

# 基于图形模型的配电网短路 计算拓扑分析及数据生成

卢 洵<sup>1</sup>, 姚建刚<sup>1</sup>, 周乐青<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 软件学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 给出了基于故障电流补偿的配电网短路计算网络图形模型, 提出了“结点”图形模型概念。“结点”包含网络拓扑结构中所有的“节点”, 是连接网络其他图形模型的交叉点。根据结点和其他图形元件的连接关系分析获得短路计算网络拓扑结构算法。该算法不仅能够准确地描述配电网拓扑结构, 还能生成短路计算所需的数据。在实际系统运行中表明, 该算法具有一定的实用价值。

**关键词:** 配电网; 短路计算; 图形模型; 网络拓扑

**中图分类号:** TM 711; TM 76

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2005)03-0067-05

## 0 引言

配电网一般呈辐射状, 网架结构较简单<sup>[1]</sup>, 且支路参数  $R/X$  比值较大, 分支线较多, 系统为三相不对称运行, 使得传统对称分量法不再适合于配电网的短路计算。本文采用基于故障电流补偿的配电网短路计算方法进行短路计算编程。这种方法将三相潮流计算结果作为故障前的状态。计算出故障补偿电流后, 将其作为注入量叠加到故障节点, 经过一次回推前推算法计算出支路故障电流和节点电压<sup>[2]</sup>。这种方法计算过程简单, 易于在计算机上实现, 且在计算配电网短路电流时具有高效、可靠的特点。

短路计算程序有两种较为常见的原始数据录入方式: 一种为数据文件方式, 即用户使用任何一种文本编辑器, 手工输入计算所需的原始数据, 形成数据文件, 然后由程序直接调用; 另一种为人机交互方式<sup>[3]</sup>, 该方式需要用户首先绘制电网接线图, 以接线图为背景提示用户输入原始数据。本文采用第二种数据录入方式进行短路计算编程。网络拓扑结构分析是进行短路计算的基础。由于在电网接线图中使用的是直观图形, 它与配电网短路计算中使用的网络拓扑图表示方法不一致, 基于这一特点, 提出了一种配电网的图形模型, 并根据设计好的图形模型给出了网络拓扑结构算法, 该算法不仅清晰地分析出网络中节点与支路的关系, 还生成了基于故障电流补偿的配电网短路计算所需的数据<sup>[4]</sup>。经过实际系统的运行, 证明了该算法的可靠性和实用性。

## 1 辐射状配电网短路计算所需数据分析

### 1.1 基于故障电流补偿的配电网短路计算方法

基于故障电流补偿的配电网短路计算将短路故

障分解为正常运行方式和故障分量方式。正常运行方式可由三相潮流计算获得, 而故障补偿电流则通过三相潮流计算结果和故障边界条件计算得出。将两者叠加在一起即得到短路计算所需结果。

本文采用最适合于配电网潮流计算的前推回推法进行三相潮流计算。对一有  $N$  个节点的配电系统, 已知根节点处电压  $U_0$  和各节点的三相负荷功率值  $P_i + jQ_i (i=1, 2, \dots, N-1)$  及配电系统拓扑结构和各支路阻抗。待求量为各节点的节点电压  $U_i (i=1, 2, \dots, N-1)$  及各支路电流, 经过反复迭代直至收敛。三相潮流计算的具体算法如下所述。

#### 1.1.1 求解支路电流

假设支路  $l$  首末端节点号分别为  $i$  和  $j$ 。若  $j$  为整个网络的末梢点, 则该支路的电流  $I_l$  等于该末梢点的负荷电流<sup>[5]</sup>, 即

$$I_l = I_j = \frac{(\bar{P}_j + jQ_j)^*}{U_j^*} \quad (1)$$

式中  $\bar{P}_j + jQ_j$  为节点  $j$  的负荷功率;  $U_j^*$  为节点  $j$  的电压共轭。

若  $j$  不是整个网络末梢点, 则支路电流  $I_l$  等于该支路末端节点电流和其所有子支路的电流之和, 即

$$I_l = I_j + \sum_{m \in k} I_m \quad (2)$$

式中  $k$  为以节点  $j$  为父节点的支路的集合。

这样, 根据式(1)(2), 由网络末梢点向电源点回推, 可得到各支路电流, 其中第一次回推时  $U_j^*$  取网络平均电压<sup>[6]</sup>。

#### 1.1.2 求解节点电压

对于支路  $l$  有

$$U_j = U_i - I_l(R_l + jX_l) \quad (3)$$

求得支路电流后, 可根据式(3)求得各节点电压。

计算故障分量采用如下公式:

$$U_f = Z_f I_f \quad (4)$$

$$U_f = U_f(s) - U_f(0) \quad (5)$$

其中  $Z_f$  为故障节点到根节点的阻抗之和,  $U_f$  可根据式(5)和故障边界条件求得,  $U_f(0)$  为故障前故障节点电压(可由三相潮流计算获得),  $U_f(s)$  为故障后故障节点的短路电压。假设配电网发生三相对称短路, 易知  $U_f(s)$  为 0, 那么  $U_f$  即为  $-U_f(0)$ 。根据式(4)可求得故障电流分量  $I_f$ , 将故障电流叠加入式(1)~(3)进行一次前推回推即可求得三相短路后各支路电流和节点电压。

## 1.2 配电网短路计算数据分析

根据基于故障电流补偿的配电网短路计算公式, 配电网短路计算模型可描述如下:

a. 对一有  $N$  个节点的配电系统, 在进行三相潮流计算时, 已知量为根节点(或电源点)的电压  $U_0$ 、各节点的负荷值  $P_i + jQ_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ) 及配电系统拓扑结构和各支路阻抗;

b. 在进行故障分量计算时利用三相潮流计算所得的故障前各节点电压  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N-1$ ) 和故障节点到根节点各支路阻抗之和求得故障后各支路电流和节点电压。

由上述数据分析可知, 要准确进行配电网短路计算, 必须清楚网络拓扑结构、节点参数值和各支路阻抗参数。下文将讨论基于配电网图形模型的短路计算拓扑算法, 该算法准确、可靠地描述出网络拓扑结构, 还生成了配电网短路计算数据, 为短路计算做好了准备。

## 2 配电网图形模型

无论配电网络多么复杂, 都是由母线、输电线路、变压器、开关 4 种基本元件构成的<sup>[7]</sup>, 配电网将这些设备有机的结合起来, 完成配电工作。在绘制配电网络接线图时, 根据这 4 种设备元件设计网络图形模型。同时, 在分析配电网拓扑结构时定义了新的图形模型——“结点”, 与配电线路段一同形成配电网络拓扑结构。以下对配电网络各图形模型进行具体分析。

### 2.1 结点模型

在绘制配电网络接线图时, 两节点之间并不一定用一条直线相连, 可能会考虑构图的美观, 通过多条线段连接起来, 因此线段之间的交点不一定为网络拓扑结构中的节点。为准确描述配电网络拓扑结构, 给出了“结点”图形模型, 它区别于其他的设备元件, 是连接多个设备元件的交点。“结点”包含网络中所有“节点”, 且具有“节点”所有的物理量, 如“节点”的负荷功率。当某一“结点”不是“节点”时, 该结点的物理量为零。在绘制电网接线图时, 结点将作

为一个独立元件添加在图中。每增加 1 个结点, 系统将该结点编号自动增 1, 编号在图中以标注的形式显现出来, 并弹出对话框提示用户输入该结点已知的物理量。利用结点模型构成网络图形时, 需要满足以下规则:

a. 1 条母线可等效为 1 个结点, 因此在网络图形中每增加 1 条母线, 自动增加结点编号;

b. 结点只能作为设备元件的顶点, 不能出现在设备元件的中间;

c. 对于某结点的已知物理量, 可以存在, 也可以不存在。

根据以上规则可知, 系统通过自动生成的结点编号记录了各图形元件之间的连接关系, 结点包含了网络拓扑结构中所有的节点, 结点在数据库中表结构由 CrunodeID, IDdepict, Crunode\_P 及 Crunode\_Q 字段组成。Crunode ID 字段是系统对结点的编号; IDdepict 字段是对结点编号的描述, 在添加线路元件时, 它为用户在已生成的结点中选择线路元件两端结点提供文字提示。由上述数据分析可知, 计算三相潮流时, 节点的三相负荷功率是已知的, 是用户录入的物理量。字段 Crunode\_P 和 Crunode\_Q 分别为结点的有功功率和无功功率, 当该结点不是节点时, 则这 2 个字段的值为零。

