

利用附加节点注入电流法设计静止同步 串联补偿器的潮流控制器

赵建军, 郭剑波, 周孝信

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

USING THE METHOD OF INJECTING CURRENT FROM ADDITIONAL NODES FOR MODELING AND SIMULATION OF SSSC POWER FLOW CONTROLLER

ZHAO Jian-jun, GUO Jian-bo, ZHOU Xiao-xin

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: This paper investigates a model of SSSC (Static Synchronous Series compensator) in Newton power flow analysis in PSASP (Power system analysis software package). The model considers characteristic of injected voltage and control constraints of SSSC. Based on the Nordon's theorem, the SSSC is equaled to injecting current into the additional nodes. By modifying the admittance matrix through additional nodes and modifying Jacobin matrix by additional injection quantity, the key problem of developing a suitable model of SSSC for power flow calculation in bulk power grid is resolved. By using the UD (User Defined) and UPI (User Program Interface) function provided by PSASP, the SSSC can be simulated to provide both capacitive and inductive compensation by injecting current model. Simulation results based on EPRI-7 system are presented to demonstrate the performance of SSSC power flow model. The satisfactory steady state performance also shown SSSC has more effective regulation ability than TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) even in low power flow conditions.

KEY WORDS: Power system; Static synchronous series compensator(SSSC); Power flow; Modeling; Steady state performance

摘要: 从静止同步串联补偿器(SSSC)的原理和特性出发,分析了其稳态特性和数学模型,研究对比了SSSC及其它FACTS装置潮流建模的方法,通过分析节点导纳矩阵和雅可比矩阵的修正,提出了利用附加节点注入电流法建立SSSC潮流模型的方法,并分析了此方法的优点。在电力系统分析综合程序PSASP中,利用用户接口程序实现了SSSC

的潮流建模,结合开发的潮流控制模块,解决了含SSSC装置的大系统仿真问题。在EPRI-7节点系统的分析计算中,验证了理论分析的正确性和SSSC潮流模型的控制作用。并与相同控制条件下TCSC特性作了比较,结果表明:SSSC能够以更小的输出功率实现相同的控制效果,而且在小功率情况下,SSSC的优势更加明显。

关键词: 电力系统; 静态同步串联补偿器; 潮流; 建模; 稳态特性

1 引言

潮流计算是电力系统分析的基础,也是系统运行、规划和控制的基础^[1]。我国电网的规模和复杂程度日益增加,越来越多的FACTS装置将在电网中得到应用^[2]。

静态同步串联补偿器(SSSC)是基于可关断器件的新一代可控串联补偿技术^[3-5]。SSSC通过在线路中串联注入幅值可调、相角与线路电流相角正交的电压量来调节线路输送功率,相当于可控电压源,实现了对系统元件的纵向控制。SSSC对电压及相角有较好的控制作用,对潮流的控制能力强,可以改变潮流的大小及方向。文献[3-9]着重于SSSC数学模型的建立和稳态特性的分析,没有进行潮流建模计算。文献[10-12]对UPFC、TCPS等装置的潮流计算进行了分析,提出了基于注入功率的交替求解方法。文献[13]提出了串联补偿设备的注入模型方程,文献[14]利用UPFC潮流计算中的注入模型,提出了利用UPFC优化潮流控制的方法。X.P. Zhang在文献[13,15]中对IPFC、GUPFC的潮流建模及优

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477055)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50477055).

化进行了分析研究,提出了 IPFC 模块在潮流计算中的数学模型。文献[16]对基于 VSC 的轻型直流的潮流计算进行了研究。文献[17]将 HVDC 和 FACTS 装置的有功功率和无功功率转换为与电压相关的负荷,建立了含 HVDC 和 FACTS 装置混合电力系统的潮流计算模型。文献[18]将 UPFC 对潮流的控制作用转移到线路两端的节点上,利用注入功率方法实现潮流计算。

