

# 基于馈线区间和 GIS 的配电网网损计算拓扑分析方法

刘伟<sup>1</sup>, 李恒<sup>2</sup>, 张江<sup>2</sup>, 孙福杰<sup>2</sup>, 郭志忠<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京许继电气有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 结合配电自动化的工程实际问题, 提出将馈线区间作为一个图, 并将区间内各节点作为图的顶点, 节点间线段作为图的弧, 以线路潮流的方向作为弧的方向, 并由此建立了配电网馈线区间的数学模型。在该模型的基础上定义了区间的网基结构矩阵和有向描述矩阵, 并将其进一步结构化。从而得到能与 GIS 平台拓扑分析功能紧密结合的数据结构和计算分析方法。最后, 描述了基于该方法的网损计算过程, 并讨论了对不完整量测数据的处理问题。

**关键词:** 配电网; 配电自动化; 区间; 数据结构; 拓扑分析; 网损计算; GIS(地理信息系统)

**中图分类号:** TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)08-0010-04

## 1 引言

配电网网损计算作为配电自动化系统的高级分析功能之一, 在配电网网络规划和提高配电系统运行经济性方面起着重要的作用。随着近年来配电自动化技术的发展, 地理信息系统(GIS)也逐渐成为了配电自动化系统中不可分割的一部分<sup>[2]</sup>, 许多成熟的商用 GIS 平台不断涌现。网损计算所不可缺少的拓扑分析则是这类平台成熟可靠的基本功能之一。充分而合理地利用 GIS 平台的拓扑分析功能将会大大提高系统的开发速度以及运行的可靠性, 同时还具有相当的可扩展性。

此外, 大量监控终端单元的装设也是配电自动化实现的前提之一, 这样, 配电网网损计算及拓扑分析就可以从过去以馈线为单位转变成以区间为单位<sup>[7]</sup>。不但提高了计算精度, 而且进一步提高了对馈线区间内各类网损(如线路损耗、配变损耗以及管理损耗)的分析能力, 更利于决策部门的分析与管理。

本文所述的配电网网损计算拓扑分析方法, 就是基于上述两个成熟的实际条件, 并充分考虑到配电网系统的现有技术和能力而提出的。

## 2 配电网馈线区间数学模型的建立

从拓扑结构来看, 配电网显然可以看作是一种图<sup>[4,5]</sup>, 这一点同样适用于配电网馈线上的单个区间, 本文采用邻接矩阵对区间加以描述。将区间内部的各个节点作为图的顶点, 节点间的线段作为图的弧, 以线路上潮流的方向作为弧的方向; 区间的首端节点(即区间潮流的流入节点)固定编号为 0, 其

余节点编号无顺序要求。在此基础上, 就可以建立如下的配电网馈线区间数学模型。

### 2.1 建立配电网馈线区间的无向图描述模型

把一个区间内的线段作为无向边, 并采用  $N$  行  $N$  列的网基结构矩阵加以描述,  $N$  为区间内节点的个数。矩阵元素定义规则如下: 如果节点  $i$  与节点  $j$  之间存在线段, 则元素  $A_{ij} = 1$ , 否则  $A_{ij} = 0$ 。该网基结构矩阵描述了配电网馈线区间内部潜在的连接方式, 它是由线路的架设所决定的。

由于不论在 GIS 图上还是在数据库里, 配电网中的每个设备(如开关、配变和线段等)都对应着一个唯一的标识符, 即设备 ID。所以, 在不失一般性和通用性的前提下, 为了使上述网基结构矩阵  $A$  能够包含更多的信息, 这里将两个节点之间的线段 ID 作为  $A$  阵中的非 0 元素值, 即节点  $i$  与节点  $j$  之间如果存在线段, 则元素  $A_{ij}$  为该线段 ID, 否则  $A_{ij}$  为 0。

图 1 是一个典型的配电网馈线区间模型, 除首端节点外, 其余节点编号任意。

按照上述建立网基结构矩阵的方法, 对图 1 所示区间, 可建立如下矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & 0 & L_3 & 0 & 0 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_5 & L_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_7 & L_8 & 0 & L_9 \\ 0 & 0 & L_2 & 0 & L_4 & L_7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

