

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/346678370>

ACTUALITĂȚI ȘI PERSPECTIVE ÎN DOMENIUL MAȘINILOR ELECTRICE –20 noiembrie 2020 – SME'20 –ediția a XVI-a REGIMURI TRANZITORII ȘI EFECTELE ACESTORA ASUPRA IZOLAȚIEI TRANSFORMATOARELOR...

Conference Paper · December 2020

CITATIONS

0

READS

41

3 authors, including:



Maria Cristina Nitu

National Institute for Research, Development and Testing in Electrical Engineerin...

35 PUBLICATIONS 79 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Marcel Nicola

National Institute for Research, Development and Testing in Electrical Engineerin...

133 PUBLICATIONS 128 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Power transformer fault diagnosis [View project](#)



Equipment for stress - relieving by controlled mechanical vibrations with AC motor [View project](#)

REGIMURI TRANZITORII ȘI EFECTELE ACESTORA ASUPRA IZOLAȚIEI TRANSFORMATOARELOR DE MARE PUTERE

Maria Cristina NIȚU, Marian DUȚĂ, Marcel NICOLA

Research and Development Division/National Institute for Research Development and
Testing in Electrical Engineering – ICMET

Craiova, Romania

cristinamarianitu@yahoo.com, marianduta@icmet.ro, marcel_nicola@yahoo.com

Rezumat. Transformatorul este echipamentul cel mai important din sistemul de transmitere și distribuție a energiei electrice. Importanța lui rezultă atât din costul lui ridicat cât și din faptul că asigură o bună funcționare a sistemului energetic național. Regimurile tranzitorii ce apar în funcționarea transformatorului cum sunt supratensiuni provocate de impulsul de trăsnet și curenții tranzitorii la conectarea transformatorului la rețea, generează solicitări mecanice, solicitări termice și solicitări electrice în transformator. Aceste solicitări duc la îmbătrânirea sistemului de izolație, pentru evitarea unor posibile avarii sau chiar scoaterea transformatorului din funcțiune, această lucrare prezintă metode analitice de determinare a supratensiunilor ce se transmit între înfășurările transformatorului la impuls de trăsnet și a curenților tranzitorii ce apar la conectarea transformatorului. Sudiile au fost realizate pe două transformatoare de mare putere TTOS-OFAF de 40 MVA, 123/6,3kV și transformator TTOS-OFAF de 15 MVA, 10.5/6.3 kV. Rezultatele obținute, au fost validate prin teste de laborator, pot fi folosite pentru a stabili ce soluții să fie adoptate pentru evitarea unor posibile avarii din momentul implementării transformatorului în sistem.

1. INTRODUCERE

Impactul fenomenelor tranzitorii asupra funcționării transformatoarelor de mare putere reprezintă o preocupare actuală încă din stadiul de proiectare al acestora pentru asigurarea unei izolații corespunzătoare.

Această lucrare tratează două din regimurile tranzitorii întâlnite în funcționarea transformatoare: supratensiuni ce se propagă în înfășurările transformatorului când acesta este supus impulsului de trăsnet și curentul tranzitoriu ce apare la conectarea transformatorului la rețea[1-8].

Lucrarea conține metode analitice de determinare a supratensiunilor ce se transmit între înfășurările transformatorului la impuls de trăsnet și a curenților tranzitorii ce apar la conectarea transformatorului.

Ambele regimuri tranzitorii abordate în aceasta lucrare, generează solicitări mecanice, solicitări termice și solicitări electrice în transformator.

Pentru a beneficia de un program de mentenanță optim partea activă a transformatorului (miez magnetic, înfășurări) trebuie evaluată după cum urmează [1], [9-15]:

- evaluare termică vizează îmbătrânirea mai rapidă decât cea anticipată, datorită temperaturilor excesive rezultate din punctul fierbinte al înfășurării, a punctului fierbinte din miez și a defectelor metalelor calde izolate cu hârtie,

- evaluare dielectrică urmărește procesul de degradare a izolației solide/lichide din cauza tensiunii termice sau electrice ridicate, a umidității din hârtie/lichidului dielectric, a defectelor de fabricație și a contaminării cu particule conductoare.

- evaluare mecanică vizează dezintegrearea structurii în miez, înfășurări și izolație solidă, datorită unuia dintre multe motive, cum ar fi forțele electromagnetice puternice provenite din curgerea curentului de scurtcircuit prin înfășurări; deformarea mecanică a

înfășurărilor datorate șocurilor în timpul transportului, montării sau în timpul defecțiunilor sistemului etc; și degradarea materialelor izolante solide[16-25].

