

独立电力网络拓扑分析方法及其在故障恢复中的应用

杨秀霞¹, 张晓锋², 张 毅¹

(1. 海军航空工程学院 自动控制系, 山东 烟台 264001;

2. 海军工程大学 电气工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 根据独立电力网络的结构特点, 定义了一种实用的供、配电网设备模型, 包括电源、负载及线路模型, 给出了用于网络拓扑在线分析时的关联矩阵形成新方法。将拓扑分析方法应用于各类设备的故障跟踪中, 结合对全局网络的简化分析, 识别故障时的受影响元件。根据故障后各支路状态, 对故障进行处理, 为系统的故障恢复做好准备。实际网络管理系统运行情况表明, 该算法能够准确、可靠地描述及跟踪系统网络的拓扑结构。

关键词: 独立电力网络; 拓扑分析; 故障跟踪; 故障处理

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0010-05

0 引言

独立电力系统主要用于一些对供电连续性要求非常高的重要部门及系统的供电, 如船舶^[1]、飞机^[2]等的电力系统及重要企事业单位的供电系统。随着信息化技术的飞速发展, 对独立电力网络的运行进行管理成为必要和可能, 并且具有重要的实际意义和应用前景。

在对网络进行调度的过程中, 迫切需要一种对供、配网络进行有效、科学管理的方法, 而网络运行管理的关键技术问题之一就是要能准确、可靠地分析电网的拓扑结构。

目前, 对独立电力网络运行管理进行研究的文献还比较少。区别于陆地大电网, 独立电力系统的供、配电网距离比较近, 且电压等级相差不大, 整体电压比较低, 因此要统一考虑; 而陆地电力系统的供、配电网是分别考虑的^[3-5], 对其进行管理时采用的网络拓扑识别方法不再适用于独立电网。

本文从独立电力网络的结构特点出发, 在研究电网关键设备及其属性的基础上, 提出了一种实用的电网设备模型, 在此基础上给出了网络拓扑分析算法, 将其应用于各类设备的故障跟踪及处理中, 结合对全局网络的简化分析, 将故障时的受影响元件简明、清晰地分析出来, 同时给出了故障元件对后续系统计算的影响及采取的相应措施。实际网络管理系统运行情况表明, 此算法能够准确、可靠地描述及跟踪系统网络的拓扑结构, 为系统的故障恢复做好了准备。

1 供、配电网设备模型

独立电力系统如图 1 所示。图中 G 为发电机; L 为负载; Z 为母线; C 为分配电板; $\updownarrow$ 为转换开关; l 为跨接线; F 为馈线连接线; 虚线表示负载的备用供电路径。

发电机等通过母线向各级配电装置及负载供电, 一些重要负载通过转换开关可两路备用供电, 系统网络主要由电站、电动机、静止负载、馈线及各种开关组成, 其中馈线又分为从母线及各级配电板到负载的馈线连接线和电站间的跨接线, 各电站又由几台发电机并联组成。整个供、配电网可定义为

$$D = \{ G_i, L_j, K_k, T_l \mid i = 1, 2, \dots, d; j = 1, 2, \dots, h; k = 1, 2, \dots, r; t = 1, 2, \dots, g \} \quad (1)$$

G, L, K, T 分别表示电网中发电机、负载、馈线及开关; d, h, r, g 则分别表示其数量。

为了简化系统的分析并且实现对网络拓扑的跟踪, 对开关的开、断属性反映到其所连接的设备中, 将其他设备都作为单个支路, 且加入是否受损标识, 将母线及各级配电板看作节点, 对采用两路供电的负载用两条支路表示。为进一步描述系统网络, 将组成网络的设备模型统一定义为

设备名

{

编码;

类别;

支路编号;

设备编号;

关联属性;

管理属性;

元件是否受损标识;

