



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI
Școala Doctorală de Inginerie Electrică



TEZĂ DE DOCTORAT - REZUMAT -

PROTECȚIA LA SUPRATENSIUNI A TRANSFORMATOARELOR
ELECTRICE DE PUTERE CONECTATE LA LINIILE ELECTRICE DE
TRANSPORT A ENERGIEI

OVERVOLTAGE PROTECTION OF ELECTRICAL POWER
TRANSFORMERS CONNECTED TO POWER TRANSMISSION
LINES

Doctorand: ing. Alina RĂCHIȚEANU

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Constantin GHIȚĂ

București 2022

CUPRINS

CAPITOLUL 1 INTRODUCERE	5
1.1. CLASIFICAREA SUPRATENSIUNILOR.....	5
1.2. EFECTELE NEGATIVE ALE SUPRATENSIUNILOR DE TRĂSNET.....	5
1.3. SCURT ISTORIC PRIVIND STUDIUL PROPAGĂRII SUPRATENSIUNILOR ÎN TRANSFORMATOARELE ELECTRICE.....	6
1.4. CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE	6
1.5. MULȚUMIRI.....	6
CAPITOLUL 2 SCHEME ELECTRICE ALE TRANSFORMATOARELOR SUPUSE LA SUPRATENSIUNI.....	7
2.1. ELEMENTE GENERALE.....	7
2.2. SCHEME ECHIVALENTE DEFINITE CU PARAMETRII LINEICI	7
2.3. SCHEME ELECTRICE DEFINITE CU PARAMETRII CONCENTRAȚI, EXPRIMAȚI ÎN VALORI ABSOLUTE	8
CAPITOLUL 3 MODELAREA IMPULSULUI DE TRĂSNET PENTRU TESTAREA ÎNFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATORULUI.....	9
3.1. GRAFICUL UNDEI DE TRĂSNET	9
3.2. GENERAREA UNDEI DE TRĂSNET	10
3.3. MODELAREA IMPULSULUI DE TRĂSNET	10
3.4. CIRCUITUL DE MODELARE AL GENERATORULUI DE IMPULSURI FOLOSIND SIMULAREA ÎN PROGRAMUL LTSPICE.....	11
CAPITOLUL 4 SIMULAREA PROPAGĂRII IMPULSULUI DE TRĂSNET ÎN ÎNFĂȘURAREA TRANSFORMATORULUI FOLOSIND LTSPICE	12
4.1. CONSIDERAȚII GENERALE.....	12
4.2. SCHEMA CIRCUITULUI ECHIVALENT AL TRANSFORMATORULUI SIMULAT ÎN LTSPICE	13
4.3. SIMULAREA PROPAGĂRII IMPULSULUI DE TRĂSNET ÎN ÎNFĂȘURAREA DE ÎNALTĂ TENSIUNE A TRANSFORMATORULUI.....	14
CAPITOLUL 5 INFLUENȚA VARIAȚIEI PARAMETRILOR SCHEMEI ECHIVALENTE ASUPRA PROPAGĂRII UNDELOR DE SUPRATENSIUNE	15
5.1. CONSIDERAȚII GENERALE.....	15
5.2. REPARTIȚIA SPAȚIALĂ ȘI TEMPORALĂ A UNDEI DE SUPRATENSIUNE	16
5.3. INFLUENȚA VARIAȚIEI PARAMETRILOR SCHEMEI ECHIVALENTE ASUPRA PROPAGĂRII UNDELOR DE SUPRATENSIUNE	17
CAPITOLUL 6 PROTECȚIA INTERNĂ A TRANSFORMATOARELOR FOLOSIND INELUL DE GARDĂ ȘI ECRANUL DE PROTECȚIE.....	20
6.1. CONSIDERAȚII GENERALE.....	20
6.2. INFLUENȚA INELULUI DE GARDĂ ASUPRA REPARTIȚIEI SUPRATENSIUNII DE-A LUNGUL ÎNFĂȘURĂRII.....	20

6.3. DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI DE PROTECȚIE LA SUPRATENSIUNI PENTRU TRANSFORMATORUL ELECTRIC	24
6.3.1. DESCRIEREA TRANSFORMATORULUI FOLOSIT ÎN SIMULARE	24
6.3.2. DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI DE PROTECȚIE PRIN METODE NUMERICE	25
6.3.3. UTILIZAREA MEDIULUI DE CALCUL COMSOL PENTRU DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI	26
CAPITOLUL 7 PROTECȚIA TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR DE TRĂSNET FOLOSIND DESCĂRCĂTOARELE	27
7.1. CONSIDERAȚII GENERALE.....	27
7.2. DESCĂRCĂTORUL – ECHIPAMENT DE PROTECȚIE.....	28
7.2.1. DESCĂRCĂTORUL CU REZISTENȚĂ VARIABILĂ ȘI REZISTOARE DE ȘUNTARE	28
7.2.2. DESCĂRCĂTORUL CU OXIZI METALICI.....	28
7.2.3. DEFECȚIUNI ALE DESCĂRCĂTORULUI.....	29
7.2.4. STADIUL ACTUAL ȘI EVOLUȚII VIITOARE	30
7.3. PARATRĂSNETE.....	30
CAPITOLUL 8 PROTECȚIA LINIILOR ELECTRICE DE TRANSPORT A ENERGIEI ELECTRICE	31
8.1. CONSIDERAȚII GENERALE	31
8.2. METODE DE PROTECȚIE A LINIILOR ELECTRICE AERIENE ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR.....	31
CAPITOLUL 9 CONCLUZII ȘI REZULTATE ORIGINALE.....	34
9.1. CONCLUZII GENERALE	34
9.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE.....	37
9.3 PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ.....	38
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	38

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

O problemă care prezintă interes teoretic și practic pentru transformatoarele electrice de mare putere și pentru rețelele de transmisie a energiei electrice o reprezintă comportarea acestora la impuls de tensiune aplicat la borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului, respectiv pe liniile de transport a energiei electrice. Studiul proceselor tranzitorii la impuls de tensiune conduce la alegerea corectă a izolației înfășurărilor transformatorului, respectiv a izolației liniei electrice atât din punct de vedere funcțional cât și din punct de vedere economic.

1.1. CLASIFICAREA SUPRATENSIUNILOR

În funcție de forma și durata lor supratensiunile se împart în următoarele categorii (a se vedea și SR EN 60071-1:2006):

a. Supratensiuni temporare: Acestea sunt supratensiuni de frecvență industrială și de durată relativ lungă. Ele pot fi neamortizate sau slab amortizate.

b. Supratensiuni tranzitorii reprezintă supratensiunile de scurtă durată, nedepășind câteva milisecunde. Ele pot fi oscilatorii sau nu. Supratensiunile tranzitorii se împart în mai multe categorii:

- *supratensiuni cu front lent;*
- *supratensiuni cu front rapid;*
- *supratensiuni cu front foarte rapid;*
- *supratensiuni combinate (temporare, cu front lent, cu front rapid, cu front foarte rapid).*

1.2. EFECTELE NEGATIVE ALE SUPRATENSIUNILOR DE TRĂSNET

Supratensiunile atmosferice produc fulgere și trăsnete. Fulgerele sunt descărcări electrice între norii încărcăți cu sarcină electrică și sunt urmate de luminozități neregulate de forma norilor care interacționează. Trăsnetele sunt descărcări electrice între nori și pământ, iar sarcinile electrice acumulate în nori se descarcă în pământ.

Cele mai mari pierderi, provocate de către lovitura de trăsnet, se produc atunci când aceasta lovește o rafinărie de petrol, un depozit de substanțe inflamabile sau chiar un avion aflat în zona descărcărilor electrice. Pagubele produse de trăsnete sunt foarte mari, iar

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat

consecințele incendiilor aferente acestor trăsnete pot conduce la emanații de gaze toxice sau a altor substanțe inflamabile, care dăunează mediului înconjurător și oamenilor aflați în zonă.

1.3. SCURT ISTORIC PRIVIND STUDIUL PROPAGĂRII SUPRATENSIUNILOR ÎN TRANSFORMATOARELE ELECTRICE

Regimurile tranzitorii referitoare la propagarea undelor de supratensiune de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune din transformatoarele electrice determină solicitări importante ale izolației, mult mai mari decât solicitările din regimul nominal.

Studiile sistematice referitoare la fenomenul de pătrundere a undelor de supratensiune în transformatoare au început pe la mijlocul celui de-al doilea deceniu al secolului trecut, publicații despre ecuația diferențială care descrie oscilațiile bobinajului, ecuația integrală a oscilațiilor înfășurării, undele progresive care se propagă de-a lungul înfășurării, studiul fenomenului de propagare a supratensiunilor în înfășurări cilindrice ale transformatoarelor, noi aspecte ale fenomenelor de propagare a supratensiunilor în transformatoarele cu înfășurări formate din galeți întrețesuți.

1.4. CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE

Calitatea energiei electrice reprezintă livrarea acestui produs la standarde de excelență. Toți parametri care caracterizează energia electrică trebuie să fie în limite admisibile. [1] Calitatea energiei electrice este urmărită în fiecare etapă de producere, transport, distribuție și furnizare.

Perturbațiile din rețeaua electrică cum ar fi supratensiunile, întreruperile, golurile de tensiune, nesimetriile, variațiile de tensiune și de frecvență sunt defecte ale calității energiei electrice. Solicitări de natură meteorologică precum trăsnete, vânt, depuneri de chiciură asupra echipamentelor electroenergetice introduc perturbațiile descrise mai sus.

1.5. MULȚUMIRI

În semn de recunoștință doresc să mulțumesc tuturor celor care mi-au acordat sprijinul în realizarea acestei teze de doctorat. Realizarea tezei a fost elaborată cu ajutorul Departamentului de Mașini Materiale și Acționări Electrice al Facultății de Inginerie Electrică din cadrul Universității Politehnica București.

Am plăcerea de a aduce mulțumiri deosebite și o profundă recunoștință domnului profesor doctor inginer Constantin GHIȚĂ, conducătorul științific al lucrării, pentru îndrumarea competentă și ajutorul adus pe tot parcursul realizării acestei teze de doctorat. În același timp, mulțumesc și Comitetului de îndrumare a activității mele doctorale din care au făcut parte domnul prof.dr.ing. Tiberiu TUDORACHE, domnul conf.dr.ing. Aurel – Ionuț

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat
CHIRILĂ și domnul conf.dr.ing. Daniel - Ion ILINA, pentru ajutorul acordat pe perioada de realizare a rapoartelor științifice aferente tezei de doctorat și a redactării finale a acesteia.

O parte din rezultatele prezentate în lucrarea de doctorat au fost obținute cu sprijinul Programul Operațional Capital Uman, Axa prioritară 6 - Educație și competențe din cadrul proiectului “Dezvoltarea competențelor de antreprenoriat ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – cheie a succesului în carieră” (A-Succes) Cod MySMIS: 125125.

Mulțumesc și Societății Comerciale Wing Computer Group SRL pentru susținerea activității mele științifice în prima parte a stagiului de pregătire doctorală.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele pentru susținerea și încurajarea permanentă în vederea realizării prezentei teze de doctorat.

CAPITOLUL 2

SCHEME ELECTRICE ALE TRANSFORMATOARELOR SUPUSE LA SUPRATENSIUNI

2.1. ELEMENTE GENERALE

Datorită frecvenței înalte la care se desfășoară procesele tranzitorii de supratensiune, schemele echivalente valabile pentru regimurile normale periodice sinusoidale nu mai sunt valabile. Frecvența frontului supratensiunii de trăsnet este foarte mare (de ordinul MHz) și din această cauză, în schema echivalentă apar și capacități. Pe de altă parte, pentru o bună precizie, trebuie să includem în schema echivalentă și rezistențe și inductivități.

2.2. SCHEME ECHIVALENTE DEFINITE CU PARAMETRII LINEICI

Schema electrică simplificată a transformatorului la supratensiuni, exprimată cu parametrii lineici, este prezentată în Fig. 2.1, schemă care este suficient de precisă pentru studiu. Se face precizarea că parametrii lineici sunt definiți pentru fiecare metru de lungime a înfășurării de înaltă tensiune.

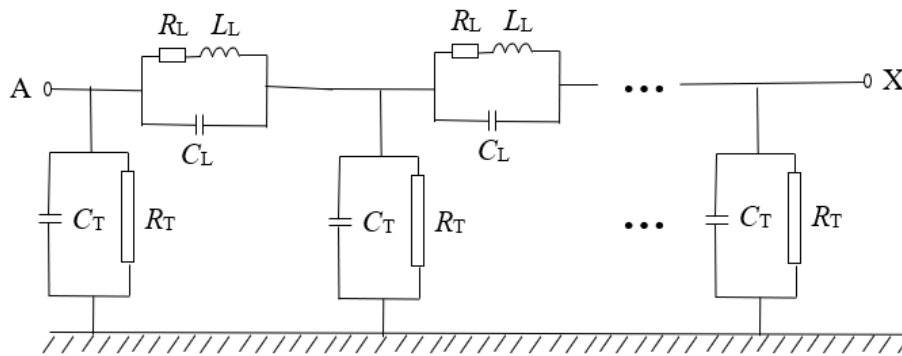


Fig. 2.1. Schema electrică echivalentă simplificată a transformatorului monofazat la supratensiuni, cu parametrii lineici

În cazul în care schemei echivalente din Fig. 2.1 i se aplică unda de trăsnet (la momentul inițial $t = 0$) la borna A de intrare a înfășurării de înaltă tensiune, valoarea tensiunii $u(x, t)$ se poate determina integrând o ecuație diferențială cu derivate parțiale de ordinul 4 având forma dată de relația [2]:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{R_L}{L_L} \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \frac{1}{C_L L_L} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{C_T}{C_L} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \left(\frac{R_L C_T}{C_L L_L} + \frac{1}{R_T C_L} \right) \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{R_L u}{R_T C_L L_L} = 0 \quad (2.1)$$

unde L_L , C_L , R_L , C_T , R_T sunt parametrii lineici, exprimați în [H/m], [F/m], [Ω /m] iar x este distanța măsurată de la borna A la punctul curent din înfășurarea de înaltă tensiune și t este timpul măsurat din momentul pătrunderii undei de trăsnet în borna de intrare A, a înfășurării de înaltă tensiune. Valorile parametrilor care apar în ecuația (2.1) sunt valori lineice.

