

大型电力系统故障节点的三维GIS快速定位系统设计

大型电力系统发生故障时能够迅速准确地对故障节点进行定位并隔离故障区段,是电力系统自动化最重要的功能之一。传统的GIS故障节点定位方法,对于无远动信息并容易受到过渡电阻影响的大型电力系统的故障节点无法进行快速定位。提出一种基于三维GIS并结合全球定位系统(GPS)的电力系统故障节点定位方法,引入电力系统关键设备的简化结构和数学模型,运用一种能够反映大型电力系统分层拓扑结构的矩阵,对故障节点位置进行运算,并设计了基于GIS平台的故障诊断模块。选择EMTP软件进行数值仿真表明,该定位系统完全克服了过渡电阻的影响,而且能够保证定位准确度,不会受到故障发生的时间、地点和类型等客观因素和系统运行要求的干扰,在各种故障情况下定位误差均小于1%。

毛迎丹/浙江水利水电学院测绘与市政工程学院



毛迎丹/讲师

关键词/Keywords

三维GIS·
全球定位系统·
分层拓扑结构·

大型电力系统故障节点定位不仅是故障有效处理的关键,也是电力系统安全工作的基础^[1],其对保障电力系统的供电可靠性和增强供电质量具有重要意义。大型电力系统的故障节点定位问题一直以来都是电力工程界人士高度关注的焦点,但是由于一些电力工程技术手段的落后,一直也没有找到一种准确度高、实用性强的定位装置^[2]。随着近年来电力技术的不断进步创新,已经成功地将GIS系统应用到了电力系统中,使得一种新的定位方法双端同步采样故障定位法得以实现^[3]。通过将地理信息系统GIS技术和现代通信技术运用到大型电力系统故障诊断中,塑造对应的空间拓扑结构以及数学模型,准确定位具体开关设备的故障信息^[4]。

参考文献[5]中所提到的电力系统故

障定位方法,因为开关控制状态和线路关系没有量化,无法用相关数学模型做支持来解决问题,因此在电力系统结构发生变化时对故障节点定位效率不高,缺少直观形象的结构描述。参考文献[6]中提到的方法通过求解电压和电流平衡方程式来对故障点进行定位,但由于受到故障节点距离因素的影响,实用性不是很高。在大型电力系统发生故障时,由于故障点的定位与输电线路两端测量点的电压、电流量有关,而由于受到测距方法的影响只能测量到系统一侧的电压值。因此,有些数据要通过经验假设而定,从而影响了大型电力系统故障节点的定位准确度。

提出一种基于三维GIS的电力系统故障节点定位方法,引入电力系统关键设备的简化结构和数学模型,运用一种能够反映大型电力系统分层拓扑结构的矩阵进行运算,设计了基于GIS平台的故障诊断模块。在GIS平台的线路拓扑结构的基础上,通过引入GPS通信方式使故障点定位更准确直观。

大型电力系统故障节点定位原理

随着大型电力系统中三维GIS的逐渐发展及普遍应用,保障了双端法定位中准确度要求,线路上某位置 x 处的电压与电流的瞬时值可通过偏微分方程计算得出

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -ri(x,t) - l \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -gv(x,t) - c \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中, r 、 l 、 g 和 c 分别代表单位长度输电线路的电阻、电感、电导和电容。

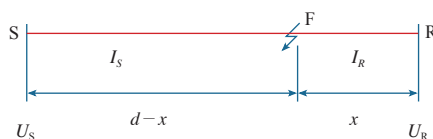


图1 电力系统故障节点线路示意图

因此, 利用给出的输电线上某点的电压值及电流值, 利用式(2)即可获取线路中其他点的电压值和电流值。图1为故障线路图, 点S与R分别为线路的两端标记点, 输电线路全长是 d 。假设与R端之间的距离为 x 处的F点出现故障。分析: 由图1可以看出, 输电线此时被分成了S至F、R至F两段。SF段内的任意一点的电压值和电流值等于S点的电压、电流值。同理, RF段内的电压值和电流值等于R点的电压值和电流值。可能的故障点F是唯一的, 计算方法如下

