

地区电网图形化综合故障分析与继电保护测试软件研究

李 渊¹, 蔡泽祥¹, 曾伟东¹, 李清波², 房若季²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 汕头供电局, 广东 汕头 515041)

摘要: 从现代地区电网的特点和需求出发, 研究了图形化综合故障分析与继电保护测试软件的开发。软件依靠面向对象技术, 采用图形数据一体化建模, 具备了计及线路互感的多重复杂故障计算等功能, 并在网络环境下进行数据共享。同时, 将故障分析结果通过接口程序与继电保护测试仪相连, 并接上实际的保护装置, 实现了基于综合故障分析的继电保护动作测试。该软件已经投入实际使用。

关键词: 故障分析; 继电保护测试; 图形; 地区电网

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0046-04

0 引言

继电保护作为一种有效的反事故自动装置, 是电网安全运行的重要保障。继电保护装置的定检测试是保证其运行可靠性的必要手段^[1], 也是一项重要的基础工作。目前, 这种测试多基于简单模型和定值, 属于元件层面上的离线测试, 然而继电保护的实际行动情况与所在电网的实际运行方式和故障条件密切相关。为此, 需通过故障分析软件仿真计算实际电网在各种运行工况(包括极端工况)下所发生的各种故障, 用以充分考验继电保护装置动作特性和效果。

目前, 在我国地区电网应用的故障分析软件一般可分为 2 种: 一种是作为继电保护整定软件的一个模块与之绑定一体; 另一种是通用商业软件, 如我国的 PSASP、美国的 BPA 等。随着地区电网建设规模的不断扩大和复杂程度的日益提高, 以上 2 种故障分析软件都存在明显的不足。就前者而言, 整定计算只是继电保护运行管理的一部分工作, 通常由调度部门的少数几个人参与; 而承担继电保护装置定检工作的大量输变电运行人员缺乏有效的面向设备的故障分析工具。而且, 面向整定计算的故障分析一般只针对母线简单故障, 运行方式多为常规大(小)方式, 其功能存在很大的局限性。后者, 商业化故障分析软件一般是面向高压电网的特点和需求开发的, 通常缺乏友好的人机交互界面, 电网的拓扑连接关系不够明朗, 在计算时数据输入的工作量较大, 流程复杂。

文献[2]详细讨论了面向对象技术在电力系统计算中的应用方法, 文献[3]又在故障分析软件中构建了图形化界面, 文献[4]则从实用化的角度论述了

故障计算软件的开发。本文在此基础上, 以关系型数据库为支持, 基于电气主接线图的可视化环境, 实现了计及线路互感的简单故障和多重复杂故障的综合分析计算。同时, 将故障计算结果拟合为暂态时域曲线, 通过继电保护测试仪输出为模拟量数据, 并与实际继电保护装置相连接, 实现了基于实际电网故障分析的继电保护动作测试。本软件为地区电网故障分析、继电保护方案校核、事故再现、继电保护装置动作定检测试提供了一个综合平台。

1 软件总体架构设计

1.1 地区电网的基本特点

我国的地区电网主要由 110 kV 以下电压等级的若干电网组成, 出于安全稳定性的考虑, 它们普遍要求以开环方式运行, 形成以 220 kV 变电站为核心的片网结构。这种片网主要由辐射型线路组成, 其中存在短线群、T 接线和地方小电源, 运行方式也与高压环网有所不同。地区电网的建设规模和复杂程度使得故障分析和继电保护测试工作具有多样性和特殊性, 同时其作为软件又应突出实用性和通用性。基于以上考虑, 软件的总体架构设计如图 1 所示。

1.2 图形数据一体化

本软件基于关系型数据管理系统(RDBMS), 采用图形数据一体化建模。以地区电网中各片网的电气主接线图作为操作主界面(图形绘制/编辑平台), 使所有与故障分析相关的工作都基于图形主界面完成; 通过电气元件的基本图形引导进入元件参数查询与编辑、故障设置与分析计算、继电保护信息检索与动作定检测试等模块。

