

# 用于提高输电能力的 TCSC 选址和定容方案

潘淑杰<sup>1</sup>, 马平<sup>2</sup>, 蔡兴国<sup>1</sup>, 韩冬<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001;

2. 青岛大学 自动化工程学院, 山东省 青岛市 266071)

## Selection Scheme for Installation Site and Optimal Capacity of TCSC to Increase Transfer Capability

PAN Shu-jie<sup>1</sup>, MA Ping<sup>2</sup>, CAI Xing-guo<sup>1</sup>, HAN Dong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China; 2. School of Automation Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** The influence of constraints such as voltage limits, branch power limits and limits of other electric equipments are critical for transfer capability. By use of continuation power flow model, a mathematical expression for the first order sensitivity of the transfer capability with respect to branch reactance is deduced at the critical operating point, and according to the results of sensitivity ordering a new method to determine the installation site of thyristor controlled series capacitor (TCSC) is proposed. After the installation site is ascertained, the inequality constraints which are out of bound before the installation of TCSC are represented by equalities and set as known conditions; the compensation degree of TCSC with regard to the branch where it is to be installed is set as a new unknown quantity; then conventional power flow equations are expanded and taking the minimum of expanded power flow mismatching function as object the optimal compensation degree is calculated. Simulation results of IEEE 30-bus system and IEEE 118-bus system show that the proposed method to select the installation site and optimal capacity of TCSC is effective.

**KEY WORDS:** transfer capability; thyristor controlled series capacitor (TCSC); sensitivity; power flow mismatch function; continuation power flow method

**摘要:** 支路传输功率、节点电压等的越限是制约系统输电能力提高的重要因素, 为此文章采用连续潮流模型, 在临界运行点推导了输电能力对支路电抗灵敏度的数学表达式, 提出根据此灵敏度排序结果确定可控串联补偿器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)安装地点的新方法。该方法中, TCSC 安装位置确定以后, 将安装 TCSC 之前发生越

界的不等式约束在其边界值处用等式形式表示出来, 并设定为已知条件, 将 TCSC 对其所要安装支路的补偿度设定为一个新的未知量, 扩展常规潮流方程, 以求取扩展潮流不匹配函数的最小值为目标, 计算支路的最优补偿度。对 IEEE30 节点和 IEEE118 节点系统的仿真计算结果表明该文所提出的选址和定容方法是有效的。

**关键词:** 输电能力; 可控串联补偿器(TCSC); 灵敏度; 潮流不匹配函数; 连续潮流法

## 0 引言

可控串联补偿器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)是应用最为广泛的柔性交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)装置之一, 其基本作用是抑制振荡以及提高系统的暂态稳定性<sup>[1-4]</sup>。由于 TCSC 可以影响系统的潮流分布, 它的投运可以提高系统的电压稳定性<sup>[5-7]</sup>, 增大负荷裕度<sup>[8]</sup>。因此研究 TCSC 在提高输电能力方面<sup>[9-11]</sup>的应用很有意义。

若 TCSC 位置选择不当, 可能导致电压稳定性或输电能力降低<sup>[5]</sup>; 其容量选择不合适可能会造成投资成本浪费。实际运行系统规模大, 结构复杂, 不可能采用仿真方法逐点测试, 因此寻找一种有效的 TCSC 选址和定容方案十分必要。

目前国内外已有很多研究成果从增大负荷裕度、提高输电能力的角度分析 TCSC 的选址和定容问题。文献[6]详细研究了 TCSC 对静态电压稳定性的影响, 选取系统正常运行方式和临界崩溃点运行方式下传输功率变化最大的支路作为 TCSC 的最优装设地点, 并提出一种衡量补偿度的指标。文献[8]

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050213006); 黑龙江省科技攻关项目(GD07A304)。

Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning(20050213006).

