

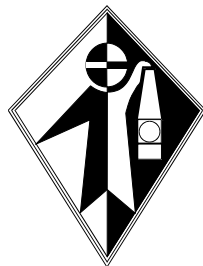
R A P O R T

FAZA I 2007

PRIVIND REALIZAREA PROIECTULUI

Metodă și tehnologie de evaluare, prevenire și limitare a implicațiilor supratensiunilor de comutație asupra consumatorilor electrici de joasă tensiune din industria extractivă

CONTRACT DE FINANȚARE nr. 21-068 / 14.09.2007



INSEMEX PETROȘANI
INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE
PENTRU SECURITATE MINIERĂ ȘI PROTECȚIE ANTIEXPLOZIVĂ
Cod 332047, Petroșani, str.G-ral Vasile Milea,
nr.32-34, Tel.0254 541621-541622, Fax 0254 546277
BCR Petroșani, Cod IBAN RO18RNCB0165020175140001BCR Petroșani
E-mail insemex@insemex.ro
ROMÂNIA

1. PROGRAM 4: PARTENERIATE IN DOMENIILE PRIORITARE

2. OBIECTIV: dezvoltarea unei metode și tehnologii de evaluare, prevenire și limitare a implicațiilor supratensiunilor de comutație asupra consumatorilor electrici de joasă tensiune din industria extractivă.

3. DENUMIREA PROIECTULUI:

"Metodă și tehnologie de evaluare, prevenire și limitare a implicațiilor supratensiunilor de comutație asupra consumatorilor electrici de joasă tensiune din industria extractivă"

4. CONTRACT DE FINANȚARE: Nr. 21-068 / 14.09.2007

5. AUTORITATEA CONTRACTANTĂ: CNMP

6. CONTRACTOR: INSTITUTUL NAȚIONAL DE CERCETARE-DEZVOLTARE PENTRU
SECURITATE MINIERĂ ȘI PROTECȚIE ANTIEXPLOZIVĂ INSEMEX
PETROȘANI

7. ETAPA I - Studiu privind evaluarea factorilor de risc

8. TERMENUL FINAL AL FAZEI II: 18.12.2007

DIRECTOR DE PROIECT,

DR. ING. MARTIN FRIEDMANN

COLECTIV DE CERCETARE

LIEx - Laborator Încercări în Amestecuri Explosive

COLECTIV DE CERCETARE:

Drd. ing. Lucian Moldovan

Dr. ing. Mihai Magyari

Ing. Adriana Martinescu

DIRECTOR DE PROIECT,

DR. ING. MARTIN FRIEDMANN

INTRODUCERE

Prin lucrare se urmărește studierea factorilor care determină dezvoltarea supratensiunilor de comutație într-un sistem electric de forță.

Aparatele de comutație și motoarele electrice (principalii consumatori) destinate minelor gruztoase sunt realizate cu tipul de protecție capsulare antideflagrantă. Cu toate că acest tip de protecție este suficient de sigur, totuși expunerea acestor capsulări la supratensiunile de comutație poate provoca distrugerii ale înfășurărilor motoarelor și chiar a capsulărilor de aparate de comutație. Este deci, foarte importantă studierea supratensiunilor de comutație pentru a stabili modalități de măsurare, de limitare a efectelor nedorite și dacă e posibil de prevenire.

Tensiunea nominală a unei rețele trifazate reprezintă valoarea efectivă a tensiunii dintre faze. Pentru stabilirea solicitărilor la care este expusă rețeaua electrică este importantă cunoașterea tensiunii maxime de serviciu U_m , adică cea mai mare valoare efectivă a tensiunii între faze, care apare într-un moment oarecare, într-un punct oarecare al rețelei în condiții normale de funcționare.

Supratensiunea poate fi definită ca orice tensiune variabilă în timp, a cărei valoare de vârf depășește valoarea de vârf a tensiunii maxime de serviciu. Supratensiunea poate apărea între fază și pământ, depășirea referindu-se la valoarea $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ sau între faze, când referința este $U_m \sqrt{2}$.

Supratensiunile sunt fenomene tranzitorii și pot fi caracterizate în mod esențial prin trei parametri: amplitudine, formă și frecvența de apariție. Când cauza care le-a produs nu aparține schemei sau elementelor rețelei, supratensiunile sunt externe. Când cauza aparține rețelei, supratensiunile sunt interne.

Reglementările internaționale clasifică supratensiunile în două categorii: supratensiuni puternic amortizate și de durată scurtă și supratensiuni cu amortizare redusă și de durată relativ lungă. În categoria supratensiunilor de scurtă durată intră supratensiunile atmosferice (provocate de descărcările atmosferice) și cele de manevră. Supratensiunile cu amortizare redusă sunt ocazionate de anumite manevre sau unele defecte.

Pentru ameliorarea, respectiv limitarea supratensiunilor de comutație, trebuie studiate fenomenele tranzitorii care apar la conectarea respectiv deconectarea aparaturii de comutație.

În capitolul 1 din lucrare sunt prezentate părțile componente ale unui contactor cu camere de stingere în vid.

Din experiența acumulată în cercetările anterioare se poate concluziona că aparatele de comutație cu contactele de forță în vid, creează cele mai mari supratensiuni de comutație. De aceea

au fost studiate îndeosebi aparatele de comutație de putere de joasă tensiune cu contactoare a căror conectare sau deconectare are loc în vid.

Capitolul următor prezintă fenomenele tranzitorii care apar la conectarea, respectiv deconectarea contactoarelor și implicit factorii care implică apariția supratensiunilor de comutație.

Ultimul capitol prezintă concluziile acestei faze și propunerile de continuare a cercetărilor pentru fazele următoare prevăzute în programul de cercetare aprobat.

CAPITOLUL I

COMUTAȚIA ÎN VID. CONSTRUCȚIE ȘI FUNCȚIONARE

Aparatele de comutație au rolul de a stabili și întrerupe circuite electrice în condiții de funcționare normală sau în cazuri de avarie cum sunt: scurtcircuiturile, suprasarcinile.

În general contactele care deservesc aparatele de comutație și care determină închiderea sau deschiderea circuitelor, sunt supuse încălzirii în regim normal și acțiunii arcului electric care apare la separarea lor. Durata arcului electric este limitată, dar temperatura sa provoacă o încălzire intensă a elementelor de contact. Aparatele supuse unui număr mare de comutații prezintă o accentuată uzură a contactelor, adică o migrație de material de pe elementele de contact sub acțiunea temperaturii arcului electric.

La deconectarea circuitelor electrice în sarcină, între elementele de contact ale aparatelor de comutație apare un arc electric ai cărui parametri depind de condițiile locale din camera de stingere. Existența arcului electric conduce la solicitări suplimentare, cauzate de transferul de energie din coloana arcului electric către piesele componente conductoare sau izolate ale aparatului. Această solicitare se manifestă prin supratemperaturi care pot afecta elementele de contact până la vaporizare.

Comutația electrică de putere în vid reprezintă o soluție des utilizată datorită avantajelor pe care aceasta o oferă, adică: izolație totală a arcului față de mediu, capacitate mare de comutație, timpi reduși de comutație, fiabilitate ridicată.

Comutația în vid are însă și unele dezavantaje cum ar fi:

- întreruperea circuitului cu “smulgere de curent” ceea ce creează supratensiuni de comutație mari, nefiind recomandate pentru consumatorii de putere inductivi;
- capacitate de comutație apropiată de curenții maximi de scurtcircuit ai rețelei în punctul în care se instalează, cu efecte negative asupra întreruperii regimurilor limită din exploatare.

Un exemplu de contactor în vid este prezentat în figura 1.1. Așa cum rezultă din această figură contactorul în vid are următoarele părți componente:

- piesa mobilă suport contact;
- flanșă de capăt (inferior și superior);
- burduf metalic;
- izolator ceramic;
- ecran de condensare;
- piesa mobilă de contact;

- piesa fixă de contact;
- piesa fixă suport contact.