O parte din operațiunile ce vizează mentenanța transformatoarelor de putere pot fi stabilite în urma modelării fenomenelor tranzitorii, încă din faza de proiectare. Din aceste considerente, aceasta lucrare vine în ajutorul utilizatorilor de transformatoare, pentru adoptarea de protecții adecvate la implementarea acestora în sistem și pentru evitarea unor posibile avarii, cum este conectarea controlată a fazelor transformatorului, pentru evitarea înregistrării unor curenți mari la conectarea transformatorului la rețea.

2. SUPRATENSIUNI TRANSMISE ÎNTRE ÎNFĂȘURĂRILE TRANSFORMATORULUI LA IMPULS DE TRĂSNET

Fenomenul tranzitoriu provocat de impulsul de trăsnet în înfășurările unui transformator este dificil de încadrat într-un model, deoarece atât amplitudinea cât și frecvența tensiunii de energizare sunt variabile în timp. În plus nu există un consens în ceea ce privește contribuția miezului magnetic la stabilirea amplitudinii, frecvenței de oscilație și atenuării semnalului rezultat în diverse porțiuni ale înfășurărilor [8-14].

Pentru realizarea analizei supratensiunilor transmise între înfășurările transformatoarelor de mare putere s-a utilizat modelul de circuite cuplate. Acest model utilizează pentru circuitul magnetic, ca și parametri concentrați inductanțele de scăpări și surse de curent a căror amplitudine depinde de curentul electric generat în circuitul electric.

Circuitul magnetic permite determinarea fluxurilor magnetice, ale căror derivate furnizează tensiune electromotoare în circuitul electric. Acest model de analiză permite obținerea cu ușurință a parametrilor concentrați din cele două circuite, cu condiția cunoașterii datelor de proiectare, dimensiunile gabaritice ale transformatorului.

2.1. Determinarea parametrilor circuitului electric

2.1.1. Determinarea parametrilor circuitului electric pentru înfășurarea de joasă tensiune

Rezistenței înfășurării i se atribuie valoarea rezistenței măsurate în curent continuu și care poate fi calculată cu relația [8-10]:

$$R_{JT} = \rho_{cu} \frac{n_{JT} \cdot \pi \cdot D_{mJT}}{S_{cuJT}} \frac{1}{n_{pJT}} \quad (1)$$

unde: ρ_{cu} - reprezintă rezistivitatea cuprului; n_{JT} - numărul de spire al înfășurării de JT; D_{mJT} - diametrul mediu al unei spire JT; S_{cuJT} - aria secțiunii conductorului înfășurării de JT; n_{pJT} - numărul de conductori în paralel.

La frecvențe înalte impedanța conductorului de cupru crește ca urmare a efectului pelicular, dar considerăm că ponderea principală în realizarea constantei de amortizare o are rezistența echivalentă a pierderilor în fier. Această aproximare este făcută pentru a introduce o mărime care poate fi determinată experimental.

În ceea ce privește capacitățile introduse în modelul circuitului electric vor fi luate în considerare numai capacitățile bobinelor față de miezul magnetic.

S-a adoptat expresia capacității între doi cilindrii concentrici [8]:

$$C_{JT} = H_{JT} \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_o}{\sum_i \frac{1}{\epsilon_{ri}} \ln \frac{D_i + 1}{D_i}} \quad (2)$$

unde: H_{JT} -reprezintă înălțimea bobinei; D_i - diametrul cilindrilor care alcătuiesc Izolația între bobine și miez; ϵ_{ri} - permitivitatea relativă a mediului izolant.

- Au fost neglijați următorii parametri:
- capacitatea între spire deoarece la frecvențe înalte are o impedanță neglijabilă în raport cu rezistența conductorului de cupru;
 - capacitățile față de cuvă și între înfășurările de joasă tensiune învecinate, pentru că au valori neglijabile în comparație cu valorile capacității față de miezul magnetic.

2.1.2. Determinarea parametrilor circuitului electric pentru înfășurarea de înaltă tensiune

Rezistența înfășurării este determinată pe baza ecuației [8-10]:

$$R_{IT} = \rho_{cu} \frac{n_{IT} \cdot \pi \cdot D_{mIT}}{S_{culT}} \frac{1}{n_{pIT}} \quad (3)$$

unde: n_{IT} reprezintă numărul de spire al înfășurării de IT; D_{mIT} - diametrul mediu al unei spire IT; S_{culT} - aria secțiunii conductorului înfășurării de IT; n_{pIT} -numărul de conductori în paralel.

Notațiile utilizate pentru determinarea capacităților implicate în transmiterea supratensiunilor între înfășurările transformatorului sunt conforme cu cele din figura 1.

