

Petru Andea
Claudia Popescu
Luiza Popa
Florin Călin

Aparate și
echipamente electrice
moderne



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România

București

2011

CUPRINS

1. Fenomene de comutație în aparatele și echipamentele electrice moderne	9
1.1. Procese de conectare	9
1.1.1. Curentul de scurtcircuit depărtat de generator	9
1.2. Deconectarea unui circuit inductiv	12
1.3. Tensiunea de restabilire	12
2. Solicitățile aparatelor și echipamentelor electrice moderne	15
2.1. Contactele electrice	15
2.1.1. Generalități	15
2.1.2. Rezistența de contact	15
2.1.3. Încălzirea contactelor electrice	18
2.1.4. Uzura contactelor	19
2.2. Arcul electric	19
2.2.1. Generalități	19
2.2.2. Arcul electric de curent continuu. Modalități de stingere	20
2.2.2. Arcul electric de curent alternativ. Modalități de stingere	22
2.3. Solicități termice	24
2.3.1. Generalități	24
2.3.2. Încălzirea unui conductor electric	26
2.3.3. Încălzirea unei bobine parcurse de curent	27
2.4. Solicități electrodinamice	30
2.4.1. Generalități. Formule de calcul	30
2.4.2. Forțele exercitate asupra unui conductor plasat în apropierea unor pereți din material feromagnetic	30
2.4.3. Forțele exercitate asupra spirelor bobinelor	32
2.4.4. Forțele exercitate în curent alternativ trifazat	32
2.4.5. Stabilitatea electrodinamică a aparatelor electrice	35
2.5. Solicitățile datorate arcului electric	35
2.5.1. Energia dezvoltată în arcul electric	35
2.5.2. Capacitatea de rupere	36
2.6. Solicități dielectrice	37
3. Aparate electrice de joasă tensiune	41
3.1. Contactoare electromagnetice	41
3.2. Siguranțe fuzibile de joasă tensiune	45
3.3. Contactoare statice	53
3.3.1. Contactoare statice de curent alternativ	53

3.3.2. Contactoare statice de curent continuu	56
3.4. Întreruptoare automate de joasă tensiune. Disjunctoare	58
3.4.1. Întreruptoare automate de curent alternativ	59
3.4.2. Întreruptoare automate de curent continuu	64
3.5. Relee electrice și electronice	67
3.5.1. Generalități	68
3.5.2. Relee electronice	72
4. Aparate electrice de înaltă tensiune	75
4.1. Întreruptorul în vid avansat	76
4.1.1. Observații de natură fizică privind comutația în vid avansat	77
4.1.2. Soluție constructivă	80
4.2. Întreruptorul cu SF ₆	82
5. Echipamente capsulate cu hexaflorură de sulf	87
5.1. Proprietățile gazului	88
5.2. Echipamente electrice de comutație cu SF ₆	93
6. Impactul echipamentelor electrice asupra mediului	95
6.1. Criterii și principii care stau la baza reglementărilor de mediu	95
6.2. Impactul rețelelor electrice asupra mediului	96
6.3. Standarde privind expunerea persoanelor la câmpuri electrice și magnetice	100
6.4. Evoluția legislației de mediu în România	103
7. Bibliografie	105

1. FENOMENE DE COMUTAȚIE ÎN APARATELE ȘI ECHIPAMENTELE ELECTRICE MODERNE

1.1. Procese de conectare

1.1.1. Curentul de scurtcircuit depărtat de generator

Prin „depărtat” se înțelege un curent de scurtcircuit în a cărui limitare ponderea impedanței generatorului sincron este redusă și deci scurtcircuitul se produce departe de generator.

Regimul de scurtcircuit într-o rețea este caracterizată de faptul că, prin dispariția sarcinii active a receptorului, rămâne ca sarcină numai rețeaua, care are un pronunțat caracter inductiv. Această evoluție se poate urmări în figura 1.1.a, în care Z este impedanța sarcinii scurtcircuitate între punctele a și b. Ținând seama că valorile curentului de scurtcircuit sunt aproximativ cu două ordine de mărime mai mari decât ale curentului nominal, se poate considera, ca model de calcul pentru curentul de scurtcircuit, schema din figura 1.1.b, în care circuitul cu rezistența R și inductivitatea L se conectează la o sursă de curent alternativ. După închiderea întreruptorului D , într-un moment corespunzător unghiului ψ de la trecerea tensiunii u_s a sursei prin valoarea zero, este valabilă relația:

$$u_s = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

cu expresia curentului în regim tranzitoriu:

$$i(t) = \hat{I} \left[\sin \alpha \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \sin(\omega \cdot t - \alpha) \right] \quad (1.2)$$

