

基于连续潮流法的交直流系统可利用传输能力的计算

陈 静, 李华强, 刘 慧

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出并建立了交直流系统可利用传输能力(ATC)模型。该模型采用两端直流混合系统, 考虑电压稳定性、节点电压水平、热稳定、 $N-1$ 故障等安全约束条件。应用连续潮流法求解过程中, 将交流和直流系统方程分解计算, 通过直流网络状态量与换流器交流母线电压和给定直流控制量之间关系方程组来简捷地计及交直流系统间耦合关系。对 IEEE30 节点系统进行的仿真计算证明了所提出模型和算法的有效性。

关键词: 可用传输能力; 交直流系统; 静态电压稳定; 连续潮流法; $N-1$ 准则

Calculation of available transfer capability for AC/DC power systems based on continuation power flow

CHEN Jing, LI Hua-qiang, LIU Hui

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The paper proposes and establishes an available transfer capability (ATC) model based on AC/DC power systems. The model uses two-end DC mixing system, considering the security constraints of voltage stability, node voltage level, thermal stability and $N-1$ contingency, etc. In the continuation power flow solving process, the AC system equation and the DC system equation are decomposed, and the coupling relationship of the AC/DC system is taken into account through the relation equations between the state variables of the DC system and the AC bus voltage of the converter station and the presented DC parameters. Simulation results of IEEE30-bus system prove that both the proposed model and method are effective.

Key words: available transfer capability (ATC); AC/DC power systems; steady voltage stability; continuation power flow; $N-1$ outage contingencies

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0001-05

0 引言

现代电力工业在全球范围发生深刻变化^[1-2]。一方面, 电力系统向大电网、高电压、大机组、远距离发展, 电网以交直流系统混联形式出现; 一方面, 世界范围内电力工业从垂直一体化垄断管理体制向电力市场方向改革。

电力市场环境下, 存在大量频繁变化的电力交易, 使输电系统负荷增加、环流增大、容量裕度降低, 稳定裕度减少, 电力系统安全与稳定问题突出。在此背景下, 可用传输能力(ATC)的计算显得十分重要。它不仅可显示电网运行的安全与稳定裕度, 减小阻塞发生概率, 还可为市场参与者提供电网使用状况的详细信息, 指导其参与市场行为。

随着直流输电技术的快速发展, 交直流输电已

成为必然趋势。而对交直流联合系统 ATC 的研究至今还鲜有人问津。由于直流端控制方式和运行方式的多样性, 以及控制变量的多样化和换流站交流母线的电压稳定等问题, 使 HVDC 的加入不仅改变了原有交流电力系统结构, 并使系统的运行特性更加复杂^[2-3], 对混合系统的运行及 ATC 研究提出了新挑战。

ATC 的计算从方法学角度看, 可概括为基于概率的求解方法和确定性的求解方法。前者利用概率理论和数理统计分析确定输电系统的 ATC, 计算量较大^[4]。后者主要分为直流潮流法^[5]、最优潮流法^[6]和连续潮流法^[7]。

直流潮流法以直流潮流为基础, 利用线性规划计算, 但无法计及无功潮流和电压非线性影响。最优潮流法把 ATC 的计算问题转为纯粹非线性规划数学问题, 可用各种优化算法对系统资源优化调度, 但无法得出中间计算的精确值。连续潮流方法

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目

根据系统的当前运行状态逐步过渡到系统的功率传输极限点,因而计算出的传输极限更具有实际价值,此外这种方法对使用者而言具有完全的开放性,可方便地计及各种约束条件、各种运行方式及各种故障情况的影响。避免在电压稳定极限附近病态问题,具有更好的收敛性。

本文提出并建立基于连续潮流法的交直流混合系统的 ATC 模型。通过对 IEEE30 节点样本系统的仿真,验证了所提出模型和算法的合理性和有效性。

1 交直流系统 ATC 数学模型

1.1 交直流系统的数学模型

本文将交流直流系统方程分别求解^[8],求解直流系统方程时,将交流系统等效成加在换流站交流母线一个恒定电压。换流器转换方程为:

$$\begin{cases} V_{di} = K_1 a_i V_{ti} \cos \theta_i - K_2 X_{ci} I_{di} \\ P_{di} = V_{di} I_{di} \quad i=1,2,\dots,N_{dc} \\ Q_{di} = I_{di} \cdot \sqrt{K_3^2 a_i^2 V_{ti}^2 - V_{di}^2} \cdot \text{sign} \end{cases} \quad (1)$$

