

8. Controlul stării izolației

Calitățile funcționale ale echipamentelor electrice de înaltă tensiune trebuie verificate în vederea garantării fiabilității impuse, corespunzător importanței acestora. În ceea ce privește izolația, multiplele solicitări cărora le este supusă în timpul funcționării diminuează treptat proprietățile specifice, astfel încât verificarea calității are scopul de a garanta buna funcționare.

Tehnicile de verificare pot fi grupate în două categorii:

- încercări preventive periodice destinate asigurării funcționării corecte pe un interval de timp a cărui durată este stabilită fie prin experiența de exploatare acumulată;
- încercări oportune aplicate prin evaluarea gradului de diminuare a caracteristicilor inițiale, respectiv a duratei de viață remanentă. Această modalitate, numită mentenanță oportună, implică pe de o parte monitorizarea suficient de exactă a solicitărilor echipamentului respectiv, iar pe de altă parte cunoașterea consecințelor solicitărilor asupra calității izolației, lucru deosebit de dificil.

Controlul stării izolației se execută:

- la omologarea unui echipament nou, pentru atestarea parametrilor funcționali și de calitate, printr-un set cuprinzător de încercări, posibil de realizat în laborator, numite *încercări de tip*;
- la producător, înainte de livrare, printr-un număr de încercări uzuale, a căror amploare depinde de importanța echipamentului și de mărimea seriei de fabricație. Astfel produsele unicate, de serie mică sau deosebit de importante la locul de utilizare sunt supuse unui set complet de încercări, numite *încercări individuale*. Așa se procedează, de exemplu cu transformatoarele de mare putere și cu autotransformatoarele, cu întrerupătoarele de înaltă și foarte înaltă tensiune.
- pe durata exploatarei: la prima punere în funcțiune, periodic în timpul utilizării și după fiecare reparație care implică și izolația.

Ca urmare a solicitărilor, starea izolației poate fi afectată prin:

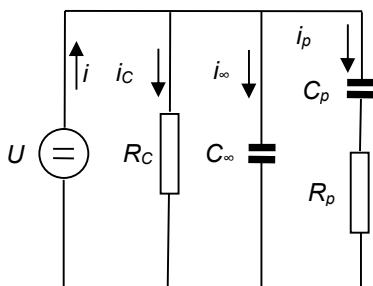
- *defecte locale* precum fisurare, străpungere, ardere;
- *defecte difuze* precum umezire, descărcări parțiale, modificarea compoziției chimice, îmbătrânire.

Controlul stării izolației se poate realiza folosind o gamă destul de largă de tehnici:

- a) *Metode electrice nedistructive* prin care determinarea unor parametri se face folosind tensiune electrică mai mică decât aceea de serviciu, astfel încât starea izolației să nu se agraveze în urma încercărilor. Astfel de metode pot folosi tensiune continuă, alternativă sau de impuls. Alte metode electrice sunt măsurarea nivelului descărcărilor parțiale în izolație și determinarea repartiției tensiunii pe izolație.
- b) *Metode electrice distructive*, folosind nivele de tensiune mult mai mari decât tensiunea de serviciu, putându-se solda, în cazul izolației necorespunzătoare, cu producerea unor descărcări electrice care scot din funcțiune izolația afectată. Aceste metode folosesc tensiune alternativă, de impuls și uneori continuă.
- c) *Metode neelectrice* prin care se pot identifica defecte de structură a izolației. Astfel de metode sunt defectoscopia cu ultrasunete, cu raze X sau termografia.

8.1 Metode nedistructive folosind tensiune continuă

Bazele teoretice ale acestor metode rezultă din comportarea materialelor izolante la aplicarea tensiunii continue. Schema din fig.8.1 modelează fenomenele electrice care au loc în izolație în aceste condiții.



R_C reprezintă rezistența electrică a izolației în regim permanent de aplicare a tensiunii. Această rezistență, deși foarte mare, nu este totuși infinită astfel încât izolația este parcursă de un curent, cu atât mai mic cu cât starea izolației este mai bună. Prezența unor impurități în masa sau pe suprafața materialelor izolante, dintre care apa este cea mai importantă, reduce mărimea rezistenței izolației.

Fig. 8.1 Schema echivalentă a izolației

$C_∞$ reprezintă capacitatea geometrică a izolației, care depinde de natura materialului izolant ca și de forma și dimensiunile electrozilor. Această capacitate ideală se încarcă instantaneu la aplicarea tensiunii, printr-un impuls de curent atât de rapid încât nu poate fi măsurat.

Ramura de circuit care conține rezistența R_p și capacitatea C_p modelează fenomenele de polarizare, care au loc în dielectric la aplicarea tensiunii. Prin polarizare se înțelege deplasarea sau orientarea sarcinilor electrice libere din izolație în câmpul electric creat de tensiunea aplicată. Această deplasare consumă putere maximă în momentul inițial al aplicării tensiunii și din ce în ce mai mică pe măsura avansării procesului de polarizare. Variația curentului absorbit datorită polarizării are aceeași formă cu a curentului printr-un circuit RC serie supus unei tensiuni continue.

Polarizarea dielectricilor este un proces complex a cărui desfășurare depinde de natura materialului izolant ca și starea sa, în principal de conținutul de umiditate. Principalele componente ale procesului de polarizare sunt:

- Polarizarea electronică și ionică, care se referă la deplasarea sarcinilor libere datorită forțelor electrostatice. Acest proces este foarte rapid.
- Polarizarea dipolică, care reprezintă alinierea axelor electrice ale moleculelor dipolare cu direcția intensității câmpului electric aplicat. Unii dielectrici sunt formați din astfel de molecule, dar cea mai mare contribuție la polarizarea dipolică revine moleculelor de apă din dielectric. Și acest proces este rapid, dar cu atât mai lent cu cât temperatura izolației este mai mare.
- Polarizarea structurală este un proces de acumulare a unor sarcini electrice la suprafața de separație a două materiale izolante sau a două straturi ale aceluiași material care au căpătat unele proprietăți diferite datorită degradării sau impurităților. Acest proces este cel mai lent, având durate de la câteva minute până la mai multe ore.

Curentul i absorbit de izolație are expresia

$$i = \frac{U}{R_C} + \frac{U}{R_p} e^{-t/R_p C_p}$$

iar rezistența de izolație se definește ca

$$R_{iz} = \frac{U}{i}$$

Deoarece curentul absorbit variază în timp, rezultă că și rezistența de izolație este variabilă, între valoarea inițială R_c/R_p și valoarea finală R_c , conform graficului din fig. 8.2.

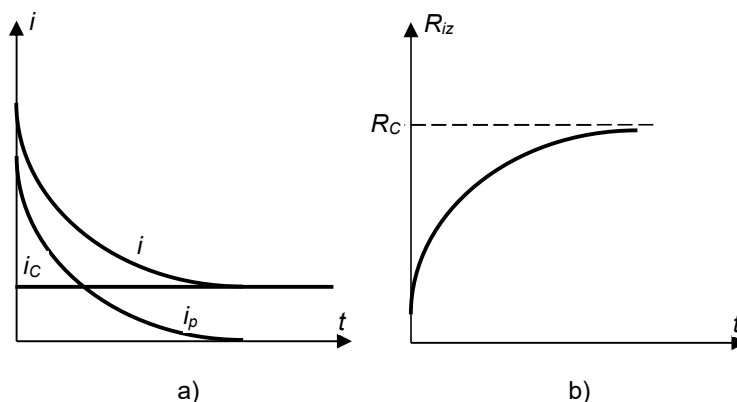


Fig. 8.2- Curentul absorbit de izolație (a) și rezistența de izolație (b) ca funcții de timp

Metodele practice de încercare, cel mai frecvent utilizate sunt:

a) Măsurarea valorii R_{60}

Datorită variației rezistenței de izolație în funcție de timp, este necesară alegerea unui moment pentru măsurare față de aplicarea tensiunii, astfel ca valorile măsurate să poată fi comparate cu acelea normate sau măsurate anterior la același obiect.

