

# 面向对象的实用复杂故障计算

钱兵<sup>1</sup>, 程浩忠<sup>1</sup>, 杨镜非<sup>1</sup>, 唐春华<sup>2</sup>, 黄春雷<sup>2</sup>, 郑如春<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200030; 2. 上海石化公用事业公司, 上海 200540)

**摘要:** 文章首先说明了基于多口网络理论的电力系统复杂故障计算模型。然后说明了面向对象的概念, 并用面向对象的思想实现了复杂故障计算。详细分析了复杂故障类的层次关系和实现。

**关键词:** 电力系统; 面向对象; 复杂故障; 多口网络

**中图分类号:** TM744

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2001)07-0001-04

## 1 引言

电力系统故障是一个复杂的电磁暂态过程,但在实用计算中,只考虑基频分量,此时故障计算可简化为线性不对称三相电路计算。简单不对称故障计算<sup>[1]</sup>利用线性网络的迭加原理,将不对称网络分解为三序对称网络,在故障点根据边界条件,利用复合序网求解。复杂故障则利用多口网络理论<sup>[2]~[3]</sup>,将故障口电流、电压的序分量边界条件方程和各序网口参数方程联立,可解得各序口电流、电压,进而求得节点电压、支路电流。

传统的计算面向过程,不同类型的数据耦合在一起,物理概念不强,难以扩充、维护。面向对象的计算<sup>[4]</sup>通过抽象将对象的属性和操作封装在类中,系统计算在类的基础上,具有可扩充性、可维护性。面向对象的思想已运用于潮流计算<sup>[5]</sup>、电力系统仿真<sup>[6]</sup>等计算中。

本文说明了运用多口网络理论的复杂故障计算模型,并用面向对象思想实现。

## 2 复杂故障计算模型

### 2.1 故障端口网络

对于复杂故障,可以将研究的范围集中于故障处,每个故障端口构成一个口。对于横向故障,故障点和地构成一个口;纵向故障,故障处两个端子构成一个口。一个双端口的示意图如下:

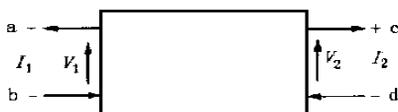


图1 双口网络示意图

对于有源网络,端口电流、电压的关系为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{(0)} \\ V_2^{(0)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{(0)} \\ V_2^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中,  $V_1$ 、 $V_2$  为端口电压,  $I_1$ 、 $I_2$  为端口电流,  $V_1^{(0)}$ 、 $V_2^{(0)}$  为端口的开口电压,  $Z_{11}$ 、 $Z_{22}$  是端口的自阻抗,  $Z_{12}$ 、 $Z_{21}$  是端口的互阻抗。端口的自、互阻抗通过导纳矩阵求得。首先根据故障情况生成导纳矩阵。然后,计算故障点的自阻抗、故障点和其它点的互阻抗,对于横向故障,在故障点注入单位电流,对于纵向故障,在故障两端分别注入单位正电流和单位负电流,解  $YV = I$  方程,求得电压向量,其数值等于故障点的自阻抗、故障点和其它点的互阻抗。最后根据故障点的自、互阻抗求端口的自、互阻抗。

端口的开口电压即故障前端口的初始电压可以通过系统故障前的节点电压相减得到。这里要注意的是纵向故障的端口初始电压无法通过正常的潮流计算得到。本文采用发电机由戴维宁电路等效变换为诺顿电路求解。发电机的等效注入电流  $I^{(0)} = E_d / X_d$ , 代入方程  $YV^{(0)} = I^{(0)}$  中,可解得各节点的初始电压,然后计算故障端口电压。

### 2.2 复合序网图

当故障发生在特殊相时(本文采用 A 相为特殊相),根据故障端口的边界条件,分为串联型故障和并联型故障。单相接地短路、两相断路是串联型故障,两相接地短路、单相断路是并联型故障。两相相间短路有点特殊,没有零序网,通过将自阻抗设定为很大值,互阻抗设定为零,可近似为并联型故障。复杂故障中,某些故障可能并不发生在特殊相,这时可在端口上串联理想变压器,将非特殊相故障转移到特殊相,使之符合串、并联的条件。各种情况下理想变压器的变比和连接示意图可参见文献<sup>[2]</sup>。