式中: N_{dc} 为换流器个数; V_{di} 为直流电压; I_{di} 为直流电流; a_i 为换流变压器变比; X_{ci} 为换相电抗; $\cos \theta_i$ 为控制角余弦; V_{ti} 为与第 i 个换流器相联的交流网络节点的电压幅值; sign 为符号(整流器为正,逆变器为负); $K_1 = 3\sqrt{2}/\pi$; $K_2 = 3\sqrt{2}/\pi \cdot \text{sign}$; $K_3 = 0.995 \cdot 3\sqrt{2}/\pi$ 。

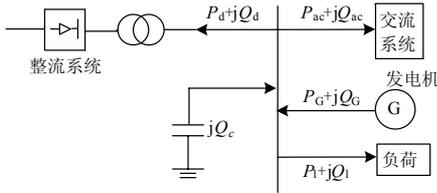


图 1 直流输电换流器等效计算电路

Fig.1 Equivalent circuit of converter in DC system

如图 1,某节点关联直流端时,其交流端节点功率方程式为:

$$\begin{cases} P_G - P_L = P_{ac} + P_d \\ Q_G - Q_L + Q_c = Q_{ac} + Q_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_L , Q_L 表示负荷注入的功率; P_G , Q_G 表示发电机注入的功率; Q_c 表示无功补偿注入的无功功率; P_{ac} , Q_{ac} 表示注入交流系统的功率; P_d , Q_d 表示注入直流系统的功率。联合电力系统的潮流雅克比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} H & N+NN \\ M & L+LL \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $NN = \frac{\partial P_d}{\partial V}$, $LL = \frac{\partial Q_d}{\partial V}$, 为交直流联合系统雅克比矩阵耦合项。

对于双端直流系统采用典型的运行方式如下:整流器定电流、逆变器定熄弧角控制。由式(1)中有功功率方程对 $V_{t\theta}$ 求导,可得矩阵 NN 中各非零元素值:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} = V_{d\theta} \cdot \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} + I_{d\theta} \cdot \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} \\ \frac{\partial P_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} = V_{d\theta} \cdot \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} + I_{d\theta} \cdot \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)中无功功率方程对 $V_{t\theta}$, $V_{t\theta}$ 求导得矩阵 LL 中各非零元素值:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} = \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} \cdot Q_{Q\theta} - \frac{P_{d\theta}}{Q_{Q\theta}} \cdot \frac{\partial V_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} \\ \frac{\partial Q_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} = \frac{\partial I_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} \cdot Q_{Q\theta} - \frac{P_{d\theta}}{Q_{Q\theta}} \cdot \frac{\partial V_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} + \frac{K_3^2 a_{\theta}^2 V_{t\theta}}{Q_{Q\theta}} \cdot I_{d\theta} \\ \frac{\partial Q_{d\theta}}{\partial V_{t\theta}} = \frac{K_3^2 a_{\theta}^2 V_{t\theta}}{Q_{Q\theta}} \cdot I_{d\theta} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $Q_i = \sqrt{K_3^2 a_i^2 V_{ti}^2 - V_{di}^2} \cdot \text{sign}$ 。

在迭代过程中,随模型负荷缓慢增加,换流器交流母线电压也缓慢下降。考虑换流变压器变比的离散调节:对于整流侧,若 $\alpha < 10^\circ$ 则将整流侧换流变压器变比往上调一档;若 $\alpha > 20^\circ$,则将整流侧换流变压器变比往下调一档,直到 α 角回到 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间或变比达到极限为止。对于逆变侧,若 $V_{di} < 0.98V_{di0}$ (V_{di0} 是逆变器侧额定直流电压),换流变压器变比往上调一档;若 $V_{di} > 1.02V_{di0}$,则将换流变压器变比往下调一档,直到逆变侧直流电压回到额定电压的 0.98~1.02 倍之间或变比达到极限为止^[8]。

1.2 交直流系统的 ATC 求解模型^[9]

ATC 计算就是从基态到一系列约束条件下功率最大传输点的距离。因此可归结为非线性规划问题,即:

$$\begin{cases} \min(-\lambda) \\ f(x, \lambda) = \lambda y_d + h(x) = 0 \\ G_{\min} \leq G(x) \leq G_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\lambda \in R^1$ 为反映 ATC 的参数;