în care:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}} \text{ reprezintă valoarea de vârf a curentului; } (1.3)$$

$$\alpha = \varphi - \psi \text{ este unghiul de conectare } (1.4)$$

După cum arată expresia (1.2), curentul de scurtcircuit are două componente și anume:

- componenta aperiodică

$$i_a(t) = \hat{I} \cdot \sin \alpha \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (1.5)$$

- componenta periodică

$$i_p(t) = \hat{I} \sin(\omega \cdot t - \alpha) \quad (1.6)$$

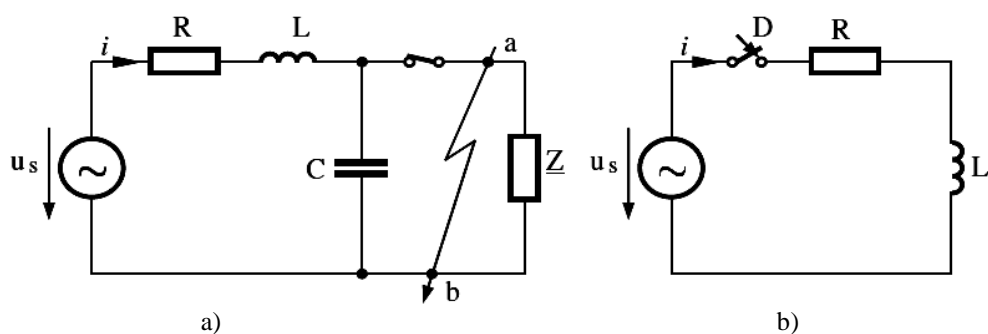


Figura 1.1. Conectarea unei sarcini inductive la o sursă de curent alternativ
 a) schema corespunzătoare apariției curentului de scurtcircuit; b) schema echivalentă

În figura 1.2. se prezintă curentul de scurtcircuit cu cele două componente. Prezența componentei aperiodice determină o asimetrie a amplitudinilor pozitive față de cele negative și de aceea un astfel de curent se mai numește și curent asimetric. Valoarea maximă instantanee, notată cu i_l , se numește curent de lovitură.

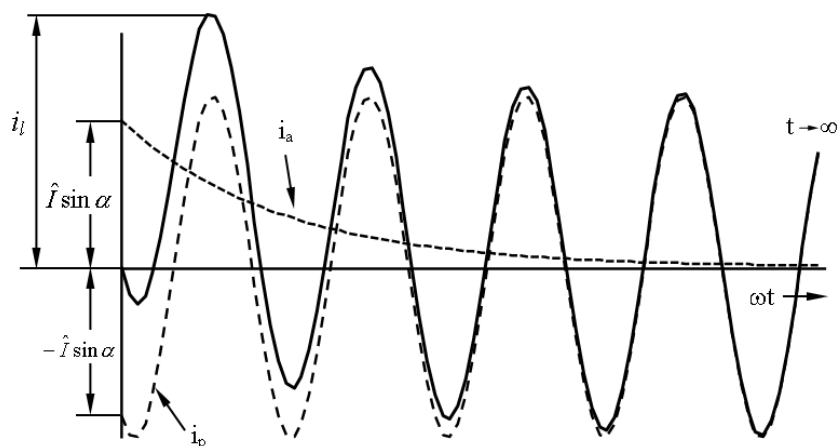


Figura 1.2. Diagrama curentului de scurtcircuit depărtat pentru $0 < \alpha < \pi/2$

Curentul simetric. Dacă unghiul de conectare $\alpha = \varphi - \psi = 0$, curentul de scurtcircuit depărtat este lipsit de componenta aperiodică, se numește simetric și are expresia:

$$i = \hat{I} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (1.7)$$

Curentul cu asimetrie maximă. Dacă unghiul de conectare $\alpha = \varphi - \psi = \frac{\pi}{2}$, curentul de scurtcircuit este cu asimetrie maximă și are expresia:

$$i = \hat{I} \left(e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega \cdot t \right) \quad (1.8)$$

