

基于 TCSC 技术和粒子群优化算法的 电力系统阻塞疏导方法

周前¹, 方万良²

- (1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏省南京市 210036;
2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710048)

Studies on Congestion Management of Power Systems Based on TCSC and PSO

ZHOU Qian¹, FANG Wan-liang²

- (1. Jiangsu Electric Power Research Institute Company Limited, Nanjing 210036, Jiangsu Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Based on the technology of thyristor controlled series capacitor (TCSC) and particle swarm optimization (PSO), a congestion management approach for power systems is proposed. According to the result of sensitivity analysis, the authors firstly decide the transmission line where the TCSC device should be installed; then a mathematical model for the congestion management calculation of power network containing TCSC device under the electricity market environment is proposed; finally by use of particle swarm optimization(PSO), the parameters of the proposed mathematical model is optimized to achieve the goal of congestion management. The calculation results of IEEE 14-bus test system show that the TCSC technology based congestion management is reasonable and effective.

KEY WORDS: electricity market; congestion management; TCSC; sensitivity analysis; particle swarm optimization (PSO)

摘要: 提出了一种基于晶闸管控制的串连电容器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)技术和粒子群优化算法的电力系统阻塞疏导方法。首先根据线路灵敏度分析确定安装 TCSC 的线路; 然后提出了电力市场环境下电网中含有 TCSC 装置的阻塞疏导计算数学模型; 最后运用粒子群优化算法对这一数学模型进行参数优化, 达到疏导电网阻塞的目的。IEEE 14 节点系统算例表明, 基于 TCSC 技术进行电网阻塞疏导是有效、合理的。

关键词: 电力市场; 阻塞疏导; 晶闸管控制的串联电容器; 灵敏度分析; 粒子群优化(PSO)

0 引言

输电阻塞是指输电系统由于本身网络容量的限制, 不能满足所希望的输电计划的状态。在垂直

垄断管理模式下, 电网出现阻塞现象时, 系统的调度员可以调节电网中无功补偿装置、变压器分接头以及发电机有功、无功出力等消除阻塞; 而在电力市场环境下, 输电网络对所有市场参与者公平开放, 电网发生阻塞的可能性比以往情况增加。因此, 垂直管理模式消除阻塞的手段受到了挑战, 必须研究新的适应市场环境下的阻塞疏导方法。

在以往基于柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)处理输电阻塞的研究中, 研究人员针对 FACTS 装置的优化配置提出了若干方法, 但在电力市场中研究这个问题还很少。目前, 电力市场环境下 FACTS 装置的研究大多先假设 FACTS 装置在网络中位置已定, 而后针对某些控制目标对其参数进行优化^[1]。文献[2]研究了 FACTS 装置在缓解输电阻塞和减小交易电量方面的作用。结果表明 FACTS 装置以合适的参数安置在合适地点可提高系统的输电能力, 有效缓解输电阻塞和减小交易电量。但该文并没有提出一种有效的方法来确定 FACTS 装置的安装地点及其参数, 只是采取了试探性的方法来说明上述问题。文献[3]采用遗传算法, 以增大系统负荷率为目标, 确定系统达到最大负荷率时所用 FACTS 装置数量以及每个装置的安装地点。文献[4]提出利用单事故灵敏度指数(single contingency sensitivity, SCS)来确定系统中 FACTS 的最佳安装地点, 并说明不同的运行方式会产生不同的结果, 因此综合考虑了系统几种主要的运行方式。文献[5]提出线性灵敏度这一概念, 对电力网络采用直流潮流计算模型, 计算得出每条

线路传送有功变化量对于其它线路参数变化量的灵敏度后, 根据灵敏度大小最后得到 FACTS 装置最佳安装地点的排序。文献[1]、[6-7]也是采用灵敏度的方法, 只是对电力网络和 FACTS 装置计算采用的模型各异, 而且灵敏度公式也不同。另外, 文献[8-10]在优化配置 FACTS 装置时还考虑了 FACTS 装置的成本、安装以及操作费用的经济问题, 只是目标函数各异, 并且求解方法也不尽相同。