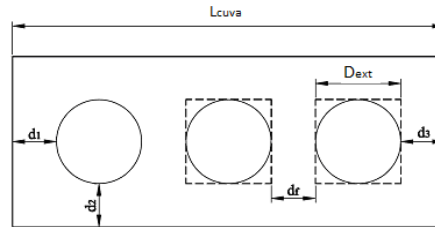


Figura 1. Așezarea înfășurării de IT față de cuvă transformatorului

- Capacitatea fazelor laterale față de cuvă [8-10]:

$$C_{IT_L-C} = \frac{1}{2} \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot H_{IT} \cdot D_{ext} \left(\frac{2}{d_2} + \frac{1}{d_1} \right) \quad (4)$$

- Capacitatea fazei centrale față de cuvă [8-10]:

$$C_{IT_C-C} = \frac{1}{2} \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot H_{IT} \cdot D_{ext} \frac{1}{d_1} \quad (5)$$

- Capacitatea neutrilor înfășurării de înaltă tensiune față de cuvă [8-10]:

$$C_N = 2 \cdot C_{IT_L-C} + C_{IT_C-C} + C_n \quad (6)$$

unde: C_n este capacitatea conductorului de nul în raport cu cuvă.

- Capacitatea între faza centrală și fazele laterale [8-10]:

$$C_{IT_C-IT_L} = \frac{1}{2} \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot H_{IT} \cdot D_{ext} \frac{1}{d_f} \quad (7)$$

Capacitatea dintre înfășurarea de înaltă tensiune și înfășurarea de joasă tensiune se calculează pe baza relației (2).

Repartiția tensiunii de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune este neliniară la energizarea acesteia cu impuls de trăsnet în circuitul electric se consideră o capacitate egală cu o treime din valoarea capacității C_{IT-JT} , plasată între intrările înfășurărilor de înaltă respectiv joasă tensiune.

2.2. Determinarea parametrilor circuitului magnetic

Liniiile de câmp magnetic produc în secțiunea transversală a miezului magnetic un flux fascicular Φ . Acest flux asociat cu numărul de spire al înfășurării de înaltă tensiune n_{IT} și cu numărul de spire al înfășurării de joasă tensiune n_{JT} formează fluxul total:

$$\phi_{IT} = n_{IT} \cdot \phi \quad (8)$$

$$\phi_{JT} = n_{JT} \cdot \phi \quad (9)$$

Liniile câmpului magnetic de dispersie ale înfășurării de înaltă tensiune față de înfășurarea de joasă tensiune se închid parțial prin miezul magnetic. Aceste linii realizează un flux total de dispersie Φ_{IT-JT} . Aplicând legea inducției electromagnetice se obține:

$$R_{IT} \cdot i_{IT} - u_{IT} = -\frac{d}{dt}(\phi_{IT} + \phi_{IT-JT}) \quad (10)$$

unde: i_{IT} reprezintă curentul care circulă prin înfășurarea de IT; u_{IT} -tensiunea la bornele înfășurării de IT luând în considerare că:

$$\phi = \frac{n_{IT} \cdot i_{IT} + n_{JT} \cdot i_{JT}}{R_{Fe}} \quad (11)$$

unde R_{Fe} este reluctanța miezului magnetic.

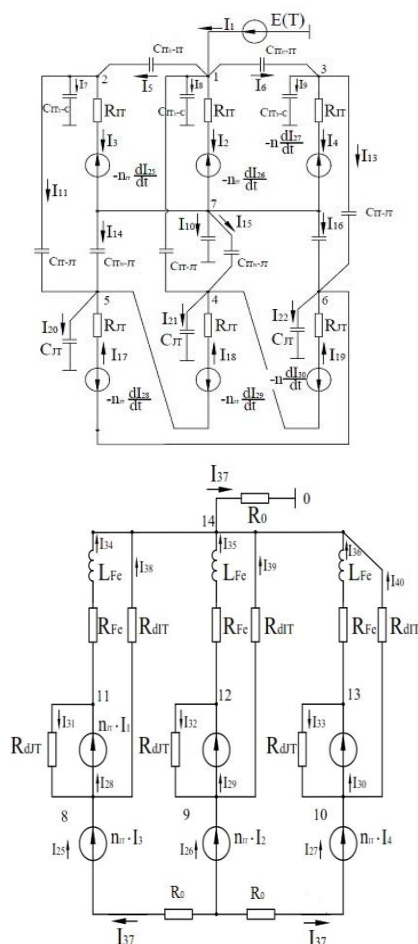


Figure 2. Modelul circuitelor cuplate

Pentru calculul reluctanțelor de scăpări, s-au făcut următoarele aproximări:

➤ prima ipoteză este că liniile de câmp magnetic sunt paralele cu generatoarele înfășurărilor și au o lungime egală cu înălțimea ferestrei miezului magnetic. Această aproximare este acceptabilă dacă luăm în considerare faptul că liniile care se închid prin cuvă nu afectează semnificativ magnitudinea inductanței de scăpări [11].

