

基于 GIS 的大庆油田电力系统连锁过负荷故障分析系统

闫丽梅^{1,2}, 赵国成¹, 陈娟¹, 安小龙¹, 张艳¹, 薛晨光¹

(1. 东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为满足大庆油田电网调度和信息管理的需要, 同时为了避免大庆油田发生由于过负荷连锁故障而导致的大停电造成过大的经济损失, 开发了基于 GIS 的大庆油田电力系统连锁过负荷故障分析系统软件。该软件利用美国 ERSI (环境系统研究所) 开发的 MapObjects 组件及 C# 进行集成二次开发, 并进行必要的扩充, 完成了如下的功能: 大庆电网主接线图的主界面, 基态潮流计算, 初始故障的求取, 开断潮流的计算, 连锁故障路径的显示, 故障图的分区显示以及故障率的计算等。通过其显示的连锁故障路径, 可以清晰地看出易出现连锁故障的线路, 为大庆油田的安全可靠供电提出了有益的警示和参考, 为避免更大的经济损失提供了依据。结果表明: 求出的关键路径是大庆油田电力系统故障率比较高的路径。证明了结果的正确性。
关键词: GIS; 基态潮流; 连锁故障; 过负荷; 开断潮流; 故障树

GIS based overload cascading failure analysis system in Daqing oil-field power system

YAN Li-mei^{1, 2}, ZHAO Guo-cheng¹, CHEN Juan¹, AN Xiao-long¹, ZHANG Yan¹, XUE Chen-guang¹

(1. School of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. School of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to meet the needs of grid dispatching and information management in Daqing oil field, and meanwhile, in order to ensure Daqing oil field against excessive economic losses resulting from massive power failures that caused by cascading failure, this paper has developed a software of GIS based power system cascading failure overload fault analysis system. The software uses Map Objects components that was developed by American ERSI (Environmental Research System and Institute); uses C# to integrate secondary development; carries out the necessary expansion, and at last completes the following functions: the main interface of Daqing Grid' main wiring diagram, the ground-state power flow calculation, the calculation of initial failure, the breaking power flow calculation, the display of cascading failure fault path, the partition show of the fault map, the calculation of failure rate, etc. Through the path of the cascading failure showed by the software, we can see clearly the line with cascading failure. So we can propose a useful warning and reference for the safety and reliability of electricity supply in Daqing Oil field, and provide a basis for avoiding further economic losses. The results show that the critical path which is found by the software is the path that has the high failure rate in Daqing oil field power system. The correctness of the results is proved.

Key words: GIS; basal state power flow; cascading failure; overload; breaking power flow; fault tree

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0075-07

0 引言

大庆油田电力系统是一个面向油田供电的大型企业电力系统, 经过几十年的发展, 供电区域总面积达 30 万 km²。大庆油田电力系统现有 30 座 110 kV 变电站, 249 座 35 kV 变电站以及 82 座 6 (10) kV 变 (配) 电所, 110 kV 电压等级以下的输电线路达 3 000 多公里, 年供电量近 110 亿度, 是全国最大的

企业电力系统。

大庆油田供电区域比较分散, 供电主体区南北长 138 km, 东西宽 73 km, 计及周边地区, 油田电网覆盖区域超过上万平方米。这使得油田电力系统的信息管理难度很大, 而传统的电力图形系统已经很难满足电网的调度管理和信息自动化的要求, 因此建立大庆油田地理信息系统 (GIS) 来管理和处理这些信息, 才能使调度部门实时、直观地了解信息的变化, 做到有效、科学地管理电网。

近年来, 国内外多个国家的电力系统相继出现了由于连锁故障而引起的大范围停电事故, 已造成

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助 (20090460863); 黑龙江省普通高校骨干教师创新能力资助计划 (1152G003)

了巨大的经济损失和严重的社会影响^[1-7]。究其原因,大部分都是由于过负荷导致连锁跳闸所引发的。其发生机理为^[8-9]:当电网正常运行时,每个元件都带有一定的初始负荷,当某一个元件或几个元件因过负荷而导致电网发生故障时,系统原来的潮流将发生变化,停运元件的负荷会加载到仍在正常工作的元件上,一旦这些元件无法承担新增加的负荷而退出运行时,就会引起新一轮的负荷转移,这将引发连锁性的过负荷,并最终导致大面积停电事故。大庆油田电力系统的负荷主要是油田采油生产用电以及石油化工企业生产用电,因此保证安全可靠供电,避免发生由于过负荷引发的连锁故障意义重大。