2.3. SCHEME ELECTRICE DEFINITE CU PARAMETRII CONCENTRAȚI, EXPRIMAȚI ÎN VALORI ABSOLUTE

În prezenta teză de doctorat se va lucra cu schema electrică simplificată a transformatorului, Fig.2.2, în care parametrii lineici se vor înlocui cu parametrii concentrați, exprimați în valori absolute [H], [F], [Ω]. Bornele de intrare ale celor 6 secțiuni ale înfășurării sunt notate cu $A_1, A_2, \dots, A_6$. Valorile parametrilor celor 6 secțiuni se aleg pentru un transformator electric de mică putere, având puterea aparentă de 1 kVA. Aceste valori se vor numi, în continuare, *valori de referință* și sunt următoarele [3]: $R_{0L} = 2 \Omega$, $R_{0T} = 2000 M\Omega$, $L_{0L} = 2 \text{ mH}$, $C_{0L} = 2.2 \text{ nF}$, $C_{0T} = 5.5 \text{ nF}$.

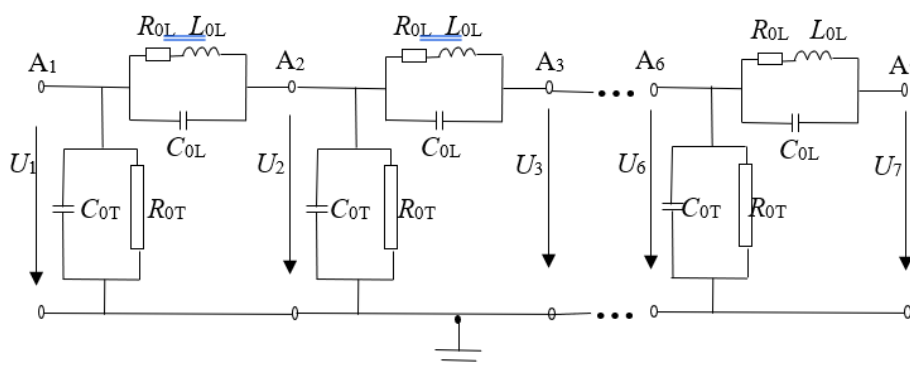


Fig. 2.2. Schema echivalentă la supratensiuni cu parametrii celor 6 secțiuni având valorile de referință

Schema echivalentă prezentată în Fig. 2.2 a fost dedusă în următoarele ipoteze simplificatoare:

- Au fost alese doar șase secțiuni ale înfășurării și în acest caz, studiul repartiției spațiale a supratensiunilor conduce la anumite erori. În cazul în care numărul de secțiuni este dublu este evident că studiul repartiției spațiale a supratensiunii este mai aproape de realitate;
- Cele șase secțiuni în care s-a împărțit înfășurarea au aceeași parametri, neținându-se seama de modificarea parametrilor secțiunii de intrare A_1 , datorate izolației întărite a spirelor acesteia;
- Se consideră că înfășurările transformatorului nu sunt prevăzute cu inel de gardă și cu ecrane de protecție conectate la bornele de intrare ale înfășurărilor, lucru de care se va ține seama atunci când se vor studia separat influența acestor elemente, în capitolele următoare ale tezei.

CAPITOLUL 3

MODELAREA IMPULSULUI DE TRĂSNET PENTRU TESTAREA ÎNFĂȘURĂRILOR TRANSFORMATORULUI

3.1. GRAFICUL UNDEI DE TRĂSNET

În acest capitol se analizează determinarea parametrilor unui generator de impuls care să genereze o undă de supratensiune de formă cât mai apropiată de unda prezentată în standardele IEC 60060 – 1 [4] și IEC 60060 - 2 [5]. Pornind de la schemele echivalente ale transformatorului electric supus supratensiunilor se aplică undele de supratensiune produse de generatorul de impuls acestor scheme echivalente urmărindu-se, prin simulare numerică, pentru a se studia, în capitolele următoare, propagarea undelor de supratensiune de-a lungul înfășurărilor transformatorului, atât în momentul inițial cât și în alte momente de timp.

3.2. GENERAREA UNDEI DE TRĂSNET

Generatorul de supratensiune de impuls este o parte importantă a sistemului de testare a transformatorului [6]. Dată fiind frecvența foarte mare a impulsului, generatorul produce și perturbații în semnalul măsurat, inclusiv oscilații în zona frontului de undă, în special în jurul originii, dar și în zona descrescătoare a frontului de undă, aici perturbațiile având o influență mai mică [7].

O metodă de abordare mai puțin dificilă a problemelor cauzate de supratensiunile de trăsnet asupra înfășurărilor transformatorului o reprezintă înlocuirea metodelor experimentale de încercare cu metode numerice de simulare LTspice (spice – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [8]. În acest caz, nu mai apar perturbații suplimentare în semnalul aplicat înfășurării transformatorului și deci, nu mai este necesară prezența filtrelor speciale. De asemenea și în acest caz, apar erori datorate procesului de simulare, dar acestea au doar influență cantitativă astfel încât din punct de vedere calitativ, fenomenele simulate conduc la concluzii corecte.

3.3. MODELAREA IMPULSULUI DE TRĂSNET

Diagrama de circuit simplificat al generatorului de impulsuri este prezentată în Fig. 3.1. Acest generator a fost proiectat pentru prima dată de Erwin Otto Marx [9].

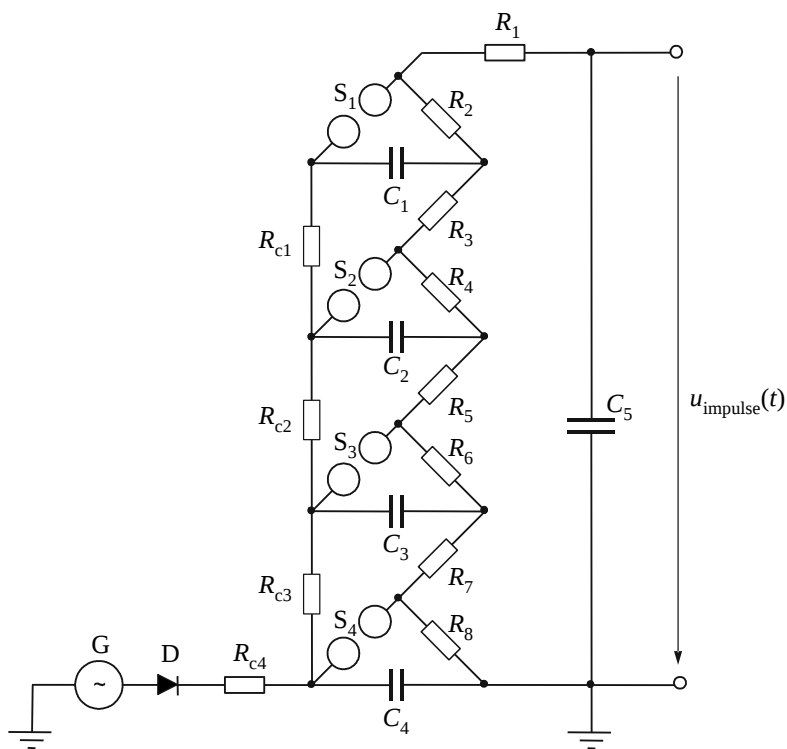


Fig. 3.1. Generator Marx de impulsuri cu schema de circuit în 4 trepte

3.4. CIRCUITUL DE MODELARE AL GENERATORULUI DE IMPULSURI FOLOSIND SIMULAREA ÎN PROGRAMUL LTSPICE

Pornind de schema generatorului de impuls prezentată în Fig. 3.1, se obține modelarea în LTspice a generatorului de impulsuri prezentată în Fig. 3.2.

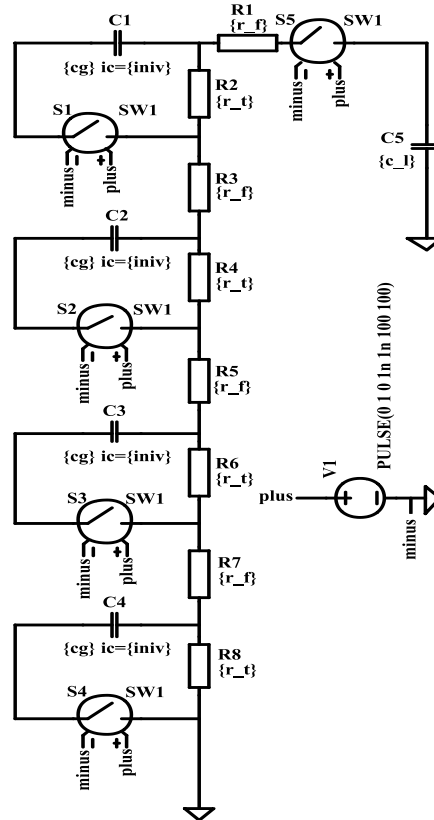


Fig. 3.2. Modelarea în LTspice a generatorului de impulsuri Marx [3]

Rezistențele de încărcare $R_{c1} \dots R_{c4}$ nu sunt incluse în Fig. 3.2, deoarece pentru simulare la momentul inițial de timp, condensatoarele de impuls C_1, C_2, C_3, C_4 , sunt deja încărcate. Acest lucru se realizează prin utilizarea aplicației LTspice, IC (starea inițială).

Întrerupătoarele deschise $S_1 \dots S_4$ sunt înlocuite cu comutatoare, care sunt controlate de tensiune. Comutatorul S_5 este adăugat în circuitul LTspice pentru a preveni descărcarea condensatoarelor de impuls atunci când se dorește o întârziere (de exemplu, întârziere de 1 s).

Pragul de tensiune de control al comutatoarelor este setat la 0,5 V. Tensiunea de comandă este de tip impuls cu valoarea 1 V tensiune continuă și timpi egali de creștere și de scădere de 1 ns. Simularea este de tip tranzitoriu cu timpul de oprire setat la 50 μ s, în timp ce pasul de timp maxim al simulării este de 1 ms. Metoda de integrare este trapezoidală modificată.

În urma simulării, s-a obținut unda de supratensiune standard, prezentată în Fig. 3.3, pentru cazul în care generatorul de impulsuri este în modul de funcționare fără sarcină. Pentru

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat

sistemul în unități relative (Per-unit system) valoarea la care se raportează tensiunea este 1 kV.

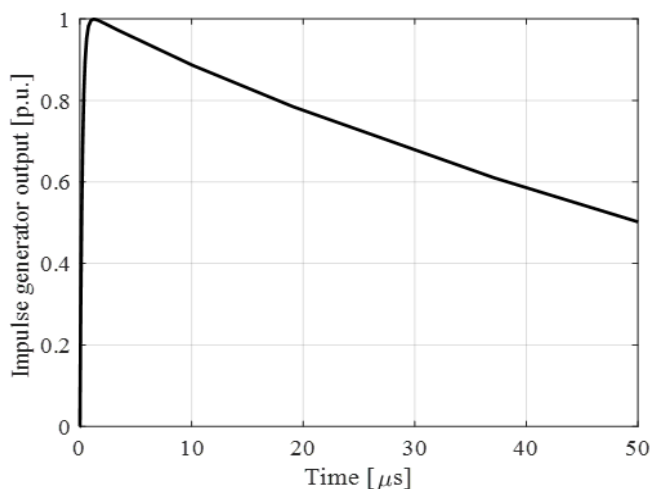


Fig.3.3. Forma standard de undă de impuls de trăsnet modelată în LTspice

Există o concordanță între forma de undă standard și forma de undă modelată, deoarece frontul de undă în creștere atinge o valoare maximă de 1 kV la 1,255 μs (încadrându-se în limitele de eroare standard), iar partea de capăt (partea cozii) revine la 0,5 kV în timp de 50 μs.

CAPITOLUL 4

SIMULAREA PROPAGĂRII IMPULSULUI DE TRĂSNET ÎN ÎNFĂȘURAREA TRANSFORMATORULUI FOLOSIND LTSPICE

4.1. CONSIDERAȚII GENERALE

După ce s-a generat forma de undă cu ajutorul generatorului de impuls în LTspice, se va alege în continuare pentru simulare un transformator având următoarele caracteristici indicate în Tab.4.1.