Standardele naționale fixează acest moment la 60 secunde de la aplicarea tensiunii.

Rezultatul măsurării indică, în primul rând prezența sau lipsa unui defect major al izolației de natură a nu permite punerea sub tensiunea de serviciu a obiectului încercat. Valorile mai mici decât acelea normate semnaleză o degradare a izolației, fără a putea indica natura și localizarea acesteia.

Deoarece rezultatul măsurării depinde de volumul izolației ca și de natura materialului izolant, rezultatul măsurării nu poate servi pentru comparație decât cu echipamente identice constructiv. În cazul cablurilor, valoarea măsurată se recalculează prin raportare la unitatea de lungime, de obicei 1 km.

Efectuarea unei măsurători trebuie precedată de eliminarea sarcinilor electrice din izolație, remanente de la o aplicare anterioară a tensiunii. Bornele obiectului încercat se scurtcircuitază la pământ timp de câteva minute, în acest scop. De asemenea, suprafața izolației trebuie curățată de impurități pentru a elimina curentul superficial, care poate altera valoarea măsurată.

Mărimea rezistenței de izolație este influențată de temperatură, astfel că valoarea măsurată la o temperatură oarecare trebuie corectată pentru a corespunde temperaturii de referință, de 20°C. Dependența de temperatură a valorii rezistenței de izolație are loc în sens invers decât în cazul rezistenței conductoarelor. Astfel, cu creșterea temperaturii rezistența de izolație scade.

Raportarea (recalcularea) valorii rezistenței de izolație măsurată la temperatura t_1 la temperatura de referință t_0 se face:

- prin înmulțire cu un factor de corecție, dacă $t_0 < t_1$,

- prin împărțire cu un factor de corecție, dacă $t_0 > t_1$.

Factorul de corecție depinde de $\Delta t = |t_0 - t_1|$. De exemplu, pentru transformatoare cu izolație hârtie-ulei se pot folosi valorile din tabelul următor, dacă nu există alte valori indicate de către constructor.

Tabelul 1. Factorul de corecție a rezistenței de izolație în funcție de temperatură

Δt [°C]	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
k	1,04	1,08	1,13	1,17	1,22	1,5	1,84	2,25	2,75	3,4	4,15	5,1	6,2	7,5	9,2	11,2	13,9	17

b) Măsurarea coeficientului de absorbție R_{60}/R_{15}

Raportul valorilor rezistenței de izolație măsurate la 15 și respectiv 60 secunde de la aplicarea tensiunii continue oferă informații mai utile asupra stării izolației, comparativ cu R_{60} . Rezultatul încercării, numit **coeficient de absorbție**, este independent de volumul de material izolant ca și de temperatura izolației datorită raportării celor două valori măsurate. Astfel, utilitatea rezultatului este mai largă, putând servi pentru compararea stării izolației din același material dar aparținând unor echipamente diferite. Considerând și solicitările diferite ale izolației acelor echipamente se pot obține concluzii cu privire la efectul solicitărilor asupra vitezei de degradare a izolațiilor respective.

Interpretarea mărimii coeficientului de absorbție se referă în primul rând la prezența umidității în izolație. Cu cât gradul de umiditate este mai ridicat, procesele de polarizare sunt mai intense, dar se desfășoară și cu viteză mai mare, astfel că iau sfârșit mai repede decât într-o izolație lipsită de umiditate, fig. 8.3. Astfel, în cazul unei izolații lipsite de umiditate, valoarea coeficientului de absorbție este semnificativ mai mare decât 1, iar în cazul prezenței umidității valoarea se apropie de 1 cu cât mai mult cu cât conținutul de umiditate este mai mare.

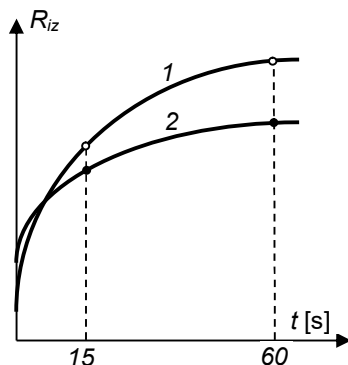


Fig. 8.3 – Coeficientul de absorbție: izolație uscată (1), izolație umedă (2)

Aparatul pentru măsurarea rezistenței de izolație, $M\Omega$ -metrul, este alcătuit, în principiu, dintr-o sursă de tensiune înaltă continuă și un instrument de măsură a curentului absorbit de izolație. Tensiunea de încercare este corelată cu tensiunea de serviciu a izolației, putând fi selectată conform normelor de încercare. Domeniul uzual de tensiuni de măsură este 500 – 10000 V.

Aparatele de construcție recentă sunt completate cu sistem de prelucrare a rezultatelor încercărilor precum înregistrarea continuă a mărimii rezistenței de izolație pe durata încercării, trasarea curbei $R_{iz}(t)$, calculul coeficientului de absorbție sau chiar a oricăror rapoarte ale valorilor rezistenței de izolație, memorarea valorilor măsurate, interfață pentru conexiune la calculator etc.

c) controlul stării izolației neomogene cu tensiune continuă

Adesea construcțiile izolante sunt realizate din straturi de materiale izolante diferite. De exemplu, izolația hârtie-ulei folosită în transformatoare, condensatoare și cabluri constă din benzi sau straturi de hârtie între care se află pelicule sau straturi de ulei. Aceste materiale au proprietăți dielectrice diferite ca și comportare diferită la

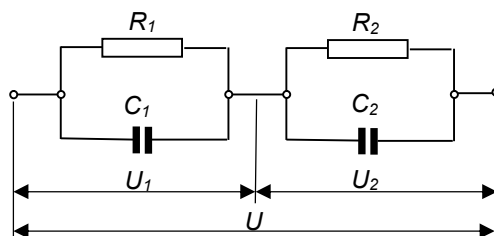


Fig. 8.4 Schema echivalentă a izolației neomogene

solicitările electrice și termice. Schema echivalentă a unei izolații neomogene poate fi o înseriere de circuite RC paralel. Cea mai simplă schemă de acest fel este dată în fig. 8.4.

Neomogenitatea izolației se poate exprima cu ajutorul constantelor de material, permitivitate și conductivitate:

$$\varepsilon_1 \rho_1 \neq \varepsilon_2 \rho_2,$$

care, la nivelul parametrilor schemei revine la:

$$R_1 C_1 \neq R_2 C_2$$

Aplicând acestui circuit o tensiune continuă U , la momentul inițial repartiția tensiunii pe cele două straturi este capacitivă:

$$\frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{C_2}{C_1}, \quad U_{10} + U_{20} = U,$$

de unde rezultă

$$U_{10} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} U, \quad U_{20} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U.$$

La sfârșitul regimului tranzitoriu, cele două condensatoare sunt încărcate, iar curentul absorbit de circuit este pur rezistiv, iar tensiunea se repartizează în funcție de mărimile rezistențelor:

$$\frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{R_1}{R_2}, \quad U_{1f} + U_{2f} = U$$

astfel încât

$$U_{1f} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad U_{2f} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U.$$

Sarcinile electrice acumulate în cele două capacități după trecerea regimului tranzitoriu sunt diferite, astfel că se poate defini mărimea numită sarcină de absorbție:

$$Q_{abs} = |Q_{1f} - Q_{2f}| = C_1 U_{1f} - C_2 U_{2f} = U \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{R_1 + R_2}.$$

Aceasta, se localizează la suprafața de separație a celor două straturi, determinând fenomenul de polarizare remanentă, care poate fi pus în evidență prin curba de revenire a tensiunii pe izolație. Pentru obținerea curbei tensiunii de revenire, se poate folosi montajul din fig.8.5.

