

# 交直流互联系统节点 PV 曲线的求取

谭涛亮, 张尧, 武志刚

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

## Seeking PV Curve of AC/DC Hybrid Power System

TAN Tao-liang, ZHANG Yao, WU Zhi-gang

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** To calculate voltage stability of AC/DC hybrid power system, a method to seek PV curve at each node of AC/DC hybrid power system is presented. By use of continuation power flow method based on unified iteration, the step length around the critical point is reduced, so that whole PV curve and accurate critical point can be obtained. The impacts of different variations of load and generator output and various DC control modes on PV curve are researched. Results of calculation example show that using the proposed algorithm the PV curve of AC/DC hybrid power system can be obtained quickly and completely.

**KEY WORDS:** voltage stability; AC/DC hybrid power system; PV curve; continuation power flow

**摘要:** 针对交直流互联系统电压稳定性的计算问题, 给出了交直流互联系统各节点 PV 曲线的求取方法。该算法采用基于统一迭代法的连续潮流法, 在临界点附近采取缩小步长的策略, 可以精确求出整个 PV 曲线并得到精确临界点。研究了负荷和发电机出力的不同变化方式及各种直流控制方式对 PV 曲线的影响等问题, 并做了系统实例计算。计算结果表明, 文中提出的算法能快速完整地得到交直流互联系统 PV 曲线。

**关键词:** 电压稳定; 交直流互联系统; PV 曲线; 连续潮流

## 0 引言

电力系统正朝着大电网、大机组、超高压、远距离、交直流并联输电的方向发展。交直流互联系统的出现给电压稳定性研究带来了全新课题。

在电力系统电压稳定性研究中, 准确求取 PV 曲线可以获得电力系统电压稳定的功率极限值和电压临界值, 因此具有重要意义。

目前求解交流系统 PV 曲线的方法主要有负荷增长法<sup>[1]</sup>和连续潮流法<sup>[2-11]</sup>。由于负荷增长法在临界点附近雅可比矩阵奇异, 往往不能得到完整的 PV 曲线。连续潮流法通过参数变化并引入一维校正方程, 解决了临界点附近雅可比矩阵奇异问题。连续潮流法<sup>[12-13]</sup>、内点法<sup>[14]</sup>和崩溃点法<sup>[15-16]</sup>已应用于求解交直流互联系统的电压稳定裕度。以上文献在求解交直流互联系统的潮流时, 均采用了交替迭代法<sup>[17]</sup>, 即将交、直流系统的潮流方程分开求解。当与直流线路相连的交流系统是弱交流系统<sup>[17]</sup>时, 交替迭代法的收敛性会变差, 可能出现迭代次数明显增加甚至不收敛的现象。

本文将采用连续潮流法, 在统一迭代法<sup>[17]</sup>的基础上, 准确地求出交直流互联系统的 PV 曲线; 并着重对负荷和发电机出力的不同变化方式及各种直流控制方式对 PV 曲线的影响等问题进行研究; 此外, 对局部参数化连续潮流法的预测、校正、步长控制等环节也将做详细的讨论。

## 1 含参数交直流系统模型

### 1.1 潮流方程及换流器方程

按照交流系统中节点上是否接有换流变压器, 把节点分为直流节点和纯交流节点。换流变压器的一次侧所连接的节点即为直流节点。纯交流节点是指没有换流变压器与其相连的节点<sup>[17]</sup>。

对纯交流节点有

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \\ \quad (P_{Gi} - P_{id}) \lambda = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + \\ \quad (Q_{Gi} - Q_{id}) \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 国家“十一五”重点科技攻关项目(2006BAA02A17)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2006BAA02A17).

对直流节点有

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \\ \quad (P_{Gi} - P_{id}) \lambda \pm V_{dk} I_{dk} = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + \\ \quad (Q_{Gi} - Q_{id}) \lambda \pm V_{dk} I_{dk} \tan \varphi_k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

换流器基本方程

$$\begin{cases} \Delta d_{1k} = V_{dk} - k_{Tk} V_{tk} \cos \theta_{dk} + X_{ck} I_{dk} = 0 \\ \Delta d_{2k} = V_{dk} - k_{\gamma} k_{Tk} V_{tk} \cos \varphi_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $k=1,2,\dots,n_c$ 。

直流网络方程

$$\Delta d_{3k} = \pm I_{dk} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dkj} V_{dj} = 0, \quad k=1,2,\dots,n_c \quad (4)$$