同时, 根据地区电网运行管理的需求, 构建了与图形主界面对应的数据管理模块。对于绘制或编辑

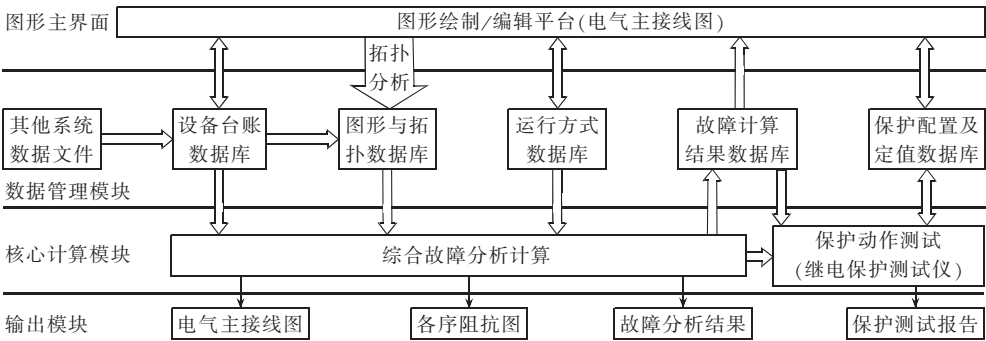


图 1 软件基本结构示意图

Fig.1 Block diagram of basic software structure

好的每一张片网图,都采用长二进制的格式存储到图形数据库中,经拓扑分析得到的元件间连接关系情况则存入拓扑数据库中。同时,元件的基本参数也以分类的形式存储到设备台账数据库中,并与片网图严格关联。考虑到继电保护装置动作测试的需求,数据管理模块中专门构建了保护配置及定值数据库。以上所有数据信息都显示于图形主界面,提供查询和编辑的操作,实现了数据的可视化管理和维护。

1.3 基于故障分析的继电保护动作测试

在故障分析之前,首先从运行方式数据库中调出片网的当前运行方式,在此基础上进行拓扑分析。在图形环境下进行故障描述之后,进入程序的核心部分即综合故障分析计算模块,针对不同需求进行各种类型的故障计算。故障计算结果在软件中通过表格控件分类显示并可报表打印输出,供有关人员进行综合分析。同时,将计算结果数据经接口程序进行格式转化后,再与继电保护测试仪相连,并接上实际的保护装置。通过设置相应的测试条件并启动测试项目,从而实现基于故障分析计算的继电保护动作测试和电网继电保护运行的闭环管理。

1.4 网络环境下的数据共享

实际电网的电气主接线图、元件参数和运行方式等数据信息存入相应数据库后,通过配置网络数据库服务器(如 SQL Server),基于客户端/服务器(C/S)方式,在网络环境下可进行数据共享。在设置权限后,服务器上的公共数据由管理员进行专门维护。用户则通过数据传输程序,在客户端下载有用的数据信息,并生成本机的 Access 数据库用于软件运行,提高了计算速度。这样的做法也避免了不同应用对公共数据重复进行各自的数据建模,保证了各用户的协调一致,有利于管理和维护。

2 电气主接线图绘制与编辑平台

2.1 基本元件的面向对象建模

本文针对地区电网拓扑结构的基本特点,采用面向对象的方法建立尽可能切合实际的元件模型。在图形环境下,将常用电气元件抽象成基本图元,并将其基本形状固定下来,集成为专用绘图工具条,用户只需点击其中的相应图标即可轻松实现对该元件

的绘制和编辑。这种操作类似 AutoCAD 环境下的绘图,可以自由实现缩放和定位,较大程度地减少了错误几率。在已绘制好的元件上输入相应的基本参数,便实现了元件图形与数据的绑定。

2.2 元件连接关系的智能判断

元件连接关系的情况决定着拓扑分析的正确性。本文采用对元件图形的端节点进行坐标定位的方法,在电气主接线图上实现了元件间连接关系的智能判断。用户可以拖动元件的某一端子,当其与另一元件相应端子在电气主接线图中的距离小于某一限值时,两者即自动吸合,实现了在几何上的相互连接。此外,还可进行全网的元件连接性综合判断,并通过端节点的颜色加以区分。这样的做法既方便了绘图,又适于从总体上查找并纠正错误,确保了片网图拓扑结构的正确性。

3 电网运行方式设置和拓扑分析

3.1 地区电网运行方式设置

本文基于地区电网实际运行场景,提供了 2 级运行方式的设置环节。一级运行方式是普通意义下的电网运行状况,如正常或检修等;二级运行方式则是电网中各电气元件运行状态的集合,其典型表现为发电机或系统电源的等值阻抗不同,变压器中性点的接地情况不同以及断路器的开合情况不同等,通常在总体上表征为大/小方式。在软件实现中,运行方式的设置在电气主接线图中具体到各元件的图形上,通过用户对元件运行状态的选择从而确定元件在逻辑意义上的连接情况。