### 2.2 其他设备模型

#### 2.2.1 母线模型

在配电网络中, 母线分为变电站母线和负荷母线两大类; 接线方式包含单母接线、双母接线、3/2 断路器接线及 4/3 断路器接线 4 种。为了简化母线模型, 更好地分析网络拓扑结构, 在绘制网络接线图时, 母线模型的接线方式一律采用单母及单母分段 2 种接线方式。其中, 变电站母线与母联开关相关联, 负荷母线则相反。由于母线可等效成结点, 利用母线模型构成网络图形时, 在已画好的母线上增加 1 个母联开关, 系统自动将该母线分成 2 条母线, 当母联开关闭合时, 2 条母线将自动合并成 1 条母线。同时修改数据库中结点表和母线表的相关信息。当母线为变电站母线时, 此时母线可看做根节点, 必须在母线表中录入根节点电压参数。

母线模型在数据库中的表结构由 Type ID, BusID, CrunodeID, SwitchID, Rootvoltage 及 BusState 字段组成。TypeID 字段描述母线模型种类; Bus ID 是系统为母线的编号; CrunodeID 描述母线所在结点的编号; SwitchID 为母线所关联的母联开关编号, 母联开关信息可存在, 也可不存在; Rootvoltage 为系统根节点电压, 当某条母线为系统根节点时, 该字段的值不为零; BusState 描述母线的运行状态(是否带电运行)。

### 2.2.2 线路段模型

线路分为普通输电线路和变压器线路。由于变压器元件和输电线路元件运用到短路计算中的参数大致相似,因此为简化电网结构模型,将变压器元件和输电线路元件统一构成线路段模型。利用“结点”图形元件构成网络接线图时,为描述网络拓扑结构中的支路,将结点之间独立的线段定义为线路段。易知线路段与拓扑分析中的支路是有区别的,两结点之间的一条或多条线路段构成1条支路。1条线路段的首端或末端可能有悬空、与其他线路段相连或与某条母线相连3种情况。绘制线路段模型时,需要满足以下规则:

- a. 在增加线路段元件之前,必须确定线路段两端结点号,否则接线图上将不会绘制线路段图形;
- b. 当线路段上连有开关时,无论此开关是断开还是闭合,线路段的数目将不会增加,这与母线是有区别的。

线路段模型在数据库中的表结构由TypeID, LineID, Crunode1, Crunode2, FD\_switchID, LL\_switchID, LP\_reactive, LZ\_reactive, LP\_resistance 及 LZ\_resistance 字段组成。TypeID 为线路段类型字段,线路段分为普通输电线路段和变压器线路段两种;LID 是系统为线路段的编号;Crunode1, Crunode2 分别为线路段首末端结点号;FD\_switchID 为线路段所关联的分段开关编号;LL\_switchID 为线路段所关联的联络开关编号;LP\_reactive, LZ\_reactive 分别为线路段正序、零序电抗;LP\_resistance, LZ\_resistance 分别为线路段正序、零序电阻。

### 2.2.3 开关模型

配电网络中的开关分为母联开关、分段开关和联络开关3种。在配电网中开关的存在使得网络结构可以随负荷的变化而调整<sup>[8]</sup>,即进行重构。因此,要获得重构后的配电网络拓扑结构,必须确定开关状态的组合情况。开关模型包含了开关种类、运行状态以及与其相连的设备信息。利用开关模型构成网络图形时,需要满足以下规则:

- a. 在网络接线图中,三类开关模型都属于与其相连设备的一部分,不作为独立图形元件出现,若相连的设备元件被删,那么该开关元件也将不存在;
- b. 母联开关不同于其他两类开关,它的状态将影响系统的结点数目,因此在定义了母线模型后应立即定义母联开关;
- c. 1条线路段上只能有1个分段开关,当在线路段上增加第2个分段开关时,线路段将自动分割成2个线路段,其编号将自动加1;
- d. 在两馈线之间增加联络开关时,联络开关信息将同时存入与其相关的2条线路段的线路段表中。