以实现系统最大负载能力为目标,采用遗传算法来求解包括 TCSC 在内的多种 FACTS 装置的最佳安装地点及参数。文献[9]在电压崩溃临界点推导了输电能力对支路传输功率的灵敏度表达式,提出按此灵敏度排序来选择 TCSC 的安装地点。文献[10]考虑负荷预测和发电机出力的不确定性,首先将灵敏度法与蒙特卡罗仿真法相结合,以实现电压稳定条件下输电能力最大化为目标来确定 TCSC 的安装位置,然后确定系统获得最大经济收益时 TCSC 的最佳安装容量。

文献[6-7,9-10]都是在只考虑电压稳定性约束的条件下研究安装 TCSC 对于增大负荷裕度的作用,提出选址方案。然而不等式约束(如节点电压、设备过负荷等)是制约输电能力提高的重要因素<sup>[12-15]</sup>。通常系统电压崩溃之前就已经发生了支路传输有功、节点电压等越限。当此类约束条件发生越界时,输电能力达到其临界值。基于此,本文提出一种新的 TCSC 安装策略:在有不等式约束发生越界的临界运行点分析输电能力对支路电抗的灵敏度,根据此灵敏度排序结果识别 TCSC 安装支路;同时将对所提出的灵敏度选址指标的使用条件进行分析。关于 TCSC 的定容问题,受文献[16]的启发,本文将安装 TCSC 之前发生越界的不等式约束在其边界值处用等式形式表示,设定为已知条件,将 TCSC 对其所要装支路的补偿度设定为新的未知量,采用不匹配函数法确定支路最优补偿度。

## 1 基本模型

### 1.1 TCSC 的稳态模型

TCSC 由电容器和晶闸管控制电抗器并联而成,串联在支路中,通过控制晶闸管触发角快速连续地调节支路参数。本文主要分析电力系统的稳态行为和潮流控制,因此采用 TCSC 的稳态模型,其等效模型见图 1。

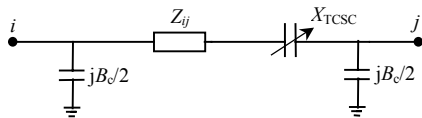


图 1 TCSC 等效模型

Fig. 1 Equivalent model of TCSC

潮流分析中,TCSC 在可调运行状态下可等效为串联在输电线路中的可变电抗  $X_{TCSC}$ 。假设支路  $i-j$  上装有 TCSC,在给定补偿度情况下,当对地导纳  $B_c/2$  较小时,可将  $X_{TCSC}$  与支路阻抗  $Z_{ij}$  叠加来考虑(见图 1),表示为

$$\begin{cases} X'_{ij} = X_{ij} + X_{TCSC} \\ X_{TCSC} = -\beta X_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X'_{ij}$ 、 $X_{ij}$  分别为补偿后和补偿前的支路电抗;  $\beta$  为 TCSC 对支路电抗的补偿度。在潮流方程中,只需将与安装了 TCSC 的支路相关的节点导纳作相应改动,雅可比矩阵的阶数保持不变。

### 1.2 连续潮流模型

本文采用连续潮流法计算系统的区域间输电能力。假定负荷为恒功率负荷,发电机和负荷节点的功率按一定比例增加,此时静态潮流平衡方程可用向量形式表示为

$$f(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}$  表示节点电压幅值和相角;  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  为常规潮流平衡方程式;  $\mathbf{b}$  表示系统节点功率注入变化方向向量;  $\lambda$  为反映系统负荷水平的标量参数。这里,以某一不等式约束条件(支路传输有功、节点电压等)发生越界时的  $\lambda$  值代表输电能力的大小,有不等式约束条件发生越界则停止连续潮流计算,记录  $\lambda$  值。

本文同时考虑支路过负荷约束、节点电压约束 2 种主要的不等式约束。当不等式约束达到边界值时,可用如下等式具体表示:

1) 支路传输有功约束达到边界值时,有

$$\begin{cases} e = P_{jk}^m - P_{jk} = 0 \\ P_{jk} = V_j^2 G_{jk} - V_j V_k (G_{jk} \cos \theta_{jk} + B_{jk} \sin \theta_{jk}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{jk}^m$  为节点  $j$  和  $k$  之间输电线路传输的有功功率极限(最大或最小)值;  $P_{jk}$  为节点  $j$ 、 $k$  之间线路传输的有功功率;  $G_{jk}$ 、 $B_{jk}$  分别为节点  $j$  和  $k$  之间的互电导和互电纳;  $\theta_{jk}$  为节点  $j$  和  $k$  的电压相位差;  $V_j$ 、 $V_k$  分别为节点  $j$ 、 $k$  的电压幅值。

2) 节点电压幅值约束达到边界值时,有

$$e = V_k^m - V_k = 0 \quad (4)$$

式中:  $V_k^m$  为节点  $k$  的电压幅值极限(最大或最小)值;  $V_k$  为节点  $k$  的电压幅值。

## 2 TCSC 安装位置的选择

### 2.1 灵敏度分析

在装设 TCSC 之前,用灵敏度法分析 TCSC 的最优安装地点。TCSC 在可调运行状态下可等效为串联在输电线路中的可变电抗,所以取支路电抗为控制参数。

计及系统参数向量的潮流方程可以表示为

$$f(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{p}$  为控制参数向量, 如节点无功补偿量、发电机端电压、可调变压器变比等(本文取支路电抗为控制参数)。设初始运行点为  $(\mathbf{x}_0, \lambda_0, \mathbf{p}_0)$ , 用连续潮流法计算出的临界运行点记为  $(\mathbf{x}_*, \lambda_*, \mathbf{p}_*)$ , 显然在装设 TCSC 之前的灵敏度分析中有  $\mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_*$ 。

在临界运行点  $(\mathbf{x}_*, \lambda_*, \mathbf{p}_*)$  某一不等式约束发生越界, 则发生越界的不等式约束在其边界值处用等式形式表示为

$$e(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) = 0 \quad (6)$$

式(6)为式(3)(4)的向量表示形式。定义

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) \\ e(\mathbf{x}, \lambda, \mathbf{p}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

则  $(\mathbf{x}_*, \lambda_*, \mathbf{p}_*)$  是式(7)的解。在临界运行点  $(\mathbf{x}_*, \lambda_*, \mathbf{p}_*)$  计算  $\lambda$  对控制参数  $\mathbf{p}$  的灵敏度<sup>[17]</sup>, 有

$$\lambda_p|_* = \frac{d\lambda}{d\mathbf{p}} = \frac{-\omega \mathbf{H}_p|_*}{\omega \mathbf{H}_\lambda|_*} \quad (8)$$

式中  $\omega$  为非零行向量, 其具体求解方法见文献[18]。

若取  $\lambda$  表示区域间传输的有功功率,  $X_{ij}$  为支路  $i-j$  的电抗, 则  $\lambda_{X_{ij}}|_*$  即反映在确定的约束条件下, 临界运行点的输电能力对支路电抗  $X_{ij}$  的灵敏度大小。如果系统满足以下 2 种情况之一, 则  $\lambda_{X_{ij}}|_*$  的值可作为选择 TCSC 安装地点的指标: 1) 在临界运行点某一不等式约束条件发生越界, 且在安装 TCSC 之前的临界运行点和 TCSC 安装之后的临界运行点都是此不等式约束条件发生越界; 2) 在临界运行点某一不等式约束条件发生越界, 在安装 TCSC 之前的临界运行点和 TCSC 安装之后的临界运行点不是同一个不等式约束条件发生越界, 但在 TCSC 安装后的临界运行点处, 安装前发生越界的那个不等式约束接近其边界值。

$\lambda_{X_{ij}}|_*$  的绝对值越大, 则其对应的支路  $i-j$  安装 TCSC 对于提高输电能力越有利。值得指出的是, 这里提出的灵敏度选址方法虽然不是一种精确计算方法, 但可以快速地筛选出对输电能力变化灵敏的支路。为了得到最优方案, 按灵敏度值进行排序之后, 只须对其排在前面的支路用实际计算值加以验证, 便可精确确定对提高输电能力最有利的 TCSC 安装策略。