本文从 SSSC 的基本原理和特性出发,分析其稳态特性和数学模型。通过分析 SSSC 注入电压对节点功率的影响以及牛顿法潮流计算中导纳阵和雅可比矩阵的修正,提出附加节点注入模型,使修正计算量更小。本文在理论分析的基础上利用电力系统分析计算软件包——PSASP,基于程序中提供的 UD/UI 用户接口功能,开发了 SSSC 的潮流计算模块及相应的控制模块,通过在 EPRI-7 节点系统的计算证明了此程序模块可实现 SSSC 的潮流控制功能,解决了含 SSSC 装置的大规模电力系统的分析计算问题,通过与 TCSC 模型的比较验证了 SSSC 控制的能力和效率。

2 SSSC 的基本原理和传输特性

静态同步串联补偿器通过在线路中串联一个幅值可调且相角与线路电流相角差 90° 的电压量来调节线路输送功率,抑制功率振荡及电压振荡等^[1-2],其原理接线见图 1。

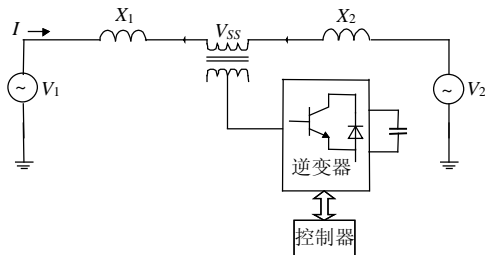


图 1 SSSC 原理接线图

Fig. 1 Single line diagram of SSSC

SSSC 注入电压 V_{SS} 相当于一个可控无功电压源,其幅值控制不受线路电流影响。容性补偿时,注入电压滞后线路电流 90° ,感性补偿时,注入电压超前线路电流 90° ,其相量图见图 2。SSSC 可以在保持线路功角差的前提下,灵活地控制线路输送功率,提高系统稳定性。其功角特性为:

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin d}{x_1 + x_2} \left(1 - \frac{V_{SS}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos d}} \right) \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos d)}{x_1 + x_2} \left(1 - \frac{V_{SS}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos d}} \right) \quad (2)$$

加入 V_{SS} 后线路电流相角不变,幅值发生变化为加入 V_{SS} 前为 $I = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos d} / (x_1 + x_2)$

加入 V_{SS} 后为 $I = \frac{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos d}}{x_1 + x_2} - \frac{V_{SS}}{x_1 + x_2}$

因此,SSSC 也相当于给线路附加了一个电流值,改变了线路的等值阻抗,从而使线路电流增加,这个基本特性也是潮流建模的基础。图 3 为 SSSC 功角特性曲线,注入电压 V_{SS} 的改变可以改善功角特性、增加系统输送容量、提高系统稳定性。

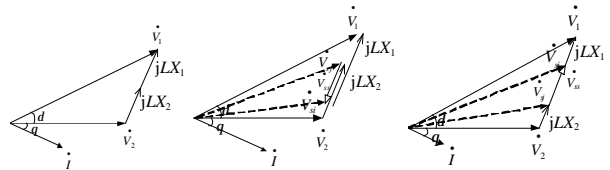


图 2 SSSC 系统相量图

Fig. 2 Vector diagram of SSSC

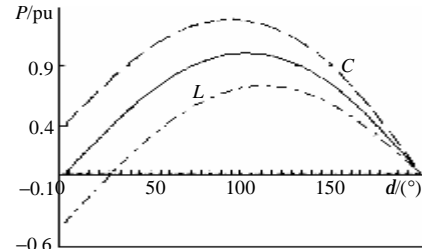


图 3 SSSC 功角特性曲线

Fig. 3 SSSC Transmission characteristics

3 含 SSSC 系统的潮流计算

SSSC 是对线路纵向元件的补偿,但与 TCSC 不同,它不是直接通过改变支路参数来实现控制目的,而是要在程序中体现注入电压的控制效果。本文提出了附加节点修正系统节点导纳阵以及附加注入量修正功率方程的方法,较好地解决了这个问题。

