

# Fenomene de supratensiune în transformator

Eugeniu CATLABUGA  
Universitatea Tehnică a Moldovei

**Abstract.** În lucrare se propun ecuațiile cu derivate parțiale și în formă complexă pentru calcularea repartiției tensiunii de-a lungul înfășurării la intrarea unei de tensiune înaltă în transformator. Deasemenea se prezintă curbele de repartiție a tensiunii calculate cu ecuațiile propuse și cu ecuațiile prezentate în literatura de specialitate. Prin compararea rezultatelor se arată care este avantajul ecuațiilor propuse.

**Cuvinte cheie:** constanta de propagare, ecuație în formă complexă, schemă echivalentă.

## I. ÎNTRODUCERE

Într-o rețea electrică de tensiune apar diferite perturbații care pot produce supratensiuni în transformator (Tr). Cauzele unor astfel de perturbații sunt cunoscute, de exemplu, fenomenele tranzitorii la conectare, scurtcircuitele și punerile la pământ directe sau prin arc, descărcările atmosferice.

În continuare lucrarea se referă la supratensiunea produsă în circuitul înfășurării Tr ca urmare a undelor călătoare lungi (sau scurte) cu un front abrupt al tensiunii.

## II. REPARTIȚIA TENSIUNII ÎN CIRCUITUL ÎNFĂȘURĂRII.

În primul moment după intrarea unei de tensiune, Tr se comportă ca un lanț de condensatoare [1].

Pentru a ne forma o imagine despre repartiția tensiunii, se consideră că înfășurarea primară este constituită din inele de sârmă suprapuse. Fiecare inel are față de toate celelalte inele și față de pământ o capacitate determinată.

În cele ce urmează se prezintă schema echivalentă Fig.1 pentru circuitul capacitativ al înfășurării primare. În ea sa notat capacitatea longitudinală a elementului cu lungimea  $dx$  cu  $C_d dx$ , capacitatea transversală respectiv cu  $C_q dx$ . În același moment, la distanța  $x+dx$ , tensiunea și curentul din înfășurare vor fi  $u + \partial u / \partial x \times dx$ , respectiv  $i + \partial i / \partial x \times dx$ . Din schema echivalentă pentru nodul a după teorema întâi a lui Kirchhoff rezultă ecuația:

$$i = i + \partial i / \partial x \times dx + C_q dx \times \partial u / \partial t$$

După simplificări ecuația se reduce la forma:

$$-\partial i / \partial x = C_q \times \partial u / \partial t \quad (1)$$

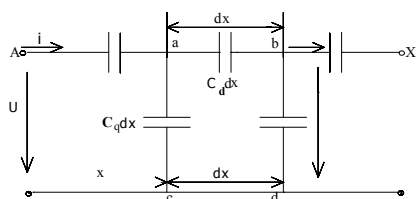


Fig. 1 Schema echivalentă a înfășurării primare.

Teorema a 2-a aplicată ochiului **abcd** conduce la ecuația:

$$u = u + \partial u / \partial x \times dx + 1 / C_d \times \partial i / \partial t \times dx$$

După simplificări se obține ecuația:

$$-\partial u / \partial x = 1 / C_d \times \partial i / \partial t \quad (2)$$

Ecuațiile (1) și (2) cu derivate parțiale reprezintă ecuațiile înfășurării primare ale transformatorului de ordinul întâi.

Folosind reprezentările în complex, ecuațiile (1) și (2) se reprezintă în complex prin următorul sistem de ecuații diferențiale ordinare în variabila  $x$ :

$$-d \underline{I} / dx = j \omega C_q \times \underline{U}; \quad (3)$$

$$-d \underline{U} / dx = -j \times 1 / \omega C_d \times \underline{I}$$

Prin derivare se poate elimina succesiv oricare dintre funcțiile necunoscute  $\underline{I}$  sau  $\underline{U}$  și se obțin următoarele ecuații:

$$d^2 \underline{I} / dx^2 = (j \omega C_q) \times (1 / \omega C_d) \times \underline{I}; \quad (4)$$

$$d^2 \underline{U} / dx^2 = (j / \omega \times C_d) \times (j \omega C_q) \times \underline{U},$$

care reprezintă forma complexă a ecuațiilor înfășurării de ordinul al doilea.

