

ESTIMAREA PARAMETRILOR REȚELELOR ELECTRICE UTILIZÂND MĂSURĂRI FAZORIALE SINCRONIZATE

Ecaterina MURDID, Ion STRATAN

Universitatea Tehnica a Moldovei

Rezumat: *Lucrarea dată reprezintă examinarea măsurărilor fazoriale ca instrumentul util în dirijare, monitorizare, vizualizare, analiză și planificare a rețelelor electrice. Conform standardului IEEE C37.118-2005 aceste măsurări sunt bazate pe obținerea și transmiterea fazorilor sincronizați în timp prin GPS. Sunt evidențiate aplicațiile privind utilizarea măsurărilor sincronizate pentru estimarea parametrilor rețelelor electrice. Sunt indicate problemele principale privind implementarea măsurărilor fazoriale în electroenergetica națională.*

Cuvinte cheie: *măsurări fazoriale, fazorii sincronizați, estimarea parametrilor pasivi, cuadripol..*

Aspecte generale

Creșterea eficienței energetice, implementarea surselor regenerabile de energie și dezvoltarea tehnologiilor de tip SMART GRID reprezintă cele mai răspândite priorități ale companiilor energetice din întreaga lume. Realizarea acestor tendințe într-o măsură mai mare sau mai mică este condiționată de dezvoltarea sistemelor de monitorizare distribuită (WAMS – Wide-Area Monitoring System). Sistemele de tipul WAMS sunt bazate pe tehnologia măsurărilor fazorilor sincronizați (syncrophasor measurement).

Standardul IEEE C37.118-2005 determină măsurarea fazorilor sincronizați ca formatul mesajului de comunicare a acestor date la o distanță în timp real. Cum urmează din denumire fazorii sincronizați sunt niște date măsurate în formatul vectorial, de aceea primul avantaj semnificativ în utilizarea acestei tehnologii este determinarea punctului de referență, cum este arătat în figura 1.

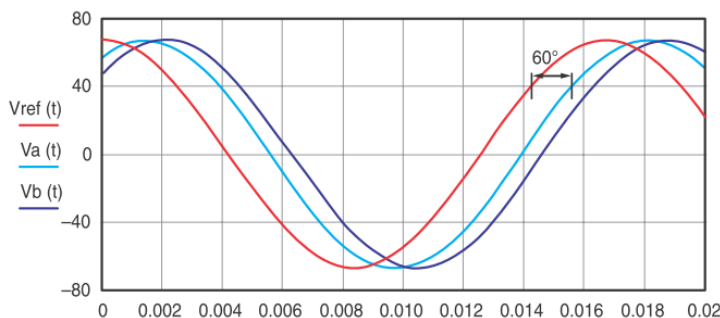


Fig. 1 Unda de referință $V_{ref}(t)$ și undele locale $V_a(t)$ și $V_b(t)$ cu comparația unghiulară

Toate măsurările locale sunt efectuate în raport cu unda sinusoidală de frecvența nominală [1]. Fiecare măsurare are marcaj de timp conform timpului de reper. Marcarea de timp a fazorilor din diferite puncte permite alinierea lor funcție de timp (sincronizare), ce asigură examinarea cuprinzătoare a întregii rețele electrice din punctul central [2]. Fazorii sincronizați în rețele electrice sunt măsurăți cu precizie de către echipamentul de măsurare a fazorilor numit PMU (Phasor Measurement Unit). Sincronizarea între diferite PMU individuali este atinsă prin utilizarea unui semnal comun sincronizat de la satelitele GPS (Global Positioning System), semnalul acesta fiind transmis prin portul de comunicare IRIG-B.

Utilizarea fazorilor sincronizați în estimarea parametrilor rețelelor electrice

Conform standardului indicat anterior prin formatul datelor sincronizate poate fi transmisă următoarea informație:

- fazorii (tensiunelor trifazate și curenților trifazați), adică amplitudinea și unghiul;
- frecvența și variația ei în timp df/dt ;
- valorile analogice (orice valoare măsurată ori calculată cu ajutorul mărimelor măsurate);
- valorile digitale (ce descriu starea logică a elementului, 1 sau 0).

Toate aceste valori sunt pe larg aplicate în calcul, în analiza și dirijarea operativă a rețelelor electrice. Modelele tradiționale de estimare a stării statice sunt bazate pe măsurarea tensiunilor și fluxurilor de puteri.