本文将首先确定某一电网中在几种主要运行方式下, 流经各条输电线路的有功功率对于线路电抗参数 X 的多方式综合灵敏度的排序, 以这个排序确定安装晶闸管控制的串联电容器装置(thyristor controlled series capacitor, TCSC)的线路; 然后, 根据电力系统运行方式在市场环境下与原先管制环境下的不同之处, 提出电网中含有 TCSC 装置的阻塞疏导方法计算数学模型; 最后把微粒群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法应用到优化计算中得到所期望的结果。IEEE 14 节点系统算例表明, 基于 TCSC 技术进行阻塞疏导是有效、合理的。

1 基于 TCSC 技术计算电力系统阻塞疏导方法的数学模型

1.1 TCSC 装置的功率注入模型

TCSC 装置在电力系统的稳态分析中有两种建模方法。一种是按照装置的物理特点建立其在系统分析中的模型, 称为物理模型 (physical oriented model, POM)。这种模型由于引起了网络导纳阵元素的变化, 需要对以往的程序做较大的修改。另一种模型是按照 TCSC 的控制输出特性建立其在系统分析中的模型, 称为功率注入模型 (power injection model, PIO)。这种模型把 TCSC 对系统的控制作用等效为系统的注入功率, 不需要对系统的导纳阵做任何修改, 在稳态潮流分析中得到较多的应用。

通过 TCSC 的原理结构可以看到, 在稳态情况下 TCSC 具有与并联 LC 电路相似的特征, 但 TCSC 可以通过控制触发角连续地调节所补偿线路的电抗。其稳态等效数学模型 (物理模型) 如图 1 所示。图中线路电抗 $X_{ij\text{new}} = X_{ij\text{old}} - X_{\text{TCSC}} = K_{\text{TCSC}} X_{ij\text{old}}$, K_{TCSC} 是 TCSC 装置的补偿度。

为得到 TCSC 的 PIO, 可以用一个与线路电流



图 1 TCSC 的等效电路模型图
Fig. 1 Equivalent circuit of TCSC

垂直的可控电压源 $U = -jK_{\text{TCSC}} X_{ij} I_L$ 来表示安装有 TCSC 的输电线路^[1], 如图 2 所示。

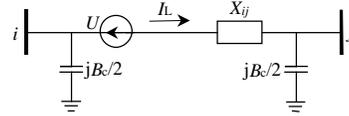


图 2 TCSC 的等效可控电压源模型图
Fig. 2 Equivalent controllable voltage source model of TCSC

再把可控源的作用等效为线路两端节点的附加注入功率形式, 如图 3 所示。

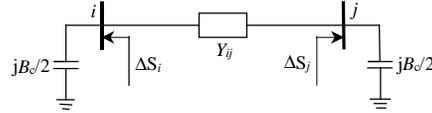


图 3 TCSC 的等效附加注入功率模型图
Fig. 3 Additional injection power model of TCSC

从图 3 可以看到, 等效注入功率只和网络中安装 TCSC 的两个节点的状态变量、该线路的参数以及 TCSC 的控制参数有关。含有 TCSC 线路的有功功率方程和原线路有功功率方程相比, 增加了 TCSC 的附加功率, 其表达式为

$$\begin{cases} S_i + \Delta S_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} (\cos q_{ij} + \sin q_{ij}) - B_{ij} (\cos q_{ij} - \sin q_{ij})] = 0 \\ S_j + \Delta S_j - U_j \sum_{i=1}^n [G_{ij} (\cos q_{ij} - \sin q_{ij}) - B_{ij} (\cos q_{ij} + \sin q_{ij})] = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta S_i = \Delta P_i + j\Delta Q_i \\ \Delta S_j = \Delta P_j + j\Delta Q_j \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta P_i = U_i \Delta G_{ij} - U_i U_j (\Delta G_{ij} \cos q_{ij} + \Delta B_{ij} \sin q_{ij}) \\ \Delta Q_i = -U_i^2 \Delta B_{ij} + U_i U_j (\Delta B_{ij} \cos q_{ij} - \Delta G_{ij} \sin q_{ij}) \\ \Delta P_j = U_j \Delta G_{ij} - U_i U_j (\Delta G_{ij} \cos q_{ij} - \Delta B_{ij} \sin q_{ij}) \\ \Delta Q_j = -U_j^2 \Delta B_{ij} + U_i U_j (\Delta B_{ij} \cos q_{ij} + \Delta G_{ij} \sin q_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta G_{ij} = K_{\text{TCSC}} X_{ij}^2 R_{ij} (K_{\text{TCSC}} - 2) / \\ (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) [R_{ij}^2 + X_{ij}^2 (1 - K_{\text{TCSC}})^2] \\ \Delta B_{ij} = K_{\text{TCSC}} X_{ij} [X_{ij}^2 (1 - K_{\text{TCSC}}) - R_{ij}^2] / \\ (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) [R_{ij}^2 + X_{ij}^2 (1 - K_{\text{TCSC}})^2] \end{cases} \quad (4)$$