➤ a doua ipoteză este că liniile câmpului magnetic traversează numai canalul dintre bobinele înfășurărilor de înaltă respectiv joasă tensiune, considerând că fluxul magnetic nu pătrunde în interiorul bobinelor.

Cea de-a doua ipoteză presupune că umplerea canalului dintre bobina de IT și bobina de JT se face în mod egal de liniile câmpului magnetic produs de înfășurarea de JT. Cu aceste aproximări se realizează calculul reluctanței de dispersie dintre înfășurări cu relațiile [8-10]:

$$R_{dJT} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{a}{2} \left(D_{Fe} + 2a_{JT} + \frac{a}{2} \right)} \quad (12)$$

$$R_{dIT} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{a}{2} \left(D_{Fe} + 2a_{JT} + \frac{3a}{2} \right)} \quad (13)$$

unde: a_{JT} reprezintă înălțimea înfășurării de joasă tensiune; a_{IT} - înălțimea înfășurării de înaltă tensiune; a - canalul dintre bobinele înfășurărilor de înaltă respectiv joasă tensiune; D_{mJT} - diametrul mediu al unei spire JT; D_{mIT} - diametrul mediu al unei spire IT; D_{Fe} - diametrul coloanei miezului magnetic; l_{Fe} - înălțimea coloanei miezului magnetic.

2.3. Modelul miezului magnetic cu parametri concentrați

Modelul miezului magnetic implementat în circuitul magnetic cuplat cu circuitul electric a fost propus în lucrările [9-10] constând din:

- inductanța L_{Fe} care înlocuiește reluctanța magnetică R_m ;

$$L_{Fe} = \frac{N^2}{R_m} \quad (14)$$

- rezistența R_{Fe} care înlocuiește inductanța magnetică L_μ ;

$$R_{Fe} = \frac{N^2}{L_\mu} \quad (15)$$

unde N este numărul de spire al înfășurării primare.

$$R_m = \frac{l_{Fe}}{\mu \cdot S_{Fe}} \quad (16)$$

$$L_\mu = \frac{1}{\omega} \frac{U_{1N}}{I_\mu} \approx \frac{1}{\omega} \frac{U_{1N}}{1,04 \cdot I_{10}} \quad (17)$$

unde: l_{Fe} - lungimea circuitului magnetic; S_{Fe} - secțiunea miezului magnetic; μ - permitivitatea relativă; ω - pulsația tensiunii de energizare a transformatorului, se calculează luând în considerare că frecvența corespunzătoare frontului standard al impulsului de trăsnet este aproximativ 15 kHz; U_{1N} - tensiunea nominală a înfășurării primare; $1,04 \cdot I_{10}$ - curentul de mers în gol corectat cu o creștere determinată de lucrarea, referitoare la pierderile în fier suplimentare, provocate de impulsul de trăsnet.

Un alt parametru introdus în modelul circuitului magnetic este reluctanța omopolară R_0 . Calculul exact al reluctanței omopolare nu este posibil din cauza reluctanței cuvei, care este în serie cu reluctanța traseului fluxului prin ulei [12].

Relația de calcul propusă nu include reluctanța cuvei [8-10]:

$$R_0 = \frac{h_{cv} - h_{cm}}{\mu_0 \cdot l_{cm} \cdot L_{cm}} \quad (18)$$

unde: h_{cv} reprezintă înălțimea medie a cuvei; h_{cm} - înălțimea medie a circuitului magnetic; l_{cm} - lățimea circuitului magnetic; L_{cm} - lungimea circuitului magnetic.

Tabel 1. Parametrii transformator

$R_{IT}=0,64 \cdot 10^{-3} \text{ k}\Omega$	$C_{ITN-IT}=2,3\text{nF}$
$R_{JT}=3,67 \cdot 10^{-6} \text{ k}\Omega$	$C_N=2,56\text{nF}$
$n_{IT}=843$	$C_{JT-C}=3,44 \text{ nF}$
$n_{JT}=72$	$R_{dJT}=2,8 \cdot 10^4 \text{ k}\Omega$
$C_{ITc-IT}=1,05\text{nF}$	$R_{dIT}=2,7 \cdot 10^4 \text{ k}\Omega$
$C_{IT2-C}=0,48\text{nF}$	$R_{Fe}=176 \text{ k}\Omega$
$C_{IT1-IT}=0,47\text{nF}$	$L_F=300 \text{ mH}$
$C_{IT3-IT}=0,59\text{nF}$	$R_0=183,6 \text{ k}\Omega$
$C_{IT-JT}=1\text{nF}$	

Prin modificarea diversilor parametri ai circuitelor cuplate au fost evidențiate influența lor asupra rezultatelor și a permis următoarele concluzii:

- influența permitivității relative a miezului magnetic se manifestă prin modificarea amplitudinii tensiunii transmise, adică creșterea acesteia duce la scăderea amplitudinii;
- frecvența răspunsului este indicată de inductanța de scăpări a înfășurării IT (care este alimentată de impulsul de trăsnet) și de capacitatea acesteia la pământ.

