

微分同胚正规形理论在确定负荷控制地点及 SVC 安装地点中的应用

张靖¹, 何宇¹, 程时杰², 文劲宇², 彭志炜¹

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州省 贵阳市 550003;

2. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Application of Normal Forms of Diffeomorphism in Determination of Load Control and SVC Allocation Position

ZHANG Jing¹, HE Yu¹, CHENG Shi-jie², WEN Jin-yu², PENG Zhi-wei¹

(1. College of Electric Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou Province, China; 2. Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Using the theory of normal forms of diffeomorphism and according to nonlinear participation factors, a more accurate method to decide the location to implement load control or the place to allocate static var compensator (SVC) is proposed. Taking load control in WSCC 9 bus power system and SVC allocation in New England 39 bus power system for examples, by use of voltage stability index and dynamic simulation the stability of these systems are verified. Results show that the normal forms of diffeomorphism theory can reflect the nonlinear characteristic of power grid better, and the location to implement load control and place to allocate SVC can be effectively decided.

KEY WORDS: power system; normal forms of diffeomorphism; nonlinear system control; participation factor; load control; static var compensator(SVC)

摘要:应用微分同胚正规形理论,以非线性参与因子为依据,提出了确定实施负荷控制的地点及静止无功补偿(static var compensator, SVC)安装地点的更准确方法。分别以美国西部9节点系统、新英格兰39节点系统为算例进行了有功负荷控制和SVC安装地点分析,并采用电压稳定性指标以及动态仿真对系统的稳定性进行了检验。结果表明,微分同胚正规形方法能更好地反映电力系统的非线性特性,有效地确定实施负荷控制措施的地点以及SVC的安装地点。

关键词:电力系统;微分同胚正规形;非线性系统控制;参与因子;负荷控制;静止无功补偿器(SVC)

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217906);国家自然科学基金资助项目(50595410)。

Project Supported by the Special Fund of the National Basic Research Program of China (973 Program)(2004CB217906);Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50595410)。

0 引言

电力系统是一个复杂的非线性系统,大电网、大机组、超高压、重负荷、远距离输电使电力系统出现了一些新问题,其中包括复杂的非线性行为^[1]。随着全国电网互联及西电东送等重大战略的实施,电网负荷中心的受电比重将不断增加,负荷中心缺乏大电源的支撑,这使得电力系统不可避免地受到电压稳定性问题的严重威胁。

在重载运行的状态下,电力系统呈现出了越来越复杂的行为^[2-4]。由于环境和经济的制约,为降低成本,电力系统中的元件冗余度不断减小,电力系统的运行点势必会越来越接近其稳定极限,电力系统的非线性也必然会急剧增强^[5]。

由于系统的非线性对系统的性能有不可忽视的影响,因此采用线性化方法可能会导致不精确甚至是错误的结果。时域仿真方法是唯一能够完整分析电力系统非线性特性的方法,但却不能提供有价值的系统结构信息,因此很难从分析结果中得到电力系统复杂行为的物理本质。

向量场正规形是一种分析非线性系统动态行为的方法,它已被成功地引入电力系统分析^[6-14]。微分同胚正规形与向量场正规形相似,可以用于分析非线性方程^[15-16];正规形理论能够在一定程度上计及电力系统的非线性特性,提供有价值的系统结构信息,并可以从分析结果中得到系统复杂行为的物理本质。本文将采用微分同胚正规形方法分析电力系统潮流方程,并根据电力系统的二阶信息来分

析电力系统的电压稳定性。

1 潮流方程及其正规形变换

电力系统的潮流方程可以表示为

$$\mathbf{L} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式中： $\mathbf{L}=(P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, Q_1, Q_2, \dots, Q_m)^T$ ； $\mathbf{x}=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}, V_1, V_2, \dots, V_m)^T$ 。

