

Theories of Distribution Systems
and Their Applications

配电网理论 及应用

刘 健 毕鹏翔 杨文字 程红丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Theories of Distribution Systems and Their Applications

配电网理论及应用

刘 健 毕鹏翔 杨文字 程红丽 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统论述了针对配电网的理论和应用研究, 主要内容包括: 配电网的数学模型, 馈线地理接线图到单线图的转换, 配电负荷模型, 短期负荷预测, 中、长期负荷预测、配电网潮流计算基础, 配电网潮流的降规模计算, 基于等效负荷模型的配电网的简化分析, 基于等效负荷密度模型的配电网的简化分析, 周期性波动负荷配电网理论线损分析, 配电网电压稳定性研究, 配电自动化条件下配电网供电可靠性分析, 配电网抗灾变性评价及其应用, 配电网网络重构的研究进展, 配电网网络重构的改进支路交换法, 基于改进遗传算法的配电网网络重构, 配电网故障判断隔离和恢复, 紧急状态下配电网大面积断电快速恢复, 重合器和电压一时间型分段器配合的馈线自动化的参数整定, 配电网架规划研究现状, 基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划, 配电网架优化规划扩展规划, 基于蒙特卡罗的配电网架规划算法比较, 配电网架的不确定性规划, 配电网架多阶段动态规划, 分段开关与联络开关位置优化规划和配电网分区规划等 27 章。

本书适合于从事城乡电网规划、建设、改造以及配电自动化系统研究、开发、制造和应用部门的技术人员及管理干部阅读, 也可作为大专院校电力系统自动化和供用电技术专业专业的教师、研究生及高年级学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

配电网理论及应用 / 刘健等著. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4822-0

I. 配… II. 刘… III. 配电系统—研究 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 101445 号

书 名	配电网理论及应用
作 者	刘健 毕鹏翔 杨文字 程红丽 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 18.25 印张 433 千字
版 次	2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介

刘健：教授、博士、博士生导师，Senior Member of IEEE，享受国务院政府特殊津贴。曾获得全国优秀博士学位论文奖、陕西省青年科技奖、陕西省劳动模范、陕西省三五人才、陕西省产学研先进工作者、西安市科技成果转化先进工作者等荣誉称号。

曾 11 次获得省部级科技进步奖，先后出版了 8 部专著，在 IEEE、《中国电机工程学报》、《电工技术学报》、《电力系统自动化》、《电网技术》等国内外重要期刊发表了学术论文 150 余篇，被 SCI 和 EI 收录 60 余篇次，其理论成果被同行们广泛地正面引用。

前 言

国家电网公司提出了建设坚强电网的宏伟蓝图。坚强电网是指电网“网架坚强、结构合理、适应性强、安全可靠、调度灵活、装备精良、管理科学、电能优质、技术经济指标先进、自动化程度高”。配电网是电力网的重要组成部分，并且具有节点众多、网格化程度高、运行方式灵活、负荷变化大和获取信息量少且准确度较差等特点。因此实现坚强电网，就要完成坚强配电网的改造，而在对配电网建模、分析、优化运行、故障处理以及科学规划等方面，又面临着许多新的特殊问题和实际困难。

本书系统论述了作者领导的科研团队近年来在复杂配电网简化建模、降规模分析计算、负荷预测、网络重构与优化运行、局部和灾害性故障处理、配电网架规划等领域的研究成果，适合于从事城乡配电网分析、设计、规划、运行和自动化等方面科研、生产、管理和产品制造的科技人员和管理人员阅读，也可作为电力系统自动化专业研究生和高年级大学生参考资料。

在本书中，刘健教授统编全稿并著写第2、3、7、8、10、11、18、19、23章和第24章稿件，毕鹏翔博士著写第6、9、14、15章和第16章稿件，杨文宇博士著写第20、21、22、25章和第26章稿件，程红丽副教授著写第1、4、5、12、13、17章和第27章稿件。

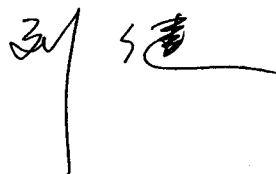
参与本书涉及领域研究为书中内容作出建设性贡献并参与写作的还有：徐精求博士生、武晓滕博士生、张伟硕士、王双虎硕士、马莉硕士、宋蒙硕士、蔡建新硕士、吴媛硕士、唐开成硕士、阎昆硕士、朱继平硕士、刘华硕士、许琼硕士、宋九旭硕士、陈英硕士和燕飞硕士等。董张卓博士、刘巩权工程师、董海鹏工程师、成风波工程师、周艳硕士和李启瑞硕士等在将书中成果转化产品方面作出了杰出的贡献。作者在此表示感谢！