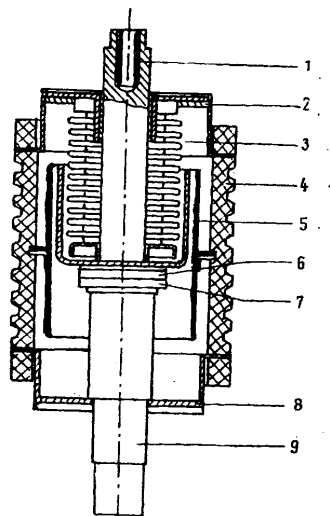


Fig. 1.1 Camera de stingere pentru contactor în vid

- 1-piesă mobilă suport contact; 2-flanșă de capăt
- 3-burduf metalic (inox); 4 – izolator ceramic;
- 5-ecran de condensare; 6-piesă mobilă de contact;
- 7-piesă fixă de contact; 8-flanșă de capăt;
- 9-piesă fixă suport contact.

Un exemplu reprezentativ de cinematică a unui contactor în vid este prezentat în figura 1.2 a și b.

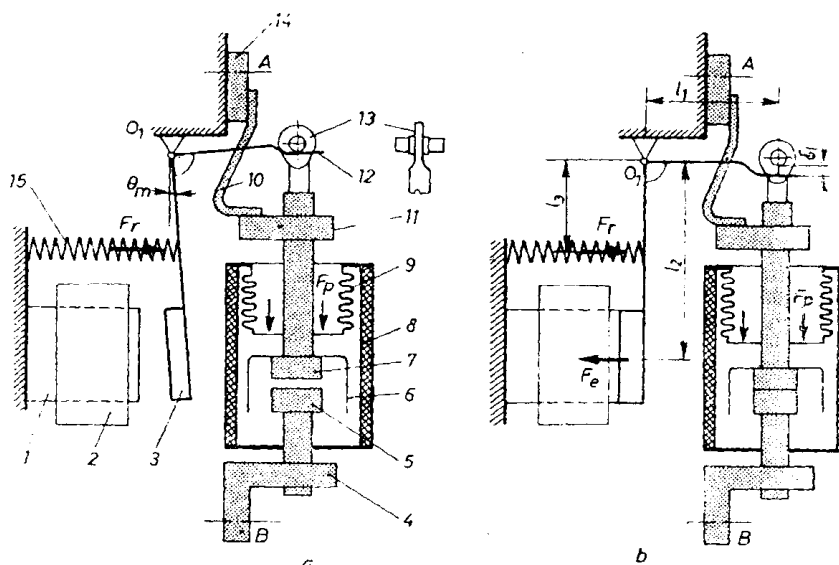


Fig. 1.2 Cinematica contactorului în vid

a-aparatul deschis; b - aparatul închis

Poziția deschis (fig. 1.2, a) este asigurată de resortul 15 prin condiția:

$$F_r \cdot l_3 > F_p \cdot l_1$$

unde: F_p este forța de apăsare pe aria transversală A_b a burdufului provenită din acțiunea presiunii atmosferice p_a , adică $F_p = p_a \cdot A_b$. În această poziție bobina 2 a electromagnetului nu este parcursă de curent.

Poziția închis (fig. 1.2, b) este asigurată de excitarea bobinei electromagnetului (2), care atrage clapeta 3 la întrefier minimal față de armătura fixă 1, cu condiția ca forța F_e , dezvoltată de electromagnet să conducă la relația:

$$F_e \cdot l_2 > F_r \cdot l_3$$

În această poziție pârghia 12 nu mai agață piesa 13, între cele două rămânând distanța δ_1 .

În acest mod se realizează închiderea contactului sub acțiunea forței datorate presiunii atmosferice și o viteză de aproximativ 0,3 m/s la deschiderea contactului, prin dezexcitarea electromagnetului.

CAPITOLUL II

SUPRATENSIUNI DE COMUTAȚIE. FENOMENE TRANZITORII ȘI FACTORI DE RISC

În general orice operațiune de comutație electrică, de inițiere a unui defect sau de întrerupere a unei instalații electrice este urmată de fenomene tranzitorii în care apar supratensiuni, numite *supratensiuni tranzitorii de comutație*. Schimbări bruște în sistemul electric pot iniția oscilații de tensiune cu *frecvențe înalte* determinate de *frecvențele de rezonanță* ale componentelor de circuit ale sistemelor. **Amplitudinea maximă** a acestor tensiuni depinde de o multitudine de parametri, ca de exemplu: *tipul de circuit și configurația acestuia, tipul de comutație (conectare, deconectare, reaprindere, etc.), tipul sarcinii comutate, metoda de comutație utilizată (statică sau dinamică, cu arc electric) și nu în ultimul rând de momentul efectiv al comutației*. Cazuri fundamentale concrete vor fi prezentate pentru exemplificare, pentru circuite monofazate sau trifazate, pentru sarcini capacitive, inductive sau complexe.

În majoritatea cazurilor, amplitudinea maximă a supratensiunilor de comutație este de două ori mai mare de cât amplitudinea maximă a tensiunii sistemului, dar valori și mai mari pot să apară atunci când în procesul de comutație apar consumatori reactivi inductivi, de valoare mare, cum ar fi motoare electrice și transformatoare sau consumatori mari capacitivi, cum ar fi baterii de condensatoare.

Importanța teoretică și practică a cunoașterii și evaluării corecte a acestor supratensiuni este legată strict de *fiabilitatea sistemelor electrice* și a componentelor acestora, cunoscut fiind faptul că orice tip de supratensiune generează *solicitări suplimentare* ale izolațiilor electrice și pericole potențiale legate de *străpungerea* sau de *conturnarea izolațiilor*.

2.1. EXPRESIA TENSIUNII OSCILANTE DE RESTABILIRE

După *deconectarea* unei linii electrice, sau a unui receptor, *la bornele întreruptorului* apare o *tensiune tranzitorie de restabilire*. Tensiunea de restabilire reprezintă tensiunea la bornele longitudinale ale contactorului la deschiderea contactelor, după momentul imediat al stingerii arcului electric și până la amortizarea completă a fenomenului tranzitoriu. Dacă deconectarea s-a realizat ca urmare a unui scurtcircuit, la bornele întreruptorului, *tensiunea tranzitorie are un caracter oscilant amortizat* ca urmare a prezenței în rețea a două categorii de acumulate de energie (*inductiv și capacitiv*). În cazul deconectării unui scurtcircuit, solicitarea dielectrică, determinată de tensiunea oscilantă de restabilire, este sensibil mai mare decât tensiunea de restabilire în regim permanent. În cazul deconectării sarcinilor capacitive tensiunea tranzitorie de

restabilire nu are caracter oscilant, dar solicitarea dielectrică a întreruptorului este superioară tensiunii de exploatare, ca urmare a faptului că, după deconectare, bateria de condensatoare rămâne încărcată cu sarcină electrică.

În figura 2.1 s-a reprezentat schematic circuitul cu întreruptorul K, la bornele căruia se stabilește tensiunea oscilantă de restabilire u . Circuitul din figura 2.1 are însemnătate pentru laboratoarele de încercări, unde rezistența R, inductivitatea L și capacitatea C sunt componente ale circuitelor electrice. În cazul efectuării de scurtcircuite în rețele, elementele menționate sunt uniform distribuite. Mai trebuie menționat că amortizarea, în cazul încercărilor de laborator este determinată de rezistența R, în timp ce această amortizare, în cazul rețelelor reale buclate sau ramificate puternic, rezultă în mare măsură din rezistența corespunzătoare pierderilor în dielectric și efectului corona. Rezultă astfel, că schema de principiu din figura 2.1 este suficient de exactă pentru încercări în laboratoare echipate cu generatoare sincrone, ca sursă proprie de energie.

Pentru a calcula tensiunea oscilantă de restabilire u , se admite că întreruperea curentului de scurtcircuit are loc la trecerea lui naturală prin zero, ceea ce se apropie mult de realitate, mai ales la întreruptoarele cu vid avansat.

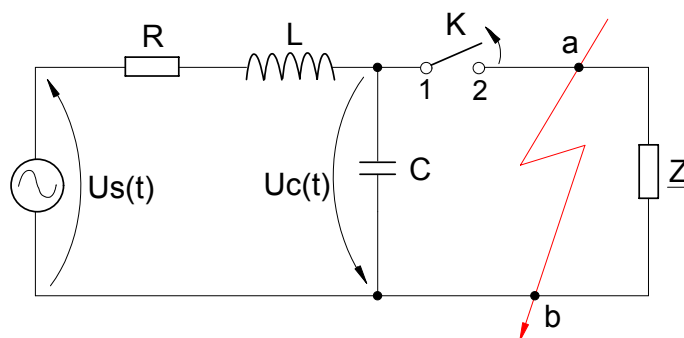


Fig. 2.1. Schema electrică a circuitului de comutație.

