文章编号:1000-582X(2002)02-0071-04

基于分层模型的配电网拓扑辨识*

林景栋,曹长修,张帮礼
(重庆大学 自动化学院,重庆 400044)

摘 要:传统的电网模型主要描述网络元件和网络元件联结,其网络模型最终要解决的问题是在某一输入下的输出响应情况。而配电网的网络拓扑描述不仅要表示出各顶点之间的联结关系,而且要描述出当开关状态改变时,其运行网络结构的变化及对应参数的变化。同时配电网中存在T接点、分支,使配电网的负荷分配、网络重构、恢复供电等功能采用图算法难以实现全局最优。基于分层的拓扑模型不仅可以有效地辨识处理区域与分支,而且采用分层拓扑模型可以方便地对配电网各顶点进行状态估计,从而为配电网图算法的解实现全局最优提供了强有力的拓扑分析方法。

关键词:配电自动化;数学模型;图算法;分层模型
中图分类号:TM 726 **文献标识码**:A

配电自动化的基本功能包括在配电网正常运行时,监视配电网的负荷分配情况,并通过改变配电网的运行方式,达到负荷优化分配的目的;在故障发生后,隔离故障区段,并且在恢复健全区段供电时,采取最优的恢复策略。即故障定位的功能是要确定哪几个顶点之间有故障,显然这几个顶点应该是相邻的或是一个区域的,因而需要判断哪些顶点是相邻的,在相邻的顶点之间又有哪些顶点是故障[1];网络重构是要确定一组开关状态,使网络结构在这组开关状态的作用下,网络运行状态达到最优,同样需要知道各个开关在网络中的位置以及开关之间的相互联结关系[2]。因此这些功能的实现算法不仅包含配电网的拓扑结构描述和状态变量描述,而且必须将这两方面有机地结合起来。一个好的描述模型将有助于功能算法快速、方便地实现。文献[3]使用节点——支路关联矩阵描述模型,简化了电力系统调度员培训真系统和电力系统状态估计算法;文献[4]采用邻接矩阵描述配电网各顶点之间关系,加快了神经网络的故障定位算法;文献[5]采取设备分层模型,实现了配电网的快速故障定位。

配电网中经常出现T接点,T接点既不可控又不可测。与T接点相连的顶点组成的区间称为区域[6],由于T接点不可控,所以区域内的负荷是无法分割的;配电网中一般存在末梢点,从末梢点到区域顶点的支路称为分支,组成分支的各段弧虽然可控,但各段弧到源点却只有一条路径,因此在正常运行状态下,分支内的负荷也是不应分割的,而且分支必然属于某个区域。因而在实现负荷优化、恢复供电、网络重构功能时,区域内的负荷及区域所属分支的负荷均应作为一个整体考虑,是不可分割的。

配电网的拓扑模型不仅要描述出各顶点的邻接关系,而且也要描述出各顶点间的路径关系;而传统的电网模型虽然也描述网络元件的联结关系,但它主要是体现基尔霍夫定律,同时传统的电网模型侧重研究电网的功能,而不涉及电网拓扑的变化。因此传统的电网模型不适用于配电自动化,笔者在对配电网中区域、分支进行拓扑辨识的基础上,提出了基于分层的配电网拓扑模型。

1 配电网的分层拓扑模型

1.1 配电网分层的原理

对于 N 顶点的配电网 $D(V,E)$,其邻接矩阵 $C(c_{ij})_{N\times N}$ 为N行N列矩阵,若顶点 v_i 与v_j之间存在一条边 $c_{ij}=c_{ji}=1$,否则 $c_{ij}=c_{ji}=0$;$c_{ii}=0$。由于邻接矩阵 $C(c_{ij})_{N\times N}$ 的元素 c_{ij} 表示顶点v_i 到v_j 长度为1的通路数目;而 $C^k=(c_{ij}^{(k)})_{N\times N}$ 的元素$c_{ij}^{(k)}$ 表示顶点v_i 到 v_j 长度为k的通路数目。利用邻接矩阵所具有的这种特性,就可以表示出某两个顶点之间通过了几条边间接地联结在了一起,从而得出配电网的分层模型。

* 收稿日期:2001-09-18
作者简介:林景栋(1966-),男,福建宁德人,重庆大学自动化学院博士研究生。主要从事变电站综合自动化系统和配电网自动化系统、人工智能在电力系统中应用的研究。

定义　配电网的分层拓扑模型是以某一源点(或末梢点)为基点,按距该基点的长度实现拓扑分层的模型。

定义　配电网分层拓扑辨识矩阵:

$A_k = (a_{ij}^{(k)})_{N\times N}$,其元素 $a_{ij}^{(k)}$ 为:

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} c_{ij}^{(k)} & c_{ij}^{(k)} = 1, i \neq j, k = 1,\cdots,N-1 \\ 0 & c_{ij}^{(k)} \neq 1, i \neq j, k = 1,\cdots,N-1 \\ 0 & i = j, k = 1,\cdots,N-1 \end{cases} \tag{1}$$

利用矩阵 A_k 就可以依次求出距离某一源点(或末梢点)长度为 1,2,3...的顶点,从而实现分层拓扑描述。

1.2　配电网拓扑分层的算法

定义　基点矩阵 $F_i = (f_{1j})_{1\times N}$ 为以顶点 v_i 为基点的基点矩阵,f_{1j} 中只有一个元素为 1,其余元素均为 0。

利用基点矩阵 F_i 与配电网分层拓扑辨识 A_k 矩阵就可以求出该基点对应的分层拓扑模型 y_i。

$$\begin{cases} \text{第 1 层} & y_{i1} = F_i = (f_{11}\quad f_{12}\cdots f_{1N}) \\ \text{第 2 层} & y_{i2} = F_i \cdot A = (f_{21}\quad f_{22}\cdots f_{2N}) \\ \quad\vdots & \\ \text{第 } N \text{ 层} & y_{i,N} = F_i \cdot A_{N-1} = (f_{N1}\quad f_{N2}\cdots f_{NN}) \end{cases} \tag{2}$$

分层模型中元素 $f_{ij} = 1$,表示第 i 层的顶点为 v_j,因此从分层模型就可知道该基点的分层拓扑情况。

1.3　基于分层模型的顶点负荷算法

在已知各段弧的负荷以及开关状态的情况下,利用源点的分层拓扑模型,可以估计出各顶点的负荷。

定义　顶点状态矩阵为 $T = (t_i)_{1\times N}$,当顶点合闸时 $t_i = 1$;当顶点分闸时 $t_i = 0$。

定义　配电网的负荷矩阵为 $L = (l_{ij})_{N\times N}$,其元素 $l_{ij}(i \neq j)$ 为弧 h_{ij} 对应的负荷,l_{ii} 为顶点的负荷。

配电网顶点负荷的辨识问题可以描述为:已知配电网各弧的负荷 l_{ij},并已知配电网的末梢点及各开关的状态,求解各顶点的负荷 l_{ii} 大小。

分层拓扑矩阵描述了各顶点顺序关系,而邻接矩阵则表达了各顶点的邻接关系,因此利用分层拓扑矩阵和邻接矩阵既可了解各层的顶点又可了解上下顶点的连接关系。而底层一般为末稍点,其顶点负荷已知,因此利用反向推理,可以求出上一层的负荷,其计算公式为:

$$l_{f_{ij}} = f_{ij}\left[\sum_{k=1}^{N}(l_{f(i-1)\cdot k} \cdot t_k + l_{jk}) \cdot c_{jk}\right] \tag{3}$$

按上式依次逐层推算,直到第 1 层,计算结束,则各顶点负荷为:

$$l_{ii} = \sum_{i=1}^{N} l_{ij} \tag{4}$$

而利用正向推理,则可以直接求出源点的负荷,其计算公式为:

$$l_{f_{1j}} = f_{1j} \cdot t_j \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{N} f_{2k} \cdot c_{jk} \cdot l_{jk} + \\ \sum_{m=2}^{N-1}\sum_{k=1}^{N} f_{mk} \cdot t_k \cdot \left\{\sum_{i=1}^{N} f_{(m+1)i} c_{ki} \cdot l_{ki}\right\} \end{bmatrix} \tag{5}$$

利用反向推理公式,可以很方便地求出顶点状态变化后的各顶点负荷。在求解过程中,不仅可以知道各顶点负荷,而且知道各顶点负荷的组成过程。但实际问题经常是对多源点配电网,在已知弧负荷的情况下,如何确定开关状态,使各源点的负荷分配最优,或确定网络重构的最优方案。在这优化过程中,同一区域或同一分支内的所有负荷只能由一个源点来供电,而不可由多个源点分别提供,为此,须对上述分层拓扑模型进行完善。

2　配电网区域的辨识

2.1　配电网区域的表示及负荷的计算

T 接点的度大于 2,而其他顶点的度均小于或等于 2,因此从邻接矩阵 $C(c_{ij})_{N\times N}$ 可以判断出 T 接点,其判据为:

$$\deg\left(\sum_{j=1}^{N} c_{ij}\right) > 2 \quad \text{则顶点 } v_i \text{ 为 T 接点} \tag{6}$$