作者还要感谢一些高校、科研单位、设计院、制造厂家和供电企业的同行们的交流和讨论，感谢《中国电机工程学报》、《电力系统自动化》、《电工技术学报》、《电网技术》、《高电压技术》、《继电器》和《电力自动化设备》

等期刊编辑和审稿人的指教，感谢中国水利水电出版社李莉编辑的精心编排。

本书的出版涉及的研究工作受到“全国优秀博士学位论文作者基金”和教育部“新世纪优秀人才支持计划”的资助，作者在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免错误与不妥之处，希望读者批评指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '刘继' (Liu Ji).

2007 年春于西安

目 录

前言

第 1 篇 配电网的模型化方法

第 1 章	配电网的数学模型	1
第 2 章	馈线地理接线图到电气接线图的转换	12
第 3 章	配电网的负荷模型	19

第 2 篇 配电网负荷预测

第 4 章	配电网短期负荷预测	25
第 5 章	配电网中长期负荷预测	38

第 3 篇 配电网简化分析

第 6 章	配电网潮流计算	55
第 7 章	配电网潮流的降规模计算	68
第 8 章	基于等效负荷模型的配电网简化分析	84
第 9 章	基于等效负荷密度模型的配电网简化分析	94
第 10 章	周期性波动负荷配电网理论线损计算	106
第 11 章	配电网电压稳定性研究	115
第 12 章	配电自动化条件下配电系统供电可靠性评估	123
第 13 章	配电网抗灾变性分析及其应用	133

第 4 篇 配电网网络重构

第 14 章	配电网网络重构的研究进展	141
第 15 章	配电网络重构的改进支路交换法	151
第 16 章	基于改进遗传算法的配电网络重构	161

第 5 篇 配电网故障判断和处理

第 17 章	配电网故障区域判断和隔离	169
第 18 章	紧急状态下配电网大面积断电快速恢复	173
第 19 章	重合器和电压一时间型分段器配合的馈线自动化系统的参数整定	180

第6篇 配电网优化规划

第20章	配电网架规划研究现状	189
第21章	基于改进最小生成树算法的配电网架规划	197
第22章	配电网架扩展规划	205
第23章	基于蒙特卡罗分析的配电网架规划方法比较	213
第24章	配电网架的不确定性规划	222
第25章	配电网架多阶段动态规划	234
第26章	配电网分段和联络开关安装位置的优化规划	246
第27章	配电网分区规划	252

附 录

附录1	文献 [371] 中规划算例的数据	261
附录2	文献 [400] 中西北某城市配电网规划算例数据	262
附录3	某城市配电网规划算例	263
参考文献		265

第 1 篇 配电网的模型化方法

第 1 章 配电网的数学模型

1.1 配电网的严格模型

一个典型的配电网如图 1-1 (a) 所示, 它由主变电站中压母线、中压母线进线开关 (用内外嵌套的方块表示)、中压母线分段开关 (用小方块表示)、中压出线开关 (一般认为是配电网的电源点, 用大方块表示)、馈线分段开关 (用实心圆圈表示)、联络开关 (用空心圆圈表示)、T 接点、配电变压器 (低压负荷)、高压负荷 (用箭头表示) 和补偿电容器等构成。凡代表开关的符号, 实心代表其处于合闸状态、空心代表其处于分闸状态。

在对配电网进行分析时, 可以采用中压母线进线开关的合、分状态来反映该母线的带电状态, 假设一般配电线路不考虑并联导纳, 并且对于一些比较短的支路可以忽略, 则典型配电网的严格数学模型如图 1-1 (b) 所示, 其中矩形块表示支路的阻抗。

