

电压稳定在线分析与决策系统^①

钟 浩¹, 张小兵²

¹(三峡大学 电气与新能源学院, 宜昌 443002)

²(湖南省电力公司 株洲电业局, 株洲 412000)

摘 要: 本文致力于开发一种适用于大型电力系统的静态电压稳定实时快速分析及预防调度软件, 结合目前电压稳定分析方法在实际系统中的应用, 考虑实时分析的速度与精度要求, 使用一种基于灵敏度约束与局部曲线拟合相结合来快速寻找崩溃点的方法与基于优化发电功率分配因子来提高系统负荷裕度的方法, 研制开发了一套基于 B/S 模式的“在线电压稳定快速分析及预防调度”软件. 使用该软件对湖南电网静态稳定性进行算例分析, 验证该软件能满足在线分析的速度与精度要求.

关键词: 电压稳定; 预防调度; 在线分析; 软件开发; 分配因子

Design of a Set of Software Serving for Online Voltage Stability Rapid Analyzing and Prevention Scheduling

ZHONG Hao¹, ZHANG Xiao-Bing²

¹(College of Electrical and new energy, Three Gorges University, Yichang 443002)

²(Zhuzhou County Electric Bureau, Hunan Electric Power Company, Zhuzhou 412000)

Abstract: The thesis commits to develop a type of software applicable for the rapid analyzing and prevention scheduling of static voltage stability in large-scale power system, by bring the application of current voltage stability analyzing method in real system into consideration, reviewing speed and precision requirements for real-time analysis, use the method of anchored on the combination of sensitivity restriction and local curve fitting to detect collapse point rapidly and precisely and the method of grounded on the optimizing of generated power distribution factor to raising system load margin, to researches and develops a set of software serving for online voltage stability rapid analyzing and prevention scheduling. The software is empowered to process an example analysis to the static stability of Hunan Grid, it can meet the speed and accuracy.

Key words: voltage stability; prevent scheduling; online analysis; design of software; distribution factor

1 引言

电力系统电压稳定性问题, 一直以来都是电力系统各运行单位、设计及科研部门极为关注的重要课题. 由于研究手段、科技条件的不成熟以及电力系统稳定性问题本身的复杂性, 国内外大停电^[1]等电压稳定严重破坏性事故的不断发生, 引起了国内外从事电力行业工作者的重视. 理解电压崩溃机理, 建立电力系统数学模型, 提出快速、准确的计算方法, 给出合理的预防控制策略, 是目前研究在线电力系统电压稳定性分

析的一个紧迫课题.

目前, EMS(Energy Management System, 电能管理系统)可以在线监测到电网运行的数据, 但是, 在获得 EMS 数据的基础上, 急需一种兼顾速度与精度的基于 B/S 模式的系统来分析当前系统的运行状态, 获得当前电网的负荷裕度和薄弱节点, 以及裕度对各电力主设备的灵敏度信息, 这些重要的详细分析结果, 可以直接作为调度人员做出正确调度策略的有力参考.^[2]

因此, 我们根据湖南电网的结构特点和独有的运行

^① 收稿时间:2013-04-15;收到修改稿时间:2013-06-03

方式, 结合电力工作的需求, 开发了一套基于 EMS 实时数据的电压稳定快速分析及预防调度策略输出软件.

2 软件的核心方法与技术

2.1 电压崩溃点快速追踪方法

本软件采用了基于灵敏度约束与局部曲线拟合相结合的方法来快速寻找电压崩溃点. 该方法在求出节点电压对负荷裕度参数的一阶与二阶灵敏度基础上, 根据灵敏度约束引导, 改进了一种自适应负荷增长步长选择方法. 在远离崩溃点时, 负荷增长步长较大, 大跨度逼近崩溃点, 而在接近崩溃点时, 负荷增长步长较小, 灵敏度的适应性更强. 当系统运行点接近崩溃点时, 根据局部灵敏度的曲线拟合法^[3]对临界点进行拟合, 快速准确得到崩溃点信息.