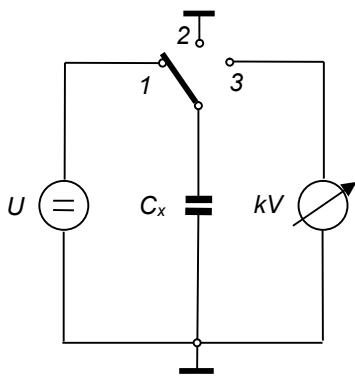


Fig. 8.5 Schema de încercare pentru curba de revenire

Încercarea are loc astfel:

- se încarcă obiectul de încercat de la sursa de tensiune înaltă continuă, timp suficient de lung pentru încheierea proceselor de polarizare (comutatorul pe poziția 1);
- se descarcă C_{∞} , trecând contactul mobil pe borna 3, atingând pentru scurt timp și borna 2 legată la pământ. Pe durata contactului pe borna 2, capacitățile C_1 și C_2 (fig.8.4) sunt conectate în paralel, iar tensiunea pe acestea se stabilește la valoarea:

$$U_{abs} = \frac{Q_{abs}}{C_1 + C_2}.$$

• Contactul mobil fiind trecut pe poziția 3, se înregistrează evoluția în timp a tensiunii la kV-metru. La momentul inițial al atingerii contactului 3, cele două capacități sunt încărcate la aceeași tensiune, U_{abs} , dar aflate în opoziție, astfel că tensiunea pe obiect este nulă. În continuare are loc descărcarea, cu viteze diferite a celor două condensatoare pe rezistențele R_1 și R_2 , având ca efect apariția la bornele obiectului a unei tensiuni:

$$U_{rev} = U_{abs} \left(e^{-t/R_1 C_1} - e^{-t/R_2 C_2} \right).$$

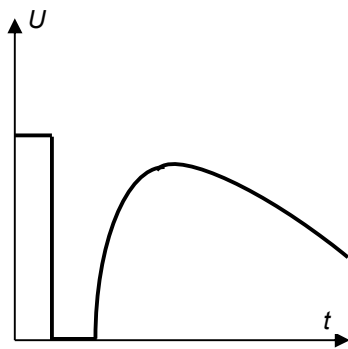


Fig. 8.6 – Curba de revenire a tensiunii pe izolație

Forma curbei tensiunii de revenire (fig.8.6) oferă informații asupra stării izolației încercate astfel: cu cât izolația este mai umedă, frontul tensiunii de revenire este mai lent, iar amplitudinea sa este mai redusă. De asemenea spatele curbei tensiunii descrește mai rapid dacă izolația este umedă.

d) autodescărcarea

Prin evaluarea vitezei de descărcare a unei capacități încărcate în prealabil de la o sursă de tensiune înaltă continuă, se poate obține o informație mai curând calitativă referitoare la mărimea rezistenței

de izolație.

Folosind montajul din fig.8.5, se realizează încărcarea completă a capacității izolației menținând suficient timp contactul mobil pe poziția 1. Ulterior, se trece contactul mobil direct pe borna 3, fără atingerea bornei 2. kV-metrul va indica tensiunea pe obiectul încercat, descrescătoare după o lege exponențială (fig.8.7) :

$$U(t) = \frac{U}{R_1 + R_2} \left(R_1 e^{-t/R_1 C_1} + R_2 e^{-t/R_2 C_2} \right).$$

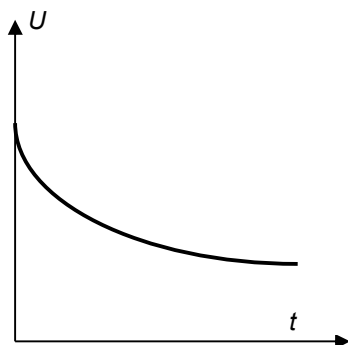


Fig. 8.7 – Curba de autodescărcare

Cu cât viteza de descreștere a tensiunii este mai mare, cu atât rezistența de izolație este mai mică. Încercarea poate servi, de exemplu, pentru compararea stării izolației fazelor unui cablu sau a unor condensatoare.

e) Metoda capacitate-timp

Această metodă de încercare servește la determinarea raportului C_p/C_∞ . Se folosește montajul din fig.8.8, în care C_N reprezintă un condensator cu izolație fără pierderi (etalon) având capacitatea mult mai mare decât a obiectului încercat.

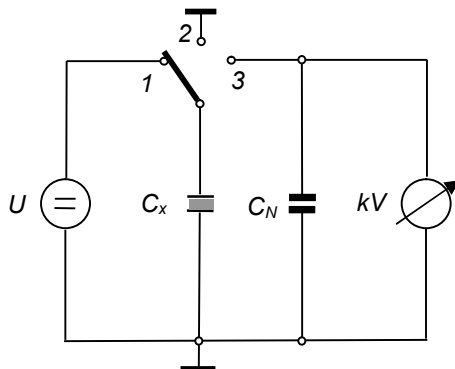


Fig. 8.8 Schema de încercare pentru determinarea coeficientului de dispersie

Se efectuează două încercări.

- Mai întâi se încarcă complet capacitatea obiectului, $C_x = C_\infty + C_p$. Apoi se trece contactul mobil pe borna 3, atingând în trecere și borna 2, ceea ce provoacă descărcarea capacității geometrice, C_∞ .

După conectarea în paralel a celor două capacități, pe acestea se stabilește o tensiune U_1 . Bilanțul sarcinilor electrice se scrie:

$$C_p U = (C_p + C_\infty + C_N) U_1,$$

de unde, ținând seama că $C_N \gg C_x$, se obține:

$$C_p = C_N \frac{U_1}{U}.$$

- A doua încercare constă în încărcarea completă a capacității C_x după care aceasta se conectează în paralel cu capacitatea C_N , fără a se mai face contactul pasager la borna 2. Tensiunea la bornele capacităților în paralel devine $U_2 > U_1$.

Bilanțul sarcinilor electrice este acum:

$$(C_\infty + C_p) U = (C_p + C_\infty + C_N) U_2,$$

din care rezultă

$$C_\infty + C_p = C_N \frac{U_2}{U}.$$

În continuare

$$C_\infty = C_N \frac{U_2 - U_1}{U}.$$

În final, raportul capacităților este

$$\frac{C_p}{C_\infty} = \frac{U_1}{U_2 - U_1}.$$

Experimental, s-a constatat că acest raport variază aproximativ linear în funcție de conținutul de umiditate al izolației hârtie-ulei.

8.2 Metode nedistructive folosind tensiune de frecvență industrială

Izolația echipamentelor de înaltă tensiune supusă tensiunii de frecvență industrială, se comportă diferit în raport cu aplicarea tensiunii continue. Deși se poate adopta aceeași schemă echivalentă (fig.8.9 a), circulația curentului se schimbă, iar procesele care au loc în izolație, de asemenea se schimbă. Schema vectorială a curenților prin izolație (fig.8.9 b) permite definirea unghiului de pierderi dielectrice, δ , prin care se poate caracteriza starea izolației încercate.

