

基于构件的变电站控制与信号系统仿真

张炳达¹, 陈伟乐², 黄大鹏¹¹天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; ²香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 本文用“输入—控制—输出”模型描述变电站控制与信号系统中的各种电气设备, 创建具有一定可视性、通用性和开放性的系统仿真模型。针对仿真模型拥有大量的开关性电气部件和局部独立性等特点, 提出了等效节点法、模块分割法、树梢消去法和局部调整法, 以提高其仿真的快速性。

关键词: 变电站; 控制与信号系统; 构件; 拓扑分析

文章编号: 1004-731X(2004)05-1064-04 中图分类号: TM743 文献标识码: A

The Simulation of the Control and Signal System for Substation Based on Components

ZHANG Bing-da¹, CHAN W.L.², HUANG Da-peng¹¹Dept. of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Dept. of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: Electrical devices in the control and signal system for substation are expressed as component model with “input-control-output”, and the system simulation model with certain visibility, commonality and expansibility is established. With a view to the fact that there are lots of on-off electrical components and self-governed parts in the simulation model, such methods as equivalent-node, separate-module, treetop-elimination and partial-modification are proposed to speed up the simulation.

Keywords: substation; control and signal system; component; topological analysis

引言

变电站控制与信号系统仿真是变电站培训仿真系统的重要组成部分, 提高它的通用性和开放性有着极其重要的意义。对于一般的 110kV 变电站来说, 整个变电站控制与信号系统有几十张图纸, 一张图纸中就有几十个电气设备。系统中众多的电气设备不利于仿真模型的建立, 同时也妨碍了仿真速度的提高^[1]。本文以“输入—控制—输出”模型描述系统中各种电气设备, 创建相应的设备构件, 并用它们绘制变电站控制与信号系统, 建立其仿真模型。虽然仿真模型中电气部件众多, 但大部分是开关性电气部件。这些部件一般在断开状态, 使整个仿真模型具有天然的分块性。针对这些特点, 用等效节点法、模块分割法、树梢消去法、局部调整法简化仿真模型, 以加快仿真的速度。

1 设备构件

在变电站控制与信号系统中有许多电气设备, 其中有些

是智能型设备, 如综合自动化设备、微机保护装置。在电气设备中, 除电气部件之外, 还有非电气部件(如计算机程序), 仅用电路模型难以描述。这里用输入等效电路和输出等效电路表述电气设备的对外特性, 输入输出等效电路上的电气量或设备自身的变化规律对输出等效电路的影响用程序加以控制, 即所谓的“输入—控制—输出”模型。为分析方便起见, 假定输入等效电路和输出等效电路只是由一端口电气部件所组成。同时, 把整个电气设备作为一个对象来研究, 用构件^[2]来实现“输入—控制—输出”模型, 即设备构件。为更好地观察整个系统的动态特性, 设备构件设有多套图形, 使它们的图形显示能够体现电气设备当时所处的状态。

下面以电磁型电压继电器为例说明设备构件的具体构造。假如它只有一个电压线圈和一个常开触点, 则相应的“输入”用电阻 R (电压线圈) 来描述, “输出”用开关 K (常开触点) 来描述, “控制”部分说明“电阻 R 两端的电压上升到什么程度(动作电压)使开关 K 闭合, 下降到什么程度(恢复电压)使开关 K 断开”。图 1 是上述电磁型电压继电器的分析模型。至于电压线圈的直流电阻、继电器的动作电压和恢复电压, 通过构件的“属性”给以赋值。该设备构件

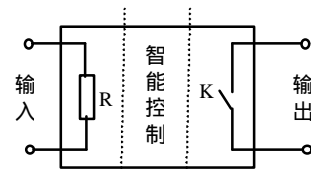


图 1 电磁型继电器模型

收稿日期: 2003-03-21 修回日期: 2003-07-07

作者简介: 张炳达(1959-), 男, 江苏人, 副教授, 研究方向为电力系统仿真和高压电气设备故障检测; 陈伟乐(1965-), 男, 香港人, 副教授, 研究方向为智能系统与计算机在电力系统中的应用等; 黄大鹏(1980-), 男, 山西人, 硕士生, 研究方向为电力系统仿真。