}

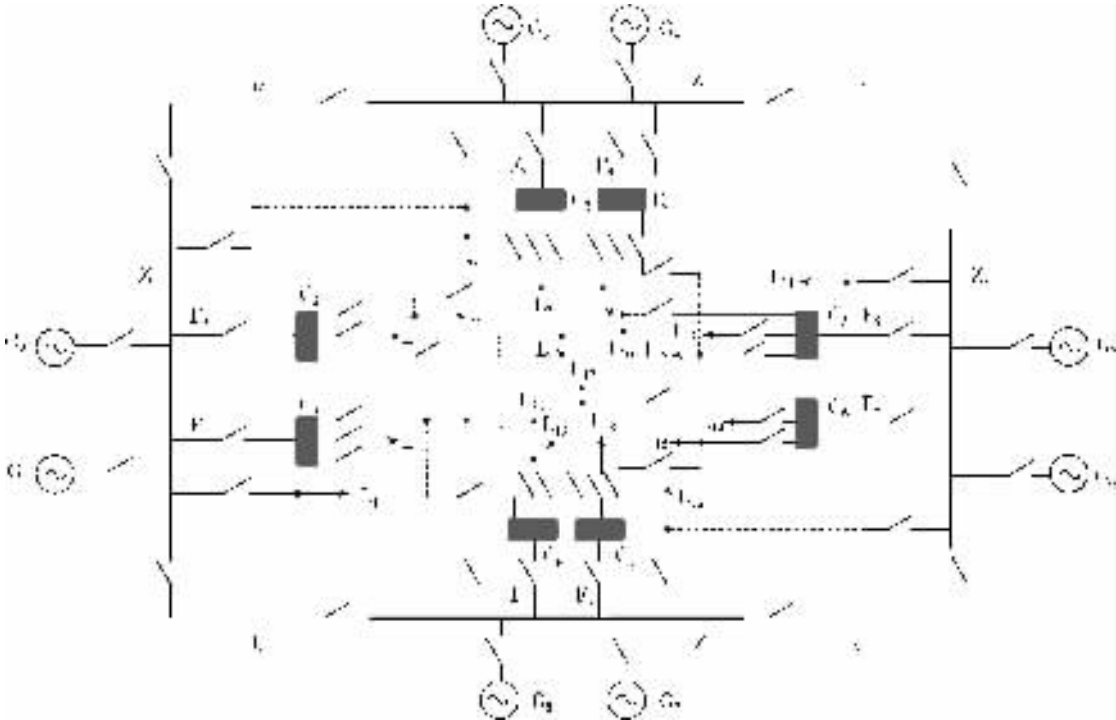


图 1 独立电力系统简化结构图
Fig.1 Simplified structure of an isolated power system

模型中的“编码”是根据设备的大类(发电机、负载、馈线)按照一定的规则统一标识;“类别”用于进一步标识该设备属于某一大类中的某一类(例如,馈线设备中的馈线连接线及跨接线等);“支路编号”是对系统中所考虑的所有设备支路的排序;“设备编号”指各设备在所属的各大类中的排序;“关联属性”用于描述系统中各类元件的电流流入、流出的节点,即元件之间的相互关系,它们将直接影响网络的拓扑结构;“管理属性”主要用于网络的运行管理,存放设备的运行属性,包括馈线的阻抗值,负载的正常、备用供电路径标识及负载等级,对发电机,则是指有功、无功功率分配系数。

2 网络拓扑分析算法

根据定义的模型,采用系统的节支关联矩阵恰好能反映整个网络的联接情况,设零电势为最大节点,假设共 $n + 1$ 个节点, m 条支路。根据支路电流方向的规定,可得到系统的关联矩阵 $M_{n \times m}$ (将地节点去掉)。

以 2 台发电机供电的电力系统为例,见图 2(a) (图中 M 为电动机; L_s 为静态负载; F 为连接线)。将其简化成节点 - 支路的结构图,见图 2(b)。图中有三级配电装置分别被定义为节点 1,2,3,另外设零电势为节点 4,发电机、电动机、静止负载及馈线被定义成 9 个支路。