Curentul de scurtcircuit este de forma:

$$i = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \sin \omega t \quad (2.1)$$

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

$$u_s = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi); 0 < \varphi < \frac{\pi}{2} \quad (2.2)$$

unde:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

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

$$\left. \begin{aligned} \hat{U} \sin(\omega t + \varphi) &= Ri + L \frac{di}{dt} + u \\ i &= C \frac{du}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

sau, în domeniul imagine:

$$\underline{\mathcal{L}} u = \frac{1}{LC} \cdot \underline{\mathcal{L}} u_s / (p^2 + 2p\delta + \omega_0^2) \quad (2.4)$$

În scriere complexă, expresia tensiunii sursei este:

$$\underline{u}_s = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (2.5)$$

astfel că, în domeniul imagine, se poate scrie:

$$\underline{\mathcal{L}} u = \frac{\hat{U}}{LC} e^{j\varphi} \frac{1}{(p - j\omega)(p^2 + 2p\delta + \omega_0^2)} \quad (2.6)$$

Se poate scrie direct soluția în original corespunzătoare ecuației 1.6:

$$u(t) = \frac{\hat{U} \sin(\omega t + \varphi - \varphi_1)}{C\omega \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} + \frac{D\hat{U} \cdot e^{-\delta t}}{2LC\omega_e^2} \sin(\omega_e t - \gamma) \quad (2.7)$$

cu notațiile:

$$\begin{aligned} \omega_e &= \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \\ D &= \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos(\beta - \alpha)} \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{A \sin \alpha - B \sin \beta}{A \cos \alpha - B \cos \beta} \\ \alpha &= \varphi_3 + \varphi; \beta = \varphi_2 - \varphi \\ \varphi_1 &= \operatorname{arctg} \frac{2\omega\delta}{\omega_0^2 - \omega^2} \\ \varphi_2 &= \operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega_e - \omega} \\ \varphi_3 &= \operatorname{arctg} \frac{\delta}{\omega_e + \omega} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$A = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega_e}\right)^2}}$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\omega_e}\right)^2}}$$

Relația 2.7 este expresia tensiunii oscilante de restabilire, adică a tensiunii care se stabilește între bornele întreruptorului, după deconectarea unui scurtcircuit. Această expresie are două componente și anume componenta periodică, de frecvență industrială:

$$u_p = \frac{\hat{U} \sin(\omega t + \varphi - \varphi_1)}{C\omega \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)^2}} \quad (2.9)$$

și o componentă oscilantă amortizată, cu pulsația ω_e :

$$u_0 = \frac{D\hat{U} \cdot e^{-\delta t}}{2LC\omega_e^2} \sin(\omega_e t - \gamma) \quad (2.10)$$

În rețelele electrice, regimul de scurtcircuit este practic un regim pur inductiv, adică se poate considera $\varphi \approx \pi/2$. Pentru a scoate în evidență caracterul oscilant al tensiunii de restabilire se consideră atenuarea nulă, adică $\delta=0$. În acest caz se scrie:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0 \\ \omega_e = \omega_0 \\ \gamma = \varphi \\ D = \frac{2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

În aceste condiții expresia tensiunii de restabilire rezultă:

$$(u)_{\delta=0, \varphi=\frac{\pi}{2}} = \frac{\hat{U}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \cos \omega t - \frac{\hat{U}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \cos \omega_0 t \quad (2.12)$$

Deoarece în rețelele electrice pulsația proprie ω_0 este cel puțin cu un ordin de mărime mai mare decât pulsația industrială ω , numitorul fiecărui termen din partea dreaptă a ecuației 2.12, se poate considera egal cu unitatea. Astfel ecuația 2.12, reprezintă, în condițiile de

simplificare menționate, însumarea a două oscilații, de frecvențe deosebite, dar de aceeași amplitudine.

Soluția simplificată. Se poate obține o relație mai simplă pentru tensiunea oscilantă de restabilire, dacă se fac următoarele ipoteze simplificatoare:

- întreruperea curentului de scurtcircuit are loc la trecerea lui naturală prin valoarea zero;

- defazajul între tensiune și curent este de $\pi/2$, adică regimul de scurtcircuit este pur inductiv;

- frecvența proprie de oscilație este superioară față de frecvența rețelei; pe durata în care se studiază fenomenul, se consideră tensiunea alternativă constantă și egală cu tensiunea de vârf \hat{U} .

După deschiderea întreruptorului D, pentru schema din figura 2.1, se poate scrie:

$$\begin{aligned}\hat{U} &= Ri + L \frac{di}{dt} + u \\ i &= C \frac{du}{dt}\end{aligned}\tag{2.13}$$

deci:

$$\hat{U} = RC \frac{du}{dt} + LC \frac{d^2u}{dt^2} + u$$

Cu soluția în domeniul imagine:

$$\mathcal{L}u = \frac{\hat{U}}{LC} \cdot \frac{1}{p(p^2 + 2p\delta + \omega_0^2)}\tag{2.14}$$

și cu notațiile:

$$\delta = \frac{R}{2L}; \omega_0^2 = \frac{1}{LC}; \omega_e = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}\tag{2.15}$$

soluția în domeniul original este:

$$u = \hat{U} \left[1 - e^{-\delta t} \left(\cos \omega_e t + \frac{\delta}{\omega_e} \sin \omega_e t \right) \right]\tag{2.16}$$

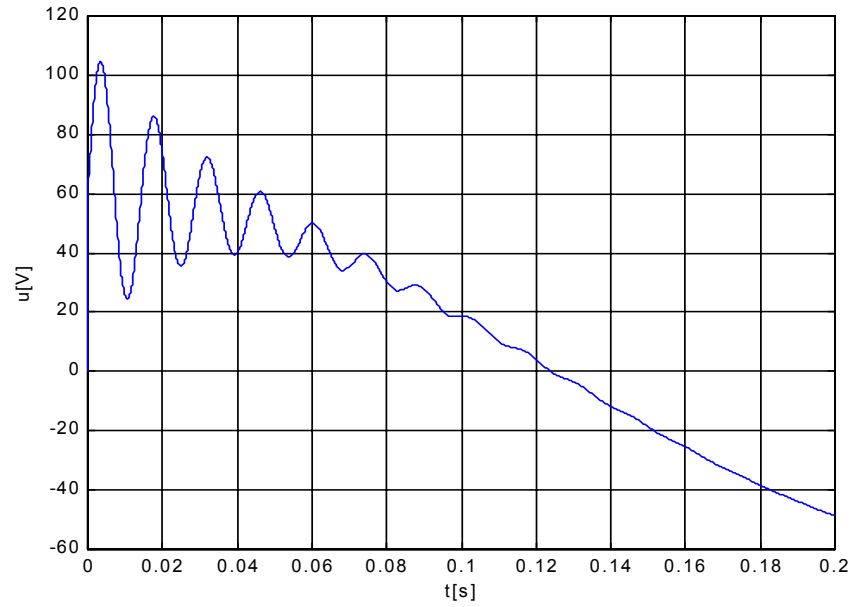
Pentru $\delta \ll \omega_e$, termenul în sinus se poate neglija și se obține:

$$u \approx \hat{U} (1 - e^{-\delta t} \cos \omega_e t)\tag{2.17}$$

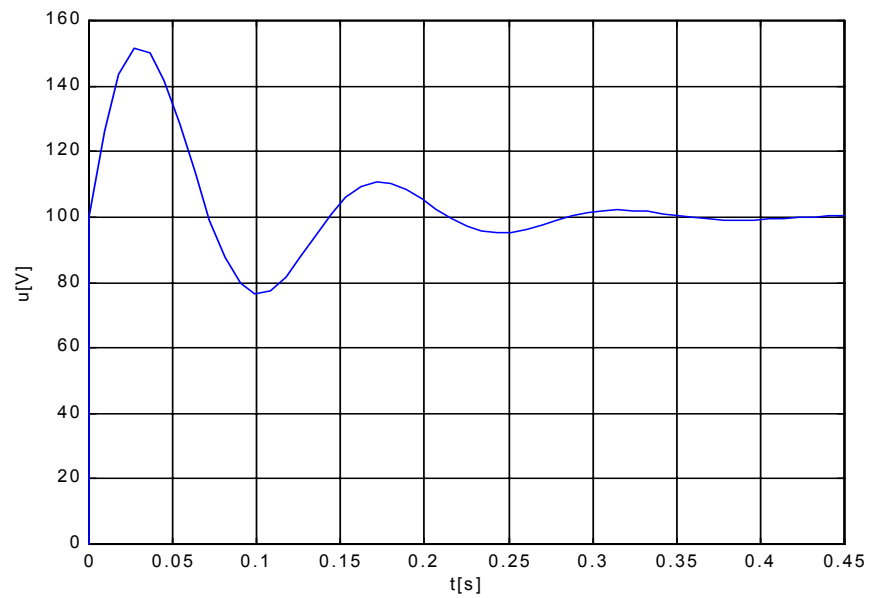
Parametrii tensiunii oscilante de restabilire. Ecuația 2.7, 2.16 și 2.17, reprezintă ecuații care descriu tensiunea tranzitorie de restabilire cu o singură frecvență de oscilație. Diagramele corespunzătoare sunt date în:

- figura 2.2.a, pentru relația 2.7; aspectul global;

- figura 2.2.b, pentru relația 2.17.



a)



b)

Fig. 2.2. Tensiunea tranzitorie de restabilire cu o singură frecvență de oscilație:

a - soluția exactă; b - soluția aproximativă.