有两种图示形式, 一种是开关 K 处于闭合状态, 另一种是处于断开状态。

综合自动化设备、微机保护装置的输入输出不仅有模拟量、开关量, 而且有数据通讯接口。对于这些智能型电气设备, 通过其设备构件的“方法”提供对外的数据服务, 并让需要数据的设备构件与它相关联。

2 电气部件的连接关系

为绘制变电站控制与信号系统, 需要构造一些用于连接这些设备构件的连接类构件。本文定义了这样一些连接类构件: 连接线构件、焊点构件、引出标志构件。这些构件和设备构件统称为图形构件。为了有效地管理这些图形构件, 创建一个公共的基类。在基类中有以下几个重要的“属性”:

```
TList *GraphicList //图形列表
TList *HotPointList //热点列表
TLink *HotLink //热点互联信息链表
```

图形列表 GraphicList 含有若干个指向具体图形画法的指针, 而具体图形画法则在图形库中给出。这样, 设备构件的细分与图形画法无关, 完全由设备内在的机理和功能所决定。

在图形构件的引出端设置热点 (HotPoint) 敏感区, 当某热点的敏感区域与另一热点敏感区域相交时, 认为这两个引出端相互连接。对于引出标志类图形构件, 若它们的引出标志相同, 则认为它们是互连的。

构件自身 热点号	对方构件 编号	对方构件 热点号	该信息在对方构件 信息链表中的位置	下一信息 指针
-------------	------------	-------------	----------------------	------------

图2 热点互联信息结构

在每一个图形构件中, 都有一张热点互联信息链表 HotLink。热点互联信息的结构如图 2 所示, 其中构件的编号是唯一的, 由计算机自动生成。变量“该信息在对方构件信息链表中的位置”虽然多余, 但有利于电气部件连接关系的建立。

在电气部件连接关系中, 并不包括焊点、连接线和引出标志, 应把它们移去。如图 3(a)中的焊点 a、b、c、d 和连接线 ad、bd、cd 应归并成图 3 (b)中的节点 0, 即把设备引出端归并成节点。

设备引出端归并成节点的具体方法是: 将某焊点作为节

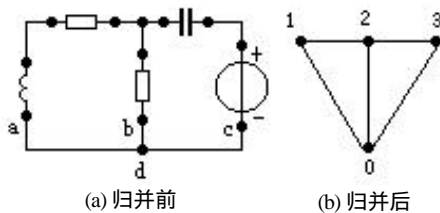


图3 设备引出端归并成节点示例

点, 按图形构件的热点互联信息链表进行深度优先搜索^[3]。若遇到设备构件的引出端, 在此端口上标注节点编号并回溯; 若遇到焊点类、连接线类和引出标志类图形构件, 则穿越它们继续往前搜索。把上述方法用于所有未做搜索标记的焊点, 最终形成如图 4 所示的电气部件连接关系。

它由节点表、节点—部件表、端点—节点表三个部分组成。节点表中包括了设备内部节点在内的所有节点。每一节点有一张节点—部件表, 存储着与该节点相连的所有电气部件 (包括端点)。每一设备构件有一张端点—节点表, 记录着设备自身拥有的电气部件 (包括端点和节点)。三表存储法虽有信息冗余现象, 但有利于节点、部件和端点之间的快速查询。

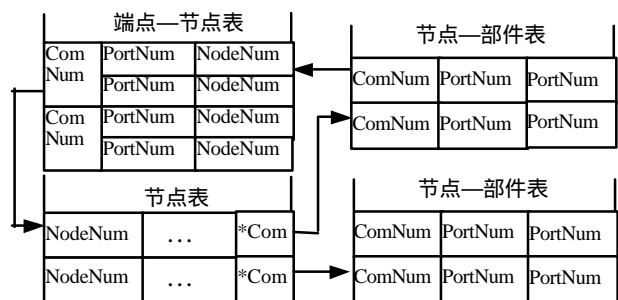


图4 电气部件的连接关系

用“输入—控制—输出”模型描述各种电气设备以后, 整个变电站控制与信号系统的仿真模型可以分成两大部分。第一部分是电气部件特性和连接关系组成的电路模型, 第二部分是设备构件的“控制”组成的控制模型。由此可见, 系统仿真模型的建立是基于图纸的, 具有一定的可视性、通用性和开放性。