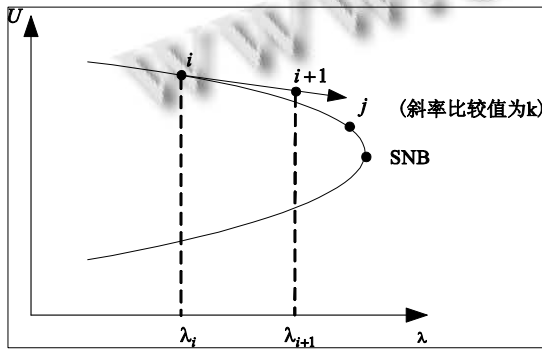


图 1 步长预测示意图

如图 1 所示, 利用运行点 i 的节点电压对负荷裕度参数的二阶灵敏度约束负荷增长步长 $\Delta\lambda_i$, 得到下一运行点 $i+1$ 的负荷增长步长 $\Delta\lambda_i$:

$$\left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_{i+1} = \left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_i + \left. \frac{d^2U_c}{d\lambda^2} \right|_i \Delta\lambda_i = r \left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_i \quad (1)$$

式中: $r(1 < r < 1.5)$ 为设定的斜率常数; i 为运行点; c 为该运行点的电压弱节点号; $\left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_i$ 为系统第 i 运行点电压弱节点 c 的电压幅值对负荷参数 λ 的灵敏度; $\left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_{i+1}$ 为给出的预测点 $i+1$ 处电压弱节点的电压幅值对负荷参数 λ 的灵敏度, 其预测值为斜率常数 r 乘以运行点 i 处的灵敏度 $\left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_i$, 即为 $r \left. \frac{dU_c}{d\lambda} \right|_i$.

同时可利用发电机输出无功对裕度参数的二阶灵敏度考虑预测点的发电机无功越界情况, 以此来判断无功/电压约束转换点和确定系统电压崩溃类型. 当运行点斜率绝对值大于斜率比较值后(如图 1 所示, 即运行点在 j 点之后, 运行点斜率大于斜率比较值 k), 直接对 PV 曲线进行局部曲线拟合, 计算出 SNB 点.

若 $\left| \frac{dU_c}{d\lambda} \right| > k$ 时 (k 为拟合斜率比较值), 则可用局

部曲线拟合方法快速求出当前运行点到 SNB 点的负荷增长步长 $\Delta\lambda$. 局部曲线拟合方程:

$$\Delta\lambda = \alpha\Delta U_c + \beta\Delta U_c^2 \quad (2)$$

式中: α 、 β 为常系数; 由于 $\lambda = \lambda' + \Delta\lambda$, λ 为待求步长, λ' 为当前运行点负荷水平, $\Delta\lambda$ 为负荷增长

步长, 因此有 $\frac{d\Delta U_c}{d\Delta\lambda} = \frac{dU_c}{d\lambda}$.

$dU_c/d\lambda$ 、 $d^2U_c/d\lambda^2$ 已知, 由式(2)对 λ 的一阶、二阶方程组可以解出 α 、 β . 然后式(2)对节点电压变化量求导, 可得:

$$\frac{d\lambda}{dU_c} = \alpha + 2\beta\Delta U_c \quad (3)$$

在临界点处 $d\lambda/dU_c = 0$, 式(3)可变为 $\alpha + 2\beta\Delta U_c = 0$, 从而可以计算出当前运行点到 SNB 点的电压幅值变化量 ΔU_c , 代入式(2)可求出当前运行点到 SNB 点的负荷增长步长 $\Delta\lambda_{cir}$.

2.2 优化预防调度方式

当系统在某种不稳定运行方式下运行, 或存在失稳故障^[4]时, 需对电力系统的运行状态进行控制以确保电力系统安全、稳定运行.

本软件采用基于优化发电功率分配因子等控制参数来提高系统负荷裕度的预防调度方法. 发电机功率分配因子是发电机对未来时刻增长负荷量时, 发电机发出功率的一个分配该负荷增量的比例. 该方法在基态时刻, 有功分配因子只是一个发电机功率增长方向, 如果该方向最优, 可直接延长 PV 曲线的崩溃点; 在基态情况下调整有功分配因子不会改变系统任何状态变量, 且其调节成本非常低, 可有效减少其他实际控制参数的调整量, 特别是减少了对发电厂发电机的大量、频繁调整, 和主变变比、补偿器输出的调节.