O astfel de tensiune de restabilire este caracterizată prin doi parametri și anume: factorul de oscilație și frecvența proprie de oscilație.

Factorul de oscilație γ este definit ca raportul între valoarea de vârf u_{\max} a tensiunii de restabilire și valoarea de vârf \hat{U} a tensiunii de frecvență industrială (fig.2.1). În relația 2.17 se introduce $t = \pi/\omega_e$ și se obține:

$$\gamma = \frac{u_{\max}}{\hat{U}} = 1 + e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_e}} \quad (2.18)$$

Frecvența proprie de oscilație rezultă din diagramele din figura 2.2 ca fiind:

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{2t_e} \quad (2.19)$$

În locul frecvenței proprii de oscilație, al doilea parametru se poate înlocui cu viteza v de creștere a tensiunii oscilante de restabilire:

$$v = \frac{\gamma \hat{U}}{t_e} = 2\gamma \hat{U} f_e \quad (2.20)$$

Buclarea rețelelor joacă un rol important în stabilirea parametrilor tensiunii oscilante de restabilire, în sensul că, prin buclare, pe de o parte crește valoarea capacității de serviciu, iar pe de altă parte se micșorează valoarea inductivității de serviciu.

Factorul de oscilație γ teoretic ar ajunge la valoarea 2, în absența amortizării ($R=0$), dar, realmente, valorile lui sunt cuprinse între 1,3 și 1,6. În cazul rețelelor trifazate acest factor se aplică tensiunii sursei egală cu $1,5 \frac{U_n}{\sqrt{3}}$, care reprezintă solicitarea dielectrică la frecvența industrială a polului care întrerupe primul arc electric în întreruptor și unde U_n este tensiunea compusă (între faze).

Tensiunea oscilantă de restabilire cu o singură frecvență apare în rețele cu o structură omogenă, la care parametrii liniei R_0 , L_0 , C_0 se conservă în totalitatea rețelei. Dacă parametrii liniei nu se conservă în toate punctele rețelei, la deconectarea unui scurtcircuit rețeaua va oscila pe două sau mai multe frecvențe proprii. O situație concretă de tensiune oscilantă de restabilire cu două frecvențe apare la deconectarea defectului kilometric.

Parametrii tensiunii oscilante de restabilire γ și f_e joacă un rol decisiv în realizarea unei întreruperi reușite de către un întreruptor. Într-adevăr, după separarea mecanică a contactelor, în polul unui întreruptor apare un arc electric, care se stinge la trecerea prin valoarea zero a curentului. În acest moment, are loc întreruperea electrică și începe procesul de refacere a rigidității dielectrice în camera de stingere a întreruptorului; tensiunea de ținere se restabilește după o funcție

crescătoare în timp. Dacă în fiecare moment, tensiunea de ținere este mai mare decât tensiunea de restabilire, aceasta fiind solicitarea dielectrică a întreruptorului, după trecerea prin valoarea zero a curentului, întreruperea este reușită. În caz contrar, are loc o reamorsare a arcului electric în întreruptor, iar întreruperea este nereușită.

O tensiune tranzitorie de restabilire, cu un factor de oscilație γ mai mare și o frecvență f_e de restabilire mai mare, constituie o solicitare dielectrică mai importantă decât solicitarea produsă la parametrii mai mici ai tensiunii de restabilire. În primul caz probabilitatea reamorsării arcului electric este mai mare decât în cazul al doilea.

2.2. TENSIUNEA DE RESTABILIRE LA DECONNECTAREA SCURTCIRCUITELOR TRIFAZATE

Regimul de scurtcircuit este în mod practic un regim de sarcină inductivă, deoarece impedanța receptorului este scurtcircuitată, iar pentru rețea $\omega L \gg R$. Se poate considera, cu o aproximație de câteva grade electrice, că întreruperea mecanică, pentru cei trei poli ai unui întreruptor, este sincronă. Dimpotrivă, întreruperea electrică, adică stingerea arcului electric, în cei trei poli nu este sincronă. Mai întâi se stinge arcul electric în polul în care curentul trece primul prin valoarea zero. După o întârziere de 90 grade electrice are loc stingerea simultană a arcului electric în ceilalți doi poli ai întreruptorului.

◆ Tensiunea de restabilire \underline{U}_1 pentru polul care întrerupe primul se determină cu ajutorul schemei din figura 2.3.a, unde $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3$ sunt tensiunile electromotoare pe cele trei faze.

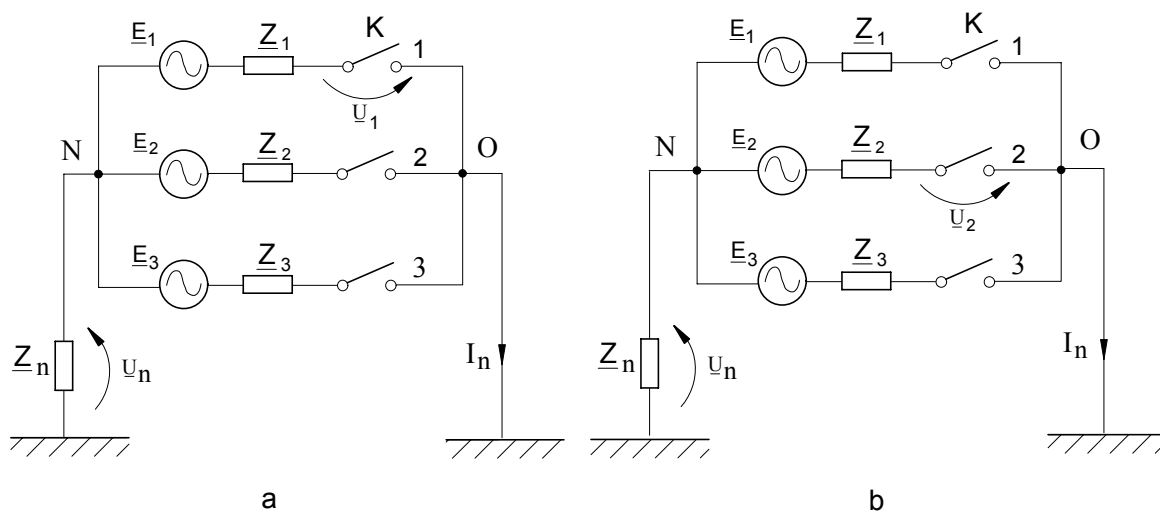


Fig. 2.3. Relativ la tensiunea de restabilire în circuitele trifazate:

a - polul 1 întrerupe primul; b - întrerupe polul 2.