3 电路模型的化简

在电路模型中有大量的开关性电气部件和松散型模块 (仅仅设备构件的“控制”或者电源把它们连接在一起)。为提高仿真的速度, 本文采用等效节点法、模块分割法、树梢消去法对电路模型进行简化。

3.1 等效节点法

如果把开关性电气部件看作为阻值变化的电阻 (断开时电导值为零, 闭合时电导值很大), 这能使分析电路模型的节点电压方程在形式上保持不变, 但因矩阵元素的值相差悬殊影响解的精度和因矩阵阶数的庞大影响解的速度。

本文不把开关性电气部件引入节点电压方程, 采用等效节点法考虑开关性电气部件的作用。具体方法是: 取与开关性电气部件关联的节点为起始节点, 采用深度优先法搜索, 如果搜索到的电气部件是开关性的且处于闭合状态, 则继续往前搜索, 并给搜索到的所有节点标上和起始节点相同的编

号, 否则回溯。

3.2 模块分割法

在电路模型中有许多松散型模块。采用等效节点法后, 松散型模块的数量进一步增加。考虑到有些松散型模块公用同一个直流电源, 如果把直流电源看作理想电压源, 这些松散型模块便可以独立求解。把整个电路模型分解成许多独立模块的过程称为模块分割。

模块分割的操作步骤如下: 任取一电源, 做上移去标记, 以该电源的正极为起始点, 采用深度优先法搜索, 遇到该电源负极后回溯, 回到起始点时结束搜索。被搜索到的部件(包括移去的电源)和节点构成一个独立模块。如果独立模块中含有该电源负极节点、其它电源或非零状态的储能电气部件(电容和电感), 则称有源模块, 否则称无源模块。

如果存在着未搜索过的和该电源正极节点相关联的电气部件, 则以其中一个作为新一轮的搜索方向, 得到另一个独立的模块。对所有未搜索过的电源做同样的处理。待所有的电源部件处理完毕后, 如果存在未搜索过的非零状态的储能电气部件, 用连通性^[4]的搜索方法分别获取以它们为核心的独立模块。到最后未搜索到的电气部件统称为待分模块。显然, 在无源模块和待分模块中, 所有电气部件的电流电压均为零。

3.3 树梢消去法

任取一节点为起始节点, 向某个方向进行深度优先搜索, 当回溯到起始节点时, 如果没有遇到任何电源和非零状态的储能电气部件, 这条搜索路径称为从起始节点长出的一条无源树枝。无源树枝中的所有电气部件的电流电压都为零, 消除它们能够降低节点矩阵的阶数。在有源模块中可能存在着这样的树枝。例如: 在图 5 中, 当 K1 闭合和 K2 断开时, 路径 R2||R3—R5 就是从 b 点长出的一条无源树枝。切除所有的无源树枝要花费许多时间, 这里采用树梢消去法切除某些特殊的无源树枝。树梢节点的定义是: 它关联的所有电气部件关联

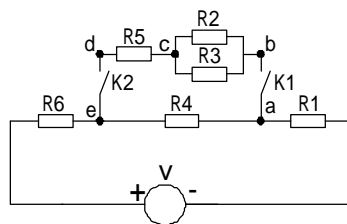


图 5 树梢消去法示例

同样的两个节点, 且这些电气部件没有一个是电源、非零状态的储能电气部件。把与树梢节点关联的电气部件从电气部件的连接关系中移去, 称为树梢被切除。某个树梢被切除以后, 可能产生新的树梢。树梢消去法就是识别树梢, 切除树梢, 再识别, 再切除, 直到不再出现树梢为止。识别树梢不需要搜索, 且可融入到模块分割法中去, 因而切除由树梢组成的无源树枝所花费的时间很少。下面是切除图 5 中