$f(x, \lambda) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$ 为扩展潮流方程;
 $h(x) = [h_1(x), \dots, h_m(x)]^T$ 为常规潮流方程;
 $G(x) = [G_1(x), \dots, G_m(x)]^T$ 为安全约束条件;
 G_{\min} , G_{\max} 为安全约束上下限; $y_d \in R^m$ 为负荷变化方向; $x \in R^n$ 为状态控制变量。

其中当节点没有接换流站时, 该节点潮流方程就是交流系统的常规潮流方程; 当节点接有换流站时, 原潮流方程要加入换流站的等效注入功率 P_d 和 Q_d , 其潮流方程表示为:

$$\begin{cases} P_i \pm P_{di} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - Q_{di} + Q_{si} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

假设功率输出区域的发电机总出力 and 负荷区域的总负荷分别为1个单位, 即

$$\sum_{i \in source} y_{dpi} = \sum_{j \in load} y_{dpj} = 1 \quad (8)$$

式中: *source* 为功率输出区域; *load* 为负荷区域; y_{dpi} 表示发电机集合的有功变化方向; y_{dpj} 表示负荷集合的有功变化方向。

为使负荷母线功率因素保持一致, 设负荷无功变化方向为:

$$y_{dq_i} = Q_{Di0} / P_{Di0} \quad (i \in load) \quad (9)$$

这样处理后, λ 的值就可直接代表 *ATC*。

本文考虑电压幅值约束、线路热稳定约束、电压稳定裕度约束和 *N-1* 支路、发电机故障。建立以下两种数学模型。

计及热稳定约束和电压幅值约束时, *ATC* 的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min(-\lambda_{\text{ther-vol}}) \\ f(x, \lambda) = \lambda_{\text{ther-vol}} y_d + h(x) = 0 \\ P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \\ Q_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} \\ V_{Gi} \leq V_{Gi} \leq \bar{V}_{Gi} \\ P_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\lambda_{\text{ther-vol}}$ 表示考虑热稳定和电压幅值约束的 λ ; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为母线 *i* 的有功和无功功率; V_i 为母线的电压幅值; P_{ij} 为传输线路 *ij* 的有功功率。

计及静态电压稳定约束时, *ATC* 数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min(-\lambda_{\text{stab}}) \\ f(x, \lambda) = (\lambda_s + \lambda_{\text{stab}}) y_d + h(x) = 0 \\ P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \\ Q_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \bar{Q}_{Gi} \\ V_{Gi} \leq \bar{V}_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ_{stab} 为考虑电压稳定约束的 λ ; λ_s 为预留的稳定裕度, 以保证任何时刻运行点距崩溃点必须保持一定的距离, 其值可根据系统具体运行要求选择。

综上, 计及 *N-1* 事故前后的运行状态和各种安全约束, *ATC* 可表示为:

$$ATC = \min \{ \lambda_{\text{ther-vol}}, \lambda_{\text{stab}} \} \quad (12)$$

2 连续潮流法求解

2.1 加入离散控制的连续潮流法

连续潮流法从当前潮流解出发, 逐步增加指定送段母线功率, 迭代求解, 沿 *P-V* 曲线准确得相应系统功率分布。考虑系统非线性和无功影响以及静态电压稳定性。可用来直接计算静态电压稳定约束下的 *ATC*^[9]。在此基础上增加相应约束条件判断, 可得到计及热稳定约束和电压幅值约束时的 *ATC*。

根据前述直流系统 *ATC* 数学模型, 形成新潮流方程 $g'(x)$, 使用预测-校正 (*Predictor-Corrector*, *PC* 法) 的连续潮流法^[9-10] 求解。主要包括预测、校正、步长控制几个环节。

采用局部参数化法, 得参数化方程:

$$\begin{cases} f(x, \lambda) = g'(x) - \lambda y_d = 0 \\ \Delta x_k - \eta = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: η 为步长控制参数; Δx_k 为节点电压变化量。预测环节使用切线法, dx 、 $d\lambda$ 由式 (14) 求得:

$$\begin{bmatrix} \partial f / \partial x & \partial f / \partial \lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: e_k 为除第 *k* 个元素外其余元素为零的行向量。式 (14) 解得的切向量为方向向量、 σ 为步长进行解的预测, 即:

$$\begin{bmatrix} x_1^{i+1} \\ \lambda_1^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (15)$$