$$u_F = f^u(u_R, i_R, x) \quad (3)$$

$$u_F = f^u(u_S, i_S, d-x) \quad (4)$$

式中, 电力系统输电线路的参数和长度都是已知的。

由于电压具有连续性, 式(3)和式(4)可以合并为

$$f^u(u_R, i_R, x) = f^u(u_S, i_S, d-x) \quad (5)$$

可见, 式(5)即为包含故障点位置 x 的电压平衡方程式。

为了简化问题, 考虑到大型电力系统中的输电线路较短, 因此电容和电导对计算的影响可忽略不计, 电阻和电感串接即可表示线路。则可获取和式(5)等价的电压平衡方程式

$$U_S - U_R = U_{SF} - U_{RF} \quad (6)$$

对三相线路, 可得到包含故障距离 x 的方程

$$u_{mS} - u_{mR} = (d-x) \sum_{p=a,b,c} (r_{mp} i_{pS} + l_{mp} \frac{di_{pS}}{dt}) - x \sum_{p=a,b,c} (r_{mp} i_{pR} + l_{mp} \frac{di_{pR}}{dt}) \quad (7)$$

$$m = a, b, c$$

式中, r_{aa} 、 r_{bb} 、 r_{cc} 、 l_{aa} 、 l_{bb} 和 l_{cc} 为大型电力系统中单位长度线路的自电阻和自电感; r_{ab} 、 r_{ac} 、 r_{bc} 、

l_{ab} 、 l_{ac} 和 l_{bc} 为大型电力系统中单位长度输电线路的互电阻和互电感值。

对上式进行离散化处理后可得

$$A_m(k) + xB_m(k) = 0 \quad (8)$$

其中

$$A_m(k) = u_{mS}(k) - u_{mR}(k) -$$

$$d \sum_{p=a,b,c} [(r_{mp} + \frac{l_{mp}}{\Delta t} i_{pS}(k) + \frac{l_{mp}}{\Delta t} i_{pS}(k-1)] \quad (9)$$

$$B_m(k) = \sum_{p=a,b,c} \left\{ (r_{mp} + \frac{l_{mp}}{\Delta t}) [i_{pR}(k) + i_{pS}(k)] - \frac{l_{mp}}{\Delta t} [i_{pR}(k-1) + i_{pS}(k-1)] \right\} \quad (10)$$

式中, $u_{mS}(k)$ 和 $u_{mR}(k)$ 为大型电力系统输电线路端S和端R在时刻 $t = k\Delta t$ ($k = 1, 2, \dots, N$)的相电压采样瞬时值; $i_{mS}(k)$ 和 $i_{mR}(k)$ 为电流采样瞬时值; Δt 为采样步长; N 为总采样点数。

由此可以得出, 每采样一次通过式(8)就可以计算出一个相对应的 x 值, 大型电力系统故障发生点位置可以由如下方程计算

$$x = - \frac{\sum_{m=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_m(k) B_m(k)}{\sum_{m=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_m^2(k)} \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 该故障点定位计只受输电线路参数、线路两侧的电压值和电流值的影响, 不受过渡电阻的影响。

基于三维GIS的大型电力系统故障节点快速定位系统设计

1. 大型电力系统故障节点定位流程

以GIS平台为基础的大型电力管理系统提供了实际输电线路的拓扑结构, 运用点、线和面间的关系表达电力系统中各个节点之间的逻辑关联。如果线路开关通断状态发生变化时, 监测终端设备会第一时间通过GPS的方式传递变化情况。GIS平台在拓扑关系中利用诊断算法获取的电力系统中发生事故的详细位置, 系统将自动生成故障处理操作说明, 让工作人员根据操作说明及时

对故障点进行处理。程序流程图如图2所示。

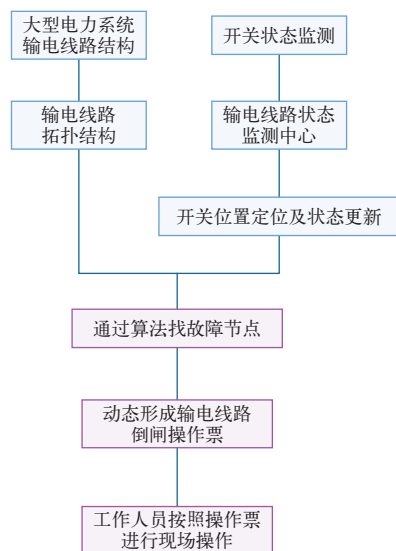


图2 大型电力系统故障诊断GIS算法操作流程图中

2. 大型电力系统拓扑结构分析

大型电力系统中的各个节点具有网状结构特征，实际电网从简化角度考虑，可以用点和线构成的结构对GIS平台中的特征进行描述^[8]，同时通过结构图模型对其计算机处理过程进行体现，简化后的拓扑结构如图3所示。

