

含静止同步串联补偿器的电力系统电压稳定性 奇异值分析法及指标计算

吴杰康¹, 秦砺寒¹, 胡文霞¹, 宁琳²

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004;

2. 北京超高压有限公司, 北京市 东城区 100045)

Singular Value Calculation Methods for Voltage Stability and Index Calculation of Power System With Static Synchronous Series Compensators

WU Jie-kang¹, QIN Li-han¹, HU Wen-xia¹, NING Lin²

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China;

2. Beijing Super-High Voltage Company, Dongcheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: The authors propose a hybrid power injection model of static synchronous series compensator (SSSC) for power flow and voltage stability analysis, and derive the power flow equation after the SSSC model is added to power system. On the basis of power flow calculation and singular value decomposition, the index to judge the nodes with weak voltage stability based on the hybrid SSSC model and singular value decomposition is constructed. By use of singular value analysis the impacts of SSSC on power system voltage stability under average growth of power load and load growth at the most sensitive nodes are analyzed in depth. The way to judge the weakest node in power system and the node with the fastest load growth is researched by use of the index to judge weak node and the index of most dangerous load growth mode. It is proved that adding SSSC to the weakest node and the node with the fastest load growth can enhance power system voltage stability. The feasibility, effectiveness and applicability of the constructed hybrid SSSC model and the two power source stability analysis indices are validated by simulative calculation results of IEEE 14-bus test system.

KEY WORDS: voltage stability; static synchronous series

基金项目: 国家 863 高技术基金资助项目(2007AA04Z100); 国家自然科学基金资助项目(50767001); 广西自然科学基金资助项目(桂科自0640028); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划项目(RC20060808002); 广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(20070808M32)。

Project Supported by National High Technology Research and Development of China 863 Program (2007AA04Z100); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50767001).

compensator hybrid model; minimum singular value; power system

摘要: 提出了一种静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)混合模型, 推导了电力系统中加入 SSSC 模型后的潮流方程。在潮流计算和奇异值分解的基础上, 构建了基于 SSSC 混合模型和奇异值分解的电压稳定性弱节点判别指标及最危险负荷增长方式指标。利用奇异值分析法, 深入分析了在负荷平均增长和最灵敏节点负荷增长 2 种情况下, SSSC 对电力系统电压稳定性的影响。研究了采用弱节点判别指标和最危险负荷增长方式指标确定系统最薄弱节点和负荷增长最快节点的方式。证明了在系统最薄弱节点和负荷增长最灵敏节点线路中加入 SSSC 后能提高电力系统电压稳定性。对 IEEE14 节点系统进行了仿真计算, 验证了所构建的 SSSC 混合模型以及 2 个电源稳定性分析指标的可行性、有效性和适用性。

关键词: 电压稳定性; 静止同步串联补偿器混合模型; 最小奇异值; 电力系统

0 引言

近年来, 电压不稳定已经成为限制电力传输的主要因素之一, 电压稳定问题引起了人们的广泛关注^[1]。静态电压稳定性分析因可以预警系统电压崩溃, 并提出合理的防御措施而受到极大地重视和发展。最小奇异值作为静态电压稳定分析指标, 在实际电力系统中得到了较为广泛的应用。文献[2]给出了最小奇异值对系统参数的灵敏度算法, 并将最小奇异值灵敏度用于薄弱节点的分析; 文献[3]结合最小奇异值指标对江苏电网的稳定性做了分析, 给出