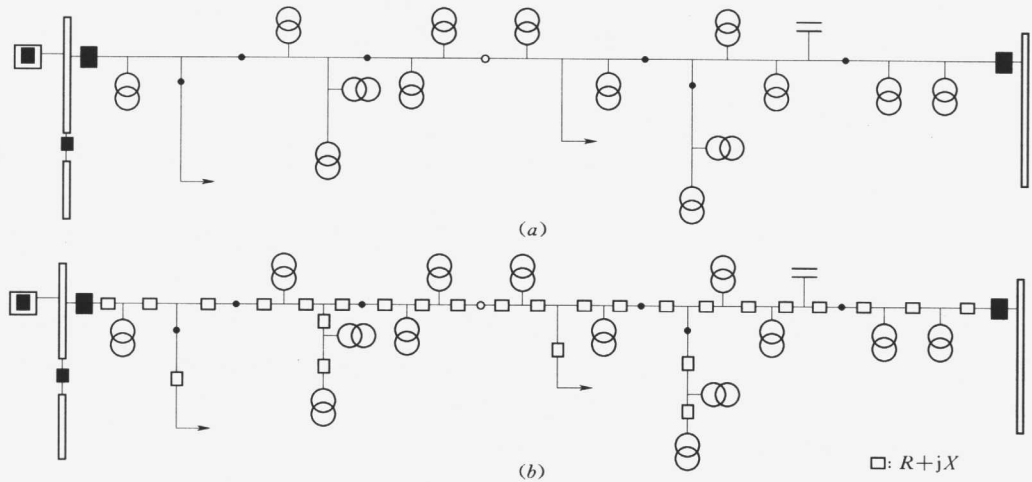


图 1-1 配电网的严格数学模型

(a) 典型的配电网; (b) 严格数学模型

将母线、母线进线开关、母线分段开关、电源点、馈线分段开关、联络开关、T 接点、配电变压器 (低压负荷)、高压负荷和补偿电容器等都当作节点, 将相邻节点间的支

路当作边,则整个配电网构成了一个图。将母线进线开关、母线分段开关、电源点、馈线分段开关和联络开关节点统称为开关节点,将配电变压器(低压负荷)、高压负荷和补偿电容器节点统称为负荷节点。

分别对一个可行模型的节点和边进行编号,并定义节点和支路的描述矩阵,描述节点和支路的参数及网络拓扑关系。

1. 配电网的节点描述矩阵

对于一个具有 N 个节点的配电网,定义 N 行 13 列的节点描述矩阵 A , 其中:

a_{i1} 描述节点 i 的类型: 其取值可以为 0、1、2、3、4、5 或 6, 分别表示该节点是馈线开关点、T 接点、电源点、母线节点、负荷节点、母线进线开关或母线分段开关。

a_{i2} 描述节点 i 的状态: 对于开关节点, 若 $a_{i2}=1$ 则表示该节点处于合闸状态, 若 $a_{i2}=0$ 则表示该节点处于分闸状态; 对于母线节点和 T 接点, a_{i2} 始终为 1; 对于负荷节点, 若 $a_{i2}=1$ 则表示该负荷投入, 若 $a_{i2}=0$ 则表示该负荷退出。

a_{i3} 、 a_{i4} 和 a_{i5} 描述和节点 i 相连接的元件: 对于电源点, a_{i3} 中存放与其相连的母线节点编号, a_{i4} 中存放与其相连的边(支路)的编号, a_{i5} 无意义, 可填 -1; 对于母线节点, a_{i3} 中存放其进线开关节点的编号, a_{i4} 中存放母线分段开关的编号, a_{i5} 无意义, 可填 -1; 对于母线进线开关节点, a_{i3} 中存放与其相连的母线节点编号, a_{i4} 和 a_{i5} 无意义, 可填 -1; 对于母线分段开关节点, a_{i3} 和 a_{i4} 中分别存放与其相连的母线的编号, a_{i5} 无意义, 可填 -1; 对于其他开关节点, a_{i3} 和 a_{i4} 中分别存放与其相连的边(支路)的编号, a_{i5} 无意义, 可填 -1; 对于 T 接点, a_{i3} 、 a_{i4} 和 a_{i5} 中分别存放与其相连的边(支路)的编号。

对于负荷节点, a_{i6} 和 a_{i7} 分别描述节点 i 供出的有功功率 P_L 和无功功率 Q_L ; 对于开关节点和母线节点, a_{i6} 和 a_{i7} 分别描述流过节点 i 的有功功率 P 和无功功率 Q 。

对于配电变压器(低压负荷)节点, $a_{i8} \sim a_{i13}$ 分别描述节点 i 的配电变压器的 4 个铭牌参数及额定功率和额定电压参数; 对于其他类型的节点, $a_{i8} \sim a_{i13}$ 无意义, 均填 -1。