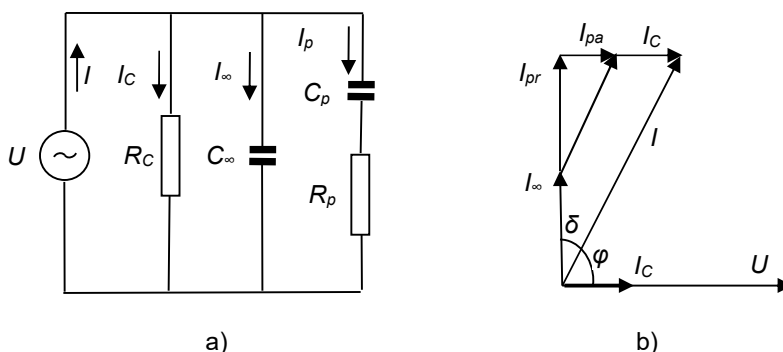


Fig. 8.9 Izolația supusă tensiunii alternative: (a) schema echivalentă, (b) diagrama vectorială

Expresiile curenților în schema de mai sus sunt:

$$I_C = \frac{U}{R_C}$$

$$I_\infty = \frac{U}{1} = j\omega C_\infty U$$

$$I_p = \frac{U}{R_p + \frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{j\omega C_p}{1 + j\omega R_p C_p} U = \frac{j\omega C_p (1 - j\omega R_p C_p)}{1 + (\omega R_p C_p)^2} U$$

Astfel, componentele activă și capacitivă ale curentului absorbit de izolație sunt :

$$I_a = U \left[\frac{1}{R_C} + \frac{R_p (\omega C_p)^2}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \right]$$

$$I_{cap} = U \left[\omega C_\infty + \frac{\omega C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \right]$$

Punând expresia curentului capacitiv sub forma :

$$I_{cap} = U\omega \left[C_\infty + \frac{C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \right] = U\omega C_e,$$

se obține definiția capacității echivalente a izolației supusă tensiunii alternative :

$$C_e = C_\infty + \frac{C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2}$$

Se definește factorul de pierderi dielectrice al izolației :

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_{cap}}$$

Față de cazul tensiunii continue, când prin izolație circulă, în regim permanent numai curentul de conducție, în cazul tensiunii alternative prin toate ramurile schemei echivalente circulă curent permanent. Componenta activă a curentului total prin izolație, I_a , produce o pierdere de energie activă, direct proporțională cu factorul de pierderi dielectrice :

$$P_a = UI_a = UI_{cap} \tan \delta = U^2 \omega C_e \tan \delta.$$

Calitatea izolației este cu atât mai bună cu cât pierderile active sunt mai mici, respective cu cât factorul de pierderi dielectrice, $\tan \delta$ este mai mic.

Metodele de încercare bazate pe aceste considerente teoretice sunt:

a) măsurarea $\tan \delta$

Încercarea se execută cu ajutorul punții de curent alternativ (Schering), care permite determinarea simultană și a capacității obiectului încercat. Întrucât factorul de pierderi dielectrice este raportul a doi curenți, mărimea lui nu depinde de volumul izolației ci numai de natura și starea acesteia.

Temperatura izolației influențează mărimea $\tan \delta$, valoarea măsurată crescând cu temperatura, deoarece curentul activ crește pe seama intensificării proceselor de polarizare și a scăderii rezistenței de conducție în aceste condiții. Rezultatul măsurării trebuie corectat pentru a corespunde temperaturii de referință de 20°C.

Raportarea (recalcularea) valorii $\tan \delta$ măsurată la temperatura t_1 la temperatura t_0 se face:

- prin împărțire cu factorul de corecție k , dacă $t_0 < t_1$,
- prin înmulțire cu factorul de corecție k , dacă $t_0 > t_1$.

Factorul de corecție depinde de $\Delta t = |t_0 - t_1|$, conform tabelului:

Tabelul 2. Factorul de corecție a $\tan \delta$ în funcție de temperatură

$\Delta t [^\circ\text{C}]$	1	2	3	4	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
k	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,25	1,51	1,75	2	2,3	2,65	3	3,5	4	4,6	5,3	6,1	7

Valorile k indicate în tabel sunt informative și se folosesc dacă nu există rezultate anterioare ale măsurării $\tan \delta$ la diferite temperaturi.

Rezultatul măsurării se compară cu valorile admisibile specificate pentru echipamentul încercat sau cu valorile măsurate anterior pentru același echipament.

În principiu, folosirea punții Schering pentru măsurarea factorului de pierderi dielectrice nu implică utilizarea unei tensiuni de alimentare precis stabilite. Totuși, datorită faptului că, pe măsura creșterii tensiunii de încercare, pot apărea fenomene neliniare precum descărcarea corona pe electrozi sau descărcările parțiale în

incluziunile gazoase, tensiunea de încercare se alege în funcție de tensiunea de serviciu a izolației astfel încât încercarea să fie nedistructivă.

b) $\tan\delta(U)$

Încercarea permite punerea în evidență a fenomenului de descărcări parțiale în izolație, fără a permite însă măsurarea intensității acestora. Se execută măsurarea $\tan\delta$ la câteva valori ale tensiunii de încercare, într-o gamă destul de largă, de exemplu $(0,25 - 1,25)U_{f.p.}$. Apariția descărcărilor parțiale conduce la creșterea pierderilor active în izolație, respectiv la creșterea valorii $\tan\delta$. Starea izolației poate fi caracterizată în funcție de viteza de creștere a $\tan\delta$ în raport cu tensiunea de încercare, fig.8.10. Izolația este considerată corespunzătoare, dacă nu apare o creștere pronunțată a valorii $\tan\delta$ până la o tensiune de încercare egală cu tensiunea fază-pământ.

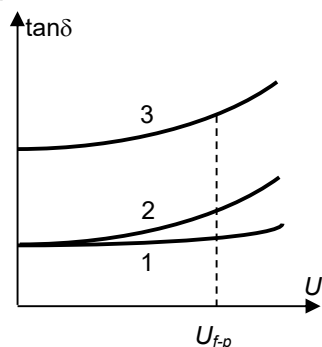


Fig.8.10 Funcția $\tan\delta(U)$

Curba (1) din fig.8.10 corespunde unei izolații lipsite de umiditate și incluziuni gazoase. Curba (2) este valabilă pentru o izolație uscată dar care conține incluziuni gazoase, iar curba (3) corespunde unei izolații umede și cu incluziuni gazoase.

c) $\tan\delta(\theta)$

Cu cât izolația are un conținut mai ridicat de umiditate, creșterea curentului de conducție în funcție de temperatură este mai accentuată. În consecință și $\tan\delta$ crește mai rapid în funcție de temperatură în cazul unei astfel de izolații.

Aplicarea acestei metode necesită definirea unor temperaturi pentru încercare. De exemplu, o propunere era pentru 20°C și 70°C . Principala dificultate pentru aplicarea unei astfel de metode este stabilizarea temperaturii la valoarea stabilită pentru încercare. Pentru echipamente mari, de exemplu transformatoarele, se poate lua în considerare temperatura uleiului la partea superioară a cuvei, așa cum se procedează și la corectarea valorii măsurate a $\tan\delta$.

d) $\tan\delta(t)$

Prin efectuarea unor măsurători ale $\tan\delta$ pentru o izolație menținută un timp îndelungat la tensiunea de încercare se constată, la izolațiile cu defecte de tip umiditate sau impurități, o creștere a valorii, iar la izolațiile în stare bună o scădere a pierderilor dielectrice, mai ales pentru izolația lichidă. Acest din urmă fenomen, poate fi pus pe seama curățirii electrolitice a uleiului.

e) Metode capacitive

Măsurarea capacității izolației în funcție de unii parametri poate conduce la obținerea unor concluzii privitoare la starea acesteia.