了一种工程上实用的稳定程度判定方法。

随着全球电力系统复杂性的进一步增加以及人们对可靠、安全、可控、经济和高质量电能需求的不断增长，灵活交流输电系统(flexible AC transmission systems, FACTS)装置将在未来的电力系统中发挥关键性的作用。FACTS 装置按其系统中的连接方式可以分为串联型、并联型和综合型 3 类，传统的串联补偿装置如可控串补(thyristor controlled series compensation, TCSC)已在实际中得到了一定的应用。文献[4]阐明了 TCSC 抑制次同步振荡的物理机理及实现抑制次同步振荡需满足的工作条件；文献[5]以多机系统为对象，研究了可控串补抑制功率振荡的规律；文献[6]研究了一种新兴的串联型设备 SSSC，它通过注入一个与线路电流正交的电压来控制潮流，抑制振荡，提高系统稳定性；文献[7]介绍了一种 SSSC 的 π 型模型；文献[8]介绍了一种将 SSSC 模型引入潮流计算的方法，缺点是控制效果不明显；文献[9-11]针对电源稳定性指标进行了综合分析，但对含 SSSC 的电力系统电源稳定性分析指标的构建和应用则涉及不多。

本文将建立一种混合型的 SSSC 阻抗电压源模型，并构建基于 SSSC 的弱节点判别指标、最危险的负荷增长方式分析指标，研究 SSSC 对电力系统电压稳定性的影响，探究利用所构建的 SSSC 混合模型和 2 个分析指标来评估电压稳定性的方法。

1 电力系统潮流模型

假定系统节点总数为 n 个，PV 节点 r 个，平衡节点为第 n 个节点。在正常运行条件下，系统的有功功率方程有 $n-1$ 个，无功功率方程有 $n-r-1$ 个。在电力系统静态分析中，极坐标形式的潮流方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j=1}^{j=n} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j=1}^{j=n} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$

线性简化后系统潮流方程的形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

2 SSSC 的数学模型

2.1 含 SSSC 的电源阻抗混合模型

综合前 2 种模型的优点设计了混合阻抗和电源模型，即用可控逆变器使相量 \dot{V}_{SSSC} 与节点 1 的电压角度垂直，SSSC 相当于串联在线路中的可

控电抗，建模时仍为电压源的形式。令控制变量、逆变器交流输出电压的相位 $\delta = \pi/2$ ，如图 1 所示^[12-13]。这种模型的优点是实用性好，可以方便地用于潮流计算，适宜工程应用，对潮流能起到良好的控制效果。SSSC 的等值电路和相量图分别如图 1、图 2 所示。

图 1 的含源支路 lm 由诺顿定理可以转化为图 3 的电流源与阻抗并联的形式，电流源为

$$I_c = \dot{V}_{SSSC} / (r + jx)$$

图 3 中 P_{lc} 、 Q_{lc} 、 P_{mc} 、 Q_{mc} 分别为节点 1、m 的注入功率。



图 1 SSSC 的等值电路
Fig. 1 Equivalent circuit of SSSC

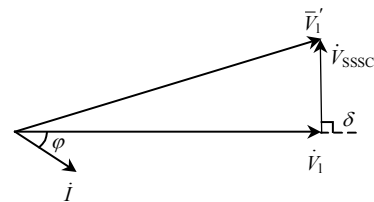


图 2 SSSC 的相量图
Fig. 2 Phasor diagram of SSSC

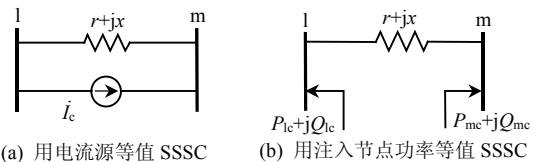


图 3 SSSC 的等值节点注入功率
Fig. 3 The power injection of SSSC equivalence node

由上式可知

$$P_{lc} + jQ_{lc} = -\dot{V}_1 \dot{I}_c^* = -\dot{V}_1 \left(\frac{\dot{V}_{SSSC}}{r + jx} \right)^*$$

$$P_{mc} + jQ_{mc} = \dot{V}_m \dot{I}_c^* = \dot{V}_m \left(\frac{\dot{V}_{SSSC}}{r + jx} \right)^*$$