După întreruperea curentului în polul 1, tensiunea de restabilire \underline{U}_1 se determină prin aplicarea teoremei a doua a lui Kirchhoff:

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1 + \underline{U}_n \quad (2.21)$$

unde tensiunea la bornele impedanței \underline{Z}_n este $\underline{U}_n = \underline{Z}_n \cdot \underline{I}_n$, adică:

$$\underline{U}_n = -3\underline{E}_1 \frac{\underline{Z}_i \underline{Z}_n}{\underline{Z}_0 \underline{Z}_d + \underline{Z}_0 \underline{Z}_i + \underline{Z}_i \underline{Z}_d} \quad (2.22)$$

Astfel rezultă expresia tensiunii de restabilire la frecvența industrială pentru polul care întrerupe primul:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 \left(1 + \frac{3\underline{Z}_i \underline{Z}_n}{\underline{Z}_0 \underline{Z}_d + \underline{Z}_0 \underline{Z}_i + \underline{Z}_i \underline{Z}_d} \right) \quad (2.23)$$

Se prezintă următoarele cazuri reprezentative:

a) Pentru scurtcircuite depărtate, ținând seama că transformatoarele și liniile electrice sunt elemente statice, rezultă că $\underline{Z}_h = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}$. Cu $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_n$, și tensiunea de restabilire:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}}}{\frac{1}{2} + \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}}} \quad (2.24)$$

b) Dacă, cumulat cu situația a, neutrul este izolat, adică: $\underline{Z}_n = \infty; \underline{Z}_0 = \infty; \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0} = 0$ se obține:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 \frac{3}{2} \quad (2.25)$$

c) Dacă, cumulat cu situația a, impedanța de nul \underline{Z}_n este nulă, adică $\underline{Z}_n = 0; \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}} = 1$, se obține:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 \quad (2.26)$$

adică tensiunea electromotoare pe fază.

◆ Tensiunea de restabilire pentru polul care întrerupe al doilea. Pentru această situație este valabilă schema din figura 2.3.b. Tensiunea de restabilire la frecvența industrială \underline{U}_2 se obține prin scrierea teoremei a doua a lui Kirchhoff:

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{U}_n \quad (2.27)$$

unde $\underline{U}_n = \underline{Z}_n \underline{I}_n$. Se observă că $\underline{I}_n = \underline{I}_3$, se obține:

$$\underline{U}_n = \frac{3\underline{E}_3 \underline{Z}_n}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \quad (2.28)$$

iar tensiunea de restabilire rezultă:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 \left(1 - a^2 \frac{3\underline{Z}_n}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_d + \underline{Z}_i} \right) \quad (2.29)$$

Se prezintă următoarele cazuri particulare:

a) Pentru scurtcircuitele îndepărtate, ținând seama că liniile electrice și transformatoarele sunt elemente statice, rezultă că $\underline{Z}_h = \underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}$. Cu $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_h + 3\underline{Z}_n$ se obține tensiunea de restabilire:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 \sqrt{3} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} \right) \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0}}{1 + \frac{2\underline{Z}}{\underline{Z}_0}} \quad (2.30)$$

b) Dacă, cumulat cu situația a, neutrul este izolat, adică: $\underline{Z}_n = \infty; \underline{Z}_0 = \infty; \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0} = 0$ se obține:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 \sqrt{3} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} = \underline{E}_2 - \underline{E}_3 \quad (2.31)$$

În acest caz, curentul nu se poate întrerupe numai pe un pol, ci în ambii poli simultan, iar tensiunea de restabilire care revine unui pol este $\frac{\underline{E}_{23}}{2}$, adică jumătate din tensiunea compusă.

c) Dacă, cumulat cu situația a, neutrul este legat direct la pământ, adică $\underline{Z}_n = 0$, rezultă: $\underline{Z}_0 = \underline{Z}, \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}_0} = 1$. În aceste condiții, din relația 2.30 se obține:

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 \quad (2.32)$$

adică tensiunea electromotoare pe fază.

Procesul deconectării scurtcircuitului trifazat, într-o rețea cu neutrul izolat se poate urmări cu ajutorul schemei din figura 2.4.a, și a diagramei fazoriale din figura 2.4.b. Imediat după trecerea curentului \underline{I}_1 prin valoarea zero, ceea ce echivalează cu întreruperea electrică pe faza 1, se calculează tensiunea de restabilire \underline{U}_{R1} pe polul 1 al întreruptorului:

$$\underline{U}_{R1} = \underline{E}_1 - \underline{E}_2 + \underline{Z} \underline{I}_{23}$$

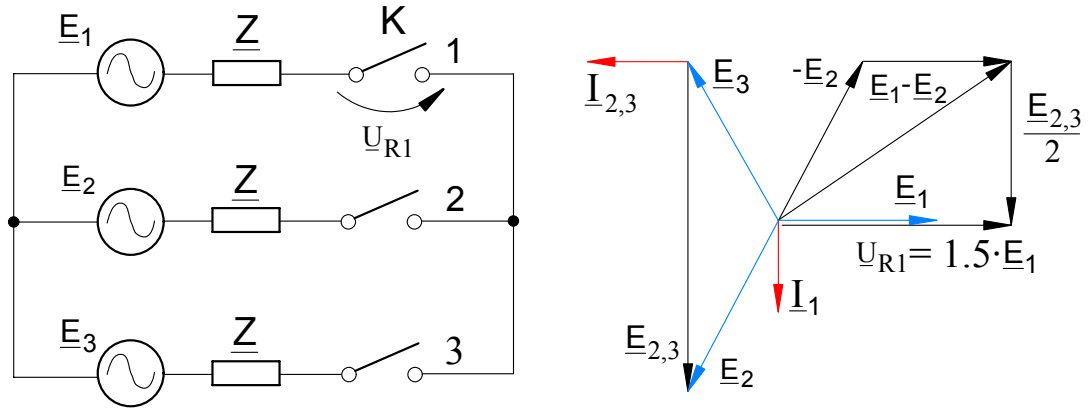


Fig. 2.4. Diagrama fazorială la deconectarea sarcinilor inductive trifazate:

a - schema electrică; b - diagrama fazorială.

unde curentul de scurtcircuit bipolar este:

$$\underline{I}_{23} = \frac{\underline{E}_{23}}{2\underline{Z}}$$

Se obține astfel:

$$\underline{U}_{R1} = \underline{E}_1 - \underline{E}_2 + \frac{\underline{E}_{23}}{2} = 1,5\underline{E}_1 \quad (2.33)$$

cea ce concordă cu relația 2.25. Curentul de scurtcircuit bipolar \underline{I}_{23} , care trece prin polii 2 și 3, trece prin valoarea zero în întârziere cu unghiul $\pi/2$ față de curentul \underline{I}_1 de scurtcircuit tripolar, întrerupt pe faza 1. În acest moment, al trecerii prin zero a curentului \underline{I}_{23} , tensiunea de restabilire aplicată polilor 2 și 3 este \underline{E}_{23} și deci, unui pol îi revine tensiunea $\frac{\underline{E}_{23}}{2}$.

În figura 2.5, se prezintă diagrama mărimilor instantanee, pe cele trei faze, la deconectarea unui scurtcircuit trifazat, într-o rețea cu neutrul izolat.

Astfel, în acord cu relațiile 2.25 și 2.33, valoarea de vârf a tensiunii de restabilire pe polul 1 al întreruptorului este:

$$\hat{u}_1 = \gamma \cdot 1,5 \cdot \sqrt{2}E = \gamma \cdot 1,5 \cdot \hat{E} \quad (2.34)$$

în timp ce pentru polii 2 și 3 valoarea de vârf a tensiunii de restabilire este de numai:

$$\hat{u}_2 = \hat{u}_3 = \frac{\gamma \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}E}{2} = \frac{\gamma \sqrt{3}\hat{E}}{2} \quad (2.35)$$

Curentul în polul 2 este prelungit cu unghiul $\pi/6$ față de curentul de scurtcircuit simetric în polul 2, iar curentul în polul 3 este întrerupt în avans cu unghiul $\pi/6$ față de curentul de scurtcircuit simetric în polul 3.