• Metoda capacitate-frecvență

Anterior s-a determinat expresia de calcul a capacității echivalente a izolației, care cuprinde și componenta datorită polarizării. Deoarece procesele de polarizare se desfășoară tot mai incomplet cu cât frecvența tensiunii crește, capacitatea de polarizare contribuie tot mai puțin cu cât frecvența crește. Dacă dielectricul conține umiditate, reducerea capacității echivalente cu creșterea frecvenței este mai semnificativă decât în cazul izolației uscate.

Astfel raportul valorilor capacității măsurate la o frecvență joasă și una mai mare este apropiat de 1 pentru izolația uscată și semnificativ mai mare decât 1 dacă izolația conține umiditate. De exemplu, această metodă s-a aplicat folosind frecvențele de 2 Hz și 50 Hz, rezultatul fiind raportul C_2/C_{50} .

8.3 Măsurarea descărcărilor parțiale

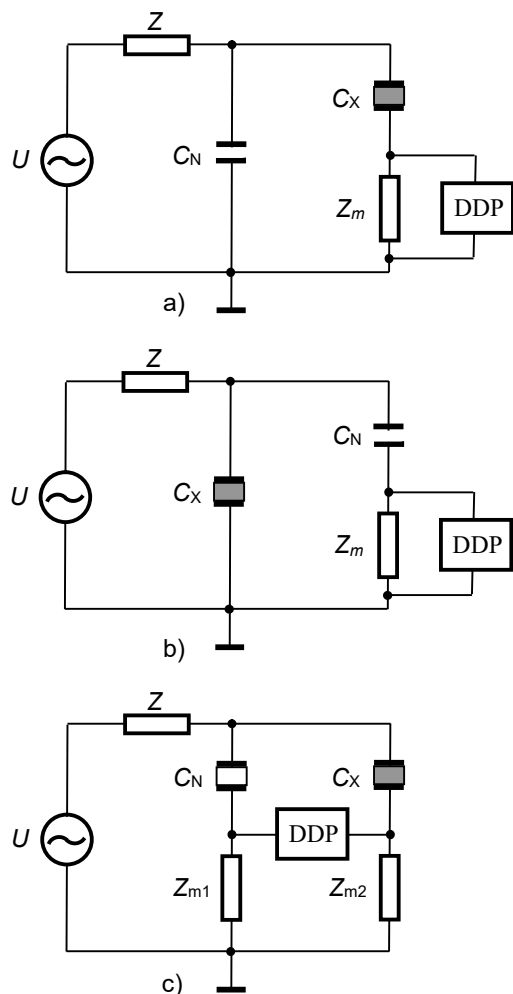


Fig.8.11 Scheme de principiu pentru măsurarea descărcărilor parțiale

ai acestui fenomen.

- C_x – Capacitatea obiectului încercat.

Schema din fig.8.11,a) este folosită la măsurători în laborator, acolo unde obiectul încercat poate fi izolat cu ambele borne față de pământ.

Dacă încercarea se execută în instalația unde funcționează echipamentul, se folosește schema din fig.8.11, b) în care obiectul încercat are o bornă legată la pământ.

Dacă încercarea se execută asupra unui lot de produse identice, atunci se poate folosi schema diferențială din fig.8.11, c), unde C_N este unul dintre obiectele din lot care prezintă un nivel al descărcărilor parțiale apropiat sau egal cu cel admisibil. Măsurătoarea se execută astfel prin comparație, fiind selectate doar obiectele cu nivel mai ridicat al descărcărilor parțiale față de obiectul etalon.

Fenomenul descărcărilor parțiale este specific mai ales izolației realizate din straturi subțiri de materiale izolante (hârtie, țesături) impregnate cu ulei sau lac. Pezența de lungă durată a acestor descărcări în incluziunile gazoase din izolația stratificată provoacă degradarea treptată atât prin eroziunea materialului cât și prin creșterea pierderilor active.

Detectarea și măsurarea descărcărilor parțiale se poate realiza prin procedee specifice unor semnale electrice de amplitudine redusă și cu frecvență ridicată. În fig.8.11 sunt prezentate schemele de principiu folosite pentru măsurarea descărcărilor parțiale în izolația echipamentelor electrice. Aceste scheme conțin unele elemente cu funcțiuni identice:

- Z - o impedanță filtru trece-jos care blochează circulația semnalelor de frecvență ridicată în circuitul sursei de alimentare.
- C_N – condensator etalon, lipsit de descărcări parțiale. Rolul acestuia este de a crea o cale de închidere a curentului de înaltă frecvență datorat descărcărilor parțiale.
- Z_m – Impedanța de măsură, care este necesară pentru obținerea semnalului de intrare pentru aparatul de măsură, DDP.
- **DDP** – detectorul de descărcări parțiale, un instrument electronic, care poate măsura sarcina aparentă a impulsurilor descărcărilor parțiale, sarcina aparentă integrată pe un interval de timp ca și alți parametri specifici

8.4 Încercarea izolației cu tensiune mărită

Acest tip de încercare este numită „*distructivă*” deoarece se poate solda cu o descărcare electrică care, în cazul izolației interne, scoate din funcțiune echipamentul respectiv. Tensiunea de încercare este mult mai mare decât tensiunea de serviciu, dar durata de aplicare este scurtă sau foarte scurtă. Rezultă că această încercare servește la verificarea ținerii izolației la supratensiuni.

În timpul funcționării rețelelor de înaltă tensiune pot apărea mai multe tipuri de supratensiuni, diferite ca amplitudine și durată de existență. Cele mai reduse sunt supratensiunile temporare de frecvență industrială, dar a căror durată poate fi între fracțiuni de secundă și mai multe ore, în funcție de cauza apariției lor. Supratensiunile de comutație au amplitudini mai mari, o mare diversitate de forme și durate până la câteva zeci sau sute de milisecunde. În sfârșit, supratensiunile de trăsnet au amplitudinile cel mai mari, dar și duratele cele mai mici.

În laborator, ținerea izolației la aceste supratensiuni se verifică folosind tensiuni de încercare standardizate ca formă și amplitudine: tensiune de frecvență industrială, de impuls de comutație și de impuls de trăsnet. În situații particulare se admite și folosirea tensiunii înalte continue.

8.4.1 Încercarea cu tensiune alternativă de frecvență industrială.

Această încercare este cel mai mult folosită putând fi aplicată majorității echipamentelor, cu excepția acelor care au capacitatea fază-pământ sau fază-fază prea mare pentru a putea fi suportată de sursa de înaltă tensiune (cabluri, condensatoare). Dacă se dispune de o instalație de încercare de tip circuit rezonant serie, această excepție poate fi depășită.

Scopul încercării este verificarea ținerii izolației la tensiunea de serviciu și la supratensiunile temporare.

Puterea necesară încercării este predominant capacitivă, componenta activă a curentului absorbit de izolația încercată fiind neglijabilă:

$$\underline{S} = U(I_a + jI_{cap}) = UI_{cap}(\tan \delta + j)$$

$$S = U^2 \omega C \sqrt{1 + \tan^2 \delta}$$

Sursa de tensiune de încercare este un transformator sau o cascadă de transformatoare, de construcție specială, numite transformatoare de încercare. Tensiunea furnizată de acestea trebuie să aibă un conținut cât mai redus de armonici, limita admisă fiind de 5%. Pentru obiecte cu capacitate mai mare se poate folosi o instalație de încercare cu circuit rezonant serie, care produce o tensiune foarte apropiată de sinusoidă.