### 2.3 故障端口矩阵法

当发生  $N$  重故障时,故障端口的正、负、零序电压、电流构成  $N * 6$  个未知数,通过  $N * 3$  个端口网络方程和  $N * 3$  个边界条件方程联立线性方程组可以求解。由于复合序网图中串联型故障端口电压以及并联型故障端口电流和为零,也可以将端口矩阵进行变换,消去串联型故障的端口电压、并联型故障端口电流,直接矩阵(维数和故障数相同)求逆解得串联型故障端口电流和并联型端口电压,而不解高维的线性方程组。多端口序网方程的分块矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} V_{s(i)} \\ V_{p(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s^{(0)} \\ V_p^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ss(i)} & Z_{sp(i)} \\ Z_{ps(i)} & Z_{pp(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s(i)} \\ I_{p(i)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中  $V_{s(i)}$ 、 $I_{s(i)}$ 、 $V_s^{(0)}$  和  $V_{p(i)}$ 、 $I_{p(i)}$ 、 $V_p^{(0)}$  分别是串联、并联故障的端口电压、电流、开路电压,  $Z_{ss(i)}$ 、 $Z_{sp(i)}$ 、 $Z_{ps(i)}$ 、 $Z_{pp(i)}$  是分块阻抗矩阵。对上面等式两边部分求逆,可得到如下等式:

$$\begin{bmatrix} V_{s(i)} \\ I_{p(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s^{(0,0)} \\ I_p^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{ss(i)} & H_{sp(i)} \\ H_{ps(i)} & H_{pp(i)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s(i)} \\ V_{p(i)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $H_{ss(i)} = Z_{ss(i)} - Z_{sp(i)} Z_{pp(i)}^{-1} Z_{ps(i)}$ ,  
 $H_{sp(i)} = -Z_{sp(i)} Z_{pp(i)}^{-1}$ ,  $H_{ps(i)} = Z_{pp(i)}^{-1} Z_{ps(i)}$ ,  
 $H_{pp(i)} = Z_{pp(i)}^{-1}$ ,  $V_s^{(0,0)} = V_s^{(0)} - Z_{sp(1)} Z_{pp(1)}^{-1} V_p^{(0)}$ ,  
 $I_p^{(0)} = Z_{pp(1)}^{-1} V_p^{(0)}$ 。

考虑到理想变压器的变比,使用理想变压器副变的电流和电压(原来的变量加上标撇号表示),式(4)可写成如下形式,其中  $N_{s(i)}$ 、 $N_{p(i)}$  是理想变压器的转移系数矩阵:

$$\begin{bmatrix} V_{s(i)} \\ I_{p(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{s(1)} V_s^{(0,0)} \\ N_{p(1)} I_p^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_{s(i)} H_{ss(i)} N_{s(i)}^{-1} & N_{s(i)} H_{sp(i)} N_{p(i)}^{-1} \\ N_{p(i)} H_{ps(i)} N_{s(i)}^{-1} & N_{p(i)} H_{pp(i)} N_{p(i)}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s(i)} \\ V_{p(i)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据串联、并联故障的边界条件,将三序网的等式(5)迭加,得到

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{s(1)} V_s^{(0,0)} \\ N_{p(1)} I_p^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sp} \\ H_{ps} & H_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s(i)} \\ V_{p(i)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $H_{ss}$ 、 $H_{sp}$ 、 $H_{ps}$ 、 $H_{pp}$  分别是相应矩阵的三序量的叠加。

由式(6)可得到串联故障端口电流和并联故障端口电压的三序量。

$$\begin{bmatrix} I_{s(i)} \\ V_{p(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{s(i)} & 0 \\ 0 & N_{p(i)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{ss} & H_{sp} \\ H_{ps} & H_{pp} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{s(1)} V_s^{(0,0)} \\ N_{p(1)} I_p^{(0)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

