

MODELAREA ELEMENTELOR FLEXIBILE ÎN REȚELELE ELECTRICE

Autor: Tudor Radilov

Conducător științific: prof. univ. Ion Stratan

Abstract: În acest articol este prezentată modalitatea de modelare a compensatorului static de putere reactivă (SVC) și a compensatorului serie constituit din condensatoare comandate prin intermediul tiristoarelor (CSCT) în regim permanent de funcționare al rețelei electrice. În modelele propuse drept variabilă de stare suplimentară a fost ales unghiul de amorsare al tiristoarelor. În scopul validării eficienței de aplicare a modelelor considerate s-a aplicat metoda Newton-Raphson pentru calculul regimului permanent al rețelei electrice care include elementele flexibile sus-menționate.

Cuvinte cheie: elemente flexibile, SVC, CSCT, Newton-Raphson, unghi de amorsare al tiristorului, reglarea tensiunii, capacitate de transport, sistem electroenergetic.

În prezent societățile de electricitate din majoritatea țărilor lumii se confruntă cu un șir de probleme privind funcționarea sistemului electroenergetic (SEE), cum ar fi:

1. Capacitatea de transport redusă a actualelor rețele electrice, ceea ce limitează posibilitatea de satisfacere a cerințelor impuse de piața energiei electrice reieșind din condițiile de alimentare fiabilă cu energie electrică a consumatorilor;

2. Gradul redus de gestionare al rețelelor electrice și un volum redus al instalațiilor de reglare a tensiunii în nodurile rețelei electrice și a puterii reactive în laturile ei. În rezultat apare pericolul de majorare a tensiunii în nodurile rețelei până la valori periculoase în perioada sezonieră de micșorare a sarcinii;

3. Distribuția neoptimală a circulațiilor de putere prin liniile electrice paralele cu tensiuni nominale diferite în rețelele neomogene, ceea ce condiționează utilizarea irațională a rețelelor electrice existente și majorarea pierderilor de energie electrică în rețea;

4. Dificultăți crescânde pentru obținerea dreptului de traversare a unor zone, sau așa-numita criză de coridoare.

Soluționarea acestui set de probleme într-un mod optim și complex poate fi realizată prin utilizarea unei tehnologii noi, numită sistem flexibil de curent alternativ. Acest termen derivă din limba engleză, succind fiind numit FACTS (Flexible AC Transmission systems). Sistemele flexibile sunt constituite din convertoare sau ventile comandate și elementele inductiv sau capacitiv de înmagazinare a energiei câmpului electromagnetic.

Toate instalațiile FACTS pot fi clasificate în trei grupuri:

1) Instalații FACTS conectate în derivație. Aceste instalații includ compensatoare statice de putere reactivă (SVC), compensatorul static de putere reactivă avansat (STATCOM);

2) Instalații FACTS conectate în serie. Aceste instalații includ compensatorul serie cu condensatoare comandate prin intermediul tiristoarelor (CSCT), compensatorul serie avansat;

3) Instalații FACTS avansate. Ele cuprind regulatorul unificat pentru controlul fluxurilor de putere (UPFC).

Astfel există un șir întreg de instalații FACTS care se deosebesc după menirea sa, principiile de funcționare și componența utilajului principal. Însă la baza funcționării tuturor instalațiilor FACTS stau principiile comune de compensare longitudinală și/sau transversală.

Alegerea și amplasarea elementelor FACTS se face în baza condițiilor impuse regimului permanent de funcționare al rețelelor electrice. Reieșind din aceste considerente scopul propus în acest articol presupune modelarea a două elemente FACTS diferite pentru funcționarea rețelei în regim permanent.

1. Modelarea compensatorului static de putere reactivă.

De regulă SVC se reprezintă printr-o admitanță variabilă. În figura 1 este ilustrată posibilitatea de reprezentare combinată SVC - transformator de putere.

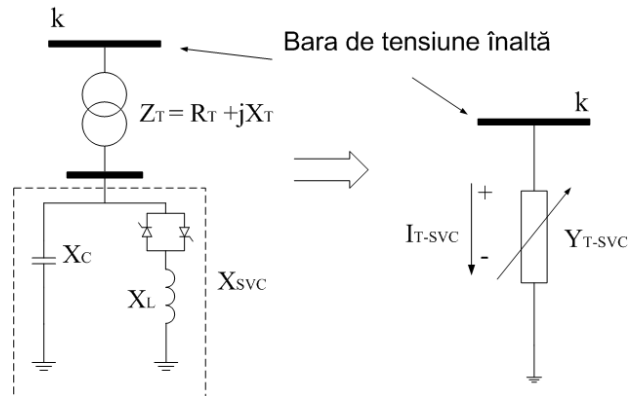


Figura 1 - Schema echivalentă SVC-transformator de putere.

