

电力系统故障模拟的图形化建模方法

周超¹, 熊易^{2,3}, 杨俊杰², 刘力²

(1. 华中科技大学控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074 ; 2. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 国家电网公司武汉高压研究院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出并建立了一种以图形建模为基础的电力系统分析软件设计框架。文中重点阐述了电力系统图形建模、潮流拓扑自动生成、电力系统故障模拟计算等技术实现方法。在构建的电力系统图形化建模平台上, 利用 IEEE 标准算例及其它典型数据, 对多个电力系统模型进行了稳态仿真, 以及以潮流分析为基础的精确故障模拟分析。经检验, 该方法在运算速度、精度以及收敛性等多个方面均能够满足实际工程需求, 展示了图形建模技术在电力系统应用领域的广泛前景。

关键词: 图形建模; 拓扑分析; 潮流计算; 故障模拟; .NET

Graphical modeling method of fault simulation in power system

ZHOU Chao¹, XIONG Yi^{2,3}, YANG Jun-jie², LIU Li²

(1. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. College of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. High Voltage Research Institute of SGCC, Wuhan 430074, China)

Abstract: A design framework of power system analysis software based on graphical modeling is proposed and established in this paper. It mainly describes the realization method of these technologies, including graphical modeling of power system, automatic generation of the power flow topology, and fault simulation of power system. On this graphical modeling platform, the steady-state simulation of several power system models are studied using the IEEE standard samples data and other typical data, and the accurate fault simulation analysis are also carried out based on the power flow analysis. It's verified that this method could satisfy all the practical demands in operation speed, precision and convergence, which shows the extensive prospects of graphical modeling in the application of power system.

This project is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China(No.50579022).

Key words: graphical modeling; topology analysis; power flow calculation; fault simulation; .Net

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0032-06

0 引言

传统电力分析软件系统一般采用面向功能或面向结构的设计方法, 大多基于字符界面设计和开发, 这种系统缺乏友好的人机界面, 图形拓扑与数据分离, 操作极为不便, 而且一般只兼容特定格式的文件数据, 系统通用性、可维护性差。采用图形描述电力系统网络拓扑结构, 在图形界面上修改数据库中的元件参数, 设计模拟仿真模式并自动输出计算结果是现代电力系统模拟分析的发展趋势, 它不仅可简化软件的操作, 还可以使计算分析结果一

目了然。然而, 基于图形化建模的电力系统分析在图形生成、模型建立、图模映射、算法优化等方面始终是研究工作的难点。为此, 本文采用面向对象设计模式, 研究并设计了一种基于.NET技术的电力系统图模一体化方法。该系统以C#.NET为开发工具, 利用GDI+技术绘制图元, 采用ADO.NET技术访问数据库, 设计并建立了基于面向对象的图元数据结构。在电力系统图形建模基础上, 通过拓扑重构和图模映射, 可在图形界面输入电力参数并自动生成电网拓扑结构, 进而实现拓扑分析、稳态分析、故障分析、以及图形化分析结果输出等多种功能。

1 图形化建模分析的拓扑描述

电力系统故障模拟的图形化建模研究方法中,

基金项目: 科技部水利部公益性行业科研专项(200701008); 国家自然科学基金重点项目(50579022)

电网拓扑描述与表达是人们一直普遍关心的问题, 良好的电网拓扑结构表示能使电网拓扑信息完整地储存和灵活访问。因此, 必需研究和设计一种能够利用专用图形库实现图元及其图元间连接关系的电力系统网络拓扑绘制, 并自动对元件编号, 形成网络拓扑结构, 生成系统稳态计算和故障计算所需数据的方法。

1.1 流拓扑元件分类

母线既是潮流的汇入点又是潮流的汇出点, 以母线为网络拓扑纽带, 把元件分为三类: 一端口元件(母线、发电机、负荷、接地元件等); 二端口元件(双相变压器、线路、电容、电抗、开关等); 多端口元件(三相变压器等)。下面以图1所示实际系统为例, 分析系统潮流数据的生成方法。