Tab.4.1. Datele tehnice ale transformatorului

Denumire	Valoare
Tip produs	Transformator de siguranță și izolare
Putere nominală	1 kVA
Tensiune de intrare	230 V c.a. o singură fază, borne: N-L1 400 V c.a. fază la fază, borne: L1-L2
Tensiune de ieșire	115 V c.a.
Înfășurare secundară	Monofilar

Limite pentru tensiune la intrare	207...253 V
	360...440 V
Limitele frecvenței rețelei	47...63 Hz
Toleranța pentru tensiune la intrare	+/- 15 V
Eficiența	94 %
Puterea disipată în W	63,8 W
Supratensiune continuă la ieșire	3 % (în gol, stare caldă)
Cădere de tensiune maximă la încărcare nominală	0,5 %
Pierderi în gol	26,5 W
Tensiune de scurtcircuit	0,0304
Tip de protecție a ieșirii	Protecție la suprasarcină
	Protecție la supratensiune
	Protecție la scurtcircuite
Rigiditate dielectrică	2000 V între înfășurare și masă
	4000 V între primar și secundar

Transformatorul pe care se fac simulările are înfășurarea de înaltă tensiune împărțită în șase secțiuni identice, așa cum este prezentat în schema echivalentă din Fig. 2.2.

4.2. SCHEMA CIRCUITULUI ECHIVALENT AL TRANSFORMATORULUI SIMULAT ÎN LTSPICE

În Fig.4.1 este reprezentată implementarea LTspice a circuitului echivalent complet al transformatorului atunci când acestuia i se aplică o formă de undă de supratensiune. Se pot observa cele șapte borne ($A_1 \dots A_7$) și cele șase secțiuni identice rezultate ($S_1 \dots S_6$), care sunt conectate în serie.

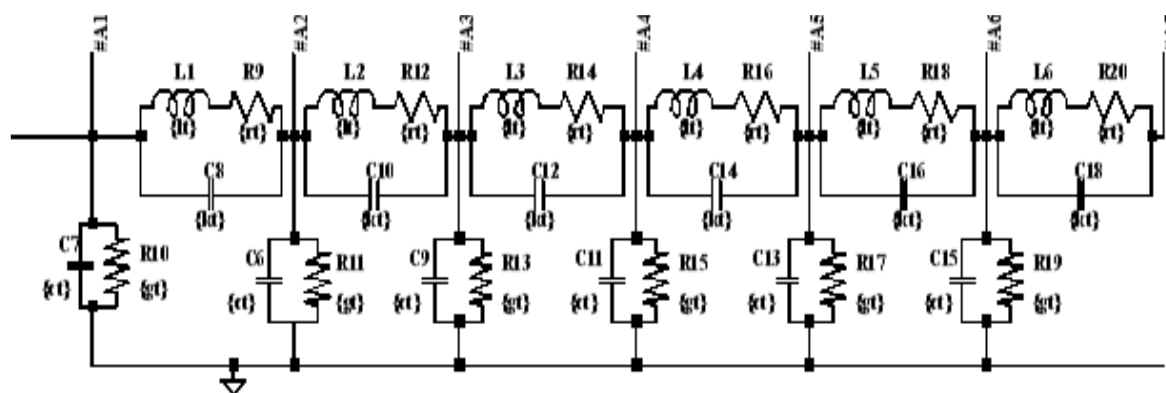


Fig. 4.1. Schema de circuit echivalentă a transformatorului folosind modelul cu parametrii concentrați și implementată în software-ul LTspice

Cazul de studiu analizat consideră terminalul de capăt al înfășurării (A_7) ca neconectat la masă.

4.3. SIMULAREA PROPAGĂRII IMPULSULUI DE TRĂSNET ÎN ÎNFĂȘURAREA DE ÎNALTĂ TENSIUNE A TRANSFORMATORULUI

Propagarea rezultată în timp și spațiu a supratensiunii aplicate este prezentată în Fig. 4.2 pentru primele patru borne (A_1 , A_2 , A_3 , A_4) și în Fig. 4.3 pentru ultimele trei borne (A_5 , A_6 , A_7). În aceste figuri, valorile supratensiunilor sunt exprimate în unități relative, iar timpul este exprimat în μs .

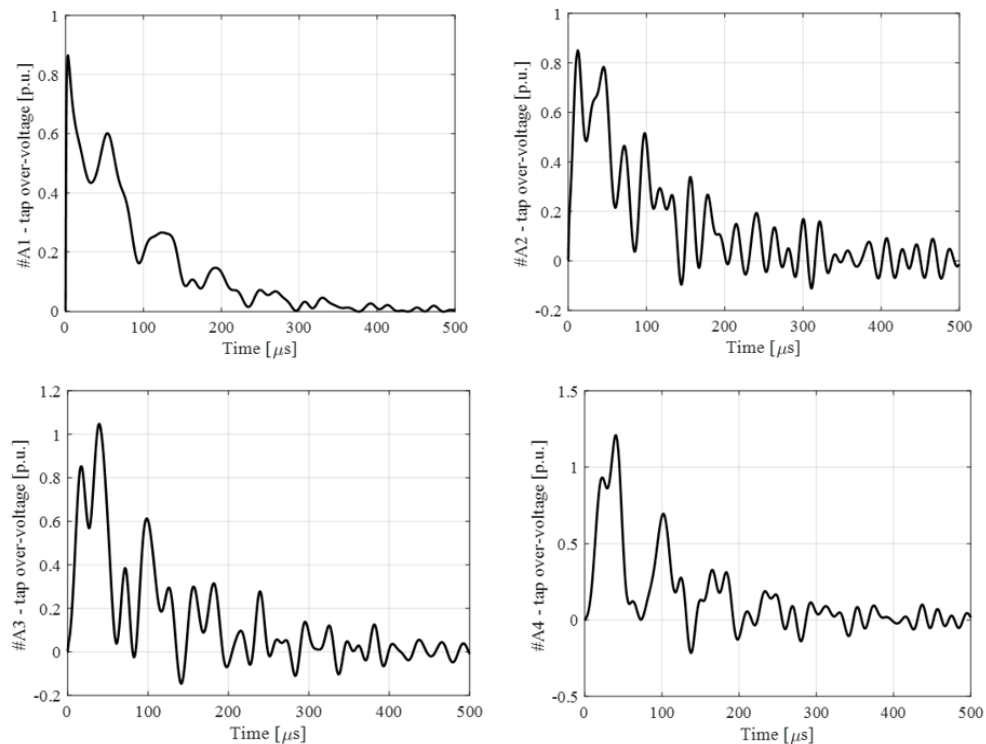


Fig. 4.2. Propagarea în timp și în spațiu a supratensiunii de impuls, pentru primele patru borne (A_1 , A_2 , A_3 , A_4) [3]

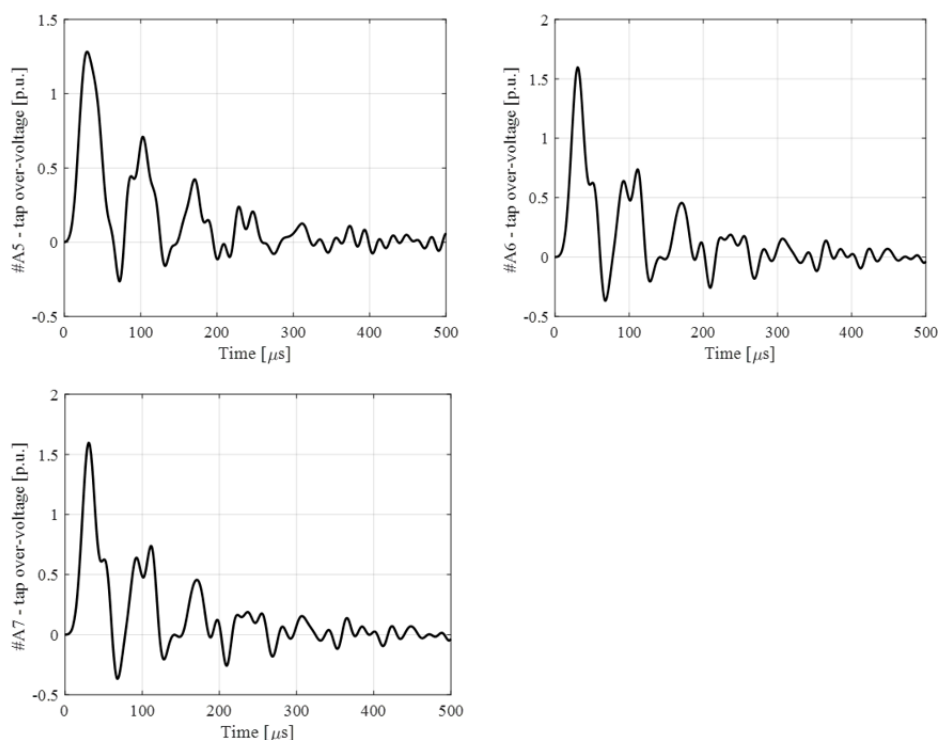


Fig. 4.3. Propagarea în timp și în spațiu a supratensiunii de impuls, pentru ultimele trei borne (A_5 , A_6 , A_7) [3]

Secțiunea cea mai solicitată este ultima (bornele A_6 - A_7), deoarece unda de supratensiune atinge valoarea de 1,6 kV după 30 μ s. Observând formele de variație ale supratensiunilor din Fig. 4.2 și Fig. 4.3 se desprinde concluzia generală că valorile supratensiunilor au o scădere în timp. După timpul de 500 μ s, valoarea de vârf a undelor de tensiune măsurate este mai mică de 10 procente din valoarea inițială, la toate cele 6 borne.

Simulările efectuate în acest capitol sunt generale, deoarece valorile supratensiunilor care se propaga de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune sunt măsurate în unități relative.

CAPITOLUL 5

INFLUENȚA VARIAȚIEI PARAMETRILOR SCHEMEI ECHIVALENTE ASUPRA PROPAGĂRII UNDELOR DE SUPRATENSIUNE

5.1. CONSIDERAȚII GENERALE

O atenție deosebită trebuie acordată sistemului de izolație al înfășurărilor de înaltă tensiune ale transformatorului care trebuie să reziste atunci când este supus la aceste tensiuni de trăsnet, dar și unor elemente speciale de diminuare a efectelor acestor supratensiuni.

5.2. REPARTIȚIA SPAȚIALĂ ȘI TEMPORALĂ A UNDEI DE SUPRATENSIUNE

Pentru început se consideră valorile de referință ale parametrilor schemei echivalente la supratensiuni, notate cu indicele „zero”, care sunt următoarele: $R_{0L} = 2 \Omega$, $R_{0T} = 2000 M\Omega$, $L_{0L} = 2 mH$, $C_{0L} = 2.2 nF$, $C_{0T} = 5.5 nF$. Valorile acestor parametrii sunt aceleași pentru toate cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului.

Se aplică la borna de intrare a transformatorului un impuls de tensiune standard, a cărei valoare de vârf este de $U_{100} = 1 kV$. Se modelează în LTspice propagarea în timp și spațiu a unde de supratensiune, pentru valorile de referință, de mai sus, ale parametrilor schemei echivalente și se obțin curbele din Fig. 5.1. [10]

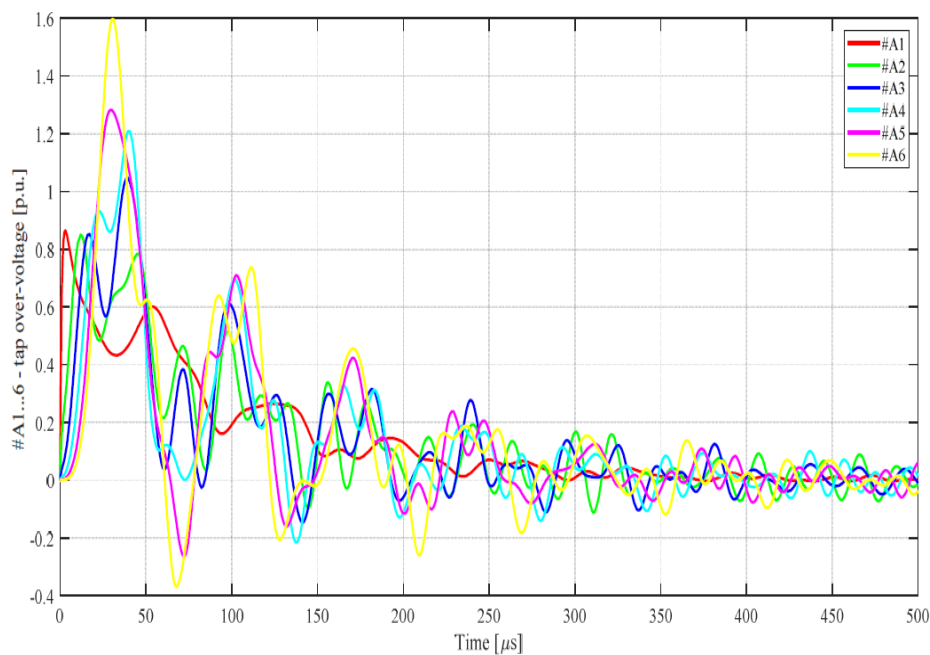


Fig. 5.1. Curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, simulate pentru bornele de intrare ale celor 6 secțiuni. *Legenda culorilor curbelor este următoarea:* borna A_1 – culoarea roșie; borna A_2 – culoarea verde; borna A_3 – culoarea albastru închis; borna A_4 – culoarea albastru deschis (bleu); borna A_5 – culoarea magenta; borna A_6 – culoarea galben

Observând formele curbelor de variație în timp ale propagării supratensiunii de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, se pot deduce câteva concluzii importante:

- Deși valoarea maximă a supratensiunii la intrarea înfășurării de înaltă tensiune este de 1 kV se constată că prin propagare, valoarea maximă a supratensiunii este mai mică sau mai mare decât valoarea sa de la intrare. Astfel, pentru borna A_1 , valoarea maximă a tensiunii este de 861 V, pentru borna A_2 valoarea maximă este 850 V, pentru borna A_3 valoarea maximă este 852 V, pentru borna A_4 valoarea maximă este 1209 V, pentru borna A_5 valoarea maximă este 1282 V și pentru borna A_6 valoarea maximă este 1541 V.