## 2.2 计算步骤

TCSC 选址的仿真计算步骤如下:

1) 初始状态下 ( $\lambda_0 = 0$ ), 对试算系统进行潮流计算, 得到基准运行点  $(\mathbf{x}_0, \lambda_0, \mathbf{p}_0)$ 。

2) 在给定的节点功率注入变化方向  $\mathbf{b}$  上, 逐渐增大  $\lambda$ , 用连续潮流法计算系统潮流直到某一不等式约束发生越界, 得到装设 TCSC 之前系统的临界运行点  $(\mathbf{x}_*, \lambda_*, \mathbf{p}_*)$ 。

3) 由式(8)计算输电能力对支路电抗的灵敏度, 并按灵敏度的绝对值由大到小排序。

4) 对于灵敏度排序在前面的支路, 用分别安装相同容量的 TCSC 之后的实际计算值加以验证, 确定选址方案, 得到优先装设 TCSC 的支路。

## 3 TCSC 安装容量的确定

### 3.1 不匹配函数

本文由不匹配函数法计算 TCSC 对其所要安装支路的最优补偿度。

假定区域间的输电能力是确定的 ( $\lambda$  为一常量  $\lambda_c$ ), 且大于装设 TCSC 之前的临界输电能力 (即  $\lambda_c > \lambda_*$ )。这里  $\lambda$  为常量, 且不计及控制参数向量, 则式(5)变为

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (9)$$

显然在各种不等式约束条件作用下, 当  $\lambda = \lambda_c$  时, 装设 TCSC 之前, 潮流方程(9)没有可行解。为达到输电要求, 需要装设 TCSC 加以补偿。

为了使 TCSC 对支路的补偿效果达到最佳, 将安装 TCSC 之前发生越界的不等式约束在其边界值处用等式形式表示出来, 并设定为已知条件, 则式(6)变为

$$e(\mathbf{x}) = 0 \quad (10)$$

将 TCSC 对其所要安装支路的补偿度设定为新的未知量  $\beta$ , 扩展常规潮流方程, 则式(7)变为

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}, \beta) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \beta) \\ e(\mathbf{x}, \beta) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (11)$$

令  $\mathbf{z} = [\mathbf{x}, \beta]^T$ , 则式(11)可表示为

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}) = \mathbf{0} \quad (12)$$

为解决扩展潮流方程(12)发散的问题, 这里定义不匹配函数

$$R(\mathbf{z}) = \sqrt{[\mathbf{H}(\mathbf{z})]^T [\mathbf{H}(\mathbf{z})]} \quad (13)$$

显然对于所有的  $\mathbf{z}$ , 有  $R(\mathbf{z}) \geq 0$ , 不匹配函数最小值的大小反映潮流的发散程度。当  $\min R(\mathbf{z}) = 0$  时, 表示潮流收敛<sup>[16]</sup>。以  $\min R(\mathbf{z})$  为目标, 采用 Damped Newton-Raphson 法求解式(12), 修正方程为

$$\begin{cases} \mathbf{z}^{k+1} = \mathbf{z}^k + \gamma \Delta \mathbf{z}^k \\ \Delta \mathbf{z}^k = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{z}^k) \mathbf{H}(\mathbf{z}^k) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{J}(\mathbf{z}^k)$  为扩展潮流方程第  $k$  次迭代的雅可比

矩阵；通过引入优化因子  $\gamma$  可以防止潮流发散，使得  $R(\mathbf{z}^{k+1})$  总是小于  $R(\mathbf{z}^k)$ 。此方法收敛性好，当  $R(\mathbf{z})$  接近最小时， $\gamma$  趋于零。

求解过程中，若支路的补偿度达到极限值之前  $\min R(\mathbf{z})=0$ ，即认为此补偿度是使扩展潮流方程收敛的最小补偿度。若支路的补偿度达到极限值但仍然不能使得  $\min R(\mathbf{z})=0$ ，则需要再装设 TCSC 加以补偿，根据本文提出的灵敏度选址方案确定下一条支路进行补偿。