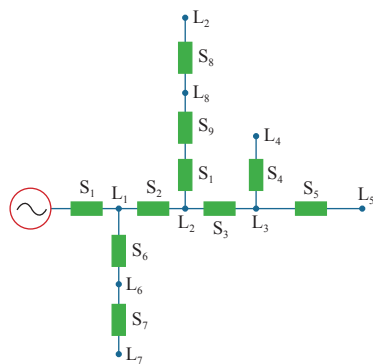


图3 大型电力系统输电线路网简化后的拓扑结构图

图3中，S表示电力系统中的线路开关，L表示负荷点，即电力系统中的变压器。

3. 大型电力系统各节点开关运行状态的矩阵描述

用向量S可以描述大型电力系统中的各个开关状态，设 $S=[S_1, S_2, \dots, S_n]^T$ ，其中 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 为各开关的状态，如果 S_1 为闭合状态，则 $S_1=1$ ，否则 $S_1=0$ ；如 $S=[1, 1, 0, \dots, 0]^T$ 说明 S_1, S_2 为闭合状

态， $S_3, \dots, S_n$ 为断开状态。

设电力系统中一分支结构的开关状态 $S=[S_1, S_2, \dots, S_n]^T$ ，则

$$\text{diag}(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & S_n \end{pmatrix}$$

设电力系统中各节点开关间关联关系矩阵为D，则故障信息矩阵P'可由如下公式求出

$$P' = D \times \text{diag}(S) \quad (12)$$

式中， $\text{diag}(S)$ 代表把 $1 \times n$ 的开关状态矩阵转化后的对角矩阵。

4. 基于三维GIS的大型电力系统故障节点定位算法

本段通过对实际应用中的GIS平台下大型电力系统拓扑结构数学模型的分析，依据开关状态，完成系统中故障节点的定位。具体过程为：

1) 依据系统在GIS平台下的电网结构图绘制出与之相应的简图，图4为单分支线的拓扑结构图。

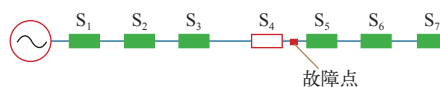


图4 电力系统单分支线路拓扑结构图

- 2) 依据简化图对相应的关系矩阵进行确定。
- 3) 计算出故障节点所在的位置信息。

GIS系统在大型输电系统中往往由很多的线路组成，并且各条支线中负荷开关数量很多。各负荷开关所对应的拓扑结构数学模型矩阵为

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

通过运用拓扑结构分析与电力系统故障信息向量的定义可知，当顶点i有电流通过时，则 $g[i]=1$ ，反之 $g[i]=0$ 。

可知大型电力系统故障节点信息矩阵为

$$P' = D \times \text{diag}(G) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

对 P' 和其转置矩阵进行“异或”运算得到

$$P = P' \oplus (P')^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

由矩阵 P 可以看出故障节点位置：当 P 中的元素取值为“1”时，它的行数和列数就代表了故障区域两端的开关节点位置。

5. GIS平台下大型电力系统故障定位模块设计

在GIS平台下引入故障定位模型和核心算法，对相应模块进行定位，从而解决GIS平台下电力系统的开关定位问题，详细流程如图5所示。

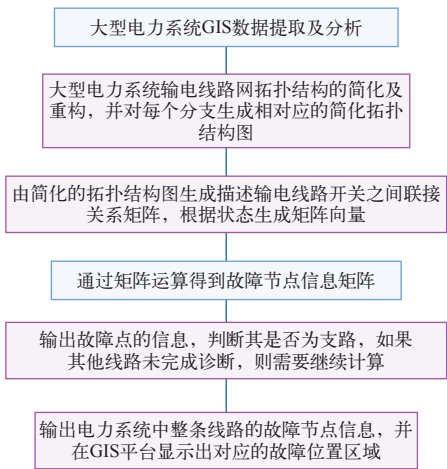


图5 大型电力系统故障诊断GIS模块设计流程

当故障位置确定之后，故障信息系统可通过模型计算得出动态的故障处理操作说明，电力工作人员再根据操作说明在现场完成相应的故障处理工作，从而实现了大型电力系统故障节点的快速定位。

