

# 基于实时测量系统的电网运行可靠性评估系统

刘玉娟<sup>1</sup>, 谢大为<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学信息与控制学院, 江苏 南京 210044; 2. 安徽电力调度通信中心, 安徽 合肥 230022)

**摘要:** 基于实时测量系统的电网运行可靠性评估系统可以根据电力系统运行状态的变化, 给出实时计算结果, 并能评估不同运行方式和未来检修方式的可靠性, 提高了电网运行可靠性的分析水平。文章概述了当前电力系统可靠性评估的发展现状, 阐述了基于实时测量系统的可靠性评估系统的整体架构设计, 分析了系统基本功能和实施方案, 并着重讨论了系统算法和用户接口的设计。应用本系统对实际电网数据进行了评估, 结果表明算法能如实反应系统可靠性水平, 对系统的可靠性水平有显著作用。

**关键词:** 电力系统; 运行状态; 实时; 可靠性评估; 测量系统; 运行可靠性

## Power grid reliability evaluation system based on real-time measurement data

LIU Yu-juan<sup>1</sup>, XIE Da-wei<sup>2</sup>

(1. School of Information & Control Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Anhui Electrical Power Dispatching & Communication Center, Hefei 230022, China)

**Abstract:** By use of power grid reliability evaluation system based on real-time measurement data, results could be figured out and the reliability of different operation model and future overhaul model could be evaluated with the change of power system operation state. The grid reliability is enhanced by this means. In the paper, the development situation of power system reliability evaluation is summed up, the design of the evaluation system frame based on real-time measurement system is expatiated, the basic function and scheme of the system are analysed and the design of arithmetic and human interface are discussed emphatically. By use of the system, the reliability evaluation of a real power system is conducted. The results show that the proposed algorithm can truthfully reflect the reliability level of power system, and real-time operating conditions greatly impact the reliability level of power system.

**Key words:** power system; operation state; real-time; reliability evaluation; measurement system; operation reliability

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0028-04

## 0 引言

随着国内经济以及电力需求的快速发展, 装机容量、负荷水平逐年增加, 电网规模和容量不断扩大, 电网事故的性质和影响范围也越来越严重。停电事故可能给社会带来重大的经济损失、人员伤亡、以及政治影响。电力市场<sup>[1]</sup>下, 用户对供电可靠性的要求越来越高, 以电价为杠杆, 停电电量可以直接转化为对用户的停电赔偿费用。因此, 对电网运行可靠性进行及时、准确的评估, 从而尽快发现运行风险, 避免或减轻停电事故, 对于电力行业意义重大。

## 1 可靠性评估发展现状

传统的 N-1 在线安全分析算法, 搜索故障集合有限, 很难分析复杂故障和连锁故障, 很难判别故障发生的可能性, 因此应用价值有限。规划可靠性算法可以自动搜索所有可能的故障集合, 计算指标

大多为停电风险指标的期望值, 可以用来比较不同规划方案的合理性, 但计算周期较长, 不能根据电力系统运行状态的变化, 给出实时计算结果, 难以满足电网运行和调度的要求。

发输电设备的检修方案不仅要满足电网的安全运行, 也要维持电网在可能发生的随机故障下的可靠性水平。考虑到运行方式和故障模式的变化, 需要采用电网实时数据跟踪分析, 引入概率仿真算法, 以量化指标分析比较不同检修方案下电网的运行风险。本文所研究的基于实时测量系统的可靠性评估系统<sup>[2]</sup>可以利用电网运行调度数据平台和可靠性历史统计数据, 计算实时运行方式、日检修方式和月度检修方式下, 电网的可靠性水平, 评估不同运行方式和检修方案, 搜索电网中的薄弱环节, 寻找降低电网运行风险的有效措施。

## 2 系统软硬件整体架构设计

### 2.1 系统软件流程

调度运行人员和方式安排人员可以设置所需的计算功能和计算条件, 并能查询电网可靠性评估的结果。该系统首先根据 SCADA 采集的电网运行数据以及检修方式、评估参数等附加信息, 形成网络拓扑, 而后进行随机故障抽样仿真, 对故障进行潮流计算和有功校正, 从而计算出电网运行可靠性指标。系统软件流程见图 1。

