

# 电力系统电压稳定的安全控制研究述评

钟清<sup>1</sup>, 蔡广林<sup>2</sup>, 张勇军<sup>3</sup>, 邱文锋<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司发展规划部, 广州 510600; 2. 广东省电力设计研究院, 广州 510663;  
3. 华南理工大学, 广州 510640)

## Review of the Research on Security Control of Power System Voltage Stability

ZHONG Qing<sup>1</sup>, CAI Guang-lin<sup>2</sup>, ZHANG Yong-jun<sup>3</sup>, QIU Wen-feng<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510600, China; 2. Guangdong Province Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China; 3. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the modern power grid Growing in scale as well as all kinds of non-linear control systems being applied in the grid, and competitive electricity market environment facing the grid, it is one of the great challenges to analyse and evaluate the voltage stability of bulk power systems, especially the large receiving-end power system. This paper gives a review on the mathematical models, control measures and computational methods for preventive control, corrective control and cooperative control of voltage stability, and then discusses the research trends in the field of voltage-stability security control.

**Key words:** Voltage stability; security control; preventive control; corrective control

**摘要:** 现代电力系统随着规模的日益增大、各种先进非线性控制系统的引入以及所面临的日益激烈的竞争性电力市场环境, 如何分析和评估大规模受端电网的电压稳定性是其面临的巨大挑战之一。文章综述了电压稳定的预防控制、校正控制和综合协调控制问题的数学模型、控制措施和计算方法, 并展望了电压稳定安全控制研究的发展方向。

**关键词:** 电压稳定; 安全控制; 预防控制; 校正控制

随着现代电力系统联网规模的日益增大, 直流输电、柔性交流输电设备 (FACTS) 和各种先进非线性控制系统的引入, 以及电力系统由原来的发电输电一体化转换为竞争性电力市场环境, 电力系统稳定问题正面临着新的挑战。电压稳定事故与功角稳定性事故、频率稳定性事故相比, 更具“突发性”

和“隐蔽性”<sup>[1-4]</sup>, 破坏性非常严重。

目前南方电网形成了“六交四直”的网架结构, 至 2010 年云广特高压直流和桂林—贤令山交流线路投运, 南方电网将出现“八交五直”的输电结构, 电网规模及复杂性在全世界范围内都是罕见的。因此如何分析和评估大规模受端电网的电压稳定性是现在面临的巨大挑战之一, 如何有效地、精确地评估系统当前状态和事故状态下的的稳定裕度, 统一考虑经济性和安全性制定提高电压稳定性的措施都是亟需要解决的问题。

本文针对电压稳定方面的安全评估与控制方面的研究, 主要包括: 基态运行点评价、故障分析、预防及校正控制, 讨论研究现状与发展。

### 1 电力系统安全性控制

电力系统的运行状态时刻在改变, 根据运行条件的不同, 可以将电力系统的运行状态分为正常运行状态、警戒状态、紧急状态、恢复状态、失稳状态等。随着条件的变化, 电力系统在各种运行状态间转换<sup>[5]</sup>。图 1 给出了电力系统典型的运行状态转移图。

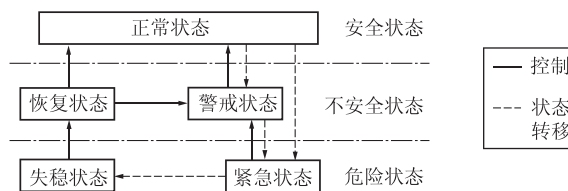


图 1 电力系统运行状态示意图

Fig.1 Power System Operate State Sketch Map

电力系统在正常状态下,运行约束条件和负荷需求得到满足,同时能够承受一系列可信的预想故障扰动后,系统仍然不违反运行约束条件。如果电网在故障发生后,无法满足基本的运行约束条件和负荷需求,则系统处于不安全状态或是警戒状态。电力系统在遭受严重扰动后,运行参数偏离了正常状态,不等式约束条件无法完全满足,严重条件下有可能引发系统失稳(功角失稳或电压失稳),该状态系统处于紧急状态。紧急状态下的电力系统可能会出现系统暂态过程的过剩能量导致功角失稳或电压失稳;以及局部的发电、用电不平衡,破坏用户的可持续性供电。紧急状态下,电网如果采取了继电保护、自动装置等有效手段将故障隔离,系统能够保持稳定,电网进入到恢复状态或警戒状态。

对于处于不安全状态、紧急状态的电力系统,为了维持系统的安全稳定运行,需要采取相应的控制措施,这些措施称为安全性控制。根据系统所处的运行状态,安全控制可分为预防控制、紧急控制和恢复控制。预防控制是一种慢速的、调节性的控制。紧急控制是系统在紧急状态下,为维持稳定运行和可持续供电,必须采取的控制措施,因此紧急控制是一种快速性的控制。