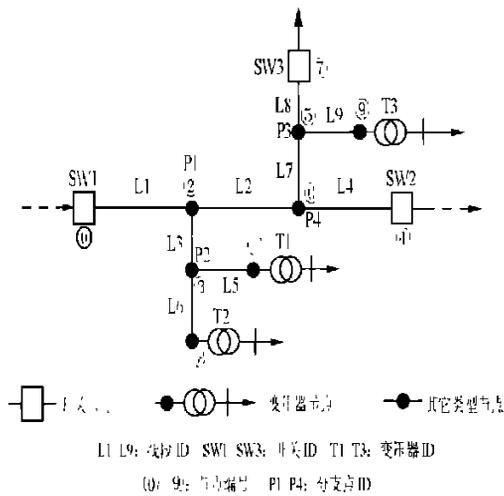


图 1 典型的配电网馈线区间模型

2.2 建立馈线区间内节点的有向图描述模型

由于网基结构矩阵只是描述了区间内节点之间的无向关系,无法表明区间当前的运行方式,所以还不能满足需要。为此,还需要建立区间内节点的有向描述模型。本文把线段上潮流的方向作为节点间线段的方向,沿着该方向,称潮流的流出点是流入点的父节点,反之,称流入点是流出点的子节点。同时考虑到配电网的辐射状树型结构,一个节点可能会有多个子节点,但有且仅有一个父节点。这样,利用树的双亲表示法,建立 1 行 N 列的区间有向描述矩阵  $\bar{A}$ ,规则如下:如果节点 i 的父节点是 j,则  $\bar{A}_i = j$ ;由于区间首端节点在本区间内无父节点,所以其对应的元素值为 -1。

显而易见,区间的有向描述矩阵表明了区间当前的实际运行方式。

正如网基结构矩阵 A 一样,有向描述矩阵  $\bar{A}$  中只包含结构信息并不够,还应当有设备信息才能满足实际计算的要求。所以,这里将 1 行 N 列的矩阵扩展为 3 行 N 列的矩阵  $\bar{A}$ ,其元素涵义如下: $\bar{A}_{i0}$  存放父节点号, $\bar{A}_{i1}$  存放节点设备类型, $\bar{A}_{i2}$  存放节点设备 ID。

对于图 1 所示区间,可建立如下的区间有向描述矩阵  $\bar{A}$  :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & 0 & 2 & 6 & 6 & 2 & 5 & 3 & 5 \\ SW & T & P & P & SW & P & P & SW & T & T \\ SW_1 & T_1 & P_1 & P_2 & SW_2 & P_3 & P_4 & SW_3 & T_2 & T_3 \end{bmatrix}$$

其中,SW、T 以及 P 分别表示开关设备、变压器设备和线路分支点等节点设备类型;最后一行各元素则分别表示各个设备对应的 ID。

2.3 馈线区间数学模型的结构化

首先,考虑到配电网的结构特点,网基结构矩阵 A 必定是一个稀疏矩阵,这样,就可以利用矩阵的稀疏存储技术<sup>[1,3]</sup>来优化其存储结构,同时还能较大地提高运算效率,方便以后需要进行的各种计算。

对于网基结构矩阵 A,下面构造其稀疏存储基本数据结构:

```
typedef struct TopSA
{
    int L_ID ; // 按行存储 A 阵中非零元素,即行列节点间的线段 ID;
    short ColNo ; // 按行存储 A 阵中的非零元素列号;
    short FirPos ; // 存放 A 阵中各行第一个非零元素在 L_ID 中的位置;
};
```

上述数据结构是通过定义一个该类型的一维数组来使用的,称为网基结构数组,编程实现非常方便。而且,该稀疏存储结构很具有一般性,因此很容易就可以应用到其它的高级分析功能当中,如潮流计算等。

其次,对于有向描述矩阵  $\bar{A}$ ,也用一个数据结构来进行存储,如下所示:

```
typedef struct TopNode
{
    short N_Father ; // 父节点号,首端开关节点没有父节点,设为 -1;
    short N_Type ; // 节点设备类型,分为 T 接点、配变、开关;
    short N_ID ; // 节点设备 ID;
};
```

在该结构里,分别用 N\_Father、N\_Type 和 N\_ID 代替了原矩阵中的  $\bar{A}_{i0}$ 、 $\bar{A}_{i1}$  和  $\bar{A}_{i2}$ ,在使用时也只需定义一个该结构类型的一维数组即可,该数组称为有向节点数组。

由于一个区间内的节点数目不会很多,可以将上述两个数组的长度设为定值,避免动态分配存储空间所带来的不利影响,以提高程序的执行效率和可靠性,由此而产生的数组中的冗余单元,全部被置为 -1,以作标识。