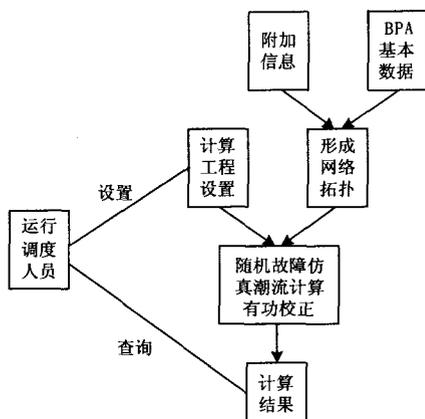


图 1 系统软件流程图

Fig.1 Flow chart of system software

### 2.2 系统硬件架构

系统主要由数据服务器、应用服务器、客户终端以及相关的网络设备组成。数据服务器主要负责数据的采集及存储, 应用服务器对采集的数据进行数据整合和处理并进行可靠性评估计算。客户终端可以发送计算命令查看可靠性评估的结果。硬件架构见图 2。

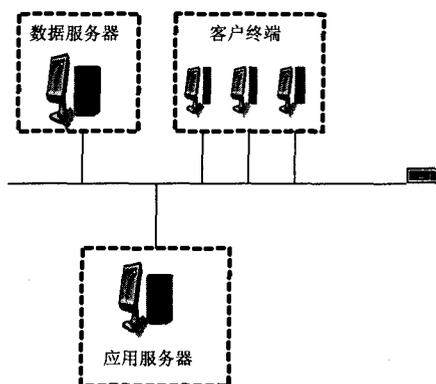


图 2 硬件架构

Fig.2 Frame of hardware

## 3 系统功能

该系统主要具有用户管理功能、查询功能、计算管理功能、计算功能四个功能模块。

#### (1) 用户管理功能

该功能主要包括用户权限、用户登陆、用户密码、注销用户等用户管理功能。

#### (2) 查询功能

该功能可以让调度运行人员和方式安排人员根据需求, 设定可靠性评估所需的计算参数<sup>[3]</sup>并查询计算结果。

#### (3) 计算管理功能

该功能可以对母线、线路、发电机、变压器及其总故障重数和抽样总次数进行合理的设置。

#### (4) 计算功能

该功能是系统的核心功能, 他能够对电网实时运行方式、日检修方式、月度检修方式以及任一指定运行方式进行可靠性评估计算。见图 3。

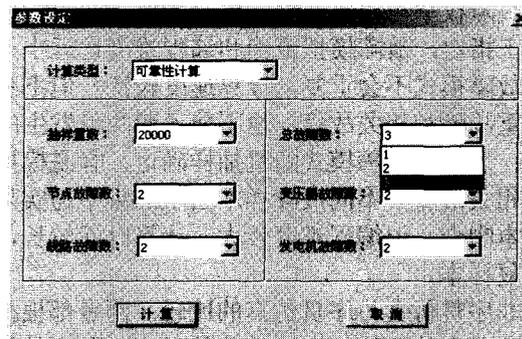


图 3 计算功能

Fig.3 Function of calculation

## 4 系统实施方案

### 4.1 基本算法设计

#### (1) 随机故障仿真算法

基于序贯仿真和非序贯仿真的蒙特卡罗概率仿真算法。

根据设备随机故障的概率分布特性, 采用人工随机数发生器进行模拟。一般选择均匀分布的伪随机数发生器  $U[0,1]$ , 其他分布类型, 如指数分布等, 可通过函数重构进行模拟, 也可以直接选择相对应的伪随机数发生器。

基于非序贯仿真的蒙特卡罗抽样中, 若设备采用故障和运行的两状态模型, 强迫停运率为  $FOR$ , 抽取服从  $[0,1]$  间均匀分布随机数  $R$ , 根据  $FOR$  与  $R$  间的关系可以判断设备是否故障停运:

$R \leq FOR$ , 设备故障;

$R > FOR$ , 设备运行。

对于多状态元件,同样可以根据对状态概率分布的模拟,抽样确定当前所属状态。

基于序贯仿真的蒙特卡罗抽样中,若设备采用故障和运行的两状态模型,平均无故障运行时间和平均故障修复时间分别为  $MTTF$  和  $MTTR$ ,一般认为发电机、变压器、输电线路的故障和修复服从指数分布,其概率分布函数为:

$$f(x_1) = 1 - e^{-x_1/MTTF}$$

$$f(x_2) = 1 - e^{-x_2/MTTR}$$

从  $t=0$  时刻开始,抽样服从(0,1)间均匀分布随机数  $R1$ 、 $R2$ ,计算预想的下次故障发生时间  $ETF$  (小时)和修复时间长度  $ETR$  (小时):

$$ETF = -MTTF * \ln(1 - R1)$$

$$ETR = -MTTR * \ln(1 - R2)$$

按时间顺序,对所有元件在仿真时段内的运行状态全部进行概率抽样。

故障枚举与概率仿真相比较:前者的故障模式由人工指定,故障模拟范围和编程难度远远小于后者,故障模式不会重复,计算速度较快,但不易模拟多重故障和相关故障,也不能说明故障发生的可能性;后者的故障模式随机抽样确定,容易模拟多重和相关故障,不同故障样本出现的频率与实际系统基本吻合,但编程难度较大,计算时间较长,存在重复样本。