3.2 基于节点支路模型的拓扑分析

在电气主接线图绘制和运行方式设置进行完毕后,需要自动生成电网络拓扑。本文根据地区电网运行设备的特点,采用基于节点支路模型的拓扑分析方法。按照端节点的数目将常用电气元件划分为单端设备、双端设备和三端设备,将它们抽象为由对应的阻抗支路构成的等值模型。在此基础上经拓扑分析即可方便实现三序网的自动生成和节点导纳矩阵的建立。

在程序开发中,首先针对电气主接线图中元件端节点物理连接特性采用布尔变量加以标识,再基

于指针数组构造节点支路邻接表,并考虑元件间逻辑连接的因素,通过逐层搜索形成全网综合的拓扑数据信息并应用于计算^[5]。在图形环境下,需要将可视的电气主接线图同抽象的拓扑数据信息关联起来。可采用的方法有从图形到拓扑的正向关联和从拓扑到图形的反向关联。后者较适用于大规模的高压电网,因其电气连接关系极其复杂,图形的绘制和存储都较为困难,而拓扑数据相对易于管理。针对地区电网规模相对较小、结构变更相对较多的特点,本文采用从图形到拓扑的正向关联使得电气接线图绘制方便,而且易于维护。

4 基于图形环境的故障分析

4.1 故障分析功能的实用性特点

本软件以地区电网的特点和需求为编制原则,在故障分析的功能方面,有下面一些实用性特点。

a. 在面向整定计算和定值校核的需求时,按照用户设置的 2 级运行方式,对全网所有母线各类简单故障进行统一批量计算;针对输变电工作人员的实际需求,可进行由线路任意点故障组成的多重复杂故障计算。

b. 在复杂故障的处理上能进行各类故障的任意组合。考虑到继电保护装置的相继动作,能处理同一线路中间短路且一侧开关非全相跳闸的特殊情形。

c. 能计及负荷电流和过渡电阻的影响,可处理 T 接线和相邻片网归算电源。

d. 考虑双回平行同杆并架线路互感影响,可进行故障发生在互感线路上的简单或复杂故障计算。

e. 在输出模式方面,通过表格控件输出故障点和保护安装处的电气量(各序/相电压、电流和归算阻抗的标么/有名值),可切换显示并能根据具体需求有选择地报表打印输出。

4.2 复杂故障的简明计算

故障计算在数学上可归结为对故障状态下网络方程的求解。本文根据节点导纳矩阵的对称性和稀疏性,选取导纳型网络方程 $YU=I$,基于面向对象的稀疏矩阵模型^[6]。同时,根据多口网络理论 and 对称分量法^[7],采用了端口矩阵的改进方法,在通用的端口矩阵基础上,结合故障的边界条件,形成一个故障端口综合阻抗矩阵求解复杂故障。

当电网中发生 n 重故障时,首先依据多口网络理论列出 $3n$ 个阻抗型参数方程。然后,根据故障边界条件,引入理想变压器变比,并考虑过渡电阻的因素,再列出 $3n$ 个方程以满足求解需求。写成矩阵相乘的形式 $AX=b$,其中矩阵 A 中包含了端口阻抗参数和故障边界条件的信息,本文中称之为综合阻抗矩阵。故障端口综合阻抗矩阵可以归纳各种串联型或并联型故障的边界条件,使得多重复杂故障的计算浓缩为一个简便的公式。根据各故障端口间的阻抗参数,利用叠加定理就可以计算出网络中在故障端口外任意位置处的节点电压和支路电流的幅值和相位

信息,为继电保护装置的動作测试提供必要的数据。

4.3 线路互感的处理

地区电网中双回平行同杆线路的陆续架设,使得在中性点接地的 110 kV 系统中线路互感对于故障计算的结果影响较大,在零序过流保护的整定上体现得更为突出。本文对互感的处理既包括故障发生在非互感线路上的情形,又涵盖了互感线路上发生多重故障的情形(以图 2 为例),扩展了 PSASP 等程序处理线路互感的能力。