Metoda de încercare standard prevede aplicarea valorii normate a tensiunii de încercare timp de 1 minut. Aplicarea tensiunii pe izolație trebuie făcută treptat pentru a nu crea supratensiuni la conectare. Astfel se aplică inițial cel mult 50% din tensiunea de încercare, urmată de creșterea până la valoarea normată în câteva secunde sau zeci de secunde. După expirarea celor 60 s, se reduce tensiunea din nou până la 50% treptat, după care se poate deconecta total.

Încercarea se consideră reușită dacă nu au apărut descărcări electrice, iar curentul absorbit de izolație a rămas constant pe durata aplicării tensiunii. Oscilația curentului absorbit, apariția unor zgomote specifice descărcării corona intense la electrozi sunt motive de nereușită a încercării.

Prin mărirea tensiunii de încercare, de 1,5 – 3 ori mai mare decât tensiunea de serviciu, această încercare este grea pentru izolație. Descărcările parțiale pot fi amplificate mult, dacă tensiunea critică de ionizare este mai mică decât tensiunea de încercare.

8.4.2 Încercarea cu tensiune înaltă continuă

La aplicarea tensiunii continue, izolația absoarbe numai curentul de conducție, astfel că puterea de încercare necesară este mult mai mică decât la tensiune alternativă:

$$P = UI_a = UI_{cap} \tan \delta = U^2 C \omega \tan \delta$$

De exemplu dacă $\tan \delta = 10^{-3}$, puterea de încercare la tensiune continuă va fi de 1000 ori mai mică decât pentru tensiune de frecvență industrială.

Încercarea cu tensiune continuă nu agravează descărcările parțiale în izolație, deoarece frecvența de apariție a acestora este mult mai mică la tensiune continuă.

Mărirea tensiunii de încercare este de ordinul dublului valorii de vârf a tensiunii de încercare de frecvență industrială pentru echipamente cu aceeași tensiune de serviciu. Aplicarea tensiunii de încercare se face cu aceleași precauții ca în cazul încercării cu tensiune de frecvență industrială.

Tensiunea înaltă continuă se obține prin redresarea tensiunii alternative, folosind, după caz scheme de multiplicare în cascadă.

8.4.3 Încercarea cu tensiune înaltă de impuls

Încercarea se realizează pentru verificarea comportării izolației la supratensiuni de comutație și de trăsnet. Deoarece aceste supratensiuni au formă de impulsuri cu durate de front și de semiamplitudine variate, verificarea izolației se poate realiza numai adoptând forme standard de impuls, astfel încât încercările să poată fi definite și efectuate ori de câte ori este nevoie, iar rezultatele să poată fi comparate. Normele actuale prevăd următoarele forme standard:

- Impuls de comutație, având durata frontului de 250 μ s și durata de semiamplitudine de 2500 μ s;
- Impuls de trăsnet, având durata frontului de 1,2 μ s și durata de semiamplitudine de 50 μ s.

Modul de încercare cu tensiune de impuls diferă în funcție de tipul izolației: internă sau externă.

Pentru izolația internă (neautoregeneratoare), încercarea constă în aplicarea unui număr redus de impulsuri (1 – 3) cu amplitudine normată, corespunzătoare nivelului tensiunii de serviciu a izolației. Încercarea este considerată reușită dacă nu a apărut nici o descărcare. Acest procedeu determinist de încercare este folosit deoarece izolația internă, fiind neautoregeneratoare, se poate distruge în urma unei descărcări.

Pentru izolația externă (autoregeneratoare) se folosește un procedeu de încercare statistic. Nivelul de ținare la impuls este definit statistic prin U_{50} ca fiind amplitudinea impulsului care, aplicat în mod repetat, produce descărcări disruptive în 50% dintre aplicări.

Obținerea rezultatului necesită un mare număr de încercări, ceea ce a condus la adoptarea unor metode mai rapide, de exemplu *metoda susmic. -jos*. Metoda constă în

aplicarea unui impuls apropiat de rezultatul scontat. Dacă a avut loc o descărcare, urmează aplicarea altui impuls cu 3% mai mic. Dacă nu apare o descărcare, urmează un alt impuls cu 3% mai mare etc. Se opresc aplicările după câteva zeci de impulsuri. Se exclud impulsurile la care nu a apărut vreo descărcare și se face media aritmetică a amplitudinii celorlalte impulsuri. Rezultatul este practic U_{50} .

O metodă pentru verificarea ținerii la tensiune de impuls este *metoda 2/15*: se aplică o serie de 15 impulsuri având amplitudinea egală cu U_{50} normată, iar încercarea este considerată reușită dacă nu apar mai mult de 2 conturnări (sau străpungeri) ale izolației. Impulsurile fiind monopolare, încercarea se execută pentru ambele polarități. Dacă apar mai mult de 2 descărcări, încercarea este considerată nereușită.

8.4.4 Încercarea izolației transformatoarelor

Măsurarea factorului de pierderi dielectrice

Structura complexă a izolației transformatoarelor face necesară determinarea $\tan\delta$ a izolației fiecărei înfășurări față de cuvă și a izolației dintre înfășurări, în conformitate cu schema din fig.8.11, care se referă la un transformator cu două înfășurări. Pentru a se putea determina factorul de pierderi dielectrice al fiecărei zone trebuie realizate trei măsurători, conectând bornele transformatorului conform tabelului 1, pentru a realiza capacitatea C_x care se introduce în circuitul punții.

Tabelul 1 – Măsurarea $\tan\delta$ la transformatorul cu două înfășurări

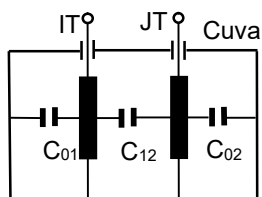


Fig.8.12 Schema echivalentă a izolației interne a transformatorului cu două înfășurări

Nr. crt.	Zona măsurată	Mărimile măsurate
1	IT – (JT + cuva)	$C_1, \tan\delta_1$
2	(IT+JT) –cuva	$C_2, \tan\delta_2$
3	JT – (IT+cuva)	$C_3, \tan\delta_3$

Valorile măsurate, C_i , $\tan\delta_i$ se folosesc pentru determinarea capacităților și valorilor $\tan\delta$ corespunzătoare izolației fiecărei înfășurări față de cuvă și dintre înfășurări, folosind relațiile de calcul:

- pentru capacități

$$C_{01} = \frac{C_1 + C_2 - C_3}{2}, C_{02} = \frac{C_2 + C_3 - C_1}{2}, C_{12} = \frac{C_3 + C_1 - C_2}{2};$$

- pentru factorul de pierderi dielectrice

$$\tan\delta_{01} = \frac{C_1 \tan\delta_1 + C_2 \tan\delta_2 - C_3 \tan\delta_3}{C_1 + C_2 - C_3}, \quad \tan\delta_{02} = \frac{C_2 \tan\delta_2 + C_3 \tan\delta_3 - C_1 \tan\delta_1}{C_2 + C_3 - C_1},$$

$$\tan\delta_{12} = \frac{C_3 \tan\delta_3 + C_1 \tan\delta_1 - C_2 \tan\delta_2}{C_3 + C_1 - C_2}.$$