当电力系统不满足二阶模态共振条件时，对式(1)进行微分同胚正规形变换，系统的潮流方程在 z 坐标下可以近似表达为包括了二阶非线性项的线性表达式。

$$I_i = I_j I_k \quad (2)$$

$$U_i^{-1} \mathbf{L} = I_i z_i \quad (3)$$

式中： I_i 为潮流方程雅可比矩阵的特征值； U_i 为潮流方程雅可比矩阵的右特征向量矩阵 U 的第 i 行。

2 模式的参与因子

电力系统中不同负荷节点对电压稳定性的影响程度可以通过对所有的负荷节点施加扰动，并经过反复地计算和分析确定。但这种方法非常耗时，而参与因子可以用于估计负荷节点对电压稳定性的影响程度。文献[17]提出了节点电压参与因子的概念，并把它用于电压稳定研究。文献[18-20]扩展了模态分析范围，定义了节点的有功参与因子，并用有功参与因子衡量节点有功负荷对电力系统稳定性的影响程度。文献[21]采用模态分析法研究最危险模式，通过选择合适的静止无功补偿 (static var compensator, SVC) 安装地点来提高电力系统静态电压稳定性。线性参与因子 p_{ki} 与非线性参与因子 p_{2ki} 可以分别通过式(4)(5)计算。

$$p_{ki} = u_{ki} v_{ik} \quad (4)$$

$$p_{2ki} = u_{ki} (v_{ik} + v_{ikk}) \quad (5)$$

式中： $v_{ikk} = -\sum_{p=1}^{n+m-1} \sum_{q=1}^{n+m-1} h_{pq}^i v_{pk} v_{qk}$ ； $h_{pq}^i = \frac{C_{pq}^i}{(I_p I_q - I_i)}$ ；

$C^i = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{n+m-1} v_{ip} \mathbf{U}^T \mathbf{H}_s \mathbf{U} = [C_{pq}^i]$ ； \mathbf{H}_s 为潮流方程的海森矩阵； u_{ki} 为潮流方程雅可比矩阵的右特征向量矩阵 U 的元素； v_{ik} 为矩阵 $\mathbf{V}=\mathbf{U}^{-1}$ 的元素。

由式(4)(5)可以看出：线性参与因子 p_{ki} 是非线性参与因子 p_{2ki} 的一部分，而 $u_{ki} v_{ikk}$ 则是对线性参与因子 p_{ki} 的非线性修正。 p_{2ki} 反映了第 k 个状态变量对第 i 个模式的非线性量度。非线性参与因子 p_{2ki} 不仅包括线性参与项，还包括二阶参与项，因此可以提供更加准确的信息。

系统中每个节点对最危险模式的参与程度决定了该节点对电压稳定性影响的重要程度。采用最危险模式的非线性参与因子 p_{2ki} 作为指标，衡量节点对电压稳定性的影响程度，非线性参与因子越大，表明该节点对电压稳定性的影响越大。在本文中，负荷节点有功功率的非线性参与因子称为节点有功非线性参与因子，负荷节点无功功率的非线性参与因子称为节点电压非线性参与因子。对有功负荷控制来说，节点有功非线性参与因子越大表明该节点越适合实施负荷控制来提高电力系统的电压稳定性；而对无功补偿来说，节点电压非线性参与因子越大表明在该节点进行无功补偿能更有效地提高电力系统的电压稳定性。

3 非线性参与因子的讨论

本文以潮流方程为基础，对电力系统的全阶模型进行电压稳定性分析，将最危险模式的非线性参与因子 p_{2ki} 作为估计实施负荷控制地点或者 SVC 安装地点的依据。最危险模式的节点有功非线性参与因子或者节点电压非线性参与因子越大，表明该节点越适合实施负荷控制或者安装 SVC。这是因为：

(1) 在电力系统电压崩溃点附近，对雅可比矩阵进行模态分析，通过参与因子的大小可识别容易发生电压崩溃的节点，并且获得对系统电压稳定性影响最大的节点。但是传统的模态分析方法只能对静态非线性潮流方程进行线性化处理，系统的非线性特性被忽略，结果可能会获得不准确甚至错误的信息。式(5)所示的非线性参与因子包含了对线性参与因子的二阶修正项，能反映系统的非线性特性。因此采用非线性参与因子作为选择实施负荷控制措施或者 SVC 安装位置的依据，能得到更加准确可靠的信息。