利用上述的结构化方法,可得图 1 的网基结构数组,如表 1、表 2 所示。

表 1 网基结构数组

L_ID	L1	L5	L1	L3	L2	L5	L3	L6	L4	L7	L8	L9	L2	L4	L7	L8	L6	L9
ColNo	2	3	3	6	0	1	1	8	6	6	7	1	4	5	5	3	-1	-1
FirPos	0	1	2	5	8	9	12	15	16	17	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

表 2 有向节点数组

N. Father	- 1	3	0	2	6	6	2	5	3	5	- 1
N. Type	SW	T	P	P	SW	P	P	SW	T	T	- 1
N. ID	SW <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	SW <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	SW <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	- 1

上述两个数组,是整个网损计算的基础,以后进行的以区间为单位的计算过程,都是在二者的基础上实现的。

### 3 网损计算专用数据结构的定义

上述两个数据结构,是为了获得拓扑分析的结果,其中存放的是拓扑数据,要想利用这些结果继续进行网损计算,还需要定义计算专用的数据结构,即节点属性数据结构。

节点属性数据结构中,主要包括节点注入电流、节点配变容量、配变短路及空载损耗功率、与父节点间的线段电阻等节点属性数据。其中的大部分成员数据来自于数据库中的配变、开关和线段属性。

辐射型配电网的功率传输具有从源节点经各中间节点指向各末端节点的单向流动性。顺着功率的流向,称它为流入节点的馈入支路;反之,逆着功率的流向,称它为流出节点的馈出支路。除源节点外,其他节点和馈入支路是一一对应的。因此,在节点属性数据结构中,将节点所对应馈入支路(即与父节点间的线段)的电阻值作为该节点的一个属性列入该结构,这样可以方便以后的计算过程。

### 4 与 GIS 平台拓扑分析模块的结合

商用 GIS 平台具有成熟的拓扑分析功能,通过 SDE(空间数据库引擎)能够方便地实现空间数据与专题属性数据的统一管理;利用节点拓扑和弧段拓扑可以很容易地得到诸如连通性、邻接性等拓扑对象间的空间关系<sup>[11]</sup>。同时,此类 GIS 平台通常会提供丰富的接口函数和强大的二次开发能力,以使用户能够更灵活地使用其内部各模块,使用户专注于功能与数据结构的构造,而不必关心其内部实现方式,这样可以大大加快软件的开发速度并提高其运行可靠性。

在明确本文第 1 节提出的公用数据结构的前提下,对 GIS 平台拓扑分析功能的调用过程,也就是利用该功能构造前述区间网基结构数组和有向节点数组的过程,需要用到 GIS 平台提供的拓扑分析编程接口。对一个区间的拓扑分析完成后,网损计算模块会利用构造好的数组,在该区间内进行一系列的运算,继而得到区间网损,最终累加得到馈线以及整

个配电网的网损。

这样,在拓扑分析模块和网损计算模块各自独立的基础上,实现了二者在功能上的紧密结合。

## 5 对不完整量测数据的处理

在系统的实际运行当中,有时难免会出现某些量测数据的缺失,有的是由于终端监控设备异常所导致的,而有的则是因为系统自身硬件结构的不完整所造成的。

### 5.1 配变终端单元(TIU)装设不完整

配电网是一个很庞杂的系统,具有数量巨大的节点、分支线和元件,而且很多元件没有量测运行参数的条件,因此,要精确地计算配网的理论网损具有相当的难度<sup>[8~10]</sup>。通常情况下,在满足实际工程计算精度的前提下,一般采用平均电流法和等值电阻法。

根据不同计算方法对数据的要求,可以知道,平均电流法对负荷点(通常是变压器节点)的实测数据(由 TIU 采集)具有较强的依赖性,如果 TIU 装设不完全,该方法将不再有效,这时可以采用等值电阻法。

本文直接利用区间首端和各末梢开关的量测电流,同时利用线性网络的叠加原理以及《电力网电能损耗导则》<sup>[12]</sup>(以下简称《导则》)中提出的按负荷容量分流的方法,对各节点电流进行分配。在配变容量与实际所带负荷相差不大的情况下,这种方法是可行的。