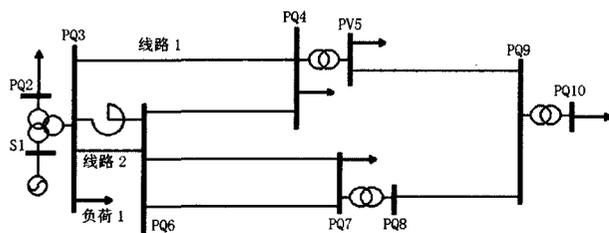


图1 电力系统主接线图

Fig.1 Main-line diagrams of power system

1.2 形成有效潮流节点集合

为实现对多个独立项目同时进行潮流分析, 在拓扑过程中, 系统自动对每个节点进行编号, 并将每个独立项目包含的有效节点信息保存到一个有效潮流节点集合中。对每个独立项目, 系统默认以平衡节点为搜索起点, 利用广度优先搜索算法, 逐个找到与其有连接关系的节点(节点只能通过双端口和多端口元件实现连接)。图1中, 节点的搜索顺序是:

S1→三相变压器中性节点→PQ2→PQ3→PQ4→PQ6→PV5→PQ7→PQ8→PQ9→PQ10

1.3 成潮流导纳矩阵

设有效潮流集合内共包含 N 个有效节点, 系统会自动构成 $N \times N$ 阶的复数导纳矩阵, 该矩阵默认元素为零。然后系统对每个节点分别操作, 逐个搜索每个节点连接的所有元件, 根据每个元件的参数逐个修改矩阵中的各个元素。例如在搜索节点PQ3时, 可发现该节点共连接了线路1、电抗器、线路2、三相变压器四个电气元件, 这四个元件都会影响PQ3对应的导纳行。

1.4 形成 P 、 Q 、 V 矩阵

为建立潮流拓扑需要, 系统自动为有效潮流节点生成有功功率、无功功率、节点电压三种 $1 \times N$ 阶实数矩阵。该矩阵的默认元素也为零, 系统根据节点电压设定值修改节点电压矩阵。有功和无功功率矩阵的修改方法类似于导纳矩阵, 即通过逐个搜索节点连接的元件进行。由此, 拓扑过程实现了从图形建模的电力系统到潮流等其它计算所需的结构化数据的映射。

2 潮流计算分析

潮流计算是电力系统分析的核心和基础。电力系统由输电线路、发电机、变压器、负荷等组成, 其中发电机及负荷是非线性元件, 但在潮流计算中, 一般可以用接在相应接点中的一个电流注入量来代表^[1]。因此, 潮流计算所用的电力网络系统可由变压器、输电线路、电容器、电抗器等静止线性元件组成, 并用集中参数表示的串联或并联等值支路来模拟。

2.1 潮流计算模型

对于 N 个节点的电力网络, 如果网络参数和网络元件已知, 可设电力系统中各节点注入电流为 I_i , 则各节点导纳矩阵 Y 与节点电压有如下关系:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

电力系统计算中, 给定的运行变量是节点注入功率, 注入节点 i 的视在功率为:

$$\hat{S}_i = P_i - jQ_i = \hat{U}_i I_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)即得潮流计算的基本方程组:

$$P_i - jQ_i = \hat{U}_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

由于节点导纳矩阵的第 i 行, 只在与节点 i 有支路相连位置的节点时, 才有非零元素。故用 $j \in i$ 来表示所有与 i 相连的节点 j , 包括 $j=i$ 。

用极坐标表示, 可得如下潮流方程:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, U_i 和 θ_i 分别表示电压相量的幅值和角度, G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示导纳矩阵的实部与虚部, 在进行潮流计算时, 一般给出式(5)所示的形式:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

当采用直角坐标时,复数量用实部和虚部表示,节点电压可表示为: $\dot{U}_i = e_i + jf_i$, 代入式(3)中可得:

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 潮流算法

潮流模型的算法很多,每个算法可构成完成同一功能的算法类,其输入和输出有相同的接口形式,将不同的算法对象组成方法库可以满足不同分析的需求。其中,牛顿-拉夫逊法和 P-Q 分解法是使用最为广泛的经典算法。

虽然 P-Q 分解法针对电力系统特性具有将有功、无功解耦迭代计算且计算内存开销小计算速度快的优势,但是考虑到当元件 R/X 过大,或是线路重载时, P-Q 法存在不收敛的问题,本文采用牛顿-拉夫逊算法。

牛顿-拉夫逊算法最突出的优点是收敛速度快^[2],如果初值选择合适,算法将具有平方收敛特性,一般迭代 4~5 次便可以收敛到一个非常精确的解,而且其迭代次数与所计算的网路规模基本无关。牛拉法还具有可靠的收敛性,对一些病态网路也能够可靠收敛。牛拉法的不足是所需的内存量较多,而且计算量较大,但是可以通过节点优化编号,稀疏矩阵存储技术减少内存资源开销。

牛顿-拉夫逊法在数学上是求解非线性代数方程式的有效方法。其要点是把非线性方程式的求解过程变成反复地对相应的线性方程式进行求解的过程,即逐次线性化过程。该方法应用于电力系统潮流计算的流程如图 2 所示。

根据式(6),假定系统中第 1, 2, ..., m 号节点为 PQ 节点,第 i 节点的给定功率设为 P_{is} 和 Q_{is} ,对该节点可列写方程:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

假定系统中第 m+1, m+2, ..., n-1 号节点为 PV 节点,则对其每一节点可以列写方程:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \\ \Delta V_i^2 = V_{is}^2 - V_i^2 = V_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

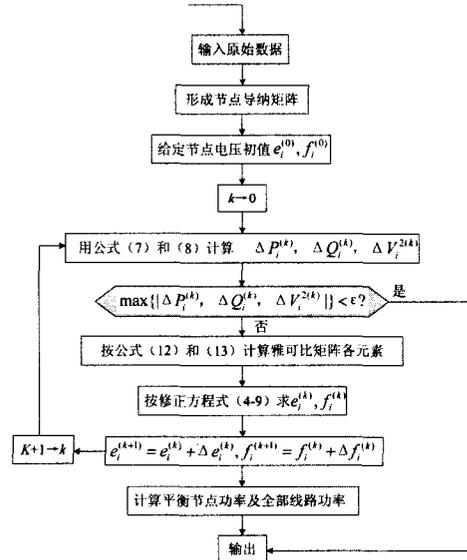


图 2 牛顿-拉夫逊法潮流计算程序框图

Fig.2 Program diagram of Newton-Raphson power flow calculation

牛顿法潮流计算的核心是求解下列修正方程式:

$$\begin{aligned} \Delta W &= -J \Delta V \\ \begin{bmatrix} \Delta W \\ \Delta V \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta P_1 & \Delta Q_1 & \cdots & \Delta P_m & \Delta Q_m & \Delta P_{m+1} & \Delta V_{m+1}^2 & \cdots & \Delta P_{n-1} & \Delta V_{n-1}^2 \end{bmatrix}^T \\ \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta V \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Delta e_1 & \Delta f_1 & \cdots & \Delta e_m & \Delta f_m & \Delta e_{m+1} & \Delta f_{m+1} & \cdots & \Delta e_{n-1} & \Delta f_{n-1} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (9)$$

其中:雅可比矩阵的求解是潮流计算的关键步骤,矩阵各元素的定义如下:

对于 PQ 节点:

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \partial P_i}{\partial e_j} & \frac{\Delta \partial P_i}{\partial f_j} \\ \frac{\Delta \partial Q_i}{\partial e_j} & \frac{\Delta \partial Q_i}{\partial f_j} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于 PV 节点:

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta \partial P_i}{\partial e_j} & \frac{\Delta \partial P_i}{\partial f_j} \\ \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial e_j} & \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial f_j} \end{bmatrix} \quad (11)$$