非序贯仿真与序贯仿真的比较:两者都根据故障概率分布特性模拟实际故障的发生。前者的计算速度较快,但不易计算与时间相关指标,如最大停电时间、最大停电电量、最大停电成本等,停电频率指标的计算比较复杂;后者可以非常容易地计算所有上述指标,编程实现相对较为简单,但计算效率较低,相同收敛条件下,所需样本容量和计算时间都较大。

## (2) 网络拓扑分析模型

网络拓扑分析存储和判断网络的结构特性,在没有人工干预的前提下,自动存储电网结构。在输电元件随机故障后,自动形成新的网络拓扑结构,避免因雅克比矩阵奇异导致的潮流无解。区分发电厂和变电所的单母线和双母线接线,均按故障概率抽样分析。

## (3) 潮流计算

作为故障模式后续分析的过滤器,潮流计算可以节约大量的计算时间。根据电网实时数据、检修方案和随机故障模式,分析电网中有功功率平衡、线路载荷和断面潮流限额是否满足,如果满足,分析下一故障模式,否则调用有功校正模型,采用一

定的发电再调度策略来消除运行风险。

## (4) 有功模型

不能通过直流潮流过滤的算例,由有功校正予以调整。约束条件包括:有功功率平衡、发电机有功出力约束、线路载荷约束、可切负荷约束、以及考虑暂态稳定约束下的断面潮流限额。再调度目标策略拟采用故障距离加权下的停电功率最小策略。

## (5) 流程框图如图 4

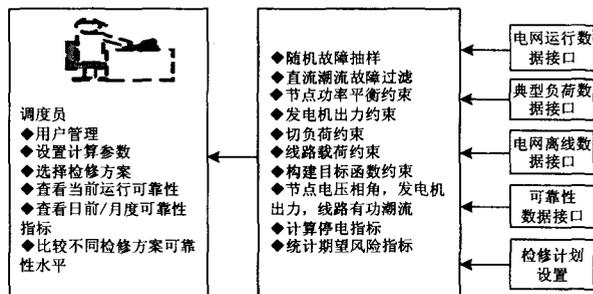


图 4 流程框图

Fig.4 Procedure frame

## (6) 研究结果

研究结果包括风险指标<sup>[4]</sup>和关键设备等。风险指标包括系统和重要负荷点的停电概率、停电时间、停电功率、停电电量、停电损失等,以表格和直方图表示,可作为检修方案比较的量化依据。关键设备是指一旦故障将给系统造成严重影响的发输电设备,按故障严重性系数排序,以表格形式给出。具体包括:

①当前运行方式下电网量化可靠性水平。

②日前检修方案下电网量化可靠性水平、不同日前检修方案可靠性水平比较。

③月度检修方案下电网量化可靠性水平、不同月度检修方案可靠性水平比较。

④调度员及方式安排人员设计检修方案下的方式下电网量化可靠性水平。

⑤不同运行方式下关键设备集合和薄弱环节。

风险指标的定义和统计应包括概率加权风险指标、期望风险指标。前者定义与故障枚举故障组定义相同。下面主要定义随机抽样得到的期望风险指标。设抽样次数为  $N_s$ ,第  $i$  次抽样得到停电功率  $\Delta P$ 、停电时间  $\Delta T$ 、停电电量  $\Delta E$ ,当停电功率大于 0 时,设定停电标志  $F_i = 1$ ,否则  $F_i = 0$ 。分别计算停电概率、停电功率、停电时间、停电电量的期望值:

$$\text{停电概率: } LOLP = \frac{1}{N_s} F_i$$

$$\text{停电功率: } EPNS = \frac{1}{N_s} \Delta P$$

$$\text{停电时间: } EDNS = \frac{1}{N_s} \Delta T$$

$$\text{停电电量: } EENS = \frac{1}{N_s} \Delta E$$

以上算法适用于系统和负荷节点指标。

#### 4.2 用户接口设计

##### (1) 输入数据

输入数据包括 BPA 潮流文件、检修计划、稳定断面限额等, 系统读数据文件(BPA)或数据库后, 自动形成网络拓扑数据。

##### (2) 用户菜单

主要功能包括用户功能定义和数据查询。用户可以在用户功能上选择确定时间断面、日前检修方式、年度检修方式, 并启动计算。数据通过 Microsoft Access 的表格显示, 可以查看原数据是数据和计算结果, 也可以修改部分原始数据, 如设备可靠性参数、载荷上限、断面及限额设置等。