Atunci starea sistemului este apreciată pe baza scanării acestor valori și calculului iterativ. Evaluarea stării include eroarea specifică de măsurare, temporizări între măsurări și simplificarea modelului [3].

$$\underbrace{\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{masurare} \\ 10 \text{ min}}} = \underbrace{f(U, \varphi)}_{\text{stare}} + \text{eroare} \Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}}_{\substack{\text{masurare} \\ 1 \text{ sec}}} = \underbrace{f(U, \varphi)}_{\text{stare}} \quad (1)$$

Modelul pe baza fazorilor sincronizați (cu utilizarea unghiurilor de defazaj măsurate) elimină aceste erori și transformă estimarea stării în măsurarea stării. Timpul necesar pentru calculul iterativ dispare, și parametrii de stare ai sistemului pot fi direct afișați pe calculatorul dispecerului sau personalului operativ. Instrumentul avansat de măsurări vectoriale asigură caracteristica reală a condițiilor într-un sistem, ajutând operatorilor în creșterea stabilității sistemului și în prevenirea colapsului rețelei.

PMU-urile integrate în dispozitivele de măsurare formează masive de valori momentane (MVM) sincronizate în timp, care pot fi cu succes utilizate pentru estimarea parametrilor elementelor din rețele electrice (transformatoare de putere, LE, reactoare, condensatoare, etc.). Ca regulă, parametrii schemelor echivalente sunt determinați din datele tehnice sau pe baza parametrilor nominali. Dar este cunoscut, că valorile parametrilor elementelor RE în proces de exploatare a instalațiilor electrice se schimbă și suficient depind de prezența multor factori. Deseori parametrii pasivi ai transformatorului se modifică din cauza scurtcircuitului între spire, deteriorării contactelor și izolației, proceselor de încălzire, degazare, etc. Iar în calcul liniilor electrice deseori sunt neglijați efectul pelicular și factorii climaterici, ce influențează pronunțat rezultatele calculului.

Estimarea parametrilor respectivi cu ajutorul fazorilor sincronizați este bazată pe reprezentarea elementului analizat (spre exemplu, LEA cu $U_n = 110 \text{ kV}$) în formă de cuadripol sau în formă II (fig. 2) [4].

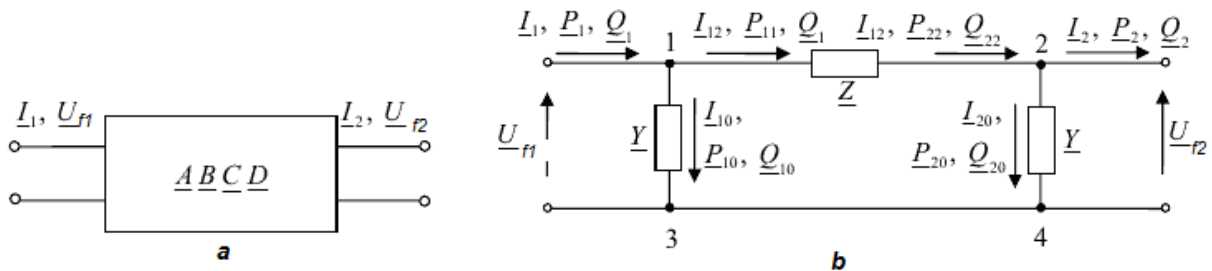


Fig. 2 - Schemele echivalente ale LEA a) în formă de cuadripol și b) în formă II

Cuadripolul pasiv este caracterizat cu coeficienții generalizați $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ și \underline{D} , determinate din valorile

parametrilor specifici: impedanța caracteristică complexă a liniei $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\underline{z}_0 / \underline{y}_0}$ și constanta

de propagare a liniei $\underline{\gamma}_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)} = \sqrt{\underline{z}_0 \cdot \underline{y}_0}$. Legatura între acești parametri și constantele cuadripolului permite determinarea parametrilor specifici cu ajutorul relațiilor (2)-(5):

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\underline{B} / \underline{C}} ; \quad (2)$$

$$\underline{\gamma}_0 = \frac{1}{l} \left(\text{arth} \frac{\text{Re}(\sqrt{\underline{B} \cdot \underline{C}})}{\text{Re}(\underline{A})} + j \text{arctg} \frac{\text{Im}(\underline{A})}{\text{Re}(\sqrt{\underline{B} \cdot \underline{C}})} \right) ; \quad (3)$$

$$\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = \underline{\gamma}_0 \cdot \underline{Z}_B ; \quad (4)$$

$$\underline{y}_0 = g_0 + jb_0 = \underline{\gamma}_0 / \underline{Z}_B . \quad (5)$$