\dot{V}_{SSSC} 的相位为 $\theta_1 + \frac{\pi}{2}$ ，可得

$$P_{lc} = -V_1 V_{SSSC} b$$

$$Q_{lc} = V_1 V_{SSSC} g$$

$$P_{mc} = V_m V_{SSSC} [b \sin(\theta_1 - \theta_m) - g \cos(\theta_1 - \theta_m)]$$

$$Q_{mc} = -V_m V_{SSSC} [b \cos(\theta_1 - \theta_m) + g \sin(\theta_1 - \theta_m)]$$

式中： $g = \frac{r}{r^2 + x^2}$ ； $b = \frac{x}{r^2 + x^2}$ 。

SSSC 发出的功率为

$$P_{\text{SSSC}} + jQ_{\text{SSSC}} = \dot{V}_{\text{SSSC}} \dot{I}^* = \dot{V}_{\text{SSSC}} \left(\frac{\dot{V}_{\text{SSSC}} + \dot{V}_1 - \dot{V}_m}{r + jx} \right)^*$$

$$P_{\text{SSSC}} = gV_{\text{SSSC}}^2 + gV_{\text{SSSC}}V_m \cos(\theta_1 - \theta_m) - bV_{\text{SSSC}}[V_1 - V_m \sin(\theta_1 - \theta_m)]$$

$$Q_{\text{SSSC}} = bV_{\text{SSSC}}^2 + gV_{\text{SSSC}}[V_1 - V_m \sin(\theta_1 - \theta_m)] + bV_{\text{SSSC}}V_m \sin(\theta_1 - \theta_m)$$

从节点 l 流向节点 m 的功率为

$$P_{lm} + jQ_{lm} = \dot{V}_l \dot{I}^* = \dot{V}_l \left(\frac{\dot{V}_{\text{SSSC}} + \dot{V}_1 - \dot{V}_m}{r + jx} \right)^*$$

$$P_{lm} = gV_l^2 - gV_lV_m \cos(\theta_l - \theta_m) + bV_l[V_{\text{SSSC}} + V_m \sin(\theta_l - \theta_m)]$$

$$Q_{lm} = bV_l^2 - gV_l[V_{\text{SSSC}} + V_m \sin(\theta_l - \theta_m)] - bV_lV_m \cos(\theta_l - \theta_m)$$

在节点 l 和 m 间加入 SSSC 后, 节点 l 和 m 的功率平衡方程为

$$\Delta P_l = P_{ls} - bV_lV_{\text{SSSC}} - V_l \sum_{j \in l} V_j (G_{lj} \cos \theta_{lj} + B_{lj} \sin \theta_{lj}) = 0$$

$$\Delta Q_l = Q_{ls} + gV_lV_{\text{SSSC}} - V_l \sum_{j \in l} V_j (G_{lj} \sin \theta_{lj} - B_{lj} \cos \theta_{lj}) = 0$$

$$\Delta P_m = P_{ms} - V_mV_{\text{SSSC}} [g \cos(\theta_1 - \theta_m) - b \sin(\theta_1 - \theta_m)] - V_m \sum_{j \in m} V_j (G_{mj} \cos \theta_{mj} + B_{mj} \sin \theta_{mj}) = 0$$

$$\Delta Q_m = Q_{ms} - V_mV_{\text{SSSC}} [b \cos(\theta_1 - \theta_m) + g \sin(\theta_1 - \theta_m)] - V_m \sum_{j \in m} V_j (G_{mj} \sin \theta_{mj} - B_{mj} \cos \theta_{mj}) = 0$$

SSSC 自身的运行约束为

$$\Delta P_{\text{SSSC}} = gV_{\text{SSSC}}^2 + gV_{\text{SSSC}}V_m \cos(\theta_1 - \theta_m) - bV_{\text{SSSC}}[V_1 - V_m \sin(\theta_1 - \theta_m)] = 0$$