本文以组件式 GIS 技术为基础,以 .NET 框架主流语言 C# 为平台,以大庆油田 110 kV 以及 35 kV 等级的电网为研究对象,实现了基于 GIS 的大庆油田电网连锁过负荷故障预警系统。该系统可实现系统管理、地图管理等基本功能,并结合大庆油田电网实际运行情况,把大庆油田电网按照一定的原则分成若干区块,应用电网数据自动分析其拓扑结构,进行潮流计算和连锁故障分析。根据相继开断结果绘制相应的故障树结构,经过故障树的定性分析和定量分析得到顶事件发生的概率和最小割集,找出易发生连锁过负荷故障线路的连锁路径,为油田电网的安全运行提供相应的参考依据,从而很大程度上节省了人力物力,提高相应人员的事故处理能力。

1 大庆油田电网 GIS 连锁过负荷故障预警系统的实现

地理信息系统 (Geography Information System, GIS) 是一项以计算机、地理学、测量学、制图学为基础的新兴边缘性学科的成果,它是一种特定而又十分重要的空间信息系统,它是以采集、贮存、管理、处理分析和描述整个或部分地球表面 (包括大气层在内) 与空间和地理分布有关的数据的空间信息系统^[10-13]。

本文基于 GIS 进行集成二次开发,利用 GIS 工具软件生产厂家提供的建立在 OCX 技术基础上的 GIS 功能组件,美国环境系统研究所 (Environment Systems Research Institute, ERSI) 的 MapObjects,以通用软件开发工具尤其是可视化开发工具 C# 为开发平台,进行二者的组件式的集成开发。本课题所开发的系统摆脱了对 GIS 工具软件的依赖,具有灵活性高,易用性强等优点。

系统运行环境的要求:

(1) 操作系统: Windows 2000 或以上版本。

(2) NET 平台: Microsoft.NET Framework 2.0 或以上版本。

1.1 地图管理

选用 ERSI 的 MapObjects 组件,利用 C# 进行集成二次开发,并进行必要的扩充,实现地图管理功能。利用地图显示对象组、实用对象组、投影对象组可以实现图形的缩放、平移、标注数据等功能。

系统运行的主界面如图 1 所示。

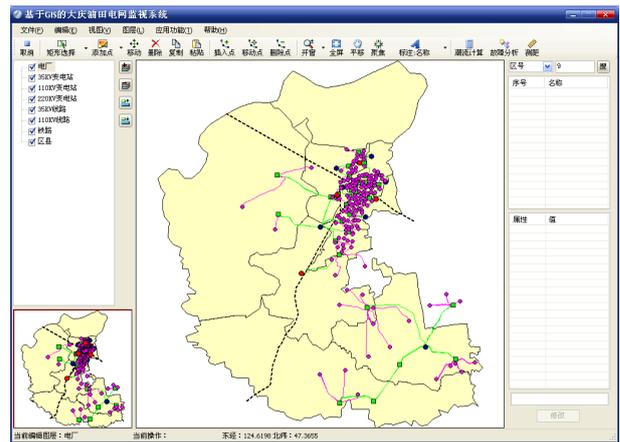


图 1 系统运行的主界面

Fig.1 Main interface of system running

主界面中的大庆油田电网电力系统网络图是根据大庆油田电力系统平面图和大庆油田电力系统主接线图,经过简化处理后得到的。图中各图层图例颜色、样式、大小都是可以随意改变的,默认图例颜色与大庆油田电力系统平面图所示一致。图 1 中显示的辅助图层有两层,分别是区县层和铁路层。区县层为面图层,铁路层用虚线表示。

1.2 电网结构的简化与处理

大庆油田电网经过多年的发展和演变,形成了“网状结构,树状运行”的实际运行现状。因此需根据实际运行情况,对大庆油田电力系统平面图 (如图 2 所示) 和大庆油田电力系统主接线图 (如图 3 所示) 进行简化,将长期备用的线路和变电站去除。经简化形成了大庆油田电网的整体电网平面图,并以供电电源点为核心 (如 220 kV 变电站,电厂),将整个电网划分为 10 个区块,形成了 10 个相互独立的树状结构的子网,如图 4 所示。将形成的 10 个相互独立的树状结构的子网分为 10 个区块,对每个区块进行单独的节点编号,生成拓扑结构数据。