Constantele $\underline{A}, \underline{B}, \underline{C}$ și \underline{D} pot fi determinate din sistemul de ecuații (6), în care întră curenții și tensiunile măsurate la ambele capete ale LE:

$$\begin{cases} \underline{U}_{f1} = \underline{A} \cdot \underline{U}_{f2} + \underline{B} \cdot \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_{f2} + \underline{D} \cdot \underline{I}_2; \\ \underline{U}_{f2} = \underline{D} \cdot \underline{U}_{f1} - \underline{B} \cdot \underline{I}_1; \\ \underline{I}_2 = -\underline{C} \cdot \underline{U}_{f1} + \underline{A} \cdot \underline{I}_1. \end{cases} \quad (6)$$

Deoarece $\underline{A} = \underline{D}$, se poate de folosit numai trei ecuații la alegere. Pe baza primelor trei ecuații a sistemului (6) este format sistemul de ecuații în forma matricială (7):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{f2} & \underline{I}_2 & 0 \\ \underline{I}_2 & 0 & \underline{U}_{f2} \\ \underline{U}_{f1} & -\underline{I}_1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A} \\ \underline{B} \\ \underline{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{f1} \\ \underline{I}_1 \\ \underline{U}_{f2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Prin soluționarea sistemului (7) se obține:

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_{f2}^2 \underline{I}_2 + \underline{U}_{f1} \underline{U}_{f2} \underline{I}_1}{\underline{U}_{f2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{f1} \underline{U}_{f2} \underline{I}_2}; \quad \underline{B} = \frac{\underline{U}_{f1} \underline{U}_{f2} - \underline{U}_{f2}^3}{\underline{U}_{f2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{f1} \underline{U}_{f2} \underline{I}_2}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{U}_{f2} \underline{I}_1^2 - \underline{U}_{f2} \underline{I}_2^2}{\underline{U}_{f2}^2 \underline{I}_1 + \underline{U}_{f1} \underline{U}_{f2} \underline{I}_2}. \quad (8)$$

Trebuie de menționat că utilizarea datelor de la dispozitivele PMU în forma fazorială include calcul valorilor eficace și unghiurilor de fază între fazori cu ajutorul expresiilor (9):

$$F_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_1^2(t_i)}; \quad F_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_2^2(t_i)}; \quad \varphi_{12} = \arccos \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_1(t_i) \cdot f_2(t_i)}{F_1 \cdot F_2} \right) \quad (9)$$

unde $f_1(t_i), f_2(t_i)$ - valorile momentane ale curenților/tensiunilor la ambele capete ale LE în momentul de măsurare t_i ; N – numărul de eșantioane într-o perioadă de timp [4].

Estimarea parametrilor pasivi ai LE cu schema echivalentă în formă de Π este efectuată pe baza calculului puterilor active și reactive în ramurile longitudinală și transversale cu utilizarea datelor din MVM primite de la PMU. La fel pot fi estimați și parametrii pasivi ai transformatoarelor de putere. Avantajul metodelor analizate constă în lipsa necesității de a efectua încercări de mers în gol și scurtcircuit. Pentru schemele de calcul simetrice parametrii pot fi determinați pe baza rezultatelor obținute prin o singură măsurare. Datele obținute prin estimare pot fi aplicate mai departe în monitorizarea uzurii tehnice a instalațiilor electrice, în calcul pierderilor tehnice de putere și energie electrică, în estimarea capacității de tranzit a LE, în determinarea locului defectului, etc.

Analiza problemelor de implementare a măsurărilor fazoriale în Republica Moldova

Deși avantajele măsurărilor fazoriale sunt evidente, companiile din sectorul energetic nu se grabesc să facă investiții în acest domeniu. Compania sectorului de transport Î.S. „Moldelectrica” poate fi numită liderul în instalare a utilajului echipat cu PMU. În 2001 în cadrul programului Energy II au fost instalate 87 de contoare digitale sincronizate cu GPS în scop de a marca hotarele sistemului electroenergetic al Republicii Moldova. Mai târziu au fost instalate peste 560 de contoare cu sincronizare la toate barele de coborâre în rețele de distribuție pentru a separa rețele de transport de rețelele de distribuție (RED Nord, RED Nord-Vest, RED Gas Natural Fenosa). Sincronizarea în timp a datelor de la contoare permite obținerea curbelor de sarcină zilnice (odată în 24 ore) cu posibilitatea de analiză dinamică și arhivarea datelor în cadrul serviciului de evidență în punctul central al Î.S. „Moldelectrica”. Datele senzorilor de putere transmise în fiecare 15 minute sunt prelucrate în serviciul de regimuri electrice, care se ocupă de calcul stabilității regimurilor de funcționare, planificarea regimurilor, menținerea nivelului de tensiune, etc. Dispozitivele de PRA bazate pe microprocesoare se instalează în rețele electrice de transport din anul 2004. Stațiile de transformare de 330 kV și 110 kV sunt echipate cu relele digitale de tipul SEL (SEL-421, SEL-311C, SEL-351) și de tipul