### 5.2 区间末梢开关 RTU 欠测

在 GIS 的拓扑分析模块中,一条馈线上的各个区间是以各自的首端开关(首端指区间潮流的流入端)作为标识和分隔点的,即本区间首端开关就是上一个区间的末梢开关。由于在以区间为单位的网损计算中,需要用到开关处 RTU 的量测电流,但如果由于故障等原因无法提供该量测电流时,认为此 RTU 处于“欠测”状态。当本区间某一个末梢开关欠测时,就要把该开关当作区间内“其它类型节点”处理,即在有向节点数组中将该开关对应的节点类型设定为“其它类型节点”,同时对以该开关为首端的区间继续进行搜索,这样就将本区间范围扩大到了以该“欠测”开关为首端的区间内。

经过这样的处理,在求取某区间网损的过程中,不用再考虑开关的欠测问题,因为在上述拓扑分析过程中已经完成了对欠测开关的判断。网损计算时,将欠测开关作为非开关节点处理即可。从这一

点也可以看出拓扑分析模块与网损计算模块的相对独立性。

事实上,欠测的一种极端情况就是整条馈线只有出口处 FCB 上的 RTU 有量测值,其余开关均无量测值,这时,利用本方法得到的馈线网损计算精度等同于《导则》中提出的等值电阻法,其他非极端情况下的计算精度均要高于该方法。如果 TIU 装设完全,计算精度将会得到进一步提高。

## 6 馈线内以区间为单位的网损计算过程

调用拓扑分析模块的程序需要先将上述两个数组清空,并将其地址以及区间首端开关 ID 作为参数传入拓扑分析模块。这两个数组被构造完毕后返回,调用程序会利用这两个构造好的数组进行计算。首先在首端开关代表的区间内进行搜索计算,从而将本区间网损算出;然后在所有设备类型为开关的节点中遍历,分别将其对应区间的网损算出,直到所有开关对应的区间被遍历一次,显然这是两个嵌套的递归调用过程;在遍历所有区间的同时,可以将各区间的网损累加,这样,遍历完成的时候一条馈线的网损就可以得到。

(1) 遍历配电网内所有馈线的出口端 FCB,对每一个 FCB,都将其设备 ID 作为参数传给 GIS 的区间拓扑分析模块,该模块会利用自身的拓扑分析功能完成对区间网基结构数组和有向节点数组的构造。

(2) 对构造好的区间网基结构数组和有向节点数组做进一步的分析,这一分析过程也就是构造节点属性数组的过程。

(3) 完成属性数组的构造后,利用它进行区间内网损计算,从而将该区间的网损算出,并累加至馈线网损中。

(4) 在有向节点数组中搜索,遇到类型为开关的节点,则将其对应设备 ID 作为参数,再次传给区间拓扑分析模块,进行递归调用,得到该开关所代表的下一个区间的网损,直到所有区间被搜索过一遍,整条馈线的网损就自然得出,然后累加至全网网损中。

## 7 结束语

本文提出的拓扑分析方法将 GIS 的拓扑分析功

能和网损计算过程在代码级上进行了分离,各自具有相对的独立性,从而使程序功能更加明确,结构更加清晰,同时也提高了网损计算的精度和运行可靠性。而且,该方案只需做很少的改动就可以应用到其它的高级分析当中,如潮流计算、状态估计等。

该方法已经成功地应用于济宁市配电自动化项目中,经过实际的测试,证明该方法是可行的。

## 参考文献:

- [1] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1999,10.
- [2] 刘健,倪建立,邓水辉. 配电自动化系统[M]. 北京:中国水利电力出版社,2001,2.
- [3] 严蔚敏,吴伟民. 数据结构[M]. 北京:清华大学出版社,1997,10.
- [4] 刘健. 变结构耗散网络 - 配电网自动化新算法[M]. 北京:中国水利电力出版社,2001,1.
- [5] 刘健,程丽红,毕鹏翔,等. 配电网的模型化方法[J]. 西安:西安交通大学学报,2000,10:10-14.
- [6] 蔡中勤. 配电网 Newton 法潮流及功率矩法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000,10.
- [7] 朱发国. 基于现场监控终端的配网线损计算[J]. 电网技术,2001,(5):38-40.
- [8] 罗毅,丁毓山,李占柱. 配电网自动化实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,1999,1.
- [9] 杨期余. 配电网[M]. 中国电力出版社,1998,11.
- [10] 王章启,顾霓鸿. 配电自动化开关设备[M]. 北京:水利电力出版社,1995,6.
- [11] 中煤航测遥感局遥感应用研究院. ArcInfo 地理信息系统教程(电子版)[EB/OL]. <http://go5.163.com/arscra/>. 2000.
- [12] 国家电力公司. 电力网电能损耗计算导则[Z]. 中华人民共和国国家经济贸易委员会,2000,2.

