

基于开关网络的继电保护二次回路逻辑的模型与算法

孔华东¹, 蔡泽祥², 邹俊雄³

(1. 广电集团佛山供电分公司, 广东 佛山 528000; 2. 华南理工大学电力学院 广东 广州 510640;

3. 广电集团广州供电分公司, 广东 广州 510600)

摘要: 继电保护二次回路的数学模型是进行继电保护系统评估和动态仿真的基础, 本文引入开关网络的原理对继电保护二次回路的逻辑进行分析、建模, 将二次回路描述成由逻辑对象组成的开关网络, 有效地解决了对二次网络拓扑的自动跟踪和数学描述的维数灾问题。讨论了二次回路元件和拓扑的数据结构, 分析了开关网络中元件的开关函数以进行二次回路逻辑的研究, 最后应用模块间的消息传递提出了二次回路逻辑的计算机分析算法。

关键词: 继电保护; 二次回路; 开关网络; 拓扑

中图分类号: TM67; TM645.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)10-0031-05

0 引言

继电保护二次回路是由各种元件组合成的完成一定逻辑的网络。随着电力系统安全可靠运行要求的日益提高, 继电保护系统构成方案的分析评估、继电保护的动态仿真等涉及继电保护二次回路定量描述的需求被提出来, 从而要求对继电保护二次回路建立合适的模型和分析算法。由于继电保护二次回路的复杂性和规模的庞大, 目前这一问题尚未得到很好的解决。

当前已有的一些二次回路逻辑分析成果主要归为二类, 一类是基于事先对二次回路的分析, 将其人为抽象为相关元件的逻辑表达式, 从而实际上回避了对二次回路的描述^[1]。这种方法的最大问题是不能自动适应二次回路的网络变化, 是一种程序实现方法, 而不是对二次回路的数学描述。另一类是参照电力系统一次网络的描述方法^[2], 基于关联矩阵等网络表述模型表达二次回路关联关系, 通过深度优先等搜索算法自动提取网络拓扑信息。相对于电力系统一次网络, 继电保护二次回路网络要复杂和庞大得多, 如此简单描述势必造成整个拓扑维数太大因而难以进行有效的处理。因而有必要对二次回路中不同类型的元件进行详细的逻辑分析和抽象, 建立适合计算机分析的模型并应用相应的算法使二次回路逻辑的分析更为清晰和高效。

本文基于对继电保护二次回路特点的分析, 二次回路网络具有“0”、“1”的开关特性, 因此引入图论中开关网络方法描述继电保护二次回路应该是十分合适的。本文将继电保护二次回路抽象为由逻辑对

象组成的图, 进而形成以继电器元件为核心的逻辑元件组成的开关网络^[3,4]。既可以自动形成拓扑, 又降低了拓扑维数。故障发生时, 用开关网络中继电器元件对象的路径乘积表达其二次回路的核心逻辑, 从而实现整个继电保护二次回路的启动、动作逻辑、出口的整个过程的逻辑抽象, 建立了适合继电保护二次系统分析的完整模型和算法。

1 继电保护二次回路的开关网络描述

1.1 二次回路的逻辑分析及元件类建模

从逻辑及组成上看, 继电保护二次回路的元件主要分为六种类型:

1) 母线类

母线主要指继电保护二次回路的直流母线。二次回路的拓扑搜索即是由正母线开始到负母线的连通回路。母线类的数据结构为:

表1 母线类元件的数据结构

Index	Type	Value	Name	Pole
-------	------	-------	------	------

其中 Index 为母线元件的唯一索引, Type 表示元件的类型, Value 表示带电与否, Name 则表示名字, Pole 则表示母线的极性。由于图纸幅面和绘制的关系, 不同的 Index 可以表示同一条母线。在拓扑搜索中, 母线作为搜索的起点, 并且同一名字的正负母线抽象为两个节点, 分别代表搜索的起始节点和末端节点。

2) 继电器类

继电器类的启动及返回, 会改变其附属的触点元件的通断状态。某些具有类似特性的保护、负载

模块也可视作继电器元件。按照启动条件的不同可分为电压、电流、阻抗、温度、压强等类型的继电器,线圈带电才启动的中间继电器,带电后延时动作的时间继电器三类。

表 2 继电器类元件的数据结构

Tab.2 Data structure of relay elements

Index	Type	Value	Action	Return	TimeDelay	Vertex1	Vertex2	pSwitches	Work
-------	------	-------	--------	--------	-----------	---------	---------	-----------	------