2. 配电网的支路(边)描述矩阵

对于一个具有 M 条支路(边)的配电网, 定义 M 行 16 列的支路(边)描述矩阵 B , 其中:

b_{i1} 和 b_{i2} 分别描述支路(边) i 的两个端点的节点序号, 反映了配电网的边与节点的连接关系。

b_{i3} 和 b_{i4} 分别描述支路(边) i 的入点和出点的序号, 它描述了边的方向(即流过该边的潮流的方向), 此时的边是有向边(或称为“弧”), 反映了配电网的运行方式。如果某条边上无电(即该边是“孤岛”), 则相应的元素填 -1。

b_{i5} 和 b_{i6} 分别描述支路(边) i 的阻抗的模和相角。

b_{i7} 和 b_{i8} 分别描述流过支路(边) i 的电流的模和相角。

b_{i9} 和 b_{i10} 分别描述流过支路(边) i 的功率的模和相角。

b_{i11} 和 b_{i12} 分别描述支路(边) i 的损耗功率的模和相角。

b_{i13} 和 b_{i14} 分别描述支路(边) i 的入点处的电压的模和相角, 若无电则填 0。

b_{i15} 和 b_{i16} 分别描述支路(边) i 的出点处的电压的模和相角, 若无电则填 0。

在对配电网进行分析时,支路(边)描述矩阵 B 中的第 3 列和第 4 列元素是在节点描述矩阵 A 中的第 1、3、4 列和第 5 列元素以及支路(边)描述矩阵 B 中的第 1 列和第 2 列元素的基础上,根据 A 中的第 2 列元素的状态计算出来的,这个过程就是“网络拓扑分析”。

在对配电网进行分析时,支路(边)描述矩阵 B 中的第 7~16 列元素是在节点描述矩阵 A 中的第 1~5 列元素和支路(边)描述矩阵 B 中的第 1~6 列元素的基础上,根据 A 中的第 6~13 列元素的值计算出来的,这个过程就是“网络潮流计算”。

上述数学模型是配电网的单线图模型,为了对配电网进行三相分析,可对该模型进行扩充,本书不再赘述。

1.2 配电网的简化模型

在有些应用中,比如配电自动化系统的高级应用,一方面由于大量缺乏对负荷的测量数据,使得采用配电网的严格模型进行分析和计算面临着巨大的困难;另一方面,在诸如配电网安全分析等应用中,没有必要进行严格细致的分析和计算。因此,针对配电网的特点,文献 [1]~文献 [5] 建立了配电网的简化模型,即变结构耗散网络模型,充分利用现实中可以获得的有限量测数据反映配电网的主要运行指标,成功地应用在配电自动化和配电网安全分析中。

另外,即使在能够获得负荷数据的配电网规划、分析和优化等应用中,也可以采取简化措施,对配电网潮流进行降规模计算。

本节主要论述变结构耗散网络模型,而对于复杂配电网潮流的降规模计算的方法,将在第 7 章进行详细论述。

配电网的变结构耗散网络模型包括两个部分:变结构模型和耗散网络模型。

1.2.1 配电网的简化处理

配电网的变结构耗散网络模型将配电网看作是一种赋权图,将母线、开关节点和 T 接点(不包括各种负荷)当作节点,节点的权为流过该节点的负荷。将相邻节点间的配电馈线和负荷综合当作边(考虑其方向时称作“弧”),边的权即是该条边上所有供出的负荷之和。

对于图 1-1(a) 所示的配电网的变结构耗散网络模型如图 1-2 所示。注意,由于取消了负荷节点,因此必须补充一类新的节点类型:末梢点(用小空心圆圈表示)来反映馈线段的末梢。

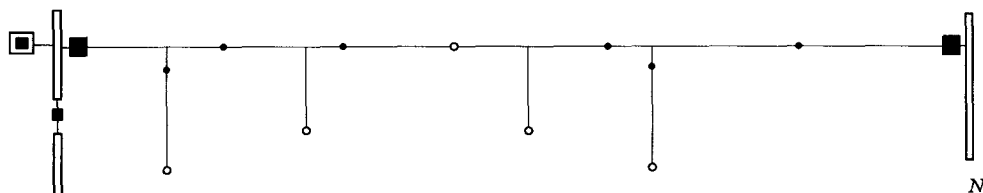


图 1-2 图 1-1 中配电网的变结构耗散网络模型

1.2.2 配电网的变结构模型

配电网的变结构模型描述网架结构和网络拓扑。例如，对于一个具有 N 个节点的配电网，可以定义 N 行 5 列的网基邻接表 DT 反映网架结构，即：

$$DT = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & d_{N3} & d_{N4} & d_{N5} \end{bmatrix}$$

其中： d_{i1} 描述节点 i 的类型，其取值可以为 0、1、2、3、4、5 或 6，分别表示该节点是馈线开关点、T 接点、电源点、末梢点、母线节点、母线进线开关节点和母线分段开关节点。

d_{i2} 描述节点 i 的属性：对于开关节点，若 $d_{i2}=1$ ，表示节点 i 的合、分状态被闭锁而不能改变；若 $d_{i2}=2$ ，表示节点 i 进行了甩负荷操作；若 $d_{i2}=3$ ，表示节点 i 禁止进行甩负荷操作；对于各种类型节点， $d_{i2}=4$ ，表示节点 i 过负荷； d_{i2} 的缺省值可填 -1，表示没有上述情形发生。