## 2 电压稳定的安全控制研究

### 2.1 电压稳定的预防控制

完整的预防控制模型中的安全约束应该包括暂态功角稳定约束、静态安全约束、电压稳定约束等,使系统的运行点能够考虑各种安全因素的影响。完整的预防控制模型如下:

$$\begin{aligned} \text{目标函数} \quad & \min f(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0), \\ \text{约束条件} \quad & \mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \lambda_0) = 0, \\ & \mathbf{g}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \lambda_0 + \Delta\lambda_{R0}) = 0, \\ & \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \leq 0, \\ & \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_0, \lambda_0) = 0 \quad (i \in N_c), \\ & \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_0, \lambda_0 + \Delta\lambda_{Ri}) = 0 \quad (i \in N_c), \\ & \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_0) \leq 0 \quad (i \in N_c). \end{aligned}$$

式中:  $\mathbf{x}_0$ 、 $\mathbf{u}_0$  是基态条件下的系统的状态变量和控制变量;  $\mathbf{x}_i$  是故障  $i$  条件下的状态变量,  $N_c$  是故障数目;  $\mathbf{g}_0$ 、 $\mathbf{h}_0$  是基态条件下等式和不等式约束;  $\mathbf{g}_i$ 、 $\mathbf{h}_i$  是故障  $i$  条件下的等式和不等式约束;  $\lambda_0$  是参数量(一般是系统在某一负荷增长方向上的负荷水平

值);  $\Delta\lambda_{Ri}$  是基态或故障  $i$  条件下的所要求的最小稳定裕度值。

电压稳定预防控制措施是通过基态条件下的系统结构和运行状态调整,使得系统能够对于可信故障集的故障具有足够的稳定裕度。对于在线静态电压崩溃预防控制,一般需考虑正常运行方式、元件  $N-1$  开断、以及部分多重元件开断的情况,因此预想故障集的规模一般较大。主要的控制措施有:调节发电机的机端电压,投切并联无功补偿设备,调节有载调压变压器的分接头,发电机出力再调度及切负荷。

预防控制的控制措施实施是在扰动发生之前,将系统的运行点拖回到安全域范围之内。预防控制模型能够描述成计及安全约束的最优潮流模型,传统的考虑  $N-1$  安全约束的最优潮流仅考虑静态电压安全约束,而没有考虑其他的安全约束。文献[6]采用粒子群算法求解了考虑安全约束的最优潮流问题。目前的静态电压崩溃预防/校正控制主要分为针对正常运行状态预防控制模型和针对故障的预防控制模型。文献[7]讨论了计及电压稳定约束的最优潮流模型,分析了电压稳定约束的不同实现方式。文献[8]在实现无功优化的基础上考虑了电压稳定约束,并分析了稳定约束对无功定价的影响。文献[9]分析了不同局部控制措施优化对电压稳定提高的效果。文献[10]实现了在有功、无功的调度优化中考虑电压稳定裕度的提高。

目前,电压稳定预防控制的研究主要有两种类型的方法:一类是基于控制参数灵敏度的方法,一类是非线性规划的最优化方法。

基于灵敏度的方法<sup>[11-13]</sup>首先对预想事故进行电压稳定分析,然后对稳定裕度不满足电压稳定要求的故障,计算负荷参数对控制变量的灵敏度,然后构造出不等式约束加入到稳定控制的线性规划模型中求解,该方法可以方便的考虑多个故障的情况。但由于电力系统中无功电压之间的非线性关系较强,同时受各种限制器作用,采用灵敏度的方法得到控制措施会产生欠调或过调的现象,往往在迭代过程中需要求解多次故障后的电压稳定裕度。

基于非线性规划方法将电压稳定的安全控制问题描述成一个最优化的问题,将预想故障下潮流方程和的电压稳定约束方程加入到模型中<sup>[14-16]</sup>,该方法能够完整的考虑基态和故障条件下的非线性特

征。但由于预想故障的规模一般较大, 导致问题求解的规模庞大, 即使采用对系统规模不敏感的现代内点算法<sup>[17]</sup>, 也无法很好地解决。文献[16]借鉴规划领域积极约束集策略的思想, 在裕度扫描的基础上确定关键预想故障集, 根据关键预想故障集计算预防控制策略。文献[18]提出了故障过滤的方法在迭代过程中减少预防控制模型中考虑的故障集。

