

AMELIORAREA REGIMULUI TRANZITORIU DE PUNERE SUB TENSIUNE A UNUI TRANSFORMATOR ÎN GOL, UTILIZÂND COMUTAREA CONTROLATĂ

Florin Constantin BĂICEANU^{1*}, Andreea-Mădălina CIOATĂ¹,
Teodora REVENCO¹

¹Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi”, Facultatea de Inginerie Electrică, Energetică și Informatică Aplicată,
Departamentul de Energetică, Iași, România

*Autorul corespondent: Băiceanu Florin-Constantin, florin-constantin.baiceanu@academic.tuiasi.ro

Rezumat. Punerea sub tensiune a transformatoarelor de putere vine cu apariția unui curent de magnetizare care poate conduce la funcționarea eronată a protecției diferențiale. În această lucrare a fost determinat punctul optim de comutare a unui transformator industrial de putere 40 MVA cu conexiunile YD₊₃₀, astfel încât curentul de magnetizare absorbit de înfășurarea primară a transformatorului să aibă valori minime. Simulările au fost realizate cu ajutorul softului EMTP.

Cuvinte cheie: comutare controlată, regim tranzitoriu, punct optim, curent de magnetizare, flux, conexiune YD₊₃₀.

Introducere

La conectarea transformatorului în gol la o sursă de alimentare apare curentul de șoc rezultat în urma fenomenului de magnetizare al transformatorului. Totodată, în procesul de comutare a transformatoarelor apare același tip de curent, care poate apărea și în urma unor defecte externe. Acest fenomen se întâlnește de obicei, în circuitele principale, dar poate apărea și în circuite auxiliare, sisteme de protecție, calculatoare, procesoare, telecomunicații [1].

Acest curent de magnetizare depinde practic de doi factori: punctul de pe forma de undă de tensiune, la care întrerupătoarele sunt conectate, și fluxurile reziduale prezente în miezul transformatorului.

Importanța analizării comutării transformatoarelor este dată de costul ridicat al acestor echipamente, defectarea lor fiind o pierdere semnificativă într-o instalație.

Ca o consecință directă, acești curenți, trifazați de magnetizare, pot provoca o varietate de efecte nedorite în sistem : funcționarea necorespunzătoare a releelor și a siguranțelor de protecție, deteriorarea mecanică a înfășurărilor care scad ciclul de viață a transformatorului, deteriorarea izolației, căderi de tensiune care provoacă degradarea calității energiei [2].

De cele mai multe ori, reducerea curenților de magnetizare a transformatoarelor se realizează folosind pre-înserierea rezistențelor în circuitele întrerupătoarelor, astfel se reduce fluxul magnetic în miezul transformatorului.

Un alt mod de a reduce, valoarea ridicată a curenților de magnetizare, este de a aplica strategia de comutare controlată a transformatoarelor, manevrând întrerupătoarele la momentul în care fluxul rezidual de magnetizare a miezului transformatorului coincide cu fluxul care va fi produs de tensiunea aplicată la înfășurări [3].

Există mai multe metode de comutare, însă cele mai folosite sunt: *metoda punctului critic*, pe care o vom aborda în această lucrare, în urma căreia sunt reduse pierderile prin comutarea frecventă a transformatorului, și *metoda secțiunii critice*, care reduce operația de comutare [4].

I. Regimul tranzitoriu de conectare în gol a transformatorului la rețeaua de alimentare

Înfășurarea primară este caracterizată prin inductanța totală:

$$L_{11} = L_{s1} + L_{h1} \quad (1)$$

egală cu suma dintre inductanța principală și cea de scăpări. Ecuația primarului poate fi scrisă în mărimi instantanee:

$$u_1 = R_1 i_{10} + \frac{d(L_{11} i_{10})}{dt} \quad (2)$$

sau, în raport cu fluxul fascicular, global:

$$u_1 = \frac{R_1}{L_{11}} W_1 \varphi_1 + W_1 \frac{d\varphi_1}{dt} \quad (3)$$

Se consideră tensiunea aplicată de forma:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \gamma) \quad (4)$$

iar ecuația (3) devine:

$$\frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{R_1}{L_{11}} \varphi_1 = \frac{U_{1m}}{W_1} \sin(\omega t + \gamma) \quad (5)$$