MiCOM (MiCOM P127, MiCOM P443, MiCOM P645 și P642). PMU-*rile* integrate în aceste relee permit măsurarea și transmiterea datelor operatorilor la o distanță (spre exemplu, în punctul central). Ca regulă adresarea la datele măsurate de dispozitivele de protecție se efectuează în caz de analiza postvarie, în ansamblu cu datele contoarelor și senzorilor de putere ei dau caracteristica amplă a defectului și arată ce protecție și în ce moment de timp a funcționat. Din păcate, releele de protecție nu sunt sincronizate cu GPS, de aceea analiza postvarie necesită mult timp și se caracterizează prin erori legate de calcul manual și fixarea incorectă a timpului de către utilizatori. În plus la majoritatea stațiilor de transformare sunt instalate registratoare digitale a marimelor electrice „PARMA”, care reprezintă osciloscoape numerice cu acționare în caz de urgență. Avantajul lor față de relee digitale constă în faptul că ei înregistrează valorile curenților și tensiunelor la toate conexiunile stației electrice, iar dispozitivul de protecție măsoară numai la conexiunile protejate.

Activitatea Î.S. „Moldelectrica” ani la rând este orientată spre dezvoltarea sistemului SCADA. Primele instalații de tip „Granit-Micro” au fost implementate în 2006, iar în ultimii ani se folosesc dispozitivele RTU (Remote Terminal Unit) firmei ABB. Informația de la RTU, instalate la stațiile electrice este colectată la Dispeceratul Central și pe urmă este răspândită în serviciile centrale sau filiale. Rolul semnificativ în transmiterea datelor de la PMU și RTU joacă organizarea canalului de comunicație. În anul 2013 se planifică finalizarea lucrărilor asupra crestei de comunicație cu fibra optică de la nord la sud. În 2010 a fost pus în funcție sistemul de achiziții de date și prelucrarea informației de la contoarele de evidență pentru 196 obiecte cu utilizarea canalelor de comunicație bazate pe tehnologia fără fir CDMA.

Compania Gas Natural Fenosa ca operator al rețelelor de distribuție în centrul și sudul Republicii Moldova (RED Centru, RED Chișinău, RED SUD) tot este interesată în implementarea tehnologiilor moderne de achiziții de date. Din 2001 se dezvoltă sistemul SCADA, contoare de evidență comercială și partea dispozitivelor RTU sunt echipate cu modeme pentru transmiterea datelor prin tehnologia GSM, GPRS a rețelelor operatorilor mobili. În anul 2012 releele de protecția numerică de tip MiCOM și RZL de la 36 obiecte au fost unite într-un sistem comun de transmitere a datelor prin protocol Modbus, ce permite obținerea informației de la PMU integrate în releele respective în punctul central.

Deși sistemele de măsurare a fazorilor sincronizați au multe oportunități și pot fi utilizate în ansamblu cu sistemele SCADA, în sectorul energetic al Republicii Moldova în domeniul implementării acestora există următoarele probleme:

- deficitul dispozitivelor PMU sincronizate cu GPS;
- dezinteresul companiilor din sectorul energetic condiționat de investiții semnificative în sistemul analizat;
- dezvoltarea lentă a rețelelor de comunicație și ponderea mică de utilizarea rețelelor fără fir (wireless);
- lipsa metodelor de determinare a locului optimal pentru dispozitivele cu PMU în rețele electrice ale Republicii Moldova;
- lipsa experienței și metodelor de analiză a datelor măsurate pentru implementarea lor în aplicațiile menționate anterior;
- lipsa software-*ul* (programelor) pentru prelucrarea și arhivarea datelor obținute de la echipamentul cu funcții de măsurare.

Republica Moldova împreună cu Ucraina intenționează în curând să adereze la sistemul ENTSO-E, rețeaua europeană de operatori sistemici în transportul energiei electrice, ce va asigura un impuls important în dezvoltarea măsurărilor fazoriale în sistemul energetic național.

Bibliografie

1. Bill Flerchinger, Roy Moxley, and Eren Ersonmez, *All the Data Fit to Print – Applying All the Available Synchrophasor Information*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2011, p.1-2
2. *Report of Unified Real Time Dynamic State Measurement*, POWER GRID CORPORATION OF INDIA LTD, 2012, p.13-15
3. *SEL Synchrophasors Flyer: A New View of the Power System*, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2008, p.2-3
4. Хрущев Ю.В., Бацева Н.Л., Абрамочкина Л.В., *Идентификация погонных параметров протяженной линии электропередачи с использованием регистраторов аварийных сигналов*, Известия Томского Политехнического университета, 2011, УДК 620.9.