由 TCSC 引起的线路附加有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = P'_{ij} - P_{ij} = -U_i^2 \Delta G_{ij} + \\ U_i U_j (\Delta G_{ij} \cos q_{ij} + \Delta B_{ij} \sin q_{ij}) \\ \Delta Q_{ij} = Q'_{ij} - Q_{ij} = U_i^2 \Delta B_{ij} + \\ U_i U_j (\Delta G_{ij} \sin q_{ij} - \Delta B_{ij} \cos q_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

1.2 TCSC 安装线路的确定

1.2.1 灵敏度方法

由于 TCSC 所影响的主要参数是线路的电抗 X ，因此为使 TCSC 尽可能发挥控制整个网络有功潮流的作用，必须找出整个电网输送有功功率对网络中哪条线路的电抗参数 X 变化最敏感。线路的单方式综合灵敏度含义为在某一个运行方式下，网络中所有线路(包含本线路)传送的有功功率对此线路电抗参数的灵敏度范数，其计算方法如式(6)。

对于一个支路数为 b 的电网，除去变压器支路的线路数为 l ，在方式 k 下，线路 i 的单方式综合灵敏度为

$$S_{ki} = \sqrt{\sum_{m=1}^b \left(a_m \frac{\partial P_m}{\partial X_i} \right)^2}, \quad i = 1 \sim l \quad (6)$$

式中 a_m 为线路 m 的重要性系数。不同的线路在电网中因不同的接线位置有不同的的重要性系数。

线路的多方式综合灵敏度含义为在所有运行方式下同线路的单方式综合灵敏度之和。假设某一电网有 n 种运行方式，则线路 i 的多方式综合灵

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial X_{mn}} = \begin{cases} 2U_i G_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} - \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} \right) (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) + U_i U_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}}, & ij \neq mn \\ 2U_i G_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} - \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} \right) (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) + U_i U_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}} + \\ 2U_i^2 G_{ij} B_{ij} - U_i U_j [2G_{ij} B_{ij} \cos q_{ij} - (G_{ij}^2 - B_{ij}^2) \sin q_{ij}], & ij = mn \end{cases} \quad (9)$$

在求解式(9)过程中需用到两组等式

$$\frac{\partial G_{ij}}{\partial X_{mn}} = \begin{cases} 0, & ij \neq mn \\ \frac{\partial}{\partial X_{mn}} \left(\frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \right) = 2G_{ij} B_{ij}, & ij = mn \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{\partial B_{ij}}{\partial X_{mn}} = \begin{cases} 0, & ij \neq mn \\ \frac{\partial}{\partial X_{mn}} \left(\frac{-X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \right) = -(G_{ij}^2 - B_{ij}^2), & ij = mn \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} \sum_{j \in i} [U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij})] + U_i \sum_{j \in i} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \right] - U_i \sum_{j \in i} \left[U_j (-G_{ij} \sin q_{ij} + B_{ij} \cos q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}} \right] + \\ 2U_m^2 G_{mn} B_{mn} + U_m U_n [2G_{mn} B_{mn} \cos q_{mn} - (G_{mn}^2 - B_{mn}^2) \sin q_{mn}], & i = m \text{ 或 } i = n \\ 0 = \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} \sum_{j \in i} [U_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij})] + U_i \sum_{j \in i} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \right] + U_i \sum_{j \in i} \left[U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}} \right] + \\ (G_{mn}^2 - B_{mn}^2) U_m^2 + U_m U_n [2G_{mn} B_{mn} \sin q_{mn} - (G_{mn}^2 - B_{mn}^2) \cos q_{mn}], & i = m \text{ 或 } i = n \end{cases} \quad (12)$$