其中 Action 和 Return 表示启动和返回条件,根据继电器类型相应表示继电器的动作阈值、线圈通电与否,TimeDelay 表示延时继电器的延时时间,Vertex1 和 Vertex2 表示继电器两端节点编号(此数据域用于网络拓扑的搜索和改变),pSwitches 为一指向其直接控制的附属触点对象集合的地址的指针,Work 则表明此元件是正常工作还是拒动。电灯、警铃等负载元件也归入继电器类,因为它们具有一定逻辑功能,可以引发诸如掉光字牌、响警铃或者其它报警信号等后续动作。

3) 触点类

触点元件是受继电器控制的可以开合一个回路的二端元件。根据瞬时还是延时动作、常开还是常闭又分若干种类型。

表 3 触点类元件的数据结构

Tab.3 Data structure of contact elements

Index	Value	Type	TimeDelay	Vertex1	Vertex2	Work
-------	-------	------	-----------	---------	---------	------

其中 Value 为触点当前的开合状态,其他与前类似。

4) 开关类

如各种转换开关、万能开关、连接片、熔断器、空气开关等隔离元件,它们的端点间连接状况由手动设置。和触点元件不同的是,它们不受其它元件控制,其状态可以由用户任意设置。其数据结构较为简单:

表 4 开关类的数据结构

Tab.4 Data structure of breaker elements

Index	Value	Type	Vertex1	Vertex2
-------	-------	------	---------	---------

其中各数据域的含义与上面的相同。它们在逻辑分析中表示一个边的通断状态。用户可以手工干预其通断状态。

5) 多端元件类

除了上面的二端元件外,还有一些多端元件如互感器、转换开关、一些封装的模块等等。这些元件连接多个端口,其输入输出条件较为繁杂,故需要单独建模并进行简化。通常我们将其简化为若干二端元件的组合,这些二端元件的功能组合与原多端元

件等效即可。

另外一些元件如电阻、电灯等,其本身的动作不对其它元件产生任何影响,以及一些为了图面美观而绘制的连接线、文本标识等等。在逻辑功能分析中,这些元件与逻辑功能无关,可以直接简化为零阻抗连接线,将其两端的端点合并为一个等效的节点。

1.2 二次回路拓扑的开关网络描述

通过对二次回路元件的逻辑建模,我们可以根据初始设置(包括开关元件的状态、继电器和触点元件的拒动与否),合并或忽略开关元件、连接线等,最终形成以继电器、触点、母线三类元件为核心的连接拓扑,其中继电器和触点为边,母线和某些连接端点为顶点的一个图,这个图中每个边只有两种状态:0 或 1。为方便讨论,设“0”代表触点的开断和继电器的失电状态,“1”代表触点的闭合和继电器的带电状态。从而可以在进行二次回路逻辑分析时,将其拓扑描述为一开关网络。

下面用一个简单的三段式电流保护二次回路(图 1、图 2)示例本文的拓扑简化过程:

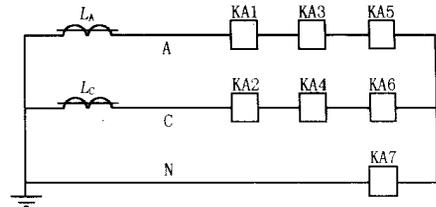


图 1 交流电流回路

Fig.1 Diagram of AC circuit

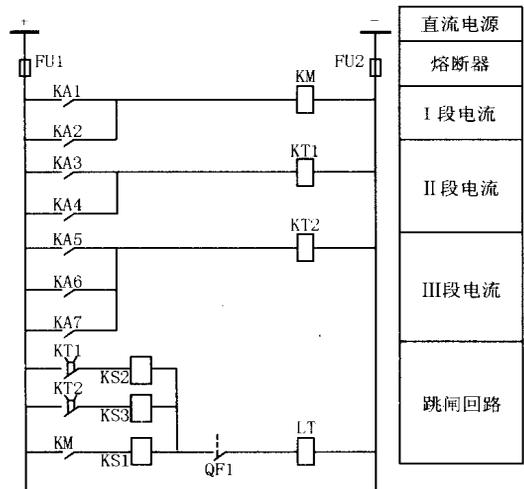


图 2 直流回路

Fig.2 Diagram of DC circuit

按照以上思路,从正母线开始,按照宽度优先的

方法搜索与其连接的二端元件/模块,略去与逻辑功能抽象无关的连接线和元件,将搜索到的继电器类、触点类、开关类元件属性存入相应的各类的数据结构中,并以边的形式保存在图形拓扑中,一直到负母线为止。这样在每个母线对之间形成一张简化的拓扑图,由继电器(包括电灯、警铃等负载)、各类触点(包括延时触点)、各类开关元件(不受其它元件制约的自己动作的开关元件,如空气开关、熔丝等)为边,以元件之间的连接点为顶点的图,图的起点为正母线,终点为负母线,图中的边各有断开和合上两种状态。这样我们就可以将图2的继电保护二次回路简化为一个开关网络(如图3所示)。