根据支路电流方向的规定,可得到系统的关联矩阵 $M_{3 \times 9}$,其中矩阵各列按照支路编号排序。

$$M = \begin{bmatrix} -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

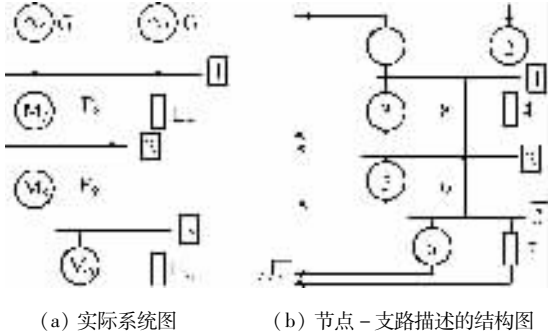


图 2 由 2 台发电机供电的电力系统

Fig.2 A power system with two generators

为便于拓扑识别,将关联矩阵按照网络的拓扑结构生成。不同于文献[6]中对各支路及节点的各种排序方法,对各支路以各设备之间的供电关系在关联矩阵中进行扩展,采用深度优先搜索与广度优先搜索相结合的方法,可得系统的扩展关联矩阵 $M'_{3 \times 9}$ (矩阵上面的数字表示各列代表的支路编号)。

$$M' = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 8 & 5 & 9 & 6 & 7 & 4 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & +1 & +1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从式(3)可以看出单电站树状供电时扩展矩阵的特点:对单个电站,首先排列各电源支路,然后采用依次排列各馈线的关联支路及其供电支路,按照从上到下、在同一层中从左到右的原则,对每一馈线扩展,直至负载支路。例如,发电机支路 1,2 位于矩阵最左端,后面直接供电的支路为 3,8,4,对于负载支路 3,4,分别以一行表示即可,而馈线支路,则采用深度优先搜索,直至搜索到负载支路,对馈线下的同一层中供电负载则按照广度优先搜索扩展整个矩

阵,馈线后紧接其供电支路,如支路5和9为8的第一层供电支路,排列在支路8的后面,而支路9也为馈线,其后紧接其供电支路6,7。

对于多电站及复杂网络的系统,以图1的环形网络说明复杂网络扩展关联矩阵的形成方法。其中为了便于上面扩展关联矩阵的生成,将各电站的元件编号按照扩展矩阵生成的顺序排放。采用局部分分析与全局拓扑相统一的方法,首先对各电站分别扩展,最后将各电站之间的关联通过对跨接线的描述表达,供、配电网的扩展关联矩阵定义为

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & & +1 & & -1 \\ & C_2 & & -1 & +1 \\ & & C_3 & & -1 & +1 \\ & & & C_4 & & -1 & +1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, C_1, C_2, C_3, C_4 为各电站的关联矩阵,若各电站之间没有跨接线,则系统的关联矩阵为块对角结构形式,各分块子矩阵形式与式(3)的形式相同,将跨接线支路关联元素加在矩阵后边,以表示各电站之间的连接关系(其中各环路上的电流正方向规定为顺时针方向),这样供、配电网整体的拓扑结构就表达出来了。应用此扩展矩阵,可以方便地查找出每条支路及各支路间的相互关系,在搜索时节约很多时间,系统中添加、删除支路及节点也比较方便,可以将支路及节点成块移动。

3 拓扑分析算法在故障恢复中的应用

3.1 基于拓扑分析的故障跟踪

若系统设备出现故障,需快速反映到网络拓扑结构当中,以对此进行跟踪。将受损支路的信息写入文件,包括受损元件编码及编号,对负载,还要输入正常路径还是备用路径受损标识。

一些设备的故障并不影响网络中其他元件支路,而有些元件失电则会使与其有关联的支路同样失电。为此,在恢复之前,根据各类设备在拓扑矩阵中的地位及作用,需对各种故障进行具体跟踪。

a. 发电机故障:此支路变为无源支路,由于电源支路为系统的连支^[7],因此不影响其他支路。

b. 负载故障:判断是负载的正常供电路径还是备用路径发生故障,由于负载支路也为系统的连支,因此可只考虑将此故障支路的完好标识置为“受损状态”。

c. 馈线连接线故障:若馈线连接线出现故障,由于其为树支,其下面所连接的支路全部失电,为了搜索供电支路,可采用扩展关联矩阵。根据式(4),以此馈线的下一支路作为供电的首支路,找出与此馈线的首节点相同的支路的前一支路作为此馈线供电的末支路,若已没有这样同首节点的支路,则以最后跨接线支路的前一条支路作为末支路,若没有跨接线,则以最后的支路作为末支路,根据扩展关联矩阵的形成规则,则可判断从首支路至末支路即为此馈线供电的支路,为失电支路。