- Valoarea maximă a supratensiunii măsurată la o bornă oarecare a înfășurării, poate fi primul maxim în timp (bornele A_1 , A_2 , A_5 , A_6) sau al doilea maxim în timp (bornele A_3 și A_4), așa cum rezultă și din curbele prezentate în Fig. 5.1.
- Fie că este primul maxim, fie că este al doilea maxim, în continuarea studiului se va considera doar valoarea maximă a tensiunii pentru o anumită bornă a înfășurării de înaltă tensiune.
- Cele mai periculoase maxime ale tensiunii sunt obținute aproximativ în primele 40 μ s de la pătrunderea undei de supratensiune la borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune. După 350 μ s valoarea supratensiunii maxime scade la aproximativ 10% din cel mai periculos maxim, obținut la borna A_6 , după aproximativ 30 μ s de la pătrunderea undei în transformator.

5.3. INFLUENȚA VARIAȚIEI PARAMETRILOR SCHEMEI ECHIVALENTE ASUPRA PROPAGĂRII UNDELOR DE SUPRATENSIUNE

Pornind de la valorile de referință ale parametrilor schemei echivalente R_{0L} , R_{0T} , L_{0L} , C_{0L} și C_{0T} , se studiază, pe rând, prin modelarea în LTspice, influența variației fiecăruia dintre cei cinci parametri din schema echivalentă, în următoarea ipoteză: se variază un parametru, ceilalți 4 rămânând constanți la valorile lor de referință. Apoi se variază un alt parametru, ceilalți 4 rămânând, de asemenea constanți, la valorile lor de referință și procedeul se continuă încă de trei ori. În acest fel, se studiază, pe rând, influența fiecăruia dintre acești parametri asupra valorilor maxime ale supratensiunilor care se produc de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului.

Cazul 1. Influența variației capacității longitudinale C_L

Se studiază influența capacității longitudinale C_L , asupra valorilor maxime ale tensiunii care se propagă de-a lungul înfășurării, pentru toate cele 6 borne de intrare A_1 , A_2 , ..., A_6 ale schemei echivalente. Procedeul de modelare este următorul:

Se aleg, de exemplu, 10 valori pentru capacitatea longitudinală C_L , în raport cu valoarea de referință C_{0L} , valori care sunt date în Tab. 5.1, restul valorilor celorlalți 4 parametri, pentru fiecare dintre cele 10 valori ale capacității C_L , rămânând constante și egale cu valorile lor de referință: $R_{0L} = 2 \Omega$, $R_{0T} = 2000 M\Omega$, $L_{0L} = 2 mH$, $C_{0T} = 5.5 nF$.

Tab. 5.1 Valorile capacității longitudinale C_L pentru care se fac simulările

Valorile parametrului C_L	$0.4C_{0L} = 0.88 \text{ nF}$	$0.6 C_{0L} = 1.32 \text{ nF}$	$0.8 C_{0L} = 1.76 \text{ nF}$	$C_{0L} = 2.20 \text{ nF}$	$1.2 C_{0L} = 2.64 \text{ nF}$	$1.4C_{0L} = 3.08 \text{ nF}$	$1.6C_{0L} = 3.52 \text{ nF}$	$1.8C_{0L} = 3.96 \text{ nF}$	$2C_{0L} = 4.4 \text{ nF}$	$4 C_{0L} = 8.8 \text{ nF}$
-----------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------------	--------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-----------------------------

Pentru cele 10 valori ale capacității longitudinale se aplică la borna de intrare a transformatorului aceeași undă standard de supratensiune cu frontul maxim de 1 kV. Pentru fiecare caz în parte, se determină valoarea maximului care se obține pentru tensiunea care se propagă de-a lungul înfășurării. Valorile acestor maxime sunt trecute în Tab. 5.2, pentru fiecare dintre cele 10 valori ale capacității longitudinale și pentru fiecare dintre cele 6 borne ale schemei echivalente. Se iau în considerare doar valorile maxime deoarece acestea sunt cele mai periculoase pentru înfășurarea de înaltă tensiune.

În Fig. 5.2 se prezintă graficele tensiunilor maxime în funcție de valoarea capacității longitudinale C_L , pentru bornele $A_1, A_2, \dots, A_6$.

De exemplu, pentru valoarea capacității longitudinale de 0.88 nF, primul maxim al tensiunii se produce la borna A_6 , și are valoarea de 1659.3 V, o valoare cu aproximativ 66 % mai mare decât valoarea supratensiunii de la intrarea înfășurării, care era de 1 kV. Se constată, de asemenea, că borna A_6 este cea mai solicitată pentru toate cele 10 valori ale capacității longitudinale. O altă constatare este aceea că cu cât se mărește capacitatea longitudinală C_L cu atât se diminuează valoarea primului maxim de la borna A_6 . Astfel dacă valoarea capacității longitudinale crește de la valoarea de 0.88 nF la valoarea de 8.8 nF, valoarea celui mai mare maxim al tensiunii, corespunzător bornei A_6 , se diminuează cu aproximativ 16.39 %.

Tab. 5.2 Valorile maxime de tensiune funcție de variația capacității longitudinale C_L

Valorile capacității longitudinale C_L	Valorile în [V] ale maximului $U_{\max}$ calculate la bornele $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
$0.4 C_{0L} = 0.88 \text{ nF}$	869.50	874.90	883.03	908.38	1290.9	1659.3
$0.6 C_{0L} = 1.32 \text{ nF}$	861.45	863.37	871.56	912.44	1242.0	1541.8
$0.8 C_{0L} = 1.76 \text{ nF}$	861.45	858.40	861.63	921.58	1266.7	1541.8
$C_{0L} = 2.20 \text{ nF}$	861.45	850.76	852.33	931.84	1282.6	1561.8
$1.2 C_{0L} = 2.64 \text{ nF}$	861.45	841.84	846.67	945.11	1291.1	1543.8
$1.4 C_{0L} = 3.08 \text{ nF}$	860.24	832.93	843.44	957.12	1296.1	1527.7
$1.6 C_{0L} = 3.52 \text{ nF}$	861.45	824.53	841.94	968.70	1297.2	1520.8
$1.8 C_{0L} = 3.96 \text{ nF}$	860.24	816.61	839.71	979.39	1298.1	1515.7
$2 C_{0L} = 4.4 \text{ nF}$	859.03	809.16	837.61	988.93	1278.8	1512.2
$4 C_{0L} = 8.8 \text{ nF}$	847.12	756.10	841.38	1025.1	1250.0	1387.0

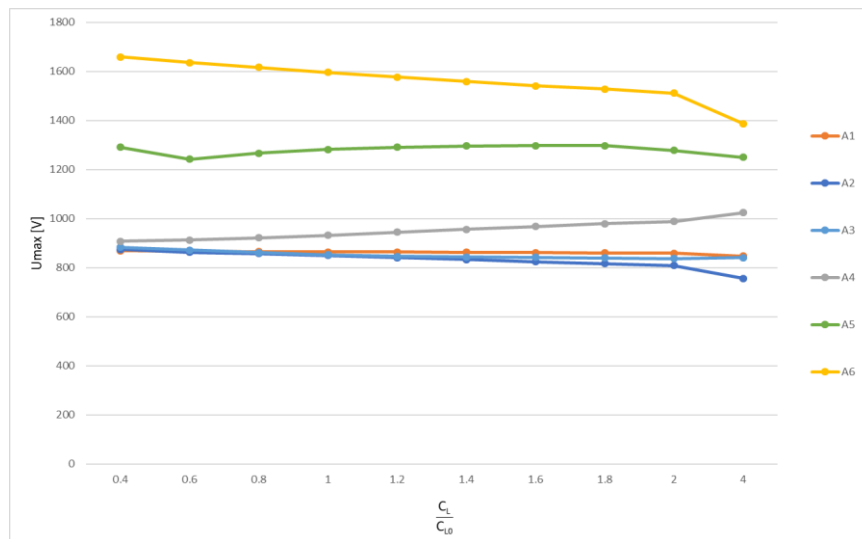


Fig. 5.2. Graficele $U_{max} = f(C_L)$ | pentru R_{OL} , R_{OT} , L_{OL} , C_{OT} , în cazul bornelor A_1 , A_2 , ..., A_6

Asemănător cu primul caz, se analizează și cazurile II, III, IV și V, respectiv se studiază influența capacității transversale C_T , a rezistenței transversale R_T , a rezistenței longitudinale R_L și a inductivității longitudinale L_L asupra valorilor maxime ale tensiunii care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, pentru toate cele 6 borne de intrare A_1 , A_2 , ..., A_6 ale schemei echivalente.

Concluzii

Cea mai solicitată parte a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului este ultima secțiune a înfășurării, cu borna de intrare A_6 . Dintre cei cinci parametri care apar în schema echivalentă, cea mai mare importanță o au valorile capacității transversale C_T și ale capacității longitudinale C_L . Astfel, dacă valoarea capacității transversale crește de la 2.2 nF la 22 nF, valoarea maximă a supratensiunii la borna A_6 se diminuează cu 37.7 %. La fel, dacă valoarea capacității longitudinale crește de la 0.88 nF la 8.8 nF, valoarea maximă a supratensiunii la borna A_6 se diminuează cu 16.39 %. O importanță mai redusă o au parametrii R_L , L_L și R_T din schema echivalentă. În mod analog, dacă acești 3 parametri variază în gama de la 1 la 10, diminuările supratensiunii apar tot la borna A_6 și sunt de 3.42 %, respectiv 3.07 % și 0.11 %. Așadar, cea mai mare influență asupra valorii maxime a supratensiunii o are capacitatea transversală C_T și cea mai mică influență o are rezistența transversală R_T .

CAPITOLUL 6

PROTECȚIA INTERNĂ A TRANSFORMATOARELOR FOLOSIND INELUL DE GARDĂ ȘI ECRANUL DE PROTECȚIE

6.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Descărcările electrice cauzate de fulgere produc avarii serioase echipamentelor din stațiile electrice, parcurilor eoliene [11] cât și liniilor conectate la acestea.

În acest capitol soluțiile propuse sunt de tip interior, prin metode constructive în înfășurarea de înaltă tensiune a transformatorului după cum urmează [12] :

- a) Folosirea unui *inel de gardă* care reprezintă o spiră circulară întreruptă;
- b) Utilizarea unui *ecran cilindric de protecție* secționat după generatoare pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit;
- c) Intercalarea sau întreșerea spirelor înfășurării folosită la înfășurările în galeți [13];
- d) Întărirea izolației de intrare a înfășurării de înaltă tensiune pentru primele 5 - 10% ale spirelor acesteia.

În continuare se analizează pe rând primele două cazuri (a și b) de protecție internă ale înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului.

6.2. INFLUENȚA INELULUI DE GARDĂ ASUPRA REPARTIȚIEI SUPRATENSIUNII DE-A LUNGUL ÎNFĂȘURĂRII

Se analizează situația în care transformatorul este prevăzut doar cu inel de gardă, iar ecranul de protecție lipsește. În acest caz, se studiază influența inelului de gardă asupra schemei echivalente a transformatorului. Pentru a lua în seamă prezența inelului de gardă asupra schemei echivalente se consideră că acesta introduce în schema echivalentă la supratensiuni, 6 capacități C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G} corespunzătoare celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune. Se face ipoteza că valorile acestor capacități sunt diferite pentru cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune, cea mai mare valoare fiind asociată secțiunii de la intrarea înfășurării și cea mai mică valoare fiind asociată ultimei secțiuni de la finalul înfășurării de înaltă tensiune [12].

În Fig. 6.1 se prezintă schema echivalentă a transformatorului considerând că acesta este prevăzut doar cu inel de gardă nu și cu ecran de protecție.