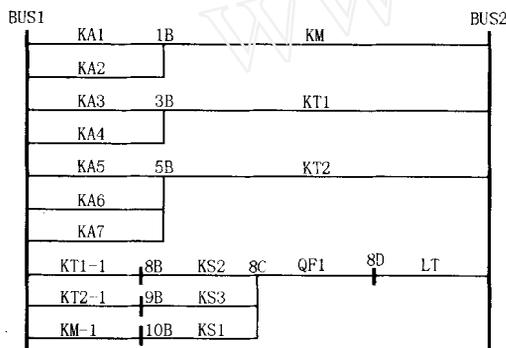


图3 简化后的二次回路拓扑图

Fig. 3 Simplified topology of the secondary circuit

1.3 二次回路拓扑的数据存储

我们可以用弧表^[5]结构表示图3所示的二次回路拓扑图。设将节点BUS1、1B、3B、5B、8B、8C、8D、9B、10B、BUS2依次排序为1到10。那么可以构造弧表如一个字典。字典中的每个元素的键值根据其起点*i*和终点*j*的编号被唯一标识为*ij*,元素*ij*的数据域为一指向单链表的表头节点的指针,指向连接于节点对<*i*,*j*>间的第一个边的对象。处理多边直接并联存在于两个端点间的情况可以用链接数组或链接一个并查集的方法,本文为了开关操作时增加和删除节点方便采用的是单链表存储表示法。这样我们可以根据简单的推理函数由元素*ij*得到元素*ji*

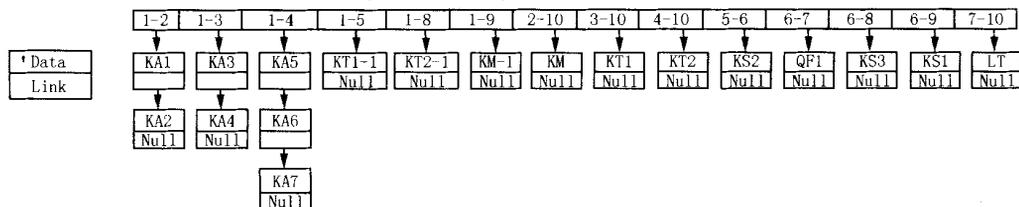


图4 继电保护二次回路拓扑的链表表示

Fig. 4 Topology list expression of the secondary circuit

而无需另外的存储空间。

继电保护二次回路逻辑的核心是继电器元件和触点元件的互动。为了描述继电器对象和触点对象之间的链接关系,可以使继电器对象的数据域里维护一个关联触点对象的指针 pSwitches,指向该继电器对象动作后,其直接控制的附属触点对象集合的地址(参见表2)。这样形成图4(继电保护二次回路拓扑的链表表示)。

1.4 继电器类元件动作的开关函数

以图2为例,可以简化为一个开关网络,其连接矩阵为*C*,*C*的每一个元素*c_{ij}*表示*i*与*j*(*i* < *j*)间直接相连的起点为*i*到终点*j*的边的和。图2经简化成为拓扑图4,经过简单的链表遍历易得连接矩阵*C*的各元素表达式为:

$$c_{1-2} = c_{2-1} = (KA1) > Value + (KA2) > Value;$$

$$c_{1-3} = c_{3-1} = (KA3) > Value + (KA4) > Value;$$

$$c_{1-4} = c_{4-1} = (KA5) > Value + (KA6) > Value + (KA7) > Value;$$

$$c_{1-5} = c_{5-1} = (KT1 - 1) > Value;$$

$$c_{1-8} = c_{8-1} = (KT2 - 1) > Value;$$

$$c_{1-9} = c_{9-1} = (KM - 1) > Value;$$

$$c_{2-10} = c_{10-2} = (KM) > Value;$$

$$c_{3-10} = c_{10-3} = (KT1) > Value;$$

$$c_{4-10} = c_{10-4} = (KT2) > Value;$$

$$c_{5-6} = c_{6-5} = (KS2) > Value;$$

$$c_{6-7} = c_{7-6} = (QF1) > Value;$$

$$c_{6-8} = c_{8-6} = (KS3) > Value;$$

$$c_{6-9} = c_{9-6} = (KS1) > Value; \quad c_{7-10} = c_{10-7} = (LT) > Value;$$

对角线元素 $c_{ii} = 1 (i = 1, 2, \dots, 6)$,其余非对角线元素均为0。由于此连接矩阵通常较为稀疏,因而可以用稀疏矩阵的存储方法如三元组或者链表结构进行存储。

