

基于PC机群的电力系统暂态稳定评估

石恒初

(云南电力调度中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 社会与经济的发展对电力的需求日益增加, 同时对电力系统的安全稳定性也提出了更高的要求。结合先进的计算机和通信技术, 提出了新型的电力系统暂态稳定评估方法。通过基于PC机群的并行化程序设计技术, 某区域电网实际系统的仿真算例表明该方法能够取得比较理想的加速比和并行效率, 具有广阔的工程应用前景。

关键词: 电力系统; 暂态稳定; 能量函数; 稳定评估; 混合法; PC机群; MPI

Personal computer cluster based power system transient stability assessment

SHI Heng-chu

(Yunnan Electric Power Dispatching Center, Kunming 650011, China)

Abstract: With the development of society and economy, the demand of power is increasing and its system security and stability become the key issue. This paper proposes a novel method for transient stability assessment of power system, which combines advanced computer and communication technology. By the parallel technology based on PC cluster, the simulation case of one regional power grid demonstrates that the method can get ideal speed-up and parallel efficiency, which owns broad foreground in projects.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60474048 and No.90612018).

Key words: power system; transient stability; energy function; stability assessment; hybrid method; PC cluster; MPI

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0005-05

0 引言

20世纪60年代以来, 世界各国均发生过因电力系统稳定破坏而导致的大面积停电事故。近20年来, 我国各大电网发生的大停电事故也有百余起。大量的国内外电力系统稳定破坏事故统计表明, 暂态稳定破坏的事故率居于首位。电力系统作为一个庞大而复杂的非线性系统, 其暂态稳定评估结果可以作为电力系统运行人员预见系统失稳事故的辅助决策依据。

目前, 电力系统暂态稳定分析方法主要有时域仿真法、直接法和混合法等^[1-15]。时域仿真法能精确地考虑各种复杂模型, 基本上可满足电力系统规划、设计和运行过程中所进行的离线暂态稳定分析对计算速度和精度的要求, 但在确定系统故障的临界切除时间时必须进行反复试凑, 需要较长的计算时间, 不能应用于在线稳定性分析, 而且根据计算结果只能判断是否稳定, 不能给出系统稳定裕度的

定量指标。直接法虽然能提供系统稳定裕度, 对极限参数计算速度快, 可快速扫描系统暂态过程, 但它有两个较大的缺点, 即采用的模型比较粗略和计算结果具有保守性。混合法的基本思想是把时域仿真法和直接法相结合, 充分利用时域仿真法模型适用能力强、计算精度高、结果可靠的优点和直接法能够给出稳定裕度的优点, 根据时域仿真结果确定系统是否稳定, 进而依据直接法相关理论确定系统稳定量化指标。

虽然电力系统暂态稳定分析在理论研究和应用方面都取得了丰硕的成果, 但是如何结合当前先进的计算机和通信技术, 将现有的一些比较成熟的暂态稳定分析方法应用于工程实践中, 仍然是一项十分有意义的工作^[16,17]。本文在借鉴学术界已有研究成果的基础上提出了基于全局暂态能量函数的新型暂态稳定评估混合算法, 同时为了加快电网预想故障集的暂态稳定评估速度, 本文建立了基于Windows XP和消息传递机制(MPI)的PC机群并行计算环境, 某区域电网的实际仿真算例验证了该算法的评估精度和并行化效果。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60474048; 90612018)

1 暂态稳定数学模型及全局暂态能量函数

电力系统作为一个强非线性的刚性自治系统,从动力学角度出发,以能量裕度作为故障后系统暂态稳定的量化指标,用能量函数的概念分析系统故障后的暂态稳定性,概念明确。

对于有 n 台发电机的电力系统,若忽略发电机的阻尼系数,则第 i 台发电机的转子运动方程为

$$M_i \frac{dw_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (1)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i - w_0 \quad (2)$$

式中: δ_i 、 w_i 分别为发电机 i 的转子角度和角速度; w_0 为额定同步转速; P_{mi} 、 P_{ei} 分别为发电机 i 的输入机械功率和输出电磁功率; M_i 为发电机 i 的转子惯性常数; $i=1,2,\dots,n$; n 是发电机机组台数。

