

SCHIMBUL DE PUTERE LA INTERFAȚA A DOUĂ SISTEME ELECTROENERGETICE

Igor ANDRIEȘ

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

Rezumat. În lucrare se examinează problema analizei schimbului de putere prin linia de interconexiune la reglarea unghiului diferenței de fază a tensiunilor din nodurile interconectate. Analiza are la bază relațiile clasice de calcul a puterii aparente și a puterii active prin linia de interconexiune, care se prezintă în sistemul de unități relative. S-au obținut relațiile a puterii aparente și a componentelor ei în unități relative, care permit analiza evoluției acestora în funcție de unghiul diferenței de fază a tensiunilor nodurilor interconectate a două sisteme electroenergetice interconectate printr-o linie de legătură cu parametri longitudinali R și X . Ca parametru de reglare s-a selectat unghiul diferenței de fază format de o instalație specializată - dispozitiv de reglare a unghiului de fază (DRUF). S-a demonstrat, caracterul complex al procesului de reglare a puterii de schimb dintre două sisteme electroenergetice la reglarea unghiului diferenței de fază cu evidențierea a trei zone cu diferită sensibilitate a puterii vehiculate (active și reactive) prin linia de interconexiune la reglarea unghiului diferenței de fază a vectorii de tensiune. Rezultatele obținute permit formularea unor cerințe tehnice argumentate la operarea sau aplicarea sistemelor de reglare a puterii în liniile sistemului electroenergetic prin reglarea unghiului diferenței de fază la intrarea și ieșirea liniei electrice.

Cuvinte cheie: linie de interconexiune, instalație de reglare a unghiului diferenței de fază, schimb bidirecțional de putere, zone optime de reglare a unghiului diferenței de fază.

Introducere

Realizarea interconexiunii a două sisteme electroenergetice gestionate de diferiți operatori a sistemului de transport se prezintă ca o problemă tehnică complexă. Ca exemplu se poate indica sistemul electroenergetic al Republicii Moldova și sistemul electroenergetic al României. Problema interconectării acestor două sisteme electroenergetice are deja o istorie destul de lungă, dar la moment nu este soluționată [1]. Realizarea interconexiunii cu utilizarea instalațiilor de tip Back-to-Back (BtB) se consideră la moment ca cea mai rezonabilă variantă de realizare a interconexiunii. În prezent se promovează soluțiile Back-to-Back de interconectare asincronă cu construcția BtB la Vulcănești, Strășeni și Bălți. Totuși, vom menționa, că se examinează și soluții de alternativă, care au la bază aplicarea convertoarelor de curent alternativ în curent alternativ (convertoare AC/AC) în baza transformatoarelor în baza transformatoarelor de construcție specială cu reglarea diferenței de fază a tensiunilor intrare/ieșire a acestor transformatoare [2]. Utilizarea acestor soluții de alternativă pot asigura sporirea flexibilității funcționării sistemelor electroenergetice în urma reglării forțate a unghiului diferenței de fază în liniile electrice și prin aceasta se asigură redistribuirea fluxurilor de putere [3]. Din aceste considerente, instalațiile de tip AC/AC cu reglarea unghiului diferenței de fază pot avea o arie destul de largă de utilizare, inclusiv, și pentru a regla sau echilibra fluxurile schimbului de putere prin liniile de interconexiune a două sisteme electroenergetice, gestionate de diferiți operatori de sistem [4, 5]. Scopul acestei lucrări constă în examinarea particularităților schimbului de putere prin liniile de interconexiune la interfața sistemelor electroenergetice la reglarea unghiului diferenței de fază în nodurile de interconexiune.

Transferul de putere prin linia de interconexiune

În sistemele electrice interconectate, fluxurile de energie respectă legile lui Kirchhoff. Puterea activă și reactivă transmisă de-a lungul liniei între două sisteme de alimentare poate fi determinată aproximativ prin expresiile [4]:

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \delta_{12}; Q_{12} = \frac{1}{X_{12}} (U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta_{12}) \quad (1)$$

unde: U_1, U_2 - reprezintă modulele de tensiune ale primului și respectiv al doilea sistem de alimentare la interfața de conexiune a două sisteme;
 X_{12} - reactanță de linie;
 δ - unghiul dintre vectorii de tensiune U_1 și U_2 .