若顶点 v_i 为 T 接点,则区域可以描述为

$$p_i = (c_{i1}\quad c_{i2}\quad \cdots\quad c_{iN}) \tag{7}$$

区域负荷由 $p_i = (c_{i1}\quad c_{i2}\quad \cdots\quad c_{iN})$ 所确定的 3 条弧的负荷决定,计算式为:

$$l_{p_i} = \sum_{j=1}^{N} c_{ij} \cdot l_{ij} \tag{8}$$

2.2　考虑区域后的配电网源点负荷算法

对区域而言,只要区域入口开关合上,则区域内的所有弧负荷均由该源点供电,其负荷无法分割。

定义　T 接点矩阵 $W = (w_i)_{1\times N}$,若 v_i 为 T 接点,则 $w_i = 1$;否则 $w_i = 0$。

定义　区域负荷矩阵为 $L_p = (l_{p_i})_{1\times N}$,当 v_i 为 T 接点,则 $l_{p_j} = l$;否则 $l_{p_j} = 0$。

只有区域的入口开关合上时,区域的负荷才组合上去;而其它情况下,区域的负荷均不组合,而且不管

何种情况，区域内的弧负荷均不再组合。基于此，在考虑区域辨识的情况下，源点负荷的正向推理算式为：

$$l_{f_{1j}} = f_{1j} \cdot t_j \Big\{ \sum_{k=1}^{N} f_{2k} \cdot [c_{jk} \cdot (1 - w_j - w_k) \cdot l_{jk} + c_{jk} \cdot w_k \cdot l_{jk}] + \sum_{m=2}^{N-1} \sum_{k=1}^{N} f_{mk} \cdot t_k \cdot \Big\{ \sum_{i=1}^{N} f_{(m+1)i} [c_{ki} \cdot (1 - w_k - w_i) \cdot l_{ki} + c_{ki} \cdot w_i \cdot l_{P_i}] \Big\} \Big\} \tag{9}$$

3　配电网分支的辨识

3.1　配电网分支的表示及负荷的计算

定义　分支是指从末梢点到区域顶点的一条支路。显然这条路径上的所有负荷也只能由一个源点来供电。

定义　末梢点矩阵 $\boldsymbol{E} = (e_i)_{1\times N}$，若 v_i 为末梢点，则 $e_i = 1$，否则 $e_i = 0$。

每个分支的辨识是从末梢点开始，选定一个末梢点，以末梢点为基点，求其分层模型。显然分支中各层的顶点应该只有一个，当某一层中的顶点多于一个，则该层已不属于该分支。而该层有两个顶点，则前一层必定为T接点，因此通过判断哪一层最先出现接点，则可知该分支到那里为止。即一个分支的辨识算法步骤如下：

1) 从第1层开始计算，令层数 $m = 1$；

2) 求出第 m 层的分层顶点，从 $i = 1$ 到 N 逐个计算该层是否包含其他分支顶点，若有则自动修正，其修正算法为 $f_m = f_m \cdot (f_m \oplus b_i)$；

3) 计算该层的结束特征 $u_m = \sum_{i=1}^{N} f_m \cdot (f_m - bt_i)$，若 $u_m = 0$，则分支到此层为止，从 $i = 1$ 到 N 逐个寻找该层中包含哪个耦合点，并自动修正该耦合点在分支辨识中的状态，其修正算法为 $bt_i = f_m \oplus bt_i$，进入步骤4)；若 $u_m \neq 0$ 则分支还未结束，$m = m + 1$，又回到步骤2)；

4) 分支到 m 层为止，此时第 m 层的顶点必为耦合点。设 $f_{mj} \neq 0$，即顶点 v_j 为T接点，用 $\boldsymbol{y}_{B_j}$ 来表示该分支的分层拓扑模型，并定义该分支顶点为

$$\boldsymbol{B}_j = \sum_{i=1}^{m} f_i = (b_1 \quad b_2 \cdots b_N) \tag{10}$$

若 $b_i = 1$，则顶点 v_i 属于该分支，否则不属于。

该分支对应负荷可按下式推算出来：

$$l_{B_j} = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{k=1}^{N} f_{ik} \cdot t_k \Big\{ \sum_{n=1}^{N} f_{(i-1)n} \cdot c_{kn} \cdot l_{kn} \Big\} \tag{11}$$

3.2　考虑分支后的配电网源点负荷算法

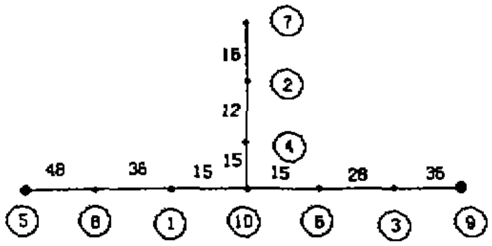
分支必然与某一区域有关，只要该区域的入口顶点合上，则该区域连同对应的分支负荷必然一同挂上源点。