Admitanța echivalentă a modelului prezentat care include unghiul de amorsare al tiristoarelor poate fi determinată în baza relației de mai jos.

$$Y_{T-SVC(\alpha_{SVC})} = \frac{Y_T \cdot Y_{SVC}}{Y_T + Y_{SVC}}, \quad (1)$$

unde: Y_T reprezintă admitanța transformatorului de putere, iar Y_{SVC} constituie admitanța compensatorului static de putere reactivă.

$$Y_{T-SVC(\alpha_{SVC})} = G_{T-SVC} - jB_{T-SVC}, \quad (2)$$

unde: G_{T-SVC} - conductanța echivalentă SVC-transformator de putere, iar B_{T-SVC} - susceptanța echivalentă SVC-transformator de putere.

$$G_{T-SVC} = \frac{R_T}{R_T^2 + X_{Ec}^2}, \quad (3)$$

$$B_{T-SVC} = \frac{X_{Ec}}{R_T^2 + X_{Ec}^2}, \quad (4)$$

$$X_{Ec} = X_T + X_{SVC}, \quad (5)$$

$$X_{SVC} = \frac{X_C \cdot X_{BCT}}{X_C - X_{BCT}}, \quad (6)$$

unde: X_C - reactanța bateriei de condensatoare, X_{BCT} - reactanța bobinei comandate prin intermediul valvei bidirecționale, constituită din tiristoare.

$$X_{BCT} = \frac{\pi \cdot X_L}{2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})}, \quad (7)$$

unde: X_L - reactanța bobinei, α_{SVC} - unghiul de amorsare al tiristoarelor.

De obicei calculul regimului permanent de funcționare al rețelei electrice se efectuează în baza algoritmului Newton-Raphson, grație caracteristicilor de convergență rapidă a acestei metode. Privind faptul că instalarea sistemelor flexibile într-o rețea electrică va determina modificarea acestei rețele, reiese că și matricea Iacobi își va modifica componența.

Ecuatiile de bilanț liniarizate, ce corespund compensatorului static de putere reactivă la pasul i al procesului iterativ vor avea aspectul:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & V_k^2 \frac{\partial G_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} \\ 0 & -V_k^2 \frac{\partial B_{T-SVC}}{\partial \alpha_{SVC}} \end{bmatrix}^{(i)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Menirea SVC constă în reglarea tensiunii într-un nod anumit al rețelei electrice. Pentru a atinge acest scop se impune valoarea dorită a tensiunii în nodul dat al rețelei și în urma procesului iterativ de calcul, în baza modelului propus se precizează valoarea unghiului de amorsare al tiristoarelor pentru care se va menține această valoare a tensiunii în nodul rețelei.

La sfârșitul iterației i unghiul $\alpha_{SVC}^{(i)}$ se va modifica în baza relației de mai jos.

$$\alpha_{SVC}^{(i)} = \alpha_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(i)}. \quad (9)$$

2. Modelarea compensatorului serie constituit din condensatoare comandate prin intermediul tiristoarelor

În figura 2 este prezentată schema unui modul al instalației cu condensatoare serie controlate prin intermediul tiristoarelor.

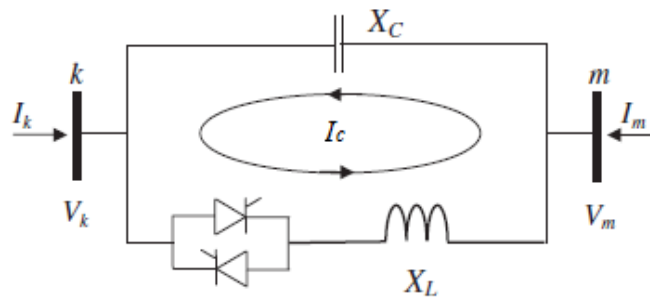


Figura 2 – Schema de principiu a modului ce intră în componența CSCT.

Analogic compensatorului de putere reactivă, în calcule CSCT poate fi reprezentat prin intermediul unei reactanțe variabile. Schema echivalentă a CSCT este ilustrată în figura 3.