对于电源点，与其相连的母线的编号固定填写在 d_{i3} 中，而其另一侧相连节点编号填写在 d_{i4} 中；对于母线节点， d_{i3} 中存放其进线开关节点的编号， d_{i4} 中存放母线分段开关的编号；对于母线进线开关节点， d_{i3} 中存放与其相连的母线节点编号， d_{i4} 无意义，可填 -1；对于母线分段开关节点， d_{i3} 和 d_{i4} 中分别存放与其相连的母线的编号；对于其他节点， $d_{i3} \sim d_{i5}$ 描述和各节点邻接的节点的序号，例如节点 i 和节点 k 、 p 和 q 相邻接，则 $d_{i3}=k$ ， $d_{i4}=p$ ， $d_{i5}=q$ 。

在 DT 中的空闲的元素填 -1。

对于一个具有 N 个节点的配电网，可以定义 N 行 5 列的网形邻接表 CT 反映当前运行方式，即：

$$CT = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & c_{N3} & c_{N4} & c_{N5} \end{bmatrix}$$

其中： c_{i1} 描述节点 i 所处的状态，1 表示合、0 表示分。对于 T 接点和母线接点， c_{i1} 始终为 1；对于末梢点， c_{i1} 始终为 0。

c_{i2} 和 c_{i3} 分别表示以节点 i 为终点的有向边（即“弧”，其方向为相应馈线段上潮流的方向）的起点序号。

对于非母线节点， c_{i4} 和 c_{i5} 描述以相应的节点为起点的弧的终点序号。对于母线节点， c_{i4} 和 c_{i5} 无意义，填 -1。因为母线和其他节点之间的连接关系可以从相应节点的 c_{i2} 和 c_{i3} 中加以反映。

在 CT 中的空闲的元素填 -1。

若存在以节点 i 为起点、以节点 j 为终点的弧，则称节点 i 为节点 j 的父节点，称节点 j 为节点 i 的子节点。

若节点 i 是节点 j 的父节点，节点 j 是节点 k 的父节点，节点 k 是节点 m 的父节点，

则称节点 j 、 k 和 m 都是节点 i 的下游节点，称节点 i 、 j 和 k 都是节点 m 的上游节点。

1.2.3 配电网的耗散网络模型

配电网的耗散网络模型描述配电网的负荷分布。

用流过馈线开关的复功率表示节点的负荷，用边（馈线段）供出的复功率表示边的负荷。例如，对于一个具有 N 个节点的配电网，可以定义 N 行 4 列的复数负荷邻接表 ST 为：

$$ST = \begin{bmatrix} \dot{s}_{11} & \dot{s}_{12} & \dot{s}_{13} & \dot{s}_{14} \\ \dot{s}_{21} & \dot{s}_{22} & \dot{s}_{23} & \dot{s}_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{s}_{N1} & \dot{s}_{N2} & \dot{s}_{N3} & \dot{s}_{N4} \end{bmatrix}$$

其中： $\dot{s}_{ii}$ 描述流过节点 i 的负荷（复功率）； $\dot{s}_{i2} \sim \dot{s}_{i4}$ 描述以相应的节点为端点的边的负荷（复功率）；在表 ST 中的空闲位置的元素填-1。 ST 中的第 2 列至第 4 列元素的顺序和 DT 的第 3 列至第 5 列对应的边的顺序一致。

将复功率表示为有功功率和无功功率的形式，则有：

$$ST = PT + jQT = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N1} & p_{N2} & p_{N3} & p_{N4} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} & q_{N3} & q_{N4} \end{bmatrix}$$

其中： PT 和 QT 分别表示有功功率和无功功率邻接表。

将复功率表示为模和相角的形式，则有：

$$ST = LT \angle \theta T = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} & l_{14} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} & l_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{N1} & l_{N2} & l_{N3} & l_{N4} \end{bmatrix} \angle \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & \theta_{14} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \theta_{23} & \theta_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{N1} & \theta_{N2} & \theta_{N3} & \theta_{N4} \end{bmatrix}$$

其中： LT 和 θT 分别表示复功率的模和相角邻接表。

定义 N 行 4 列的额定负荷邻接表 ET 为：

$$ET = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{N1} & e_{N2} & e_{N3} & e_{N4} \end{bmatrix}$$