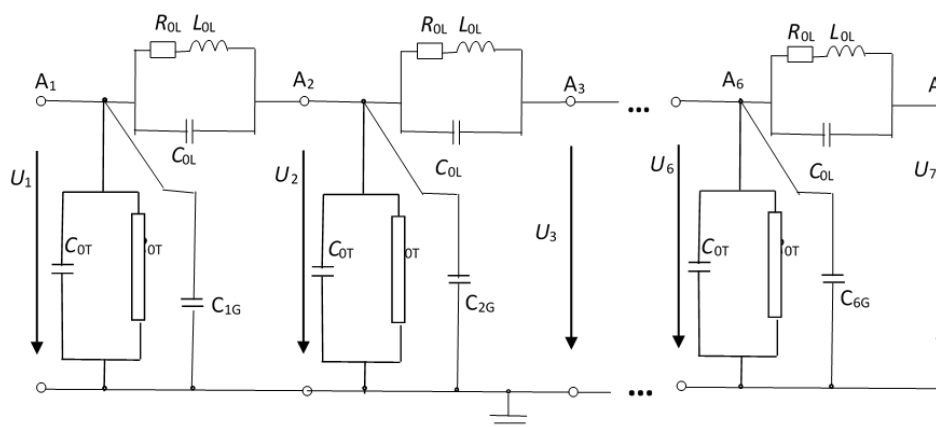


Fig. 6.1. Schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni considerând și existența inelului de gardă [12]

Se face ipoteza că cele 6 capacități, caracteristice inelului de gardă, corespunzătoare schemei echivalente din Fig. 6.1 vor fi simulate conform următoarelor patru cazuri, în care valorile capacităților C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G} sunt cele din Tab. 6.1.

Pentru cazul II și cazul III se consideră că inelul de gardă introduce în schema echivalentă o capacitate doar în secțiunea de intrare a înfășurării de înaltă tensiune, iar pentru cazul I și cazul IV inelul de gardă introduce capacități în toate cele 6 secțiuni ale înfășurării, având valori descrescătoare pe cele 6 secțiuni. În toate simulările din LTspice care se fac în cele 4 cazuri se consideră valorile de referință ale celor 5 parametri ai schemei echivalente: $C_{OL} = 2.2 \text{ nF}$, $C_{OT} = 5.5 \text{ nF}$, $R_{OL} = 2 \Omega$, $R_{OT} = 2000 \text{ M}\Omega$, $L_{OL} = 2 \text{ mH}$.

Pentru fiecare dintre cele 4 cazuri, se determină în LTspice curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune.

Influența inelului de gardă în cele 4 cazuri

Pentru cele 6 valori ale capacităților inelului de gardă se aplică la borna de intrare a transformatorului unda standard de supratensiune cu frontul maxim de 1 kV. Pentru cele 4 cazuri studiate se aleg valorile capacităților C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G} care sunt date în Tab.6.1.

Tab. 6.1. Valorile capacităților C_{1G} , C_{2G} , ..., C_{6G} corespunzătoare celor 4 cazuri

	Cazul I	Cazul II	Cazul III	Cazul IV
Valorile parametrilor capacităților $C_{1G}, C_{2G}, \dots, C_{6G}$	$C_{1G} = 10 \text{ nF}$	$C_{1G} = 10 \text{ nF}$	$C_{1G} = 20 \text{ nF}$	$C_{1G} = 20 \text{ nF}$
	$C_{2G} = C_{1G}/2 \text{ nF}$	$C_{2G} = 0 \text{ nF}$	$C_{2G} = 0 \text{ nF}$	$C_{2G} = C_{1G}/2 \text{ nF}$
	$C_{3G} = C_{1G}/3 \text{ nF}$	$C_{3G} = 0 \text{ nF}$	$C_{3G} = 0 \text{ nF}$	$C_{3G} = C_{1G}/3 \text{ nF}$
	$C_{4G} = C_{1G}/4 \text{ nF}$	$C_{4G} = 0 \text{ nF}$	$C_{4G} = 0 \text{ nF}$	$C_{4G} = C_{1G}/4 \text{ nF}$
	$C_{5G} = C_{1G}/5 \text{ nF}$	$C_{5G} = 0 \text{ nF}$	$C_{5G} = 0 \text{ nF}$	$C_{5G} = C_{1G}/5 \text{ nF}$
	$C_{6G} = C_{1G}/6 \text{ nF}$	$C_{6G} = 0 \text{ nF}$	$C_{6G} = 0 \text{ nF}$	$C_{6G} = C_{1G}/6 \text{ nF}$

Această ipoteză presupune că valorile capacităților din schema echivalentă corespunzătoare inelului de gardă au o descreștere liniară pentru cazurile I și IV și pentru cazurile II și III au o valoare nenulă doar pentru secțiunea de intrare a înfășurării de înaltă tensiune.

În mod asemănător cu simulările efectuate în capitolul 5 se reiau simulările în programul de calcul LTspice și se modelează propagarea în timp și în spațiu a aceleiași undă de supratensiune de valoare 1 kV, aplicată bornei de intrare a înfășurării de înaltă tensiune, unda care s-a folosit și pentru determinarea caracteristicilor prezentate în Fig. 5.1. În această nouă situație, de exemplu pentru cazul I, se obțin curbele prezentate în Fig. 6.2 [12].

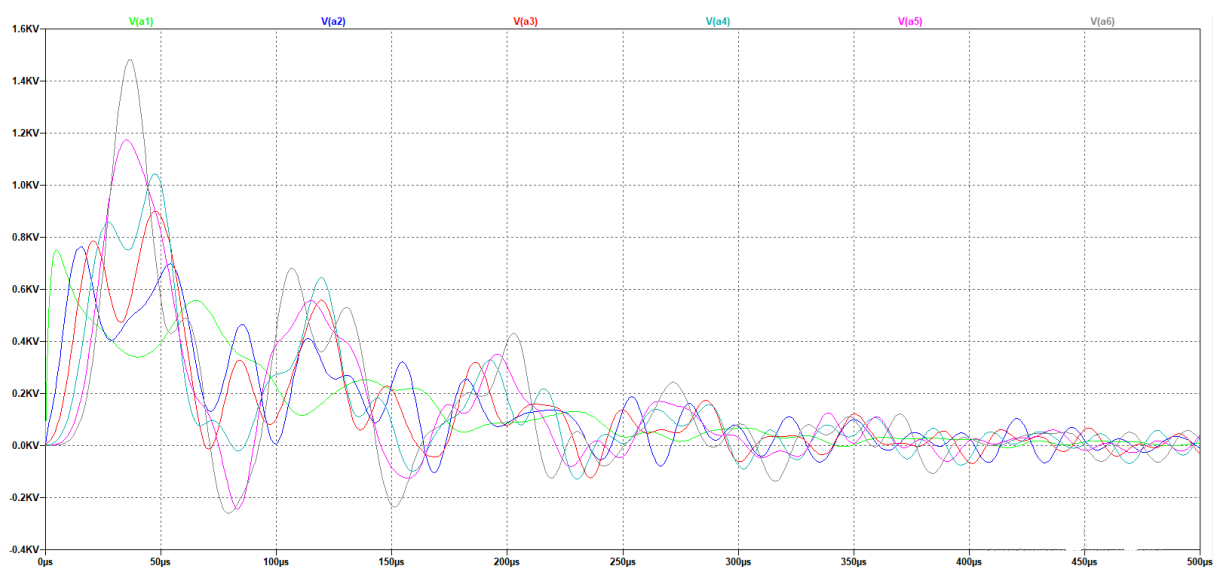


Fig. 6.2. Cazul I. Curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune, simulate pentru bornele de intrare ale celor 6 secțiuni, considerând schema electrică prezentată în Fig. 6.1. Legenda culorilor curbelor este următoarea: borna A_1 – culoarea verde; borna A_2 – culoarea albastru închis; borna A_3 – culoarea roșie; borna A_4 – culoarea albastru deschis (bleu); borna A_5 – culoarea magenta; borna A_6 – culoarea neagră [12]

Inelul de gardă conduce la diminuarea maximelor tuturor undelor de supratensiune corespunzătoare celor 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune, cu valori cuprinse între (7.15 ... 14.30)%. Astfel, reducerile celor mai mari maxime din cele 6 secțiuni ale înfășurării de înaltă tensiune, datorate prezenței inelului de gardă, sunt prezentate în Tab. 6.2, tot pentru cazul I.

Tab. 6.2. Valorile procentelor de reducere a maximelor datorate prezenței inelului de gardă (Cazul I)

Secțiunea înfășurării de înaltă tensiune	Maximul unde de supratensiune a secțiunii fără considerarea inelului de gardă	Maximul unde de supratensiune a secțiunii cu inelul de gardă	Procentul de reducere a maximului datorat inelului de gardă
A ₁	0.86 kV	0.75 kV	13.09 %
A ₂	0.85 kV	0.76 kV	10.09 %
A ₃	1.04 kV	0.89 kV	14.30 %
A ₄	1.20 kV	1.04 kV	13.82 %
A ₅	1.28 kV	1.17 kV	8.58 %
A ₆	1.59 kV	1.48 kV	7.15 %

Introducerea inelului de gardă are o mică influență și asupra vitezei de propagare a unde de supratensiune de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune. Astfel, dacă se compară curbele din Fig. 5.1 (fără inel de gardă) cu cele din Fig.6.2 (cu inel de gardă) se constată că prezenta inelului de gardă conduce la creșterea vitezei de propagare a unde de supratensiune de-a lungul înfășurării cu aproximativ 3,73%.

Influența inelului de gardă în cazul II

Similar cu cazul precedent pentru valoarea capacității C_{1G} se alege valoarea de 10 nF, iar celelalte capacități fiind considerate nule, valoarea maximă a tensiunii este de 1510 V, la borna A₆, o valoare cu 5.35 % mai mică decât valoarea supratensiunii de la intrarea înfășurării transformatorului fără protecție suplimentară. Se constată, de asemenea, că cea mai mare reducere a valorii supratensiunii este la borna A₁, cu 11.87 %.

Influența inelului de gardă în cazul III

În același mod, ca și în cazul II, se constată că dacă valoarea capacității C_{1G} crește de la valoarea de 10 nF la valoarea de 20 nF, valoarea celui mai mare maxim al tensiunii este corespunzător bornei A₆. Diminuarea maximului unde de supratensiune cel mai semnificativ se realizează la borna A₁ cu un procent de 20.33% .

Influența inelului de gardă în cazul IV

Concluziile care se deduc din studiul celui de al patrulea caz, sunt asemănătoare din punct de vedere calitativ, cu acelea din cazul I. În mod asemănător, maximul tensiunii se produce tot la borna A₆, și are valoarea de 1370 V, o valoare cu 14.14 % mai mică decât valoarea maximului tensiunii transformatorului fără inel de gardă.

Asemănător tot cu simulările din cazul I, diminuarea procentuală cea mai mare a maximului tensiunii datorat inelului de gardă se face la borna A₃.

În final, se poate trage concluzia ca inelul de gardă folosit ca mijloc de protecție la supratensiuni a transformatoarelor electrice este important, deoarece conduce la reducerea

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat

maximelor undelor de supratensiune care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune ale acestor transformatoare. Reducerea maximelor undelor de supratensiune este cu atât mai mare cu cât capacitatea inelului de gardă este mai mare.

6.3. DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI DE PROTECȚIE LA SUPRATENSIUNI PENTRU TRANSFORMATORUL ELECTRIC

6.3.1. DESCRIEREA TRANSFORMATORULUI FOLOSIT ÎN SIMULARE

Transformatorul electric pe care se fac modelările numerice privind ecranul de protecție este realizat de Societatea Comercială Electrotehnica din București. Acesta este un transformator monofazat, cu două coloane cu puterea de 2.5 kVA, având tensiunea nominală de înaltă tensiune egală cu 220 V și tensiunea nominală de joasă tensiune egală cu 110 V. Secțiunea utilă de fier a unei coloane a miezului magnetic are valoarea $S = 33.6 \text{ cm}^2$. Înălțimea ferestrei transformatorului are valoarea de 150 mm, iar lățimea acesteia are valoarea de 50 mm. Atât înfășurarea de înaltă tensiune cât și înfășurarea de joasă tensiune sunt realizate fiecare din câte două bobine, plasate pe cele două coloane, bobine înseriate aditional pentru fiecare dintre cele două înfășurări. [14].

Din punct de vedere al proprietăților dielectrice se consideră ipoteza că zona cuprinsă în fereastra transformatorului, zona miezului feromagnetic și zona exterioară transformatorului au permitivitatea electrică relativă egală cu unitatea. În această ipoteză, se face o anumită eroare deoarece zonele în care se află înfășurările conțin folii izolante care asigură izolația între straturile celor două înfășurări precum și izolația dintre înfășurări și din exteriorul acestora.

Lățimea ferestrei transformatorului are valoarea de 50 mm. Grosime echivalentă a tuturor izolațiilor din fereastra reprezintă doar 4 % din lățimea acestei fereastre. Aceasta înseamnă că practic, dacă se consideră permitivitatea relativă a izolației dintre straturi egală cu unitatea, această ipoteză conduce la o eroare relativ redusă atunci când se calculează capacitatea ecranului, fără a ține seama de izolațiile din fereastră. În final, se poate corecta valoarea finală a capacității, determinată numeric, cu ajutorul unui factor de corecție care ține seama de grosimea echivalentă, egală cu 2 mm, a izolației din fereastra transformatorului.

6.3.2. DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI DE PROTECȚIE PRIN METODE NUMERICE

Transformatorul electric are pe fiecare coloană câte două bobine, atât pentru înfășurarea de înaltă tensiune, cât și pentru înfășurarea de joasă tensiune, cele două bobine fiind înseriate adițional pentru fiecare înfășurare. Între bobinele aparținând înfășurărilor de înaltă și joasă tensiune de pe fiecare coloană se plasează câte un ecran cilindric de protecție, fiecare ecran fiind secționat după o generatoare, pentru a nu forma o spiră în scurtcircuit.