2.2 计及 SSSC 的潮流计算

根据设定的参数, SSSC 主要有以下 3 种常用的控制方式: 恒压控制方式、恒电抗控制方式、恒功率控制方式。本文所采用的控制方案是恒压控制, 即将 SSSC 安放在恒压源上保持线路电压恒定。系统加入一个 SSSC 后, 安放处节点转化为 PV 节点, 原本 PV 节点数变为 $r+1$ 个。系统的无功功率方程变为 $n-r-2$ 个。由于系统增加了一个控制变量 V_{SSSC} , 为使方程组顺利求解, 把 SSSC 自身约束方程参与迭代, 雅可比矩阵增加了一行一列。为叙述方便, 将 SSSC 自身约束方程放在修正方程式的最后一行, 系统的潮流线性化方程变为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q' \\ \Delta P_{\text{SSSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N}' \\ \mathbf{J} & \mathbf{L}' \\ \mathbf{H}_{\text{SSSC}} & \mathbf{N}_{\text{SSSC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \\ \Delta V_{\text{SSSC}} \end{bmatrix}$$

其中

$$\Delta P = [\Delta P_1 \ \Delta P_2 \ \cdots \ \Delta P_l \ \Delta P_m \ \cdots \ \Delta P_{n-1}]^T$$

$$\Delta Q' = [\Delta Q_1 \ \Delta Q_2 \ \cdots \ \Delta Q_l \ \Delta Q_m \ \cdots \ \Delta Q_{n-r-2}]^T$$

$$\Delta V' = [\Delta V_1 \ \Delta V_2 \ \cdots \ \Delta V_l \ \Delta V_m \ \cdots \ \Delta V_{n-r-2}]^T$$

$$\Delta \theta = [\Delta \theta_1 \ \Delta \theta_2 \ \cdots \ \Delta \theta_l \ \Delta \theta_m \ \cdots \ \Delta \theta_{n-1}]^T$$

$$\mathbf{N}_{\text{SSSC}} = [0 \ 0 \ 0 \ N_{\text{SSSC},l} \ N_{\text{SSSC},m} \ \cdots \ 0 \ N_{\text{SSSC},\text{SSSC}}]$$

$$\mathbf{H}_{\text{SSSC}} = [0 \ 0 \ \cdots \ H_{\text{SSSC},l} \ H_{\text{SSSC},m} \ \cdots \ 0]$$

同理, 当系统中加入 k 个 SSSC 时, 系统增加 k 个控制变量, 分别为: $\Delta V_{sk} = [\Delta V_{\text{SSSC}1}, \Delta V_{\text{SSSC}2}, \cdots, \Delta V_{\text{SSSC}k}]$ 。相应的 SSSC 自约束方程增加 k 个, 设 $\Delta P_{sk} = [\Delta P_{\text{SSSC}1}, \Delta P_{\text{SSSC}2}, \cdots, \Delta P_{\text{SSSC}k}]$ 。这时系统的潮流线性化方程增加 k 维, 可写为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q' \\ \Delta P_{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N}' \\ \mathbf{J} & \mathbf{L}' \\ \mathbf{H}_{sk} & \mathbf{N}_{sk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V' \\ \Delta V_{sk} \end{bmatrix}$$

其中雅可比矩阵的各个元素可以仿照加入一个 SSSC 时列出。

3 奇异值分解法

3.1 奇异值分析

对雅可比矩阵 \mathbf{J} 进行奇异值分解^[14], 可得

$$\mathbf{J} = \mathbf{V}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{U}^T = \sum_{i=1}^{2n-m} V_i \delta_i U_i^T$$

式中: 奇异值向量 V_i 和 U_i 是规格化矩阵 \mathbf{V} 和 \mathbf{U} 的第 i 列, $\boldsymbol{\Sigma}$ 是正的实奇异值 δ_i 的对角矩阵, 如 $\delta_1 \geq \delta_2 \geq \cdots \geq \delta_{2n-m}$ 。

