromagnetică vehiculată pe durata deconectării sale, se trece în revistă clasificarea echipamentelor electrice și se fac cunoscuți parametrii care le caracterizează, apoi sunt prezentate mai detaliat, constructiv și funcțional, echipamentele concrete, cu fotografiile de realizări industriale. Solicitățile la care sunt supuse diversele componente ale lor, încheie capitolul.

Capitolul 1, care tratează procesele de comutație, începe cu definirea continuității mărimilor electromagnetice apoi sunt analizate detaliat variațiile curentului și tensiunii la conectarea în scurtcircuit a rețelei, conectarea condensatorului, deconectarea unui circuit. Aici se acordă atenție deosebită manifestării și calculului tensiunii tranzitorii de restabilire deosebindu-le cele cu o frecvență-, respectiv cu două frecvențe de oscilație. Apoi se trec în revistă fenomenele legate de deconectări diverse. Este un capitol important pentru cei ce se ocupă mai ales cu încercarea echipamentelor și este îmbogățit cu numeroase aplicații de calcul rezolvate.

Capitolul 2, a solicitărilor electrodinamice, se referă la forțele datorate trecerii curentului electric. Prima dată sunt prezentate metodele de calcul utilizate în acest scop în electrotehnică ca apoi, să fie trecute în revistă un număr mare de situații concrete de configurații de conductoare, inclusiv vecinătatea cu pereți feromagnetici, deducându-se expresiile forțelor atât pentru regimuri staționare, cât și tranzitorii. Spectrul câmpului de la nișa dreptunghiulară este obținută prin modelare numerică, ce poate ține cont și de saturație (licență software QuickField).

După ce se motivează atenția care trebuie acordată solicitărilor termice, capitolul 3 se ocupă cu diversele aspecte ale transferului termic, criteriile de similitudine, distribuția temperaturii în regim staționar, în regim intermitent, la scurtcircuit, probleme legate de curentul admisibil și de duranța termică. Capitolul conține numeroase tabele cu constante de material și proces, proprietățile aerului etc. utile în aplicațiile de calcul.

Contactele electrice ca realizare și ca fenomene, constituie subiectul capitolului 4. Fenomenele fizice din contacte, calculul rezistenței din contact, dependența de forța de apăsare, de încălzire, influența forțelor electrodinamice, comportarea la închidere și deschidere, materiale și soluții constructive, încheie capitolul. Numeroasele tabele cu constante de material ajută aplicațiile de calcul.

Anexa 1 constituie un real ghid de proiectare a sistemelor de bare trifazate, cu

prezentarea pașilor ce trebuie urmăriți și apoi a unui calcul concretizat dar, include și o tehnică preluată de la Génie électrique. Anexa 2 se referă la pierderile în conductoare prin efectele pelicular și de proximitate, analizând variația densității de curent în corelație cu temperatura, forma conductoarelor, prezentând spectrele calculate analitic și numeric (prin modelare numerică cu QuickField) și se încheie cu considerații practice. Ambele anexe au bibliografii speciale. De altfel, cele 53 de titluri ale bibliografiei generale conțin lucrări de referință importante ale domeniului

Lucrarea analizată este o tratare extinsă a ceea ce este important pentru domeniul echipamentelor și aparatelor electrice, caracterizându-se printr-o expunere clară, grafice și schițe explicative foarte inteligibile, folosirea logică și bine pusă la punct a matematicii și nu în ultimul rând includerea unor rezultate de calcul numeric. Consider că o dată editată, va constitui un sprijin bibliografic valoros pentru toți care se ocupă cu echipamentele electrice. Felicitări autorului!

Timișoara, 21 aprilie 2017

Prof. univ. dr. ing. Iuliu Delesega



Prefață

Echipamentele electrice de comutație, folosite în sistemul electroenergetic, au rolul de a comuta (conecta și deconecta), controla și dirija fluxul de energie electrică de la surse (centralele electrice) la consumatorii de energie electrică. Anumite aparate electrice îndeplinesc numai rolul de comutație, altele îndeplinesc și rolul de protecție împotriva avariilor de tip scurtcircuite, suprasarcini și supratensiuni. Unele categorii de aparate electrice îndeplinesc numai rolul de protecție.