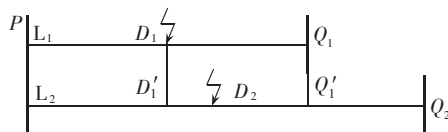


图 2 互感线路发生多重故障示意图

Fig.2 Multiple faults occurring on lines with mutual-inductance

在互感线路(L_1 、 L_2)发生故障情况下,首先需要对参数进行分解,包括线路自身零序阻抗参数和线路间互感参数的分解 2 部分^[8]。对于线路自身的零序阻抗,本文根据故障点位置按比例分解到故障新增的节点两侧的线路上;而对于线路间互感参数,则按占零序互感区域的投影长度进行比例分配。分析简单故障时,根据需要增加节点和支路,按照上述办法可一次形成计及互感的支路阻抗矩阵;分析多重复杂故障时,则对各故障进行编号,基于简单故障的原理逐重进行处理:首先针对 D_1 点的第 1 重故障形成支路阻抗矩阵,然后在此基础上针对 D_2 点的第 2 重故障对支路阻抗矩阵进行修正,以此类推。此后,通过因子表的形成和回代计算逆阵的方法,把互感支路阻抗矩阵变换成互感节点导纳矩阵。然后,根据互感线路对零序节点导纳矩阵的影响,在片网对应的未考虑零序互感线路的零序导纳阵上予以追加,从而体现出互感的影响。

5 故障分析与继电保护测试仪接口

5.1 测试系统结构设计

继电保护测试系统一般采用上位机和下位机相结合的运作方式:上层由 PC 机进行控制和管理,通过串口或 USB 口与下层的继电保护测试仪通信,传达控制命令和数据文件,并接收测试仪的反馈信息。下层由测试仪内部的 DSP 进行高速的数字信号处理,向保护装置输出模拟电力系统的电压、电流和开关量,同时监视保护装置的动作状态,从而实现继电保护测试仪相应的动作测试功能^[9]。

本文基于地区电网实际运行工况和故障条件,通过故障分析软件形成对应的仿真故障数据,再经过开发的接口程序可以利用继电保护测试仪考验保护装置在实际运行过程中的动作效果,以评价继电保护对各种实际运行工况和故障条件的适应性。测试结果存储到数据库,通过读取继电保护测试仪 I/O 输入的保护装置动作输出文件,自动批量地生成测试报

告。通过与生产管理信息系统(MIS)接口,可供相关部门直接查询和分析,从而实现了继电保护定检工作的自动化和闭环管理。测试系统的运行原理如图 3 所示。

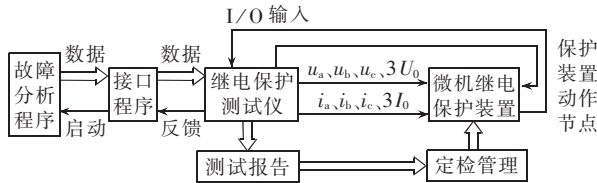


图 3 测试系统运行示意图

Fig.3 Block diagram of test system

5.2 接口程序开发和应用

COMTRADE(Common Format for Transient Data Exchange)是 IEEE 标准电力系统暂态数据转化通用格式,便于各种设备故障波形数据格式的互相交换,以进行统一的分析。继电保护测试仪在读取到 COMTRADE 格式的数据后,可以向保护装置输出模拟的电压、电流信号。

本文利用 Visual C++ 语言和动态链接库技术开发可视化的接口程序,在 PC 机上运行并进行控制操作。它一方面通过数据访问对象(DAO)与故障分析程序关联,并在界面上显示或编辑与试验相关的控制参数;另一方面通过串口线或 USB 线向继电保护测试仪传送数据信号,并在界面上显示试验效果。具体方法为:首先,将电网故障分析计算所得结果数据按自定义的格式存储到数据库中,然后利用接口程序将其从数据库中导入,再将控制参数转换为数字信号输送给继电保护测试仪。此外,接口程序还可直接提取实际电网运行中的故障录波数据,用于故障再现和事故分析。

5.3 继电保护装置动作测试的实现

接口程序通过与保护配置及定值数据库的交互,可检索待测保护装置的相关信息。与故障分析程序的图形环境对应,在此通过逐级数据检索的方式实现,即由所在片网图、所在母线、所在线路的顺序定位保护装置并读取其相关信息。根据保护型号从数据库自动读出该型号所装设的保护类型,或通过手工定制。然后,依靠数据库的关联特性调出属于该保护类型下的子测试项目,如接地 I 段保护类型下的 A 相接地故障测试。

