

基于邻接矩阵的配电网耦合点区域的分离

张宏, 郭宗仁

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350002)

摘要: 变结构耗散网络是一种新的配电网自动化算法, 能有效地实现配电网自动化的相关功能。由开关顶点负荷求弧负荷和耦合顶点负荷的点弧变换是整个算法的基础, 而进行点弧变换的关键就在于处理耦合点, 分离耦合点区域。该文提出了一种新的耦合点区域分离的算法。算法根据配电网拓扑结构形成的顶点邻接矩阵和构造的耦合点信息矩阵进行矩阵的相关布尔运算得到耦合点区域分离的判据矩阵, 根据判据矩阵很容易从复杂的配电网中确定耦合点区域的个数并将耦合点区域分离。

关键词: 变结构耗散网络; 耦合点区域; 邻接矩阵

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0011-04

0 前言

在文献[1]中, 作者从负荷的角度将配电网看作是一个耗散网络, 把配电网的馈线当作图的弧, 将断路器、重合器和分段开关当作图的开关顶点, 不可控和不可测的 T 接分支节点当作耦合点顶点。以此为基础, 作者建立了配电网的数学模型, 准确地体现了配电网中馈线的连接关系, 并能反映网络中流过开关的负荷以及各段馈线提供的负荷。在进行配电网故障区域定位的过程中, 只需要找到网络中过热弧就可以确定故障区域了。

配电网顶点的负荷很容易由装设在各个开关的 FTU 测量到并由通讯网络上报到配电中心 SCADA 系统。知道顶点负荷后就可以通过点弧变换来求出各条弧和耦合点的负荷。

点弧变换算法的关键在于处理耦合点^[1], 为此首先需要确定整个配电网含有的耦合点区域的个数, 再确定每个耦合点的区域中所含的开关顶点和耦合点顶点。文献[1]中给出了一种求耦合点区域的算法, 算法是基于顶点状态矩阵 T 及其镜像队列 T 和耦合队列 QO 的操作, 过程比较繁琐。本文提出了一种基于邻接矩阵的分离耦合点区域的算法, 通过一种既简单又有效的矩阵运算方法就可以很容易地分离出配电网的耦合点区域, 计算过程简单有效, 避免了复杂的队列操作。

1 配电网变结构耗散网络的数学模型

文献[1]中把配电网看作是一种变结构耗散网络, 建立了配电网的负荷数学模型。在这个模型中, 把开关看作是图的顶点, 具有“分”和“合”两种状

态, 把不可控和不可测的 T 接分支顶点看作是耦合点, 它只具有“合”的状态。

图 1 所示为典型配电网。

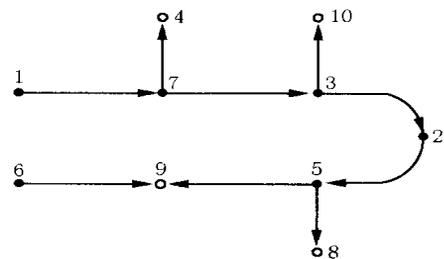


图 1 典型的配电网

Fig. 1 A typical distribution network

顶点 1、2、4、6、8、9、10 是开关顶点, 顶点 3、5、7 是耦合点顶点。

定义有 N 个顶点的配电网顶点状态矩阵 T 为 1 行 N 列矩阵 $T_{1 \times N}$, 即:

$$T_{1 \times N} = [t_1, t_2, \dots, t_N]$$

如果顶点 v_i 处于“合”的状态, 则 $t_i = 1$; 如果顶点 v_i 处于“分”的状态, 则 $t_i = 0$; 如果 v_i 是耦合点, 认为它的状态始终处于“合”, $t_i = 1$ 。

定义有 N 个顶点的配电网耦合点分布矩阵 O 为 1 行 N 列矩阵 $O_{1 \times N}$, 即:

$$O_{1 \times N} = [o_1, o_2, \dots, o_N]$$

如果顶点 v_i 是耦合点, 则 $o_i = 1$; 如果顶点 v_i 不是耦合点, 则 $o_i = 0$ 。

若图 1 中的配电网采用如图所示的运行方式, 开关顶点 9 为联络开关, 则

$$T_{1 \times 10} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$O_{1 \times 10} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