Determinarea capacității ecranului de protecție se va face considerând ipoteza în care în fereastră ar exista un singur ecran și anume ecranul dintre înfășurarea de înaltă tensiune și înfășurarea de joasă tensiune de pe o singură coloană a transformatorului. Acest lucru conduce la reducerea timpului de calcul, fără a influența obținerea rezultatului final.

În Fig. 6.3 se prezintă schița miezului magnetic al transformatorului în care apare doar ecranul de protecție. Determinarea capacității acestui ecran se face în mediul de calcul COMSOL [15], fiind un software de simulare bazat pe metode numerice avansate. Simularea numerică se va face considerând că permitivitatea electrică relativă a tuturor mediilor din jurul ecranului este egală cu unitatea. Eroarea sistematică de calcul care se face este aceea că pentru grosimea echivalentă a tuturor izolațiilor din fereastră, reprezentând 4 % din lățimea ferestrei, se consideră permitivitatea relativă ϵ_r egală cu unitatea. În realitate aceste izolații au permitivitatea relativă situată în intervalul $\epsilon_r = (3 \dots 4)$. La finalul modelării, se propune o metodă aproximativă de corecție a acestei erori sistematice.

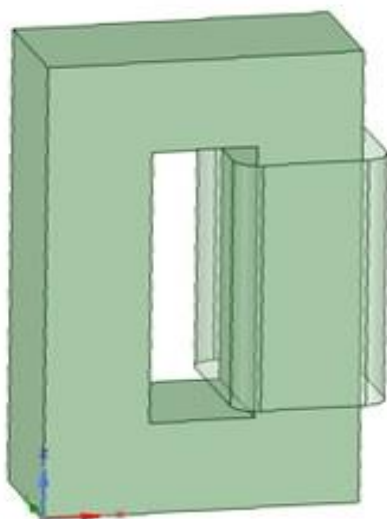


Fig. 6.3. Schița miezului magnetic al transformatorului împreună cu ecranul de protecție

6.3.3. UTILIZAREA MEDIULUI DE CALCUL COMSOL PENTRU DETERMINAREA CAPACITĂȚII ECRANULUI

Determinarea capacității ecranului se face considerând că domeniul de integrare este liniar. În mediul de calcul COMSOL se poate aborda problema determinării capacității ecranului de protecție printr-o metodă care presupune impunerea la o anumită valoare U a potențialului ecranului de protecție și prin metode numerice specifice mediului de calcul se determină valoarea sarcinii electrice Q aferentă ecranului de protecție și valoarea energiei W_e în câmp electrostatic.

Valoarea tensiunii electrice impuse U se alege aleatoriu, deoarece, mediul fiind liniar, valoarea capacității nu depinde de valoarea acesteia. În acest caz, se consideră, de exemplu, că valoarea acestei tensiuni este $U = 100$ V.

În cazul rezolvării numerice a problemei, de mare importanță este modul de rafinare a rețelei de integrare, sau altfel spus finețea acestei rețele. Pentru rezolvarea problemei s-au folosit două variante. În prima variantă s-a folosit o rețea grosieră de rafinare, iar în cea de a doua variantă s-a folosit o rețea mai fină, obținută în mod automat de programul COMSOL prin trei pași de rafinare succesivă, în funcție de zonele domeniului de integrare în care mărimile au o variație mai mică sau mai mare.

În final, se obțin valorile capacității electrice ale ecranului de protecție, calculate prin impunerea valorii de 100 V pentru tensiunea electrică.

Pentru rețeaua de discretizare grosieră a domeniului de calcul s-au obținut următoarele valori:

- $C = 38.2$ pF, dacă se aplică relația de definiție ($C = \frac{Q}{U}$)
- $C = 32.96$ pF, dacă se aplică relația energetică ($C = \frac{Q^2}{2W_e}$)

Pentru rețeaua de discretizare fină a domeniului de calcul s-au obținut următoarele valori:

- $C = 37.83$ pF, dacă se aplică relația de definiție ($C = \frac{Q}{U}$)
- $C = 35.15$ pF, dacă se aplică relația energetică ($C = \frac{Q^2}{2W_e}$)

Se constată că modul de discretizare al domeniului de calcul are influență asupra valorilor calculate numeric ale capacității ecranului de protecție. Valorile capacității calculate

cu relațiile ($C = \frac{Q}{U}$) și ($C = \frac{Q^2}{2W_e}$) diferă cu aproximativ 13.71 %, în cazul considerării rețelei de discretizare grosiere, respectiv cu aproximativ 7.08 % în cazul considerării rețelei de discretizare fine. Este evident că valorile obținute pentru cele două cazuri sunt diferite datorită erorilor de integrare în cazul celor două rețele de discretizare folosite la calcul. Din punct de vedere teoretic valorile capacității ecranului sunt aceleași, indiferent de metoda folosită.

6.3.4. CORECȚIA VALORILOR CAPACITĂȚII ECRANULUI

În paragrafele anterioare s-a neglijat prezența zonelor cu dielectric aflate în interiorul ferestrei transformatorului. În cazul transformatorului studiat, în fereastră există și regiuni în care se găsește dielectric cum ar fi izolațiile de hostafan dintre straturile înfășurărilor, având grosimea echivalentă $d_1 = 0.8$ mm și izolațiile din voltaflex între înfășurări și între înfășurări și ecran având grosimea echivalentă $d_2 = 1.2$ mm. Hostafanul are permitivitatea electrică relativă $\varepsilon_{r1} \approx 3.5$ și voltaflexul are permitivitatea electrică relativă $\varepsilon_{r2} \approx 3.8$.

Pentru determinarea factorului de corecție al capacității ecranului de protecție se propune modelul de condensator plan și nu cilindric așa cum este ecranul de protecție. Această ipoteză nu influențează semnificativ rezultatele, deoarece factorul de corecție este o mărime adimensională a cărei valoare se schimbă foarte puțin când se trece de la condensatorul cilindric la condensatorul plan.

Așadar, eroarea care se face la calculul capacității ecranului de protecție, dacă se elimină izolațiile din fereastra transformatorului este de aproximativ 3 procente, capacitatea ecranului de protecție fiind cu aproximativ 3 procente mai mare decât valoarea rezultată în urma calculului numeric realizat în COMSOL.

CAPITOLUL 7

PROTECȚIA TRANSFORMATOARELOR ELECTRICE ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR DE TRĂSNET FOLOSIND DESCĂRCĂTOARELE

7.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Echipamentele din stațiile electrice de transformare sunt protejate împotriva loviturilor directe de trăsnet cu ajutorul paratrăsnetelor, dar și împotriva undelor de supratensiune ce se propagă de pe liniile de înaltă tensiune utilizând descărcătoarele electrice.

7.2. DESCĂRCĂTORUL – ECHIPAMENT DE PROTECȚIE

Descărcătoarele sunt echipamente din categoria aparatelor de protecție împotriva valorilor de defect ale tensiunii. Aceste echipamente se clasifică în funcție de variantele constructive cum ar fi [16]:

- Descărcător cu rezistență variabilă cu eclatoare de amorsare și rezistoare de șuntare (DRV);
- Descărcător cu oxid metalic fără eclatoare de amorsare (DOM).

7.2.1. DESCĂRCĂTORUL CU REZISTENȚĂ VARIABILĂ ȘI REZISTOARE DE ȘUNTARE

Descărcătorul cu rezistență variabilă reduce valoarea supratensiunilor prin rezistoarele neliniare, dependente de tensiune, la o valoare egală cu nivelul de protecție.

Construcția unui descărcător cu rezistență variabilă și schema electrică de principiu sunt prezentate în Fig. 7.1. Partea activă a descărcătorului este formată din eclatoarele 1 și din rezistoarele cu rezistență variabilă înseriate 2. Acestea sunt alcătuite din mai multe discuri din carbură de siliciu, de construcție specială și compoziție adecvată [17]. Întreaga construcție este protejată de anvelopa de porțelan 3, iar capacele frontale metalice 4 au rol de etanșare a construcției și în același timp au și rolul de borne de conexiuni [16].

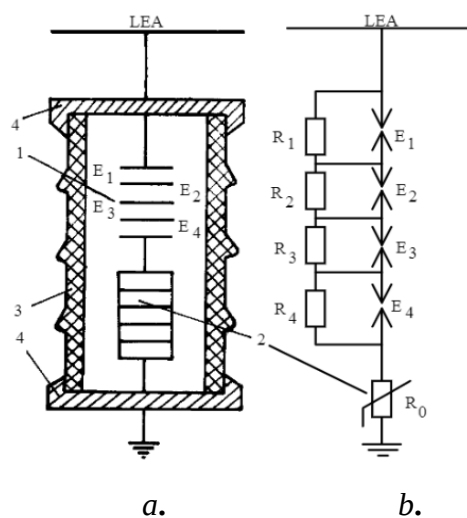


Fig. 7.1. Construcția descărcătorului cu rezistență variabilă (a); Schema electrică de principiu (b) [17]

Rezistoarele de șuntare, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , fac parte integrantă din descărcătorul cu carbură de siliciu cu eclatoare de amorsare și au o valoare foarte mare, asigurând repartitia supratensiunii în mod uniform pe eclatoarele de amorsare ale descărcătorului.

7.2.2. DESCĂRCĂTORUL CU OXIZI METALICI

În Fig. 7.2 este prezentată secțiunea descărcătorului cu oxid de zinc, fără eclatoare și cu o singură coloană de blocuri ZnO [18].

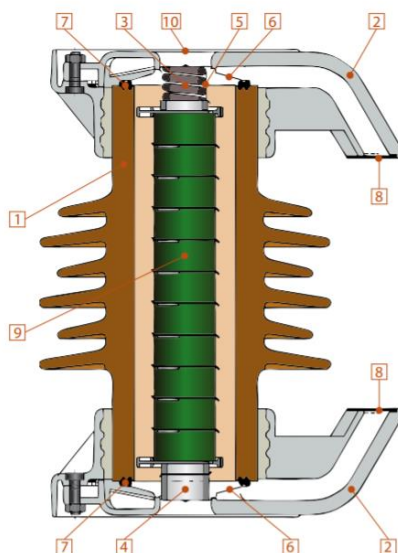


Fig.7.2. Secțiunea descărcătorului cu oxid de zinc, fără eclatoare și cu o singură coloană de blocuri ZnO [18]

Flanșele 10 sunt cimentate pe anvelopa de porțelan 1 și includ și dispozitivul de etanșare. Dispozitivul de etanșare de la fiecare capăt al fiecărei unități constă într-o placă de oțel inoxidabil pretensionată 6 cu o garnitură de cauciuc 7. Aceasta servește la fixarea coloanei blocurilor ZnO 9 în direcție longitudinală cu ajutorul unor arcuri 3 și plăcuțe de cupru 5. Gazele ionizate provoacă o creștere rapidă a presiunii interne, ceea ce, la rândul său, face ca placa de etanșare să se deschidă și gazele ionizate să iasă prin conductele de aerisire 2. În partea inferioară se regăsește, de asemenea, desicantul 4 care are proprietatea de a absorbi umiditatea. Pe plăcuța de identificare 8 se regăsesc caracteristicile principale ale descărcătorului.

Avantajele principale ale descărcătoarelor cu oxizi metalici sunt următoarele:

- Din punct de vedere constructiv au un gabarit redus și fiabilitate mare prin renunțarea la eclatoarele și la rezistoarele de egalizare;
- Caracteristica de protecție tensiune – timp a descărcătoarelor este stabilă;
- Gradul de protecție este cu aproximativ 20% mai mare decât în cazul tehnologiei constructive clasice [19].

7.2.3. DEFECȚIUNI ALE DESCĂRCĂTORULUI

Principalele cauze de defect ale descărcătoarelor sunt: umezeala din cauza neetanșeității descărcătorului, explozie externă, descărcări parțiale excesive, supratensiune atmosferică, supratensiune temporară, suprasarcină care poate apărea dacă descărcătoarele sunt supuse la supratensiuni generate de comutarea bateriilor de condensatoare, comutarea sau alimentarea liniilor lungi, comutarea liniilor de înaltă tensiune, îmbătrânirea discurilor,

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat
contaminare externă, câmpul electric dezechilibrat, alinierea incorectă a coloanei discului, presiune necorespunzătoare a arcului, stresul mecanic, rigiditate dielectrică insuficientă.

Conform prescripțiilor de funcționare ale descărcătoarelor, rata de defectare a descărcătoarelor este de 0,005% /an.

7.2.4. STADIUL ACTUAL ȘI EVOLUȚII VIITOARE

Cele mai recente evoluții în domeniul descărcătoarelor de supratensiune de înaltă tensiune sunt determinate de nevoia de creștere a siguranței și fiabilității. Preocupările actuale implică următoarele elemente:

- înălțimea excesivă (de exemplu, mai mult de 10 m), ceea ce duce la efecte de dezechilibru axial de tensiune, putere și temperatură, în afară de problemele mecanice;
- nivelul scăzut de protecție la impulsuri de comutare necesar, ceea ce duce la cerințe ridicate de gestionare a energiei;
- numărul mare de rezistoare cu oxizi metalici care necesită probabilități foarte scăzute de defectare a unităților individuale în timpul injectiei de energie;
- distanța de protecție limitată, deoarece o parte din distanța de protecție prevăzută în mod obișnuit este utilizată de fapt de descărcător.