(2) 文献[18]指出，在奇异点，降阶雅可比矩阵和全阶雅可比矩阵的特征向量一致，但是在非奇异点，降阶雅可比矩阵和全阶雅可比矩阵的特征向量不一致，降阶雅可比矩阵不能正确反映系统的特征，而且随着运行点与奇异点之间距离的增加，误差也逐渐增加，因此在电压崩溃点之前，需要分析全阶雅可比矩阵来获取系统的正确信息。

4 算例分析

4.1 负荷控制节点的选择

为验证本文所提出的方法，分别对美国西部

(WSCC)9 节点系统进行有功负荷控制以及对新英格兰(New England)39 节点系统进行 SVC 安装地点分析, 并采用电压稳定性指标以及动态仿真检验系统的稳定性。

以图 1 所示的 3 机 9 节点系统为算例, 说明节点有功非线性参与因子的有效性, 文中数据均为标幺值。节点 1~6 为 PQ 节点, 节点 7、8 为 PV 节点, 节点 9 为无穷大母线。

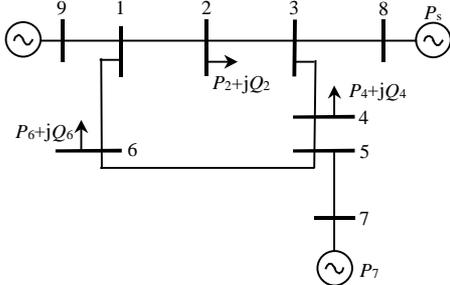


图 1 美国西部 9 节点系统
Fig. 1 WSCC 9-bus system

系统中每个节点对最危险模式的参与程度决定了该节点对电压稳定性影响的重要程度。以最危险模式的节点有功非线性参与因子为指标, 衡量节点负荷对电压稳定性的影响程度, 节点有功非线性参与因子越大表明该节点越适合实施负荷控制来提高电力系统的电压稳定性。

情况 1: 轻负荷水平。该情况为系统的标准运行状态。计算节点有功线性参与因子和非线性参与因子, 其结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在轻负荷水平情况下, 利用节点有功线性参与因子和非线性参与因子来选择实施负荷控制措施地点, 结果是一致的, 节点 4 的有功线性参与因子和非线性参与因子均为最大。这种情况下, 在节点 4 实施负荷控制是最有效的。

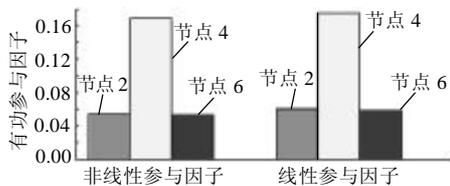


图 2 轻负荷时危险模式的节点有功参与因子
Fig. 2 Active PF for the critical mode under low load

情况 2: 重负荷水平。系统带负荷水平如表 1 所示, 表中的数值均为标幺值。计算节点有功线性参与因子和非线性参与因子, 结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在重负荷水平情况下, 采用节点有功线性参与因子和非线性参与因子来选择减负荷地点, 结果是不一致的。节点 4 的有功线性参与因子最大, 按照线性化分析结果, 在该节点实施减负

表 1 WSCC9 节点系统负荷

节点号	2	4	6	7	8
P_i	-2.934 5	-2.117 5	-2.646 9	1.170 0	1.310 0
Q_i	-0.635 3	-0.741 1	-1.058 7		