配电网开关顶点的负荷可由各开关的 FTU

测得。要建立配电网的负荷模型,就必须由这些测得的开关顶点负荷求出各条弧的负荷和耦合点的负荷,即进行点弧变换,这是变结构耗散网络中一个最重要的算法。

如图 1 中的配电网,开关顶点 1、2、6 的负荷可以由 FTU 测到,对于耦合点 3、5、7 和各条弧的负荷不能直接得到,就需要通过点弧变换由开关顶点负荷来求得。

点弧变换算法的关键在于处理耦合点,为此首先需要获得含耦合点的区域。图 1 所示的配电网比较简单,可以看出图中的两个耦合点区域为 $VP_1 = [v_1, v_7, v_4, v_3, v_{10}, v_2]$, $VP_2 = [v_2, v_5, v_8, v_9]$, 开关顶点 v_2 既是区域 VP_1 的末点,又是区域 VP_2 的始点^[1]。

2 用邻接矩阵 D 表示配电网拓扑结构

可以用邻接矩阵 D 来表示无向网络的拓扑结构的节点连接关系。如果图 G 中的两个顶点 v_m 和 v_n 之间存在一条边 e_k ,就说这两个顶点是邻接的,表示为 $v_m \text{adj } v_n$,说边 e_k 与顶点 v_m 和 v_n 相关联^[2]。邻接矩阵 D 中的元素可以定义如下:

$$d_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{顶点 } v_m \text{ 和 } v_n \text{ 之间存在边 } e_k \\ 0 & \text{顶点 } v_m \text{ 和 } v_n \text{ 之间不存在边 } e_k \end{cases}$$

把图 1 的配电网拓扑结构看作是一个无向图,则按照上面邻接矩阵的定义得到如下的邻接矩阵

$D_{10 \times 10}$:

$$D_{10 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

从上面邻接矩阵 $D_{10 \times 10}$ 可以知道两个相邻节点之间的连接关系。对于求解耦合点区域来说,就是要得到和耦合点相连的开关顶点所形成的区域,所以基于邻接矩阵 D 来分离耦合点区域是可行的,关键是要找到另外一个矩阵 G 来和邻接矩阵 D 作相应的运算,从而得到分离耦合点区域的判据矩阵 P。

3 分离耦合点区域的判据矩阵 P 的形成

首先定义布尔量的逻辑乘如下:

$1 \times 0 = 0, 0 \times 0 = 0, 0 \times 1 = 0, 1 \times 1 = 1$
定义布尔量的逻辑加如下:

$1 + 0 = 1, 0 + 1 = 1, 0 + 0 = 0, 1 + 1 = 1$
定义布尔量的逻辑异或(XOR)运算如下:

$$1 \text{ XOR } 0 = 1, 0 \text{ XOR } 1 = 1, \\ 0 \text{ XOR } 0 = 0, 1 \text{ XOR } 1 = 0$$

从分离的耦合点区域来看,若邻接矩阵中两个耦合点有相连接,那么它们同时属于一个区域,只需要找到和同在一个区域的耦合点相连接的开关顶点就可以了。基于这种思路和上面定义的布尔矩阵逻辑乘和逻辑加的运算,构造出一个基于耦合点的信息矩阵 G,利用信息矩阵 G 和邻接矩阵 D 的运算来得到判据矩阵 P。

将配电网中所有的开关顶点打开,则整个网络中只有耦合点顶点是处于“合”,图 1 配电网络变如图 2 所示。

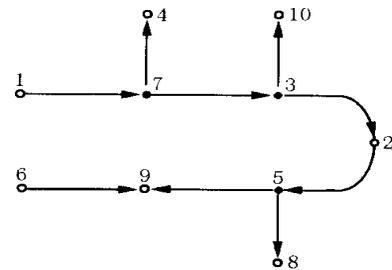


图 2 打开开关顶点后的配电网络
Fig. 2 Distribution network with switch off

那么就可以以图 2 配电网的拓扑结构为基础构造耦合点信息矩阵 $G_{10 \times 10}$ 。矩阵 $G_{10 \times 10}$ 中的元素定义为:

$$G_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{当 } i \neq j \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } i = j, \text{ 顶点 } i \text{ 不是耦合点} \\ 1 & \text{当 } i = j, \text{ 顶点 } i \text{ 是耦合点} \end{cases}$$

按照上面定义可得到图 2 的耦合点信息 $G_{10 \times 10}$ 矩阵:

$$G_{10 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将邻接矩阵 $D_{10 \times 10}$ 和耦合点信息 $G_{10 \times 10}$ 矩阵进行矩阵的布尔逻辑乘 $D_{10 \times 10} \times G_{10 \times 10}$ ^[3],就可以