定义惯性中心坐标下,发电机等值转子角 δ_{COI} 和等值角速度 w_{COI} 分别为

$$\delta_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3)$$

$$w_{COI} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i (w_i - w_0) \quad (4)$$

其中: $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$ 。

令 $\theta_i = \delta_i - \delta_{COI}$, $\tilde{w}_i = w_i - w_0 - w_{COI}$, 则得到惯性中心角度参考系中的发电机摇摆方程为

$$M_i \frac{d\tilde{w}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \tilde{w}_i \quad (6)$$

其中: $P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei})$ 。

将式(5)两边同时乘以 $\tilde{\omega}_i$, 并将等式右边各项移至左边, 迭加可得:

$$\sum_{i=1}^n M_i \dot{\tilde{\omega}}_i \tilde{\omega}_i - \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) \tilde{\omega}_i = 0 \quad (7)$$

式(7)在 $(\theta, \tilde{\omega})$ 状态空间中沿故障后轨迹进行曲线积分, 积分起点取故障清除时刻 t_c , 可得:

$$\int_{t_c}^n \sum_{i=1}^n M_i \dot{\tilde{\omega}}_i \tilde{\omega}_i dt - \int_{t_c}^n \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) \tilde{\omega}_i dt = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^{sp}}^{\theta_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\theta_i = \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i [\tilde{\omega}_i^c]^2 - \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^{sp}}^{\theta_i^c} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\theta_i$$

式中: $\tilde{\omega}_i^c$ 和 θ_i^c 分别表示 t_c 时刻的 $\tilde{\omega}_i$ 和 θ_i ; θ_i^{sp} 表示故障切除后系统稳定平衡点角度, 式(9)的左端为 t 时刻系统的动能和势能之和, 右端为 t_c 时刻系统的动能和势能之和。该式表明系统在故障阶段积累起来的全部暂态能量对于 $t > t_c$ 时是维持不变的, 并等于 t_c 时刻值。对于故障后任意时刻系统的总能量可表示为式(10):

$$TTEF = TKE + TPE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 - \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^{sp}}^{\theta_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\theta_i = const$$

式中全局暂态能量函数(TTEF)定义为全局暂态动能(TKE)和全局暂态势能(TPE)的代数和。其中:

$$TKE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \tilde{\omega}_i^2 \quad (11)$$

$$TPE = \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i^{sp}}^{\theta_i} -(P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\theta_i \quad (12)$$

式(10)的推导过程说明: 若不考虑系统阻尼, 沿故障后轨迹 TTEF 是守恒的, 即 TKE 和 TPE 进行等量的交换。2006 年末某区域 492 台机 4758 节点电网某线路故障后能量函数的仿真结果如图 1 和图 2 所示, 其中暂态势能的计算以故障时刻为势能参考点。

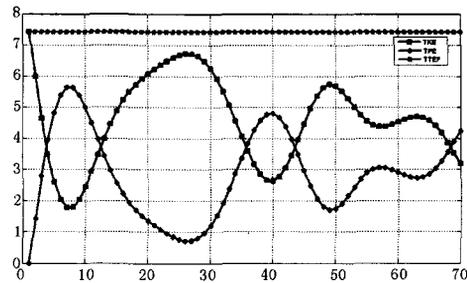


图 1 某区域电网 SNQ230-SMH230 线路首端三相短路 0.18 s 切除时的 TKE、TPE 和 TTEF(TKE+TPE) 随时间变化曲线
Fig.1 Curve of TKE, TPE and TTEF varying with time of one regional power grid (fault cleared at 0.18 s)

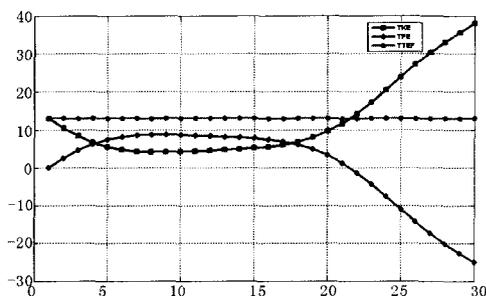


图2 某区域电网 SNQ230-SMH230 线路首端三相短路 0.24 s 切除时的 TKE 、 TPE 和 $TTEF$ ($TKE+TPE$) 随时间变化曲线
Fig.2 Curve of TKE , TPE and $TTEF$ varying with time of one regional power grid (fault cleared at 0.24 s)