敏度为

$$S_i = \sum_{k=1}^n I_k S_{ki} \quad (7)$$

式中 I_k 为介于 0 和 1 之间的小数，含义为运行方式 k 的重要性系数，即此运行方式在所有运行方式中所占的比重。

本文选择多方式综合灵敏度最大的线路为 TCSC 的安装线路。

1.2.2 灵敏度的求解

本文采用交流模型计算线路输送有功功率对线路参数的灵敏度^[11]，这样虽然增加了计算时间，但是提高了计算精度，得到了更精确的灵敏度。

对于两端节点号为 i, j 的线路，在某种运行方式下流经的有功功率为

$$P_{ij} = \operatorname{Re} \left\{ U_i^* \left(\frac{U_i - U_j}{Z} \right) \right\} = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \quad (8)$$

对两端节点号为 m, n 的线路电抗 X_{mn} 求偏导得

在求解式(9)之前，必须先求得电网中各个节点电压幅值和相位对线路电抗 X_{mn} 的偏导数。

对于一个节点数为 n 的网络，其中有一个平衡节点， n_{PV} 个 PV 节点， n_{PQ} 个 PQ 节点。由于平衡节点的电压幅值和相角与 PV 节点的电压幅值保持常数，所以需要求得的偏导数个数为 $n_{PV} + 2n_{PQ}$ 。

对于式(1)表示的节点功率平衡方程，其中有功功率平衡方程 $n_{PV} + n_{PQ}$ 个，无功功率平衡方程 n_{PQ} 个。若上述等式对某一线路电抗 X_{mn} 求偏导，则可以得到如下两组等式

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} \sum_{j \in i} [(U_j G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij})] + U_i \sum_{j \in i} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \right] - U_i \sum_{j \in i} \left[U_j (B_{ij} \cos q_{ij} - G_{ij} \sin q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}} \right], \\ & \quad i \neq m \text{ 且 } i \neq n \\ 0 &= \frac{\partial U_i}{\partial X_{mn}} \sum_{j \in i} [U_j (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij})] + U_i \sum_{j \in i} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_{mn}} (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \right] + U_i \sum_{j \in i} \left[U_j (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \frac{\partial q_{ij}}{\partial X_{mn}} \right], \\ & \quad i \neq m \text{ 且 } i \neq n \end{aligned} \right. \quad (13)$$

这样一共可以得到 $n_{PV} + 2n_{PQ}$ 个方程，可以求得网络中所有节点的电压幅值和相角对某一条线路电抗 X_{mn} 的偏导数值。再代入式(9)可以求得网络中所有线路上传送的有功潮流对线路 mn 电抗的灵敏度。最终可以求得网络中所有支路有功潮流对各条线路(包括对本身线路)电抗 X 的灵敏度值。

如果改变系统的运行方式，则会得到另一种运行方式下各条线路流经有功对各条线路电抗 X 的灵敏度。

1.3 含 TCSC 装置的阻塞疏导数学模型

在电力市场环境，如果进行交易的电量引起了输电阻塞，那么消除阻塞的方法应该一方面使得输电阻塞现象消除，另一方面使系统的网损最小。因此，该问题的数学模型应以网损最小为目标函数，以输电线路不发生超载和节点电压不越限以及其它运行变量不越限为不等式约束条件，以潮流平衡方程为等式约束条件，以发电机无功出力及 TCSC 补偿度为决策变量

$$\begin{aligned} \min f(x, u) &= \sum_{i, j \in L} (P_{ij} + P_{ji}) = \\ & \sum_{i, j \in L} [G_{ij}(U_i^2 + U_j^2) - 2U_i U_j G_{ij} \cos q_{ij}] \quad (14) \\ \text{s.t. } g(x, u) &= 0 \\ h(x, u) &\leq 0 \end{aligned}$$

式中： $f(x, u)$ 为关于变量 x 和 u 的有功网损函数； L 为所有线路的集合。约束条件 $h(x, u)$ 、 $g(x, u)$ 分别表示为

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{Gi, \min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max}, & i \in g \\ U_{i, \min} &\leq U_i \leq U_{i, \max}, & i \in n \\ P_{ij, \min} &\leq P_{ij} \leq P_{ij, \max}, & i, j \in n, i \neq j \\ K_{TCSCi, \min} &\leq K_{TCSCi} \leq K_{TCSCi, \max}, & i \in T_{CSC} \\ P_i &= U_i U_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \\ Q_i &= U_i U_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} P_i &= U_i U_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos q_{ij} + B_{ij} \sin q_{ij}) \\ Q_i &= U_i U_j \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin q_{ij} - B_{ij} \cos q_{ij}) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式中： P_i 和 Q_i 为节点 i 的注入有功和无功功率； U_i 和 q_i 为节点 i 的电压幅值和相角； Q_G 为发电机的无