直流控制方式方程:

- 1) 定电流控制:  $I_d - I_{ds} = 0$ 。
- 2) 定电压控制:  $V_d - V_{ds} = 0$ 。
- 3) 定功率控制:  $V_d I_d - P_{ds} = 0$ 。
- 4) 定控制角控制:  $\cos \theta_d - \cos \theta_{ds} = 0$ 。
- 5) 定变比控制:  $k_T - k_{Ts} = 0$ 。

式中:  $V$ 、 $\theta$  为电压幅值、电压相角向量;  $P_{is}$ 、 $Q_{is}$  为节点注入功率;  $P_{Gi} - P_{id}$ 、 $Q_{Gi} - Q_{id}$  为节点负荷增长向量;  $\lambda$  是负荷变化因子;  $V_{dk}$ 、 $I_{dk}$ 、 $\varphi_k$  为第  $k$  个换流器的直流电压、直流电流及功率因数角;  $k_T$  为换流变压器变比;  $X_c$  为换流变压器等值电抗;  $V_t$  为一次侧交流电压;  $n_c$  为换流器个数;  $g_{dkj}$  为消去联络节点后直流网络的节点电导矩阵  $G_d$  的元素。正负号分别对应整流器或逆变器。

本文采用统一迭代法进行交直流互联系统潮流计算,即将交流节点电压的幅值、相角与直流系统中的直流电压、直流电流、换流变压器变比、换流器的功率因数及换流器控制角统一进行迭代求解,得到潮流计算修正方程式

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta d \end{bmatrix} = J_d \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \\ \Delta X \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中  $\Delta d = [\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4, \Delta d_5]^T$ , 其中  $\Delta d_4$ 、 $\Delta d_5$  为任意 2 个直流控制方式方程。

$$\begin{aligned} X &= [V_d^T, I_d^T, K_T^T, W_d^T, \Phi^T]^T \\ V_d &= [V_{d1}, V_{d2}, \dots, V_{dn_c}]^T \\ I_d &= [I_{d1}, I_{d2}, \dots, I_{dn_c}]^T \\ K_T &= [k_{T1}, k_{T2}, \dots, k_{Tn_c}]^T \end{aligned}$$

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n_c}]^T$$

$$W = [\cos \theta_{d1}, \cos \theta_{d2}, \dots, \cos \theta_{dn_c}]^T$$

式中  $J_d$  为交直流互联系统雅可比矩阵,详见文献[17]。

将上述含参数交直流模型写成简化的包含单参数  $\lambda$  的潮流方程模型

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (6)$$

式中:  $f \in R^{n+5n_c}$ ,  $x \in R^{n+5n_c}$ ,  $\lambda \in R$ , 向量  $x$  包含系统中所有 PQ 母线的电压幅值和 PV 母线的电压相角, 及  $5n_c$  个直流分量。潮流方程个数为  $n+5n_c=2n_1+n_2+5n_c$  个, 其中  $n_1$ 、 $n_2$  分别为系统中 PQ 和 PV 母线数。

### 1.2 负荷增长方式

由式(1)(2)可知,以上模型为单一参数,这也意味着负荷变化需满足下列条件之一:

- 1) 一个节点有功(或无功)变化,而其它节点有功、无功不变;
- 2) 一个节点有功和无功同时变化,且这种变化可以单一参数化,同时其它节点有功、无功不变;
- 3) 某一区域或几个区域有功、无功变化,且这种变化可以单一化。

本文对第 3) 种负荷增长方式进行了计算。为方便叙述,引入负荷增长向量  $Y_d = [P_{1d}, \dots, P_{nd}, \dots, P_{(n-1)d}, Q_{1d}, \dots, Q_{nd}, \dots, Q_{md}]^T$ 。

### 1.3 发电机有功调度方式

当系统有功负荷增长时,仅由平衡机提供额外发电功率是不现实的,一般同时需要增大系统中可调节机组的有功功率。为此考虑发电机有功调度方式对 PV 曲线的求取具有实际意义。本文以比例分配方式对算例进行分析,即各发电机参与有功调节所分配的功率增量与其当前有功输出成正比。为保持有功平衡,在忽略网损变化的情况下,发电机有功功率的变化量应近似等于负荷变化量,即  $\sum \Delta P_{Gi} = \sum \Delta P_{Li}$ 。