d. 跨接线故障:若1条跨接线故障,由于各节点共地,所以1条跨接线相当于连支,其处理方法与负载支路发生故障一样;若2条及2条以上的跨接线出现故障,则可能将系统的网络解列,由于网络解列后各子系统之间不再耦合,若子系统为无源子系统,其所包含的支路都会失电,而由于一些重要负载的供电支路采用从不同的电站备用供电的方式,因此可考虑采用转换开关进行供电恢复,其中的线路容量等约束则需要对故障后的系统进行计算。

从上面的分析可以看出,对各电站所属于系统的判断及是否为有源子系统的判断非常重要,下面专门讨论。

3.2 解列子系统判断

根据图论的基本知识,电气接线图可以通过抽象和简化,成为只有节点和边的图,用邻接矩阵表示,便于计算机计算和处理,并进行连通性分析。当系统的解列是由于跨接线的断开引起的各电站之间的解列,就只需对电站之间的连接状况进行分析则可以判断出各子系统的组成及供电状况,这样可以大大减少计算量。

3.2.1 各电站之间拓扑结构的简化及邻接矩阵表示

图3为4个顶点的电网拓扑。

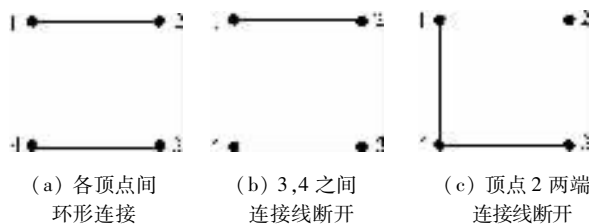


图3 简单4个顶点的拓扑

Fig.3 A 4-node topology

由图论的基本知识可知,图3可用邻接矩阵 $A = (a_{ij})$ 的方阵表示。其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 邻接} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (5)$$

与图3(a)相对应的邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

从邻接矩阵中可以看出,如果2个顶点 $i, j (i \neq j)$ 之间有边直接相连,则 $a_{ij} = 1$,称 i, j 为一级连通;否则 $a_{ij} = 0$,而对角线元素值 $a_{ii} = 1$ 。

3.2.2 连通性分析

连通性分析是通过计算可达矩阵实现的。可达矩阵 $P = (p_{ij})$ 是一个 n 阶方阵,其中

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 和 } j \text{ 连通} \\ 0 & \text{其余} \end{cases} \quad (7)$$

若 i 与 j 无直接连通的边,但它们均有边和节点 k 直接相连,实际上节点 i 和 j 是通过节点 k 连通的,则称 i, j 为二级连通。二级连通可以通过 A 矩阵的逻辑自乘求得。同理, A^m 为 A 矩阵的 m 次

自乘,矩阵元素 $(a_m)_{ij}$ 表示了节点 i,j 之间从第 1 到第 m 级的连通关系。对于有 n 个顶点的图而言,任意 2 个顶点之间最多有 $(n-1)$ 级连通。所以对连通矩阵 A 进行 $(n-1)$ 次自乘运算,就可以求出任意 2 个顶点之间包含从第 1 级到 $(n-1)$ 级的连通关系,也就是 2 个顶点之间的连通情况, A^{n-1} 即为系统的可达矩阵。

对式(6)进行矩阵自乘运算,如:

$$A^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{8}$$

矩阵 A^2 中的元素全为 1,说明各电站是二级连通的。若矩阵中含有 0 元素,可继续矩阵的自乘得到 A^3 。 A^3 表示了任意 2 个节点之间从第 1 级到第 3 级的连通情况,即任意 2 个节点之间的接通矩阵,称为网络的全连通矩阵。例如假设电站 3,4 之间的跨接线 l_{34} 断开,如图 3(b)所示,矩阵 A 应改为