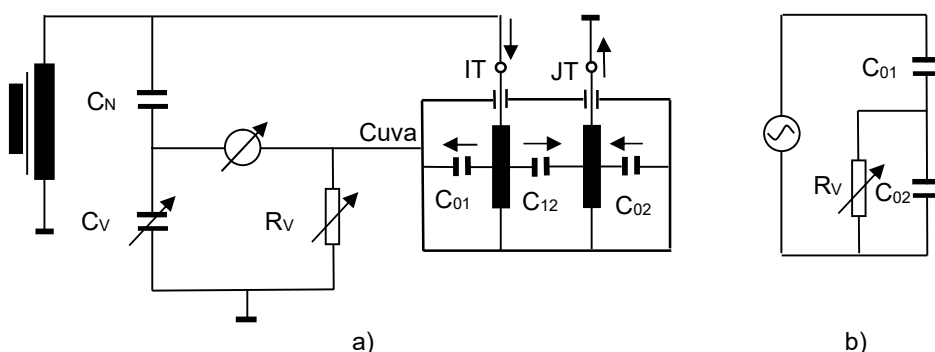
Această metodă de măsurare exactă, care necesită calcule pe baza valorilor măsurate, poate fi înlocuită cu o metodă aproximativă, a cărei eroare este neglijabilă și

care permite măsurarea directă a parametrilor fiecărei zone a izolației. Modul de conectare a bornelor transformatorului pentru această încercare este dat în tabelul 2.

Evaluarea erorii de măsurare pentru această încercare se poate face folosind schema echivalentă din fig.8.13, valabilă pentru izolația înfășurării de înaltă tensiune.

Tabelul 2 – Măsurarea directă a $\tan\delta$ pe zone

Mărimile măsurate	Zona măsurată		Se leagă la pământ
$C_{01}, \text{tg}\delta_{01}$	IT	cuva	JT
$C_{12}, \text{tg}\delta_{12}$	IT	JT	cuva
$C_{02}, \text{tg}\delta_{02}$	JT	cuva	IT

Fig.8.13 Măsurarea directă a $\tan\delta$ pentru transformatorul cu două înfășurări

Conform montajului din fig.8.13, a), capacitatea C_x din circuitul punții corespunde izolației dintre înfășurarea de înaltă tensiune și cuvă. La rezistența variabilă a punții se adaugă în paralel capacitatea izolației dintre înfășurarea de joasă tensiune și cuvă. Curentul care circulă prin capacitatea izolației dintre înfășurări se scurge la pământ fără a influența echilibrarea punții. Eroarea de măsură se poate aprecia prin modificarea impedanței brațului punții care conține rezistența variabilă.

$$\underline{Z}_v = \frac{R_v \frac{1}{j\omega C_{02}}}{R_v + \frac{1}{j\omega C_{02}}} = \frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_{02}}$$

$$|\underline{Z}_v| = \frac{R_v}{\sqrt{1 + (\omega R_v C_v)^2}}; \varphi_v = -\arctan(\omega R_v C_v)$$

De exemplu, pentru un transformator de 20/0,4 kV, 250 kVA, ordinul de mărime al parametrilor din schema din fig.25 b) este: $R_v=100 \Omega$, $C_{02}= 100 \text{ pF}$.
Rezultă

$$\omega R_v C_v = 314 * 10^2 * 100 * 10^{-12} = 314 * 10^{-8}$$

$$(\omega R_v C_v)^2 = 9,86 * 10^{-12}$$

$$|Z_V| = \frac{R_V}{\sqrt{1 + 9,86 \cdot 10^{-12}}} = R_V; \varphi_V = -\arctan(3,14 \cdot 10^{-6}) = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ rad}.$$

Încercarea cu tensiune mărită a izolației transformatoarelor

În funcție de modul de dimensionare a izolației înfășurărilor care, la rândul lui, depinde de conexiunea înfășurării trifazate, încercarea izolației transformatoarelor cu tensiune mărită alternativă se poate realiza în două moduri:

a) Încercarea cu tensiune aplicată

- Tensiunea de încercare este furnizată de un transformator de încercare, altul decât transformatorul de încercat.
- Încercarea se poate aplica numai transformatoarelor trifazate cu conexiune în triunghi și transformatoarelor de curent, deoarece acestea au nivelul de izolație constant de-alungul înfășurării.
- În cazul transformatoarelor trifazate, se poate încerca numai izolația întregii înfășurări simultan și nu separat pe fiecare fază.
- Tensiunea de încercare are aceeași mărime în orice punct al înfășurării astfel că încercarea se referă numai la izolația transversală. Izolația dintre spire (longitudinală) nu este solicitată în acest caz.
- Puterea necesară pentru efectuarea încercării este mică, curentul absorbit fiind în principal curentul capacitiv al izolației. Cum capacitatea izolației înfășurărilor este de ordinul sutelor de pF la transformatoarele mici și de până la 10 nF la transformatoarele mari, puterea de încercare maximă rezultă:

$$S = \omega C U^2 = 314 \times 10^{-8} \times 10^6 = 0,314 \text{ VA/V}.$$

De exemplu, pentru tensiunea de încercare de 185 kV, puterea necesară este de 5,8 kVAr.

Montajul pentru încercarea izolației înfășurării în triunghi a unui transformator cu conexiune **Yd** este dat în fig.8.14. Bornele ambelor înfășurări sunt legate în scurtcircuit; înfășurarea neîncercată și cuva transformatorului se leagă la pământ.

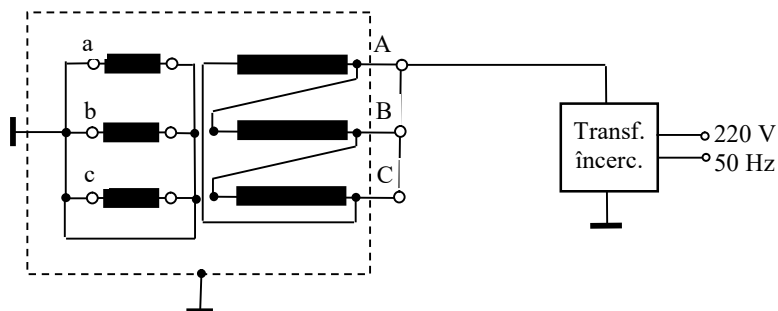


Fig. 8.14 Montaj pentru încercarea cu tensiune aplicată

b) Încercarea cu tensiune indusă

- Tensiunea de încercare este furnizată chiar de transformatorul încercat, prin alimentarea unei înfășurări, urmând a fi încercată izolația celeilalte înfășurări, în care tensiunea indusă trebuie să fie mai mare decât tensiunea nominală, corespunzătoare tensiunii de încercare.

- Încercarea se poate aplica tuturor transformatoarelor trifazate cât și transformatoarelor de tensiune inductive. Se folosește obligatoriu pentru înfășurările trifazate cu conexiune în stea deoarece nivelul de izolație al acestora descrește de la borna de linie către borna de neutru.

- În principiu, încercarea se poate executa prin aplicare trifazată a tensiunii, dar în acest fel izolația dintre înfășurări este supusă unei tensiuni de încercare de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât izolația fază-pământ, ceea ce este periculos și trebuie evitat.

- Tensiunea de încercare față de carcasa (miez) variază de-a lungul înfășurării și este mai mare decât tensiunea de serviciu, astfel că încercarea se referă simultan la izolația longitudinală (între spire) și la izolația transversală.