Dacă se notează:

$Y_q = j \omega C_q$  - admitanța dintre spiră și pământ;

$Z_d = -j / \omega C_d$  - impedanța pe porțiunea  $dx$  a înfășurării, ecuațiile (4) se aduc la forma:

$$d^2 \underline{I} / dx^2 = Y_q Z_d \underline{I}; \quad (5)$$

$$d^2 \underline{U} / dx^2 = Z_d Y_q \underline{U}.$$

Dacă în (5) se notează  $g = \sqrt{z_d Y_q} = \sqrt{C_q / C_d}$ , constanta de propagare a unei de tensiune pe lungimea înfășurării, ecuațiile (5) se pot scrie simplificat:

$$d^2 \underline{I} / dx^2 = g^2 \underline{I}; \quad d^2 \underline{U} / dx^2 = g^2 \underline{U}. \quad (6)$$

La rezolvarea acestei ecuații se ține cont ca  $\underline{U}$  și  $\underline{I}$  sunt legate prin ecuațiile de ordin întâi (2), deoarece se rezolvă numai una din ecuații, de exemplu aceea a tensiunii, curentul determinându-se apoi din (3). Soluția generală a tensiunii din ecuația (6) :

$$U(x) = \underline{A}e^{-gx} + \underline{B}e^{gx}, \quad (7)$$

În care  $\underline{A}$  și  $\underline{B}$  sunt constante arbitrare complexe.

Curentul se obține înlocuind expresia  $\underline{U}(x)$  din (7) în a doua ecuație din (3):

$$\underline{I}(x) = -\frac{1}{j\omega C_d} \times \frac{d\underline{U}}{dx} = \frac{g}{Z_d} [\underline{A}e^{-gx} - \underline{B}e^{gx}] \quad (8)$$

Se notează impedanța caracteristică complexă a înfășurării:

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_d}{\sqrt{\underline{Z}_d Y_q}} = e^{j90} \times \frac{1}{\omega \sqrt{C_d C_q}} \quad (9)$$

Prin urmare expresia curentului complex pentru înfășurare:

$$\underline{I} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_c} e^{-gx} - \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_c} e^{gx} \quad (10)$$

Constantele  $\underline{A}$  și  $\underline{B}$  a ecuațiilor (7) și (10) se determină prin condițiile de la capetele înfășurării primare ale Tr. Dacă capătul X al înfășurării Tr la intrarea undei de tensiune va fi legat cu pământul, adică  $\underline{U}(x) = 0$ , atunci în corespundere cu (7) și (10):

$$\underline{U}_1 = \underline{U}(0) = \underline{A} + \underline{B}; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}(0) = \frac{\underline{A} - \underline{B}}{\underline{Z}_c} \quad (11)$$

Din sistemul (11) rezultă:

$$\underline{A} = 1/2(\underline{U}_1 + \underline{Z}_c \underline{I}_1); \quad \underline{B} = 1/2(\underline{U}_1 - \underline{Z}_c \underline{I}_1). \quad (12)$$

Înlocuind valorile pentru  $\underline{A}$  și  $\underline{B}$  din (12) în ecuațiile (7) și (10) se obțin ecuațiile:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 Chgx - \underline{Z}_c \underline{I}_1 Shgx; \quad (13)$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_1 Chgx - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_c} Shgx,$$

care reprezintă forma complexă a ecuațiilor înfășurării Tr, în funcție de mărimile de intrare ale undei de tensiune.