Soluția acestei ecuații se poate aproxima ca sumă între soluția de *regim liber*, φ_1 și soluția de *regim forțat*, φ_p (când se consideră $R_1 \ll L_{11}$), adică:

$$\varphi_1 = \varphi_l + \varphi_p; \quad \frac{d\varphi_l}{dt} + \frac{R_1}{L_{11}} \varphi_l = 0; \quad \frac{d\varphi_p}{dt} = \frac{U_{1m}}{W_1} \sin(\omega t + \gamma) \quad (6)$$

Soluțiile obținute în cele două regimuri sunt:

$$\varphi_1 = C e^{-t/T_0}; \quad \varphi_1 = -\phi_{1m} \cos(\omega t + \gamma) \quad (7)$$

unde C este o constantă de integrare, care trebuie calculată, iar T_0 este constanta de timp la mersul în gol și ϕ_{1m} este fluxul maxim al transformatorului.

Condițiile inițiale pentru conectarea în gol a transformatorului sunt:

1. Se presupune că la momentul inițial $t=0$, transformatorul utilizat prima dată, nu posedă flux magnetic remanent, iar tensiunea la $t=0$ este:

$$u_{1(t=0)} = U_{1m} \sin \gamma \quad (8)$$

Soluția ecuației (5) conform (6) și (7), de forma:

$$\varphi_1 = C e^{-t/T_0} - \phi_{1m} \cos(\omega t + \gamma) \quad (9)$$

devine, la momentul $t=0$:

$$C = \phi_{1m} \cos \gamma \quad (10)$$

Se introduce constanta C în (9) și se obține:

$$\varphi_1 = \phi_{1m} \cos \gamma e^{-t/T_0} - \phi_{1m} \cos(\omega t + \gamma) \quad (11)$$

Dacă: $\gamma = \frac{\pi}{2}$, $u_{1(t=0)} = U_{1m}$ (12), rezultă soluția: $\varphi_1 = \phi_{1m} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$ (13)

Pentru alte valori ale lui γ apare și o componentă aperiodică în expresia fluxului (11), care nu poate conduce la o valoare globală a fluxului mai mare de dublul lui ϕ_{1m} .

2. Se poate obține situația mai apropiată de practică, în ceea ce privește fluxul global, dacă se consideră un transformator în care există un flux remanent, al cărui semn și mărime depinde de starea anterioară de magnetizare a materialului. În această situație, soluția (9), la momentul $t=0$, conduce la:

$$C = \phi_{1m} \cos \gamma + \phi_r \quad (14)$$

Soluția (11) devine:

$$\varphi_1 = \phi_{1m} \cos \gamma e^{-t/T_0} + \phi_r e^{-t/T_0} - \phi_{1m} \cos(\omega t + \gamma) \quad (15)$$

La valorile mari ale fluxului corespund vârfuri importante ale curentului, a cărui amplitudine scade în timp, stabilizându-se la valoarea amplitudinii curentului de mers în gol - de regim permanent [5].

II. Studiul de caz

Pentru determinarea punctului optim de comutare am realizat simulări în programul EMTP. Am considerat $t_0=100$ ms și am efectuat opt afișări ale curentului de intrare pentru diferite valori ale timpului.

S-au considerat următoarele opt puncte: $\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}, 2\pi$.

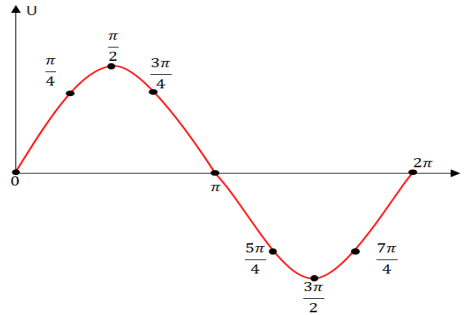


Figura 1. Punctele pe forma de undă unde s-au realizat simulările

Dintre punctele enumerate mai sus vom analiza doar trei cazuri, $\frac{\pi}{2}$, $\frac{3\pi}{4}$, π , fiind cele sugestive situații.

Primul caz, $\frac{\pi}{2}$, reprezintă punctul de maximă tensiune.