开关模型在数据库中的表结构由TypeID,

SwitchID, LineID, BusID, BranchID1, BranchID2 及 SwitchState 字段组成。TypeID 为开关类型,用来确定开关的种类;SwitchID 记录了系统为开关的编号;LineID 为分段开关所在线路段的编号;BusID 为母联开关所在母线的编号;BranchID1 和 BranchID2 为联络开关所连的某2条馈线编号;SwitchState 用于记录开关的运行状态。

## 3 配电网短路计算拓扑结构算法分析

根据电网接线图上形成的图形模型连接关系可进行配电网拓扑分析。运用到拓扑结构分析中最重要的图形模型是结点模型和线路段模型。它们与拓扑分析中的节点和支路2个基本元素有相似点,但又有着较大的区别。“结点”包含了网络拓扑中所有的“节点”,只有当结点满足由母线构成,连接3条或3条以上的线路段,连接的1条线路段为网络末梢点这3个条件中任意1个才能构成“节点”。而线路段也不是网络拓扑中的支路,两节点之间的支路可能由1条或多条线路段构成。根据网络拓扑中节点和支路的特点,设计其在数据库中的表结构。

节点表的表结构由NodeID, CrunodeID, Node\_P 及 Node\_Q 字段组成。NodeID 为节点编号;CrunodeID 为节点对应的结点编号;Node\_P 和 Node\_Q 分别为节点的三相有功功率和三相无功功率。

支路表的表结构由BranchID, No1, No2, BP\_reactive, BZ\_reactive, BP\_resistance 及 BZ\_resistance 字段组成。BranchID 为支路编号;No1, No2 分别为首端和末端的节点编号;BP\_reactive, BZ\_reactive, BP\_resistance, BZ\_resistance 分别为正序、零序电抗和正序、零序电阻。

### 3.1 形成网络拓扑中节点的算法分析

判断“结点”是否为“节点”,需要确定电网接线图中的结点模型是否符合上述3个条件中任意1个。需要注意的是,母联开关的状态决定网络拓扑中节点的数量,因此,算法首先判断该结点是否为母线处结点。算法简述如下:

- a. 设结点表中有 $r$ 条记录,指针指向结点表的第 $i$ 条记录 $\text{CrunodeID}=i, i=1, 2, \dots, r$ ;
- b. 判断该结点是否为母线,若是则转步骤c,若不是则转步骤d;
- c. 判断其母联开关状态,若开关闭合则形成1个节点,若开关断开则形成2个节点,转步骤e;
- d. 到线路段表中搜索与该结点相连的线路段信息,计算符合条件的线路段数目,以此判断该结点是否为节点;
- e. 在节点表中填写形成的节点信息,转步骤f;
- f.  $i=i+1$ ,判断指针是否指向结点表末端,若是转步骤g,若否转步骤a;

g. 搜索结束。

形成网络拓扑节点的算法流程如图 1 所示。

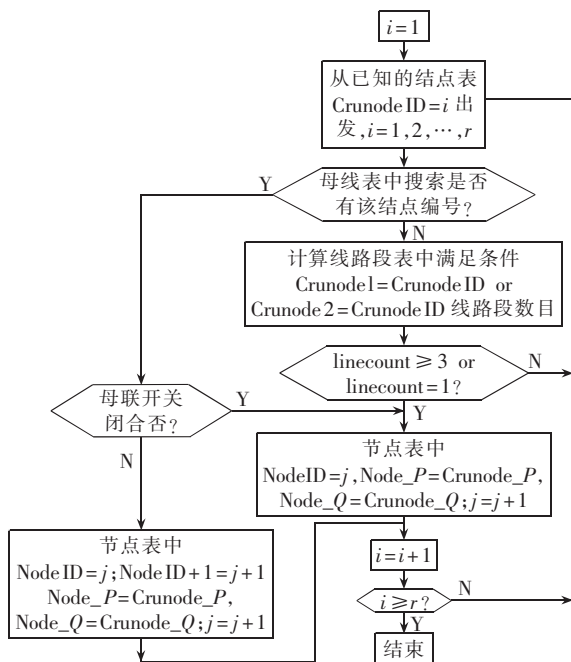


图 1 节点搜索算法流程图

Fig.1 The flowchart of node searching

### 3.2 形成网络拓扑中支路的算法分析

由于每条支路对应首末 2 个节点<sup>[9]</sup>,因此判断电网接线图中的线路段是否为网络拓扑中的支路,必须要判断该线路段首末两端的“结点”是否为“节点”,或线路段是否连有联络开关。若满足条件则线路段为支路,否则不为支路。当多条相连线路段构成网络拓扑中 1 条支路时,需将这些线路段的阻抗之和作为支路的阻抗。具体算法如下:

a. 设节点表中有  $n$  条记录,指针指向节点表的第  $i$  条记录  $CrunodeID=i, i=1, 2, \dots, n$ ;

b. 搜索与该节点相连的线路段  $LineID=j, j=1, 2, \dots, n$ ,在线路段表中依次搜索  $LineID=j$  的线路段另一端结点  $CrunodeID=k$ ;

c. 在节点表中查询是否有该结点信息或搜索该线路段的联络开关字段是否为空,若有转步骤 d,否则转步骤 e;

d. 将该线路段  $j$  两端结点号、正序电抗、零序电抗及正序电阻、零序电阻依次录入到支路表中相应的字段,转步骤 g;

e. 在线路段表中搜索与结点号  $k$  相连的线路段另一端结点号,重复步骤 c,直到搜索到的结点号为节点为止,转步骤 f;

f. 将搜索到的线路段合并成为 1 条支路,并将它们的阻抗值之和,以及两端节点号依次录入支路表中;

g.  $j=j+1$ , 判断是否操作完与节点  $i$  相连的所

有线路段,若是则转步骤 b,否则转步骤 h;

h.  $i=i+1$ ,判断是否到达节点表末端,若是则转步骤 i,否则转步骤 a;

i. 搜索完毕,结束。

支路搜索算法流程如图 2 所示。

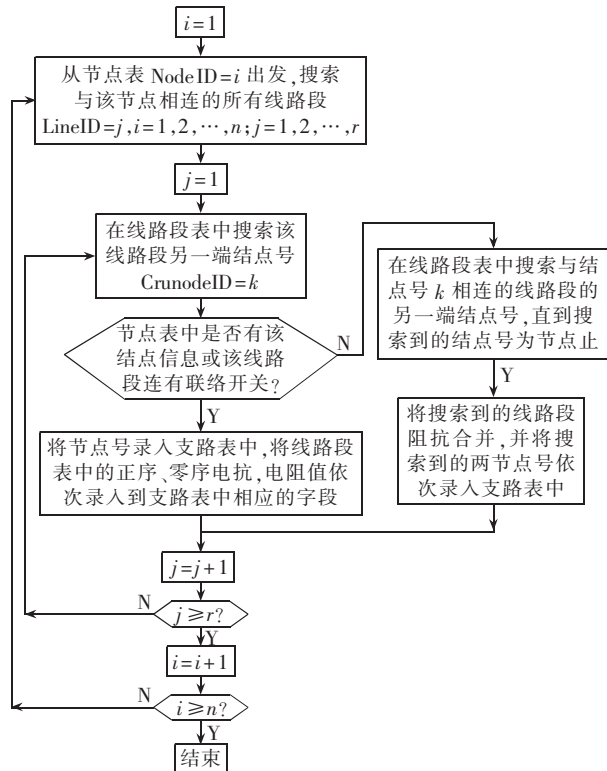


图 2 支路搜索算法流程图

Fig.2 The flowchart of branch searching

在形成网络拓扑结构中的节点和支路的同时,短路计算所需各图形元件的参数信息也存入节点表和支路表中。除开存储电网拓扑结构的静态数据表之外,系统还设计了存储短路计算所生成的动态数据表,如故障后网络的节点电压表和支路电流表。随着网络故障点、电网结构、接线方式的改变,这些数据也将改变。当系统运行时,这些动态数据表用来记录、传递中间结果和存放设置信息,系统关闭后,动态数据表中的信息全部消失<sup>[10]</sup>。

## 4 结语

本文提出的图形模型能够准确、有效地构建配电网接线图。其中的结点模型完全采用自动编号,这样可有效避免人为编号的不连续和错漏,减轻了电网继电保护工作者的工作量。基于网络图形模型的网络拓扑结构算法不仅准确地分析出电网接线图实际的网络拓扑结构,还根据用户输入的图形元件原始数据生成了配电网短路计算所需的数据,提高了运行人员的工作效率。实际应用证明,该图形模型和拓扑算法具有较高的实用性。