图 2 大庆油田电力系统平面图 (局部)
Fig.2 Plan of Daqing oil-field power system(part)

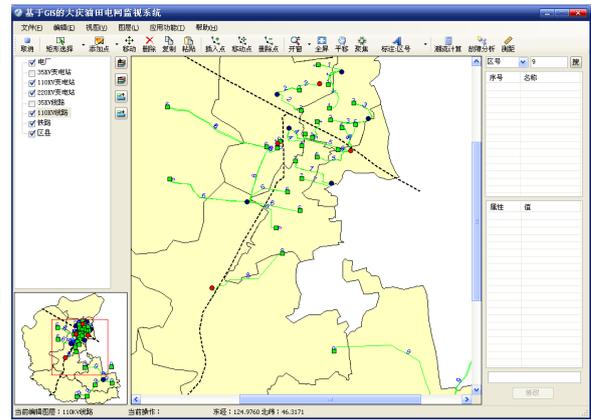


图 4 大庆油田电网分区
Fig.4 Subarea of Daqing oil-field power system (part)

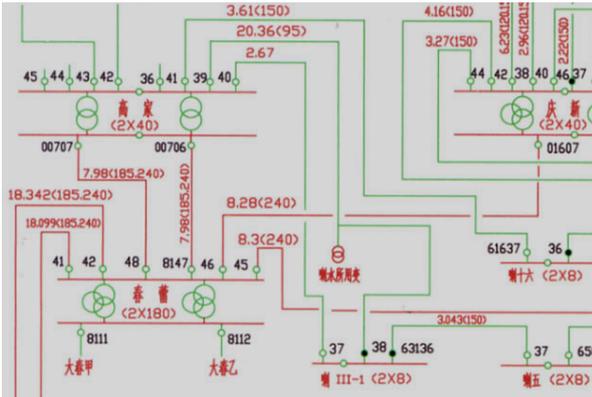


图 3 大庆油田电力系统主接线图 (局部)
Fig.3 Main wiring diagram of daqing oil-field power system (part)

电网的节点类型安排如下：以十个区的电源点为平衡节点，其他节点为 PQ 节点，即春蕾变，庆北变，火炬变，让变，油田热电厂，先锋变，红旗变，新华热电厂，丰乐变，宏伟热电厂为平衡节点，其余变电站为 PQ 节点。

供电公司提供的各变电站所带负荷的情况是 2007~2008 年间全网最大负荷即 2008 年 1 月 15 日 18 点的的数据，摘录部分数据如表 1 所示。

以第 3 区为例，第三区经过基态潮流计算后的节点数据如表 2 所示。其中： V , θ , P_1 , Q_1 , P_g , Q_g 分别代表节点的电压、相角、节点的有功功率，节点的无功功率、发电机的有功功率和无功功率； n 表示当前网络的节点，从 1 到 17 共 17 个节点。只显示部分数据。

1.3 基态潮流的计算

采用 PQ 分解法求解基态潮流。对于大庆油田

表 1 部分变电所负荷情况

Tab.1 Load of part of substation

供电公司管辖变电所负荷情况统计				
变电所名称	计量位置	2008 年 1 月 15 日 18 点整的数据		
		有功功率/kW	无功功率 / kvar	负荷电流 / A
头台一次变电所	110 kV 进线名称			
	源头甲线 01106	16	5	75
	源头乙线 01107	16	5	75
	台肇甲线 01137	11	3	190
	松一线 01140	1	0.5	10
	敖南甲线 01139	1	0.5	5
	敖南乙线 01142	11	0.2	180
	1 号主变 6 (10) kV 开关	8	4	500
2 号主变 6 (10) kV 开关	0	0	0	

表 2 基态潮流节点数据 (部分)