(1) 节点导纳阵的修正

假设 SSSC 安装于线路首端,如图 4 所示,在支路 ij 中附加节点 ic 和 jc , y_{ss} 为考虑串联变压器以及 SSSC 逆变回路损耗的导纳值。

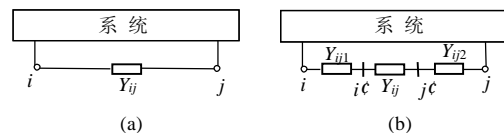


图 4 支路附加节点修正节点导纳矩阵

Fig. 4 The admittance matrix is modified by adding two additional nodes in the transmission line

新增的 2 个节点只与节点 i, j 关联,导纳矩阵不会有大的修正量。考虑 SSSC 后,节点导纳矩阵修正为

$$Y'_B = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} & 0 & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y'_{ii} & \cdots & 0 & \cdots & Y_{in} & Y_{ii'} & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots & 0 & \cdots & Y'_{jj} & \cdots & Y_{jn} & 0 & Y_{jj'} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & Y_{i'i} & \cdots & 0 & \cdots & 0 & Y_{i'i'} & Y_{i'j'} \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & Y_{j'j} & \cdots & 0 & Y_{j'i'} & Y_{j'j'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中，修正值为

$$\begin{aligned} Y'_{ii} &= Y_{ii} - y_{ij} + y_{ij1}; & Y'_{jj} &= Y_{jj} - y_{ij} + y_{ij2}; \\ Y_{i'i} &= Y_{i'i} = -y_{ij1}; & Y_{j'j} &= Y_{j'j} = -y_{ij2}; \\ Y_{i'i'} &= y_{ij1} + y_{ss}; & Y_{j'j'} &= y_{ij2} + y_{ss}; \\ Y_{i'j'} &= Y_{j'i'} = y_{ss} \end{aligned}$$

(2) 功率方程

以极坐标形式表示的节点注入功率方程为

$$\begin{cases} P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j=1, j \neq i}^n V_j (G_{ij} \cos d_{ij} + B_{ij} \sin d_{ij}) \\ Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j=1, j \neq i}^n V_j (G_{ij} \sin d_{ij} - B_{ij} \cos d_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

加入 SSSC 后，存在注入电压 $V_{ss} \angle q_{ss}$ ，除节点 i 和 j 外，其余节点功率方程不变， i 和 j 的功率方程为

$$\begin{cases} P_i = V_i^2 G_{i'i'} + V_i [V_i (G_{i'i} \cos d_{i'i} + B_{i'i} \sin d_{i'i}) + V_j (G_{i'j} \cos d_{i'j} + B_{i'j} \sin d_{i'j}) + V_i V_{ss} [G_{i'j} \cos(d_{i'} - q_{ss}) + B_{i'j} \sin(d_{i'} - q_{ss})]] \\ P_j = V_j^2 G_{j'j'} + V_j [V_j (G_{j'j} \cos d_{j'j} + B_{j'j} \sin d_{j'j}) + V_i (G_{j'i} \cos d_{j'i} + B_{j'i} \sin d_{j'i}) + V_j V_{ss} [G_{j'i} \cos(d_{j'} - q_{ss}) + B_{j'i} \sin(d_{j'} - q_{ss})]] \\ Q_i = -V_i^2 B_{i'i'} + V_i [V_i (G_{i'i} \sin d_{i'i} - B_{i'i} \cos d_{i'i}) + V_j (G_{i'j} \sin d_{i'j} - B_{i'j} \cos d_{i'j}) + V_i V_{ss} [G_{i'j} \sin(d_{i'} - q_{ss}) - B_{i'j} \cos(d_{i'} - q_{ss})]] \\ Q_j = -V_j^2 B_{j'j'} + V_j [V_j (G_{j'j} \sin d_{j'j} - B_{j'j} \cos d_{j'j}) + V_i (G_{j'i} \sin d_{j'i} - B_{j'i} \cos d_{j'i}) + V_j V_{ss} [G_{j'i} \sin(d_{j'} - q_{ss}) + B_{j'i} \cos(d_{j'} - q_{ss})]] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{i'j'} = V_i^2 G_{i'i'} + V_i V_j (G_{i'j} \cos d_{i'j} + B_{i'j} \sin d_{i'j}) + V_i V_{ss} [G_{i'j} \cos(d_{i'} - q_{ss}) + B_{i'j} \sin(d_{i'} - q_{ss})] \\ Q_{i'j'} = -V_i^2 B_{i'i'} + V_i V_j (G_{i'j} \sin d_{i'j} - B_{i'j} \cos d_{i'j}) + V_i V_{ss} [G_{i'j} \sin(d_{i'} - q_{ss}) - B_{i'j} \cos(d_{i'} - q_{ss})] \end{cases} \quad (6)$$