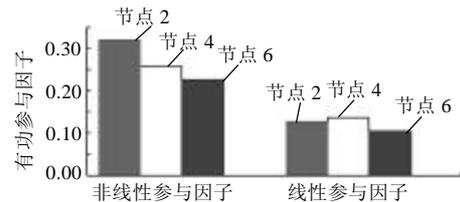


图 3 重负荷时危险模式的节点有功参与因子

Fig. 3 Active PF for the critical mode under high load

荷控制对系统的电压稳定性影响最大。而应用微分同胚正规形方法得到的节点 2 的有功非线性参与因子最大, 因此在节点 2 实施减负荷控制对系统的电压稳定性影响最大。

潮流方程雅可比矩阵的特征值 I 是衡量电力系统接近电压崩溃的一种简单有效指标^[22]。潮流雅可比矩阵的特征值越接近 0, 系统越不稳定, 当潮流雅可比矩阵的特征值为 0 时, 系统失去静态电压稳定。为验证实施减负荷控制地点的合理性, 采用绝对值最小的特征值 I_{\min} 作为电压稳定性指标。 I_{\min} 的绝对值越大, 系统越稳定。

在各负荷节点实施减负荷控制, 减负荷量为 0.03。表 2 给出了在负荷节点减负荷前后的系统静态稳定性指标。对比表 2 中 I_{\min} 的大小可以看出, 在负荷节点实施减负荷控制均能提高系统的静态稳定性, 特别在节点 2 上实施减负荷控制后, 系统的静态稳定性最高。最有效的减负荷节点顺序依次为 2、4、6, 和采用微分同胚正规形方法的分析结果一致。

表 2 不同负荷情况下的电压稳定性指标

减负荷节点	2	4	6
I_{\min}	0.110 2	0.103 6	0.102 1

4.2 SVC 及其安装地点的选择

以图 4 所示的 New England 39 节点系统为算例, 说明节点电压非线性参与因子的有效性。分别利用节点电压线性参与因子和非线性参与因子作为衡量指标, 在负荷节点 1 到 29 中选择一个节点作为 SVC 的安装地点。

情况 1: 轻负荷水平。该运行情况为 New England 39 节点系统的标准运行条件。计算节点电压线性参与因子和非线性参与因子, 其结果如图 5 所示, 图中的数据均是以最大参与因子为标准, 经过规格化处理得到的。从图 5 可以看出, 在轻

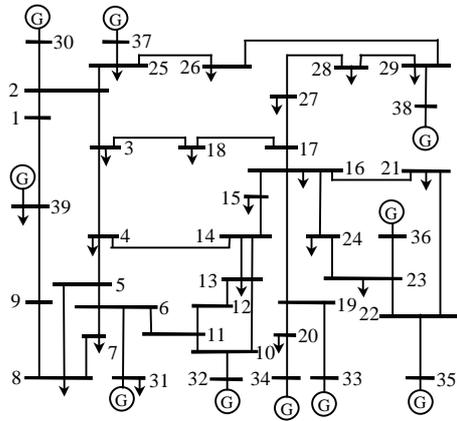


图 4 New England 39 节点系统
Fig. 4 New England 39-bus system

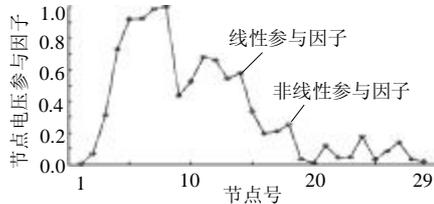


图 5 轻负荷时危险模式的节点电压参与因子

Fig. 5 Voltage PF for the critical mode under low load

负荷水平情况下，采用节点电压线性参与因子和非线性参与因子来识别 SVC 的安装地点结果是一致的，节点 8 的电压线性参与因子和非线性参与因子均为最大。这种情况下，在节点 8 安装 SVC，可以有效提高系统的电压稳定性。

情况 2：重负荷水平。增加系统的负荷水平，保持负荷功率因数不变，在情况 1 的负荷水平上，将节点 32 和节点 37 的发电机输出功率以及节点 3 和节点 4 的负荷功率增加为原来的 3.1 倍，其余节点的负荷功率保持不变。计算节点电压线性参与因子 p_{ki} 和非线性参与因子 p_{2ki} ，结果如图 6 所示。图中的数据均是以最大参与因子为标准，经过规格化处理得到的。从图 6 可以看出，在重负荷水平情况下，采用节点电压线性参与因子和非线性参与因子识别 SVC 的最佳安装地点，结果是不一致的。按照线性化分析结果，节点 12 的电压线性参与因子最大，SVC 应该安装在该节点。而应用微分同胚正规形方法得