Prin controlul valorii X_{12} sau (și) unghiului δ , este posibilă modificarea valorii și direcției fluxurilor de puteri active și reactive în linia de interconexiune.

Metoda de calcul a fluxului de putere prin linia de interconexiune

Vom examina particularitățile fundamentale a unui schimb de putere între două sisteme electroenergetici convenționali SEE1 și SEE2 printr-o linie de interconexiune cu parametrii $RLGC$ (Figura 1 și Figura 2). Pentru a examina procesul privind transmiterea fluxului de putere dintr-un sistem în alt sistem electroenergetic, utilizând metodele de analiză din cadrul BTE.

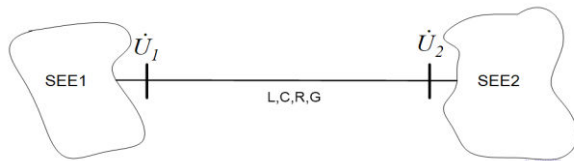


Figura 1. Schema echivalentă a interconexiunii a două sisteme electroenergetice

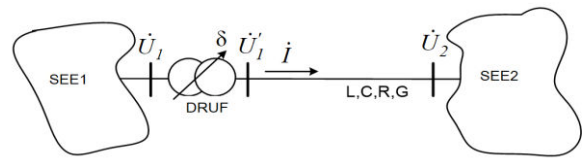


Figura 2. Schema echivalentă a interconexiunii a două sisteme cu reglarcapacitate bidirecțională de transmisie a fluxurilor de putere transmise

Pentru circuitul prezentat în Figura 2 se pot scrie relațiile următoare:

$$I = \frac{U_1^* - U_2^*}{Z} \quad (2)$$

unde: U_1^*, U_1', U_2^* - valorile complexe a tensiunii în nodurile liniei intersistemice transmisie:
 $U_1^* = U_1 e^{j\varphi_{u1}}$; $U_1' = U_1 e^{j\varphi_{u1}'} = U_1 e^{j(\varphi_{u1} + \delta)}$; $U_2^* = U_2 e^{j\varphi_{u2}}$; Z - impedanța liniei de interconexiune; $\varphi_{u1}' = \varphi_{u1} + \delta$ - unghiul de fază a tensiunii la terminalele de ieșire a instalației “Dispozitiv de reglare a unghiului de fază” (DRUF); δ - unghiul, care este o caracteristică a dispozitivului DRUF. Unghiul δ poate fi considerat pozitiv sau negativ. Presupunem, că atunci când vectorul tensiunii se rotește în sens invers acelor de ceasornic, unghiul δ a vectorului tensiunii U_1^* este o valoare pozitivă și în sensul acelor de ceasornic δ este negativ. În cazul extrem, unghiul δ poate varia în interiorul $\pm 360^\circ$.

Tensiunea U_1^* și impedanța Z din Ec. (2) se pot prezenta de relațiile următoare;

$$U_1^* = U_1 e^{j\varphi_{u1}} = U_1 e^{j(\varphi_{u1} + \delta)}, Z = Z e^{j\varphi_z} \text{ și } Z = \sqrt{R^2 + X^2} = X \sqrt{1 + \frac{R^2}{X^2}}; \varphi_z = \arctg \frac{X}{R}, \text{ unde } R, X$$

- valorile rezistenței active și inductive longitudinal ale liniei de interconexiune ce asigură legătura nodurilor SEE1 și SEE2.

La îndeplinirea condiției $U_1 = U_1' = U_2 = U$ (egalitatea valorilor modulelor tensiunilor în nodurile circuitului analizat) precum considerând că $\varphi_{u1} = const, \varphi_{u2} = const, \varphi_z = const$, se obține din Ec. (2) următoare formulă pentru calcularea curentului în linia de interconexiune pentru $\delta = 0$:

$$I = \frac{U}{Z} (e^{j(\varphi_{u1}' - \varphi_z)} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)}) = \frac{U}{Z} (e^{j(\varphi_{u1} - \varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2} - \varphi_z)}) = I_b (K_{\varphi_{u1}} e^{j\delta} - K_{\varphi_{u2}}) \quad (3)$$