得到分离耦合点区域的判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 为:

$$P_{10 \times 10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4 由分离耦合点区域的判据矩阵 P 得到耦合点区域

要得到分离的耦合点区域,首先需要知道整个配电网拓扑结构包含耦合点区域的个数 m ,才能建立 m 个耦合点区域队列来存储每个耦合点区域的顶点编号。对于简单的配电网当然可以用人工的方法来确定,但是对于拓扑结构比较复杂的网络来说,这个工作量是很大的。

对于图 1 所示的简单配电网,可以轻易看出其 2 个耦合点区域来,如图 3 中虚线所示:

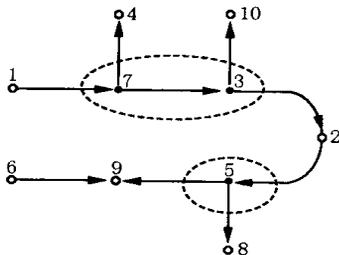


图 3 配电网耦合点区域示意图

Fig. 3 Coupling node area of distribution network

计算得到分离耦合点区域判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 后,可以由判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 来确定耦合点区域个数 m 。

由配电网的耦合点队列 $O_{1 \times 10} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 中元素为 1 的列下标可知耦合点为 $j = 3, 5, 7$ 。由下标 j 提取判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 的第 $i = 3, 5, 7$ 行和第 $j = 3, 5, 7$ 列得到耦合点邻接矩阵 $DO_{3 \times 3}$ 为:

$$DO_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对耦合点邻接矩阵 $DO_{3 \times 3}$ 作矩阵的传递闭包 $(DO_{3 \times 3} + I_{3 \times 3})^{3 [4]}$ 运算得到矩阵为 $CD-DO_{3 \times 3}$ 为:

$$CD-DO_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由传递闭包计算得到的矩阵 $CD-DO_{3 \times 3}$ 的秩 $r(CD-DO_{3 \times 3}) = 2$ 可知道配电网含耦合点区域个数 $m = 2$ 。因为矩阵 $CD-DO_{3 \times 3}$ 中第 1 行和第 3 行属于同一个连通域,所以耦合点 3, 7 属于一个耦合点区域,耦合点 5 属于一个耦合点区域。即两个耦合点区域中所含的耦合点分别为 $VP_1 = [7, 3], VP_2 = [5]$ 。

确定了耦合点区域的个数,把耦合点分别存入所属的耦合点区域队列 VP 后,就只要把每个耦合点区域中与耦合点相连接的开关顶点分别存入相关的耦合点区域队列 VP 即可得到最终的耦合点区域队列。

取配电网的耦合点队列 $O_{1 \times 10} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 中元素为 0 的列下标可知开关顶点为 $j = 1, 2, 4, 6, 8, 9, 10$ 。由 j 提取判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 的第 $i = 1, 2, 4, 6, 8, 9, 10$ 行中为 1 的元素 $p_{17}, p_{23}, p_{25}, p_{47}, p_{85}, p_{95}, p_{10,3}$ 。将这些元素与它们在判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 中对称的元素分别作异或运算,若结果为 1 则说明这些元素的行下标和列下标确定的顶点是属于同一个耦合点区域,把它们的顶点编号存入相应的耦合点队列。例如 $p_{17} = 1$,在判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 中找到对称元素 $p_{71} = 0, p_{17} \text{ XOR } p_{71} = 1$,那么开关顶点 1 与耦合点 7 属同一区域,把开关顶点 1 存入耦合点区域队列得到 $VP_1 = [7, 1]$ 。

因此可以得到两个耦合点区域队列:

$$VP_1 = [7, 3, 1, 2, 4, 10]$$

$$VP_2 = [5, 2, 8, 9]$$

5 结论

从前面的计算过程和由分离耦合点区域的判据矩阵 $P_{10 \times 10}$ 来分离配电网的耦合区过程来看,计算过程简单,能很容易从判据矩阵得到耦合点区域。

从邻接矩阵 D 和构造的耦合点信息矩阵 G 的布尔相乘得到的判据矩阵 P 可以看出,若邻接矩阵中两个耦合点 i, j 之间是相连的,在判据矩阵 P 中有 $p_{ij} = p_{ji} = 1$,那么从判据矩阵中提取耦合点所在的行和列作传递闭包就可以确定耦合点的相互连通关系,从而确定耦合点区域的个数。