Diagrama acestui curent este dată în figura 1.3. Curentul de lovitură apare la o valoare a unghiului ωt aproximativ egală cu π ,

$$i_l = \hat{I} \left(e^{-\frac{\pi}{\omega T}} + 1 \right) \quad (1.9)$$

sau dacă se pune $T = L/R$ și $X = \omega \cdot L$, se obține:

$$i_l = \hat{I} \left(e^{-\frac{\pi R}{X}} + 1 \right) \quad (1.10)$$

Expresia:

$$\chi = e^{-\frac{\pi R}{X}} + 1 \quad (1.11)$$

se numește *factor de lovitură*, iar curentul de lovitură rezultă:

$$i_l = \hat{I} \cdot \chi = \sqrt{2} \cdot I \cdot \chi \quad (1.12)$$

În cazurile practice nu există rețea cu amortizare nulă. De aceea valoarea cea mai mare care se poate accepta pentru χ este 1,8, iar valoarea curentului de lovitură se poate scrie aproximativ și acoperitor:

$$i_l = \sqrt{2} \cdot I \cdot 1,8 \quad (1.13)$$

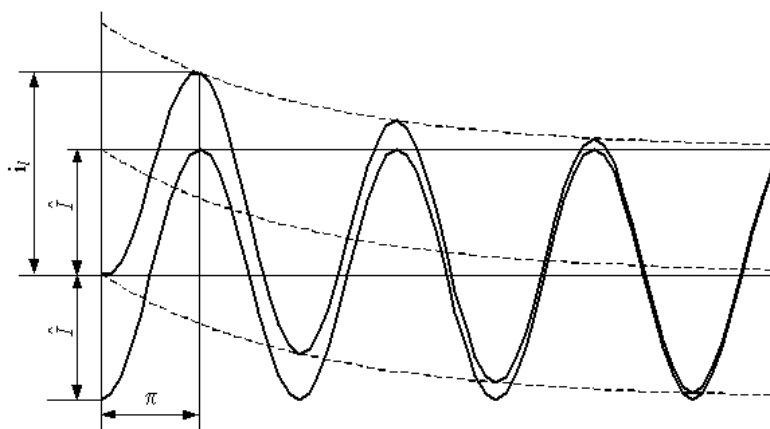


Figura 1.3. Curent de scurtcircuit asimetric cu asimetrie maximă ($\alpha = \pi/2$)

1.2. Deconectarea unui circuit inductiv

Deoarece un aparat de comutație este plasat într-o rețea, reușita sau nereușita întreruperii arcului electric în camera de stingere depinde de parametrii rețelei (curentul de scurtcircuit și tensiunea de restabilire) și de parametrii aparatului (tensiunea pe arc și tensiunea de străpungere sau tensiunea de ținere, care semnifică refacerea rigidității dielectrice în coloana arcului). Pentru a ilustra condițiile de stingere și reaprindere ale arcului la trecerea prin zero a curentului, se consideră cazul cel mai dezavantajos și anume circuitul pur inductiv (Figura 1.4).

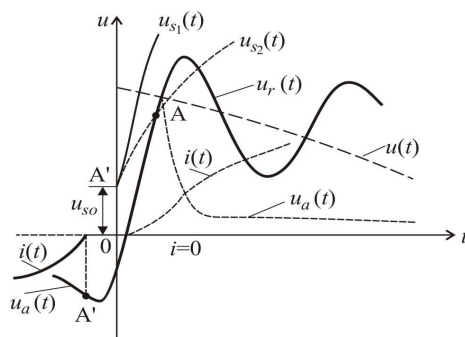


Figura 1.4. Relativ la condițiile calitative de stingere a arcului electric

La trecerea curentului prin zero are loc stingerea definitivă a arcului dacă tensiunea de restabilire $u_r(t)$ rămâne tot timpul inferioară tensiunii de străpungere (ținere) $u_{s1}(t)$ a spațiului arc. Dacă curba tensiunii de străpungere $u_{s2}(t)$ intersectează curba $u_r(t)$ într-un punct oarecare A, atunci intervalul va fi străpuns și arcul se reaprinde, apărând căderea de tensiune pe arc $u_a(t)$ ca rezultat al preponderenței proceselor ionizării asupra proceselor deionizării. Pentru ca arcul electric să nu se reaprindă, rezultă că este necesar ca tensiunea de străpungere să fie superioară tensiunii de restabilire.

1.3. Tensiunea de restabilire

Tensiunea la bornele aparatelor de comutație cu contactele în poziția deschis este egală cu tensiunea de alimentare. Când contactele sunt închise, căderea de tensiune pe acestea este foarte mică (de ordinul zecilor de milivolți). La deschiderea contactelor apare arcul electric și tensiunea între contacte devine egală cu căderea de tensiune pe arc. Din clipa stingerii arcului, între contactele deschise începe un proces tranzitoriu care, dacă stingerea este definitivă, se finalizează cu instalarea tensiunii de alimentare. Valoarea momentană a tensiunii, care apare între contacte în acest proces tranzitoriu, se numește tensiune de restabilire.