式中 V_i 、 V_j 、 $V_{i'}$ 、 $V_{j'}$ 为相应节点电压； G_{ij} 、 B_{ij} 为支路 ij 的电导和电纳； P_i 、 Q_i 为节点 i 输出有功和无功功率； P_{ij} 、 Q_{ij} 为支路 ij 的有功和无功功率； d_i 、 d_j 为节点 i 、 j 的电压相角； V_{ss} 、 q_{ss} 为注入电压的幅值和相角。

由式(6)可知， $P_{i'j'} = P_{i'j'(0)} + \Delta P_{i'j'}$ ； $Q_{i'j'} = Q_{i'j'(0)} + \Delta Q_{i'j'}$ 。其中， $P_{i'j'(0)}$ 为未加补偿时线路的潮流， $\Delta P_{i'j'}$ 为加入补偿后线路潮流的增量，如式(7)所示。

$$\begin{aligned} \Delta P_{i'j'} &= V_i V_{ss} [G_{i'j'} \cos(d_{i'} - q_{ss}) + B_{i'j'} \sin(d_{i'} - q_{ss})] \\ \Delta Q_{i'j'} &= V_i V_{ss} [G_{i'j'} \sin(d_{i'} - q_{ss}) - B_{i'j'} \cos(d_{i'} - q_{ss})] \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 修正雅可比矩阵

注入电压后的牛拉法修正方程式见附录。

SSSC 的作用体现在式(8)中的最后 4 行和 4 列， ΔP_{iqc} 、 ΔQ_{iqc} 分别为有功、无功功率的控制部分。其中 $\Delta P_{i'j'} = P_{i'j'} - P_{ij}^{ref}$ ， $\Delta Q_{i'j'} = Q_{i'j'} - Q_{ij}^{ref}$ 。

式(8)中增加了 q_{ss} 和 V_{ss} 两个状态变量，其中 q_{ss} 是随线路电流变化而变化的量，如果线路电流为 $I \angle q_{ij}$ ，则 $q_{ss} = q_{ij} \pm 90^\circ$ 。

潮流计算的约束条件为

$$\begin{aligned} V_{ss \min} &\leq V_{ss} \leq V_{ss \max} \\ q_{ss} &= q_{ij} \pm 90^\circ, \quad -\pi \leq q_{ij} \leq \pi \end{aligned}$$

V_{ss} 的大小受直流侧控制模块的控制，以 d - q 坐标系表示的 SSSC 输出电压为

$$\begin{aligned} V_{sd} &= m v_{dc} \cos d_{ss} \\ V_{sq} &= m v_{dc} \sin d_{ss} \end{aligned}$$

式中 m 表示 SSSC 直流侧电压与交流侧电压幅值的关系系数，在 SPWM 中， m 为调制系数； d_{ss} 表示 SSSC 控制信号的相角。

线路 ij 的潮流控制约束条件为

$$P_{ij} = P_{ij}^{ref}$$

4 PSASP 中 SSSC 潮流计算模型的开发

4.1 附加节点等值电流法

SSSC 向受控线路中纵向注入电压量，程序实现时将注入电压等值为两侧节点的注入电流。附加节点注入电流法在被补偿线路上增加 2 个节点，将等值注入电流通过这 2 个节点注入到系统中，线路 $L_{i'j'}$ 的阻抗 z_s 考虑了耦合变压器漏抗及逆变回路损耗，见图 5。