2.4.Rezultatele modelării și măsurării supratensiunilor transmise între înfășurările transformatorului

Pentru determinarea supratensiunilor transmise între înfășurările transformatorului, s-a realizat un studiu pe un transformator TTOS-OFAF de 40 MVA, 123/6,3kV.

Studiul cuprinde atât parte de simulări realizată cprogramul MATLAB, cât și testări în laborator. Atât în cazul simulărilor cât și în cazul testărilor impulsul aplicat transformatorului de 100 kV (1,2/50 μ s) [13-14].

În figura 3 sunt prezentate formele de undă obținute prin modelare și testare.

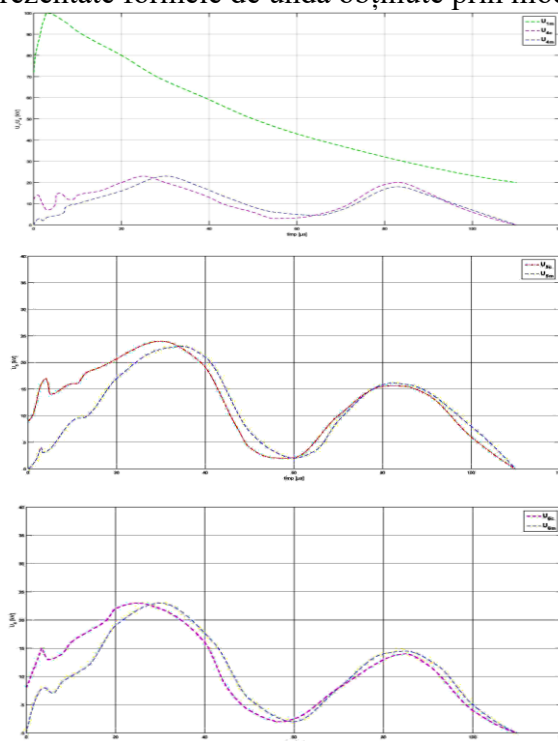


Figura 3. Forme de undă ale tensiunii obținute prin calcul si teste de laborator

La primele microsecunde unda calculată are un front mult mai rapid spre deosebire de cea măsurată, ceea ce înseamnă că rețeaua capacitivă a modelului are valoare mai mare decât cea reală.

O cauză posibilă este neincluderea capacității serie a înfășurării de înaltă tensiune în modelul creat; diferența de amplitudine maximă și timpul de apariție a ei este minoră între răspunsul calculat și cel măsurat. Acest parametru este esențial, atât pentru proiectantul de transformatoare, cât și pentru proiectantul stației electrice în care va fi implementat transformatorul, pentru dimensionarea protecțiilor; frecvențele joasă și cea înaltă sunt practic aceleași în răspunsul măsurat și calculat; atenuarea semnalului calculat este similară cu cea a semnalului măsurat.

Se poate observa din tabelul 2, că eroarea relativă dintre metoda analitică și cea practică este mică de aproximativ 1%.

Tabel 2. Supratensiuni-valori calculate/valori măsurate

	U [kV]	Eroarea relativă[%]
U _{4m}	23,09	0,47
U _{4c}	22,98	
U _{5m}	23,96	0,29
U _{5c}	24,03	
U _{6m}	23,20	1,16
U _{6c}	22,93	

U_{4m}, U_{5m}, U_{6m}- supratensiuni transmise măsurate / U_{4c}, U_{5c}, U_{6c} supratensiuni transmise calculate

3. CURENTUL TRANZITORIU CE APARE LA CONECTAREA TRANSFORMATOARELOR DE MARE PUTERE

La conectarea în rețea a transformatorului, se produce un curent tranzitoriu mare în înfășurările acestuia, un curent ce poate atinge valori de până la 10 ori mai mare decât curentul de sarcină. Șocul produs de magnitudinea acestui curent poate duce la deconectarea acestuia de la rețea sau la generarea de situații de avarie.

Factorii care influențează magnitudinea curentului de intrare sunt: fluxul remanent în miezul transformatorului; caracteristicile de magnetizare neliniare ale miezului transformatorului; unghiul de fază al tensiunii de alimentare în momentul conectării transformatorului; impedența și puterea de scurtcircuit a sursei de alimentare, etc [15-17].

Realizarea de teste în laborator pentru cuantificarea valorii maxime a curentului de conectare, pentru evitarea unor situații de avarie, implica cheltuieli mari și nu se efectuează.