代入式(4)可求得串联故障端口电压和并联故障端口电流的三序量。

将故障端口的电流代入三序分解后的电压电流关系式可求得网络各节点的电压,再求得支路的电流。

### 3 面向对象的基本概念

面向对象通过抽象将复杂的问题分解成几个子问题,然后集中于单个的子问题上<sup>[4]</sup>。这些子问题可以被进一步分解,直到它能被容易求解为止。面向对象的特征是封装、继承、多态。封装是一种通过定义严格的外部接口在单独编写的模块之间减少相互依赖的技术。它将系统中一个实体的各种特性聚集在一个对象中,且对对象的访问被限制在一个严格定义的接口上。面向对象计算开始于封装这个基本概念,即目标可以被描述为一系列完全自治的、封装的对象,这个对象通过一个受保护的接口访问其它对象。继承使新类能够共享已有类的行为,但具有修改的或额外添加的行为。多态可定义为行为在不同的类中有不同的解释。多态性是面向对象系统最具特色的特征之一,它表明了程序设计从如何实现一个行为到对象提供了什么抽象的行为这一观念的转变。目前商业上最成功的面向对象的语言是 C++ ,它完全支持面向对象的重要特征:通过扩充 C 中的 struct 和增加 class 关键字来支持封装、继承,通过虚函数、函数名重载、运算符重载、类型模板机制支持多态。类型模板中参数的多态性使类型模板的抽象层次比类更高。此外 C++ 还提供了结构化的异常处理机制。

### 4 面向对象的复杂故障计算的实现

面向对象程序设计的主要工作是设计类、类之间的关系和类之间的信息传送。本文将复杂故障计算分为三个层次的类:基本的数据类,包括复数类、向量模板类、矩阵模板类、稀疏矩阵模板类;系统结构类,包括系统元件类及其子类、故障描述类;系统计算类,包括导纳矩阵类、故障计算类。

#### 4.1 向量模板、矩阵模板、稀疏矩阵模板类

复杂故障计算的矩阵方法中,计算的单元是向量和矩阵,将向量和矩阵封装在模板中,重载运算符后,向量和矩阵运算形式上和简单数据类型一样。向量模板类的数据成员包括向量的维数和数据指针,成员函数包括重载加、减、等于、下标等运算符。矩阵模板类的数据成员包括矩阵的行数、列数和数

据指针,成员函数包括重载运算符、求逆矩阵等。重载运算符实现时,首先要判断两个向量或矩阵的运算是否合理,不合理则发出异常。

电力网络的特点是支路少,用导纳矩阵表示网络时,矩阵中的非零元素很少,因此对稀疏矩阵的处理将直接影响到程序的效率。稀疏矩阵运算需要解决的问题是稀疏矩阵的存储和对稀疏矩阵的操作,包括节点排序、LU分解、前代回代解线性方程、矩阵元素赋值等。将稀疏矩阵的特性抽象为模板,保持接口不变,有利于程序扩充、维护。数据存储可以用数组或链表,两种方法各有利弊,数组存取方便但插入删除困难,链表插入删除方便但存取费时。考虑到网络结构变化后重新生成导纳矩阵,因此存取的速度是主要矛盾,故矩阵元素的存储采用经典的数组法,用一个数组存储矩阵的对角元,一个数组存储矩阵的非零非对角元,另外用两个辅助数组指示非零非对角元在矩阵中的位置。在稀疏矩阵中设置标志位区别矩阵的对称性,对称稀疏矩阵只存储上三角元,非对称稀疏矩阵同时存储上、下三角元,LU分解、前代回代解方程组等操作实现也不相同。稀疏矩阵解线性方程组采用的LU分解会破坏矩阵的稀疏性,因此首先对节点排序,以使LU分解产生的注入元尽量少。在排序的同时为注入元预留下位置。用两个数组分别存储节点排序前和排序后的对应关系,将节点的次序变化隐藏在模板类内部。考虑到已知向量 $[b]$ 的稀疏性(求故障点的自、互阻抗时,在故障端口注入单位正或负电流,只有一或两个非零值),前代时采用快速前代<sup>[7]</sup>。