功出力； P_{ij} 为 i 和 j 节点之间输电线路传送的有功功率； K_{TCSC} 为 TCSC 的补偿度； g 为发电机集合； T_{CSC} 为 TCSC 装置集合； n 为网络节点数。下标 \max 和 \min 分别表示相应变量的最大和最小值约束。

2 微粒群优化算法的应用

粒子群优化算法是基于群体的演化算法。本文采用惯性权重^[12-13]、压缩因子^[14]与罚函数相结合的粒子群优化算法进行计算，微粒位置和速度修改公式为

$$\left\{ \begin{aligned} v_{d+1} &= K[wv_d + j_1 \text{rand}() (p_{\text{best}} - x_d) + \\ & \quad j_2 \text{rand}() (g_{\text{best}} - x_d)] \\ x_{d+1} &= x_d + v_{d+1} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

式中： d 为迭代次数； x_d 为在 d 次迭代中各微粒所处的位置； v_d 为在 d 次迭代中各微粒的速度； w 为权重因子； j_1 和 j_2 为加速常数； $\text{rand}()$ 为在(0,1)范围内变化的随机函数。 K 为由 j_1 和 j_2 表示的收缩因子，其表达式为

$$K = 2 / \left| 2 - j - \sqrt{j^2 - 4j} \right| \quad (18)$$

其中 $j = j_1 + j_2$, $j > 4$ 。对全局搜索，通常的好方法是在前期有较高的探索能力以得到合适的种子，而在后期有较高的开发能力以加快收敛速度，为此可将 w 设为随时间线性减小。所以 w 可根据式(19)确定

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{I_{\max}} I \quad (19)$$

式中： I_{\max} 为最大迭代次数； I 为本次迭代次数；而速度最大值 v_{\max} 的值可由式(20)确定

$$v_{\max} = (x_{\max} - x_{\min}) / N \quad (20)$$

式中 N 为人为选择的迭代次数。

在算例中，具体参数设置如下：微粒数 $m=70$ ； $w_{\max}=1.2$ ； $w_{\min}=0.1$ ； $j_1=j_2=2.05$ ； $K=0.7295$ ； $I_{\max}=100$ ； $N=20$ 。收敛条件有两个：一个是连续 30 次迭代目标函数值未得到改变；另一个是迭代次数达到一个预设值，设为 100。

研究中采用的罚函数的罚因子根据不等式约

束条件的不同情况动态地变化。在优化问题中，加罚目标函数如下

$$F(x,u) = f(x,u) + p(k)H(x,u) =$$

$$f(x,u) + k\sqrt{k} \sum_{i=1}^n q(q_i(x,u))q_i(x,u)^{g(q_i(x,u))} \quad (21)$$

式中 i 是不等式约束条件 $h(x,u)$ 和等式约束条件 $g(x,u)$ 的总集合。 $q(x,u)$ 的数学表达式为

$$\begin{cases} q_i(x,u) = \max\{0, |g_i(x,u)|\}, & i \in \text{不等式约束集合} \\ q_j(x,u) = \max\{0, h_j(x,u)\}, & j \in \text{等式约束集合} \end{cases} \quad (22)$$

$q(q_i(x,u))$ 和 $g(q_i(x,u))$ 的取值如下

$$\begin{cases} 0 < q_i(x,u) \leq 0.001, & q(q_i(x,u)) = 10 \\ 0.001 < q_i(x,u) \leq 0.1, & q(q_i(x,u)) = 20 \\ 0.1 < q_i(x,u) \leq 1, & q(q_i(x,u)) = 100 \\ 1 < q_i(x,u), & q(q_i(x,u)) = 300 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} 0 < q_i(x,u) \leq 1, & g(q_i(x,u)) = 1 \\ 1 < q_i(x,u), & g(q_i(x,u)) = 2 \end{cases} \quad (24)$$

在本文所建立的阻塞疏导数学模型中，决策变量是发电机的无功出力 Q_G 以及 TCSC 的补偿度 K_{TCSC} 。由于满足等式约束条件的过程即是电网潮流计算的过程，因此可以把发电机节点的电压幅值以及 TCSC 的补偿度 K_{TCSC} 作为迭代初值，然后通过潮流计算可得到各发电机的无功出力。