2 基于全局暂态能量函数的暂态稳定裕度计算

基于能量函数的暂态稳定分析方法都试图挖掘出故障后贡献于系统失稳的有效动能，需要合理判别故障后系统的临界发电机群。全局暂态能量函数 ($TTEF$) 的优势是其稳定裕度计算与故障的临界发电机群无关，但是存在着稳定故障后轨迹在回摆时刻和临界故障后轨迹在抵达 PEBS (势能界面) 时刻 TKE 皆不为零的问题。笔者认为稳定轨迹的最小全局暂态动能为故障切除时刻 TKE 中不贡献于系统失稳的无效部分，而不稳定轨迹的最小 TKE 则同时包括不贡献于系统失稳的无效部分和穿越 PEBS 时刻未被系统吸收的有效部分^[18]。通过大量的仿真研究发现：(1) 故障后系统最小全局暂态动能曲线近似由两部分线性度良好的曲线组成，这两部分曲线分别对应于系统稳定和不稳定轨迹的最小全局暂态动能；(2) 故障后系统最小全局暂态动能曲线拐点对应于故障的临界切除时间；(3) 不稳定轨迹的最小全局暂态动能曲线相对较陡，稳定轨迹的最小全局暂态动能曲线相对较平滑，数值相对较小。

文献[19]提出了可以与系统商业仿真软件相结合的暂态稳定性分析策略。对系统给定的预想故障集，该分析策略能够快速滤除那些对系统安全运行无危害的故障，并对系统安全有危害和有潜在危害的故障计算暂态能量裕度。结合该文提出的策略，应用 $TTEF$ 稳定裕度计算的新方法进行暂态稳定性分析，其中暂态稳定数值仿真采用目前电力系统运行和规划部门常用的中国版 BPA 程序，具体详细流程如图 3 所示。其中，暂态时间裕度 (TTM) 定义为故障临界切除时间 (CCT) 与实际切除时间 t_{cl} 的差值。

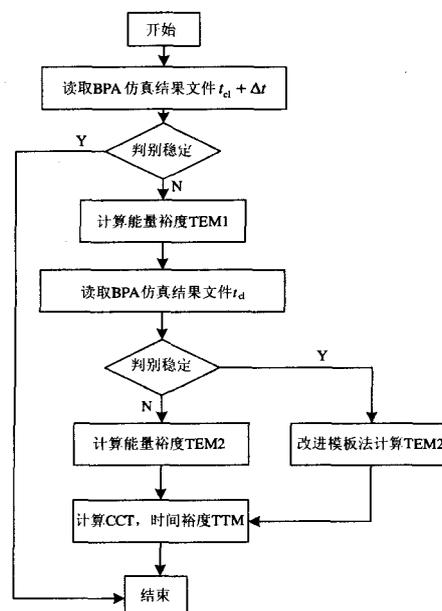


图3 基于全局暂态能量函数的暂态稳定裕度计算流程
Fig.3 Computing flow of transient stability margin based on total transient energy function

3 PC 机群系统及 MPI 并程序序设计

PC 机群系统是指利用高速通用网络将一组高性能工作站或高档 PC 机，按某种结构连接起来，并在并行程序设计以及可视化人机交互集成开发环境支持下，统一调度、协调处理，实现高效并行处理的系统。PC 机群主要使用的是基于消息传递的编程机制。所谓消息传递是指并行执行的部分之间通过消息传递来交换信息、协调步伐和控制执行。目前国际上比较流行的基于消息传递的模型主要是消息传递接口 MPI (Message Passing Interface)。MPI 通过调用六个常用函数 MPI_Init , MPI_Comm_rank , MPI_Comm_size , MPI_Send , MPI_Recv 及 $MPI_Finalize$ 可构成编写一个完整的 MPI 程序所需例程的最小集。MPI 是一个库而不是一门语言，MPI 程序以 C/C++ 或 FORTRAN 程序为载体，所以其程序的基本框架与 C/C++ 或 FORTRAN 程序基本相同，MPI 程序的构成如图 4 所示。