电气设备可靠性参数历史数据库强调列出, 在编程实现上应考虑由运行人员更新维护。

##### (3) 应用系统

采用 Visual C++ 6.0 编程, 采用 Microsoft Access 数据库存放数据。

##### (4) 多任务分布式并行计算控制功能

采用多任务分布式并行计算控制方法, 平台服务器接收各客户端不同种类、不同数量的计算请求, 将其与在线安全扫描计算任务综合归类, 进行计算优先级排列后, 根据实际情况可以将大计算任务分解成多个子任务后, 再向各个计算代理节点发布计算任务, 巡视计算进程并收集、分析、合并计算结果, 分别将计算结果发向各客户端。

为了接入各种不同种类的计算程序, 计算代理节点提供了各种类型的配置, 根据需要可以通过配置可以接入不同的计算程序, 用于控制不同的计算程序进行计算和收集计算结果, 根据自身资源状况, 动态的调整自身的计算频率和强度, 和平台服务器的计算任务管理一起工作, 负责避免多个计算任务和计算结果间的相互冲突, 并使各计算代理节点的计算资源相互协调。

### 5 系统运行情况

本系统以电网实时运行数据为基础, 基于 Windows 操作平台, 采用 Visual C++ 6.0 编程语言, 总体包括运行风险评估, 日检修和月检修计划可靠性指标评估三个独立的处理模块, 数据取自电网运行方式基本潮流的 BPA 格式实时数据和可靠性历

史统计数据, 在 CPU 为 P4 2.6G、内存为 256 M 的台式机上计算风险指标及故障模式和关键设备排序费时在 8 min 左右, 10 min 内电网运行方式的变化一般不大, 故可以满足大型电网运行风险在线评估的要求。日检修计划和月检修计划计算费时会根据检修方案的不同相应发生改变, 仍可基本满足要求。

### 6 算例

用本系统分析 2006 年 2 月 18 日 10:14 分的电网实时可靠性 (见图 5), 对电网进行 20000 次的随机故障抽样计算, 并分析出电网的可靠性水平。本次计算结果显示: 5 次抽样故障需要进行线性规划, 线性规划就是故障后对系统的发电机组出力 and 负荷进行调整, 能够避免电网元件过载以及停电情况的发生; 9 次抽样故障需要进行切负荷操作, 最大切负荷量为 125.6 MW, 最大停电时间 83.65 h, 最大停电电量 1050.6 万 kWh, 线性规划无法解决的故障只能依靠切负荷操作; 停电概率期望值 0.045, 该值主要判断系统故障后停电的可能性有多大, 停电功率期望值 2.815, 该值主要判断系统故障后需切负荷的量。调度运行方式人员可以通过以上指标对电网检修计划和机组出力计划安排的合理性进行比较从而得出最佳运行方式。本系统还能通过计算, 给出关键设备排序, 排序的根据是设备故障后造成电网停电的功率大小, 通过该信息, 调度运行人员可以了解电网运行的薄弱点, 做好事故预想。因此, 本系统能够对电网调度运行具有较强的指导意义。

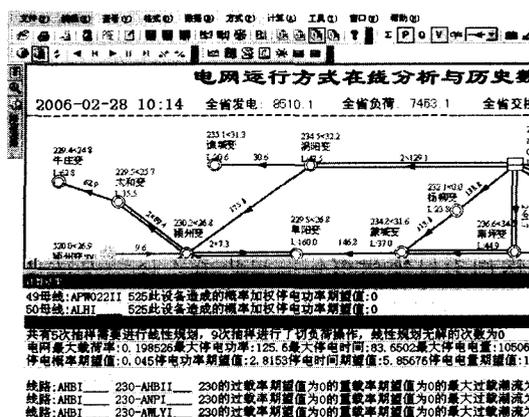


图 5 系统实例

Fig.5 Instance of the system

### 7 结束语

基于实时测量系统的可靠性评估系统与 BPA  
(下转第 38 页 continued on page 38)