求解  $\min R(\mathbf{z})$  时，由于扩展后的潮流方程在迭代过程中容易陷入局部最优，因此计算出的最优补偿度可能是实际的最优补偿度，也可能是其附近的值。为了提高计算精度，需要将计算出的最优补偿度带入支路参数中，用连续潮流法加以修正。

### 3.2 计算步骤

TCSC 定容的仿真计算步骤如下：

1) 将安装 TCSC 之前发生越界的不等式约束在其边界值处用等式形式表示出来，设为已知条件，将 TCSC 所要安装支路的补偿度设定为新的未知量，应用 Damped Newton-Raphson 法求解扩展潮流不匹配函数的最小值。

2) 若步骤 1) 中求得扩展潮流不匹配函数的最小值为零且并未达到该支路的极限补偿度值，记录此时的补偿度，并将其带入支路参数应用连续潮流法进行修正，得到 TCSC 所要安装支路的最优补偿度；否则，转入步骤 3)。

3) 将求得的补偿度带入支路参数，由灵敏度选址方案确定下一条补偿支路，转入步骤 1)。

## 4 算例及分析

### 4.1 基本条件

以 IEEE30 节点和 IEEE118 节点系统为例，对提出的方法进行验证。受电区负荷采用恒功率模型，负荷增加时，发电区发电机出力按比例分配方式增加<sup>[19]</sup>，与交易无关的区域，负荷和发电机出力保持初始状态不变，网损由平衡节点承担。为了防止过补偿现象发生，本文算例中取 TCSC 对支路的补偿度范围是 0~0.7。

### 4.2 IEEE30 节点系统仿真

IEEE30 节点 3 区系统包括 3 个区域、41 条支路，每个区域有 2 台发电机，节点 1 为全网的平衡节点，如图 2 所示。假设区域 3 到区域 2 的输电能力为 43 MW。

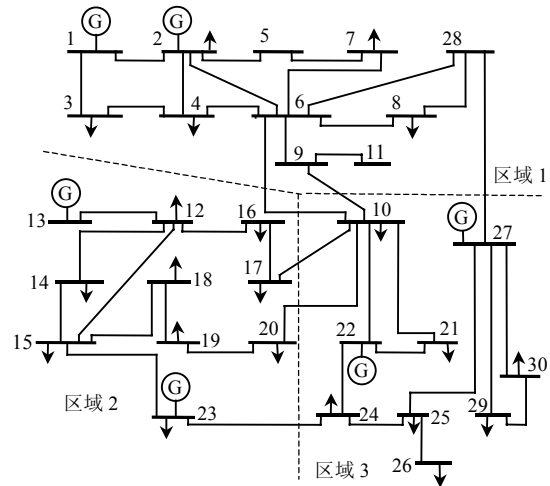


图 2 IEEE 30 节点 3 区系统

Fig. 2 Diagram of IEEE 30-bus-3-area system

考虑支路过负荷(传输有功)约束和节点电压约束，装设 TCSC 前采用连续潮流法，计算区域 3 到区域 2 的输电能力，得到  $\lambda=0.7267$ (对应 40.83 MW)，此时支路 25-27 过负荷。

将发电区和受电区的全部支路作为安装 TCSC 的备选支路，根据本文提出的方法选择 TCSC 的最优安装支路。灵敏度计算结果和每条支路分别安装相同补偿量的 TCSC 后实际计算结果见表 1。

表 1 IEEE 30 节点系统灵敏度分析结果

Tab. 1 Sensitivity analysis results of IEEE 30-bus system

灵敏度排序	灵敏度值	支路	实际 $\lambda$ 值	实际 $\lambda$ 值排序	实际发生越界的约束
1	-0.280 8	12-15	0.756 9	1	支路 25-27 过负荷
2	-0.120 7	22-24	0.746 6	2	支路 25-27 过负荷
3	-0.068 4	12-13	0.742 9	3	支路 25-27 过负荷
4	-0.051 0	12-14	0.740 8	4	支路 25-27 过负荷
5	-0.035 8	12-16	0.737 1	8	支路 25-27 过负荷
6	-0.028 1	10-20	0.737 4	7	支路 25-27 过负荷