Pentru a determina expresia tensiunii oscilante de restabilire ne situăm în ipoteza deschiderii instantanee (fără arc electric), a unui circuit cu parametrii concentrați (Figura 1.5.a), în momentul apariției unui scurtcircuit. În figură s-au notat cu K contactul întreruptorului, la bornele căruia se stabilește tensiunea oscilantă de restabilire u_r , cu R și L parametrii concentrați ai rețelei, C capacitatea parazită a rețelei, Z impedanța consumatorului și cu u tensiunea de alimentare. În Figura 1.5.b s-a reprezentat defazajul între tensiune și curent, în regimul de scurtcircuit, între punctele a și b , cu întreruptorul K închis. Pentru a calcula tensiunea oscilantă de restabilire u_r , se admite că întreruperea curentului de scurtcircuit are loc la trecerea lui naturală prin zero. Curentul de scurtcircuit are forma:

$$i = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (1.14)$$

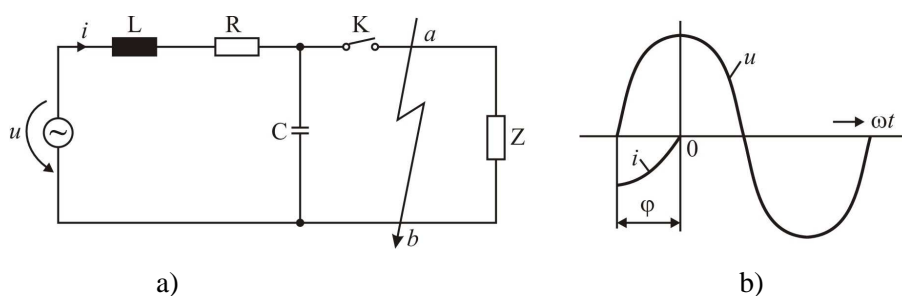


Figura 1.5. Explicativă la determinarea tensiunii oscilante de restabilire

Tensiunea de alimentare, în ipoteza considerării ca origine a timpului momentul trecerii prin zero a curentului de scurtcircuit, este:

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin (\omega \cdot t + \varphi) \quad (1.15)$$

unde:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega \cdot L}{R} \quad (1.16)$$

Ecuțiile diferențiale ale circuitului, după deconectarea întreruptorului K , ținând seama că din cauza curentului de scurtcircuit, la momentul $t=0$, condensatorul nu a fost încărcat cu sarcină electrică sunt:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin (\omega \cdot t + \varphi) &= R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + u_r \\ i &= C \cdot \frac{du_r}{dt} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Se obține pentru sistemul (1.15) o soluție simplificată de forma:

$$u_r = \sqrt{2} \cdot U \cdot \left[1 - e^{-\delta t} \cdot \left(\cos \omega_e \cdot t + \frac{\delta}{\omega_e} \cdot \sin \omega_e \cdot t \right) \right] \quad (1.18)$$

unde s-au notat: $\delta = \frac{R}{2 \cdot L}$ - factorul de atenuare; $\omega_0^2 = \frac{1}{L \cdot C}$ - pulsația proprie a circuitului; $\omega_e = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ - pulsația proprie a tensiunii de restabilire.

În cazul în care se consideră $\delta \ll \omega_e$, se obține o formă simplificată:

$$u_r = \sqrt{2} \cdot U \cdot (1 - e^{-\delta t} \cdot \cos \omega_e \cdot t) \quad (1.19)$$

Diagramele corespunzătoare sunt date în Figura 1.6.a pentru relația (1.16) și Figura 1.6.b pentru relația (1.17), caracterizând oscilația tensiunii de restabilire, cu pulsația proprie ω_e , în jurul tensiunii sursei.

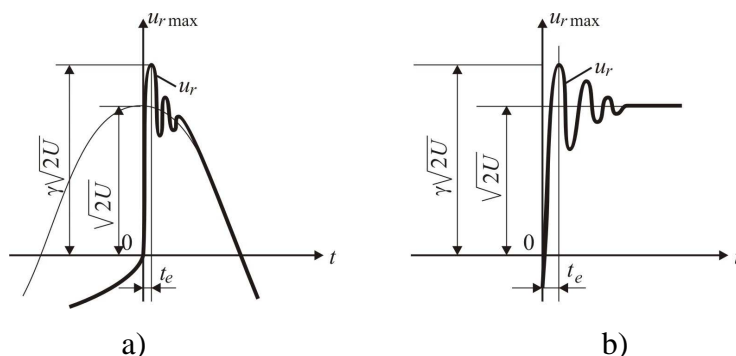


Figura 1.6. Tensiunea de restabilire cu o singură frecvență

O astfel de tensiune de restabilire este caracterizată prin doi parametri și anume:

- factorul de oscilație, $\gamma = \frac{u_{\max}}{\hat{U}} = 1 + e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_e}}$;

- frecvența proprie de oscilație, $f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{2t_e}$.