Din acest motiv s-a optat pentru metode analitice și simularea fenomenului, pentru determinarea mărimii curentului tranzitoriu care apare la conectarea unui transformator de putere la rețea pentru evitarea unor posibile avarii și pentru stabilirea unor protecții adecvate [18-25].

În cele ce urmează este prezentată o analiză a fenomenelor tranzitorii provocate de conectarea transformatorului la rețeaua de alimentare, fenomene ce generează supracurenți.

În cazul regimului tranzitoriu ce urmează închiderii întreruptorului ce conectează transformatorul la rețeaua de alimentare, curentul poate atinge valori de până la cinci ori valoarea curentului nominal.

Pentru determinarea curentului de conectare, aplicăm la bornele transformatorului o tensiune sinusoidală de forma [9], [22]:

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad (19)$$

unde: u_1 - este tensiunea aplicată înfășurării primare la momentul $t=0$; α - unghiul de fază inițială.

Valoarea maximă a curentului de conectare și fluxul depind de valoarea tensiunii aplicate în momentul conectării (moment caracterizat de α).

Ecuția de funcționare a înfășurării primare este [9], [22]:

$$u_1 = r_1 i_{10} + w_1 \frac{d\varphi_1}{dt} \quad (20)$$

unde: r_1 - rezistența înfășurării primare; i_{10} - curentul de conectare; w_1 - numărul de spire al înfășurării primare; φ_1 -fluxul fascicular ce apare la conectare în gol a transformatorului, vom considera, în cazul acestui studiu, că acest flux străbate toate spirele în serie ale înfășurării și că este localizat în întrefier.

Ecuția (20) poate fi rescrisă ca fiind relația de legătură între curentul de conectare și flux făcând apel la inductivitate [9], [22]:

$$L_1 i_1 = w_1 \varphi_1 \quad (21)$$

unde:

L_1 -inductivitatea totală, variabilă între anumite limite, în funcție de saturația magnetică a fierului.

Ecuția fluxului instantaneu este dată de relația [9], [22]:

$$\varphi_1 = \varphi_{1m} \left[\cos \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t + \alpha) \right] + \varphi_{1rem} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (22)$$

unde: φ_{1m} fluxul maxim ce depinde de valoarea curentului de mers în gol; τ -constantă de timp a înfășurării.

Se consideră inductanța totală (L_1) ca fiind însumarea inductanței de scăpări și a inductanței de magnetizare în primele momente ale cuplării, iar în momentul saturării miezului magnetic valoarea sa este considerată echivalentul inductanței de scăpări.

Rezistența totală (R_1) reprezintă însumarea, rezistenței înfășurării de înaltă tensiune și a rezistenței echivalente a pierderilor în fier la momentul cuplării transformatorului la rețea, iar apoi se consideră ca fiind valoarea rezistenței înfășurării de înaltă tensiune.

În cazul acestui studiu, vom considera că transformatorul nu a mai fost conectat la rețea în prealabil, așadar fluxul remanent (φ_{1rem}) este nul.

Conform studiilor prezentate în literatura de specialitate există două situații limită:

- prima situație este caracterizată de un flux remanent nul și un unghi de conectare al tensiunii de alimentare $\alpha = 90^\circ$, situație corespunzătoare regimului permanent de funcționare;
- ce-a de a doua situație este caracterizată de un flux remanent egal jumătate din valoarea fluxului maxim de magnetizare și un unghi de conectare al tensiunii de alimentare nul.

Această ultimă situație este cea mai nefavorabilă, conectarea transformatorului la rețea se realizează în momentul în care tensiunea trece prin zero, iar fluxul remanent este de semn opus fluxului permanent. Valoarea curentului de conectare este maximă, provocând șocuri ce în timp duc la distrugerea izolației transformatorului.

2.4. Rezultatele modelării și măsurării curentului de conectare a transformatorului la rețea

Studiul a fost realizat pe un transformator TTOS-OFAP de 15 MVA, 10.5/6.3 kV.

Figura 4 redă formele de undă obținute prin modelare, se observă că valoarea maximă a curentului se înregistrează pe faza A, la trecerea tensiunii prin zero.

Formele de undă pentru curentul de conectare pe cele trei faze ale transformatorului obținute prin măsurare (vezi Figura 5), validează modelul matematic propus pentru determinarea valorii maxime a curentului tranzitoriu, cât și rezultatele obținute prin modelare.