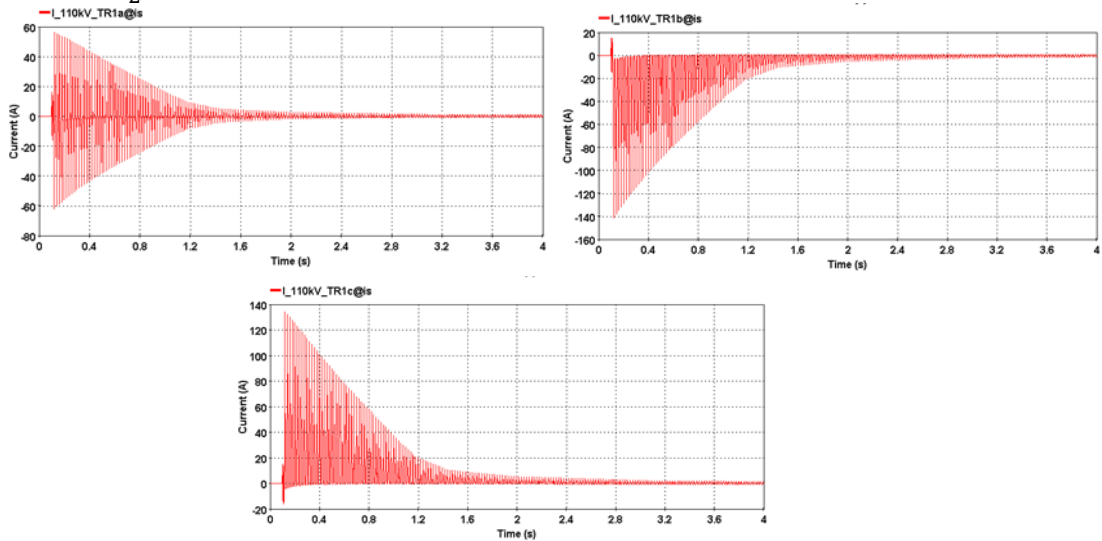


Figura 2. Formele de undă ale curentului de magnetizare în momentul $\frac{\pi}{2}$

În Fig. 2, se poate observa că valoarea curentului de intrare este aproximativ 140 A și într-un interval de timp de 1,6 secunde scade.

Pentru cazul al doilea, s-a luat în considerare punctul $\frac{3\pi}{4}$ din intervalul $(\frac{\pi}{4}, \pi)$.

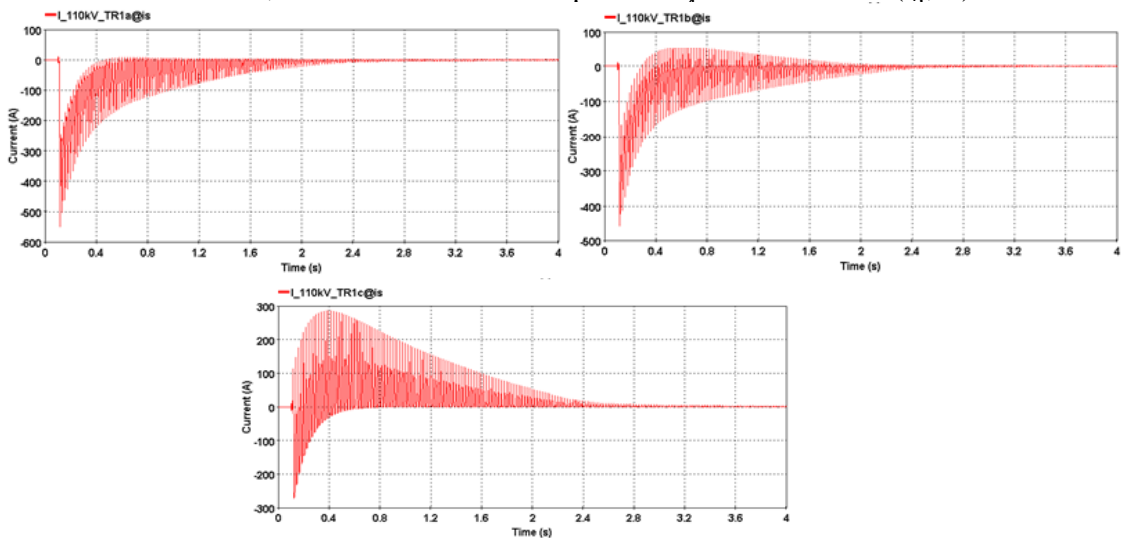


Figura 3. Formele de undă ale curentului de magnetizare în momentul $\frac{3\pi}{4}$

În această figură, valoarea curentului este de 500 A și se reduce după un timp de 2,4 secunde.