Tab.2 Basal power flow node data(part)

n	名称	V	θ	P_1	Q_1	P_g	Q_g
1	火炬变	110	0			80.477 05	27.381 99
2	风云一次变高压侧	109.551 7	-0.186 54	-0.002 12	-0.001 01		
3	风云一次变低压侧	33.938 6	-3.025 15	0.002 57	0.001 61		
4	星火一次变高压侧	109.154 6	-0.464 06	-0.001 83	-0.000 81		
5	星火一次变低压侧	34.020 22	-3.707 11	6.309 09	4.305 88		
6	北二十变	33.618 58	-3.307 07	5.000 05	3.310 03		
7	北七变	33.894 35	-3.130 46	1.999 68	0.039 8		
8	北 III-2 变	33.672 41	-3.235 32	7.000 07	5.110 04		

基态潮流计算后的支路数据如表 3 所示。其中： P_{ij} ， Q_{ij} 表示支路首端的有功功率、无功功率； P_{ji} ， Q_{ji} 表示支路末端的有功功率、无功功率； n 表示支路数。

潮流计算的界面如图 5 所示。

表 3 基态潮流计算后的支路数据 (部分)

Tab.3 Branch data after computing of basal power load(part)

n	名称	P_{ij}	Q_{ij}	P_{ji}	Q_{ji}
1	火星甲线	-52.865 3	-15.476 3	53.149 52	15.318 37
2	火风甲线	-27.260 6	-12.538 5	27.331 98	12.065 47
3	风云一次变	27.260 14	12.538 54	-27.113 6	-10.878 7
4	风二十线	5.031 12	3.350 25	-4.999 99	-3.31
5	风七线	2.002 65	0.034 31	-2.000 11	-0.04
6	风 III-2 线	7.036 4	5.167 17	-6.999 98	-5.11
7	北十九甲线	2.001 32	0.017 39	-2	-0.04
8	风十线	4.016 08	0.088 52	-4.000 25	-0.08

2 大庆油田电网连锁过负荷故障分析

连锁故障分析流程框图如图 6 所示。

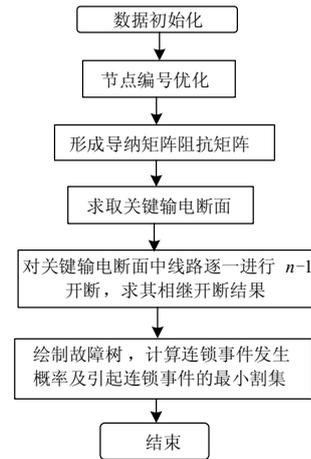


图 6 连锁故障分析流程框图

Fig.6 Cascading failure analysis flow figure

2.1 关键输电断面的求取

求取关键输电断面时, 本文选用输电线路的有功功率容量裕度与开断分布系数相结合方法。具体步骤如下^[14-15]:

- (1) 根据求解有功功率裕度的公式, 列出所有输电线路的有功功率容量裕度, 设定有功功率容量裕度的门槛值, 并且取出有功功率容量裕度最小的线路。
- (2) 计算相对于初始线路的开断分布系数, 设定开断分布系数的门槛值。
- (3) 取出开断分布系数最大的线路, 判断是否大于门槛值; 若是, 转下一步; 若否, 转到 (7)。
- (4) 判断线路是否与初始线路并行。若是, 转下一步; 若否, 转到 (6)。
- (5) 若该线路与初始线路是同电源或者同负

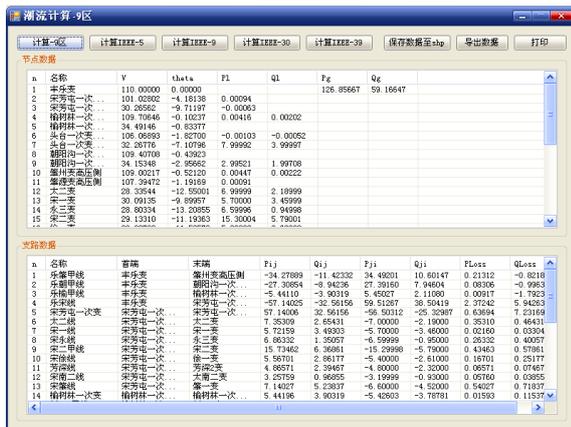


图 5 潮流计算的界面

Fig.5 Surface of computing power load

荷, 可将线路存入并行输电断面。

(6) 取出下一条开断分布系数最大的线路, 转到 (3)。

(7) 取出下一条有功功率容量裕度最小的线路, 判断是否小于阈值, 若是, 转到 (3); 若否, 结束。

其中支路开断分布系数的阈值取为 0.55 (国内外学者普遍认为一般在 0.5~0.6 之间取值)。线路有功功率容量裕度的阈值根据实际情况设定。

根据编写的程序实现关键断面的选取结果以第三区为例, 得到: 第三区: 火星甲线, 北十一线, 风二十线, 风五线, 风 III-2 线, 风七线。

2.2 开断潮流的计算

对于网络元件开断, 一般假定开断前后负荷功率和发电机输出功率不变, 只是网络结构发生了变化, 即要求解下面的潮流方程:

$$f(x, u^{(0)}, D^{(0)}, p^l, A^l) = 0 \quad (1)$$

上角标 l 表示网络发生元件开断后的参数和关联矩阵。

对各个支路的开断潮流与继电保护的整定潮流相对比, 如果大于整定潮流, 则此支路被开断, 重新进行开断计算, 如果所有的支路开断潮流均小于整定值, 则计算结束; 对于继电保护的动作情况, 只考虑其正确动作的情况, 不考虑其误动和拒动情况。判断系统失稳的条件为: ①开断支路引起系统解列, 认为系统失稳, 连锁故障路径搜索终止; ②连锁故障开断深度大于 6, 系统还没有出现失稳, 则连锁故障路径搜索终止; ③潮流算法不收敛, 认为系统出现失稳, 不再继续进行求解。

选取第三区输电断面中的第一条线路进行开断, 按照流程进行潮流计算判断其他线路是否过载, 如果过载, 将此条线路开断, 并且将此线路作为第二条线路继续开断, 随后判断是否还有其他线路过载, 直到判断条件结束为止, 在界面上显示的第三区的连锁故障相继开断结果 (部分) 如图 7 所示。



图 7 第三区的连锁故障相继开断结果 (部分)

Fig.7 Breaking result of cascading failure in the third area

2.3 故障树的建立

由于大庆油田电网故障树的分析结果较多, 在这里不能一一叙述, 因此仍以第三区为例, 根据开断潮流的计算得到的相继开断结果绘制第三区的故障树, 并且求解使得第三区系统失稳这一项事件发生的概率和最小割集, 确定引起顶事件发生的可能的路径。

第三区系统失稳的故障树结果如图 8 所示。

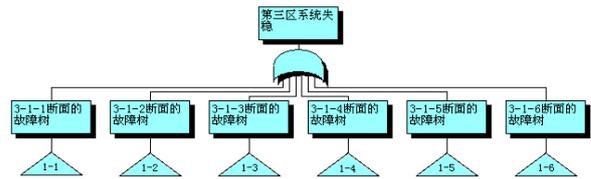


图 8 第三区系统失稳图

Fig.8 Lose stable figure in the third area

由图 8 可知, 系统失稳的总故障树有六个子故障树, 并且这六个子故障树由或门连接, 表示这六个子故障树下面的层层原因的组有可能导致第三区系统失稳这一项事件发生。3-1-1 断面的故障树如图 9 所示。

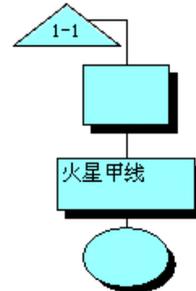


图 9 3-1-1 断面的故障树

Fig.9 Fault tree of 3-1-1 breaking surface

计算顶事件的概率:

$$P = P(x_1) + P(x_3 \cdot x_1 + x_3 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4 \cdot x_1 + x_3 \cdot x_4 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_1 + P(x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_2) + P(x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_{11} \cdot x_1 + x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_{11} \cdot x_2 + x_6 \cdot x_1 + x_6 \cdot x_2 + x_6 \cdot x_7 \cdot x_1 + x_6 \cdot x_7 \cdot x_2 + x_6 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_1) + P(x_6 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_2 + x_6 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_1 + x_6 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_2 + x_8 \cdot x_1 + x_8 \cdot x_2 + x_8 \cdot x_7 \cdot x_1) + P(x_8 \cdot x_7 \cdot x_2 + x_8 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_1 + x_8 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_2 + x_8 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_1 + x_8 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_2) + P(x_9 \cdot x_1 + x_9 \cdot x_2 + x_9 \cdot x_7 \cdot x_1 + x_9 \cdot x_7 \cdot x_2 + x_9 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_1 + x_9 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_2 + x_9 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_1) + P(x_9 \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_2 + x_{10} \cdot x_1 + x_{10} \cdot x_2 + x_{10} \cdot x_7 \cdot x_1 + x_{10} \cdot x_7 \cdot x_2 + x_{10} \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_1) + P(x_{10} \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_2 + x_{10} \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_1 + x_{10} \cdot x_7 \cdot x_3 \cdot x_{12} \cdot x_2) = 0.01444$$