## 2 用连续潮流法求取 PV 曲线

### 2.1 预估

连续潮流法使用预估-校正方案找出随负荷参数变化的潮流解路径,如图1所示。从已知的基本解  $A$  开始,利用切线预估器估计指定负荷增加模式下的解  $B$ ,然后在固定负荷下使用常规的潮流程序校正估计值,从而得到准确解  $C$ 。此后,基于新的切线预估器预估负荷进一步增加后的  $x$  值。如果新估计的负荷  $D$  超出准确解下的最大负荷,则在

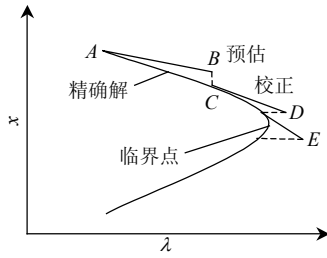


图1 连续潮流计算过程示意图

Fig. 1 An illustration of continuation flow computation process

固定负荷下的校正将不收敛。这时在固定  $x$  值下实施校正，从而得到准确解  $E$ 。

下面结合交直流互联系统介绍连续潮流法追踪 PV 曲线的步骤。参数化方案采用局部参数法<sup>[18]</sup>。

本文采用切线法进行预估。首先求出切向量，对式(6)两边微分，整理得

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

为得到切向量，需增加一个方程。局部参数法通过指定切向量中的某一分量为+1或-1解决这一问题，选定的这个分量称为连续参数。这时潮流方程变为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial \lambda} \\ \mathbf{e}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_d & \mathbf{Y}_d \\ \mathbf{e}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $\mathbf{e}_k$  表示与方程组维数匹配的行向量，除第  $k$  个元素为1外其余元素都为零。

$$dx = [d\theta^T \quad (dV/V)^T \quad dX^T]^T$$

开始将负荷参数  $\lambda$  选定为连续参数，切向量中相应的分量设置为+1。在后续预估步中，将切向量中分量绝对值最大的状态变量选定为连续参数，其斜率符号决定切向量中相应分量的符号。

从式(8)解得切向量，则解得预估

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}^{i+1} \\ \tilde{\lambda}^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中  $h$  为步长。本文采用的步长策略是：在连续参数为  $\lambda$  时，令  $h$  等于某常数  $K$ ，当连续参数不为  $\lambda$  时，由于此时已在临界点附近，令  $h = K/N$ ，减小步长以得到精确临界点。 $K$ 、 $N$  根据不同的系统进行调整即在曲线的“扁平”区，采用较大的步长以减小迭代次数，在“陡峭”区，采用较小步长以得到精确临界点。本算法以  $d\lambda < \varepsilon$  作为临界点判据，其中  $\varepsilon = 10^{-4}$ 。

## 2.2 校正

以预估得到的近似解作为初值进行解的校正。

用一个方程增广原始潮流方程(6)，得新方程

$$\begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \tilde{x}_k \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

其中  $x_k$  为连续参数。附加方程保证在临界点增广雅可比矩阵非奇异。在临界点以外同样可以继续使用连续潮流法，从而得到PV曲线下半支。算法的求解流程见图2。

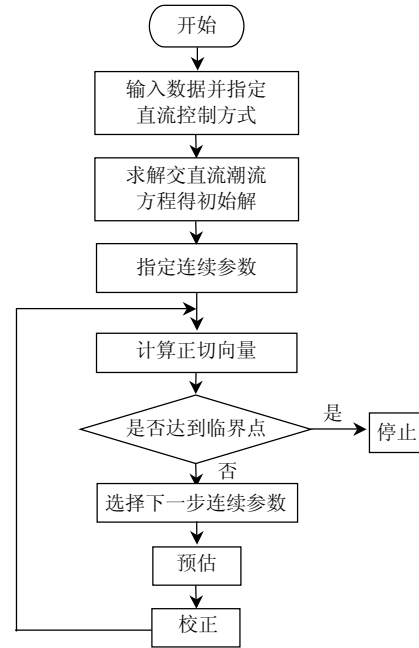


图2 连续潮流法流程图

Fig. 2 A flow chart of the continuation power flow

## 3 算例分析

以2DC交直流系统为例，其示意图如图3所示。采用第3)种负荷增长方式，考虑节点S、SS、SN有功和无功负荷的变化，发电机出力增量由G、G1~G3共同承担，负荷变化及发电机出力均按比例增长方式增加。对几种常用直流控制方式分别进行了计算，PV节点没有无功限制，计算结果见表1。