其中： e_{ii} 描述节点 i 的额定负荷； $e_{i2} \sim e_{i4}$ 描述以相应的节点为端点的边的额定负荷；在 ET 中的空闲位置的元素填 0.01。 ET 中的元素的顺序和 LT 中的元素的顺序一致。

定义 N 行 4 列的归一化负荷邻接表 $L_n T$ ，其中的元素分别等于 LT 中相应位置元素与 ET 中相应位置元素之比，反映了各个负荷的相对轻重程度，若 $L_n T$ 中某个元素大于 1.0 则表示相应的节点（开关）或边（馈线段）过负荷，在实际应用时可稍许留有余量。

1.3 配电网的分层模型

在一些应用中，对配电网建立一种分层的数据结构，会给计算提供许多方便。例如：
①采用东芝模式重合器与电压时间型分段器相互配合，实现配电网故障自动判断和隔离以及受故障影响的健全区域自动恢复供电的设计与应用中，需要对重合器和分段器的时限进行整定计算；②采用支路电流法（或前推回代法）进行配电网潮流计算时；③在需要按顺序恢复馈线段供电以进行故障处理或单相接地区域查找时。

1.3.1 层与间距的概念

即使是对于多供电途径的网格状配电网，通常也都是开环运行的。因此绝大多数配电网（包括辐射状网、环状网和网格状网）的运行方式都可以看作由许多以电源点为根、以末梢点和联络开关为终点的树组成的森林，对于这种辐射状的配电网可以建立分层模型，也即仅仅考虑电源点下游的部分，分层模型的最里层就是电源点，最外层为末梢点或联络开关。

在分层模型中，定义沿着潮流的方向，从一个开关节点 i 到另一个开关节点 j 所途径的开关节点数目 num_sw 再加上 1 为从开关节点 i 到开关节点 j 的间距（distance），记作：

$$\text{dis}(i, j) = \text{num_sw} + 1 \quad (1-1)$$

定义与节点 k 的间距为 m 的所有开关节点（如节点 $a, b, \dots, f$ ）处于以 k 为根的第 m 层（hierarchy），记作：

$$\text{hie}(a, b, \dots, f \parallel k) = m \quad (1-2)$$

定义第 $m-n$ 层中与第 m 层节点相连通的节点为第 m 层节点的上 n 层父节点，相应的第 m 层节点为第 $m-n$ 层相应节点的下 n 层子节点。

例如，对于图 1-3 所示的配电网，节点 11 是电源点，以其为根，节点 1、2、6、8、9、10、13、15 和节点 16 为开关节点，箭头方向为潮流方向。

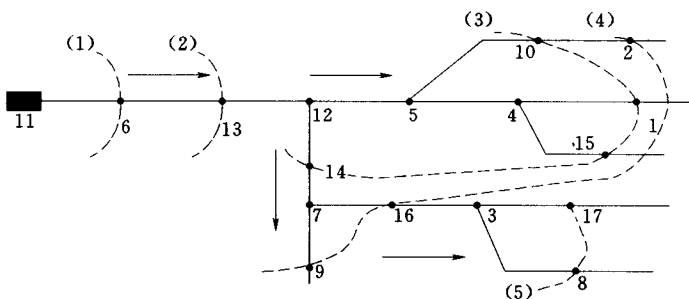


图 1-3 配电网的分层模型

该配电网共分 5 层（如括号内所示），即：

$$\text{hie}(6 \parallel 11) = 1; \quad \text{hie}(13 \parallel 11) = 2$$

$$\text{hie}(1, 10, 14, 15 \parallel 11) = 3$$

$$\text{hie}(2, 9, 16 \parallel 11) = 4$$

$$\text{hie}(8, 17 \parallel 11) = 5$$

并且节点 10 是节点 2 的上一层父节点, 节点 13 是节点 2 的上两层父节点, 节点 16 是节点 8 和节点 17 的上一层父节点, 节点 6 是节点 16 的上三层父节点。

1.3.2 配电网分层算法

对于一个配电网, 其分层过程可依照图 1-4 所示的框图进行, 其中 $H[i]$ 表示节点 i 所在的层号。

如图 1-4 所示, 分层算法的搜索是从各个根节点开始的, 为此要设置队列 Q 。当然所有根节点的层号均为 0, 因此在初始化时 $H[\text{根节点}] = 0$ 。在搜索过程中, 对于每一个既非末梢点又非 T 接点的节点, 都可看作是其子节点的根节点, 因此将它们逐渐补充至队列 Q 中。显然当所有的父节点的子节点的层号都确定之后, 也即队列 Q 为空时, 就完成了整个分层过程。