R2||R3—R5 无源树枝的过程: 从电源 V 的正极出发作深度优先搜索, 经 R6 和 R4 到 b 点 (a 点已等效于 b 点), 再经 R2 到 c 点, 经 R3 到 b 点, 从 b 点 (不是树梢) 经 R3 回溯到 c 点, 经 R5 到 d 点, 从 d 点 (是树梢, 切除树梢) 经 R5 回溯到 c 点, 从 c 点 (是树梢, 切除树梢) 经 R2 回溯到 b 点。

4 仿真计算

在电路模型和控制模型之间, 有一种互为前提条件的作用力。本文采用轮流分析电路模型、控制模型的方法, 以获取整个系统的动态特性。

4.1 电路模型的求解

为使求解电路模型的节点电压方程不出现微积分运算符, 对储能电气部件采用贝瑞隆等值变换^[5]。

对于电感 L, 其等效电阻和等效电流源如下:

$$\frac{\Delta t}{2L}, \quad i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L}[u_k(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)]$$

对于电容 C, 其等效电阻和等效电流源如下:

$$\frac{2C}{\Delta t}, \quad -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t}[u_k(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)]$$

由于无源模块和待分模块中的所有电气部件的电流电压均为零, 在分析电路模型时只考虑有源模块。对于每个有源模块, 都有以下形式的节点电压方程:

$$[Y_n][V_n] = [A][I_s] - [A][Y][V_s]$$

其中, [A] 为降阶节点关联矩阵, [Y_n] 是节点导纳矩阵, [Y] 为支路导纳矩阵, [I_s] 是电流源, [V_s] 是电压源。

当电压源的内阻为零 (电导为无穷大) 时, 节点导纳矩阵 [Y_n] 中会出现无穷大项。为避免这一现象的发生, 把电压源支路移到与电压源正极节点相关联的其它各支路中^[4]。这样, 不仅降低了节点导纳矩阵 [Y_n] 的阶数, 而且保证了矩阵的主对角元素占优。

当节点数超过 19 时, 选用 Seidel 迭代法求解方程, 否则选用 Gauss 消去法, 其原因是它们的求解速度不同^[5]。当有源模块中包含储能电气部件时, 需要不断地修改节点电压方程并求解。对这样的有源模块一律采用 Gauss 消去法, 以加快其计算速度。

4.2 局部调整法

由于设备构件的“控制”会使其输出等效电路发生变化, 原简化了的电路模型可能在下一时间段无效。然而, 在某一时间段内, 只有一部分开关性电气部件的状态发生了变化。因此, 电路模型的变化只是局部的。

为使原简化了的电路模型作些局部调整就能适用于下一时间段, 对等效节点法和模块分割法作些改进。在等效节点法中, 把所有与某等效节点关联的开关性电气部件同样存储在节点—部件表中, 并在它们的端点上也标注等效节点的

编号。在模块分割法中,把与模块相关的所有开关性电气部件都保存在模块表中,包括那些被树梢消去法移去的开关性电气部件,同时将模块的编号记录在这些开关性电气部件中。这样,当开关性电气部件的状态发生变化时,很容易获取与其相关的等效节点和独立模块。

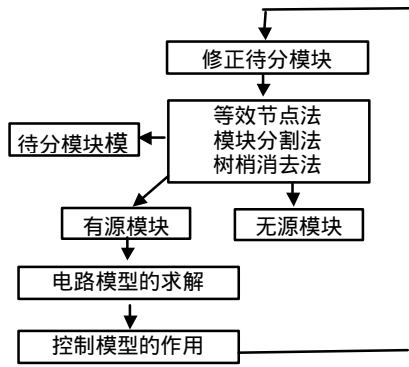


图6 仿真流程

轮流分析电路模型、控制模型的流程如图6所示。首先判别开关性电气部件的状态是否发生变化。若发生了变化,找出其相关的等效节点和独立模块。让受影响的等效节点回到等效前状态,受影响的独立模块归入待分模块。然后,在新的待分模块中,采用等效节点法、模块分割法和树梢消去法,分离出新的有源模块和无源模块。对新增的有效模块列写节点电压方程,计算电气部件的电压电流。如果原有有源模块含有储能电气部件,把它们也当作新增的有源模块,但省去方程的列写和等效电流源的初值计算。最后,根据输入等效电路上的电气量或设备自身的变化规律,由设备构件的“控制”改变其输出等效电路。