令 δ_{\min} 为最小奇异值, 当 $\delta_{\min} \neq 0$ 时, \mathbf{J} 非奇异, 则有

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \boldsymbol{\Sigma} \delta_i^{-1} U_i V_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

当 δ_{\min} 趋近于零时, 系统接近于电压崩溃点, 系统响应完全由最小奇异值 δ_{2n-m} 和它相应的左右奇异向量 V_{2n-m} 和 U_{2n-m} 所决定。因此

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \delta_{2n-m}^{-1} U_{2n-m} V_{2n-m}^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

式中: $U_{2n-m} = [\theta_1 \ \cdots \ \theta_n, U_1 \ \cdots \ U_{n-m}]^T$; $V_{2n-m} = [P_1 \ \cdots \ P_n, Q_1 \ \cdots \ Q_{n-m}]^T$ 。

3.2 奇异值分析指标

雅可比矩阵的最小奇异值可以作为一个好的静态电压稳定指标^[15]。满秩矩阵 \mathbf{A} 的奇异值从数学意义上讲, 可以解释为对应超椭圆平面的半轴长度。 \mathbf{A} 的最小奇异值 δ_{n-1} 是 \mathbf{A} 到秩为 $n-1$ 的奇异矩阵集合的最小距离。

本文通过弱节点判别指标、负荷增长指标^[15]对实例系统进行分析, 具体指标如下:

1) 弱节点判别指标

$$L_j = \frac{U_j}{\delta_{2n-m}}, \quad j \in 1, 2, \dots, n-m$$

2) 最危险的负荷增长方式指标(i 为负荷节点)

$$D_i = \frac{P_i}{\sum_j P_j}$$

3.3 奇异值分析法的实现步骤

奇异值分析法的具体实现步骤如图 4 所示。

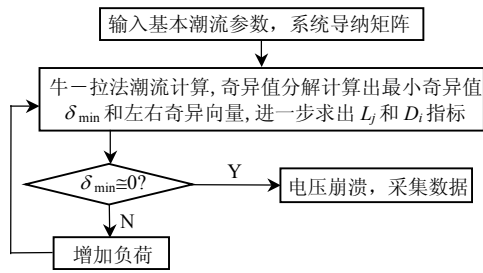


图 4 奇异值分析法流程图

Fig. 4 Flow chart of minimum singular value method

4 算例分析

本文采用电力系统分析工具 PSAT2.0 对 IEEE 5 机 14 节点系统进行仿真。IEEE 14 节点系统有 5 台发电机(即 4 个 PV 节点, 1 个平衡节点), 3 台可调变压器以及 1 个并联电容器, 共有 8 个控制变量, 其系统结构如图 5 所示。

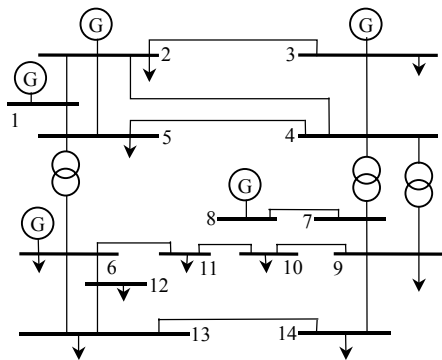


图 5 IEEE 14 节点系统
Fig. 5 IEEE 14-bus system

均匀增加系统负荷, 由左奇异相量求得的各负荷点最危险负荷增长方式指标 D_i 如表 1 所示。由右奇异相量计算出各负荷节点的弱节点判别指标 L_j 如表 2 所示。

从指标 D_i 可以看出, 节点 11 是负荷增长速度最快的节点; 指标 L_j 可以看出, 节点 12 是最薄弱节点, 分别在节点 6、11、12、13 间的线路中。加入 SSSC 后, 提高了相应的指标值, 改善了稳定性。