表 1 表明，装设 TCSC 之后，系统的输电能力有了一定的提高，只在最灵敏的支路 12-15 上装设 TCSC 就可以使输电能力提高 5% 左右；而且装设 TCSC 前后发生越界的不等式约束条件并没有变化，灵敏度排序结果与实际排序结果基本相同。可见，本文提出的灵敏度法能够准确地确定对输电能力变化灵敏的支路。对灵敏度排序之后，只需对其值排在前面的支路分别安装相同补偿量的 TCSC，计算  $\lambda$  值，加以验证就可以得到优先装设 TCSC 的支路，从而可以大大缩小搜索范围，减少计算量。验证后，TCSC 优先装设最灵敏的支路 12-15 上。

将支路 25-27 上可以传输的有功功率上限 ( $P_{25-27}=0.1600$  pu) 设定为已知条件，补偿度  $\beta_{12-15}$  设为新的未知量，计算扩展潮流不匹配函数的最小

值。初始条件下( $\beta_{12-15}=0$ )扩展潮流不匹配函数的最小值为 0.131 4。当 $\beta_{12-15}=0.7$  时, 得到 $\min R(z)=0.0301$ , 仍然不能使得扩展的潮流方程式(12)收敛。将 $\beta_{12-15}=0.7$  带入支路参数, 根据选址策略, 将支路 22-24 的补偿度 $\beta_{22-24}$  设定为未知量, 计算扩展潮流不匹配函数的最小值, 当 $\min R(z)=0$  时, 得到补偿度 $\beta_{22-24}=0.3463$ 。将其带入支路参数应用连续潮流法进行修正得 $\beta_{22-24}=0.3179$ 。所以 $\beta_{12-15}=0.7$ ,  $\beta_{22-24}=0.3179$  为满足输电要求的最优补偿度。可见, 采用不匹配函数法计算支路最优补偿度, 结果准确, 只需很小范围内的修正。

若 2 条支路装设 TCSC 之后仍不能满足需要的输电能力, 考虑到 TCSC 的造价等经济因素, 可考虑选用其他的补偿方法。

#### 4.3 IEEE118 节点系统仿真

IEEE 118 节点系统共包括 186 条支路、54 台发电机、9 台变压器, 将其划分为 2 个区域, 如图 3 所示。A 区为受电区, B 区为发电区, 两区域通过支路 15-33、19-34、20-38、23-24 相连, 节点 69 为全网的平衡节点。假定两区域间的输电能力为 $\lambda=0.5000$ 。

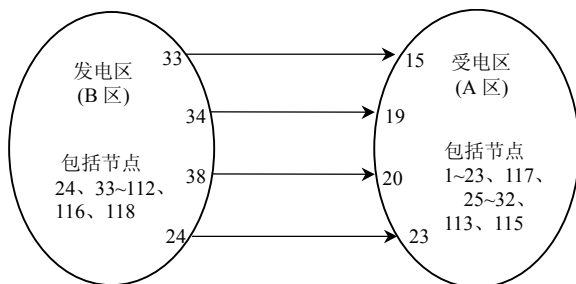


图 3 IEEE 118 节点 2 区系统

Fig. 3 Diagram of IEEE 118-bus-2-area system

考虑节点电压约束, 装设 TCSC 之前采用连续潮流法计算, 得到 $\lambda=0.4464$ , 此时, 节点 38 电压越下限(0.940 0 pu)。灵敏度分析结果如表 2 所示。表中最后一栏表示各支路分别安装 TCSC 之后在临界运行点节点 38 的电压值。