该预防调度算法以系统控制代价最小为目标函数, 以 N-1 负荷裕度、系统安全运行为约束条件, 基于裕

度对控制参数的灵敏度构造出一个线性规划^[5]模型,通过线性优化方法来获得可行性调度方案,控制变量按调度优先级依次为发电机功率分配因子、发电机功率调整量、变压器变比的调整量、节点的负荷量为控制变量。

由于实际电网结构复杂,控制参数数目非常大,在负荷裕度对控制参数的灵敏度中绝大部分控制参数的灵敏度极小,此类灵敏度极小的设备调节对于控制目标而言是无关紧要的。调度人员希望通过尽可能少的设备调节将系统运行点拉回安全域内。因此采取功率分配因子集中调度和预选参与调度集的策略,使得调度规模大大减小,同时严重故障得到了有效的控制。

对于有功分配因子值非零的发电机,在未来时刻负荷有增长时,增长负荷将按功率分配因子的比例分摊到各个发电机。但是受到发电机运行约束的限制,有些发电机不能参与未来时刻负荷增长量的分摊。另使线性规划模型更快的收敛,对发电机有功分配因子采取集中调度策略。即根据裕度对剩余发电机有功分配因子的灵敏度值大小排队,选择 NC_p 个正向灵敏度最大的发电机参与调度,而令其它负向最灵敏的分配因子值变为零,即分配因子负向最灵敏的发电机不参与调度。这样大大减小了参与调度的发电机数目,而且能够满足系统裕度要求。

其它控制参数,在计算灵敏度之后,根据灵敏度大小和控制参数类型排序,对于控制类型 j ,选择最灵敏的前 NC_j 个参数参与调度集^[6,7]。

2.3 采用 MVC 模式和 ExtJS 技术

MVC(Model View Controller, 模型—视图—控制器)是指模型 M-视图 V-控制器 C 三个核心部件组成的一种软件设计模式。使用 MVC 模式可以被多个视图共享,无论用户想要 Flash 界面或者是 Web 界面,用一个模型就能处理它们。由于数据和业务规则从表示层分开,最大化的重用了代码,具有很大的优势。MVC 框架结构图如图 2 所示。

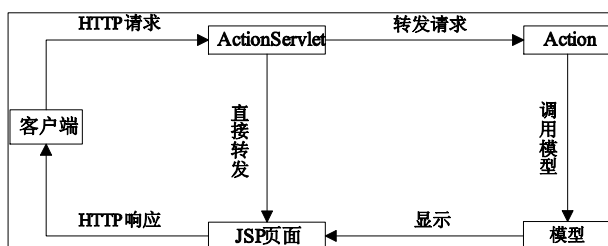


图 2 MVC 框架结构图

在 JSP 页面大量采用 ExtJS 技术完成界面显示, ExtJS 是一种主要用于创建前端用户界面^[8], 是一个与后台技术无关的前端 ajax 框架, 用 JavaScript 编写, 可以用来开发具有绚丽外观的富客户端应用^[9]。ExtJS 框架集成了 CSS 代码, 不用再单独写 CSS 部分的代码, 节省了大量的精力。结合 JSP、HTML 等语言即可快速的开发出一套基于 web 的系统软件。

3 软件开发工具

在线电压稳定快速分析及预防调度系统后台核心计算程序采用 Visual C++6.0 工具^[10]编写, Web 服务器工程是在 Myeclipse7.1 软件环境中建立, 它是功能丰富的 JavaEE 集成开发环境, 包括了完备的编码、调试、测试和发布功能, 完整支持 Html, Struts, CSS, Javascript, SQL。后台数据库是采用 SQL server 2000 关系数据库, 其主要特点: 设计性能高、系统管理先进、强壮的事务处理功能和支持对称的多处理器结构、存储过程、ODBC, 并具有自主的 SQL 语言。^[11]

4 系统总体结构

在线电压稳定快速分析及预防调度系统是接受 Ftp 服务器中的 EMS 数据并对其进行静态电压稳定性分析, 当出现失稳故障时, 则自动启动预防调度功能模块, 为调度人员提供预防电压失稳的策略。电压稳定的计算和分析由调度中心完成, 以便对所管辖的电网有全局性的把握, 下级的变电站、发电厂和线路维护部门只接受调度中心的指令, 不需要进行相关的计算分析, 通过服务器地址访问该系统, 获得电网当前运行状态信息以及预防调度策略。^[12]如图 3 所示。