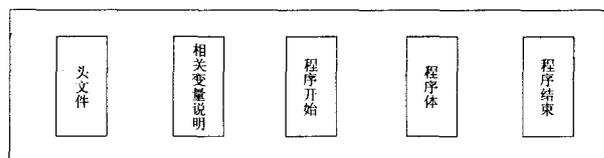


图4 MPI 程序基本框架
Fig.4 Basic frame of MPI program

MPI 程序的执行步骤一般为:

(1) 编译源程序得到 MPI 可执行程序; 对于在同构系统上执行, 只需编译一次, 若系统是异构的, 则需要在每一个异构的系统上都对 MPI 源程序进行编译。

(2) 将可执行程序拷贝到各个结点机上。

(3) 通过 MPI 命令 (即运行可执行程序 `mpirun.exe`) 并行执行该 MPI 程序。其中 MPI 的软件实现采用 MPICH 编程环境, 图 5 描述了 MPI 程序的并行执行过程。

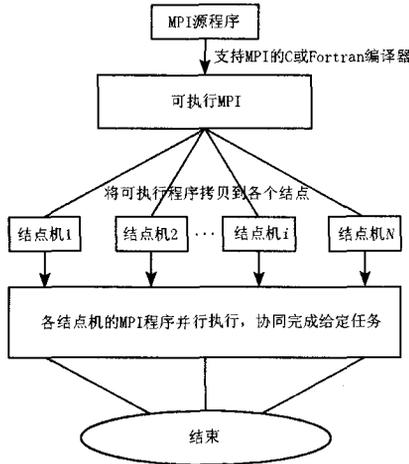


图 5 MPI 程序执行流程

Fig.5 Flow of executing MPI program

4 暂态稳定评估的并行任务划分及并行仿真指标

电力系统的暂态稳定快速评估必须寻找合理有效的并行任务划分机制, 考虑到电网预想故障集的自身特点, 本文的暂态稳定裕度并行计算依据故障事件进行划分, 算法采取主从设计模式, 即首先生成预想故障, 然后由主进程分配故障事件给从进程, 各个计算节点分别进行所属进程的暂态稳定裕度计算, 然后由主进程收集各个故障的稳定裕度计算结果, 从而获得所有预想故障集的稳定裕度。详细的稳定裕度并行计算执行流程如图 6 所示。

任何并行算法都必须通过并行实现来验证, 通过并行性能评估来鉴别有效性。在并行系统中完成计算的主要目的是要加速整个计算的过程, 节省计算耗时, 所以并行程序的加速比 sp 是最基本的性能指标。

对于一个并行处理问题而言, 设 p 为并行系统所使用的处理器数目, T_c 表示该问题的串行处理时间, $T_b(p)$ 表示利用 p 台处理器处理并行问题时所

需的时间, 则定义并行加速比 sp 为

$$sp = \frac{T_c}{T_b(p)} \quad (13)$$

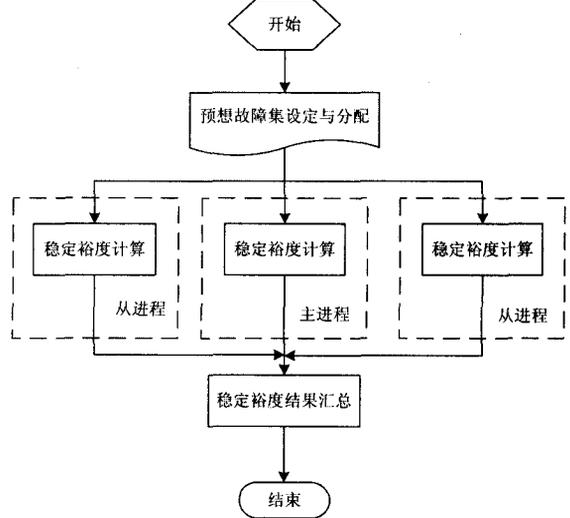


图 6 暂态稳定裕度并行计算流程

Fig.6 Parallel computing flow of transient stability margin

而加速比 sp 与并行处理器的个数 p 的比值定义为并行效率 E_p

$$E_p = \frac{sp}{p} \quad (14)$$

并行效率可用来粗略衡量计算处理器的有效利用率。

5 算例分析

结合提出的基于全局暂态能量函数的稳定裕度计算流程, 2006 年末 492 台机某区域电网部分线路首端三相短路故障后的能量裕度、时间裕度及临界切除时间仿真结果如表 1 所示。