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{9}$$

$$A^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{10}$$

$a_{34}=0$ 表示 3,4 电站不是二级连通的,而 1,3 电站之间是二级连通的。

若系统全连通,则为全 1 矩阵,否则系统会被解列为几个子系统, A^{n-1} 可组成块对角阵,即

$$A^{n-1} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_n \end{bmatrix} \tag{11}$$

例如,电站 2 两端的跨接线断开,如图 3(c)所示,即 l_{12},l_{23} 断开,则邻接矩阵 A 为

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{12}$$

$$A^3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{13}$$

可见,只有电站 2 与其他电站不连通,将连通部分 1,3,4 电站排列到一起,可得下面的块对角阵:

$$A^3 = \begin{matrix} & \begin{matrix} 2 & 3 & 4 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 2 \\ 3 \\ 4 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \tag{14}$$

在寻找连通子系统时,可从第 1 个电站开始,寻找与其连通的电站,作为第 1 个子系统,对不属于第 1 个子系统的电站继续寻找子系统。电站搜索到后,为了避免重复,则标记该电站,并且标记各电站所属的子系统。若不与第 1 个电站连通,则表示此电站与前面搜索到的电站不属于同一个子系统,开始第 2 个子系统的搜索,如此下去,直至将电站全部标记。

例如,在式(13)中,首先寻找与电站 1 相连通的电站,为 3,4 电站,以此 3 个电站及连接 3 个电站的跨接线作为第 1 个子系统,而将剩下的电站 2 作为第 2 个子系统。若此子系统中的电站存在未受损电源,则需要标识此子系统为有源子系统。搜索算法的流程见图 4。

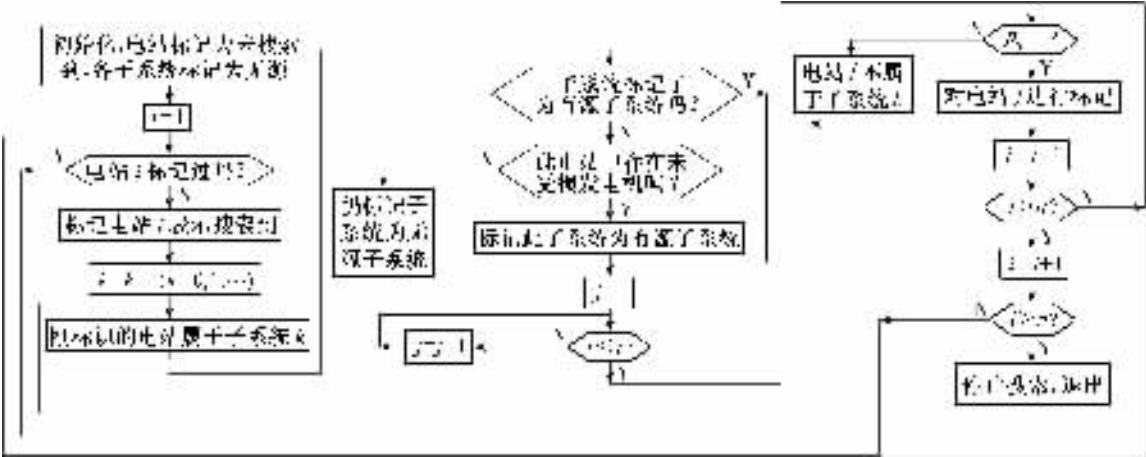


图 4 各连通子系统搜索算法流程

Fig.4 The flowchart of connected subsystem search algorithm

3.3 对系统计算的影响及处理

根据各种设备故障对供、配电网络影响的分析,结合网络拓扑矩阵,下面讨论各种故障对系统计算造成的影响及所需进行的操作。

a. 若解列后的子系统为无源子系统,则首先找出无源子系统供电的首、末支路编号,寻找其中包含的发电机数目,对其中包含的负载,按照供电路径情况,标明是正常路径还是备用路径受损,然后将无源子系统支路全部移去。根据无源支路数目,将大于无源支路编号的各支路位置前移;将无源电站移去,也同时移去了一些节点,由于电站节点的排序是连续的,因此系统中其他元件的支路中关联节点大于该无源子系统中最大节点编号的要依次减小,以建立新的系统关联矩阵。