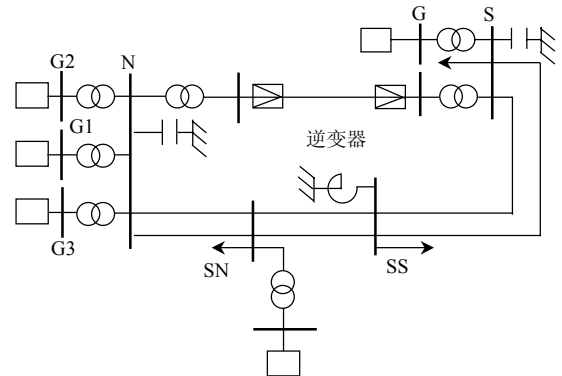


图3 2 DC 系统示意图

Fig. 3 The sketch map of 2 DC system

表 1 2DC 系统负荷增长时临界状态

Tab. 1 Critical state of 2DC system when load increasing

直流控制方式	系统运行状态	负荷因子 $\lambda$	电压/pu			
			节点SN	节点SS	节点N	节点S
R侧定功率定控制角	初始稳态	0.000 0	1.004 6	0.971 0	1.003 8	1.029 4
I侧定电压定控制角	临界状态	2.307 3	0.895 1	0.663 3	0.979 9	0.970 2
R侧定变比定电流	初始稳态	0.000 0	1.005 9	0.971 9	1.004 9	1.030 1
I侧定变比定控制角	临界状态	2.275 7	0.896 5	0.673 1	0.979 3	0.972 0

PV曲线中，总负荷和节点电压幅值为标么值，功率基值为100MVA。每一单位 $\lambda$ 值代表1000MVA。图4、5分别为定电流、定电压2种控制方式下的PV曲线。由图可知，随着负荷的增长，节点SS的电压下降最严重，且在2种直流控制方式下，求得的PV曲线很相似。在直流控制方式1)下，当 $\lambda$ 为2.307 3时达到临界值，节点SS电压为0.663 3；在直流控制方式2)下，当 $\lambda$ 为2.275 7时达到临界值，节点SS电压为0.673 1。