表 1 2006 年末某区域电网部分线路故障仿真结果

Tab.1 Simulation result of some line faults for one regional

power grid in 2006			
Case	TEM	TTM	CCT
Line1	1.871	0.029	0.249
Line2	1.534	0.030	0.210
Line3	6.695	0.025	0.225
Line4	1.290	0.008	0.248
Line5	-3.672	-0.037	0.243
Line6	-2.247	-0.018	0.242
Line7	2.901	0.026	0.206
Line8	0.740	0.024	0.184

注: Case 表示线路首端三相短路; TEM 为能量

裕度; TTM 为时间裕度; CCT 为临界切除时间

结合上面介绍的暂态稳定评估并行任务划分, 用 C++ 和 MPI 编制程序对 2006 年末某区域电网的预想故障集进行稳定裕度并行计算。利用三台安装有 Windows XP Professional 和 MPICH 1.2.5 的 PC 机构成机群, PC 机之间通过交换机连接, 用来实现在 Windows 系统下的稳定裕度并行计算。表 2 和表 3 分别列出了暂态稳定评估程序对 30 个和 50 个预想故障的测试案例进行仿真所需的计算时间。从计算结果可以看出, 基于本文的混合法在 PC 机群计算环境下进行暂态稳定评估, 可以获得近似线性的加速比。

表 2 30 个预想故障仿真计算时间

Tab.2 Simulation computing time of 30 faults

计算节点数	仿真时间/s	加速比	并行效率
1	1 327.41	1.00	100.00%
2	669.91	1.98	99.07%
3	439.25	3.02	100.73%

表 3 50 个预想故障仿真计算时间

Tab.3 Simulation computing time of 50 faults

计算节点数	仿真时间/s	加速比	并行效率
1	2 186.67	1.00	100.00%
2	1 091.93	2.00	100.00%
3	743.11	2.94	98.09%

6 结论

随着我国西电东送、全国联网战略的实施以及电力市场化的进行, 大规模电网的暂态安全问题备受科研和工程人员关注。本文在目前已有暂态稳定分析成果的基础上提出了基于时域仿真计算和暂态能量函数分析相结合的新型混合法, 兼具二者的优点, 且方便与各种成熟的商业软件结合, 具有较强的通用性和可扩展性。为了加快预想故障集的暂态稳定裕度计算速度, 本文还充分利用网络闲置计算资源建立了基于 Windows XP 和消息传递机制(MPI) 的 PC 机群并行计算环境, 据故障事件进行并行任务划分, 提出了基于 MPI 的暂态稳定裕度并行算法。实际系统的仿真算例表明, 稳定裕度计算的并行算法能够取得比较理想的加速比和并行效率, 可以为电力系统暂态稳定评估工作提供支持。

参考文献

- [1] 白雪峰, 倪以信. 电力系统动态安全分析综述[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 14-20.
BAI Xue-feng, NI Yi-xin. Survey on Dynamic Security Assessment of Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 14-20.
- [2] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京: 江苏科学技

术出版社, 1999.

- XUE Yu-sheng. Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1999.
- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [4] Kulkarni M A. Parallel Computation of Power System Dynamic Using Multi-step Methods[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1992, 14(1): 33-38.
- [5] Chiang H, Chu C, Cauley G. Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Function: Theory, Applications and Prospective[J]. Proceeding of IEEE, 1995, 83(11): 1497-1529.
- [6] Massimo, La Scale. A Pipelines-In-Parallel Algorithm for Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 6(2): 715-722.
- [7] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-393.
- [8] 常辉, 刘文颖. 电力系统暂态稳定计算的在线应用[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 54-58, 74.
CHANG Hui, LIU Wen-ying. Online Application of Power System Transient Stability Computation[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 54-58, 74.
- [9] Fouad A A, Vittal V. Power System Rransient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1992.
- [10] 陈红, 许京. 电力系统暂态稳定分析的混合算法[J]. 电网技术, 1995, 19(10): 23-27.
CHEN Hong, XU Jing. A Hybrid for Transient Stability Analysis[J]. Power System Technology, 1995, 19(10): 23-27.
- [11] Fouad A A, Kruempel K C, Vittal V, et al. Transient Stability Program Output Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 2-9.
- [12] Tang C K, Graham C E, El-Kady M, et al. Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1524-1530.
- [13] Mansour Y, Vaahedi E, Chang A Y, et al. B.C. Hydro's Online Transient Stability Assessment(TSA) Model Development, Analysis, and Post Processing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 241-253.
- [14] Fang D Z, Chung T S, David A K. Improved Techniques for Hybrid Method in Fast-transient Stability Assessment [J]. IEE Proc Gene, Transm, and Distrib, 1997, 144(2): 107-112.