Lucrarea, ce constituie un curs universitar, prezintă bazele teoretice ale principalelor procese și fenomene fizice ce au loc, în special, în cazul regimurilor de avarie. Prezentarea acestor procese și fenomene este focalizată pe solicitările principale la care sunt supuse echipamentele electrice în regimurile de avarie (supracurenți și supratensiuni). Principalele solicitări sunt electrodinamice, termice și electrice (dielectrice).

Primul volum al acestei lucrări este structurat astfel :

Capitolul 0. Probleme generale ale echipamentelor electrice ;

Capitolul 1. Procese fundamentale de comutație;

Capitolul 2. Solicitări electrodinamice;

Capitolul 3. Procese termice;

Capitolul 4. Contacte electrice.

Al doilea volum, ce va urma, va fi structurat astfel :

Capitolul 5. Electromagneți ;

Capitolul 6. Izolația echipamentelor electrice ;

Capitolul 7. Arcul electric în aparatele de comutație.

Structura cursului și modul de tratare sunt inspirate după cursul profesorului G. A. Cividjian pe care autorul prezentei lucrări l-a audiat ca student și de asemenea pe experiența proprie în prezentarea cursului studenților de la specializările de Electrotehnică și Electromecanică din cadrul Facultății de Inginerie electrică de la Universitatea din Craiova. La rândul său, cursul profesorului G. A. Cividjian este inspirat după cursurile predate de profesorii de la catedra de Aparate electrice de la Moscova. Alte surse de inspirație au constituit și cursurile predate în centrele universitare din București, Timișoara, Iași și Sofia precum și diverse monografii de specialitate apărute în SUA, Rusia și Franța (Cahiers Techniques de Schneider Electric, *Traité de Génie électrique*).

Pentru a înțelege mai bine principalele procese și fenomene fizice care au loc într-un echipament electric, autorul a considerat utilă introducerea capitolului 0 în care sunt tratate probleme generale specifice tuturor echipamentelor electrice : rolul și necesitatea unui aparat de comutație ; o scurtă clasificare a aparatelor electrice și funcțiile acestora ; definirea principalilor parametri ai aparatelor electrice ; definirea și caracteristicile principalelor aparate de comutație și protecție ; principalele solicitări ale aparatelor și echipamentelor electrice. De asemenea, în cadrul capitolelor au fost inserate aplicații care să ajute la o mai bună înțelegere a aspectelor teoretice prezentate. Principiile constructive și funcționale detaliate ale diverselor echipamente electrice sunt studiate la lucrările de laborator.

În *capitolul 1. Procese fundamentale de comutație* sunt prezentate : scurtcircuitul apropiat și depărtat de generator și mărimile sale caracteristice ; tensiunea tranzitorie de restabilire la circuite cu parametri concentrați cu o frecvență proprie și cu două frecvențe proprii ; metode de calcul a tensiunii tranzitorii de restabilire și caracterizarea acesteia prin mai mulți parametri ; tensiunea tranzitorie de restabilire la circuite cu parametri distribuiți ;

deconectarea opoziției de fază; deconectarea sarcinilor mici reactive (inductive și capacitive); aplicații.

În *capitolul 2. Solicitări electrodinamice* sunt prezentate: metodele de calcul a forțelor electrodinamice; aplicarea metodelor de calcul a forțelor electrodinamice între conductoare considerate filiforme; calculul forțelor electrodinamice între conductoare cu secțiune transversală finită; calculul forțelor electrodinamice în instalații de curent alternativ monofazate și trifazate; Stabilitatea electrodinamică a echipamentelor electrice; aplicații.

În *capitolul 3. Procese termice* sunt prezentate: modurile de transfer a căldurii și legile de bază ale transferului de căldură; ecuația generală a transferului de căldură; distribuția spațială a temperaturii în regim staționar; încălzirea și răcirea în timp uniformă a căilor de curent; încălzirea în regim intermitent; încălzirea în regim de scurtcircuit; Propagarea câmpului termic (distribuția spațio-temporală); Stabilitatea termică a echipamentelor electrice; Aplicații.