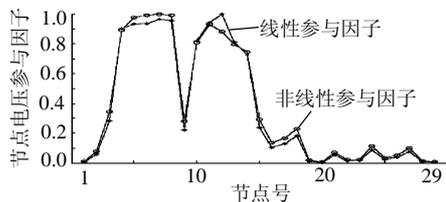


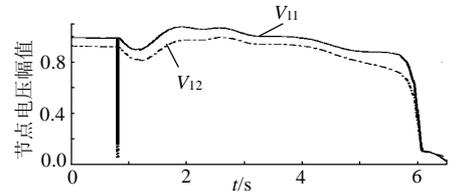
图 6 重负荷时危险模式的节点电压参与因子

Fig. 6 Voltage PF for the critical mode under high load

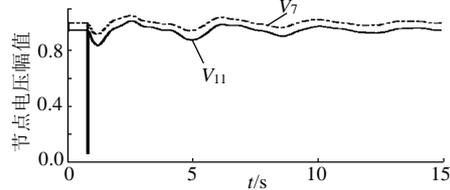
到的节点 7 的电压非线性参与因子最大，根据正规形方法得到的结果，SVC 应该安装在节点 7。

为验证 SVC 安装地点的合理性，在情况 2 中，对比节点 12 和节点 7 安装 SVC 的两种情况，计算该系统的电压稳定性指标 I_{min} ， I_{min} 分别为 0.41 和 0.45，可见，当 SVC 安装在节点 7 时，系统的静态电压稳定性更高。这说明在节点 7 安装 SVC 更有利于提高电力系统的静态电压稳定性。

图 7 给出了分别在节点 12 和节点 7 安装 SVC 的时域仿真曲线。节点 11 在 0.8 s 时发生三相对称故障，0.823 s 切除故障线路 10-11，1.2 s 重合成功。图 7(a)对应在节点 12 安装 SVC 的情况，图 7(b)对应在节点 7 安装 SVC 的情况。从图中可以看出，在节点 12 安装 SVC 不能维持这种故障下的电压稳定，而在节点 7 安装 SVC 可以保持电压稳定。



