

## **EVALUAREA PARAMETRILOR TRANSFORMATORULUI CU DOUĂ ÎNFĂȘURĂRI UTILIZÂND MĂSURĂRI FAZORIALE**

**Cristian ȘEREMET**

*Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Energetică și Inginerie Electrică, Departamentul Energetică, grupa EE-18M, Chișinău, Republica Moldova*

**Rezumat.** Apariția sistemului GPS (Global Positioning System) și deschiderea lui spre aplicațiile comerciale, crearea standardelor internaționale IEEE 1344, IEEE C37.118, IRIG-B și aplicarea dispozitivelor de măsurare fazorială, au condus în ultimii ani la realizarea aplicațiilor ce folosesc măsurările fazoriale sincronizate în sistemele electroenergetice. Această tehnologie permite urmărirea evoluției fazorilor de tensiune și de curent în anumite noduri ale sistemului electroenergetic. Cunoscând valorile reale ale parametrilor activi din nodurile rețelei electrice apare noi posibilități de a estima parametrii pasivi ai echipamentelor rețelelor electrice cum ar fi lina electrică sau transformatorul de putere. Cunoscând valorile reale ai parametrilor apare posibilitatea de a urmări starea și dinamica sistemului electroenergetic și de a lua anumite decizii asupra problemelor ce pot apărea.

**Cuvinte cheie:** măsurări fazoriale, parametri activi, parametri pasivi, schema echivalentă și cuadripol.

### **Introducere**

Dublarea RE (rețea electrică) printr-o rețea informatică ce realizează conectarea operatorilor de pe piața de energie electrică și prin informație cu ajutorul elementelor de software și hardware, a permis implementarea tehnologiei pentru măsurări fazoriale sincronizate ce reprezintă una din cele mai moderne și eficiente abordări folosite pentru monitorizarea și controlul sistemelor electroenergetice. Deci, înțelegerea sensului de funcționare a sistemului de măsurare pe arie largă (WAMS – Wide-Area Monitoring System) obține o altă formă ce sună în felul următor: WAMS combină toate datele furnizate de către sincrofazori și dispozitivele de măsură tradiționale cu o capacitate de comunicare modernă a sistemelor pentru monitorizare, exploatare, controlul și protecția sistemelor de alimentare cu energie electrică pe o suprafață geografică anumită.

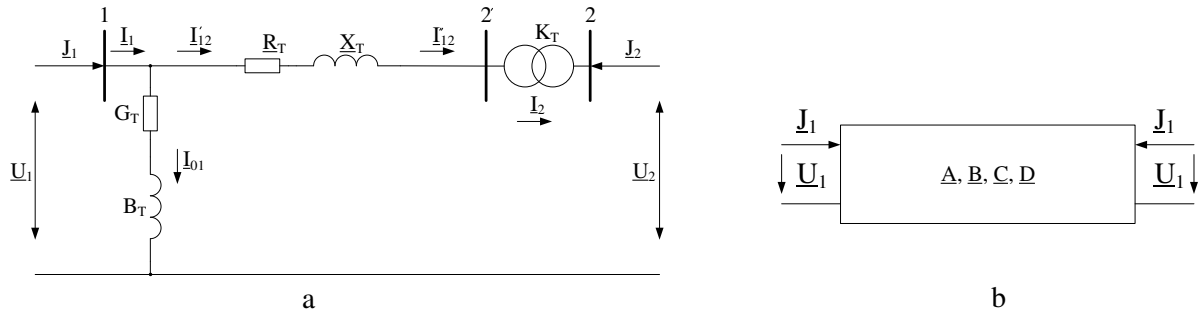
Sistemul sincronizat de măsurare fazorială (SPMS – Synchronized Phasor Measurement System) are capacitatea de a măsura modulul și unghiul (forma vectorială) al parametrilor activi, cu ajutorul dispozitivelor de măsurare a fazorilor (PMU – Phasor Measurement Unit) instalate în nodurile RE. Această abilitate a fost posibilă prin disponibilitatea sistemului de poziționare globală (GPS), de la care SPMS folosește ora primită de la GPS ca timp de eșantionare în concordanță cu standardul IEEE C37.118 ce se împarte în două părți, prima parte definește condițiile impuse privind calitatea măsurătorilor, a doua parte reprezintă modul de transfer al datelor de la un PMU către un centru de control.