(下转第14页 continued on page 14)

- 15(2): 844-851.
- [9] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Effect of Detailed Power System Models in Traditional and Voltage-Stability-Constrained Optimal Power-Flow Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 27-35.
- [10] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multi-objective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587.
- [11] Thukaram D, Jenkins L, Visakha K. Optimum Allocation of Reactive Power for Voltage Stability Improvement in AC-DC Power Systems[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2): 237-246.
- [12] 李宏仲, 金义雄, 程浩忠, 等. 基于改进粒子群优化算法并计及静态电压稳定性的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 50-55.
LI Hong-zhong, JIN Yi-xiong, CHENG Hao-zhong, et al. Reactive Power Planning Based on Improved Particle Swarm Optimization with Static Voltage Stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(22):50-55.
- [13] Chattopadhyay D, Chakrabarti B B. Reactive Power Planning Incorporating Voltage Stability[J]. Int J of Electrical Power & Energy System, 2002, 24(3): 185-200.
- [14] Dong Feng, Chowdhury B H, Mariasa L. Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 338-345.
- [15] 刘明波, 程莹, 林声宏. 求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 22-26.
LIU Ming-bo, CHENG Ying, LIN Sheng-hong. Comparative Studies of Interior-Point Linear And Nonlinear Programming Algorithms for Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1):22-26.
- [16] 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 Jin-quan, ZHANG Bo-ming. 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.
- [17] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 1-6.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan, YU Yi-xin, et al. A New Method for Direct Calculating the Critical Point of Static Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):1-6.
- [18] Carolina M Affonso, Luiz C P da Silva, Flávio G M Lima, et al. MW and MVar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3):1538-1545.
- [19] Yoshihiko Kataoka, Yukio Shinoda. Voltage Stability Limit of Electric Power Systems With Generator Reactive Power Constraints Considered[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):951-962.
- [20] Song Hwachang, Lee Byongjun, Kwon Sae-Hyuk, et al. Reactive Reserve-Based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability Margins[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4):1538-1546.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

曲绍杰(1982-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统无功优化和电压稳定性分析; E-mail:qushaojie123@163.com

高玉领(1982-), 男, 工程师助理, 从事输电网自动化的研究;

邹林(1983-), 男, 硕士, 从事高压技术及过电压研究。

(上接第9页 continued from page 9)

- [15] Rahimi F A, Lauby M G, Wrubel J N, et al. Evaluation of the Transient Energy Function Method for On-line Dynamic Security Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 497-507.
- [16] Aloisio G, Bochicchio M A, LaScala M, et al. A Distributed Computing Approach for Real-time Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 981-987.
- [17] LaScala M, Sblendorio G, Bose A, et al. Comparison of Algorithms for Transient Stability Simulations on Shared and Distributed Memory Multiprocessor[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4):2045-2050.
- [18] Fang D Z, David A K. A Normalized Energy Function for Fast Transient Stability Assessment[J]. Electric Power System Research, 2004, 69: 287-293.
- [19] 房大中, 周保荣, 宋文南, 等. 修正的暂态能量裕度评估策略[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 94-98.
FANG Da-zhong, ZHOU Bao-rong, SONG Wen-nan, et al. Strategy for Assessment of Corrected Transient Stability Margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3):94-98.

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-09-01

作者简介:

石恒初(1983-), 男, 硕士, 从事电网调度运行及继电保护工作。E-mail: hengchu_shi@yahoo.com.cn