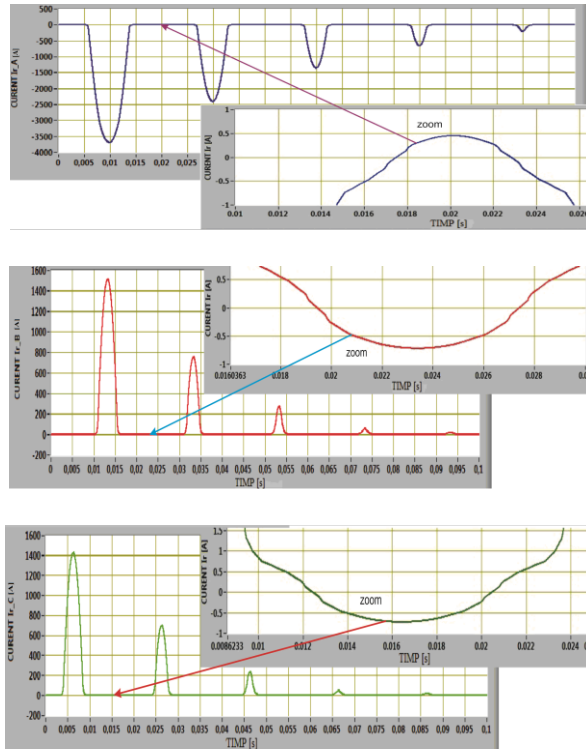


Figura 4. Formele de undă pentru curentul de conectare pe cele trei faze ale transformatorului obținute prin modelare

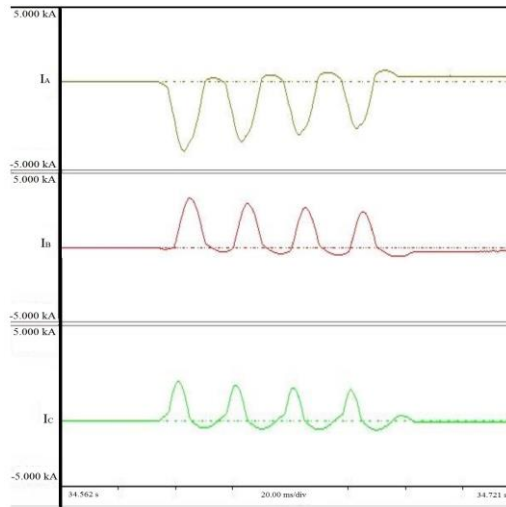


Figura 5. Formele de undă pentru curentul de conectare pe cele trei faze ale transformatorului obținute prin măsurare

Tabel 3. Curenți-valori calculate/valori măsurate

	I [kA]	Eroarea relativă[%]
I_{Am}	3,728	0,85
I_{Ac}	3,696	
I_{Bm}	1,534	1,4
I_{Bc}	1,512	
I_{Cm}	1,417	1,34
I_{Cc}	1,398	

I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm} - curenții mășurați pe cele 3 faze/ I_{Ac}, I_{Bc}, I_{Cc} - curenții calculați pe cele 3 faze

Eroarea relativă dintre metoda analitică și cea practică este mai mică 1, 5%.

Rezultatele experimentale prezentate pentru predeterminarea curentului de conectare a transformatorului de mare putere la rețea, validează studiul teoretic și sunt în concordanță cu rezultatele de simulare.

Se pot trage următoarele concluzii:

- regimul tranzitoriu ce apare la conectarea transformatorului la rețea durează câteva secunde, după care se amortizează;
- la cuplarea transformatorului la bornele fazei A la momentul inițial tensiunea trece prin zero și se înregistrează șocul de curent cel mai important;
- mărimea curentului ce apare la conectarea transformatorului la rețea este condiționată de momentul conectării transformatorului la rețea, adică de valoarea unghiului de conectare al tensiunii de alimentare.

4.CONCLUZII

Analiza solicitărilor dielectrice și mecanice extreme ce apar în cazul regimurilor tranzitorii cum sunt supratensiuni provocate de impulsul de trăsnet și curenții tranzitorii la conectarea transformatorului la rețea, realizată în această lucrare are ca scop predeterminarea prin calcul a supratensiunilor și curenților tranzitorii ce se propagă în înfășurările transformatorului.

Rezultatele obținute pot fii folosite pentru a stabili ce soluții să fie adoptate pentru evitarea unor posibile avarii din momentul implementării transformatorului în sistem.