PMU au evoluat din relele de protecție digitale (bazate pe microprocesoare). Prin urmare, structura unui PMU este similară cu un releu de protecție digitală, cu excepția receptorului GPS care este necesar pentru a sincroniza timpul de măsurare. Eroarea vectorială totală impusă unui echipament PMU care măsoară sincrofazori trebuie să fie de sub 1%, în condițiile unei deviații maxime de la frecvența nominală de  $\pm 5\text{Hz}$ , a unui coeficient de distorsiune armonică totală THD de 10% și cu un semnal perturbător în afara benzii de frecvență cu valori de până la 10% din valoarea semnalului util [1]. Aceste cerințe sunt stipulate în standardul IEEE C37.118.

### **Identificarea parametrilor pasivi al transformatorului de putere cu două înfășurări reprezentat printr-un cuadripol**

Identificându-se parametrii activi cu ajutorul PMU-urilor instalate la bornele transformatorului, apare posibilitatea de a efectua calculele în formă vectorială (complexă sau

trigonometrică) pentru parametrii transformatorului care pot fi prezentați și descriși cu ajutorul schemelor echivalente în formă de  $\Pi$ , T, sau  $\Gamma$  ca în cazul dat Figura 1 a. Indiferent de schema echivalentă utilizată transformatorul poate fi prezentat ca un cuadripol nesimetric (Figura 1 b). În acest caz parametrii de intrare și cei de ieșire vor fi legați între ei prin intermediul parametrilor A, B, C și D. Știind acești parametri se poate cu ușurință de determinat rezistențele longitudinale și transversale pentru schema echivalentă în „ $\Gamma$ ”, cât și coeficientul de transformare. Deci principalul scop este determinarea parametrilor A, B, C, și D cunoscând parametri de intrare și cei de ieșire.



**Figura 1. Schemele echivalente ale transformatorului de putere cu două înfășurări a) în formă de  $\Gamma$  și b) în formă de cuadripol**

Dacă se scriu relațiile de calcul al parametrilor  $\underline{J}_1$  și  $\underline{U}_1$  pentru două regimuri de funcționare, se obține următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} \underline{U}_1^{(1)} = \underline{A} \cdot \underline{U}_2^{(1)} + \sqrt{3} \cdot \underline{B} \cdot \underline{J}_2^{(1)} \\ \underline{J}_1^{(1)} = \underline{C} \cdot \frac{\underline{U}_2^{(1)}}{\sqrt{3}} + \underline{D} \cdot \underline{J}_2^{(1)} \\ \underline{U}_1^{(2)} = \underline{A} \cdot \underline{U}_2^{(2)} + \underline{B} \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{J}_2^{(2)} \\ \underline{J}_1^{(2)} = \underline{C} \cdot \frac{\underline{U}_2^{(2)}}{\sqrt{3}} + \underline{D} \cdot \underline{J}_2^{(2)} \end{cases} \quad (1)$$

Din sistemul de Ec. (1) se poate de identificat constantele cuadripolului, astfel cunoscându-le se poate determina parametrii pasivi al transformatorului aplicând următoarele relații:

$$\underline{k}_t = \underline{A}; \quad (2)$$

$$\underline{Z}_t = \underline{B} \cdot \underline{A}^* = \underline{B} \cdot \underline{k}_t^*; \quad (3)$$

$$\underline{Y}_t = \frac{\underline{C}}{\underline{k}_t} = \frac{\underline{C}}{\underline{A}}. \quad (4)$$

### Identificarea parametrilor pasivi ai transformatorului de putere cu două înfășurări în baza ecuațiilor bilanțului de putere

Estimarea parametrilor pasivi prin aplicarea ecuațiilor bilanțului de putere se face în baza schemei echivalente în formă de  $\Gamma$  cu parametrii transformatorului raportați la partea de joasă tensiune ca în Figura 2. Pentru schema dată se va reprezenta în Ec. (5) și Ec.(6) cu ce vor fi egale puterile complexe în nodurile 1 și 2.