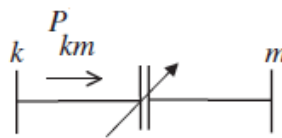


Figura 3 – Schema echivalentă a CSCT.

Modelul CSCT prezentat în acest articol se bazează pe conceptul reactanței variabile conectate în serie cu reactanța liniei electrice în care este instalat compensatorul. Valoarea reactanței compensatorului va fi ajustată în mod automat pentru a limita puterea transmisă prin linie la o valoare specificată.

Reactanța CSCT care ia în considerație unghiul de amorsare al tiristoarelor poate fi determinată cu ajutorul relației:

$$X_{CSCT} = -X_C + C_1 \cdot \left[\frac{2}{\pi} (\pi - \alpha_{CSCT}) + \sin \left[(\pi - \alpha_{CSCT}) \right] \right] C_2 \cos^2 (\pi - \alpha_{CSCT}) \cdot \left[\frac{2}{\pi} \tan \left[(\pi - \alpha_{CSCT}) \right] - \tan (\pi - \alpha_{CSCT}) \right] \quad (10)$$

$$C_1 = \frac{X_C + X_{LC}}{\pi}, \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{4X_{LC}^2}{\pi \cdot X_L}, \quad (12)$$

$$X_{LC} = \frac{X_C \cdot X_L}{X_C - X_L}, \quad (13)$$

$$\varpi = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad (14)$$

Ecuatiile de bilanț pentru CSCT la bara „k” au aspectul:

$$\begin{aligned} P_k &= V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) \\ Q_k &= -V_k^2 \cdot B_{kk} - V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) \end{aligned} \quad (15)$$

În ecuațiile de bilanț pentru CSCT la bara „m” se vor schimba cu locul indicii k și m .

Instalarea compensatorului serie în linia corespunzătoare a rețelei electrice va condiționa modificarea matricii Iacobi, care se va completa cu elementele:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km}^{\alpha_{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_{km}^{\alpha_{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^{\alpha_{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^{\alpha_{TCSC}}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{km}^{\alpha_{TCSC}}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^{\alpha_{TCSC}}}{\partial \alpha_{TCSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \alpha_{TCSC} \end{bmatrix},$$

Privind faptul că unghiul de amorsare al tiristoarelor constituie o variabilă suplimentară, a fost necesară introducerea unei noi ecuații de bilanț.

$$\Delta P_{km}^{(\alpha_{CSCT})} = P_{km}^{imp} - P_{km}^{(\alpha_{CSCT}),calc}, \quad (16)$$

unde: P_{km}^{imp} - fluxul de putere activă impus la începutul liniei în care este instalat CSCT, iar $P_{km}^{(\alpha_{CSCT}),calc}$ - fluxul de putere activă calculat din aceeași linie.

Rezultatele calculului efectuate pentru o rețea electrică neomogenă cu tensiuni nominale diferite care include instalațiile FACTS descrise mai sus sunt prezentate în anexă.

Concluzii:

1. Elementele FACTS asigură o operațiune mai flexibilă și mai fiabilă a SEE;
2. Grație sistemelor flexibile apare posibilitatea gestionării circulațiilor de putere prin liniile electrice paralele cu tensiuni nominale diferite, asigurând funcționarea rațională a actualelor rețele electrice;
3. Instalațiile FACTS sunt capabile să asigure reglarea fină și precisă a tensiunii în nodurile rețelei și majorarea capacității de transport a liniilor electrice.

Bibliografie:

1. Eremia, M. *Tehnici noi în transportul energiei electrice. Aplicații ale electronicii de putere*. Editura Tehnică, București, 1997.
2. Hingorani, N., Gyugyi, L. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 1999.
3. Ivachin, V. *Issledovanie haracteristic upravleaemoi prodolinoi compensații cac ustroistva dlea regulirovania potocov moșinosti ghibchih linii electropredaci peremennogo toca*. Electrotehnica, №6, 2003.

ANEXA A

Modelele instalațiilor FACTS prezentate în articol au fost utilizate pentru calculul regimului permanent al unei rețele electrice neomogene cu tensiuni nominale diferite. Schema de principiu a rețelei propuse este prezentată în figura A1.