## 参考文献:

- [1] 曹国臣,傅 旭. 辐射状配电网故障分析计算的解耦相分量法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):15-20.  
CAO Guo-chen,FU Xu. A decoupling phase domain method to calculation faults in a radial distribution network[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(4):15-20.
- [2] 张 红. 一种辐射型配电网短路电流实用算法 [J]. 电网技术,2001,25(12):38-41.  
ZHANG Hong. A practical algorithm of short circuit calculation for radial distribution networks[J]. **Power System Technology**,2001,25(12):38-41.
- [3] 陈湘波,冯林桥,刘 飞,等. 短路计算与继电保护一体化软件[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):47-48.  
CHEN Xiang-bo,FENG Lin-qiao,LIU Fei, *et al.* Graphic and integrative program for fault analysis and protection setting[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(11):47-48.
- [4] 吴晨曦,盛四清. 电力系统短路计算数据的生成[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):63-65.  
WU Chen-xi,SHENG Si-qing. Data generation for power system's short current calculation [J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(11):63-65.
- [5] 张 明,毕鹏翔,刘 健,等. 辐射状配电网支路电流法潮流计算的收敛特性研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):41-44.  
ZHANG Ming,BI Peng-xiang,LIU Jian, *et al.* Research on convergency of branch current method based power flow calculation for radial distribution network [J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(6):41-44.
- [6] 颜 伟,刘 方,王官洁,等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):76-80.  
YAN Wei,LIU Fang,WANG Guan-jie, *et al.* Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(8):76-80.
- [7] 兰 洁,李长海,张建华. 基于面向对象技术的配电网拓扑分析算法[J]. 现代电力,2003,20(1):49-52.  
LAN Jie,LI Chang-hai,ZHANG Jian-hua. An object-oriented algorithm for distribution system topology[J]. **Modern Electric Power**,2003,20(1):49-52.
- [8] 刘 莉,姚玉斌,陈学允,等. 10 kV 配电网拓扑结构的识别及实用潮流计算[J]. 继电器,2000,28(2):17-19.  
LIU Li,YAO Yu-bing,CHEN Xue-yun, *et al.* Topology structure identification and flow calculation of 10 kV distribution network[J]. **Relay**,2000,28(2):17-19.
- [9] 车仁飞,白树忠,李仁俊. 配电网络拓扑分析与短路电流计算的实现[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(6):77-84.  
CHE Ren-fei,BAI Shu-zhong,LI Ren-jun. Implementation of topology analysis and short circuit calculation for distribution systems[J]. **Proceedings of the EPSA**,2002,14(6):77-84.
- [10] 朱永利,翟万生,张重远,等. 界面图形化的电力系统短路计算智能系统[J]. 电力系统自动化,1997,21(11):54-56.  
ZHU Yong-li,ZHAI Wan-sheng,ZHANG Zhong-yuan, *et al.* An intelligent system for power system's short circuit computing with graphic interface[J]. **Automation of Electric Power Systems**,1997,21(11):54-56.
- [11] 刘 健,倪建立. 配电自动化系统[M]. 北京:水利电力出版社,1998.
- [12] 杨奇逊. 配电网自动化及其实现 [J]. 电力自动化设备,2001,21(1):1-5.  
YANG Qi-xun. Power distribution automation and its implementation [J]. **Electric Power Automation Equipment**,2001,21(1):1-5.

(责任编辑:戴绪云)

## 作者简介:

卢 洵(1980-),女,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场软件开发和电力调度(E-mail:xunmylover@tom.com);

姚建刚(1952-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场和配电自动化方向研究;

周乐青(1978-),男,湖南湘潭人,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络。

## Topological analysis and data generation based on graphic model for short circuit calculation

LU Xun<sup>1</sup>, YAO Jian-gang<sup>1</sup>, ZHOU Le-qing<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Software School, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The graphic network models for power distribution short circuit calculation based on fault current compensation are given. The “crunode” model conception is proposed. “Crunode” is the cross point connecting other graphic models, which includes all network nodes. According to the connective relationship between crunode and other graphic element, a network topology algorithm for short circuit calculation is obtained, which describes the distribution network topological structure exactly and generates the data necessary for short circuit calculation. The applications show its practical value.

**Key words:** distribution network; short circuit calculation; graphic model; network topology