收稿日期: 2001-12-21; 修回日期: 2002-03-07

作者简介:

刘伟(1975-),男,博士研究生,从事配网安全分析及配电自动化方向的研究。

郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,研究领域为电力系统稳定、电力市场、光电技术及计算机技术在电力系统中的应用。

李恒(1974-),男,工程师,从事配电自动化系统的研发工作。

Topology analysis method for loss calculation of distribution network based on feeder sections and GIS

LIU Wei<sup>1</sup>, LI Heng<sup>2</sup>, ZHANGJiang<sup>2</sup>, SUN Fu-jie<sup>2</sup>, GUO Zhi-zhong<sup>1,2</sup>

(下转第 42 页)

图7所示,其中  $U_1$  为输入端的端电压,  $U_2$  为输出端的响应电压。测量绕组两端的电压,然后利用前述的计算方法,即可得到实验的最终结果(如表1所示)。

表1 仿真实验的结果

实验次数	计算所得故障点	实际故障点	误差 %
1	0.11	0.1	10
2	0.28	0.3	6.7
3	0.48	0.5	4
4	0.74	0.7	5.7
5	0.84	0.9	6.7

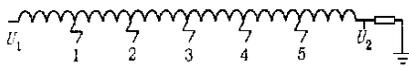


图7 仿真实验电路图

从表1可以知:(1)计算得出的故障点与实际故障点的位置存在误差;(2)绕组故障越是发生在靠近绕组两端的地方,计算所得的结果所产生的误差就越大,不过仍然在可以接受的误差范围之内。

## 5 结论

利用变压器绕组在一定条件下呈现出纯电容的特性,来进行变压器局部放电故障的定位是变压器绕组故障诊断的非常有效的方法。本文的着重点在于理论上的分析,随着信号处理技术的发展和完善,

利用本文的方法,还可能实现变压器绕组的在线诊断与定位。

## 参考文献:

- [1] 黄华,周建国,姜益民,等.阻抗法和频响法诊断电力变压器绕组变形[J].高电压技术,1999,25(2):3.
- [2] 朱明林,朱子述.变压器传递函数的系统辨识[J].高电压技术,2002,26(1):46-48.
- [3] 朱建新.电力变压器绕组变形故障的测量分析与判断[J].变压器,2000,37(6):21-24.
- [4] Oguz Soysal A,Adam Semlyen. Practical transfer function estimation and its application to wide frequency range representation of transformers[J]. IEEE Trans on PD,1993,8(3):1627.
- [5] James R E et al. Application of digital filtering techniques to determination of partial discharge location in transformers[J]. IEEE Trans. Electr. Ins,1989,24(4):657-668.

收稿日期:2001-11-07

作者简介:

苏文辉(1976-),男,硕士研究生,主要研究电力变压器的在线故障诊断。

鞠平(1962-),男,博士,教授,副校长,主要研究电力系统模拟与控制。

丁晓群(1956-),男,教授,主要研究电气设备故障诊断以及电网自动化。

## Location of partial discharges fault in transformer winding

SU Wen-hui, JU Ping, Ding Xiao-qun

(Institute of Electric Engineering of Hehai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Frequency response analysis can be used to examine distortion fault in transformer windings, but can't perform partial discharge Location. Based on frequency response analysis, the simulative circuit of transformer's winding was analyzed in this paper. According to the pure capacitive characteristic in current frequency range in transformer winding, a new method was given to realize locate the partial discharges fault in transformer winding. The method is proved to be effective by simulative experimentation.

**Keywords:** transformer windings; partial discharges; location; transfer function

(上接第13页)

- (1. Electric Engineering and Automation School, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Beijing Xuji Electric Co. Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Combined with engineering practices, this article proposes that feeder section is regarded as graph, the nodes inside the section are treated as vertexes of graph, and the lines between nodes as arcs. Their directions are load flow's directions in the lines, and the model of feeder section in distribution network is constructed. Based on this model, network-base structure matrix and directional describing matrix are defined, and deeply, they are structured. Therefore, we get the data structure and methodology which are combined with the topology function of GIS closely. Finally, the procedure of calculation based on this method is described, and the problem of incomplete measured datas is discussed.

**Keywords:** distribution network; distribution automation; section; data structure; topology analysis; loss calculation; GIS (Geography information system)