以预测点 $(x_1^{i+1}, \lambda_1^{i+1})$ 作为初值, 用牛顿法对式 (13) 计算准确解。

此外在每次潮流计算后加入变压器升降档位和电容器投切^[11-12] 的离散变量控制环节。使控制方式接近实际系统, 并提高了算法收敛速度。

2.2 计算步骤

(1) 根据换流器控制方式、换流器转换方程和雅可比矩阵耦合项的计算公式求出各直流系统变量和 NN 、 LL ，进而求出交直流联合系统的初始潮流解 (X_0, Y_0) 。

(2) 初始化：按式 (8)、(9) 设置功率传输方向以及负荷增长方式。

(3) 选取控制模式模型，式 (10) 模型一考虑热稳定和电压幅值约束，式 (11) 模型二考虑电压稳定约束模型。

(4) 用以上连续潮流法进行求解，计算 $\lambda_{ther-vol-pre}$ 和 $\lambda_{stab-pre}$ ，较小者为事故前系统可利用传输能力 λ_{pre} 。

(5) 用连续潮流法详细分析 $N-1$ 故障，计算 $\lambda_{ther-vol-post}$ 和 $\lambda_{stab-post}$ ，较小者为事故后系统可利用传输能力 λ_{post} 。

$$(6) ATC = \min \{ \lambda_{pre}, \lambda_{post} \}。$$

(7) 其他的功率传输方向及负荷增长方式重复步骤 (2) ~ (6)。

3 数值仿真

本文采用 IEEE30 节点系统作为求解交直流系统 ATC 计算。将其 4-5 交流支路去掉，再在 4 节点和 5 节点间连接如图 2 所示直流系统，从而构成本章计算的交直流联合系统。系统部分直流参数见表 1。

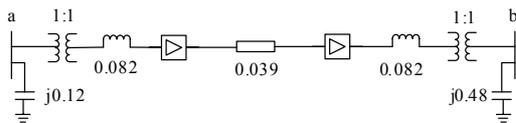


图 2 直流系统接线图

Fig.2 DC transmission line

表 1 系统部分直流参数

Tab.1 Part of DC parameters in the system

换流器	相关参数			
整流器	I_d^{sp}	α_{min}	α_{max}	nr_0
	1.0	5°	20°	1
逆变器	θ_d^{sp}	V_{min}	V_{max}	nr_0
	18°	0.98	1.02	1

该系统都在典型运行方式下进行，即整流侧定电流 (1.0 p.u)、逆变侧定熄弧角 (18°)。设换流站变压器变比范围为 ±15%，每档调节量 1.5%。通

过式 (4)、(5) 可求得 NN 与 LL 各非零元素值。

IEEE30 系统共包括 41 个发电机和支路 $N-1$ 故障。本文根据前述模型，考虑 $N-1$ 故障前后状态进行仿真^[13-14]。

设预留负荷裕度 $\lambda_s = 10\%$ ，设置功率传输方向为 {1, 2} 节点 → {19, 21, 26, 30} 节点，按连续潮流法精确计算 $N-1$ 故障前后交直流系统 ATC。系统仿真结果如表 2 所示。

表 2 交直流系统 ATC 仿真结果

Tab.2 Results in AC/DC system

传输方向	{1, 2} → {19, 21, 26, 30}	
故障前	$\lambda_{ther-vol-pre}$	0.294 6
	$\lambda_{stab-pre}$	0.294 6
$N-1$ 故障后	$\lambda_{ther-vol-post}$	0.193 4
	$\lambda_{stab-post}$	0.195 0
交直流系统 ATC / p.u		0.193 4

设预留负荷裕度 $\lambda_s = 10\%$ ，按连续潮流法精确计算 $N-1$ 故障前后不同传输方向下交直流系统 ATC。仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同传输方向系统 ATC 仿真结果

Tab.3 Results in AC/DC system in different directions

传输方向	λ_{pre}	λ_{post}	ATC/p.u
{1} → {16, 17, 18}	0.320 3	0.234 0	0.234 0
{1, 2} → {16, 17, 18}	0.412 9	0.236 4	0.236 4
{1, 2} → {19, 20, 21}	0.341 1	0.235 5	0.235 5
{1, 2} → {14, 15, 16, 17, 18}	0.365 5	0.223 6	0.223 6