将 SSSC 注入电压等值为节点 i' 和 j' 的注入电流 I_{SS} ，其相角跟随线路电流相角，如式(9)所示。

$$I_{SS} = \frac{\pm k}{(r_s^2 + x_s^2) |I_l|} [x_s I_l^{(R)} - r_s I_l^{(I)} + j(x_s I_l^{(I)} + r_s I_l^{(R)})] \quad (9)$$

式中 r_s 、 x_s 为串联变压器及 SSSC 直流回路的等值电阻和电抗； $|I_l|$ 、 $I_l^{(R)}$ 、 $I_l^{(I)}$ 分别为线路电流的模值、实部和虚部； k 为比例系数； \pm 号表示容性或感性补偿。

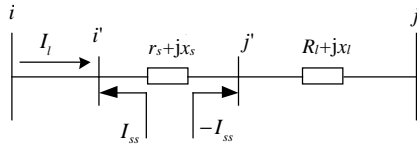


图5 附加接节点等值电流法

Fig. 5 The injection current scheme of SSSC by adding two additional nodes

为了保证 SSSC 等值注入电流不受线路电流幅值变化的影响，在式(9)中除以线路电流模值。采用附加节点法后，线路 L_{ij} 通过的电流 I_{ig} 是线路 L_{ij} 的电流 I_{ij} 加上附加注入电流。附加注入电流只是在节点 i 和 j 之间构成回路，不直接影响外部电流，从而实现了纵向元件的控制，因其对于节点 i 、 j 相连的其它线路没有直接的影响，因而实现了 SSSC 的控制作用。这个基本方法是 SSSC 稳态及暂态作用分析的起点。

4.2 PSASP 中潮流程序的实现

PSASP 提供了方便的用户接口功能，可以通过用户自定义程序 (UPI) 或用户自定义模型 (UD) 来实现用户需要附加的计算和控制功能。利用 UD 提供的控制元件及与主程序的输入输出接口变量，实现 SSSC 潮流计算 UD 模型的建立^[19-20]。由于 UD 模型与主程序的相对独立性以及易于调用的特点，开发的 SSSC 模型可以很方便地应用于任何规模系统的分析计算中。图 6 为包括潮流控制模块的示意框图。

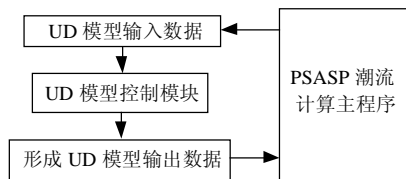


图6 SSSC 潮流控制框图

Fig. 6 The power flow control frame of SSSC

采用上面分析的等值注入电流法，以 EPRI-7 节点系统为算例，开发的 UD 模型在潮流计算中实现了 SSSC 控制线路潮流的功能，通过注入与线路电流正交的电压量 (超前或滞后)，实现对线路的容性和感性补偿，增加或减小线路电流。

EPRI-7 节点系统构成见图 7，由 2 台发电机通过双回交流线路以及一回直流线路与无穷大系统相连，在 L_1 靠近节点 B_1-500 侧加装 SSSC 装置，控制