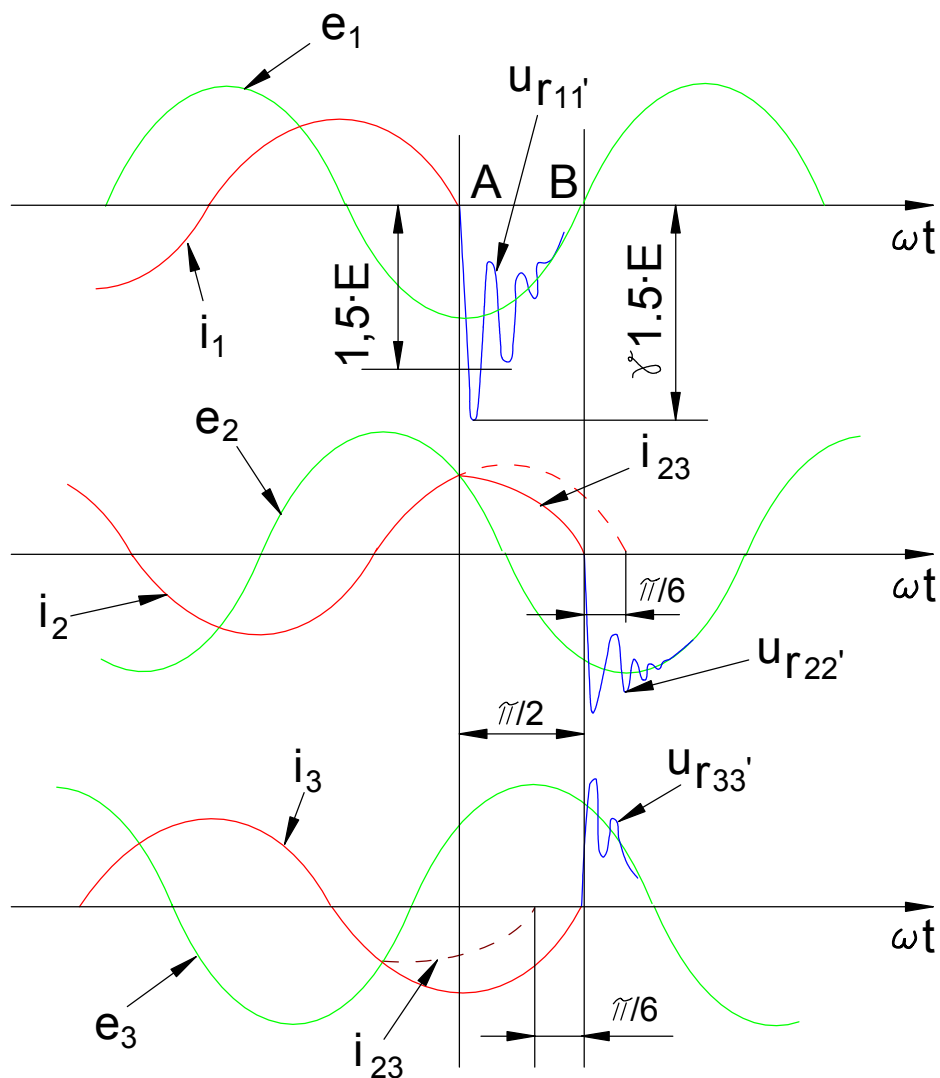


Fig. 2.5. Diagrama mărimilor instantanee la deconectarea scurtcircuitului trifazat, cu neutru izolat

2.3 TENSIUNEA DE RESTABILIRE LA DECONNECTAREA UNEI SARCINI CAPACITIVE MONOFAZATE

Schema electrică a deconectării unei sarcini capacitive de la o sursă de curent alternativ este dată în figura 2.6.a. Dacă întreruptorul K este închis, în regim permanent se produce efectul Ferranti, ca în diagrama fazorială din figura 2.6.b. După separarea elementelor de contact, în întreruptorul K circuitul se menține închis prin intermediul arcului electric, până la prima trecere

prin valoarea zero a curentului capacitiv. Acest moment surprinde condensatorul încărcat la potențialul $\sqrt{2}U_c$. Borna 2 a întreruptorului va rămâne la acest potențial u_2 , în timp ce borna 1 urmărește potențialul u_1 al sursei. Tensiunea de restabilire reprezentată în figura 2.6.c este $u_{12}=u_1-u_2$. Se constată că această tensiune depășește ca valoare maximă de două ori valoarea de vârf a tensiunii sursei, cu cantitatea $\Delta U \approx XI\sqrt{2}$, unde I este valoarea efectivă a curentului în regim nominal de exploatare. În mod normal, căderea de tensiune $\Delta U \approx XI\sqrt{2}$ este sub 5% din tensiunea sursei, astfel că în considerațiile ce urmează nu se va mai lua în considerare. În momentul trecerii prin zero a curentului, se produce un salt brusc de tensiune la bornele întreruptorului, ca urmare a dispariției căderii de tensiune în linia de alimentare. Oscilațiile pe frecvență proprie în circuitul sursei nu afectează decât puțin partea inițială a tensiunii de restabilire.

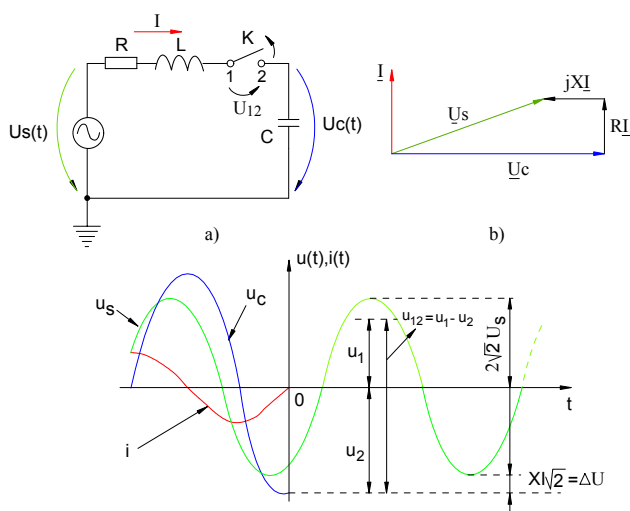


Fig. 2.6. Deconectarea unei sarcini capacitive monofazate:
a - schema electrică; b - diagrama fazorială; c - tensiunea tranzitorie de restabilire.

2.4. TENSIUNEA DE RESTABILIRE LA DECONNECTAREA SARCINILOR CAPACITIVE TRIFAZATE

În figura 2.7.a, se prezintă schema electrică corespunzătoare deconectării unei baterii trifazice de condensatoare. Și în acest caz se consideră că, după separarea elementelor de contact, separare acceptată ca fiind sincronă pe cele trei faze, conducția electrică în întreruptor este asigurată de arcul electric. Mai întâi are loc întreruperea electrică la polul în care curentul trece primul prin valoarea zero. Defazat în întârziere cu unghiul $\pi/2$, se realizează, simultan, întreruperea în poli 2 și 3. Condensatorul de pe faza 1 se încarcă la tensiunea \hat{E} și rămâne astfel încărcat și după întreruperea pe faza 1. În intervalul de un sfert de perioadă, adică din momentul întreruperii pe faza 1 până în momentul întreruperii pe fazele 2 și 3, cum arată diagrama fazorială din figura 2.7.b, și

diagrama valorilor instantanee din figura 2.8, potențialul punctului O crește de la valoarea zero la valoarea $\hat{E}/2$.

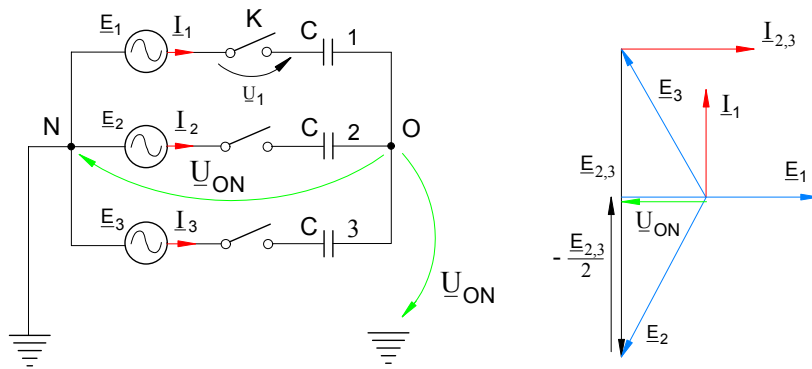


Fig. 2.7. Deconectarea unei sarcini capacitive trifazate:
a - schema electrică; b - diagrama fazorială.