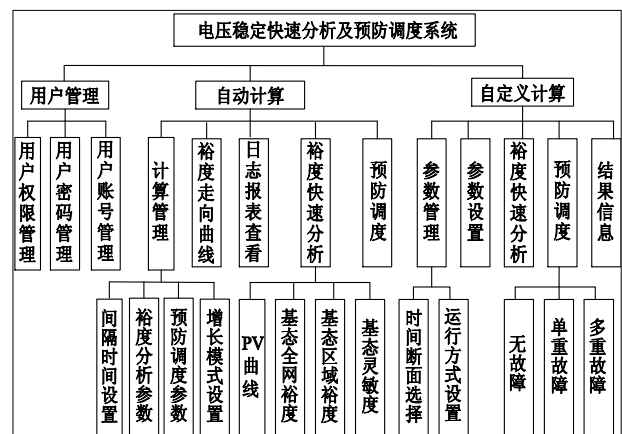


图 3 系统结构图

5 系统数据结构

Web 系统由一个单独的线程控制新数据的获取、判断和下载。从 Ftp 服务器下载的数据进行分类,并按特定格式存储,以便在后面的分析中使用。线程控制流程如图 4 所示。

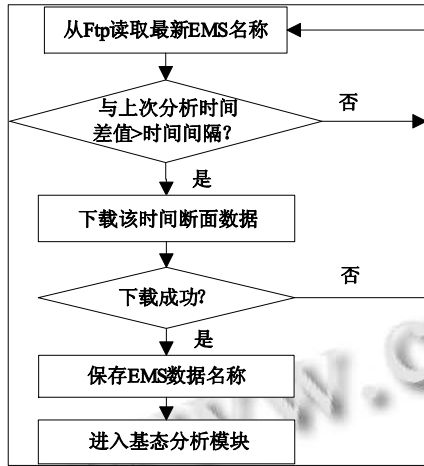


图 4 控制数据下载流程

系统主要是对数据的处理和分析,需要频繁的存取、查询和分析数据,用户查询和获取的数据,因此,数据库的合理设计是本系统设计的重点。包括数据库的结构设计和数据库安全性设置。

(1) 数据库结构设计

根据系统数据的特点设计两个数据库:基础数据和结果数据库。各数据库之间的关系如图 5 所示。只能在权限允许的情况下读取数据,不能对其进行更改和删除。只有高级管理员才能对其维护和管理,这样保证了数据库的安全性和稳定性。

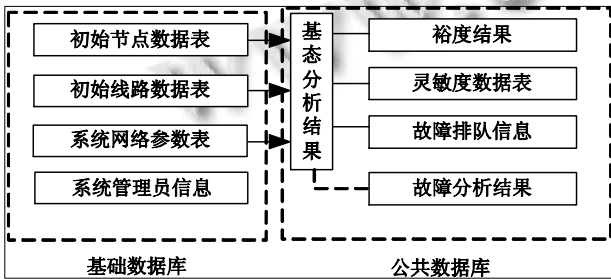


图 5 数据库结构

结果数据库存储了潮流计算、灵敏度计算结果。包括基态情况下或故障情况下的负荷裕度表、灵敏度信息表、故障排队信息、节点支路信息以及预调度信

息。所有的 N-1 故障情况下的数据表都是临时数据表,存储的当前时间断面的故障分析结果信息。

(2) 数据库安全配置

在对 SQL Server 2000 进行安全配置之前,首先必须对操作系统进行安全配置,保证操作系统处于安全状态。本系统采用 SQL Server 和 Windows 混合认证模式,集成了操作系统的安全系统和数据库的安全系统,效率更加高。