Ultimul caz, pune în evidență, trecerea tensiunii prin valoarea zero, în punctul π .

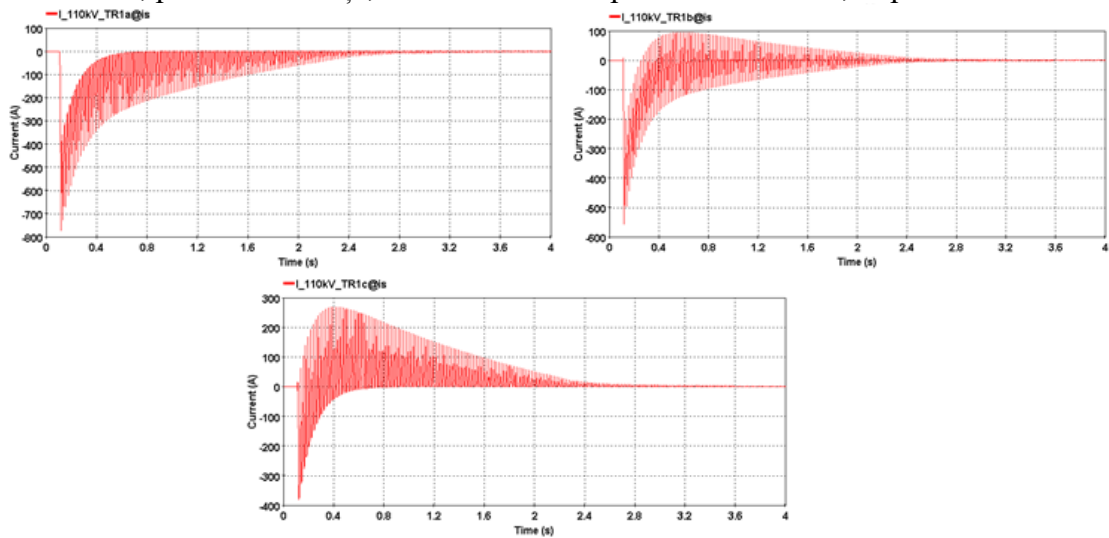


Figura 4. Formele de undă ale curentului de magnetizare în momentul π

Din Fig. 4 am constatat faptul că curentul are o valoare de 700 A și scade într-un interval de 2,4 secunde.

Concluzii

În urma analizei celor trei situații, s-a remarcat că în punctul de vârf al tensiunii, adică $\frac{\pi}{2}$, curentul de magnetizare are cea mai scăzută valoare. În punctul intermedier, curentul are o valoare medie, iar la trecerea prin zero a tensiunii, curentul atinge valoarea maximă.

Din compararea celor trei simulări, am ajuns la concluzia că punctul optim de comutare al transformatoarelor industriale de putere cu conexiunile YD_{+30} este punctul $\frac{\pi}{2}$, în care tensiunea are valori maxime, iar curentul de magnetizare are valori minime.

Referințe

Articole în conferințe

1. MOHAMED HASSAN HASHEM, AHDAB MOHAMED ELMORSHEDY și AHMED MOHAMED EMAM „Attenuation of Transformer Inrush Current Using Controlled Switching System on Delta-Star Transformer”, Cairo University Giza, Egypt, 2018.
2. JOSE C. OLIVEIRA, CARLOS E. TAVARES, ROBERTO APOLONIO ARNULFO B. VASCONCELLOS, and HERIVELTO S. BRONZEADO, "Transformer Controlled Switching to Eliminate Inrush Current - Part I: Theory and Laboratory Validation", Member, IEEE, 2006 .
3. HERIVELTO S. BRONZEADO, SERVULO O. PINTO, PER JONSSON, JOSE CARLOS DE OLIVEIRA, and MARCELO L. R. CHAVES , "Transformer Controlled Switching to Eliminate Inrush Current - Part II: Field Tests on a 100MVA Three-phase Transformer", Member, IEEE, 2006.
4. SUNDONG He, QING Li, RENYUAN TONG, GE SHI, “Transformer economic operation control system based on zero-crossing switching”, Institute of mechanical and electrical engineering, China Jiliang University, Hangzhou, China.

Capitole în cărți

5. ALECSANDRU SIMION, Mașini electrice, Volumul I, Transformatoare electrice, 2000, pp. 167-171.