由开关网络的理论可知,如果我们把正母线设为节点1,负母线设为节点*n*,那么求出这两个节点间所有路径乘积的和 $\text{Per}C_{1n}^{[6]}$,便可以求出从正母线到负母线之间的所有可能的带电路径的路径乘积

和,这些路径乘积和中的路径乘积有的为0(意味着两节点间无连通路经),有的为1(意味着存在一条连通路经)。

例如图4的节点1到10的开关函数为: $F_{1-10} = PerC_{1-10}$ 。经化简后,得到下式:

$$F_{1-10} = \sum_{i=1}^4 H_i R_i \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 个继电器类对象; H_i 为继电器对象的动作路径乘积,即是该继电器带电与否的条件。本例中四个继电器对象的动作路径乘积分别为:

$$\begin{aligned} H_1 &= (KA1) \rightarrow Value + (KA2) \rightarrow Value; \\ H_2 &= (KA3) \rightarrow Value + (KA4) \rightarrow Value; \\ H_3 &= (KA5) \rightarrow Value + (KA6) \rightarrow Value + (KA7) \rightarrow Value; \\ H_4 &= (KT1 - 1) \rightarrow Value + (KT2 - 1) \rightarrow Value + (KM1) \rightarrow Value \times (QF - 1) \rightarrow Value; \end{aligned} \quad (2)$$

H_i 有两个特点:一是其中的运算符只有与或两种,分别用“ \times ”和“ $+$ ”表示;二是 H_i 的表达式中,参与运算的变量均为触点元件和开关元件的值,即 $pSomeObject \rightarrow Value$,这个值是随时间段的不同而变化的(例如某触点在继电器动作和返回时的值是不同的)。

以此为基础,我们便可以对各个继电器对象做动作逻辑分析。

2 基于模块间消息传递的时间队列分析法

继电保护二次回路的动作,是一组时间相关的逻辑事件,整个动作过程可以分四个阶段:启动、动作、出口、返回。如果没有跳跃现象发生的话,那么整个动作逻辑过程的结束标志为再无任何继电器元件启动或返回,意味着系统达到了新一轮的稳态。

以上的动作逻辑过程不是一个简单的组合逻辑过程,而是一个时间相关的逻辑序列过程。所以无法用简单的组合逻辑来进行逻辑功能抽象,必须在逻辑功能抽象时考虑到动作的时序。由于不必每次动作都重新计算新一轮的继电器动作路径乘积,而可以将一个时间段里的所有事件处理完毕才重新计算连接矩阵的继电器动作路径乘积,这样可以极大地节约计算时间,使程序可以处理更高维数更为复杂的二次图纸。因此我们将时间划分为一个个的小段,成为一个 FIFO 的时间队列。每个队列元素指向一个事件链表来表示某时间段内发生的所有事件。时间队列和事件链表的结构如图5所示。

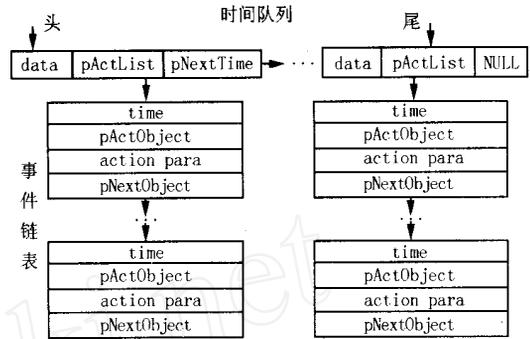


图5 时间队列的事件驱动链表表示方法

Fig. 5 Time queue for event driven list expression

时间队列用单链表表示,时间队列元素有三个数据域分别为: data 代表时间段编号, pActList 指向本段时间内发生的事件的事件链表首指针, pNextTime 指向下一个时间队列元素。事件链表也为一个单链表,事件链表的每个元素的数据域有: time 代表事件发生时间; pActObject 指向发生事件的对象指针; action para 代表事件的参数,这些参数可以被 $pActObject \rightarrow Act()$ 函数调用,表示如继电器立即带电和返回,触点打开、延时打开及闭合、延时闭合或复归继电器等等事件; pNextObject 指向发生下一事件的对象指针。

根据以上对继电保护二次回路逻辑动作过程分析以及基于消息传递的时间队列映射的事件链表驱动表达方法,可以得出继电保护二次回路逻辑分析算法:

- 形成唯一标志元件的编号字符串和元件对象指针字典映射;
- 形成拓扑;
- 设置开关、连接片、熔丝的状态;
- 设置故障地点、类型;
- 设置开关、连接片、熔丝的状态和元件拒动与否;
- 根据故障计算结果,得到启动继电器或模块列表;
- 当前时刻赋值为0,时间段编号赋值1。根据启动继电器向事件链表里添加继电器动作事件;
- 取出并处理本时间段的事件直至本时间段事件链表为空;
- 对于触点动作事件,分析拓扑改变连接矩阵C中的相应元素;
- 对于手动复归按钮事件,可以提示用户是否复归,如果是,则改变连接矩阵C中的相应元素;
- 对于继电器动作(包括手动复归继电器)事件,

则向下一个时间队列元素里的事件链表里添触点动作事件,如果是延时事件,那么在相应时间段的事件链表里添加;

对连接矩阵 C 进行运算求得各继电器元件 R_i 的动作路径乘积 H_i , 根据 H_i 的结果向事件链表里发送继电器动作事件(向事件链表里添加事件或者添加新的时间段入队);

此时间段处理完毕,出队,下一时间段入队;

重复此过程直到时间队列为空。

对于可能发生的事件冲突,可以采用改变时间队列的时间片长度进行。限于篇幅,此处不再进行讨论。

3 结论

如何解决二次回路的定量数学描述和维数灾问题是继电保护二次回路建模的难题。本文基于继电保护二次网络具有“0”、“1”开关特性的事实,引入图论中开关网络的原理,提出了一种更有效地利用计算机辅助分析的方法来研究继电保护二次回路的逻辑。在深入分析二次回路逻辑的基础上,抽象出二次回路元件的共有特性并定义了二次回路的元件模型,将二次回路的拓扑抽象为开关网络进行分析,以继电器类元件作为二次回路逻辑分析的核心,减少处理的维数。并且利用模块间的消息传递和合理的数据结构,将一个时间队列里的所有事件处理完毕才重新计算新一轮的继电器动作路径乘积,而不必每次动作都重新计算。既可以高效率地自动形成二次回路的拓扑,又具备手动形成拓扑的简化维数的优点。

参考文献:

[1] 邹俊雄,蔡泽祥,孔华东(ZOU Jun-xiong, CAI Ze-xiang,

KONG Hua-dong). 基于图形平台的电力系统继电保护动作逻辑仿真(The Operation Logic Simulation of Relay Protection of Power Systems Based on Graphic Platform)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002,26(8):61-64.

[2] 宋政湘,王建华(SONG Zheng-xiang, WANG Jian-hua). 继电控制线路的网络拓扑图的生成与再次抽取(Generation and Simplification of Topo Graph of the Relay Control Circuit)[J]. 计算机工程与应用(Computer Engineering and Applications),1999,(1):18-20.

[3] 陈树柏,左垚,张良震(CHEN Shu-bai, ZUO Kai, ZHANG Liang-zhen). 网络图论及其应用(Network Graph Theory and Its Applications)[M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),1982.

[4] Bryant R E. Graph-based Algorithms for Boolean Function Manipulation[J]. IEE Trans on Computers,1986,(8):677-691.

[5] 殷人昆,等(YIN Ren-kun, et al). 数据结构(Data Structure)[M]. 北京:清华大学出版社(Beijing:Tsinghua University Press),2000.

[6] CHEN W K. Applied Graph Theory[M]. Amsterdam: North Holland,1976.

收稿日期: 2003-09-04; 修回日期: 2004-02-12

作者简介:

孔华东(1975-),男,工学硕士,工程师,从事电力系统技术管理工作;

蔡泽祥(1960-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制;

邹俊雄(1977-),男,工学硕士,研究方向为电力系统继电保护。

Logic modeling and algorithm of relay secondary circuit based on switching network

KONG Hua-dong¹, CAI Ze-xiang², ZOU Jun-xiong³

(1. Foshan Power Supply Branch, Foshan 528000, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Guangzhou Power Supply Branch, Guangzhou 510600, China)

Abstract: Mathematical model of relay protection secondary circuit is the basis of system assessment and dynamic simulation. This paper introduces the principle of switching network to analyse and models the logic of relay protection in secondary circuits, and the secondary circuits are simplified to be a switching network composed of logic objects. In this way, the dimensions in large scale system could be decreased more effectively and therefore the topology in secondary circuit could be tracked easier. Appropriate data structure of the secondary circuits' components and topology are discussed, and switching functions of the components' logic are analyzed. Based on these analysis, this paper presents a computerized algorithm for secondary circuits' logic research.

Key words: relay protection; secondary circuit; switching network; topology