- Puterea necesară pentru efectuarea încercării este mare dacă se folosește tensiune de frecvență industrială. Curentul absorbit este în acesta caz curentul de mers în gol (de magnetizare) al transformatorului, care crește neliniar în funcție de tensiunea aplicată. Tensiunea de încercare fiind mult mai mare decât tensiunea nominală, în cursul acestei încercări punctul de funcționare al transformatorului se mută în zona de saturație pe curba de magnetizare, astfel încât curentul absorbit crește mult, putând chiar depăși curentul nominal al înfășurării alimentate. Pentru a elimina acest neajuns, se recurge la încercare cu tensiune de frecvență mărită (până la 150 Hz). Curentul absorbit scade cu creșterea frecvenței, datorită creșterii reactanței de magnetizare proporțional cu frecvența.

Schemele de încercare sunt mult mai diverse în cazul folosirii tensiunii induse.

Transformatoare cu conexiune $Y_{0}y_{0}$ (cu fluxuri libere-miez cu 5 coloane sau miez în manta)

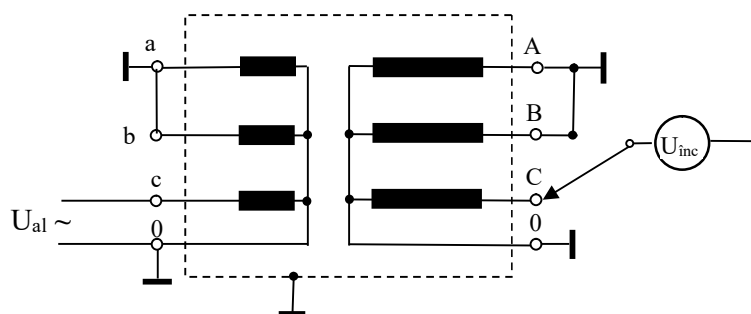


Fig.8.15 Montaj pentru încercarea transformatoarelor cu conexiune $Y_{0}y_{0}$

Încercarea se execută fază cu fază, aplicând tensiunea U_{al} pe faza de joasă tensiune de pe aceeași coloană ca și faza încercată. Celelalte borne ale ambelor înfășurări și carcasa se leagă la pământ.

Transformatoare cu conexiune Y_d cu fluxuri forțate

Acest tip de transformator este cel mai mult utilizat în sistemul electroenergetic românesc, atât ca transformator ridicător în centralele electrice cât și coborător în stațiile de transformare. Înfășurarea în triunghi se încearcă cu tensiune aplicată, ca mai sus. Înfășurarea în stea nu poate fi încercată decât cu tensiune indusă. Schemele de încercare diferă în funcție de nivelul de izolație al punctului neutru.

Scheme de încercare cu neutrul înfășurării în stea legat la pământ

Încercarea se poate executa simultan pentru cele două faze laterale și separat pentru faza mediană.

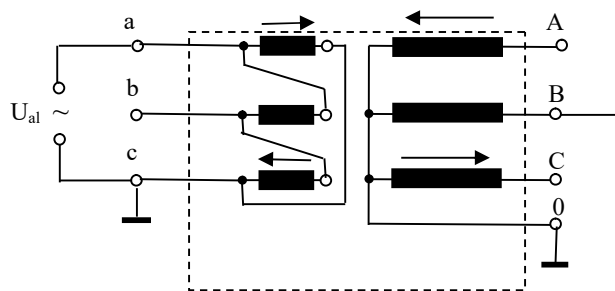


Fig.8.16 Încercarea transformatoarelor Y_{0d} cu neutrul legat la pământ (I)

Faza mediană a înfășurării încercate (B) fiind scurtcircuitată, coloana corespunzătoare a circuitului magnetic este demagnetizată, astfel încât fluxul magnetic se poate închide numai prin cele două coloane laterale. Tensiunea de alimentare se aplică, în sensuri opuse, fazelor laterale ale înfășurării în triunghi (a, c), deoarece pe faza mediană nu apare cădere de tensiune din cauza scurtcircuitului de pe partea înfășurării în stea. Prin inducție, apar tensiuni de încercare egale pe fazele corespunzătoare ale înfășurării în stea (A, C).

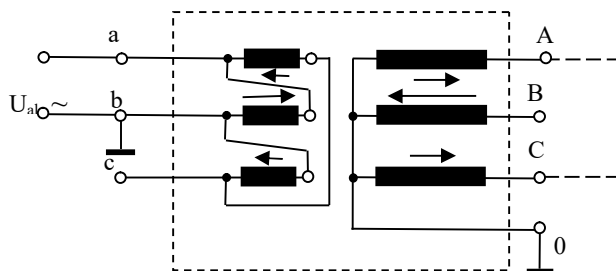


Fig.8.17 Încercarea transformatoarelor Y_d cu neutrul legat la pământ

Pentru încercarea fazei mediane, se folosește montajul din fig.8.17. Tensiunea de alimentare se aplică 100 % fazei mediane (b) a înfășurării în triunghi și câte 50% fazelor laterale, conectate în serie. Corespunzător, apare tensiunea de încercare pe faza mediană a înfășurării în stea (B) și numai $\frac{1}{2}$ din aceasta pe fazele laterale. Legătura, figurată cu linie întreruptă, dintre fazele laterale ale înfășurării în stea este facultativă. Realizarea ei nu modifică tensiunile în montaj, deoarece unește două borne aflate la același potențial.

Scheme de încercare pentru transformatoare având nivelul de izolație a punctului egal cu $\frac{1}{3}$ din nivelul de izolație al bornei de linie

Montajul următor permite încercarea simultană a izolației unei faze a înfășurării în stea ca și a bornei neutre.

Tensiunea de alimentare se aplică întregă fazei „a” a înfășurării în triunghi și câte $\frac{1}{2}$ fazelor „b” și „c”, conectate în serie. Corespunzător, apare tensiunea indusă 100% pe faza „A” a înfășurării în stea și numai câte 50% din aceasta pe fazele „B” și „C”. Legarea împreună a bornelor fazelor „B” și „C” nu constituie un scurtcircuit, pentru că cele două

borne se află la același potențial. Tensiunea de încercare a fazei „A” apare prin însumarea tensiunii induse pe această fază cu tensiunile induse pe celelalte două în paralel. Ca urmare izolația punctului neutru este solicitată numai cu tensiunea indusă pe fazele „B” și „C”, adică $\frac{1}{3}$ din tensiunea de încercare a bornei „A”.

Pentru încercarea celorlalte faze se permută bornele înfășurării în triunghi la care se aplică tensiunea de alimentare, respectiv bornele legate în paralel ale înfășurării în stea.

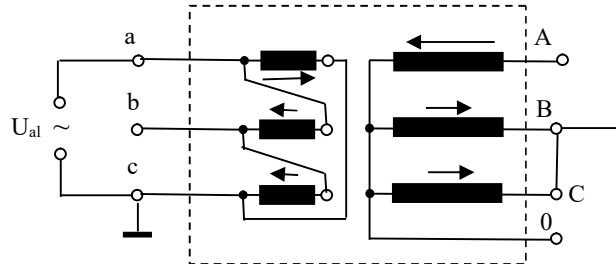


Fig.8.18 Încercarea izolației înfășurării în stea cu neutrul izolat

Dacă nivelul de izolație al neutrului diferă de $\frac{1}{3}$ din nivelul de izolație al bornei de linie, se execută încercarea izolației fazelor cu neutrul legat la pământ și separat încercarea izolației neutrului cu tensiune aplicată de la un transformator de încercare. În acest caz, tensiunea de încercare a neutrului se aplică întregii înfășurări în stea.