3 算例分析

3.1 灵敏度分析在算例中的应用

在 IEEE 14 节点系统^[15-16]中，第一种运行方式下，总的负荷有功功率为 2.59(本文的电压、相角、有功无功数值均为标幺值)，节点 2 上的发电机有功出力为 1.4，节点 3 上的发电机有功出力为 1.0，节点 6 上的发电机有功出力为 0.19，节点 8 为调相机节点，即有功出力为 0。

第二种运行方式下，总的负荷有功功率不变，节点 2 上的发电机有功出力调为 0.4，节点 3 上的发电机有功出力调为 0.25，节点 6 上的发电机有功出力调为 1.49，节点 8 上的发电机有功出力调为 0.45。

假设系统中各条线路的重要性系数相同(均为 1)，由式(6)计算得到各线路两种方式下的单方式综合灵敏度结果。假设两种运行方式重要性系数相同(均为 0.5)，由式(7)可得到各条线路的两种方式下综合灵敏度结果，如表 1。由结果可知，TCSC 安装在线路 7 上最合适。

表 1 IEEE14 节点系统线路灵敏度结果

Tab. 1 The result of sensitivity of IEEE 14 bus test system

排序	第一种运行方式		第二种运行方式		两种运行方式下	
	线路	综合	线路	综合	线路	综合
序号	灵敏度结果	灵敏度结果	序号	灵敏度结果	序号	灵敏度结果
1	3	1.897 34	7	2.593 21	7	2.008 460
2	5	1.681 32	2	1.136 66	3	1.010 240
3	7	1.423 7	6	1.088 48	5	1.007 494
4	4	1.101 86	16	0.826 12	6	0.891 577
5	12	0.777 567	1	0.735 243	2	0.869 147
6	6	0.694 674	14	0.681 326	16	0.704 805
7	2	0.601 633	18	0.578 11	12	0.655 373
8	16	0.583 49	12	0.533 18	4	0.606 610
9	1	0.367 791	5	0.333 668	1	0.551 517
10	14	0.246 306	20	0.326 24	14	0.463 816
11	15	0.188 707	13	0.313 763	18	0.361 622
12	17	0.181 95	15	0.224 77	20	0.228 626
13	18	0.145 134	3	0.123 138	13	0.219 737
14	20	0.131 012	4	0.111 364	15	0.206 738
15	13	0.125 71	19	0.079 547	17	0.100 008
16	10	0.069 159 3	10	0.046 187 5	19	0.061 900
17	19	0.044 253	17	0.018 066 5	10	0.057 673

3.2 电力系统阻塞疏导方法在算例中的应用

在 IEEE 14 节点系统算例中，决策变量包括 K_{TCSC} 以及电网中 6 台发电机的无功出力。设 K_{TCSC} 的取值范围是(-0.5,+0.5)。为说明这些决策变量在减小网损方面以及在阻塞疏导方面的作用，在同一种运行方式下进行计算结果的比较。同时，为使线路出现阻塞现象，可以在原先的运行方式下一方面增加发电厂商与负荷之间的售电合同量；另一方面改变某些输电线路的传输极限。共同的运行方式可以在 IEEE 14 节点系统算例第一种运行方式的基础上，把节点 2 上的发电机有功出力增大为 2.4，节点 4 上的有功负荷增大为 1.478。

情况 1: 改变第 7 号线路的传输极限使其出现阻塞情况，超过其传输极限 0.65 达到 0.664 581，其它线路均未出现阻塞情况。

情况 2: 改变第 3 号线路的传输极限使其出现阻塞情况，超过其传输极限 0.75 达到 0.782 382，其它线路均未出现阻塞情况。

经阻塞疏导计算结果见表 2。

表 2 IEEE14 节点系统算例结果

Tab. 2 The result of IEEE 14 bus test system

参数	原始运行方式	阻塞情况 1		阻塞情况 2	
		调节方式 1	调节方式 2	调节方式 1	调节方式 2
K_{TCSC}	0	-0.122 8	0.047 21	0.432 0	0.423 8
Q_{G1}	0.452 0	0.452 0	-0.248 1	0.441 2	-0.248 4
Q_{G2}	-0.326 1	-0.324 2	0.288 5	-0.332 0	0.303 4
Q_{G3}	0.149 8	0.149 8	0.225 7	0.166 2	0.238 4
Q_{G6}	0.135 2	0.135 4	0.159 9	0.130 3	0.121 4
Q_{G8}	0.208 5	0.208 9	0.136 1	0.215 5	0.157 2
P_{LOSS}	0.102 4	0.102 5	0.094 8	0.101 3	0.093 6