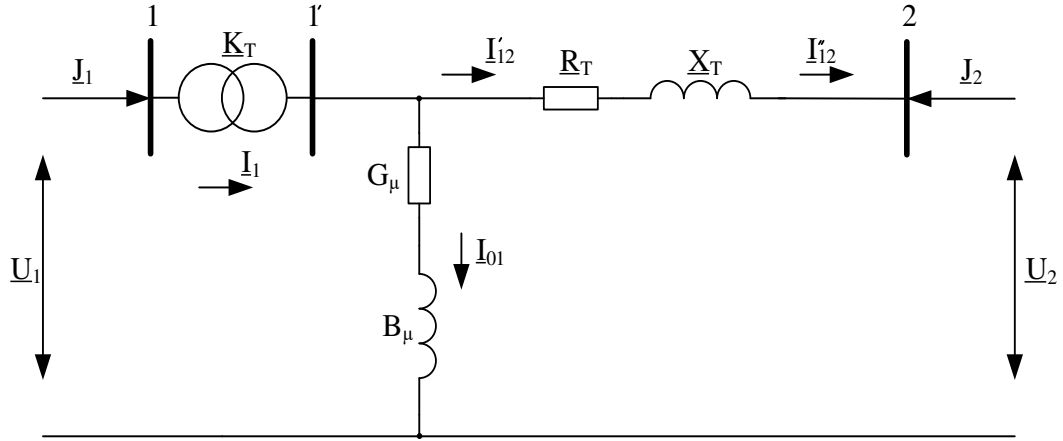


Figura 2. Schema echivalentă în formă de „Γ” pentru transformatorul cu două înfășurări

$$\underline{S}_1 = (U_1'^2 + U_1''^2)(k_t'^2 + k_t''^2)(G_{t\mu} - jB_{t\mu}) - (U_2' - jU_2'')(U_1' - jU_1'')(k_t' + jk_t'')(G_{t\mu} - jB_{t\mu}); \quad (5)$$

$$\underline{S}_2 = -(G_t - jB_t)(k_t' - jk_t'')(U_1' - jU_1'')(U_2' - jU_2'') + (U_2'^2 - jU_2''^2) \cdot (G_t - jB_t). \quad (6)$$

Efectuând un șir de transformări matematice pentru Ec. (5) și Ec.(6) s-a alcătuit relațiile de calcul pentru puterea activă și cea reactivă pentru două regimuri de funcționare, astfel s-a obținut următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} P_1 = (U_1'^2 + U_1''^2)(k_t'^2 + k_t''^2)G_{t\mu} - a \cdot k_t' \cdot G_t - a \cdot k_t'' \cdot B_t + b \cdot k_t'' \cdot G_t - b \cdot k_t' \cdot B_t; \\ Q_1 = (U_1'^2 + U_1''^2)(k_t'^2 + k_t''^2)B_{t\mu} + a \cdot k_t'' \cdot G_t - a \cdot k_t' \cdot B_t + b \cdot k_t' \cdot G_t + b \cdot k_t'' \cdot B_t; \\ P_2 = -(U_2'^2 + U_2''^2)G_t + a \cdot k_t' \cdot G_t - a \cdot k_t'' \cdot B_t - b \cdot k_t'' \cdot G_t - b \cdot k_t' \cdot B_t; \\ Q_2 = -(U_2'^2 + U_2''^2)B_t + a \cdot k_t'' \cdot G_t + a \cdot k_t' \cdot B_t + b \cdot k_t' \cdot G_t - b \cdot k_t'' \cdot B_t; \\ P_{1s} = (U_{1s}'^2 + U_{1s}''^2)(k_{ts}'^2 + k_{ts}''^2)G_{t\mu} - a_s \cdot k_t' \cdot G_t - a_s \cdot k_t'' \cdot B_t + b_s \cdot k_t'' \cdot G_t - b_s \cdot k_t' \cdot B_t; \\ Q_{1s} = (U_{1s}'^2 + U_{1s}''^2)(k_{ts}'^2 + k_{ts}''^2)B_{t\mu} + a_s \cdot k_t'' \cdot G_t - a_s \cdot k_t' \cdot B_t + b_s \cdot k_t' \cdot G_t + b_s \cdot k_t'' \cdot B_t; \\ P_{2s} = -(U_{2s}'^2 + U_{2s}''^2)G_t + a_s \cdot k_t' \cdot G_t - a_s \cdot k_t'' \cdot B_t - b_s \cdot k_t'' \cdot G_t - b_s \cdot k_t' \cdot B_t; \\ Q_{2s} = -(U_{2s}'^2 + U_{2s}''^2)B_t + a_s \cdot k_t'' \cdot G_t + a_s \cdot k_t' \cdot B_t + b_s \cdot k_t' \cdot G_t - b_s \cdot k_t'' \cdot B_t. \end{cases} \quad (7)$$

unde:  $a = U_1' \cdot U_2' - U_1'' \cdot U_2''$ ;

$b = U_1' \cdot U_2'' + U_1'' \cdot U_2'$ .