4.3 实例分析

这里用电动机星三角启动控制电路(图7)进一步说明仿真模型的创建思路和仿真的轮流分析法。

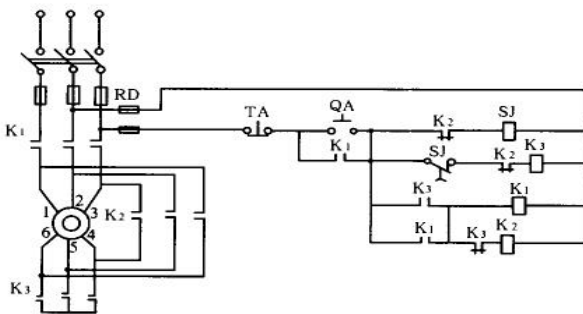


图7 电动机星三角启动的控制电路

在电动机星三角启动控制电路中有8个电气设备:2个熔断器,2个按钮,3个接触器,1个时间继电器。按钮和熔断器的分析模型没有输入等效电路,它们的输出等效电路仅包含一个开关。这些开关受其设备构件的“控制”,按钮是人为的操作,熔断器是流经它的电流。接触器和时间继电器的分析模型与图

1类似,但输出部分的开关数目有许多,而且“控制”每个开关的方式不一样,有常开瞬时动作、常闭瞬时动作、常开延时闭合、常开延时打开、常闭延时闭合、常闭延时打开。

按下启动按钮QA之前,电路模型中没有有源模块,接触器K1、K2、K3和时间继电器SJ处于非工作状态。按下启动按钮QA后,有两个有源模块,分别包含接触器K3和时间继电器SJ的电压线圈。此时,接触器K3和时间继电器SJ的“控制”将使它们的输出等效电路改变(常开触点闭合,常闭触点断开)。但因时间继电器未达到时延定值,它的输出等效电路暂时不变。分析新状态下的电路模型,多了一个包含接触器K1电压线圈的有源模块。接触器K1的“控制”使它的常开触点闭合,电动机作Y形启动。此时若松开启动按钮QA,有源模块并不改变。随着时间的推移,时间继电器SJ的常闭延时打开触点动作,使含有接触器K3电压线圈的有源模块归入待分模块。接触器K3的电压线圈失去电压,其常闭触点闭合。接触器K2的电压线圈承受电源电压,其常开触点闭合,电动机转入三角形运行。同时,包含时间继电器SJ的电压线圈的有源模块归入待分模块,其常闭延时打开触点闭合。此后,控制电路的状态保持不变。

对电路模型、控制模型反复地进行轮流分析,可以得到整个系统完整的动态特性。再者,如果给定的系统存在着某些缺陷,通过仿真可以发现问题的所在。

5 结论

本文提出的变电站控制与信号系统的仿真模型建立在用图形构件绘制的图纸之上,具有直观性、通用性和开放性。等效节点法、模块分割法、树梢消去法、局部调整法的综合运用实现了仿真的实时性。基于构件的变电站控制与信号系统仿真已成功应用于变电站培训仿真系统,使控制与信号系统的工作原理以图示的形式展现在学员面前。它也可作为设计控制电路的辅助工具,帮助设计人员及时发现问题。另外,在电路模型中,尚未涉及非线性电气部件,电路模型的仿真计算有待进一步改进。

参考文献:

- [1] 王铁红,张炳达,沈捷.继电保护培训仿真系统[J].继电器,1999,27(6):34-36.
- [2] 肖勇,龙玺,徐健,等.C++ Builder 4 应用程序开发[M].北京:人民邮电出版社,2000.
- [3] 严蔚敏,吴伟民.数据结构[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [4] 钟佐华,李灿宏.网络图论和矩阵分析法[M].北京:人民邮电出版社,1983.
- [5] 黄家裕,陈礼义,孙得昌.电力系统数字仿真[M].北京:水利水电出版社,1995.
- [6] 文锋.发电厂及变电所的控制[M].北京:中国电力出版社,1998.