Îmbunătățirile caracteristicilor tehnice ale descărcătoarelor se traduc fizic în reducerea dimensiunilor acestora pentru același nivel de tensiune. Producători precum Meidensha [20] menționează o reducere de volum a descărcătoarelor cu până la 44% datorită acestor schimbări.

7.3. PARATRĂSNETE

Un alt tip de protecție cu rol de preluare a loviturilor directe de trăsnet este paratrăsnetul. O caracteristică a trăsnetului este de a lovi cu o probabilitate mai mare obiectele cele mai înalte, astfel paratrăsnetele verticale metalice se montează într-o stație electrică pe stâlpii de cadre, și au înălțimea între 3 m și 9 m în funcție de nivelul de tensiune al stației.

Un alt model de parastrăsnet denumit *sistem de disipare* previne loviturile directe de trăsnet prin reducerea câmpului electric sub nivelul de captare a trăsnetului, în interiorul zonei protejate. Diversitatea sistemelor de disipare a trăsnetelor și aplicațiile acestora au crescut în diferite domenii cum ar fi: stâlpi, liniile de transport și distribuție a energiei electrice, clădiri industriale și comerciale cu acoperiș plat, rezervoarele de depozitare cu acoperiș conic utilizate în industria petrochimică și industria de depozitare a produselor inflamabile, coșurile de fum/evacuare industrial, structuri industriale și comerciale cu cabluri de ancorare, telecabine.

Paratrăsnetele active sau ionizante sunt un al model de protecție împotriva loviturilor directe ale trăsnetului echipate cu un generator electro-pulsat care emite impulsuri electrice care se află în rezervă atunci când nu este furtună, și se activează când sunt condiții de oraje.

Curentul de trăsnet trece prin exteriorul armăturii externe și prin spațiul liber pentru a fi condus la masă, fără a deteriora circuitele interne.

CAPITOLUL 8

PROTECȚIA LINIILOR ELECTRICE DE TRANSPORT A ENERGIEI ELECTRICE

8.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Furtunile însoțite de descărcări electrice sunt foarte periculoase. Frecvența acestora pe pământ în fiecare zi este de 4000 de furtuni și 9 milioane de fulgere simultan. [21]

Conform unui raport privind realizarea indicatorilor de performanță pentru serviciile de furnizare a energiei electrice [22], în categoria de incidente deosebite raportate în anul 2020 în cadrul Operatorilor de Distribuție (OD) concesionari s-au înregistrat 694 de incidente.

Se constata un procent important de 15.5% al defectelor pe fondul unor condiții meteo deosebite, printre care se numără și supratensiunile de trăsnet.

8.2. METODE DE PROTECȚIE A LINIILOR ELECTRICE AERIE NE ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR

În continuare se prezintă metodele de protecție ale liniilor electrice aeriene împotriva supratensiunilor atmosferice și de comutație.

1) Alegerea corespunzătoare a traseului liniei electrice (indicele keraunic)

Alegerea amplasamentului/traseului este primul factor de analiză atât pentru liniile electrice aeriene, cât și pentru stațiile electrice, parcurile eoliene [23] și fotovoltaice, instalații nucleare și termice. Există un parametru keraunic și o hartă keraunică care stabilesc frecvența anuală a loviturilor de trăsnet. Parametrul keraunic, indicele N_k definește numărul mediu de zile dintr-un an cu descărcări electrice dintr-o zonă.

Descărcările electrice între/intra nori nu ajung pe suprafața pământului și apar de cele mai multe ori în timpul furtunilor fiind de aproximativ 85%. Trăsnetele au contact cu solul sau cu diferite obiecte, reprezintă un procent mai mic, de aproximativ 15% în fenomenele atmosferice cu caracter de furtună, dar impactul acestora este sever.

Densitatea medie a fulgerelor calculată din 2016 până în 2021 pe o scară de evenimente/km²/an clasează județul Gorj pe primul loc, cu cele mai multe evenimente, cu un total de 11.3 evenimente/km²/an.

Toate aceste date colectate rezultate în urma urmăririi activităților orajoase sunt necesare în proiectarea instalațiilor electroenergetice pentru asigurarea celei mai bune protecții la supratensiunile atmosferice.

2) Conductoarele de protecție

Conductoarele de protecție reprezintă o măsură tehnică împotriva supratensiunilor de trăsnet, astfel acestea sunt montate pe coronamentul stâlpilor, deasupra conductoarelor active.

Conductoarele de protecție sau firele de gardă sunt utilizate pentru echiparea LEA și sunt de tip clasic sau FO (fibră optică).

3) Prizele de pământ

Priza de pământ are rolul de a disipa sarcinile electrice rezultate din descărcările electrice fără a provoca supratensiuni periculoase de pas.

Prizele de pământ se realizează astfel încât să asigure continuitatea electrică.

4) Lanțuri de izolatoarele

Lanțurile de izolatoarele sunt elemente componente ale liniilor electrice aeriene, cu ajutorul cărora se realizează izolarea electrică a conductoarelor active față de pământ, precum și fixarea acestora pe stâlpi.

Clemele și armăturile sunt piese care fac legătura între conductoarele liniei, izolatoare și stâlpii liniilor electrice aeriene. Clemele fac contactul direct dintre izolatoare și conductoare, iar armăturile unesc izolatoarele de consolele stâlpilor sau între izolatoare și cleme.

5) Reanclanșarea automată rapidă (RAR)

Liniile electrice aeriene sunt supuse deseori defectelor și sunt scoase de sub tensiune, ca apoi după un interval scurt de timp în care defectul este neutralizat intră în funcțiune dispozitivul RAR care verifică îndeplinirea condițiilor de siguranță și realizează reanclanșarea automată rapidă, iar LEA va funcționa în condiții normale de siguranță.

Un echipament RAR are în componența sa un dispozitiv principal și anume un întrerupător care declanșează atunci când un defect de tipul supratensiunilor atmosferice apare pe linia electrică aeriană.

6) Protecția specială a intersecțiilor de linii

La intersecțiile de linii electrice aeriene, traversări ale liniilor electrice aeriene peste autostrăzi și drumuri cu frecvență ridicată riscul ca supratensiunile atmosferice să afecteze alte linii electrice aeriene este mărit. Se pot avea în vedere următoarele dispoziții de proiectare:

- respectarea distanțelor minime impuse între circuite;
- alegerea unor elemente de rețea cu rezistență mecanică ridicată cum ar fi: stâlpi supraînălțați, lanțuri de izolatoare duble, reducerea deschiderilor între stâlpi, reducerea unghiului de traversare, reducerea unghiului de protecție.

7) Descărcătoare de supratensiune pe liniile electrice aeriene

Instalarea descărcătoarelor pe liniile electrice aeriene asigură protecția rețelei electrice împotriva supratensiunilor cauzate de trăsnet și supratensiunilor de comutație, astfel crește fiabilitatea întregului sistem.

Conform unui studiu ABB [18], în Fig.8.1 se arată efectul descărcătoarelor asupra evoluției supratensiunii pe o linie electrică de 550 kV, cu o lungime de 100 km care a fost reconectată în urma unei avarii. Astfel, pe grafic cu linia continuă este prezentată valoarea unitară a supratensiunii pe toată lungimea LEA fără descărcătoare, cu linie discontinuă a fost reprezentată protecția LEA la supratensiune cu descărcătoare montate la capetele liniei, iar cu linie punctată, protecția cu descărcătoare la capetele liniei și suplimentată cu două intermediare pe linie.

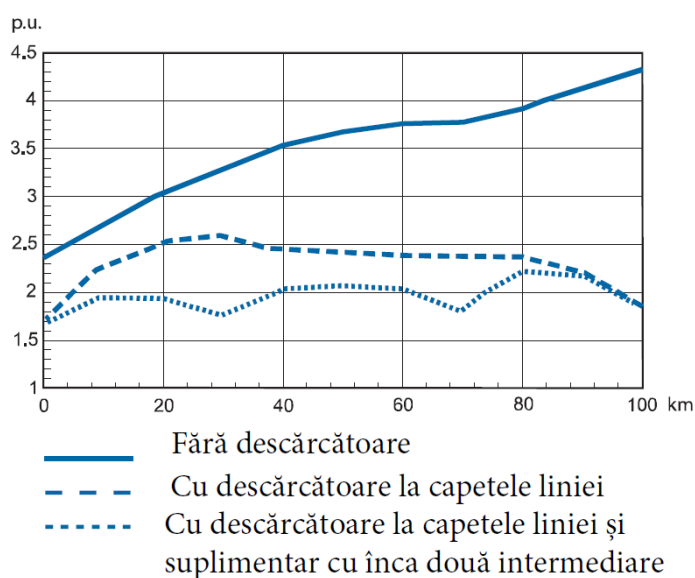


Fig.8.1. Reprezentare grafică a evoluției supratensiunii pe LEA 550 kV, cu și fără descărcătoare de linie instalate [18]

În concluzie cu ajutorul reprezentării grafice din Fig. 8.1 se observă îmbunătățirea valorii supratensiunii folosind ca modalitate de protecție descărcătoarele de linie.

CAPITOLUL 9

CONCLUZII ȘI REZULTATE ORIGINALE

9.1. CONCLUZII GENERALE

În lucrarea de față au fost analizate supratensiunile de trăsnet în general, dar și consecințele acestora cu accent pe analiza mai multor posibilități: propagarea supratensiunilor de-a lungul echipamentelor electrice, în special a transformatoarelor electrice, dar și a liniilor aeriene de transport a energiei electrice. În același timp, au fost analizate și mijloacele de protecție împotriva acestor supratensiuni dar și echipamentele folosite în acest scop. Un interes deosebit din punct de vedere teoretic și practic îl prezintă comportarea echipamentelor electrice de putere la supratensiunile de impuls, supratensiuni aplicate la borna de intrare a înfășurării de înaltă tensiune pentru transformatoarele electrice, iar pentru liniile de transport a energiei electrice interesul se materializează prin îmbunătățirea mijloacelor de protecție. Studiul proceselor tranzitorii la impuls de tensiune conduce la alegerea corectă a izolației înfășurărilor transformatorului, respectiv a izolației liniei electrice atât din punct de vedere funcțional cât și din punct de vedere economic.

Capitolul 1 al lucrării analizează o clasificare coerentă a supratensiunilor, arătându-se că în literatura tehnică de specialitate se propun mai multe criterii cum ar fi: forma și durata acestora (supratensiuni temporare, supratensiuni tranzitorii), mărimea frontului de undă al supratensiunii (cu front lent - (20 ... 5000) μ s, cu front rapid - (0,1 ... 20) μ s, cu front foarte rapid – sub 0,1 μ s). Se trec în revistă efectele negative ale supratensiunilor (fulgere și trăsnete) și cum acționează acestea asupra persoanelor, clădirilor sau obiectelor înalte din zonă (stâlpi ai rețelelor de înaltă tensiune, arbori) dându-se și câteva exemple din domeniul rafinărilor de petrol, al depozitelor de substanțe inflamabile și al avioanelor aflate în zona supratensiunilor. Se analizează din punct de vedere istoric modul de tratare al problemelor de supratensiuni atmosferice care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune a transformatoarelor electrice de putere pe plan mondial. În finalul capitolului 1 se tratează problema calității energiei electrice în fiecare fază de producere, transport, distribuție și furnizare. Se aduc mulțumiri celor care au ajutat autoarea, pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat.

În capitolul 2 al lucrării se descriu principalele scheme electrice ale transformatoarelor supuse la supratensiuni de trăsnet, arătându-se ca aceste scheme sunt total diferite de schemele echivalente folosite în regimurile normale de funcționare ale acestor transformatoare. Frecvența frontului supratensiunii de trăsnet este foarte mare și din această cauză, în schema echivalentă apar și capacități. Pe de altă parte, pentru o bună precizie, trebuie să includem în schema echivalentă și rezistențe și inductivități. Se analizează atât schemele echivalente la supratensiuni în care apar parametrii lineici, cât și schemele echivalente cu parametri concentrați.

Capitolul 3 prezintă modelarea impulsului de trăsnet pentru testarea înfășurărilor transformatorului. La început se analizează determinarea parametrilor unui generator de impuls care să genereze o undă de supratensiune de formă cât mai apropiată de unda prezentată în standarde. Pătrunderea supratensiunilor la bornele de intrare ale înfășurărilor transformatoarelor și propagarea acestora de-a lungul acestor înfășurări este însoțită de solicitări importante ale izolației dintre spirele înfășurărilor, ale izolației dintre înfășurări și masă și ale izolației dintre înfășurări. Se definește forma de variație în timp a undei de trăsnet, apoi se modelează în LTspice unda de supratensiune astfel încât aceasta să fie cât mai apropiată de forma standard, existând o bună concordanță între forma de undă standard și forma de undă modelată.