仿真结果表明，根据电网安全性要求，系统须承受一定扰动而不失稳，保证一定裕度。因此通过 $N-1$ 故障校核的可用传输能力才是可靠的。

4 结论

本文基于连续潮流法提出了交直流系统可用传输能力的方法，其主要优点有：

(1) 考虑了包括热稳定、电压幅值和静态电压稳定等一系列安全约束条件，并且满足“ $N-1$ ”准则。使 ATC 模型更完善可靠。

(2) 交直流系统的建模按运行方式，修正 Jacobi 矩阵的直流耦合项，方便可行。同时引入直流量约束及变压器变比调整，切合实际情况。

(3) 应用连续潮流算法分析交直流系统的稳定性时, 能直接用于计算考虑静态电压稳定约束的 *ATC*。考虑各种离散控制, 接近实际运行条件, 算法简单, 初值要求不高, 收敛性能好, 计算精度高并能对整个过程中进行无功与电压跟踪观察。

综上, 算法在目前交直流系统稳定性问题逐渐突出的情况下具有现实意义。

参考文献

- [1] 曹建权, 许琦, 等. 电力市场下电网可用输电能力的研究[J]. 江苏电机工程, 2007, 26 (5): 39-41.
CAO Jian-quan, XU Qi, et al. Research on available transfer capability of electric power grid in power market[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26 (5): 39-41.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
LI Xing-yuan. HVDC transmission system operation and control[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [3] Kundur P. Power system stability and control[M]. NewYork(USA): McGraw-Hill, 1994.
- [4] 李国庆, 李雪峰, 沈杰, 等. 牛顿法和内点罚函数法相结合的概率可用功率交换能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 17-22.
LI Guo-qing, LI Xue-feng, SHEN Jie, et al. A probability ATC computation by a combination of Newton's method with SUMT interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8): 17-22.
- [5] Landgren G L, Terhune H L, Angel R K. Transmission interchange capability analysis by computer IEEE[J]. Trans on Power Apparatus and Systems, 1992, 91 (6): 748-754.
- [6] 汪峰, 白小民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (11): 35-40.
WANG Feng, BAI Xiao-min. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (11): 35-40.
- [7] 王成山, 李国庆, 余贻鑫, 等. 电力系统区域间功率交换能力的研究: (一)连续型方法的基本理论及应[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 23-26.
WANG Cheng-shan, LI Guo-qing, YU Yi-xin, et al. Study on transmission transfer capability of interconnected electric power systems: the basic principles and its application of the continuation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 23-26.
- [8] 顾成华. 交直流联合电力系统静态电压稳定性研究(硕士学位论文)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.
GU Cheng-hua. The study of the steady voltage stability of AC/DC power system based on the continuation method, thesis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.
- [9] 程超, 李华强, 等. 可利用传输能力的快速计算[J]. 电网技术, 2009, 33 (3): 49-52.
CHENG Chao, LI Hua-qiang, et al. A fast computation method for available transmission capability[J]. Power System Technology, 2009, 33 (3): 49-52.
- [10] 周双喜, 朱凌志. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [11] 庄侃沁, 李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (10): 47-50.
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategies and implementation modes of voltage and reactive power control for substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (10): 47-50.
- [12] 严浩军. 变电站电压无功综合控制策略的改进[J]. 电网技术, 1997, 21 (10): 47-49.
YAN Hao-jun. Voltage reactive-power integrated control strategy[J]. Power System Technology, 1997, 21 (10): 47-49.
- [13] 曾勇波, 李华强, 范勇, 等. 考虑电压和热稳定约束的可利用传输能力的快速算法[J]. 继电器, 2007, 35 (7): 32-36.
ZENG Yong-bo, LI Hua-qiang, FAN Yong, et al. A fast computation method for available transfer capability based on voltage and thermal constraints[J]. Relay, 2007, 35 (7): 32-36.
- [14] Peter N M, Tinney W M, Bree D W. Iterative linear AC power flow solution for fast approximate outage studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 91 (5): 2048-2056.

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-10-15

作者简介:

陈静(1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向电压稳定及电压无功控制; E-mail: pupu1124@yahoo.cn

李华强(1965-), 男, 教授, 博士, 从事电压稳定及无功优化问题研究; E-mail: lihq1986@hotmail.com

刘慧(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向电压稳定及电压无功控制。E-mail: 396694469@qq.com