Soluționând sistemul de Ec. (7) se vor identifica următoarele necunoscute:  $k_t' \cdot G_t$ ,  $k_t'' \cdot G_t$ ,  $k_t' \cdot B_t$ ,  $k_t'' \cdot B_t$ ,  $(k_{ts}'^2 + k_{ts}''^2)G_{t\mu}$ ,  $(k_{ts}'^2 + k_{ts}''^2)B_{t\mu}$ ,  $G_t$  și  $B_t$ .

Dacă se consideră că unghiul de defazaj între tensiunile de linie ale înfășurărilor primară și secundară se vor modifica cu  $30^0$ , atunci coeficientul de transformare va fi egal cu:

$$\underline{k}_t = (k_t' + jk_t'') = |\underline{k}_t|(\cos(30) + j\sin(30)) = |\underline{k}_t| \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right). \quad (8)$$

Conform celor menționate se va obține următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases}
 P_1 = (U_1'^2 + U_1''^2) |k_t|^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \right)^2 G_{i,\mu} - a \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t - a \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t + b \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t - b \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t; \\
 Q_1 = (U_1'^2 + U_1''^2) |k_t|^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} \right)^2 + a \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t - a \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t + b \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t + b \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t; \\
 P_2 = -(U_2'^2 + U_2''^2) G_t + a \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t - a \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t - b \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t - b \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t; \\
 Q_2 = -(U_2'^2 + U_2''^2) B_t + a \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t + a \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t + b \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t - b \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t; \\
 P_{2s} = -(U_{2s}'^2 + U_{2s}''^2) G_t + a_s \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t - a_s \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t - b_s \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t - b_s \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t; \\
 Q_{2s} = -(U_{2s}'^2 + U_{2s}''^2) B_t + a_s \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot G_t + a_s \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_t + b_s \cdot |k_t| \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot G_t - b_s \cdot |k_t| \frac{1}{2} \cdot B_t.
 \end{cases} \quad (9)$$

### Concluzii

Prin aplicarea tehnologiilor pentru măsurarea fazorială sincronizată apare posibilitatea de a cunoaște parametrii activi în nodurile rețelei cu o descriere detaliată pentru orice moment de timp, însă pentru identificarea și analiza fenomenelor fizice ce se întâmplă în RE pe lângă parametrii activi mai este nevoie și de a cunoaște pe cei pasivi, la fel și pentru foarte multe studii ce se efectuează în diferite ramuri din domeniul electroenergetic este nevoie de a cunoaște parametrii pasivi ai transformatoarelor de putere. Acești parametri variază din cauza gradului de uzură (pierderile de mers în gol se majorează anul cu circa 2%), condițiilor climaterice și de pierderile Joule-Lenz datorate circulației de curent în funcție de regimul de funcționare.

Avantajul metodelor analizate constă în lipsa necesității de a efectua încercări de mers în gol și scurtcircuit astfel se exclude necesitatea de a deconecta transformatoarele de putere de la RE pentru a efectua încercările date. În cazul când se aplică relațiile de calcul pentru cuadripol, estimările parametrilor pasivi sunt obținute din rezultatele rezistențelor longitudinale și transversale ce sunt reprezentate în formă complexă. La aplicarea relațiilor de calcul obținute în baza ecuațiilor bilanțului de putere apare posibilitatea de a analiza fiecare parametru în parte, însă se obține un sistem de ecuații complex cu un număr de necunoscute mare, pentru a reduce numărul de necunoscute este nevoie de a prezenta coeficientul de transformare conform Ec.(8) și ca consecință eroarea se poate majora. Cunoscând parametrii pasivi și cei activi ai transformatoarelor de putere se poate de sesizat starea sistemului la un moment dat, respectiv excluderea limitelor de funcționare ale rețelelor electrice în cazul creșterii sarcinii din sistem. Crearea posibilităților de a implementa tehnologii noi (cum ar fi instalațiile FACTS) în SEE pentru a ridica gradul fiabilități de funcționare ale rețelelor electrice din punct de vedere tehnic cât și economic.

### Referințe:

#### Cărți:

1. TÎRNOVAN Radu-Adrian. *Protecții digitale în sistemele electroenergetice*. Cluj-Napoca, 2019.

#### Referințe Web:

2. Saha Roy, B.K. *An optimal PMU placement technique for power system observability*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 42, Issue 1, November 2012, Pages 71-77. [accesat 09.02.2020]. Disponibil: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014206151200066X>
3. HOSSEIN, J. *Wide Area Measurement Systems*. [online]. [accesat 12.10.2019] Disponibil: [https://www.researchgate.net/publication/221927487\\_Wide\\_Area\\_Measurement\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/221927487_Wide_Area_Measurement_Systems).