unde: I_b curentul în linia de interconexiune pentru condițiile formulate. Vom considera ca valoarea curentului pentru aceste condiții este o mărime de bază pentru introducerea

sistemului de unități relative; $K_{\varphi_{u1}} = e^{j(\varphi_{u1}-\varphi_z)} = \cos(\varphi_{u1}-\varphi_z) + j \sin(\varphi_{u1}-\varphi_z)$; $K_{\varphi_{u2}} = e^{j(\varphi_{u2}-\varphi_z)} = \cos(\varphi_{u2}-\varphi_z) + j \sin(\varphi_{u2}-\varphi_z)$ - mărimi complexe de parametrii longitudinali ai liniei de interconexiune și de unghiurile φ_{u1} și φ_{u2} a fazorilor tensiunii în nodurile de conexiune a liniei cu SEE1 și SEE2. Considerând ca unități de bază se selectează tensiunea nominală și curentul notat prin I_b , se poate obține următoarea relație de calcul a curentului liniei I^* în unități relative:

$$I^* = K_X^* (e^{j(\varphi_{u1}-\varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2}-\varphi_z)}) \quad (4)$$

unde K_X - reprezintă un coeficient, care are o valoare constantă. Pentru comoditate, vom considera, că valoarea coeficientului în unități relative.

Puterea de schimb în nodurile 1 și 2 în sistemul unităților relative se calculează folosind formulele:

$$\begin{aligned} S_1^* &= U_1^* I^* = (e^{j(2\varphi_{u1}-\varphi_z)} e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2}+\varphi_{u1}-\varphi_z)}); \\ S_2^* &= U_2^* I^* = (e^{j(\varphi_{u1}+\varphi_{u2}-\varphi_z)} e^{j\delta} - e^{j(2\varphi_{u2}-\varphi_z)}), \end{aligned} \quad (5)$$

iar puterea transmisă prin linia de interconexiune ale sistemelor electroenergetice SEE1 și SEE2 se determină din relația:

$$S_{12} = (U_1^* - U_2^*) I^* = U (e^{j(\varphi_{u1}+\delta)} - e^{j\varphi_{u2}}) * I (e^{j(\varphi_{u1}-\varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2}-\varphi_z)}). \quad (6)$$

Considerând că în sistemul de unități relative curentul și tensiunea au valoarea $U^* = I^* = 1$, pentru calcularea puterii aparente transmise prin linia de interconexiune în unități relative va fi valabilă relația următoare:

$$S_{12}^* = (e^{j\varphi_{u1}} e^{j\delta} - e^{j\varphi_{u2}}) * (e^{j(\varphi_{u1}-\varphi_z)} \cdot e^{j\delta} - e^{j(\varphi_{u2}-\varphi_z)}) = e^{j(2\varphi_{u1}-\varphi_z+2\delta)} - 2e^{j(\varphi_{u1}+\varphi_{u2}-\varphi_z+\delta)} + e^{j(2\varphi_{u2}-\varphi_z)}. \quad (7)$$

Din Ec. (8) se obțin relațiile de calcul a puterii transmise prin linia de interconexiune:

$$\begin{aligned} P_{12}^* &= \cos(2\varphi_{u1}-\varphi_z+2\delta) - 2\cos(\varphi_{u1}+\varphi_{u2}-\varphi_z+\delta) + \cos(2\varphi_{u2}-\varphi_z); \\ Q_{12}^* &= \sin(2\varphi_{u1}-\varphi_z+2\delta) - 2\sin(\varphi_{u1}+\varphi_{u2}-\varphi_z+\delta) + \sin(2\varphi_{u2}-\varphi_z). \end{aligned} \quad (9)$$

În baza Ec. (4) - Ec. (9) se calculează valorile curentului I^* , puterilor aparente S_1^* , S_2^* , S_{12}^* , active P_{12}^* și reactive Q_{12}^* .