负荷的持续增长是造成电压不稳定的重要原因之一, 当负荷变化时, 发电机需要调节有功和无功出力来满足负荷需求。不合理的功率分配方式会导致系统的传输极限下降, 网损增加, 对电压稳定产生负面影响。因此在稳定的控制措施中, 发电机的调度分配也是电压稳定控制的重要手段。文献[19]采用发电机调度措施提高系统的负荷裕度和低电压母线的电压。文献[20]提出了提高系统负荷裕度的经济发电方向方法。文献[21]在提高系统传输能力的同时考虑小扰动稳定约束的影响。

由于系统的电压稳定程度与无功功率的备用容量密切相关, 电压崩溃往往是发生在缺乏动态无功备用的重负荷区域。所以在电网运行的正常运行状态下考虑动态无功源的无功备用对故障后电压稳定的影响, 以及建立动态无功模型对于预防控制的实施具有重要的意义<sup>[22]</sup>。由于无功功率不能远距离传输, 从而远方动态无功源不能为本地故障提供显著的电压支撑, 所以无功备用不能简单地通过将各个无功备用相加得到, 迄今为止这方面的研究还很缺乏。

## 2.2 电压稳定的校正控制

电压稳定的校正控制是在系统发生严重故障或负荷持续增长的情况下, 系统处于电压不稳定或电压失稳过程中, 在这种紧急条件下进行控制使系统恢复稳定。由于系统已经处于不稳定状态, 需要尽快采取措施, 所以校正控制是也可以称为紧急控制。

校正控制需要控制措施满足快速性的原则, 因此快速地故障后切负荷措施是最有效的方法。但切负荷措施会造成部分用户停电, 在电力市场环境, 非计划的停电费用较高, 因此, 切负荷措施往往是系统稳定最后一项措施, 需要谨慎采用<sup>[23]</sup>。

切负荷问题的分析方法多样, 但基本的框架是类似的, 可以概括为:

- 给定初始运行点;
- 给定系统扰动, 包括系统故障或负荷增长;

——判断受扰后系统的稳定性;

——选择切负荷地点并计算切负荷量;

——校验切负荷的效果(其中切负荷地点的选择和切负荷量的计算是实现的关键环节, 通常可以采用连续潮流的切线矢量的最大的负荷节点作为候选的切负荷节点<sup>[24]</sup>)。

潮流有无解是系统接近崩溃的评价指标之一, 文献[25]把参数空间中无解的点与最临近可解域边界上点的距离的计算转化非线性优化问题。文献[26]采用非线性内点法求解了切负荷问题。文献[27]考虑切负荷的经济和技术指标, 并采用粒子群算法求解。文献[28]建立了元件故障的连续潮流模型用来计算多故障的切负荷量。文献[24]提出了一种基于两步法的恢复潮流可行解的优化控制策略。

在紧急控制中, 带负荷调压变压器的闭锁控制措施<sup>[29]</sup>, 以及对感应电动机负荷的快速切除的判断都有利于系统恢复稳定。文献[30]在单感应电动机-无穷大系统中提出了暂态电压稳定的临界故障极限切除时间的概念; Vournas<sup>[31]</sup>分析比较了 OLTC 的抽头调整、二次侧电压设定值以及负荷切除等紧急控制措施对电压稳定的影响。

## 2.3 电压稳定的综合协调控制

在完整的预防控制模型中, 分别针对暂态功角稳定约束、静态安全约束、电压稳定约束等安全约束的预防控制措施制定都有了比较成熟和完善的方法和理论, 综合考虑多种安全约束的协调控制模型正逐步开展, 并取得了初步的成果。如将暂态稳定问题和经济性协调的暂态稳定预防控制与优化<sup>[32]</sup>; 静态电压稳定与线路热稳定之间的协调优化<sup>[33]</sup>; 将静态电压安全与动态功角稳定的协调预防控制优化<sup>[34]</sup>; 暂态稳定与暂态电压的协调校正控制<sup>[35]</sup>; 暂态电压与静态电压稳定的协调预防控制<sup>[36]</sup>; 针对长期电压不稳定的最优协调电压紧急控制, 协调各种中长期控制措施的实施次序<sup>[37,38]</sup>。这些协调的控制方法都是通过计算不同类型稳定指标对控制措施的灵敏度来实现不同安全约束下的协调。另一类主要的方法是基于安全域的方法<sup>[39]</sup>, 实现了预防控制与紧急控制的协调优化。

## 3 电压稳定安全控制的研究方向

随着近年来我国国民经济的飞速发展, 电力负荷需求持续增长, 负荷中心的压力日益增大, 由此



而引发的电压稳定问题不容忽视。随着西电东送策略实施的不断深入,针对大受端电网的安全评估及稳定控制研究也刻不容缓。根据上述对相关研究工作的综述,在电压稳定分析与安全控制方面需要解决以下问题:

(1)针对大型系统的预防控制模型算法实用化研究。

考虑系统非线性和各种约束条件的非线性规划模型具有完善数学模型,但其实用化研究还不够。用于求解大型非线性规划问题的内点算法具有良好的性能,但对于某些恶劣条件还需要研究相应的解决方法提高算法的鲁棒性。故障解耦能够为算法的计算速度提高一个数量级,研究算法的数据结构能够为解耦实现寻找出合适的解决方法。

(2)在安全控制模型中需要考虑各种安全约束和控制措施之间的协调。

现有的低压校正措施和预防控制措施之间的联系缺乏必要的分析。预防控制和紧急控制本身就是相辅相成的。在大受端电网中,部分低概率的线路故障对系统的稳定性影响较大,如果仅通过预防控制措施实现,会造成控制代价过大。同时部分控制措施是离散性的,采用将离散量连续化的方法得到的控制措施可信度值得怀疑。

(3)传统的安全控制模型中未考虑系统在基态和故障条件下的崩溃概率,对于完整的综合控制模型,应该在模型中考虑系统发生电压崩溃的风险费用。

## 4 结 语

电压稳定问题是近年来学术界研究的热点问题。本文总结了电压稳定安全评估与控制方面的研究成果,对于所采用的模型和计算方法进行了分析和评述,并提出了作者的一些看法和研究发展方向。随着研究的不断深入,更加完善和实用化的电压稳定安全分析和控制软件将被用于电网运行和分析。

### 参考文献:

- [1] 王梅义,吴竞昌,蒙定中.大电网系统技术[M].北京:中国电力出版社,1991.
- [2] 余贻鑫,董存.美加814大停电过程中的电压崩溃[J].电力自动化设备,2004,5(3):4-7.  
YU Yi-xin, DONG Cun. Voltage Collapse During the US-Canada 8.14 Blackout. Electric Power Automation Equipment, 2004, 5(3): 4-7.
- [3] TAYLOR C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [4] CUTSEM T V. Voltage Stability of Electric Power Systems[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [5] 中国电力百科全书(电力系统卷)[M].北京:中国电力出版社,1995.
- [6] YUMBLA P E O, RAMREZ J M, COELLO C A C. Optimal Power Flow Subject to Security Constraints Solved with a Particle Swarm Optimizer[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2008, 23(1): 33-40.
- [7] ROSEHART W D, CANIZARES C A, QUINTANA V H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587.
- [8] LIN X, DAVID A K, YU C W. Reactive Power Optimization with Voltage Stability Consideration in Power Market Systems[J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(3): 305-310.
- [9] De SOUZA A C Z, HONORIO L M, TORRES G L, et al. Increasing the Loadability of Power Systems Through Optimal-Local-Control Actions[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(1): 188-194.
- [10] AFFONSO C M, da SILVA L C P, LIMA F G M, et al. MW and Mvar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria[J]. IEEE Trans. Power System, 2004, 19(4): 1538-1545.
- [11] CAPITANESEU F, VAN CUTSEM T. Preventive Control of Voltage Security Margins: A Multi-Contingency Sensitivity-Based Approach[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2002, 17(2): 358-364.
- [12] SHAO W, VITTAL V. LP-Based OPF for Corrective FACTS Control to Relieve Overloads and Voltage Violations[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2007, 21(4): 1832-1839.
- [13] CAPTIANESCU F, VAN CUTSEM T. Unified Sensitivity Analysis of Unstable or Low Voltages Caused by Load Increases or Contingencies[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(1): 321-329.
- [14] WANG X, EJEBE G C, TONG J, et al. Preventive Corrective Control for Voltage Stability Using Direct Interior Point Method[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(3): 878-883.
- [15] FENG Zhi-hong, AJJARAPU V, MARATUKULAM D J. A Comprehensive Approach for Preventive and Corrective Control to Mitigate Voltage Collapse[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2000, 15(2): 791-797.
- [16] 郭瑞鹏,吴浩,韩祯祥.在线多预想故障静态电压崩溃预防控制[J].中国电机工程学报,2006,26(19):1-6.  
GUO Rui-peng, WU Hao, HAN Zhen-xiang. Online Multi-contingency Preventive Control to Avoid Static Voltage Collapse [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 1-6.
- [17] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with a Novel Data Structure[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [18] CAPITANESCU F, GLAVIC M, ERNST D, et al. Contingency Filtering Techniques for Preventive Security-Constrained Optimal Power