În *capitolul 4. Contacte electrice* sunt prezentate: procesele fizice din contacte; componentele rezistenței de contact – rezistența de stricțiune și pelicula disturbatoare; influența forței de apăsare; temperatura punctului de contact și relația cu căderea de tensiune pe contact; încălzirea contactelor în regim permanent și la scurtcircuit; comportarea contactelor în comutație – eroziunea contactelor; materiale și soluții constructive de contacte; aplicații

În *anexa 1. Calculul sistemelor de bare trifazate* se prezintă calculul sistemelor de bare trifazate conform normei Comisiei Electrotehnice Internaționale (CEI) și de asemenea conform normelor franceze (Technique de l'ingénieur, Traité de Génie électrique).

În *anexa 2. Pierderile suplimentare în conductoare masive prin efectele pelicular și de proximitate* se prezintă modele explicative ale fenomenelor de efect pelicular și de proximitate și un model matematic în cazul conductorului cilindric; abace obținute prin modelare numerică privind factorul în alternativ pentru conductoare cilindrice și de secțiune dreptunghiulară; exemple privind influența efectului pelicular și de proximitate asupra distribuției temperaturii într-un sistem de bare cu o bară pe fază și cu mai multe bare în paralel pe fază.

Lucrarea se adresează studenților, masteranzilor și doctoranzilor de la facultățile de profil electric precum și cercetătorilor din domeniul concepției de echipamente electrice.

Craiova, 2017

Autorul

Capitolul 0

PROBLEME GENERALE ALE ECHIPAMENTELOR ELECTRICE

0.1. Locul, rolul și necesitatea unui aparat de comutație

Un sistem electroenergetic se compune din surse de energie electrică (centralele termoelectrice, hidroelectrice, nuclearelectrice, eoliene, fotovoltaice), stații de transformare, linii de transport și transfer de energie electrică (aeriene sau prin cablu) între rețelele electrice și între acestea și consumatori (industriali și casnici). Legătura între aceste elemente componente ale unui sistem electroenergetic nu este rigidă, ci elastică astfel încât să permită stabilirea unei anumite configurații în transmiterea fluxului de energie. Acest lucru este posibil prin intermediul unor dispozitive specializate în comutația circuitelor (conectare și deconectare) denumite *aparate de comutație*.

Aparatul de comutație este un sistem electric sau electromecanic capabil de a comuta, controla și dirija fluxul de energie de la surse către consumatori în mod automat sau neautomat (fig. 0.1)

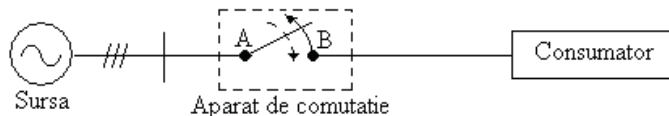


Fig. 0.1 Locul aparatului de comutație în fluxul de energie de la sursă la consumator

- Din punct de vedere structural aparatele de comutație se împart în două mari categorii:
- *Aparate cu comutație mecanică*, acestea având cel puțin un element de contact care este mobil pe durata comutației. În această categorie intră separatoarele, separatoarele de sarcină (întrerupătoarele), întrerupătoarele de putere și contactoarele electromagnetice. Caracteristic acestor aparate de comutație destinate a comuta sub sarcină este apariția arcului electric între elementele de contact.
 - *Aparate cu comutație statică*, care nu au elemente în mișcare, iar conectarea și deconectarea circuitelor este comandată electronic. În această categorie intră dispozitivele semiconductoare ca dioda, tiristorul, triacul și tranzistorul de putere.

Caracteristic aparatelor cu comutație statică este căderea de tensiune mare în conducție directă (1...1,5 V) în raport cu căderea de tensiune la un aparat cu comutație mecanică (10...30 mV). Astfel, puterea disipată în conducție la un aparat cu comutație statică este mult mai mare decât la un aparat cu comutație mecanică (de zeci de ori mai mare). Aparatele cu comutație statică sunt folosite în schemele cu convertoare, dar nu pentru conectare și deconectare de la rețea ci pentru controlul turației motoarelor în domeniul acționărilor electrice. Există și o altă categorie de aparate, mai rar întâlnite, denumite *aparate hibride* care combină comutația statică cu cea mecanică.