对式(7)、(8)求偏导,当 $i \neq j$ 时:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \partial P_i}{\partial e_j} = -\frac{\Delta \partial Q_i}{\partial f_j} = -(G_{ij}e_i + B_{ij}f_i) \\ \frac{\Delta \partial P_i}{\partial f_j} = \frac{\Delta \partial Q_i}{\partial e_j} = B_{ij}e_i - G_{ij}f_i \\ \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial e_j} = \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial f_j} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当 $i=j$ 时:

$$\begin{cases} \frac{\Delta \partial P_i}{\partial e_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} e_k - B_{ik} f_k) - G_{ii} e_i - B_{ii} f_i \\ \frac{\Delta \partial P_i}{\partial f_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} f_k + B_{ik} e_k) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\Delta \partial Q_i}{\partial e_i} = \sum_{k=1}^n (G_{ik} f_k + B_{ik} e_k) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\Delta \partial Q_i}{\partial f_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} e_k - B_{ik} f_k) + G_{ii} e_i + B_{ii} f_i \\ \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial e_i} = -2e_i \\ \frac{\Delta \partial V_i^2}{\partial f_i} = -2f_i \end{cases} \quad (13)$$

2.3 实例分析

以 IEEE 标准仿真数据和实际电网数据, 建立多个电力系统模型, 并进行大量稳态仿真计算, 通过对比 IEEE 标准结果, 证明上述模型具有较好的运算精度和收敛性。其中 IEEE14 节点系统是典型的环网结构, 具有较好的代表性, 该系统共有 14 个节点, 19 条支路, 其中 PV 节点 4 个。在图 3 中, 给出了采用默认配置进行潮流计算的结果, 以及与 IEEE 标准结果进行的比较分析, 其中电压最大偏差值小于 0.002, 误差小于 0.2%, 相角最大偏差值小于 0.15°, 达到了较高的精度, 完全满足工程应用需求。

节点编号	节点类型	IEEE标准数据结果		本程序计算结果		误差比较	
		电压幅值	电压相角	电压幅值	电压相角	幅值偏差	相角偏差
1	平衡节点	1.06	0	1.06	0	0	0
2	PV	1.045	-4.9932	1.045	-4.981	0	0.0122
3	PV	1.01	-12.7562	1.01	-12.718	0	0.0382
4	PQ	1.0119	-10.2191	1.01262	-10.324	0.00072	-0.1049
5	PQ	1.0158	-8.7718	1.01626	-8.7826	0.00046	-0.0108
6	PV	1.07	-14.6373	1.07	-14.5227	0	0.1146
7	PQ	1.04	-13.1591	1.04195	-13.2582	0.00195	-0.1091
8	PV	1.09	-13.1591	1.09	-13.2582	0	-0.1091
9	PQ	1.0128	-14.7385	1.01334	-14.8466	0.00054	-0.1081
10	PQ	1.0152	-15.0016	1.01433	-15.0774	-0.00087	-0.0758
11	PQ	1.0386	-14.9273	1.03808	-14.7953	-0.00152	0.132
12	PQ	1.0543	-15.2025	1.05522	-15.0774	0.00092	0.1251
13	PQ	1.0443	-15.3941	1.04144	-15.2589	-0.00086	0.1352
14	PQ	1.008	-16.075	1.00879	-16.039	0.00079	0.036

图 3 IEEE14 节点系统结果比较

Fig.3 Result comparison of IEEE14 bus system

3 故障模拟及算例分析

3.1 电力系统故障计算

严格地讲, 电力系统的短路故障或其它复杂的故障都伴随着复杂的电磁和机电暂态过程。在整个故障期间电力系统各部分的电流和电压是随时间变化的, 其中不仅包括幅值随时间变化的工频周期分量, 同时还有随时间衰减的非周期分量以及其它频率的周期分量。所以, 完整的短路电流及复杂故障计算要求解微分方程和代数方程组。但一般在解决