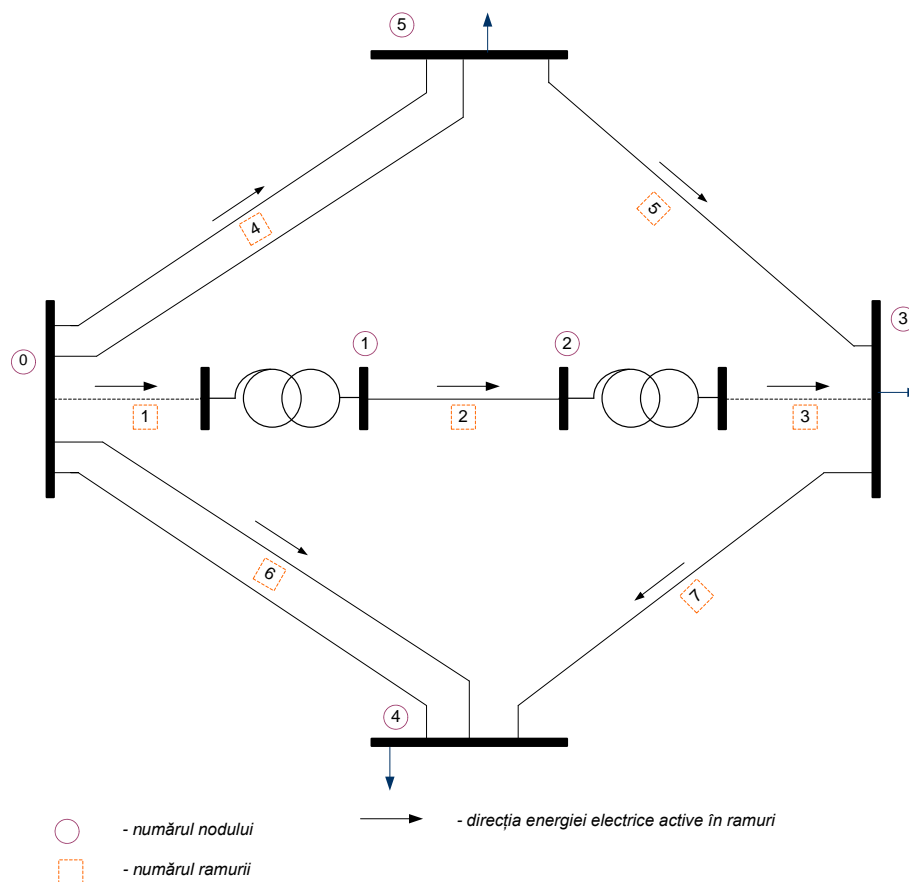


Figura A1 – Schema de principiu a rețelei electrice analizate 330/110 kV.

În tabelul 1 este inclusă informația privind puterile generate și consumate în nodurile rețelei electrice.

Tabelul A1 – Puterile generate și consumate în nodurile rețelei

<i>Numărul nodului</i>	<i>P, MW</i>	<i>Q, MW</i>
0	491,2	161,9
1	0	0
2	0	0
3	-280	-26
4	-105	-50,9
5	-80	-38,7

Parametrii pasivi ai rețelei electrice sunt prezentați în tabelul 2.

Tabelul A2 – Parametrii pasivi ai rețelei

<i>Numărul laturii</i>	<i>R, Ω</i>	<i>X, Ω</i>
1	0,0925	3,47
2	9,8	65
3	0,0925	3,47
4	10,5	20,5
5	27,675	39,915
6	7,65	17,73
7	29,7	44,88

În tabelul 3 sunt prezentate rezultatele calculului regimului permanent de funcționare al rețelei electrice analizate în lipsa sistemelor flexibile.

Tabelul A3 – Valorile tensiunilor în nodurile rețelei electrice

Parametrul	Numărul nodului				
	1	2	3	4	5
U, kV	344,401	324,098	108,733	105,020	105,980
δ , rad	-0,0621	-0,2026	-0,2725	-0,1561	-0,1521

Schema de principiu a rețelei electrice cu SVC este prezentată în figura A2.