Metodele analitice au fost validate prin teste de laborator, garantând eficiența acestora.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Condition assessment of power transformers, in Cigré brochure 761, pp. 1–163, March 2019
- [2] S. Jazebi, F. de León and N. Wu, "Enhanced Analytical Method for the Calculation of the Maximum Inrush Currents of Single-Phase Power Transformers," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 6, pp. 2590-2599, Dec. 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2443560.
- [3] Q. Guo, J. Wang, F. Zheng, G. Du, L. Zhu and J. Guo, "An Application of Inrush Current Suppression Technology Based on CNN in Switching Operation of High-voltage Built-in High-impedance Transformer," 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Singapore, 2018, pp. 511-516, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2018.8467772.
- [4] P. C. Y. Ling and A. Basak, "Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, no. 6, pp. 3217-3222, Nov. 1988, doi: 10.1109/20.92380.
- [5] S. De and A. De, "Low cost surge voltage linearization methods for small rating power transformers," 2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON), Kolkata, 2017, pp. 69-73, doi: 10.1109/CALCON.2017.8280698.
- [6] Y. Zhou et al., "A Model Considering Deep Saturation of the Iron Core for 10 kV Potential Transformers," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), ATHENS, Greece, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642218.
- [7] Zhong Yuan Zhang, Xin Ge, Zeng Chao Wang, "Research on Nonlinear Modeling for Power Transformer over Wide Frequency Range", Applied Mechanics and Materials, vol. 446-447, pp. 832, 2013.
- [8] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering: Design and Practice", Marcel Dekker, 2004.
- [9] I. Gheorghiu, A. Fransua, "Mașini electrice", vol. II. Editura Academiei Republicii Socialiste Romania, 1970.
- [10] Maria Cristina Nițu, Marian Duță, "Calculation of Surges Transmitted Between Transformer Windings Using the Coupled Circuit Model", Proceedings of the International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, Romania, 4-6 October, 2018, pp. 1-6, DOI: 10. 1109/ICATE. 2018. 8551475.
- [11] C. M. Arturi, "Transient Simulation and Analysis of a Five-Limb Step-Up Transformer Following and Out-of-Phase Synchronization", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, January 1991, pp. 196-207
- [12] P. I. Fegerstad, T. Henriksen, "Inductance for the Calculation of Transient Oscillation in Transformers", In: IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, pp. 510-517, March/April 1974.
- [13] ***IEC 60076-1:2011-Power Transformer. Part. 1-General

-
- [14]***IEC 60076-3:2013-Power Transformer. Part. 3-Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- [15] Maria-Cristina Nițu, Claudiu-Ionel Nicola, Marcel Nicola, Marian Duță, "Determination of Inrush Current to High Power Transformers using the LabVIEW Environment", *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol. 7, No. 2, 2017, pp. 46-52, USA, p-ISSN: 2163-2405, e-ISSN: 2163-2413, DOI: 10.5923/j.jmea.20170702.03
- [16] Maria Cristina NIȚU, Marian DUȚĂ, Claudiu-Ionel NICOLA, "Predetermining the size of inrush current in power transformers coupling using LabVIEW", *Proceedings of International Conference on Hydraulics and Pneumatics HERVEX – 22nd edition, Băile Govora, 9-11 November 2016*, pp. 271-279, ISSN: 1454-8003
- [17] Michael Streuer, Klaus Fröhlich, "The Impact off Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils", In : *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, No. 1, pp. 155-160, January 2002.
- [18] Yu Cui, Sami G. Abdulsalam, Shiuming Chen, Wilsun Xu, "A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction- Part I: Simulation and experimental results", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 943-949, April 2005.
- [19] Wilsun Xu, Sami G. Abdulsalam, Yu Cui, Xian Liu, "A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction- Part II- Theoretical analysis and design guide", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 950-957, April 2005.
- [20] Wilsun Xu, Sami G. Abdulsalam, "A sequential phase energization method for transformer inrush current reduction- transient performance and practical considerations", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 208-216, January 2007.
- [21] M. G. Vanti, S. L. Bertoli, S. H. Cabral, A. G. Gerent, P. Kuo-Peng, "Semianalytic solution for a simple model of inrush currents in transformers ", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 6, pp. 1270-1273, June 2008.
- [22] Maria Cristina NIȚU, V. Voicu, M. Duță, P.-M. Nicolae, "Ensuring the Security of the Energy System by Predetermining the Size of Inrush Current at Power Transformers Coupling ", In *Proc. of 16th - International Conference on Computer as a Tool- EUROCON, Salamanca, Spania*, pp. 1-4, September 2015.
- [23] Hong, L. Haifeng, L. Hua, Z. Jiran, T. Haiguo and Z. Zhidan, "Waveform Complexity Analysis of Differential Current Signal to Detect Magnetizing Inrush in Power Transformer," *2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, Changsha, 2017, pp. 120-123.
- [24] A. YAHIOU, A. BAYADI and B. BABES, "Point on Voltage Wave Switching for Sympathetic Inrush Current Reduction.," *2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS)*, Medea, Algeria, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICASS.2018.8651972.
- [25] S. S. H. Bukhari, M. Gul and F. A. Chachar, "A Series Voltage Sag Compensator with Reduced Magnitude of Transformer Inrush Current," *2018 IEEE 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Singapore, Singapore, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SPEC.2018.8635998.