从而得到第三区系统失稳的概率为: 0.014 44 次/年。

引起第三区系统失稳的可能的发生路径为: ① 风七线→火风甲线, ② 风七线→中五线→火风甲线,

③风七线→中五线→北十一线→火风甲线, ④风七线→中五线→北十一线→北十七线→火风甲线, ⑤风七线→火星甲线, ⑥风七线→中五线→火星甲线, ⑦风七线→中五线→北十一线→火星甲线, ⑧风七线→中五线→北十一线→北十七线→火星甲线。

3 程序运行结果

应用连锁故障分析程序对大庆油田实际电网进行了分析, 连锁故障分析界面如图 10 所示。

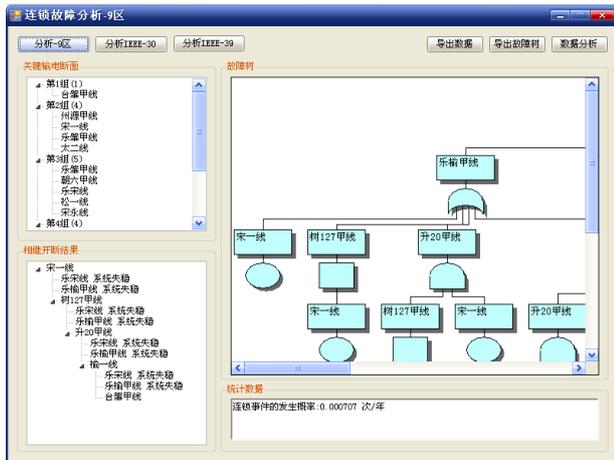


图 10 连锁故障分析界面

Fig.10 Cascading failure analysis surface

4 结论

本文以大庆油田电网为研究对象, 实现了大庆油田电网连锁故障的分析, 可以得到以下结论:

1) 将 GIS 应用于电网监视系统, 把电网信息以及反映地理位置的图形信息结合在一起, 会显著提高供电企业的现代化管理水平。

2) 根据每条线路的有功功率容量裕度以及开断分布系数, 对大庆油田电网可能发生故障的线路进行有效的选择, 形成了关键输电断面, 这种方法能够迅速, 准确地选择出极有可能出现过载的线路。

3) 通过系统运行得到的连锁故障树及连锁故障事件发生的概率和发生连锁故障的最小割集, 为大庆油田电网的实际运行提供了科学的依据。有效提高了大庆油田电网的安全性和可靠性, 具有重大的实用价值。

通过研究与开发, 实现了基于 GIS 的大庆油田电网监视系统, 并通过了验收, 投入了使用。相关部门对系统给予了高度的评价。系统还有可以扩展和完善的地方:

1) 基于大庆油田电网的现状, 目前只针对大庆油田电网的静态数据进行了计算分析, 不能实时动态采集数据进行连锁故障分析。而且数据都为人工

手动录入, 因此可能造成数据的不准确。可以开发数据接口, 实时采集电网数据。

2) 本系统目前运行状态属于单系统独立运行, 可以将系统与已有其他信息系统, 如 SCADA、EMS/DMS 等系统实现完全的融合, 实现在全局范围内最大限度地信息共享、资源共享, 构建真正的电力企业一体化企业应用系统。

参考文献

[1] 鲁宗相. 莫斯科“5·25”大停电的事故调查及简析[J]. 电力设备, 2005, 6(8): 14-17.
 LU Zong-xiang. Survey and analysis of Moscow “5.25” blackout[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(8): 14-17.

[2] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-5.
 GAN De-qiang, HU Jiang-yi, HAN Zhen-xiang. After the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-5.

[3] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7, 16.
 TANG Si-qing, ZHANG Mi, LI Jian-she, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th—causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7, 16.

[4] 胡学浩. 美加联合电网大停电事故的反思和启示. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.
 HU Xue-hao. Rethink and enlightenment of large scope blackout in interconnected north America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.