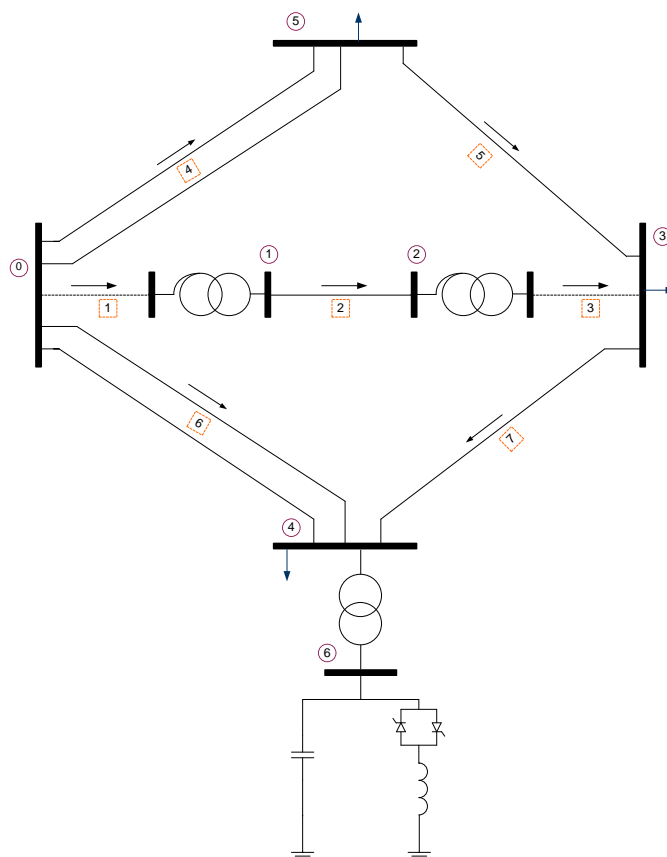


Figura A2 – Schema de principiu a rețelei electrice analizate 330/110 kV cu SVC.

În tabelul 4 sunt prezentate rezultatele calculului regimului permanent de funcționare al rețelei electrice analizate în nodul 4 al căreia este instalat SVC.

Tabelul A4 – Valorile tensiunilor în nodurile rețelei electrice

Parametrul	Numărul nodului				
	1	2	3	4	5
U, kV	345,169	326,845	109,924	110	106,426
δ , rad	-0,0616	-0,2005	-0,2687	-0,1691	-0,1508

Schema de principiu a rețelei electrice cu CSCT este prezentată în figura A3.

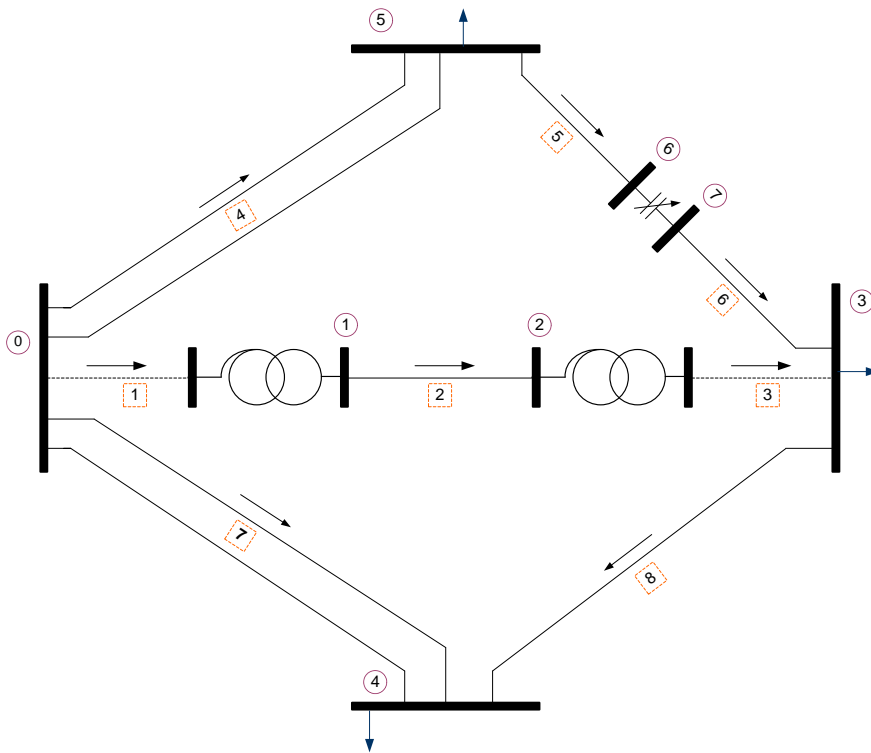


Figura A3 – Schema de principiu a rețelei electrice analizate 330/110 kV cu CSCT. CSCT instalat în linia 5 a permis tranzitarea unui flux de putere activă prin linia dată cu 15% mai mare decât în lipsa compensatorului serie.