În capitolul 4 se analizează simularea propagării impulsului de trăsnet în înfășurarea de înaltă tensiune a unui transformator electric monofazat. Se arată că transformatoarele nu sunt deteriorate din cauza supratensiunilor tranzitorii sau de comutație, ci din cauza supratensiunilor de trăsnet. Se analizează metodele prezentate în literatura tehnică pentru determinarea parametrilor transformatoarelor electrice supuse supratensiunilor atmosferice, arătându-se că cele mai folosite sunt metodele bazate pe simularea numerică a circuitelor electrice, deoarece la frecvențele foarte mari ale frontului undei de trăsnet, metodele experimentale sau metodele analitice nu se pot aplica cu ușurință. Utilizarea software-ului LTspice pentru analiza regimului tranzitoriu oferă un avantaj major în ceea ce privește timpul de calcul, iar modificarea diferitelor valori ale parametrilor pentru a cuantifica ponderea fiecărui parametru în rezultatul final se face relativ ușor.

Capitolul 5 tratează influența variației parametrilor schemei echivalente a transformatorului asupra propagării undelor de supratensiune de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune. Impulsurile de trăsnet pătrund în înfășurările transformatorului și au ca urmare un proces tranzitoriu complex. Se arată că pătrunderea supratensiunilor în interiorul transformatorului poate distruge izolația dintre înfășurările acestuia, sau dintre înfășurări și

Protecția la supratensiuni a transformatoarelor electrice de putere conectate la LE de transport a energiei - rezumat miezul feromagnetic, respectiv dintre înfășurări și cuva metalică a acestuia. Pornind de la valorile de referință R_{OL} , R_{OT} , L_{OL} , C_{OL} și C_{OT} ale parametrilor schemei echivalente se studiază, pe rând, prin modelarea în LTspice, influența variației fiecăruia dintre cei cinci parametrii din schema echivalentă în ipoteza variației valorilor unui parametru, ceilalți 4 rămânând constanți la valorile lor de referință. În acest fel, se studiază, pe rând, influența fiecăruia dintre cei 5 parametrii asupra valorilor maxime ale supratensiunilor care se produc de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului. În finalul capitolului se trag câteva concluzii: cea mai solicitată parte a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului este ultima secțiune a înfășurării; dintre cei cinci parametrii care apar în schema echivalentă, cea mai mare importanță o au valorile capacității transversale C_T și a capacității longitudinale C_L ; o importanță mai redusă în schema echivalentă o au parametrii R_L , L_L și R_T din schema echivalentă.

În **capitolul 6** se analizează modul în care inelul de gardă și ecranul de protecție servesc la diminuarea undelor de supratensiune de trăsnet. Inelul de gardă prezintă avantajul că diminuează șocul inițial datorat frontului undei de supratensiune atmosferică în sensul că unda de supratensiune se repartizează mai uniform de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune și ajută la protecția dielectrică a spirelor de intrare ale acestei înfășurări. În cazul inelului de gardă se analizează 4 ipoteze de calcul și se trasează, pentru fiecare ipoteză, curbele de variație în timp ale supratensiunilor propagate de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune. O altă problemă tratată în capitolul 6 se referă la determinarea capacității ecranului de protecție la supratensiuni pentru transformatorul electric. Pentru determinarea acestei capacități se folosește mediul de calcul COMSOL, utilizându-se două metode de rafinare ale rețelei de calcul și anume o rețea grosieră de rafinare, respectiv o rețea fină de rafinare. Se arată că diferențele în cele două cazuri nu sunt semnificative, cu concluzia că mai precise sunt rezultatele obținute cu rețeaua mai fină de discretizare.

Capitolul 7 al lucrării se ocupă de protecția transformatoarelor electrice împotriva supratensiunilor de trăsnet folosind descărcătoarele. Echipamentele din stațiile electrice de transformare sunt protejate împotriva loviturilor directe de trăsnet cu ajutorul descărcătoarelor și al paratrăsnetelor. Nivelul de protecție asigurat de descărcătoarele electrice depinde de distanța față de echipamentul care se dorește protejat, amplasarea acestuia în amonte sau în aval, performanța descărcătorului, configurația stației și caracteristicile liniei de înaltă tensiune. Paratrăsnetele au proprietatea că preiau loviturile directe de trăsnet fiind utile la protecția obiectelor mai înalte față de sol.

În **capitolul 8** se analizează modul de protecție al liniilor de transport a energiei electrice la apariția unor supratensiuni. Se arată că aceste supratensiuni pot fi cauzate direct de lovituri de trăsnet sau de fulger, sau pot apare ca urmare a unor supratensiuni de comutație sau a unor supratensiuni induse. Măsurile de protecție împotriva supratensiunilor atmosferice și de comutație a liniilor electrice aeriene reprezintă metode de siguranță în exploatare cu impact asupra omului și al echipamentelor ce se pot deteriora. Se prezintă și câteva metode de protecție ale liniilor electrice aeriene împotriva supratensiunilor atmosferice și de comutație cum ar fi: alegerea corespunzătoare a traseului liniei electrice, prevederea liniei cu conductoarele de protecție, prize de pământ, descărcătoare de linie și activarea reanclanșării automate rapide (RAR) atunci când este cazul.

9.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Lucrarea tratează o temă de interes în continuă expansiune, care se ocupă de protecția împotriva supratensiunilor de trăsnet a echipamentelor electrice și a liniilor electrice la care aceste echipamente sunt conectate.

Principalele contribuții originale ale tezei de doctorat sunt următoarele:

- Prezentarea într-un mod compact și bine documentat a clasificării supratensiunilor, a efectelor negative produse de acestea și a criteriilor de calitate privind energia electrică produsă în centralele electrice;
- Realizarea unei sinteze privind schemele transformatoarelor electrice la supratensiuni atmosferice, atât pentru parametrii lineici cât și pentru parametrii concentrați;
- Modelarea impulsului de trăsnet prin metode numerice astfel încât forma de variație în timp a acestuia să fie cât mai apropiată de forma standard, cu încadrarea acesteia în gama permisă de erori;
- Studiul influenței variației parametrilor din schema echivalentă a transformatorului la supratensiuni, asupra valorilor maxime ale supratensiunilor care se propagă de-a lungul înfășurării de înaltă tensiune în scopul reducerii acestor maxime;
- Analiza influenței inelului de gardă asupra valorilor maxime ale supratensiunilor în sensul scăderii acestor maxime, folosind metode numerice de modelare în mediul de calcul LTspice;
- Determinarea capacității ecranului de protecție la supratensiuni al transformatoarelor electrice prin folosirea metodelor numerice de element finit, utilizând două metode de calcul numeric: calculând sarcina electrică de pe armăturile condensatorului cu care se

echivalează ecranul de protecție, respectiv calculând energia electrică înmagazinată în condensatorul echivalent în software-ul COMSOL;

- Analiza bine documentată a folosirii descărcătoarelor electrice la protecția liniilor electrice împotriva supratensiunilor de trăsnet, și descrierea detaliată a celor mai folosite tipuri de descărcătoare;
- Studiul protecției liniilor electrice de transport a energiei electrice la apariția supratensiunilor și a măsurilor de protecție utilizate în prezent în industria energetică.

9.3 PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

- Determinarea capacității inelului de gardă pentru protecția la supratensiuni a transformatorului electric prin metode numerice de element finit, metode analoage celor care au fost utilizate la calculul capacității ecranului de protecție;
- Analiza influenței ecranului de protecție asupra valorilor maxime ale supratensiunilor în sensul scăderii acestor maxime, folosind metode numerice de modelare în mediul de calcul LTspice;
- Redactarea unor capitole speciale și publicarea acestora sub formă de cărți și lucrări științifice referitoare la protecția împotriva supratensiunilor de trăsnet a echipamentelor electrice de putere și a liniilor electrice de transport a energiei electrice;
- Obținerea de informații practice privind sistemele de protecție împotriva supratensiunilor a echipamentelor electrice și colaborarea cu diverse societăți comerciale din acest domeniu în vederea realizării de proiecte specifice.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] *Ghid de Aplicare - Calitatea Energiei Electrice*, SIER / European Copper Institute, 2001.
- [2] Ciumbulea Gloria, Deleanu S., Iordache M., Curteanu S., Galan N., Moscu A., *Computation Overvoltage Distibution Across the High Voltage Winding of the Electric Power Transformer*, The 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND POWER SYSTEMS, Oct. 2015, Chișinău, Rep. Moldova.
- [3] Deaconu, I.D., Chirilă, A.I., Năvrăpescu, V., **Răchițeanu Alina**, Viișoreanu, A.M. Ghiță, C., Săracin, Gabriela, *Lighting impulse voltage modeling for transformer windings testing*, The 11th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING – ATEE, 2019, Bucharest, Romania, DOI: 10.1109/ATEE.2019.8724942 , Conferință ISI.

- [4] IEC 60060 – 1 « *High – voltage test techniques – Part 1 – General definitions and test requirements* », International Electrotechnical Commission, Sept. 2010, Edition 3.0.
- [5] IEC 60060 – 2 « *High – voltage test techniques – Part 2 – Measuring systems*», International Electrotechnical Commission, nov. 2010, Edition 3.0.
- [6] *Impulse Voltage Generator Test System*, [Online] http://www.bhthv.com/products/Impulse_voltage_generator_test_system.html, [Accesat ianuarie 2019]
- [7] Swaffield D.J., Lewin P.L., Dao N.L., Hallstrom J.K., *Lightning impulse wave-shapes: defining the true origin and it's impact on parameter evaluation*, <https://www.researchgate.net/publication/39995505>
- [8] *Analog Devices, LTspice, Simulation Software*,, 2019 [Online], "https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html.
- [9] Erwin M. O., *Versuche über die Prüfung von Isolatoren mit Spannungsstößen*, Elektrotechnische Zeitschrift, 25, pp. 652–654, 1924.
- [10] Deaconu I.D., Chirilă A.I., Năvrărescu V., Ghiță C., **Răchițeanu Alina**, Vișoreanu A.M., *The Influence of Parameters of a Power Transformer Winding Equivalent Distributed Circuit Model on Atmospheric Overvoltage Wave Internal Propagation along the Windings*, EPE 2020 Iasi – The 11th International Conference and exposition on electrical and power engineering, 2020, DOI: 10.1109/EPE50722.2020.9305584, Conferință ISI.
- [11] Vișoreanu A.M, **Răchițeanu Alina**, *Reliability and maintenance of wind power systems*, EMERG, Volume VI, Issue 3/2020, ISSN 2668-7003, ISSN-L 2457-5011, Bucharest, Romania, DOI: 10.337410/EMERG, The EMERG publication is BDI indexed in EBSCO and Copernicus International.
- [12] **Răchițeanu Alina**, Vișoreanu A. M., *Propagarea undelor de supratensiune în transformatoare prevăzute cu inel de gardă*, Simpozionul de Masini Electrice - SME '21, Ediția a XVII-a, Bucuresti, 2021, ISSN / ISSN-L: 1843-5912, Journal.iem.pub.ro/apme/, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2021.1.5>
- [13] Bălă C., *Mașini electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979, 632 pg.
- [14] Deaconu I.D., Chirilă A.I., Ghiță C., Năvrărescu V., **Răchițeanu Alina**, Vișoreanu A.M., Popescu S.V., Gheorghiu Corina - Ioana, Sărăcin Cristina - Gabriela ,*Determination of the Electric Capacitance of the Overvoltage Protective Shield of an Electric Transformer*, The 12th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING – ATEE, 2021, Bucharest, Romania, DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425086, Conferință ISI.
- [15] COMSOL Multiphysics - Understand, Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes [Online] <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>. [Accesat ianuarie 2021]
- [16] **Răchițeanu Alina**, Vișoreanu A.M., *Overvoltage protection of transformers and high voltage networks by surge arrester*, EMERG, Volume VI, Issue 2/2020, ISSN 2668-7003, ISSN-L 2457-5011, Bucharest, Romania. DOI: 10.337410/EMERG, The EMERG publication is BDI indexed in EBSCO and Copernicus International.

- [17] Adam M., Baraboi A., *Echipamente electrice II*, Editura Gh.Asachi, 2002.
- [18] ABB guide, , *Hight Voltage Surge Arresters Buyer's Guide*, 2009
- [19] **Răchițeanu Alina**, Viișoreanu A.M., *Surge arrester for protection against overvoltage of high voltage networks*, EMERG, Volume VI, Issue 3/2020, ISSN 2668-7003, ISSN-L 2457-5011, Bucharest, Romania, DOI: 10.337410/EMERG, The EMERG publication is BDI indexed in EBSCO and Copernicus International.
- [20] Meidensha Corporation, *Stage7: Protecting the Power Grid from the threat of Lightning Strikes*, [Online] https://www.meidensha.com/knowledge/know_10/hitotech/stage7/, [Accesat: aprilie 2022]
- [21] *Consequences of overvoltages*, Aplicaciones Tecnologicas Lighting & Earthing, [Online] <https://at3w.com/en/> , [Accesat noiembrie 2021]
- [22] *Raport privind realizarea indicatorilor de performanță pentru serviciile de transport, de sistem și de distribuție a energiei electrice și starea tehnică a rețelelor electrice de transport și de distribuție (2020)* – ANRE, [Online] <https://www.anre.ro/ro/energie-electrica/rapoarte/rapoarte-indicatori-performanta> , [Accesat ianuarie 2022]
- [23] Viișoreanu A.M., **Răchițeanu Alina**, *Evaluation of wind potential from a location and layout of the turbines*, Simpozionul de Masini Electrice, Ediția a XVII-a, Bucuresti, 2021, ISSN/ISSN-L:1843-5912, Journal.iem.pub.ro/apme/, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2021.1.10>