L_1 的潮流。

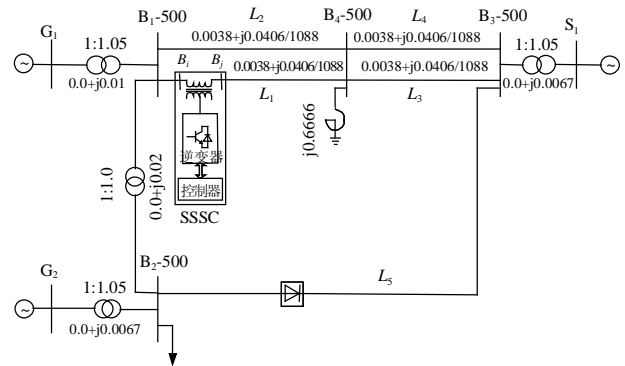


图7 加装 SSSC 补偿装置的 EPRI-7 节点系统

Fig. 7 The EPRI-7 nodes power system with SSSC

4.3 算例分析

(1) 算例 1 容性补偿

线路 L_1 有功功率的控制目标是 1000MW。仿真计算结果见图 8、9，图中所示各值均为标么值。

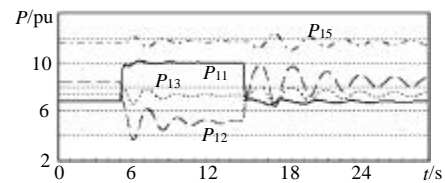


图8 SSSC 对线路功率的控制作用

Fig. 8 The power flow control by SSSC

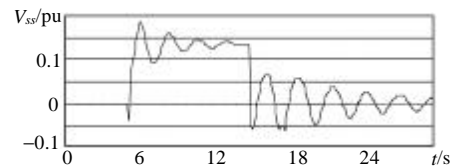


图9 SSSC 的注入电压

Fig. 9 The injection voltage of SSSC

从潮流计算结果可以看出，SSSC 对补偿线路的有功功率控制是迅速、准确的。通过 SSSC 的控制作用可以实现 L_1 和 L_2 上的潮流可控分配。注入电压 V_{ss} 的标么值最大达到 0.19，稳定在 0.14。可以将线路功率从初始的 680MW 提高到 1000MW 的控制目标值，输送功率增加了 47%，SSSC 的注入功率为 195Mvar。

图 10(a) 为 SSSC 引起的相关节点电压相量的变化，横、纵坐标分别为电压的实部和虚部，投入 SSSC 后不但输送功率增加，而且线路 L_1 首、末端电压 $V_{B1} \sim V_{B4}$ 的相角差由 19.97° 减小为 11.47° 。图 10(b) 为 L_1 各节点间电压差相量， $V_1 = V_2 + V_3$ 。由于注入电压的作用，使节点电压 V_{B1-j} 反相，实现了对线路的容性补偿作用，这个分析结果也验证了建模的正确性。

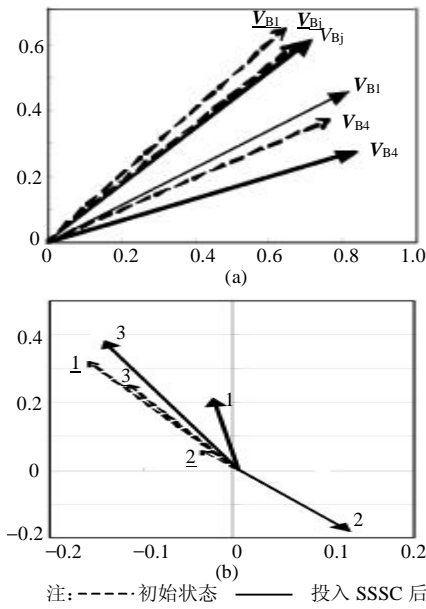


图 10 SSSC 投入对节点电压的影响

Fig. 10 The influence of nodes voltage by SSSC

(2) 算例 2 感性补偿

感性补偿时 SSSC 可以按照目标值实现对线路有功功率的控制，线路功率从 680MW 减小到 500MW，减小了 26.5%，此时 SSSC 输出电压最大值为 0.135，稳定在 0.12，见图 11~12。