厂站数据接入 PI 系统,有人称之为电力系统的第二信道系统。信息采集子站是该系统的重要组成部分,随着电力信息化建设的进行,信息采集子站将会得到越来越广泛的应用。

#### 参考文献

- [1] 周怡,王坚敏. PI 实时数据库在供电企业中的应用架构[J]. 浙江电力,2005,(1):40-43.  
ZHOU Yi, WANG Jian-min. The PI Real-Time Database Application Architecture in Power Supply Enterprise[J]. Zhejiang Electric Power, 2005, (1): 40-43.
- [2] 崔江枫,王冬青. 实时数据库在变电站自动化系统中的应用[J]. 继电器,2004, 32(12):47-50.  
CUI Jiang-feng, WANG Dong-qing. Application of Real-time Database System on Substation Automation [J]. Relay, 2004, 32(12):47-50.
- [3] 刘贵红. 实时数据库 PI 在柳电信息化建设中的应用[J]. 广西电业, 2006,1(7):73-76.  
LIU Gui-hong. Application of Real-time Database PI on Liu-Zhou Power Information System Construction[J]. Guangxi Electric Power,2006, 1(7):73-76.
- [4] 刘吉臻,房方. 电力企业中的实时数据库技术[J]. 中

国电力,2004, 37(2):73-78.

- LIU Ji-zhen, FANG Fang. Real-time Database in Electric Power Enterprise [J]. Electric Power,2004,37(2):73-78.
- [5] 陈坤,冷杉. 基于 OPC 的虚拟 DCS 对象调试软件开发[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(10):39-41.  
CHEN Kun, LENG Shan. Development of Object-oriented Debugging Software Based on OPC for Virtual DCS[J]. Power Electric Automation Equipment, 2004, 24(10):39-41.
- [6] 洪慧,林中达. PI 数据库及其信息交换技术在电厂中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3):60-63.  
HONG Hui, LIN Zhong-da. Application of PI Real-time Data-base and Information Exchange in Power Plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2005, 25(3):60-63.

收稿日期: 2006-10-26; 修回日期: 2007-05-31

#### 作者简介:

温信强(1968-),男,工程师,长期从事继电保护工作;  
杜浩良(1977-),男,工程师,长期从事继电保护工作;  
吴新华(1982-),男,硕士研究生,主要从事电网二次设备监控和自动化的研究。E-mail:wuxh-zjuce@163.com

(上接第 31 页 continued from page 31)

数据完全兼容,能够利用实时数据进行分布式并行计算,可以与其他在线分析手段相结合监控电网运行方式。分析评估不同日前、月度检修计划下电网运行的可靠性水平,并提出线路重载率期望值指标的概念,本系统为电网实时监测评估运行可靠性和合理安排检修计划提供了有效方法。基于实时测量系统的电力系统运行可靠性和检修可靠性的应用和实践还是刚刚开始,还需要在运行中不断完善和发展。今后的工作将会在恶劣天气条件下电网运行可靠性评估理论、设备故障的条件概率及相互影响机理等方面开展进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] 李生虎,丁明. 电力市场中基于电价弹性的电力系统运行可靠性的协调控制[J]. 中国电机工程学报,2005, 25(24): 34-40.  
LI Sheng-hu, DING Ming. Coordination to Power System Operational Reliability in Power Market Based on Price Elasticity[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(24): 34-40.
- [2] 孙元章,程林,刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术,2005,29(15): 6-12.  
SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power

System Operating Reliability Evaluation Based on Real-time Operating State[J]. Power System Technology, 2005,29(15):6-12.

- [3] 程林,何剑,孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006,30(13): 8-13.  
CHENG Lin, HE Jian, SUN Yuan-zhang. Impact of Transmission Line's Real-Time Reliability Model Parameter upon Power System Operational Reliability Evaluation[J]. Power System Technology, 2006,30(13): 8-13.
- [4] 丁明,李生虎,吴红斌,等. 基于充分性和安全性的电力系统运行状态分析和量化评价[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4): 43-49  
DING Ming, LI Sheng-hu, WU Hong-bin, et al. Analysis of Power System Operation State Based on Adequacy and Security[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4): 43-49.

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-04-06

#### 作者简介:

刘玉娟(1979-),女,助教,硕士,主要从事电力系统继电保护与自动化的研究; E-mail: yjliu\_china@163.com  
谢大为(1978-),男,工程师,硕士,主要从事电力系统稳定分析研究。