表 2 IEEE 118 节点灵敏度分析结果

Tab. 2 Sensitivity analysis results of IEEE 118 -bus system

灵敏度排序	支路	实际 $\lambda$ 值	实际 $\lambda$ 值排序	实际发生越界的约束	节点 38 电压值/pu
1	38-65	0.518 5	1	节点 21 下限	0.941 6
2	30-38	0.461 4	4	节点 21 下限	0.954 2
3	8-30	0.473 9	3	节点 21 下限	0.944 3
4	26-30	0.480 1	2	节点 38 下限	0.939 8
5	30-17	0.405 3	*	节点 38 下限	0.939 8
6	49-66	0.459 4	5	节点 38 下限	0.939 9
7	64-65	0.452 2	8	节点 38 下限	0.939 5
8	23-32	0.454 4	6	节点 38 下限	0.939 8
9	42-49	0.454 2	7	节点 21 下限	0.940 6

可见, 装设 TCSC 之后系统的输电能力有了很大的提高。有的支路实际安装 TCSC 后, 在临界运行点, 电压越下限的节点位置发生了变化。但是通过仿真计算可得节点 21 电压越下限时, 节点 38 的电压值接近其下限值。因此, 安装 TCSC 之前根据本文提出的灵敏度法得到的排序结果与各条支路分别安装 TCSC 之后的实际排序结果差别不大。而且在安装 TCSC 之前和安装之后的临界运行点不是同一个不等式约束条件发生越界的支路, 其灵敏度排序一般都在前面。即对输电能力越灵敏的支路, 安装 TCSC 之后在临界运行点发生越界的约束条件与 TCSC 安装之前相比越容易发生变化。验证后, 优先在支路 38-65 上装设 TCSC。

将节点 38 电压下限( $V_{38}=0.940 0$  pu)设定为已知条件, 补偿度 $\beta_{38-65}$  设为新的未知量, 计算得 $\beta_{38-65}=0.375 0$  时 $\min R(z)=0$ , 修正后最优补偿度为 $\beta_{38-65}=0.359 9$ 。

## 5 结论

1) 并不是任何支路安装 TCSC 对于提高输电能力都有利。若 TCSC 的安装位置选择恰当, 可以使系统的输电能力有较大提高, 反之会造成输电能力的降低。

2) 如果系统满足第 2.1 小节所指出的 2 个条件之一, 那么可以根据本文提出的灵敏度方法对 TCSC 进行选址。

3) 本文所提出的选址方法虽然不是一种精确计算法, 但该方法可以很准确地筛选出对提高输电能力有利的支路, 大大缩小了计算范围, 从而快速确定出 TCSC 的最优选址方案。

4) 用不匹配函数法计算得到的补偿度, 只需很小范围内的修正, 就可以求得支路的最优补偿度。由最优补偿度便可确定出该支路上需要安装的 TCSC 的最佳容量, 该方法计算量小, 易于实现。

5) TCSC 的安装数量以及 TCSC 与其他 FACTS 装置的协调安装是值得进一步研究的问题。

## 参考文献

- [1] 江振华, 程时杰, 傅予力, 等. 含有可控串联补偿电容的电力系统次同步谐振研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 47-52.  
Jiang Zhenhua, Cheng Shijie, Fu Yuli, et al. Analysis of sub-synchronous resonance of power system with TCSC [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 47-52(in Chinese).
- [2] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补抑制功率振荡的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 1-6.