表 1 安装 SSSC 前后 D_j 指标值
Tab. 1 Value of D_j with and without SSSC

负荷点	系统没加 SSSC 前 D_i 指标值	节点 12、13 间加 SSSC 后 D_i 值	节点 6、11 间加 SSSC 后 D_i 值
4	-0.221 718	$4.969\ 396 \times 10^{-3}$	-0.105 720 6
5	-0.310 455	$4.159\ 987 \times 10^{-3}$	-0.159 392 1
7	-0.690 143	$-3.282\ 051 \times 10^{-2}$	-0.729 760 1
9	-0.771 896	$1.679\ 637 \times 10^{-2}$	-0.892 605 4
10	-0.335 419	$1.765\ 585 \times 10^{-2}$	-0.646 769 8
11	1.479 876	$-8.916\ 387 \times 10^{-3}$	1.084 729
12	1.207 206	$7.287\ 782 \times 10^{-3}$	1.015 325
13	-1.611 23	$5.859\ 698 \times 10^{-4}$	-0.863 996 4
14	0.777 484 3	$1.148\ 358 \times 10^{-3}$	0.704 851 9

表 2 安装 SSSC 前后 L_j 指标值
Tab. 2 Value of L_j with and without SSSC

负荷节点	系统没加 SSSC 前 L_j 值	节点 12、13 间加 SSSC 后 L_j 值	节点 6、11 间加 SSSC 后 L_j 值
4	-0.036 2	0.031 4	0.025 9
5	-0.021 4	0.015 6	0.013 5
7	-0.077 4	0.074 7	0.057 9
9	-0.142 5	0.139 1	0.108 7
10	-0.160 6	0.152 8	0.149 9
11	-0.010 6	0.090 4	-0.173 2
12	-0.009 5	0.016 7	-0.059 2
13	-0.043 8	0.052 9	-0.014 3
14	-0.194 1	0.200 6	0.094 9

图 6 为在所有节点负荷均匀增加的情况下, IEEE14 节点系统节点 6 和 11、12 和 13 之间加入 SSSC 前后最小奇异值曲线图。由图 6 可以看出, 在最薄弱节点 12 处加入 SSSC 后系统最小奇异值提高的幅度更大, 承载负荷的效果比在节点 11 处加入 SSSC 好。

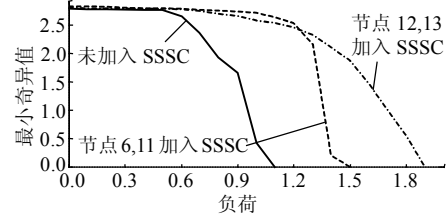


图 6 IEEE14 节点系统节点 6 和 11、12 和 13 之间加入 SSSC 前后最小奇异值曲线
Fig. 6 Curve of minimal singular value in IEEE14-bus system without SSSC and with SSSC devices installed between node 6 and 11, 12 and 13

图 7 为仅在最薄弱节点负荷增加的情况下 IEEE14 节点系统节点 12 和 13 之间加入 SSSC 前后最小奇异值曲线图。由图 7 可以看出, 节点 12 负荷增长最灵敏。

从图中可以看出, 加入 SSSC 后提高了系统的最小加入奇异值和系统承载负荷的能力, 对系统接近电压崩溃时的电压稳定性起到了一定的调节作用,

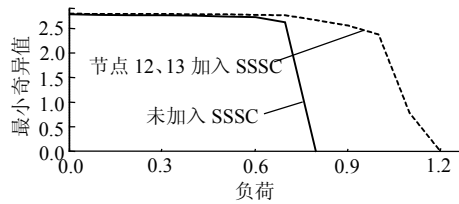


图7 IEEE14 节点系统节点 12 和 13 之间加入 SSSC 前后最小奇异值曲线

Fig. 7 Curve of minimal singular value in IEEE14-bus system without SSSC and with SSSC devices installed between node 12 and 13