b. 若解列后的子系统为有源子系统,则根据其中的故障发电机支路开断标识,将其中的故障发电机支路移去,同时将大于此支路编号的各完好支路位置前移。

c. 对于跨接线,若跨接线完好,找出其所属的子系统;若跨接线故障,为了统一计算,则将其从系统中移去,同时将大于此支路编号的各完好支路位置前移。

d. 对发电机功率分配系数进行重新设定。为了对故障后的系统进行计算,按照文献[8]的方法,对每一发电机根据其所属子系统中包含的完好发电机台数重新设置功率分配系数,对每个子系统都设置一个基准电压节点,一般假设第1台未受损发电机具有额定电压。

从对故障跟踪及处理的具体方法可以看出,由于网络拓扑矩阵采用了一定的扩展规则,使得对各类设备支路的搜索及修改变得非常简单、直观,节省了大量计算;对元件故障的跟踪处理为系统的故障恢复做好了充分的准备。

利用上述供、配电全局网络的拓扑分析及跟踪算法,已在某独立电力系统中建立了供、配电网络管理系统,该系统集网络运行仿真、故障管理及日常工作管理等功能于一体,较好地解决了供、配电网络运行中的管理问题。

4 结语

本文从独立电力网络结构特点出发,提出一种实用的电网设备模型,包括电源模型、负载模型及线路模型。在此基础上给出网络拓扑在线分析的新算法——扩展关联矩阵法;将此算法应用于各类设备的故障跟踪中,把系统中各元件的供电情况简明、清晰地分析出来;其中对故障后的解列子系统判断采用了网络进行抽象、简化的手段,运用邻接矩阵法,结合网络故障情况,实现了全局网络的拓扑跟踪;根据故障后各支路的是否可供电状态,对故障作了处理,为系统的故障恢复做好了准备。

本文提出的方法可应用于任意复杂结构的独立电力网络,能够满足现代独立电力系统的供、配电运行管理工作的需要,对于提高电网运行水平有较好的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] BUTLER K L, SARMA N D R, WHITCOMB C A, *et al.* Shipboard systems deploy automated protection[J]. **IEEE Computer Applications in Power**, 1998, 11(2): 31–36.
- [2] 谢 威. 飞机电源负载智能分配系统仿真与研究[D]. 西安:西北工业大学, 2001.
XIE Wei. Simulation and study on aircraft power system load intelligent distribution system[D]. Xi'an: Northwest Industry University, 2001.
- [3] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪(一)[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 178–181.
DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, *et al.* Object-oriented to fast tracing of topology for power systems (Part 1) [J]. **Proceedings of the CSEE**, 1998, 18(3): 178–181.
- [4] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪(二)[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 283–286.
DONG Zhang-zhuo, QIN Hong-xia, SUN Qi-hong, *et al.* Object-oriented to fast tracing of topology for power systems (Part 2) [J]. **Proceedings of the CSEE**, 1998, 18(4): 283–286.
- [5] 刘 健, 程红丽, 毕鹏翔. 配电网的简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 77–82.
LIU Jian, CHENG Hong-li, BI Peng-xiang. A simplified model for distribution system[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2001, 21(12): 77–82.
- [6] 王守相, 王成山. 配电系统节点优化编号方案比较[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 54–58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Comparative study of optimal node index schemes for distribution systems[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, 27(8): 54–58.
- [7] 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.
- [8] 庄劲武. 舰艇电力系统稳态参数计算方法的研究[J]. 海军工程大学学报, 2000, (5): 20–24.
ZHUANG Jin-wu. Research on the calculation methods on stable parameters of the power system of naval ships[J]. **Journal of Naval University of Engineering**, 2000, (5): 20–24.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

杨秀霞(1975–),女,山东莱州人,讲师,博士,主要从事独立电力系统调度自动化方面的研究(E-mail: yangxiuxia@21cn.com);

张晓锋(1963–),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,主要从事独立电力系统运行与控制方面的研究。