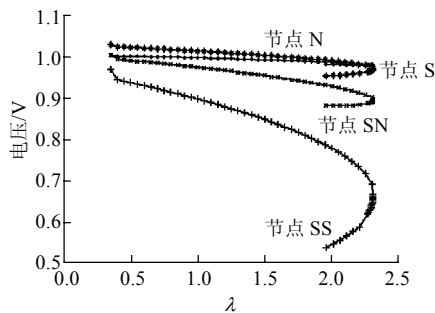


图 4 定电流控制方式下 PV 曲线

Fig. 4 PV curve under constant current mode

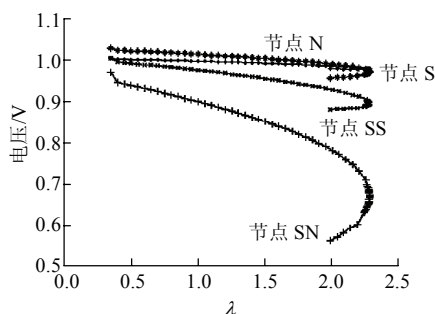


图 5 定电压控制方式下 PV 曲线

Fig. 5 PV curve under constant voltage mode

## 4 结论

1) 考虑交、直流变量之间的耦合关系，采用统一迭代法计算交直流互联系统潮流，对各种网络及运行条件均呈现良好的收敛性。

2) 不同的直流控制方式对各节点 PV 曲线影响

不大，达到临界点时的条件及状态也基本相同。

3) 整流器和逆变器在运行过程中需要消耗大量无功，电压往往偏低，给予充足的无功补偿后，其电压在负荷增长过程中，下降不大。

4) 步长的选择对精确求得临界点至关重要。本文采用连续参数控制步长的策略能很好地提高计算效率。

## 参考文献

- [1] Gao B, Morison G K. Towards the development of a systematic approach for voltage stability assessment of large-scale power systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1314-1324.
- [2] Ajarapu V, Christy C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [3] 周双喜, 冯治鸿, 杨宁. 大型电力系统PV曲线的求取[J]. 电网技术, 1996, 20(8): 4-8.  
Zhou Shuangxi, Feng Zhihong, Yang Ning. Seeking PV curves in bulk power system[J]. Power System Technology, 1996, 20(8): 4-8(in Chinese).
- [4] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力中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).
- [5] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统PV曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 37-40.  
Zhu Dakang, Cheng Haozhong. An improved continuation method in tracing PV curves of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 37-40(in Chinese).
- [6] 余一平, 刘俊勇. 基于最优乘子的PV曲线求取方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 14-17.  
Yu Yiping, Liu Junyong. Tracing PV curves of power systems in optimal multiple factor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 14-17(in Chinese).
- [7] 赵晋泉, 张伯明. 连续潮流及其在电力系统静态稳定分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 91-97.  
Zhao Jinquan, Zhang Boming. Summarization of continuation power flow and its applications in static stability analysis of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 91-97(in Chinese).
- [8] 张尧, 张建设, 袁世强. 求取静态电压稳定极限的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化学报, 2005, 17(2): 21-25.  
Zhang Yao, Zhang Jianshe, Yuan Shiqiang. Improved continuation power flow algorithm for obtaining the limit of static voltage stability [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(2): 21-25(in Chinese).
- [9] 蔡伟程, 代静. 对求取电力系统PV曲线的连续潮流法的改进[J]. 电力系统自动化学报, 2005, 17(5): 82-85.  
Cai Weicheng, Dai Jing. Improvement of continuation method in tracing PV curves of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 82-85(in Chinese).
- [10] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28-32.  
Zhao Jinquan, Jiang Xiaodong, Zhang Boming. Approach for identification and computation of static voltage stability critical point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 28-32(in Chinese).

- Chinese).
- [11] 杜晓明, 赵冬梅. 改进连续潮流法追踪PV曲线[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 278-281.  
Du Ding, Zhao Dongmei. An improved continuation power flow tracing PV Curve[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 278-281(in Chinese).
- [12] Canizares C A, Alvarado F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 1-8.
- [13] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.  
Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12(in Chinese).
- [14] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器, 2006, 34(22): 22-26.  
Wang Xiujie, Li Huaqiang, Li Bo, et al. An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory[J]. Relay, 2006, 34(22): 22-26(in Chinese).
- [15] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.  
Hu Linxian, Chen Xueyun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC power system[J]. Proceedings of

- the CSEE, 1997, 17(6): 395-398(in Chinese).
- [16] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 计算最近电压崩溃临界点的实用算法[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 13-17.  
Guo Ruipeng, Han Zhenxiang. A practical algorithm for calculating the closest point of collapse[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 13-17(in Chinese).
- [17] 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: 166-198.
- [18] 程浩忠, 吴浩. 电力系统无功与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 100-105.



谭涛亮

收稿日期: 2008-10-20.

作者简介:

谭涛亮(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 30940480@qq.com;  
张尧(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统电压稳定性、电网规划、电力市场等方面的研究工作;

武志刚(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与稳定。

(责任编辑 王晔)

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [11] 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).
- [12] Canizares C A. Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 158-165.
- [13] 刘大鹏, 唐国庆, 陈珩. 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, 3(10): 16-19.  
Liu Dapeng, Tang Guoqing, Chen Heng. Improving power system voltage stability in terms of optimal placement of TCSC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 3(10): 16-19(in Chinese).
- [14] 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(11): 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(11): 17-22(in Chinese).
- [15] 吴起, 林莉, 牟道槐. 用 TCSC 和 SVC 提高交直流并联输电系统大干扰电压稳定性分析[J]. 电气应用, 2007, 26(4): 67-72.  
Wu Qi, Lin Li, Mo Daohuai. Analysis of using SVC and TCSC to improve the large disturbance voltage stability of the AC/DC parallel transmission system[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(4): 67-72(in Chinese).
- [16] 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 Buhuan, 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).
- [17] 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).
- [18] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 28-31.  
Wei Hua, Ding Xiaoying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 28-31(in Chinese).
- [19] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 196-210.
- [20] 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: 186-192.
- [21] Preedavichit P. Optimal reactive power dispatch considering FACTS devices[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998(46): 251-257.
- [22] Fuerte-Esquivel C R. A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2000, 15(1): 58-64.
- [23] Federico M. Power system analysis toolbox documentation for PSAT[EB/OL]. <http://thunderbox.uwaterloo.ca/~fmilano>, 2007-03-08.



吴杰康

收稿日期: 2008-10-16.

作者简介:

吴杰康(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为红水河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、FACTS 及对电力系统影响, E-mail: wujiekang@163.com;

丁一琰(1983—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析、电力市场;

何杲杏(1983—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为柔性交流输电技术。

(责任编辑 王晔)