6 系统界面介绍

Web 界面结构如图 6 所示。

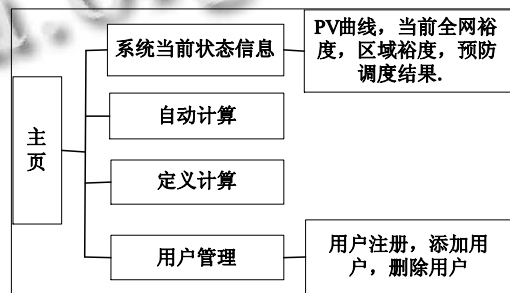


图 6 系统界面结构图

6.1 自动计算页面

自动计算子页面包括计算管理、裕度走向、基态信息、故障信息以及查看日志五个功能按钮,点击按钮即可弹出相应功能的窗口,如图 7 所示。

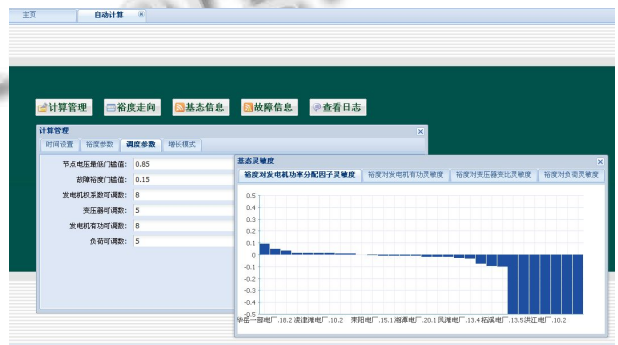


图 7 自动计算页面截图

计算管理窗口主要功能: ①设置自动计算时间间隔; ②设置基态裕度分析参数: 发电机增长方式(按发电机有功初始比例全网增长/按发电机有功剩余比例全网增长)、斜率常数、基态不收敛递减裕度、拟合点斜率最小值; ③设置预防调度参数: 节点电压最低门檻

值、故障裕度门限值、发电机功率分配因子可调数、变压器可调数、发电机有功可调数、负荷可调数; ④设置发电机及负荷增长模式: 某区域中发电机或者负荷是否参与增长。

6.2 自定义计算子页面

该页面提供了定义计算所有操作功能。按操作顺序依次是获取数据、处理数据、设置参数、计算裕度、预防调度等。子页面如图 8 所示。



图 8 自定义计算页面截图

处理数据页面对发电机数据(投运状态、输出电压、输出功率)、变压器数据(高、中、低压侧投运状态)、补偿器数据(投运状态、补偿值)、线路数据(线路 I、J 端投运状态)、负荷数据(负荷投运状态、负荷有功值、负荷无功值)进行修改, 选择一台系统平衡机, 设置增长方式(增长模式、发电机和负荷是否参与增长)、可调(发电机、变压器、负荷是否可调设置)、基态电压稳定裕度分析参数、预防调度参数。电压稳定裕度分析结束后, 选择自动选择故障设备、人工选择 N-1 故障、人工选择 N-m 故障, 启动预防调度程序。

程序运行结束后可查看基态信息、故障信息及预防调度策略信息。如图 9 所示。



图 9 结果显示页面

7 结论

本文在电压稳定分析模块使用基于灵敏度约束与

局部曲线拟合相结合的方法来快速寻找崩溃点的方法, 该方法能自适应负荷裕度步长选择, 快速准确得到崩溃点信息, 包括基态裕度、裕度对参数灵敏度信息。在预防调度模块中, 本系统引用了基于优化发电功率分配因子来提高系统负荷裕度的方法, 该方法以系统控制代价最小为目标函数, 以 N-1 负荷裕度、当前运行节点电压为约束条件, 构造线性规划数学模型, 快速得到故障裕度和故障灵敏度信息, 分析出电网薄弱环节和薄弱线路, 快速得到预防调度策略, 用以作为电力工作人员电力调度的理论参考。该系统满足电压稳定快速分析及预防调度的要求, 功能层次清晰, 人机交互界面美观便捷, 该软件采用了较好的工程框架和计算机编程技术, 并达到了兼顾速度与精度、稳定运行、使用便捷等多项指标。

参考文献

- 1 Taylor CW. Power system voltage stability. New York, McGraw-Hill, 1994: 23-58.
- 2 Jain T, Srivastava L, Sing SN. Fast voltage contingency screening using radial basis function network. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(4): 1359-1366.
- 3 Zhao JQ, Chiang HD. Enhanced look-ahead load margin estimation for voltage security assessment. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 6(3): 2640-2645.
- 4 邱晓燕, 李兴源, 林伟. 在线电压稳定性评估中事故筛选和排序方法的研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 51-54.
- 5 陈宝林. 最优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社, 1989: 188-210.
- 6 江伟, 王成山. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法. 中国电机工程学报, 2006, 6(2): 13-18.
- 7 Greene S, Dobson I, Alvarado FL. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters. IEEE Trans. on Power System, 1997, 12(1): 262-272.
- 8 徐会生, 何启伟, 康爱媛. 深入浅出 Ext JS. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 28-229.
- 9 张峰, 李慧丽. Java Web 2.0 架构开发与项目实战. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 460-466.
- 10 张世钦, 张俊, 程春田, 申建建. 福建省电网中长期水文预报系统设计与开发. 水电能源科学, 2008, 26(6): 58-61.
- 11 李春葆, 曾慧. SQL Server 2000 应用系统开发教程. 北京: 华大学出版社, 2008: 23-26.
- 12 孙卫琴. Tomcat 与 Java Web 开发技术详解. 北京: 电子工业出版社, 2009: 30-41.