Cei doi parametri ai tensiunii de restabilire depind de inductanța, capacitatea și rezistența rețelei. La rețelele în cablu, inductanța este redusă și capacitatea mai mare decât la rețelele aeriene. Conductoarele rețelelor aeriene de foarte înaltă tensiune sunt plasate la distanțe mai mari între ele și față de pământ și, ca urmare, inductanța proprie crește sensibil față de cea a rețelelor de medie sau joasă tensiune.

2. SOLICITĂRILE APARATELOR ȘI ECHIPAMENTELOR ELECTRICE MODERNE

2.1. Contactele electrice

2.1.1. Generalități

În tehnica aparatelor și echipamentelor electrice prin contacte se înțeleg chiar piesele de contact prin a căror atingere, sub o presiune oarecare, se stabilește continuitatea unui circuit electric.

Contactele electrice sunt piesele cele mai solicitate ale aparatelor și echipamentelor electrice de comutație, deoarece ele trebuie să suporte încălzirea în timpul funcționării, uzura prin ciocniri și frecări, acțiunea arcului electric ce se stabilește, îndeosebi la deschiderea circuitului electric.

Comportarea contactelor în funcționarea aparatelor și echipamentelor electrice este hotărâtoare, în sensul că o construcție greșită sau o stare nesatisfăcătoare a lor poate conduce la avarii grave. Deoarece condițiile de lucru ale contactelor electrice sunt diferite, fiind folosite atât în circuite de mică putere cât și în cele de mare putere, forma lor constructivă este foarte variată.

2.1.2. Rezistența de contact

Contactul electric introduce în circuit o rezistență suplimentară, denumită rezistență de contact, care poate fi pusă în evidență printr-o experiență simplă (Figura 2.1). Astfel, se măsoară căderea de tensiune pe un segment de conductor, parcurs de curentul I între punctele 1 și 2 (Figura 2.1.a) și în baza legii lui Ohm se calculează:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

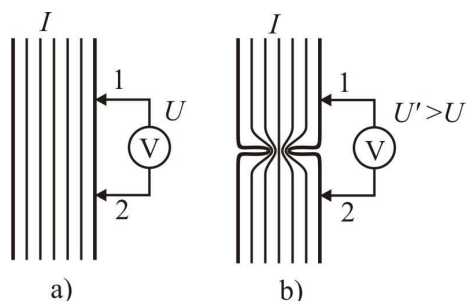


Figura 2.1 Explicativă pentru definirea R_c

Dacă tăiem conductorul și apoi punem în atingere cele două capete, sub o anumită presiune și facem ca prin conductor să treacă același curent I , se va măsura o cădere de tensiune $U' > U$ (Figura 2.1.b). Acest rezultat dovedește că în segmentul de conductor neomogen, care conține acum un contact electric, a apărut o rezistență suplimentară R_c numită rezistență de contact:

$$\frac{U'}{I} = R + R_c \quad (2.2)$$

Cercetările teoretice și experimentale au stabilit că rezistența de contact se compune din două părți distincte:

$$R_c = R_s + R_p \quad (2.3)$$

Rezistența de stricțiune R_s există permanent, chiar și în cazul suprafețelor de contact ideale (curate) și se datorește stricționării liniilor de curent. Rezistența peliculară R_p este produsă de existența pe suprafețele de contact a unor pelicule disturbatoare, care alterează contactul pur metalic.

Pe baza unor modele de calcul, cum ar fi modelul sferic, de conductivitate infinită [1], rezistența de stricțiune pentru un contact considerat sferic, de rază „ a ” și rezistivitate ρ a materialului de contact se calculează cu formula:

$$R_s = \frac{\rho}{\pi \cdot a} \quad (2.4)$$

Dacă două piese de contact au n locuri de atingere, rezistența de stricțiune are valoarea:

$$R_s = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (2.5)$$

Rezistența peliculară R_p se poate calcula cu relația [1]:

$$R_p = \frac{\rho_p}{n \cdot \pi \cdot a^2} \quad (2.6)$$

unde ρ_p este rezistivitatea peliculară, determinată de regulă experimental.