#### 4.2 系统结构类

系统结构信息包括网络结构信息和故障信息。电力网络是由各种元件组成的,元件类是所有系统元件的基类,基类中的数据成员是元件标识符,成员函数是将元件插入导纳矩阵的纯虚函数。复杂故障计算中有两种类型的元件:支路类,派生出线路、变压器、电容器;注入类,派生出发电机。支路类是支路型元件的父类,数据成员是支路两端的节点号。线路类的数据成员是线路的电阻、电抗、对地电容、零序电抗,变压器类的数据成员是变压器的阻抗、变比,电容器类的数据成员是电容的容抗,这三个类都重新实现了将元件插入导纳矩阵的函数。注入类是注入型元件的父类,数据成员是注入型元件的一个节点号。发电机类的数据成员是发电机的直轴次暂态电抗、直轴次暂态电势。

系统元件类的继承关系如下所示(图中箭头表示继承关系):

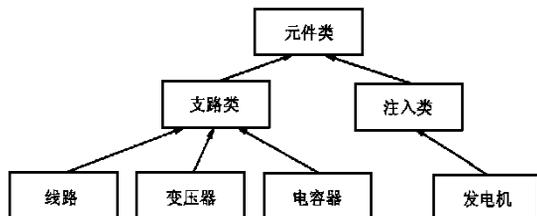


图2 系统元件类继承关系

故障描述类用来存储故障处信息,数据成员是故障处的节点号、故障相标识、故障类型、线路故障时故障点距一端节点距离占线路长度的百分比等,成员函数是故障信息初始化。

#### 4.3 导纳矩阵类和故障计算类

导纳矩阵类派生于稀疏矩阵模板类,提供了根据网络信息生成导纳矩阵的方法。故障计算类封装了复杂故障计算的模型。故障计算类的数据成员包括正、负、零序导纳矩阵、故障端口电压、故障描述、部分阻抗矩阵、故障端口矩阵等。故障计算类的成员函数包括:(1)故障计算初始化,即根据元件链表和故障信息生成三序导纳矩阵,通过支路变换法求节点电压初始值和故障端口开口电压;(2)计算故障端口矩阵和端口电流,通过注入电流法得到部分阻抗矩阵,再得到故障端口矩阵,根据故障类型将端口矩阵变换,然后将非特殊相的故障通过理想变压器转移到特殊相,最后三序网叠加求故障端口的零序电压、电流;(3)计算节点电压,即初始电压减去该节点与故障端口的互阻抗和故障电流的乘积;(4)计算支路电流,根据节点电压和支路阻抗求解。这里部分阻抗矩阵指通过导纳矩阵求的故障点自阻抗、故障点和其它点的互阻抗组成的阻抗矩阵,其行数是节点数,列数是故障数。计算类之间的继承和信息流动关系如图3。

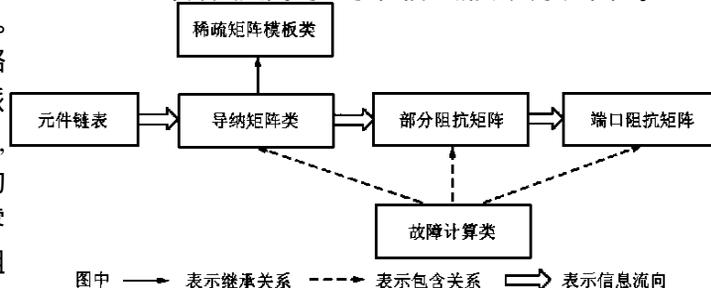


图3 计算类继承关系和信息流动

### 5 实例

通过文献<sup>[3]</sup>几个算例的演算,本文算法的结果

与其相同。本文提出的实用复杂故障计算模型和实现已应用于上海石化电网的辅助决策软件中。上海石化电网由煤电厂、热电厂、石化变电站的 220kV 网络组成,并通过两回线路到南桥变电站和华东电网连接,通过 35kV 线路给装置负荷送电。利用该算法计算石化电网短路容量(大方式)如表 1,对于每个厂站,上栏是本文计算结果,下栏是上海市电力公司中心调度所的计算结果,两者基本吻合。