- Flow[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(4): 1690–1697.
- [19] WANG Rong-hai, LASSETER R H. Re-Dispatching Generation to Increase Power System Security Margin and Support Low Voltage Bus[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2000, 15(2): 496–501.
- [20] SODE-YOME A, MITHULANANTHAN N. An Economical Generation Direction for Power System Static Voltage Stability[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76: 1075–1083.
- [21] CHUNG C Y, WANG L, HOWELL F, et al. Generation Rescheduling Methods to Improve Power Transfer Capability Constrained by Small-Signal Stability[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2004, 19(1): 524–530.
- [22] DONG F, CHOWDHURY B H. Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2005, 20(1): 338–345.
- [23] LADHANI S S, ROSEHART W. Under Voltage Load Shedding for Voltage Stability Overview of Concepts and Principles[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. [S.I]: IEEE, 2004: 1597–1602.
- [24] 郭力, 张尧, 胡金磊, 等. 恢复潮流可行解的优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 24–28.  
GUO Li, ZHANG Yao, HU Jin-lei, et al. An Optimal Control Strategy for Recovering Feasible Solution of the Power Flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 24–28.
- [25] GRANVILLE S, MELLO J C O, MELLO A C G. Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability[J]. IEEE Trans. Power Systems, 1996, 11(3): 1096–1103.
- [26] FENG Zhi-hong, AJJARAPU V, MARATUKULAM D J. A Practical Minimum Load Shedding Strategy to Mitigate Voltage Collapse[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 13(4): 1285–1291.
- [27] AMRAEE T, MOZAFARI B, RANJBAR A M. An Improved Model for Optimal Under Voltage Load Shedding: Particle Swarm Approach[C]. 2006 IEEE Power India Conference, New Delhi, India, April 10–12, 2006.
- [28] SONG H, BAIK S D, LEE B. Determination of Load Shedding for Power-Flow Solvability Using Outage-Continuation Power Flow (OCPF)[J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(3): 321–325.
- [29] ELSADEK M Z. Voltage Instabilities Subsequent to Short-Circuits Recoveries[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21: 9–16.
- [30] VOURNAS C D, METISIOU A, KOTLIDA M, et al. Comparison and Combination of Emergency Control Methods for Voltage Stability[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. [S.I]: IEEE, 2004: 1799–1804.
- [31] VOURNAS C, KARYSTIANOS M. Load Tap Changers in Emergency and Preventive Voltage Stability Control[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(1): 492–498.
- [32] 甘德强, 辛焕海, 王建全, 等. 暂态稳定预防控制和优化新发展[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 1–7.  
Gan Deqiang, Xin Huanhai, Wang Jianquan, et al. Progress in Transient Stability Preventive Control and Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 1–7.
- [33] FU X, WANG X. Unified Preventive Control Approach Considering Voltage Instability and Thermal Overload[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(6):864–871.
- [34] 郭琦, 张伯明, 赵晋泉, 等. 综合动态安全和静态电压稳定的协调预防控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23):1–6.  
GUO Qi, ZHANG Bo-ming, ZHAO Jin-quan. Coordinated Preventive Control Between Dynamic Security and Static Voltage Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23):1–6.
- [35] De TUGLIE E, DICORATO M, la SCALA M, et al. A Corrective Control for Angle and Voltage Stability Enhancement on the Transient Time-Scale[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 15(4): 1345–1353.
- [36] WEN J Y, WU Q H, TUMER D R, et al. Optimal Coordinated Voltage Control for Power System Voltage Stability[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(2): 1115–1122.
- [37] 薛禹胜, 王正风. 暂态电压安全预防控制的优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9):1–4.  
XUE Yu-sheng, WANG Zheng-feng. Optimization of Preventive Control for Transient Voltage Security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9):1–4.
- [38] 张芳, 房大中, 陈家荣, 等. 最优协调电压紧急控制新模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 35–41.  
ZHANG Fang, FANG Da-zhong, CHEN Jia-rong, et al. Study on Novel Model for Optimal Coordinated Voltage Emergency Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 35–41.
- [39] 刘辉, 余贻鑫. 基于实用动态安全域的电力系统安全性综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 31–36.  
LIU Hui, YU Yi-xin. A comprehensive security control method based on practical dynamic security regions of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 31–36.

收稿日期: 2008-08-28

作者简介:

钟清(1965-), 女。教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划、运行工作与研究。E-mail: zhongqing@gd.csg.cn。

蔡广林(1980-), 男。工程师, 博士, 从事电力系统规划与设计, 稳定分析等工作。

张勇军(1973-), 男。副教授, 博士, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究。

(本文责任编辑 张亚拉)