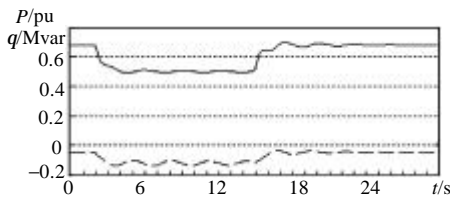


图 11 SSSC 对线路功率的控制作用

Fig. 11 The power flow control by SSSC

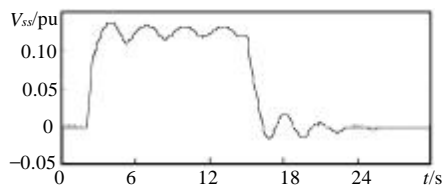


图 12 SSSC 的注入电压

Fig. 12 The injection voltage of SSSC

(3) 算例 3 相同容性补偿效果时，TCSC 的补偿作用

通过潮流计算，TCSC 等值容抗 $x_c = 0.031$ 时， L_1 有功功率可以提高至 1000MW，此时 TCSC 输出无功功率为 280.4Mvar， L_1 首、末端电压的相角差为 12.7° 。因此，达到相同补偿效果时，TCSC 需要的容量比 SSSC 大。

5 结论

本文对 SSSC 控制线路潮流的机理进行了分

析，通过附加节点引入 SSSC 的控制量，减少了节点导纳矩阵及雅可比矩阵的修正量，提出了附加节点注入电流法。在注入电流的处理上，既从线路电流取得相角量，又避免了线路电流幅值对注入电流的影响，体现了 SSSC 控制的独立性。利用广泛使用的电力系统分析软件包 PSASP 解决了大系统计算中对 SSSC 潮流计算建模的要求，并通过 EPRI7 节点算例验证了其正确性。

理论分析表明，SSSC 对线路有功功率的作用不是像 TCSC 一样对线路电抗进行控制，而是通过对相关节点电压幅值及相角的直接改变来实现，这种补偿方式不会改变线路的 r/x 比值，不受线路电流的影响。一定的补偿容量可以产生容性、感性 2 种补偿作用，利用率要高于 TCSC。

潮流计算是电力系统分析的基础，本文提出的方法较好地解决了含 SSSC 装置大规模电网的潮流计算问题，为 SSSC 技术的研究和应用提供了技术保证。附加节点注入电流法同样可用于含 SSSC 系统暂态分析，从而为 SSSC 装置在系统中的稳态和机电暂态特性分析提供了条件，为 SSSC 装置实际应用的系统级研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 电力电子技术发展回顾及研究框架建议[R]. 北京: 国家电网公司, 2004.
- [2] Nabavi-Niaki A, Irvani M R. Steady-state and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1996, 11(4): 1937-1943.
- [3] Kalyan K Sen. SSSC-static synchronous series compensator: theory, modeling, and applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(1): 241-246.
- [4] 赵剑锋, 蒋平, 唐国庆, 等. 基于电压型逆变器的串联型电能质量补偿器与电力系统相互作用的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 75-79.
Zhao Jianfang, Jmng Ping, Tang Guoqing *et al.* Study of interaction between power system and VSI based series power quality compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 75-79.
- [5] Laszlo Gyugyi, Colin D Schauder, Kalyan K San. Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(1): 406-417.
- [6] Mihalič R. Power flow control with controllable reactive series elements[J]. IEE prco., Gener. transm. distrib, 1998, 145(5): 493-498.
- [7] Kalyan K Sen, Eric J Stacey. UPFC-Unified power flow controller Theory, Modelling and Applications[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1453-1460.
- [8] Edvina Uzunovic, Claudio A Canizares, John Reeve. Fundamental frequency model of unified power flow controller[C]. North American Power Symposium (NAPS), San Luis Obispo, California, 1999.
- [9] Sunil Kumar L, Arindam Ghosh. Modeling and control design of a static synchronous series compensator[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(4): 1448-1453.
- [10] Prabha Kundur. Power system stability and control[M]. McGraw-

Hill, Companies, Inc. 1994.

[11] 段献忠, 陈金富, 李晓露. 柔性交流输电系统的潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 195-199.
Duan Xianzhong, Chen Jinfu, Li Xiaolu *et al.* Power flow calculation of flexible AC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 195-199.

[12] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2001, 24(7): 6-9.
Liu Qianjin, Li Xiang, Sun Yuanzhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2001, 24(7): 6-9.

[13] Zhang X P. Modelling of the interline power flow controller and the generalised unified power flow controller in Newton power flow [J]. IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., 2003, 150(3): 268-274.