表 1 短路容量计算结果 单位 MVA

母线	220kV	110kV	35kV 正一	35kV 正二	35kV 副母
金山热电厂	7051	2699	653	665	487
	6970	2648	629	646	513
金山煤电厂	6433	-	664	836	-
	6382	-	688	858	-
石化变电站	6682	-	596	596	605
	6625	-	-	-	-

石化电网中性点通过 75  $\Omega$  电阻和 150  $\Omega$  电抗并联接地,煤电厂 35kV 正一段母线发生各种简单故障时的故障点电压和电流如表 2(电压单位 kV,电流单位 A):

表 2

	单相接地故障	两相短路故障	两相接地故障	三相短路故障
A 相电压	0	21.36	31.95	0
B 相电压	36.3	10.68	0	0
C 相电压	37	10.68	0	0
A 相电流	311.7	0	0	8153.3
B 相电流	0	7061	7129.9	8153.3
C 相电流	0	7061	6992.3	8153.3

石化电网常发生异地异相接地故障,假设在煤渣 356 线路中点发生 A 相接地短路,同时乙烯总降 35kV 正二段发生 B 相接地短路,其结果如表 3、表 4,和实测值相比结果是合理的。

表 3 故障点电压(幅值单位 kV,相角单位度):

节点名	A 相幅值	A 相相角	B 相幅值	B 相相角	C 相幅值	C 相相角
乙烯 35kV 二段	3.11	33.3	0	120.14	32.93	118.96
煤渣 356 出线故障点	0	111.49	4.19	201.45	31.88	122.5

表 4 故障电流(幅值单位 A,相角单位度):

故障	A 相幅值	A 相相角	B 相幅值	B 相相角	C 相幅值	C 相相角
故障 1	9742.47	-56.38	0	63.62	0	63.62
故障 2	0	4.05	9597.46	124.05	0	124.05

## 6 结论

本文说明了复杂故障计算模型,并首次将面向对象的思想运用于复杂故障计算中,最后通过实例验证了模型和实现的有效性。本文提出的方法适用于任何类型的复杂故障,其解算过程特别适于计算机完成,而面向对象的实现结构清晰,物理概念明确,扩充性强。

### 参考文献:

- [1] 李光琦. 电力系统暂态分析(第二版). 北京:水利电力出版社,1995.
- [2] Han Z X. Generalized Method of Analysis of Simultaneous Faults in Electric Power System. IEEE Transaction On Power Apparatus and Systems,1982, PAS101(10):3933~3942.
- [3] 华北电力学院. 电力系统故障分析. 北京:电力工业出版社,1980.
- [4] 张国峰. 面向对象的程序设计和 C++ 教程. 北京:电子工业出版社,1995.
- [5] Hakvik B, Holen A T. Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object - Oriented Programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1994,9(2).
- [6] Zhou E Z. Object - Oriented Programming, C++ and Power System Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 1996,11(1):206~215.
- [7] 吴际舜. 电力系统稳态分析的计算机方法. 上海:上海交通大学出版社,1992.

收稿日期: 2001-01-03;

基金项目: 上海市重点学科项目资助

作者简介: 钱兵(1975-),男,电力系统及其自动化专业硕士研究生,研究方向为电力系统分析;程浩忠(1962-),男,博士、教授、博士生导师,现从事电力系统规划、电压稳定性等方向的教学、科研工作;杨镜非(1974-),女,硕士、讲师,研究方向为电力系统分析。

## Object - oriented practical calculation of simultaneous faults

QIAN Bing<sup>1</sup>, CHENG Hao-zhong<sup>1</sup>, YANG Jing-fei<sup>1</sup>, TANG Chun-hua<sup>2</sup>, HUANG Chun-lei<sup>2</sup>, ZHENG Ru-chun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Petrification Company, Shanghai 200540, China)

**Abstract:** This paper analyzes a practical model of simultaneous faults by multiple - port theory. Then it explains the object - oriented concept, and implements the calculation of simultaneous faults via object - oriented technology. It also analyzes the levels of simultaneous faults calculation classes and tells the way to implementation.

**Key words:** power system; object - oriented; simultaneous faults; multiple - port network