(a) 节点 12 安装 SVC



(b) 节点 7 安装 SVC

图 7 电压响应曲线

Fig. 7 Voltage response curves

5 结论

(1) 应用微分同胚正规形方法可以简化分析系统的高阶项。由于它包含了电力系统更多的信息，因此更便于分析和理解复杂电力系统的非线性本质。

(2) 分别采用节点有功非线性参与因子和节点电压非线性参与因子方法进行了负荷控制的地点和 SVC 安装地点计算。

(3) 在轻负荷的电力系统中，采用线性化方法分析得到的结果和采用微分同胚正规形方法得到的结果一致；而在在重负荷的电力系统中两种方法所得到的结果不一致。

(4) 在重负荷强非线性条件下，节点非线性参与因子包含了对线性参与因子的二阶修正项，在一定程度上计及了电力系统的非线性特性，因此可以得到更加准确的结果。

参考文献

- [1] Concordia C. Dynamic performance and security of interconnected systems[J]. IEEE Power Engineering Review, 1992, 12(3): 11-14.
- [2] 邓慧琼, 艾欣, 赵亮, 等. 大停电自组织临界特征的若干问题探讨[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 42-46.
Deng Huiqiong, Ai Xin, Zhao Liang, et al. Discussion on several problems of self-organized criticality of blackout[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 42-46(in Chinese).
- [3] 于群, 郭剑波. 我国电力系统停电事故自组织临界性的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 1-5.
Yu Qun, Guo Jianbo. Study on self-organized criticality of power system blackouts in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 1-5(in Chinese).
- [4] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 电力系统自组织临界特性分析与仿真模型[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 7-12.
Yi Jun, Zhou Xiaoxin, Xiao Yunan. Analysis on power system self-organized criticality and its simulation model[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 7-12(in Chinese).
- [5] Berizzi A, Zeng Y G, Marannino P, et al. Second order method for contingency severity assessment with respect to voltage collapse [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 81-87.
- [6] 张靖, 文劲宇, 程时杰. 基于向量场正规形的电力系统稳定模式相关性理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 82-86.
Zhang Jing, Wen Jinyu, Cheng Shijie. Theoretical analysis of the interaction between power system stability modes with the normal forms of vector fields[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 82-86(in Chinese).
- [7] Irma M, Messina A R, Barocio E. Perturbation analysis of power systems: effects of second- and third-order nonlinear terms on system dynamic behavior[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 159-167.
- [8] Liu S, Messina A R, Vittal V. Assessing placement of controllers and nonlinear behavior using normal form analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1486-1495.
- [9] 邓集祥, 华瑶, 韩雪飞. 大干扰稳定中低频振荡模式的作用研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 60-64.
Deng Jixiang, Hua Yao, Han Xuefei. Study on effect of low frequency oscillation modes in large disturbance stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 60-64(in Chinese).
- [10] 张靖, 文劲宇, 程时杰. 基于向量场正规形的电力系统动态分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 1-5.
Zhang Jing, Wen Jinyu, Cheng Shijie. Power system dynamic characteristics analysis with the normal forms of vector fields [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 1-5(in Chinese).
- [11] 徐东杰, 贺仁睦, 胡国强, 等. 正规形方法在互联网网低频振荡分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 18-23.
Xu Dongjie, He Renmu, Hu Guoqiang, et al. Analysis of low frequency oscillations using normal form method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 18-23(in Chinese).
- [12] 邓集祥, 赵丽丽. 励磁调节器对模态非线性相关作用的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 69-74.
Deng Jixiang, Zhao Lili. Study on effect of excitation regulator on nonlinear modal interaction [J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 69-74(in Chinese).
- [13] 李颖晖, 张保会, 李勤. 对电力系统暂态稳定边界的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 22(3): 72-77.
Li Yinghui, Zhang Baohui, Li Meng. Study on electrical power system stability boundary[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(3): 72-77(in Chinese).
- [14] 张靖, 程时杰, 文劲宇, 等. 基于向量场正规形方法的静态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2007, 32(5): 22-25.
Zhang Jing, Cheng Shijie, Wen Jinyu, et al. Determine nodes important to power system steady state voltage stability by normal forms of vector field[J]. Power System Technology, 2007, 32(5): 22-25(in Chinese).
- [15] Arrowsmith D K, Place C M. An introduction to dynamical systems [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- [16] Arnold V I. Geometrical methods in the theory of ordinary differential equations[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1988.
- [17] Gao B, Morison G K, Kundur P. Voltage stability evaluation using modal analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(4): 1529-1542.
- [18] Silva L C P D, Costa D, Xu W. Preliminary results on improving the modal analysis technique for voltage stability assessment[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, 2000.
- [19] Huang Z, Bao L, Xu W. Generator ranking using modal analysis [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 709-716.
- [20] Da Silva L C P, Wang Y, Costa V F, et al. Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(5): 564-570.
- [21] Mansour Y, Wilsun X, Alvarado F, et al. SVC placement using critical modes of voltage instability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 757-763.
- [22] Young-Hyun M, Heon-Su R, Jong-Gi L, et al. Uniqueness of static voltage stability analysis in Power Systems[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 2001.



张靖

收稿日期: 2008-03-06.

作者简介:

张靖(1979—),男,讲师,研究方向为电力系统稳定、运行与控制, E-mail: zhangjing_s@hotmail.com;

何宇(1978—),女,讲师,研究方向为电力系统电压稳定;

程时杰(1945—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、人工智能在电力系统中的应用、低压电力线载波通信、超导电力等;

文劲宇(1970—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、储能技术、电力电子等;

彭志炜(1958—),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定与控制。

(实习编辑 王晔)