基于保护类型和故障条件建立测试项目后,可启动故障分析程序计算该项目下通过继电保护测试仪需要输出的电压、电流一次值,包括流经保护装置的三相电压值($u_a, u_b, u_c, 3U_0$)和保护装置安装处的三相电流值($i_a, i_b, i_c, 3I_0$)。通过 TA 或 TV 变比换算后,在接口程序界面中显示出二次值并可调整其幅值和相角。此后即可启动继电保护测试仪对与其相连接的实际继电保护装置进行动作测试。试验过程中动态显示当前测试的试验条件和动作结果,一旦发现错误可以及时调整,从而保证了测试效果。随后即可自定义输出测试报告,进入相关管理流程。

6 结语

本文详细介绍了地区电网图形化综合故障分析与继电保护测试软件的具体实现过程。它克服了继电保护装置动作定检测试脱离电网实际运行工况和故障条件的缺点,实现了基于实际电网故障分析的继电保护装置动作测试。软件面向不同需求提供了各种故障的分析计算,提高了故障分析软件的计算能力和实用性。今后,还可在故障暂态过程仿真方面进行进一步探索。本文讨论的地区电网图形化综合故障分析与继电保护测试软件已应用于汕头供电局。

参考文献:

- [1] 曾克娥. 电力系统继电保护装置运行可靠性指标探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 83-85.
ZENG Ke-e. Research on operation situation and reliability indices of protective relays in power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 83-85.
- [2] 范文涛, 薛禹胜, 慕志恒. 面向对象技术及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 72-76.
FAN Wen-tao, XUE Yu-sheng, MU Zhi-heng. Object-oriented technology and its applications in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(12): 72-76.
- [3] 韩肖清, 靳力. 图形化故障计算软件的开发[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 70-71.
HAN Xiao-qing, JIN Li. The development of graphical fault analysis software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 70-71.
- [4] 石东源, 李银红, 段献忠. 电力系统故障计算软件实用化研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(11): 44-47.
SHI Dong-yuan, LI Yin-hong, DUAN Xian-zhong. Research on practicability of power system fault calculation software[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(11): 44-47.
- [5] 陈星莺, 孙恕坚, 钱锋. 一种基于追踪技术的快速网络拓扑分析方法[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 22-25.
CHEN Xing-ying, SUN Shu-jian, QIAN Feng. A fast power system network topology based on tracking technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 22-25.
- [6] 朱浩骏, 蔡泽祥, 侯汝锋. 基于 CIM 的稀疏矩阵模型设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 50-54.
ZHU Hao-jun, CAI Ze-xiang, HOU Ru-feng. Design of a CIM-based sparse matrix model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 50-54.
- [7] 曹国臣, 祝滨, 蒋建东. 虚拟故障端口法及其在电网故障计算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 42-48.
CAO Guo-chen, ZHU Bin, JIANG Jian-dong. Fictitious fault port method and its application to fault calculation in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 42-48.
- [8] 石东源, 李银红, 段献忠, 等. 电力系统故障计算中互感线路的处理[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 58-61.
SHI Dong-yuan, LI Yin-hong, DUAN Xian-zhong, et al. Treatment of lines with mutual inductance in power system fault calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 58-61.
- [9] 郝文斌, 李群湛, 郑勇康, 等. 基于嵌入式 PC 104 的微机继电保护测试装置设计[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 65-68.
HAO Wen-bin, LI Qun-zhan, ZHENG Yong-kang, et al. Design of microcomputer protective relaying tester based on embedded PC 104 measuring-control platform[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 65-68.

(责任编辑: 李 玲)

(下转第 52 页 continued on page 52)

为电力系统保护、控制与自动化(E-mail:ely1982@21cn.com);
蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,
研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制;
曾伟东(1980-),男,广东河源人,硕士研究生,研究方向
为电力系统保护、控制与自动化。

作者简介:

李 渊(1982-),男,四川达州人,硕士研究生,研究方向

Research on software for graphic integrated fault analysis
and relay protection test for district power grid

LI Yuan¹,CAI Ze-xiang¹,ZENG Wei-dong¹,LI Qing-bo²,FANG Ruo-ji²

(1. South China University of Technology,Guangzhou 510640,China;

2. Shantou Electric Power Supply Bureau,Shantou 515041,China)

Abstract: According to features and requirements of modern district power grid, the development of software for graphic integrated fault analysis and relay protection test is researched. Based on object-oriented technology and integrative modeling of graph and data,the software has the function of complicated multi-fault calculation,considering mutual-inductance of lines,and realizes data sharing under network environment. Fault analysis results are sent to relay protection test device via interface program. The actual relay protection is connected with the test device and tested according to the integrated fault analysis results. The software has been put into operation.

Key words: fault analysis; relay protection test; graph; district power grid