对提高最薄弱节点的耐负荷能力和全系统的电压稳定性均起到了良好的作用。

5 结论

1) 本文所建的 SSSC 模型很好地改善了系统电压稳定性情况, 具有良好的实用价值。

2) 基于左右奇异相量的 L_i 指标和 D_i 指标是很好的电压稳定性判据, 能方便地判断系统的薄弱节点和负荷增长敏感节点。在电力系统的薄弱节点线路上和负荷增长敏感的节点线路上串联 SSSC 装置, 均可不同程度地提高系统的电压稳定性, 但在系统最薄弱节点加入 SSSC 装置效果尤为明显。

3) 不论系统各个节点负荷均匀增加, 还是在负荷增长最敏感节点或者最薄弱节点上增加负荷, SSSC 都能提高电压稳定性。

参考文献

- [1] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 1-6.
Han Zhenxiang, Cao Yijia. Power system security and its prevention [J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6(in Chinese).
- [2] 陈敏, 张步涵, 段献忠, 等. 基于最小奇异值灵敏度的电压稳定薄弱节点研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 36-39.
Chen Min, Zhang Buhan, Duan Xianzhong, et al. Study on weak buses of voltage stability based on sensitivity of minimum singular value [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 36-39(in Chinese).
- [3] 李钦, 孙宏斌, 赵晋泉, 等. 静态电压稳定分析模块在江苏电网的在线应用[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 11-17.
Li Qin, Sun Hongbin, Zhao Jinquan, et al. On-line application of static voltage stability analysis module in Jiangsu power system [J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 11-17(in Chinese).
- [4] 葛俊, 童陆园, 耿俊成. TCSC 抑制次同步谐振的机理研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 25-29.
Ge Jun, Tong Luyuan, Geng Juncheng. The mechanism research of SSR mitigation by TCSC and its parameter design[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 25-29(in Chinese).
- [5] 郭春林, 童陆园. 多机系统中可控串补(TCSC)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).

- [6] 姜旭, 肖湘宁. 级联结构的小步长建模[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 1-3.
Jiang Xu, Xiao Xiangning. Study on small-step modeling in RTDS [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 1-3(in Chinese).
- [7] Zhang Y K, Zhang Y. A novel power injection model of embedded SSSC with multi-control modes for power flow analysis inclusive of practical constraints[J]. Electric Power Systems Research 2005(76): 374-381.
- [8] Alomoush M I. Static synchronous series compensator to help energy markets resolve congestion-caused problems[C]. Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2004.
- [9] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
Yuan Jun, Duan Xianzhong, He Yangzan, et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems [J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 7-10(in Chinese).
- [10] 王景亮, 张焰, 王承民. 基于灵敏度分析与最优潮流的电网无功/电压考核方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 65-69.
Wang Jingliang, Zhang Yan, Wang Chengmin. Power system reactive power/voltage assessment based on sensitivity analysis and optimal power flow[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 65-69(in Chinese).
- [11] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
Zhou Shuangxi, Jiang Yong, Zhu Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7(in Chinese).
- [12] Kumkratug P, Haque M H. Improvement of stability region and damping of a power system by using SSSC[C]. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2003.
- [13] Mihalic R, Gabrijel U. A structure-preserving energy function for a static series synchronous compensator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1501-1507.
- [14] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 12-55.
- [15] 冯治鸿, 周双喜. 大规模电力系统电压失稳区的确定方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
Feng Zhihong, Zhou Shuangxi. Determination of voltage collapse areas in large scale power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156(in Chinese).



吴杰康

收稿日期: 2008-08-10.

作者简介:

吴杰康(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为梯级水电站群水电能源利用与调控、电力系统运行与分析、电力系统优化技术、电力市场、装备 FACTS 的电力系统电压稳定性、FACTS 调控与影响, E-mail: wujiekang@163.com;

秦砺寒(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与计算;

胡文霞(1983—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与分析、电力市场;

宁琳(1981—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与分析。

(编辑 王晔)