电气设备的选择、继电保护的整定及运行方式分析等问题时, 往往只需要计算短路或故障后某一瞬间 (如故障后 $t=0$ 时) 电流和电压的周期分量。为此, 本文涉及的算法和计算结果是故障后 $t=0$ s 时电流和电压的周期分量, 而不涉及这些量的变化过程的计算。

3.2 对称故障算法

在正常运行情况下, 三相电力系统可以认为是三相对称的, 只要知道某一相的值就可以推算出其它两相的值, 所以可以用单相电路来求解三相电力系统, 即将所有 Δ 形接法的三相电力系统元件变换成等值的 Y 形接法后, 求其一臂的单相值即可。

对称短路时, 制定等值网络的方法与潮流计算时形成电力网络的方法近似, 主要算法如下^[3]:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1f} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{f1} & \cdots & Y_{ff} & \cdots & Y_{fn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nf} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_f \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \leftarrow f \text{点} \quad (14)$$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_{f0}}{Z_{ff}} \approx \frac{1}{Z_{ff}} \quad (\text{接地阻抗 } Z_f \text{ 为零时}) \quad (15)$$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_{f0}}{Z_{ff} + Z_f} \approx \frac{1}{Z_{ff} + Z_f}$$

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} \approx \frac{\Delta \dot{U}_i - \Delta \dot{U}_j}{Z_{ij}} \quad (16)$$

3.3 不对称故障算法

将三相不对称的电流、电压系统分为三个对称系统, 即正序、负序和零序系统。每一序网络可以列出一个对故障点的电压平衡方程式, 然后根据边界条件分解出的三个对称分量等式形成复合序网, 直接在复合序网中进行计算, 即可得到故障处的各序短路电流和电压^[4, 5]。分别在各序网中求得每一条支路、每一个节点的电压后, 即可合成生成不对称故障时网络中三相支路电流和节点电压的分布。如果正序、负序电流、电压分量经过 Y, d 接线方式的变压器时, 还需要计及正序、负序电流和电压分量的相位变化后, 才能合成网络中三相支路电流和节点电压。不对称故障算法的一般流程如图 4 所示。

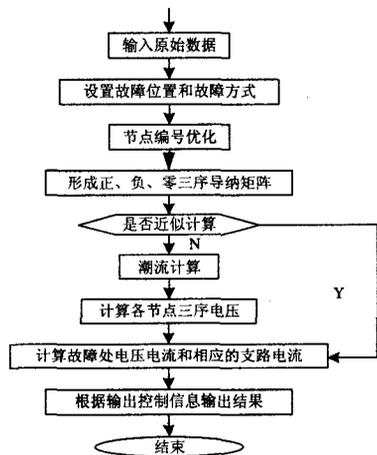


图 4 故障计算流程图

Fig.4 Flow chart of fault calculation

3.4 三序拓扑重构

在故障计算程序设计过程中, 如何从图形化建模的电力系统自动生成该系统对应的正负零三序拓扑结构, 是实现图形化建模故障计算分析的关键技术。正、负、零三序导纳矩阵的拓扑思路基本一致, 但在具体算法上有所不同。下面以图形化建模系统生成的电力系统(图 1)形成正序导纳矩阵为例, 描述正、负、零三序导纳矩阵的拓扑过程:

(1) 形成正序有效节点集合: 与潮流拓扑设定不同的是^[6], 本文设定的正序有效节点集合不再以平衡节点为搜索起点, 而是以用户设定的故障位置作为搜索起点。为此, 将故障点分为两种大的类型: 节点类故障和线路类故障。对于节点类故障, 故障点就是该节点本身; 对于线路类故障, 系统会自动添加一个新的故障点作为搜索起点。由于深度优先搜索法需要回溯, 某些节点可能多次被搜索, 而广度优先搜索法只对每个节点访问一次, 因此, 本文采用广度优先搜索法来实现电网拓扑的静态分析和动态追踪。

例如, 当图 1 中 PQ3 节点发生任意故障时, 正序有效节点的搜索路径是:

PQ3→三相变压器中性节点→PQ6→PQ4→S1→PQ2→PQ7→PV5→PQ8→PQ9→PQ10

当图 1 中节点 PQ3 和节点 PQ4 之间的线路 1 发生任意故障时, 正序有效节点的搜索路径是:

故障点→PQ3→PQ4→三相变压器中性节点→PQ6→PV5→S1→PQ2→PQ7→PQ9→PQ8→PQ10

(2) 形成正序导纳矩阵: 假设有效正序节点集合内共包含 N 个有效节点, 系统自动为每个节点生

成 $1 \times N$ 阶复数导纳行, N 个节点共同构成 $N \times N$ 阶的复数导纳矩阵, 该矩阵默认元素都为零。然后系统对每个节点分别操作, 逐个搜索每个节点连接的所有元件, 根据每个元件的参数逐个修改矩阵中的元素。除中性点接地阻抗、空载线路(不计导纳)以及空载变压器(不计励磁电流)外, 电力系统各元件均应包括在正序网络中。此外, 还需在短路点引入代替故障条件的不对称电势源的正序分量。

生成负序以及零序网络的思路, 与正序网络生成过程相同^[7,8]。区别在于, 所有电源的负序电势为零。因此, 只需把正序网络中各元件的参数用负序参数代替, 并令电源电势等于零, 而在短路点引入代替故障条件的不对称电势源中的负序分量, 便可得到负序网络。

在零序网络中, 因为三相零序电流大小及相位相同, 因此它们必须经过大地(或架空地线、电缆包皮等)才能构成通路, 而且电流的流通与变压器中性点接地方式及变压器的接法有密切的关系。因此在生成零序导纳矩阵时, 需要运用到 Y- Δ 变换, 限于篇幅, 不再详述。

3.5 节点类型故障实例分析

本文采用基于潮流分析为基础的精确故障计算。图形化建模分析的用户可以通过简单的鼠标键盘操作, 选择故障位置以及故障类型。下面仍以图 1 所示的电力系统为例, 分析计算方法。

系统首先完成潮流计算, 继而进行潮流计算为基础的节点故障计算。以 PQ3 节点发生 AB 两相接地短路, 且过渡阻抗中 Z_f 为 $(2+j3)$, Z_g 为 $(4+j5)$ 为例 ($Z_f=R_f+jX_f$; $Z_g=R_g+jX_g$)。用户操作如下:

(1) 选择故障位置: 用鼠标左键单击选中节点 PQ3。

(2) 选择故障类型及过渡阻抗: 单击系统故障计算菜单, 会出现图 5 所示故障类型选择对话框。首先鼠标左键单击选中故障类型“AB 相短路接地”, 然后在过渡阻抗菜单中输入参数值, 点击确定即可完成计算。

(3) 输出计算结果: 单击系统“输出计算结果”菜单, 用户即可查看系统任意节点, 以及任意元件的正、负、零三序和最终电压、电流信息。其中: 图 6 中 A、B、C 图分别为系统中所有节点的正、负、零三序电压值信息(包括电压模值和相角)列表; D 图是由正、负、零三序电压合成系统最终电压集合。