- Guo Chunlin, Tong Luyuan. Application of TCSC to damp oscillations in multi-machine systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 1-6(in Chinese).
- [3] 苏建设, 柯宁, 陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS 协调策略设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 6-10.  
Su Jianshe, Ke Ning, Chen Chen. Coordinated design of generator excitation and FACTS for transient stability enhancement [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 6-10(in Chinese).
- [4] 武守远, 蒋卫平, 李亚健, 等. 可控串补用于暂态稳定控制的模拟试验研究[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 3-8.  
Wu Shouyuan, Jiang Weiping, Li Yajian, et al. Analog test on system dynamic control of TCSC[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 3-8(in Chinese).
- [5] 张彦魁, 张焰, 卢国良. 可控串联补偿电容器控制角模型及其在静态电压稳定研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 17-22.  
Zhang Yankui, Zhang Yan, Lu Guoliang. TCSC control angle model and its application in static voltage stability research[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 17-22(in Chinese).
- [6] Canizares C A, Faur Z T. Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(1): 158-165.
- [7] 刘大鹏, 唐国庆, 雷宪章, 等. 选择最佳 TCSC 安装地点提高电力系统电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 16-19.  
Liu Dapeng, Tang Guoqing, Lei Xianzhang, et al. Improving power system voltage stability in terms of optimal placement of TCSC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 16-19(in Chinese).
- [8] Gerbex S, Cherkaoui R, Germond A J. Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms [J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(3): 537-544.
- [9] 张立志, 赵冬梅. 考虑 FACTS 配置的电网输电能力计算[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 26-31.  
Zhang Lizhi, Zhao Dongmei. Calculation of power network available transfer capability considering optimal mounted positions of FACTS devices[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 26-31(in Chinese).
- [10] 王成山, 陈光远, 魏炜, 等. 考虑负荷及发电机出力不确定性的 TCSC 选址与定容[J]. 继电器, 2006, 34(7): 51-55.  
Wang Chengshan, Chen Guangyuan, Wei Wei, et al. Optimal location and parameters of TCSC considering load and generator output uncertainties[J]. Relay, 2006, 34(7): 51-55(in Chinese).
- [11] 占勇, 李光熹, 刘志超, 等. 计及 FACTS 装置的最大输电能力研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 23-26.  
Zhan Yong, Li Guangxi, Liu Zhichao, et al. The transfer capability incorporating FACTS devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 23-26(in Chinese).
- [12] 严赵宇, 李渝曾. 一种求解可用传输容量的新方法[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 68-72.  
Yan Zhaoyu, Li Yuzeng. A new method to calculate available transfer capability[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 68-72(in Chinese).
- [13] 刘皓明, 李卫星, 倪以信, 等. 计及静态安全约束的跨区域双边交易最大交易量实用计算方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 1-5.  
Liu Haoming, Li Weixing, Ni Yixin, et al. A practical method for calculating maximum transaction volume of bilateral transaction in multiregional electricity market considering static security constraints[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 1-5(in Chinese).
- [14] 耿光飞, 杨仁刚. 基于定向变异遗传算法的地区电网无功功率优化[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 42-44.  
Geng Guangfei, Yang Rengang. Reactive power optimization of regional power network by directed mutation based genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 42-44(in Chinese).
- [15] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 考虑 ULTC 和 SVC 等影响的功率交换能力的分析与计算[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 17-22.  
Li Guoqing, Wang Chengshan, Yu Yixin. Analysis and calculation of transmission transfer capability considering some influencing factor[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 17-22(in Chinese).
- [16] 马平, 蔡兴国, 于继来, 等. 基于最小不匹配函数的低压减载算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 27-31.  
Ma Ping, Cai Xingguo, Yu Jilai, et al. Study on an under voltage load shedding strategy based minimum mismatch function[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 27-31(in Chinese).
- [17] Greene S, Dobson I, Alvarado F L. Sensitivity of transfer capability margins with a fast formula[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 34-40.
- [18] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 用于静态稳定预防控制的新灵敏度分析法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 27-33.  
Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming. A new sensitivity method for static stability preventive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 27-33(in Chinese).
- [19] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 9-12.  
Jiang Wei, Wang Chengshan. PV curve tracing in power system transfer capability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 9-12(in Chinese).



潘淑杰

收稿日期: 2008-05-09.

作者简介:

潘淑杰(1982—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统可用输电能力计算方面的研究, E-mail: surfy560922@163.com;

马平(1973—), 女, 博士, 从事电力系统稳定性分析与控制等方面的研究;

蔡兴国(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析与控制、电力系统 IT 等方面的研究;

韩冬(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济调度。

(责任编辑 李兰欣)