属于同一个耦合点区域的开关顶点 i 和耦合顶点 j 在判据矩阵 P 中对应的元素 p_{ij} 和 p_{ji} 的元素作异或运算,必然可以得到 $p_{ij} \text{ XOR } p_{ji} = 1$ 。这是因为在构造耦合点信息矩阵 G 时是将所有的开关顶点打开,其状态为 0,而耦合顶点总是合的,其状态为 1,它们的状态正好互为相反。所以由邻接矩阵 D 和耦合点信息矩阵 G 作矩阵的布尔逻辑相乘得到的判据

矩阵 P 中 p_{ij} 和 p_{ji} 必互为相反的布尔量,这也就是可以用判据矩阵 P 来得到的属于同一个耦合点区域的开关顶点 i 和耦合顶点 j 的依据。

参考文献:

- [1] 刘健(LIU Jian). 变结构耗散网络——配电网自动化新算法 (Structure Variable Dissipated Network—New Algorithm to Distribution System Automation) [M]. 北京:中国水利水电出版社(Beijing:China Hydro-electric Power Press),2001.
- [2] 陈惠开(CHEN Hui-kai). 应用图论 (Applied Graph Theory) [M]. 北京:人民邮电出版社(Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House),1990.
- [3] 刘健,倪建立,杜宇(LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu). 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法 (A Unified

Matrix Algorithm for Fault Section Detection and Isolation in Distribution System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems),1999,23(1): 31-33.

- [4] Swamy M N S, Thulasiraman K. 图、网络与算法 (Graphs, Networks and Algorithms) [M]. 左垵,译 (ZUO Kai, Trans). 北京:高等教育出版社(Beijing:Higher Education Press),1998.

收稿日期: 2003-07-14; 修回日期: 2003-08-16

作者简介:

张宏(1976-),男,硕士研究生,研究方向为配电网馈线自动化;

郭宗仁(1944-),男,教授,研究方向为人工智能在电力系统的应用。

Separating coupling node area from distribution network based on adjacency matrix

ZHANG Hong, GUO Zong-ren

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Structure variable dissipated network is a new algorithm which can realize distribution automation efficiently. The key process of the algorithm, called nodes to arcs transforming, is based on the calculation of coupling nodes loads and arcs loads from the loads of switch nodes. Getting the coupling node area separated is the most important step in this process. This paper presents a new method, which combines the adjacency matrix of distribution network and the information matrix of coupling nodes to get the criterion matrix. Thus it is easy to determine the number of coupling nodes area and to separate them from distribution network.

Key words: structure variable dissipated network; coupling node area; adjacency matrix

(上接第7页 continued from page 7)

- [4] 吕世荣,等(L ü Shi-rong, et al). 次同步谐振分析中复转矩系数与特征值之间的关系 (Relationship between Complex Torque Coefficients and Eigenvalues in Subsynchronous Resonance Analysis) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems),1999, 23(3):16-22.
- [5] Pai M A. Power System Stability [M]. Amsterdam North Holland Publishing Company,1981.
- [6] 四川大学数学系教研组 (Maths Department Teaching and Research Group, Sichuan University), 高等数学(物理专业用) (Higher Mathematics, for Physics) [M]. 北京:人民教育出版社(Beijing: People Education Press), 1979.

- [7] 余耀南(YU Yao-nan), 动态电力系统 (Dynamic Power System Analysis) [M]. 何大愚,等译 (HE Da-yu, et al Trans). 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1985.

- [8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖(NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin). 动态电力系统的理论和分析 (Theory and Analysis of Dynamic Power Systems) [M]. 清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 2002.

收稿日期: 2003-03-18; 修回日期: 2004-01-04

作者简介:

李吉芳(1965-),男,副教授,在读博士生,主要研究方向为非线性动力系统的分岔及稳定性分析和固体实验力学。

Complex torque coefficients method extended to the rectification of multi machine power systems

LI Jifang

(Dept. of Mechanics and Engineering Measurement, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The paper analyzes the process of complex torque coefficients method, and points out the limitation of traditional method in multi-machine power systems. A new conception of complex torque method is presented, a universal criterion of SSR is derived, and the rotor angle increment is solved by equations. Based on IEEE SSR, the system of two-generator is studied by eigenvalue analysis and complex torque method. And the results show that the interaction of generators mostly influence low frequency region, and a universal criterion of SSR can reflect true phenomena of multi-machine systems.

Key words: multi-machine power systems; subsynchronous resonance; eigenvalue analysis; complex torque method