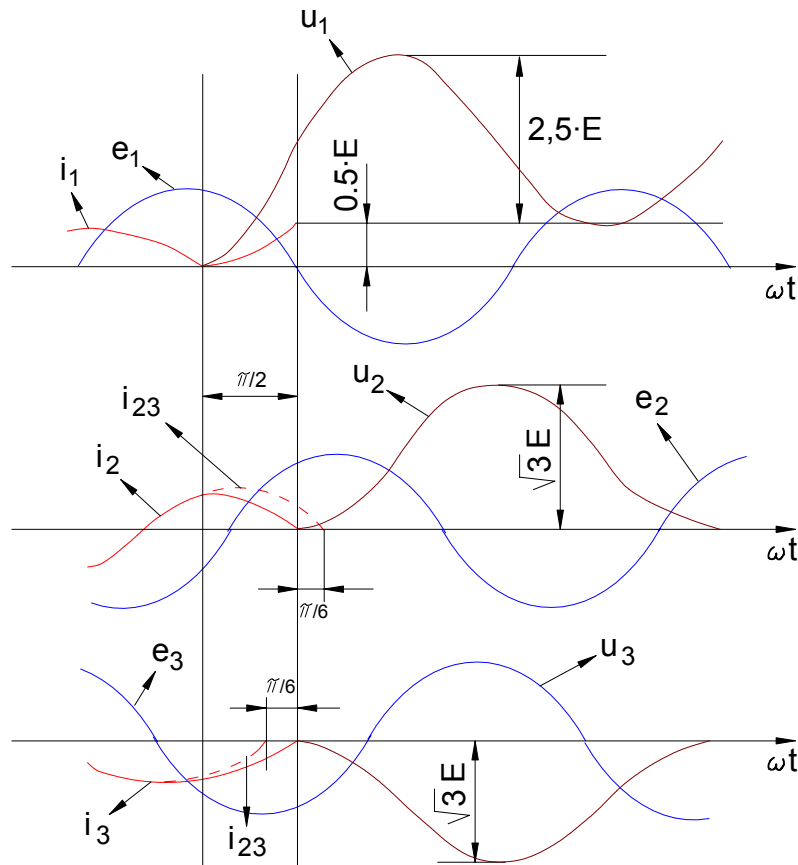


Fig. 2.8. Tensiuni de restabilire la deconectarea unei baterii trifazate de condensatoare.

Pentru schema din figura 2.7.a, se poate scrie:

$$\underline{E}_2 = \underline{Z} \underline{I}_{23} + \underline{U}_{ON} \quad (1.36)$$

unde \underline{U}_{ON} este tensiunea punctului O față de pământ, iar $\underline{I}_{23} = \frac{E_{23}}{2Z}$. Din relația 2.36, se obține astfel $\underline{U}_{ON} = 0,5E_1$. Tensiunile de restabilire pe fiecare pol al întreruptorului sunt desenate ca valori instantanee în figura 2.8, după cum urmează:

Polul 1: Tensiunea de restabilire u_1 se obține din însumarea tensiunii punctului O față de pământ, adică a tensiunii u_{NO} cu o tensiune normală de restabilire în regim monofazat cu amplitudinea $2\hat{E}$. Rezultă astfel amplitudinea $2,5\hat{E}$ pentru polul 1.

Polii 2 și 3: După deconectarea electrică pe faza 1, rezultă că o baterie de condensatoare de capacitate $C/2$ este supusă tensiunii $\sqrt{3}\hat{E}$. Întreruperea are loc la trecerea curentului i_{23} prin valoarea zero, adică cu un defazaj în întârziere de $\pi/2$ față de trecerea curentului prin zero în faza 1. Întreruperea are loc simultan în polii 2 și 3, care sunt parcurși de același curent i_{23} . Tensiunile de restabilire u_2 și u_3 ating valoarea maximă $\sqrt{3}\hat{E}$, deoarece valoarea maximă aplicată polilor 2 și 3 este $2\sqrt{3}\hat{E}$.

În polii 2 și 3 durata arcului electric este mai mare cu timpul $t = \pi/2\omega$ față de durata arcului în polul 1. Curentul în faza 2 trece prin valoarea zero în avans cu unghiul $\pi/6$ față de curentul în regim trifazat, iar curentul din polul 3 trece în întârziere, prin valoarea zero, cu unghiul $\pi/6$ față de curentul corespunzător în regim normal de funcționare.

2.5. COMUTAȚIA LINIILOR ELECTRICE ÎN GOL

Liniile electrice - cabluri sau linii aeriene - constituie sarcini capacitive. Caracteristic deconectării sarcinilor capacitive este viteza mare de creștere a tensiunii de restabilire și ca urmare reamorsarea arcului electric în cazul în care tensiunea de ținere nu crește suficient de rapid în camera de stingere. În figura 2.9, se prezintă o asemenea situație. Curba tensiunii de restabilire u_r , intersectează curba tensiunii de ținere a rigidității dielectrice în punctul M. În figura 2.10, sunt prezentate diagrame calitative ale unei duble amorsări.

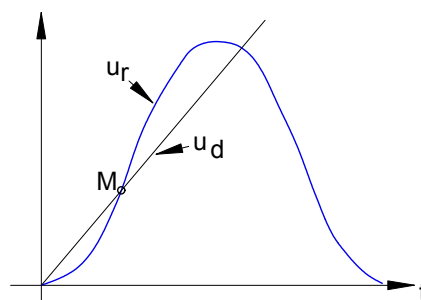


Fig. 2.9. Solicitarea dielectrică în întreruptor la deconectarea unei sarcini capacitive.

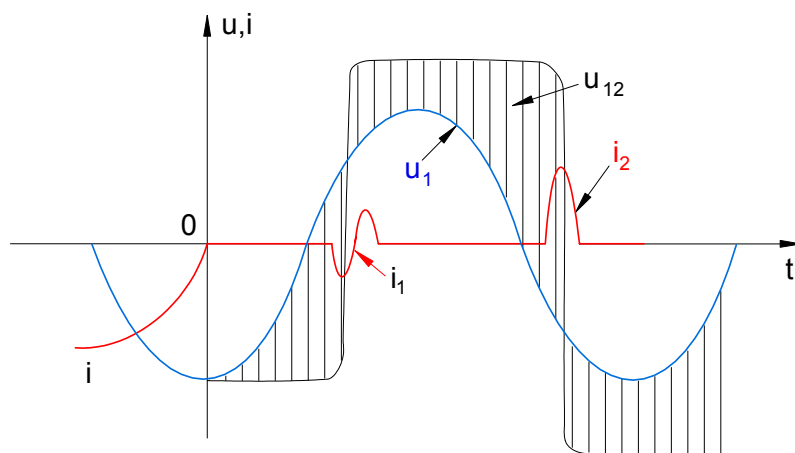


Fig. 2.10. Amorsare dublă la deconectarea unui condensator.

Amorsarea se face cu o tendință de oscilație a tensiunii condensatorului în jurul tensiunii sursei la o frecvență ridicată, determinată de valoarea capacității și de parametrii rețelei. Stingerea arcului electric are loc la trecerea curentului i_1 prin valoarea zero. În acest moment, tensiunea oscilantă a condensatorului, după ce și-a schimbat polaritatea, se conservă la valoarea de vârf a oscilației. Un proces asemănător se produce la amorsarea curentului i_2 . Prima ca și a doua amorsare se poate produce în etapa când tensiunea de restabilire u_r crește fără a ajunge la valoarea maximă (de exemplu, la prima amorsă $2\sqrt{2}U$).

În funcție de condițiile locale din camera de stingere a întreruptorului, curentul poate oscila câteva perioade, la frecvență ridicată, iar tensiunea condensatorului se limitează la un vârf oarecare al tensiunii oscilante, așa cum se indică în figura 2.11.

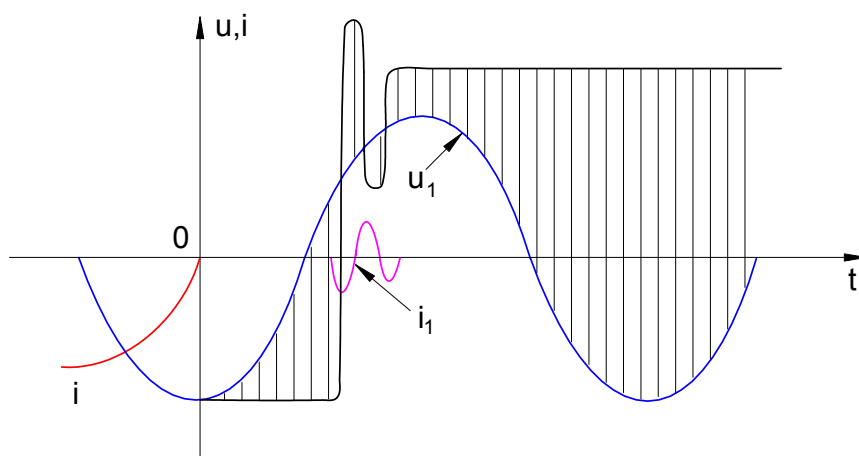


Fig. 2.11. Amorsare cu oscilații de curent.