La intrarea undei în transformator, în primul moment, curentul nu va parcurge spirele înfășurării, deci  $\underline{I}(x) = 0$ . Pe baza acestei condiții, din ecuația a doua a sistemului (13), rezultă:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_c} \times \frac{Shgx}{Chgx} \quad (14)$$

Înlocuind expresia (14) în prima ecuație a sistemului (13), rezultă ecuația:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 (Ch^2 gx - Sh^2 gx) / Chgx \quad (15)$$

Curentul de conducție  $\underline{I}(x)$  se determină prin condiția  $\underline{U}(x) = 0$ , atunci în corespundere cu ecuațiile (13), rezultă:

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_1 (Ch^2 gx - Sh^2 gx) / Chgx \quad (16)$$

Ecuațiile elaborate (15) și (16) reprezintă forma complexă a mărimilor după intrarea undei de tensiune înaltă în Tr, care permit cu exactitate mai mare calcularea repartiției inițiale a tensiunii și a curentului în circuitul capacitativ a înfășurării față de ecuațiile (2-242, 2-243) prezentate în [2].

În Fig.2 se prezintă curbele repartiției inițiale ale tensiunilor, calculate cu ecuațiile (15), (2-242), (2-243).

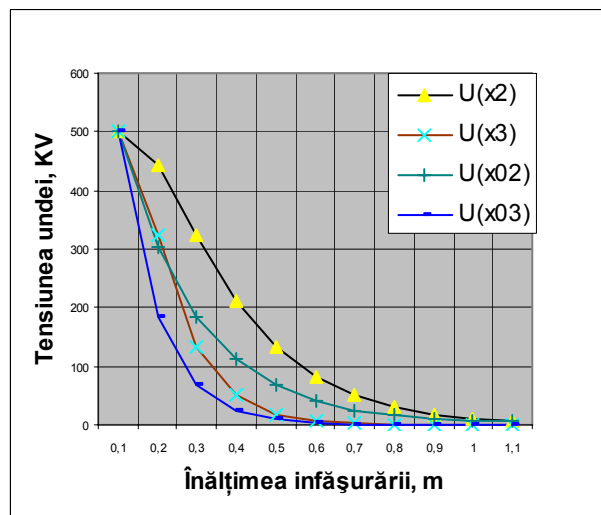


Fig. 2 Repartiția tensiunilor undei pe înfășurare pentru constanta de propagare  $g_{02} = g_2 = 5$  și  $g_{03} = g_3 = 10$ .

S-a notat  $U(x2)$ ,  $U(x3)$  – tensiunile de undă calculate cu ecuația (15) și  $U(x02)$ ,  $U(x03)$ , cu ecuațiile prezentate în [2]. Se observă:

Curba  $U(x2)$  are o pantă mai mică. Tensiunea de la 500 KV până la 100 KV se repartizează pe lungimea 0,57 m a înfășurării, pe când, tensiunea  $U(x02)$  pentru aceeași valoare a factorului  $g=5$  are o pantă abruptă și se distribuie pe o lungime mai mică a înfășurării egală cu 0,43 m.

Curba  $U(x3)$  deasemenea are o pantă mai mică, iar tensiunea undei descrește de la 500 KV până la 100 KV pe lungimea înfășurării egală cu 0,34 m, pe când, curba  $U(x03)$ , calculată cu ecuația din [2] pentru aceeași valoare

a factorului  $g=10$ , are o pantă mai abruptă și se distribuie pe o lungime mai mică a înfășurării, egală cu  $x=0,27$  m.

### III. CONCLUZII

1. Ecuația (15) asigură o precizie mai înaltă la calcularea repartiției inițiale a tensiunii unde de-a lungul înfășurării, ceea ce este foarte important la proiectarea izolației pentru rezistarea înfășurărilor la supratensiunile produse de undele atmosferice sau de altă natură.

2. Ecuația (16) deasemenea asigură o precizie mai înaltă la calcularea curentului de conducție în cazul când artificial se mărește capacitatea spirelor de intrare față de pământ [1] pentru a evita o acumulare a unde călătoare în momentul sosirii ei în înfășurare.

### BIBLIOGRAFIE

- [1] R. Richter. Mașini electrice, vol.III. Editura tehnică. București, 1960.
- [2] Г. Н. Петров. Электрические машины. Часть 1. Введение. Трансформаторы. Энергия, 1974.