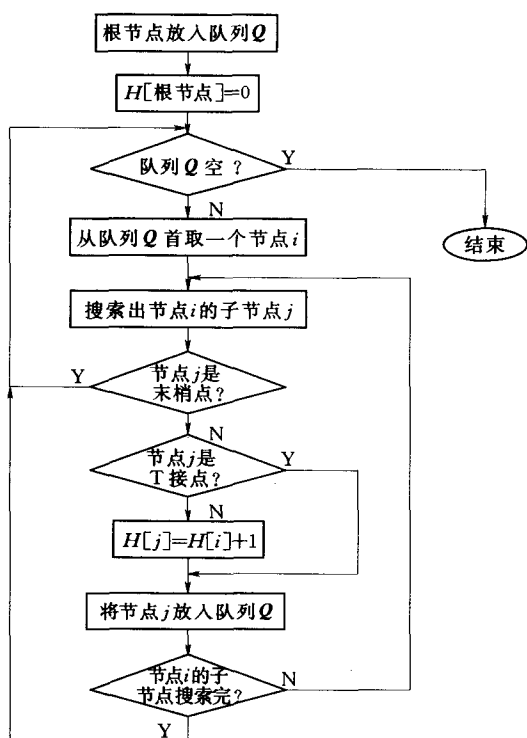


图 1-4 配电网分层的程序框图

1.4 基本拓扑分析

1.4.1 基形变换

对于一个给定的开环运行的 N 节点配电网, 实际上其网基邻接表 DT 是确定的, 而其开关节点的状态是变化的。每一组开关状态对应一种网形, 也即对应一个网形邻接表 CT 。根据配电网架结构 (DT) 和开关的当前状态 (CT 第 1 列) 求出配电网的运行方式 (CT 其余各列) 的过程, 称为基形变换。

开环运行的配电网的 CT 邻接表具有下列性质:

- (1) 处于分状态的节点只能作为弧的终点。
- (2) 处于合状态的节点的人度不大于 1。

上述性质是基形变换的依据。文献 [3] 给出了一个可行的基形变换流程, 本书不再赘述。

一个闭环运行的配电网在经过基形变换后, 将会出现至少一个处于合闸状态的节点的人度大于 1 的现象, 这也可以作为判断是否存在闭环的依据, 即:

[判据 1] 如果 CT 中至少存在一个处于合闸状态的节点的人度大于 1, 则一定有闭环存在。

此外还可以得出下列判据:

[判据 2] 如果 CT 中存在非母线进线开关的节点的入度为 0，则一定有无电“孤岛”存在。

[判据 3] 如果一个处于分闸状态的开关的入度为 2，则该开关为联络开关。

1.4.2 连通系及其分解

仅仅考虑电源点下游的部分（即不考虑通过母线及其进线开关和分段开关构成的相互连接关系），配电网中具有潜在连通关系的一个子网络称为一个连通系（Connected Domain）。

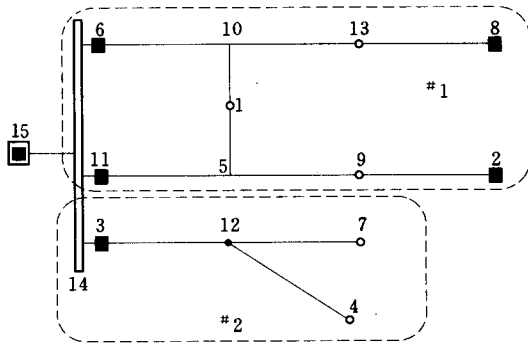


图 1-5 一个具有两个连通系的配电网

用 $CD = [i, j, \dots, k]$ 表示一个连通系，其中 $i, j, \dots, k$ 为该连通系中包含的节点，因此 CD 又称为该连通系的节点数组。

对于一个给定的配电网，从其网基结构邻接表 DT 中搜索出它的各个连通系、并得出相应的节点数组的过程称作连通系的分解。

文献 [3] 给出了一个可行的连通系分解流程，本书不再赘述。

对于如图 1-5 所示的配电网，它具有

两个连通系： CD_1 和 CD_2 。

$$CD_1 = [1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13], \quad CD_2 = [3, 4, 7, 12]$$