实验及结果分析

为了证实算法的准确性，用EMTP（Electro Magnetic Transient Program）软件进行了数值仿真。

实验中，系统输电线路用若干段电感线圈模拟，线路一侧为1台20 kV·A的发电机，另一侧为40 kV·A的无穷大系统。为了测试不同的故障位置，实验模拟电力系统输电线路长100 km，实测的模拟线路参数为：正序阻抗 $Z_1 = 3.57 + j37.5$ ；零序阻抗 $Z_0 = 6.45 + j78.7$ 。

对系统中可能存在的3个干扰参数进行检测，还要考虑到系统故障发生时和故障发生前的系统运行状态的随机性。

检测时所采用频率为 $f = 3.6$ kHz（即每周期采样点数 $N = 64$ ），依据电力系统发生故障后3个周期内的数据长度求出数据窗。

实验结果如表1所示。

表1 大型电力系统故障类型和位置定位

故障节点设定位置	$p = 30$ km	$p = 60$ km	$p = 90$ km
A相接地/km	19.8	38.7	78.6
B、C两相接地/km	19.7	39.4	79.3
B、C两相接地/km	18.9	40	79.5
A、B和C三相接地/km	19.4	39.6	79.9

由表1可以看出，故障类型和故障节点位置对本文中电力系统故障节点定位算法结果影响。

测试电力系统中的接地过渡电阻对实验结果的影响如表2所示。

表2 大型电力系统接地过渡电阻对故障节点定位准确度的影响

过渡电阻 R_f/Ω	A相接地/km	AB两相接地/km
0	19.5	19.6
30	19.6	18.9
60	19.4	19.3
120	19.3	19.2

由表2可以看出，过渡电阻对大型电力系统中的故障节点定位结果影响较小。

结束语

针对传统的GIS故障节点定位方法，不适合无运动信息的大型电力系统故障节点的快速定位，

容易受到过渡电阻的影响,而无法对大型电力系统的故障节点进行快速定位。提出一种基于三维GIS并结合全球定位系统(GPS)的电力系统故障节点定位方法,引入电力系统关键设备的简化结构和数学模型,运用一种能够反映大型电力系统分层拓扑结构的矩阵进行运算,设计了基于GIS平台的故障诊断模块。由仿真实验结果可以看出,定位算法可操作性较强,通用性较高,只采用微分方程,差分只需要对采样的瞬时值进行处理,解决了大型电力系统传统算法中由于短路非周期分量对定位准确度的影响,能够对大型电力系统的安全进行有效维护。

参考文献

- [1] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 623—1997电力系统继电保护及安全自动装置运行评价规程[S].
- [2] 刘健,董新洲,陈星莺,等. 配电网容错故障处理关键技术[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.
- [3] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.
- [4] Kezunovic M, Mrkic J. An accurate fault location algorithm using synchronized sampling[J]. Electric Power Systems Research, 1994(29).
- [5] 朱传柏,郭创新,曹一家. 基于调度综合数据平台的大规模电网分层故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 51-55.
- [6] 龙启峰,陈岗,丁晓群,等. 基于面向对象技术的电力网络拓扑分析新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 73-77.
- [7] 严晓蓉,张玉洲. 地理信息系统在配电网自动化中的应用[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 52-53.
- [8] 竺炜,穆大庆. 电力网络实时拓扑分析的两种算法的实现[J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2001, 16(2): 13-25.

(收稿日期: 2014-11-27) EA

色彩丰富 凸显主题

2015《电气应用》以鲜明色彩和新颖版式呈现精彩内容,力求赏心悦目。

栏目设置 独具风格

坚持继承与开拓并举,以丰富内涵充实经典栏目,持续深化面对面、专家访谈、EA经理人等栏目,密切关注电气技术的发展和运用。

专家点评 精辟深刻

每期都将围绕一个热点话题,隆重推出一场专题讨论的盛宴,共邀知名专家、产品用户和生产厂家汇聚一堂,针对焦点问题作出评析。

行业案例 生动丰富

关注电力、建筑、石化和冶金等电气行业应用,以典型深刻的案例分析、方案设计构建技术互动的空间,促进应用经验交流。

国内邮发代号: 82-341 国外发行代号: M1409

每期定价: 15.00元 全年定价: 360.00元

全新改版

电气应用

· 电气应用 盛情呈现 ·

2015