Rolul aparatului de comutație

Considerăm circuitul inductiv din fig. 0.2 alimentat de la o sursă de curent alternativ sau continuu parcurs de curentul i . În câmpul magnetic al bobinei de inductanță L este

înmagazinată o energie magnetică. Circuitul poate fi întrerupt cu ajutorul aparatului de comutație (AC). La separarea contactelor, distanța dintre elementele de contact fiind foarte mică, spațiul dintre acestea se ionizează (apar purtători de sarcină) și se formează un arc electric (o plasmă evasineutră din punct de vedere electric cu o temperatură foarte ridicată) prin intermediul căruia curentul continuă să circule.

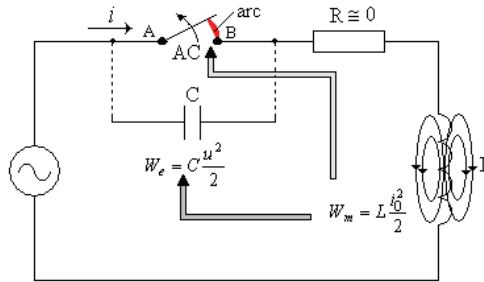


Fig. 0.2 Relativ la întreruperea cu arc electric a unui circuit inductiv

Aparatul de comutație are rolul de a întrerupe arcul electric într-un timp foarte scurt (zeci de ms). Înainte de începerea separării contactelor energia magnetică din circuit era $W_m = 1/2 Li^2$. Odată cu apariția arcului electric această energie magnetică trebuie disipată (transformată) în energie termică (căldură) în arcul electric și apoi cu ajutorul unui dispozitiv specializat al aparatului de comutație această căldură trebuie disipată (transferată) în exterior. Acest dispozitiv specializat și capabil ca într-un timp foarte scurt (circa 5 ms la aparatele ultrarapide și 30 – 40 ms la aparatele normale) să disipe în exterior aproape întreaga energie din circuit se numește *cameră de stingere*. Întreruperea arcului electric trebuie realizată într-un timp așa de scurt, îndeosebi în regimurile de scurtcircuit și suprasarcină, pentru a limita efectele termice și electrodinamice ale supracurenților.

Să presupunem că datorită eficienței camerei de stingere, întreruperea arcului electric a avut loc înainte de trecerea naturală prin zero a curentului și anume la valoarea i_0 (acest curent se numește *curent smuls* sau *curent tăiat*) astfel că nu toată energia din circuit a fost transformată în căldură și a rămas în circuit o energie magnetică $W_m = 1/2 Li_0^2$ care se va transfera sub formă de energie electrică $W_e = 1/2 Cu^2$ încărcând capacitatea echivalentă C văzută pe la bornele aparatului de comutație la o tensiune u denumită *supratensiune*. Supratensiunea maximă rezultă din egalitatea energiilor magnetică și electrică, acest transfer având loc printr-un proces oscilant:

$$W_m = W_e \quad \frac{1}{2} Li_0^2 = \frac{1}{2} Cu_{\max}^2 \quad \Rightarrow \quad u_{\max} = i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (0.1)$$

Inductanța L este în general mare iar capacitatea parazită C este foarte mică și sunt mărimi constante pentru un anumit circuit, astfel că valoarea acestei supratensiuni depinde de valoarea curentului « smuls » i_0 . Cu cât curentul smuls este mai mare cu atât supratensiunea de la bornele AB ale aparatului de comutație va fi mai mare. Curentul smuls este în general mare atunci când aparatele de comutație destinate să întrerupă curenți mari de scurtcircuit sunt puse în situația de a întrerupe curenți mici reactivi (inductivi sau capacitivi). În cazul întreruperii curenților mari de scurtcircuit întreruperea arcului electric are loc la trecerea naturală prin zero a curentului sau foarte aproape de aceasta. Supratensiunile mari sunt foarte