Zonele de transmisie a puterii

Pentru a obține informații cantitative a procesului de reglare a schimbului de putere dintre două sisteme electroenergetice în regim sincron ne vom folosi de datele inițiale prezentate în lucrarea [5]: $\varphi_{u1} \approx 3^0$, $\varphi_{u2} \approx 70^0$, $U_{nom} = 110$ kV, $x_0 = 0.433$ Ohm / km, $\varphi_z = \arctg \frac{x_0}{r_0} = \arctg \frac{0.433}{0.428} = \arctg(1.011) \approx 45^0$. Parametrii corespund liniei de interconexiune

LEA 110 kV a sistemelor electroenergetice a Republicii Moldova și României. În Figura 3 se prezintă rezultatele calculului dependenței de unghiul δ a puterii și componentelor puterii a (active și reactive) prin linia de interconectare a două sisteme electroenergetice, care funcționează în regim sincron.

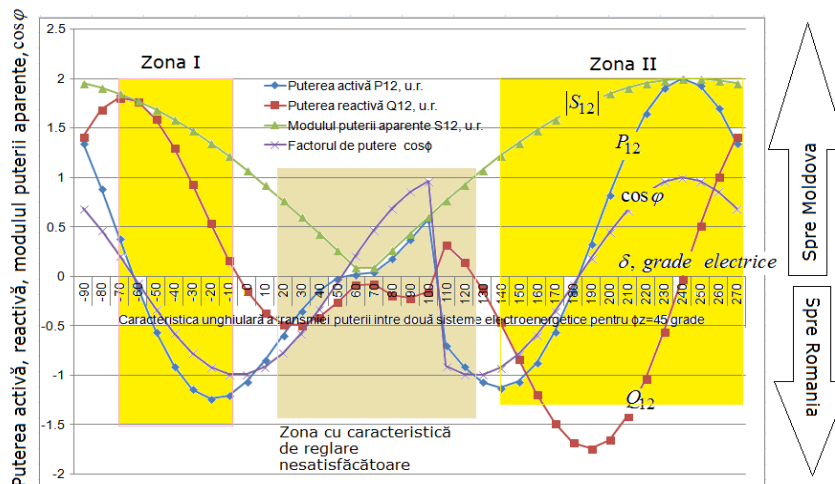


Figura 3. Zonelor de schimb bidirecțional de putere prin LEA 110 kV a sistemelor electroenergetice ale Republicii Moldova și României la reglarea unghiului diferenței de fază δ

Concluzii

Analiza particularităților reglării schimbului de putere între două sisteme electroenergetice indică la complexitatea procesului și necesitatea de a studia de fiecare dată caracterul acestor procese, în caz că se dorește de a asigura regimul bidirecțional de schimb de putere.

Referințe:

Articole în reviste:

1. KALININ, L.P., ZAYTSEV, D.A., TYRSHU M.S., GOLUB, I.V. Characteristics of a phase-shifting transformer made according to the "polygon". *Problemele energeticii regionale*, 3 (35) 2017, pp.1-8. ISSN 1857-0070. DOI:10.5281/zenodo.1188531
2. POSTOLATY, V., BERZA, V., BYKOVA, E., BOSNEAG, V., SUSLOV, V., ERMURACHI I.U., GRIGORAS, G.H., GAVRILAS, M., ISTRATE, M. Estimation of Power Exchange through 110 kV Overhead Power Lines at the Interface of the Romanian and Moldovan Power Systems. *Problemele energeticii regionale*

Articole în culegerile conferințelor:

3. POSTOLATI, V., BYCOVA, E., BERZAN, V. Compact and Controllable Electric Lines. In: *Proceedings of the 12th edition of the International Conference on Electromechanical and Energy Systems*, SIELMEN 2019 –. Chișinău, 9-11 October 2019. DOI: [10.1109/SIELMEN.2019.8905859](https://doi.org/10.1109/SIELMEN.2019.8905859).

Referințe Web:

4. LARSSON, Mats, (ABB Switzerland), SANTOS, Luis-Fabiano (ABB Switzerland), ANTONOVA, Galina (ABB Canada). Monitoring and control of low-frequency oscillations in power systems with FACTS / HVDC based on synchronized vector measurements. [online] [accesat 12.11.2019]. <https://docplayer.ru/125564076-Monitoring-i-upravlenie-nizkochastotnymi-kolebaniyami-venergosistemah-s-facts-hvdcna-osnove-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmereniy.html2>

Reglementări legale și legi, organizații:

5. STRATEGIA ENERGETICĂ a Republicii Moldova până în anul 2030. [online] [accesat 10.11.2019]. <http://lex.justice.md/md/346670/>