Așa cum rezultă din figurile 2.10 și 2.11 solicitarea dielectrică între contactele întreruptorului poate depăși valoarea $2\sqrt{2}U_1 = 2\hat{U}_1$.

2.6. DECONECTAREA UNUI SCURTCIRCUIT LA BORNELE TRANSFORMATORULUI

Acest proces de comutație produce la bornele întreruptorului o tensiune oscilantă de restabilire cu pantă mare, întocmai ca la deconectarea defectului kilometric. În figura 2.24 s-a reprezentat:

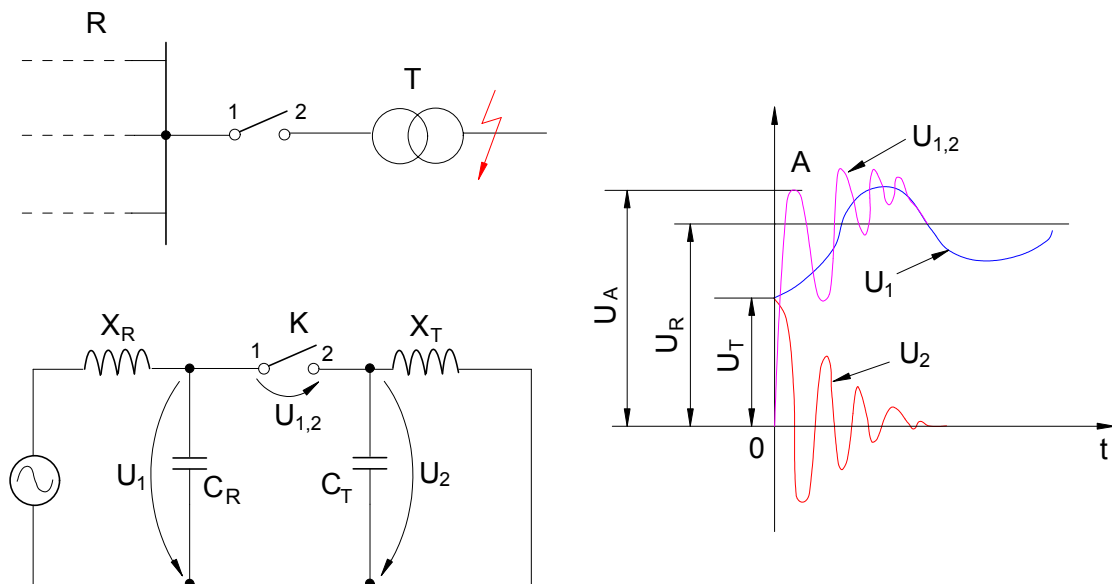


Fig. 2.24. Deconectarea unui scurtcircuit la bornele transformatorului.

- Poziția întreruptorului în rețeaua cu scurtcircuit la bornele transformatorului.
- Schema electrică echivalentă, unde s-a neglijat influența rezistențelor.
- Diagramele tensiunilor: u a sursei, u_1 a bornei întreruptorului spre rețea, u_2 a bornei întreruptorului spre transformator și $u_{1,2}=u_1-u_2$, care reprezintă tensiunea oscilantă de restabilire la bornele întreruptorului.

Pe durata scurtcircuitului raportul între tensiunea la bornele transformatorului U_T și tensiunea U a sursei, presupusă de putere infinită este:

$$\frac{U_T}{U} = \frac{X_T}{X_R + X_T} \quad (2.37)$$

unde cu X_R s-a notat reactanța rețelei și cu X_T reactanța transformatorului. Cu cât transformatorul are o putere nominală mai mică, cu atât reactanța sa este mai mare iar tensiunea \hat{U}_T la bornele transformatorului este mai mare. Pentru cazurile practice raportul $\frac{U_T}{U} \approx 0,6...0,9$.

Frecvența proprie de oscilație a transformatorului în scurtcircuit variază între 10 kHz, la tensiuni de ordinul 400 kV și 20 ... 30 kHz, la tensiuni de ordinul 50 kV. Frecvența proprie de oscilație a rețelei din amonte este de ordinul 1 ... 3 kHz. Întocmai ca la defectul kilometric solicitarea dielectrică produsă de tensiunea oscilantă de restabilire $u_{1,2}$ este dată atât de valoarea amplitudinii U_A , cât și de frecvența proprie de oscilație a transformatorului în scurtcircuit. Se poate obține astfel o pantă de ordinul 5,9 kV / μ s, pentru $U_A=148$ kV, ceea ce reprezintă o solicitare extrem de dură pentru întreruptor.

În concluzie, deconectarea unui scurtcircuit în apropierea unui transformator poate conduce la solicitări dielectrice importante, dacă puterea transformatorului este mică, spre exemplu 5 ... 10% față de puterea de scurtcircuit a întreruptorului.

2.7. DEFECTUL EVOLUTIV

Un defect evolutiv este un defect de scurtcircuit între o fază și pământ sau între două faze, ca urmare a supratensiunilor produse la deconectarea sarcinilor mici inductive sau capacitive. Întreruptorul deconectează în prima etapă un curent mic inductiv sau capacitiv, iar în etapa a doua un curent de scurtcircuit. Ținând seama de probabilitatea redusă de apariție a defectului evolutiv se admite că valoarea curentului de scurtcircuit, care se deconectează la defectul evolutiv, să fie de 60% din valoarea curentului de scurtcircuit la verificarea normală a capacității de deconectare.

Din analiza de mai sus rezultă că principalii factori de risc care pot genera supratensiuni de comutație și care vor fi tratați în următoarea fază pentru a stabili modalitățile de măsură și de prevenire sau limitare, sunt:

- amplitudinea (magnitudinea) tensiunilor de restabilire;
- viteza de creștere a tensiunii de restabilire;
- frecvența tensiunii oscilante de restabilire;
- durata de amortizare a fenomenului tranzitoriu.

Factorii de risc amintiți depind în mare măsură de tipul circuitului în care este amplasat contactorul în vid, adică inductiv, capacitiv sau complex.

CONCLUZII ȘI PROPUNERI

1. CONCLUZII

În lucrare au fost prezentate principalele caracteristici ale comutației în vid, solicitările la care sunt expuse elementele constructive și efectele acestora asupra principalilor consumatori din subteran (motoare și transformatoare).

S-a prezentat construcția și funcționarea unui contactor cu camere de stingere în vid.

În lucrare au fost supuse unei analize teoretice fenomenele tranzitorii și factorii de risc care pot genera supratensiuni de comutație mari.

Pentru exemplificare s-au folosit un circuit monofazat și unul trifazat, utilizându-se legile și teoremele din electrotehnică pentru a determina analitic tensiunile de restabilire.

Așa cum a rezultat din exemplificările și calculele analitice prezentate în capitolul 2, principalii factori cu implicații asupra supratensiunilor de comutație se referă la parametri care caracterizează tensiunile de restabilire și anume: amplitudinea, viteza de creștere, frecvența și durata de amortizare a fenomenului tranzitoriu.

2. PROPUNERI

Pentru etapa a II-a care se va desfășura pe parcursul anului 2008 se propun următoarele:

- continuarea cercetărilor pentru realizarea modelelor experimentale;
- experimentarea în condiții de laborator a modelelor propuse.

Pentru realizarea programului etapei din anul 2008, trebuie achiziționate următoarele echipamente:

- placă achiziție date;
- laptop cu configurația specificată în proiectul aprobat;
- contactoare în vid (2 buc.);
- imprimantă multifuncțională.

BIBLIOGRAFIE

1. Hortopan Gh. Aparate electrice de comutație. Vol I-principii. Ed Tehnică, București, 2000
2. Șurianu F.D, On connecting in parallel ZnO varistor used at low voltage, Bul, Frigură F., Șt. al Univ. Politehnica Timișoara, seria Energetica, Vătău D. Proceedings of the Fourth International Power Systems Conference, Timișoara, 8-9 Nov. 2001, p.407-410
3. * * * INGESCO - Products Catalogue, Dena Desarolles S.L. - Spania, 2001
4. * * * Metal Oxide, Catalog ISCRA Varistor, Lubljiana, Slovenia, 2001
5. * * * Overvoltage Protection - Main Catalogue, DEHN & SOHNE GmbH, Germania, 2000
6. * * * MURATRON S.A.: Catalogue 2000, Franța, 2000
7. * * * SF16/2001 / SC. PROTENERGO S.A.: Fișa tehnică a produsului BMS-01, Timișoara, 2001