1.4.3 最小配电区域及其分解

配电网在线路中间经常出现 T 接分支，为此定义区域的概念。

区域是指相互连通的若干弧构成的子图，称流入该区域的弧为该区域的流入弧，称流出该区域的弧为该区域的流出弧。对于开环运行的配电网，在一个区域中仅存在一条流入弧。对于闭环运行的配电网，在一个区域中则可能存在多条流入弧。称流入弧的起点为该区域的始点或入点，称流出弧的终点为该区域的末点或出点；始点和末点统称为该区域的端点；称区域内的其他节点为该区域的内点。

如果一个区域的所有端点都是开关节点并且没有内点或者所有内点都不是开关节点，则称该区域为最小配电区域，用 $A(i, j, \dots, k)$ 表示，其中 $i, j, \dots, k$ 为该最小配电区域包含的节点，对于开环运行的配电网，节点 i 为入点。显然，区域是配电网运行方式调整的最小单元。实际上没有内点的最小配电区域就是一个馈线段（弧）。

文献 [4] 给出了一个可行的最小配电区域分解流程。

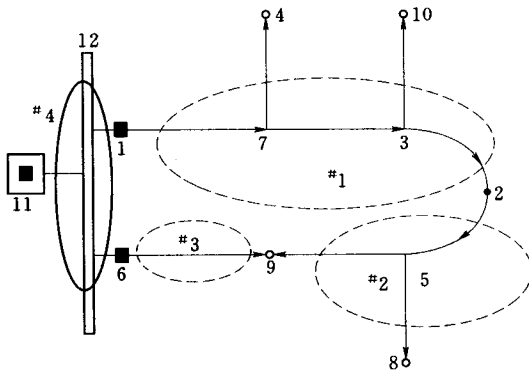


图 1-6 一个典型配电网及其最小配电区域划分

网, 具有 4 个最小配电区域, 其包含的节点分别为: $A_1\{1^*, 2, 3, 4, 7, 10\}$ 、 $A_2\{2^*, 5, 8, 9\}$ 、 $A_3\{6^*, 9\}$ 和 $A_4\{11^*, 12, 1, 6\}$, 其中带 “*” 号者为入点。

1.4.4 点区变换

已知配电网中各节点的负荷, 根据网形邻接表 CT , 可以计算出各个最小配电区域的负荷, 这个过程称为点区变换。

对于一个最小配电区域 A , 设 α 为其入点的集合, β 为其末点的集合, 则根据流过该最小配电区域的端点的负荷计算该最小配电区域的负荷 (即点区变换) 的表达式为:

$$\dot{s}_A = \sum_{i \in \alpha} \dot{s}_i - \sum_{j \in \beta} \dot{s}_j \quad (1-3a)$$

式中: $\dot{s}_A$ 表示最小配电区域 A 的负荷 (复功率); $\dot{s}_i$ 和 $\dot{s}_j$ 表示流过节点 i 和 j 的负荷 (复功率)。

对于开环运行配电网, 若节点 i 为最小配电区域 A 的入点, β 为其末点的集合, 则根据流过该最小配电区域的端点的负荷计算该最小配电区域的负荷 (即点区变换) 的表达式为:

$$\dot{s}_A = \dot{s}_i - \sum_{j \in \beta} \dot{s}_j \quad (1-3b)$$

根据式 (1-3b), 有:

$$p_A = p_i - \sum_{j \in \beta} p_j \quad (1-4)$$

$$q_A = q_i - \sum_{j \in \beta} q_j \quad (1-5)$$

1.4.5 区点变换

已知配电网中各个最小配电区域的负荷, 根据网形邻接表 CT , 可以计算出其各个端点的负荷, 这个过程称为区点变换。

对于一个节点 i , 假设其下游最小配电区域的集合为 φ , 则根据集合 φ 中的最小配电区域的负荷计算流过节点 i 的负荷 (即区点变换) 的表达式为:

$$\dot{s}_i = \sum_{A \in \varphi} \dot{s}_A \quad (1-6)$$

式中: $\dot{s}_A$ 表示最小配电区域 A 的负荷 (复功率); $\dot{s}_i$ 表示流过节点 i 的负荷 (复功率)。

根据式 (1-6), 有:

$$p_i = \sum_{A \in \varphi} p_A \quad (1-7)$$

$$q_i = \sum_{A \in \varphi} q_A \quad (1-8)$$

1.4.6 环及其分解

环 (loop) 是指在配电网的无向图模型上, 仅仅考虑电源点下游的部分 (即不考虑通过母线及其进线开关和分段开关构成的相互连接关系), 有可能形成闭环的路。它有两种形式: 一种是从配电网的一个电源点出发, 每个节点只经过一次, 到达另一个电源点的环, 这种环为第一类环; 第二种是从配电网的某个节点出发, 每个节点只经过一次, 又回