定义　分支负荷矩阵为 $\boldsymbol{L}_B = (l_{B_i})_{1\times N}$，当 $b_i = w_i = 1$ 时，$l_{B_i} = l_{B_i}$；否则 $l_{B_i} = 0$。

定义　区域分支负荷矩阵为 $\boldsymbol{L}_{BP} = (l_{BP_i})_{1\times N}$，$l_{BP_i} = l_{B_i} + l_{P_i}$。

源点负荷的正向推理算式为：

$$l_{f_{1j}} = f_{1j} \cdot t_k \Big\{ \sum_{k=1}^{N} f_{2k} \cdot [\boldsymbol{c}_{jk} \cdot (1 - b_k)(1 - w_j - w_k) l_{jk} + \boldsymbol{c}_{jk} \cdot w_k \cdot l_{BP_k}] + \sum_{m=2}^{N-1} \sum_{k=1}^{N} f_{mk} \cdot t_k \Big\{ \sum_{i=1}^{N} f_{(m+1)i} [\boldsymbol{c}_{ki} \cdot (1 - w_k - w_i) \cdot l_{ki} + \boldsymbol{c}_{ki} \cdot w_i \cdot l_{BP_i}] \Big\} \Big\} \tag{12}$$



①— 顶点编号　数据 — 弧负荷

图1　某双源点配电网

4　算例

已知图1所示双源点配电网源点矩阵 $\boldsymbol{Z} = (0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0)$ 和末梢点矩阵 $\boldsymbol{E} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)$

则以 V_5 为基点的分层拓扑模型为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{y}_{51} = (0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ \boldsymbol{y}_{52} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0) \\ \boldsymbol{y}_{53} = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ \boldsymbol{y}_{54} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1) \\ \boldsymbol{y}_{55} = (0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ \boldsymbol{y}_{56} = (0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ \boldsymbol{y}_{57} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0) \end{cases}$$

以 V_9 为基点的分层拓扑模型为：

$$\begin{cases} y_{91} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0) \\ y_{92} = (0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ y_{93} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ y_{94} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1) \\ y_{95} = (1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0) \\ y_{96} = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0) \\ y_{97} = (0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0) \end{cases}$$

利用区域和分支的辨识,可以求出:

T接点矩阵 $W = (0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1)$

区域负荷矩阵 $L_p = (0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,45)$

分支矩阵 $B = (0\,1\,0\,1\,0\,0\,1\,0\,0\,0)$

分支负荷矩阵 $L_B = (0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,28)$

区域综合负荷矩阵 $L_{BP} = (0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,73)$

若已知开关状态矩阵 $T = (1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1)$,利用正向推理可以得出源点负荷 $l_{55} = 157$, $l_{99} = 64$,利用反向推理可以求出各顶点负荷为 $L_u = (73\ \ 16\ \ 28\ \ 157\ \ 0\ \ 0\ \ 109\ \ 64\ \ 58)$。

5 结论

配电网的拓扑分层模型,在已知开关状态的情况下,可以快捷估计各顶点的负荷大小及负荷组成情况;可以方便有效地辨识配电网中的区域和分支,并将区域与分支的负荷有机地集合于一体。配电网的拓扑分层模型,为配电网利用最优化原理进行网络优化提供了强有力的拓扑分析方法。

参考文献:

[1] 林景栋,曹长修,张帮礼,等. 基于拓扑辨识的配电网故障定位算法[J].重庆大学学报,2001,24(5):51-54.

[2] AOKI K, ICHIMORI T, KANEZASHI M. Normal state optimal load allocation in distribution systems[J]. IEEE Transaction on PWRD, 1987,2(1):147-153.

[3] 王湘中,黎晓兴. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J].电网技术,2001,25(2):10-12.

[4] 顾雪平,张文勤,高曙,等. 基于神经网络和元件关联分析的电网故障诊断[J].华北电力大学学报,1999,26(2):12-17.

[5] 束洪春,王晶,葛耀中. 基于故障投诉电话信息的配电网故障诊断方法[J].电力系统自动化,2000,24(11):39-41.

[6] 刘健,程红丽. 配电网的模型化方法[J].西安交通大学学报,2000,34(10):10-14.

Topology Identification of Distribution Networks Based on Hierarchical Model

LIN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Traditional model of distribution networks mostly research the response of input excitation, by describing elements and connections of elements for distribution networks. When the states of vertexes in distribution networks have changed, the connections of elements transformation. Owning to the mutual couplings and branches of distribution networks, it is hard to achieve the global optimization for load balancing, reconfiguration and restoration after fault by nomograph. A new model based on hierarchical model is presented. This model can be employed to identify the zone and branches efficiently and offer a cogent topological analysis method for the global optimization. The test result shows the effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution automation system; mathematical model ; nomograph ; hierarchical topologic

(责任编辑 张 苹)