[14] Noroozian M, Angquist L, Ghandhari M *et al.* Use of UPFC for optimal power flow control[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1629-1634.

[15] Zhang Xiaoping, Edmund Handschin. Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2001, 16(3): 367-373.

[16] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei *et al.* Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 1-5.

[17] 李建华, 方万良, 杜正春, 等. 含 HVDC 和 FACTS 装置的混合电力系统潮流计算方法[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 31-36.
Li Jianhua, Fang Wanliang, Du Zhengchun *et al.* Calculation method of power flow in hybrid power system containing HVDC and FACTS[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 31-36.

[18] 吴捷, 王建. 基于 UPFC 的灵活交流输电潮流控制计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 3-6.
Wu Jie, Wang Jian. The computation of power flow of flexible AC transmission system with UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 3-6.

[19] 电力系统分析综合程序潮流计算用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.

[20] 电力系统分析综合程序用户自定义模型和程序接口用户手册 [R]. 中国电力科学研究院, 2003.

附录

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial d_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial d_i} & \frac{\partial P_1}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial d_j} & \frac{\partial P_1}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial d_n} & \frac{\partial P_1}{\partial d_i} & \frac{\partial P_1}{\partial d_j} & 0 & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial d_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial d_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_1}{\partial d_j} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial d_1} & \frac{\partial P_i}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_n} & \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_i}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial d_1} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial d_n} & \frac{\partial Q_i}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_j}{\partial d_1} & \frac{\partial P_j}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_n} & \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_j}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \frac{\partial Q_j}{\partial d_1} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_j}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial Q_j}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial Q_j}{\partial d_n} & \frac{\partial Q_j}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_n}{\partial d_1} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial d_i} & \frac{\partial P_n}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial d_j} & \frac{\partial P_n}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial d_n} & \frac{\partial P_n}{\partial d_i} & \frac{\partial P_n}{\partial d_j} & 0 & 0 \\ \frac{\partial P_i}{\partial d_1} & \frac{\partial P_i}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial d_n} & \frac{\partial P_i}{\partial d_i} & \frac{\partial P_i}{\partial d_j} & \frac{\partial P_i}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_i}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \frac{\partial P_j}{\partial d_1} & \frac{\partial P_j}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_j}{\partial d_n} & \frac{\partial P_j}{\partial d_i} & \frac{\partial P_j}{\partial d_j} & \frac{\partial P_j}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_j}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_1} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_n} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_1} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} V_i & \dots & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} V_j & \dots & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_n} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} V_i & 0 & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} V_j & 0 & 0 & \frac{\partial P_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} V_i & \frac{\partial P_{ij}}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_{ss}} V_{ss} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} V_i & 0 & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_j} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} V_j & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_i} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} V_i & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial q_{ss}} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_{ss}} V_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \frac{\Delta V_1}{V_1} \\ \vdots \\ \Delta d_i \\ \frac{\Delta V_i}{V_i} \\ \vdots \\ \Delta d_j \\ \frac{\Delta V_j}{V_j} \\ \vdots \\ \Delta d_n \\ \Delta d_i \\ \Delta d_j \\ \frac{\Delta V_j}{V_j} \\ \vdots \\ \Delta d_n \\ \Delta d_i \\ \Delta d_j \\ \Delta q_{ss} \\ \frac{\Delta V_{ss}}{V_{ss}} \end{bmatrix}$$

式中 ΔP_i 、 ΔQ_i 为母线 i 的有功、无功功率失配值； P_i 、 Q_i 为注入母线 i ($i=1\sim n$) 的有功、无功功率。

收稿日期: 2005-10-08.

作者简介:

赵建军 (1970-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析及电

力电子技术;

郭剑波 (1960-), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 长期从事电力系统规划、分析和可靠性的研究, 近年来主要从事 FACTS 技术的研究及其装备的研制;

周孝信 (1940-), 男, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事电力系统分析与控制及 FACTS 技术等方面的工作。