注：调节方式 1: 只调节 TCSC; 调节方式 2: 同时调节 TCSC 与发电机无功出力。

4 结论

本文提出的基于 TCSC 技术和 PSO 算法的电力系统阻塞疏导方法首先根据线路所输送有功对线路电抗参数的灵敏度确定 TCSC 装置的安装地点, 然后再进行 TCSC 参数和无功输出的调整。算例表明, 此方法对于解决电网阻塞问题是有效的。但是, 影响 TCSC 安装位置的因素还有很多, 如经济、电网规划和电力系统暂态稳定等。另外, TCSC 的数量与 TCSC 调节电网阻塞能力之间的关系也是一个值得研究的问题。

参考文献

- [1] Singh S N, David A K. 有 FACTS 装置的电力系统在市场环境下的最优调度[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 20-24.
S N Singh, A K David. Optimal transmission dispatch with optimizing FACTS device in open power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 20-24(in Chinese).
- [2] Srivastava S C, Kumar P. Optimal power dispatch in deregulated market considering congestion management[C]. In: Proceeding of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, London, 2000.
- [3] Gerbex S, Cherkaoui R, Germond A J. Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by mean of genetic algorithms [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 537-544.
- [4] Lu Y Q, Abur A. Static security enhancement via optimal utilization of thyristor controlled series capacitors[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 324-329.
- [5] Choi H S, Moon S. A new operation strategy of series compensating device under line flow congestion using the linearized line flow sensitivity[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, Ohio, USA, 2001.
- [6] Orfanoganni T, Bacher R. Steady-state optimization in power systems with series FACTS devices[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 19-26.
- [7] Berizzi A, Silvestri A, Tironi E, et al. Power flows and voltage control in electric systems by traditional and innovative devices [C]. Electrotechnical Conference, MELECON'96, 8th Mediterranean Maggio, 1996.
- [8] Paterni P, Vitet S, Bena M, et al. Optimal location of phase shifters in the french network by genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 37-42.
- [9] Oliveira E J, Marangon J W, Almeida K C. Allocation of FACTS devices in hydrothermal systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 276-282.
- [10] Lie T T, Deng W. Optimal flexible AC transmission systems (FACTS) devices allocation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1999, 19(2): 125-134.
- [11] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]. IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1998, Anchorage, Alaska.
- [13] Shi Y, Eberhart R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]. Proceeding of Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999.
- [14] Clerc M. The swarm and the queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C]. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1999.
- [15] 周前. 基于 TCSC 技术和 PSO 算法的电力系统阻塞疏导方法的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [16] 陈伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

收稿日期: 2007-06-20.

作者简介:

周 前(1978—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统分析与计算,

E-mail: xjtu@jsepc.com.cn;

方万良(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(实习编辑 王晔)

范明天等著《中国配电网发展战略相关问题研究》一书出版

由中国电力科学研究院范明天、张祖平教授编著的《中国配电网发展战略相关问题研究》一书最近由中国电力出版社出版, 该书从战略高度探讨了我国配电网的发展模式, 预测了我国配电网的发展前景, 对比分析了国内外配电网的发展情况, 探讨了影响配电网连续供电的因素、电压等级序列的合理配置等问题, 对我国配电网可持续发展战略问题和目标、方针及其技术措施进行了深入探索。该书视角新颖、内容丰富, 在统计分析了国内外社会、经济、人口、电网等大量资料的基础上, 将配电网的发展战略作为系统理论问题来探讨, 并与实践经验相结合, 提出了新的思路及有价值的结论和建议。

该书为 16 开本, 187 页, 共分 7 章: 绪论、影响配电网发展的主要因素、国内外配电网发展情况的比较与借鉴、影响配电网供电安全的关键技术因素、电压等级序列的合理配置、我国配电网可持续发展战略的思考、结论和建议。该书的出版旨在引起决策和管理部门对我国配电网发展中一些共性问题的关注, 为有志于配电网规划的研究人员以及有关专业师生提供研究课题和创新思路。

范明天博士是城市电网规划与运行方面的专家, 国际大电网会议(CIGRE)配电及分布式发电分委会中国委员, 中国电机工程学会供电专委会委员, 中国电机工程学会高级会员。