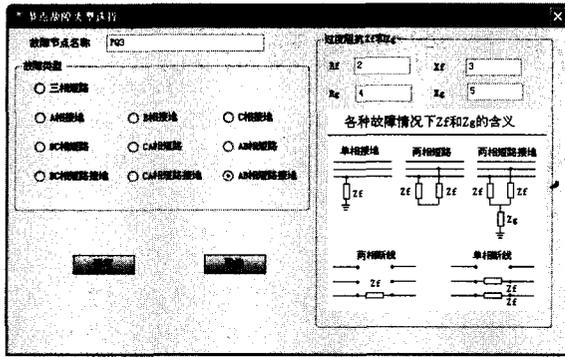


图5 节点故障类型选择

Fig.5 Type selection of node fault

节点名称	故障类型	故障相	故障阻抗	故障电抗	故障电阻	故障电纳
F02	三相短路		17.2973	179.8662	59.8662	-60.1130
F03	单相接地	A	127.8421	-6.8572	-126.8572	113.3429
F04	三相短路		100.6524	179.8662	59.8662	-60.1130
F05	单相接地	B	125.2374	-9.2227	-129.2227	110.7773
F07	三相短路		123.3476	-10.3577	-130.3577	109.6423
F08	单相接地	C	65.7824	-12.9369	-132.9369	107.0631
F09	三相短路		65.5061	-13.7823	-133.7823	106.2377
F15	单相接地	A	65.7477	-14.0026	-134.0026	105.9972
S1	三相短路		8.9548	179.8662	59.8662	-60.1130

图6 系统节点相关计算结果

Fig.6 Relevant calculation results of system node

节点名称	故障类型	故障相	故障阻抗	故障电抗	故障电阻	故障电纳
F02	三相短路		18.1826	116.3394		
F03	单相接地	A	116.1927	116.3394		
F04	三相短路		116.2044	116.3394		
F05	单相接地	B	116.0824	116.3394		
F07	三相短路		115.7272	116.3394		
F08	单相接地	C	59.1436	116.3394		
F09	三相短路		58.5181	116.3394		
F15	单相接地	A	57.3090	116.3394		
S1	三相短路		286.2254	116.3394		

图7 元件正序电流

Fig.7 Positive sequence current of the elements

图形化建模电力系统故障模拟分析软件能自动生成系统所有元件的正、负、零三序电流以及最终电流。图7为系统中所有元件的正序电流值列表。图8所示为系统中所有元件的最终电流集合,该表的结构类似于元件正序电流表,其电流值是由正、负、零三序电流值矢量叠加生成。

节点名称	故障类型	故障相	故障阻抗	故障电抗	故障电阻	故障电纳
F02	三相短路		123.9718	8.0618	-85.9008	8.5305
F03	单相接地	A	127.8421	-6.8572	-126.8572	113.3429
F04	三相短路		100.6524	179.8662	59.8662	-60.1130
F05	单相接地	B	125.2374	-9.2227	-129.2227	110.7773
F07	三相短路		123.3476	-10.3577	-130.3577	109.6423
F08	单相接地	C	65.7824	-12.9369	-132.9369	107.0631
F09	三相短路		65.5061	-13.7823	-133.7823	106.2377
F15	单相接地	A	65.7477	-14.0026	-134.0026	105.9972
S1	三相短路		8.9548	179.8662	59.8662	-60.1130

图8 元件最终电流

Fig.8 Final current of the elements

4 结论

电力系统图形化建模方法为电力系统故障模拟计算提供了一种新颖、便捷的仿真分析手段。本文通过基于面向对象的图元数据结构分析和设计,构建了电力系统图形化建模平台,提出了一种适应电力系统图形化建模分析的潮流拓扑生成方法和潮流计算模型及其求解算法,并对其进行了设计与实现。IEEE标准分析和实例研究表明,本文所描述的拓扑分析方法和算法,能够满足工程所需的精度和实时性要求,用户只需通过鼠标操作完成网络图布置、计算数据选择及其输出方式等多种操作,并可通过图形化建模分析功能直观观察计算项目的运行结果,在实际应用中取得了较好的效果。

参考文献

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [2] 王锡凡. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [3] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [4] Hongsak D P, Eheakul P Y, Abbyghchi Iraj D. A Topology-Based Algorithm for Tracking Network Connectivity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (1): 339-346.
- [5] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [6] 于尔铿. 电力系统实时接线分析[J]. 电力系统自动化, 1980, 6 (1): 12-16.
- [7] 苏义荣, 邱淘西, 邱家驹. 配电网络拓扑分析的研究[J]. 浙江电力, 2001,(5): 12-17.
- [8] McCormick B H, DeFanti T A, Brown M D. SpecialIs issue on Visualization in Scientific Computing[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(6):1-14.

收稿日期: 2008-01-20

作者简介:

周超(1986-),男,从事自动化技术领域的学习和研究工作。E-mail: the_five@126.com