[5] 印水华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-12.
 YIN Shui-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-12.

[6] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-5.
 TANG Bao-sheng. Blackout in South of London and its lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.

[7] 李铁, 金世军, 鲁顺, 等. 辽宁电网“3·4”事故处理过程及分析[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 38-41, 58.
 LI Tie, JIN Shi-jun, LU Shun, et al. Liaoning power grid “3.4” failure processing and analysis[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 38-41, 58.

- [8] 于才洋, 郭剑波. 我国电力系统停电事故自组织临界性的研究[J]. 电网技术, 2006, 30 (6): 1-5.
YU Cai-yang, GUO Jian-bo. Study on self-organized criticality of power system blackouts in China[J]. Power System Technology, 2006, 30 (6): 1-5.
- [9] 卢锦玲, 陈媛, 朱永利. 基于输电线路过负荷特性的连锁事件识别[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34 (5): 27-31.
LU Jin-ling, CHEN Yuan, ZHU Yong-li. Identification of cascading failures based on overload character of transmission lines[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34 (5): 27-31.
- [10] 袁陶颖. 基于 MapXtreme 的 Web GPS 系统的设计与实现[J]. 计算机应用研究, 2004, 21 (5): 14-21.
YUAN Tao-ying. Implementation of MapXtreme-based web GPS system[J]. Application Research of Computers, 2004, 21 (5): 14-21.
- [11] 倪建立, 孟令奎, 王宇川, 等. 电力地理信息系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
NI Jian-li, MENG Ling-kui, WANG Yu-chuan, et al. Geographical information system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [12] 戴士毅. 大庆油田电网可靠性管理系统的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
DAI Shi-yi. The research and application of reliability management system in Daqing oil field power network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [13] 孙彦彬. 配电网地理信息系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
SUN Yan-bin. Distribution geographic information system[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2002.
- [14] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (12): 1-5.
ZHOU De-cai, ZHANG Bao-hui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (12): 1-5.
- [15] 李响, 郭志忠. N-1 静态安全潮流约束下的输电断面有功潮流控制[J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 29-32.
LI Xiang, GUO Zhi-zhong. Power flow at cross-section of transmission line and its control under N-1 static state secure power flow restraint[J]. Power System Technology, 2005, 29 (3): 29-32.

收稿日期: 2009-11-15; 修回日期: 2010-03-31

作者简介:

闫丽梅 (1971-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: yanlimei@yahoo.cn

(上接第 48 页 continued from page 48)

- [6] 吴卿艳. 激励相容的金融监管机制初探[J]. 北方经济, 2005, 10: 66-67.
WU Qing-yang. Compatible-incentive tedious financial regulation mechanism of primary study[J]. Northern Economy, 2005, 10: 66-67.
- [7] 张青. 激励相容机制下的个人所得税设计[J]. 税务研究, 2005, 6: 45-48.
ZHANG Qing. Incentive compatibility mechanism below insculptate personal income tax design[J]. Taxation Study, 2005, 6: 45-48.
- [8] Li C, Svobod A, Guan X. Revenue adequate bidding strategies in competitive electricity markets[J]. IEEE Trans on PW S, 1999, 14: 492-497.
- [9] Bunn D W. Forecasting loads and prices in competitive power markets[J]. Proceedings of IEEE, 2000, 88 (2): 163-169.
- [10] 李灿, 龚乐年, 宋燕敏. Power Pool 中发电公司的竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (6): 12-15.
LI Chang, GONG Le-nian, SHONG Yan-min. Power pool medium power generation company of unexpectedly price strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (6): 12-15.
- [11] 葛朝强, 李扬, 唐国庆, 等. 基于风险的火电厂报价策略评估[J]. 电网技术, 2003, 27 (11): 48-51.
GE Zhao-qiang, LI Yang, TANG Guo-qing, et al. Risk based assessment for strategies in thermal power plant bidding[J]. Power System Technology, 2003, 27 (11): 48-51.

收稿日期: 2009-11-30; 修回日期: 2010-01-26

作者简介:

林济铿 (1967-), 男, 博士, 研究方向为电力系统定性分析及控制, 人工智能在电力系统中的应用; E-mail: mejklin@126.com

王旭东 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电, 配网自动化;

包铁 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场中的发电竞价理论及电厂报价策略。