

# 基于图计算的电力系统故障建模方法

李鑫, 曾琢琳, 石鹏, 王永灿

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**故障建模是电力系统仿真分析的重要基础,如何快速准确对某类( $N-1$ 、 $N-2$ 等)故障进行建模一直困扰电网分析人员。首先,分析了电力系统故障建模需要考虑的故障发展路径、故障动作时序两个要素,其中故障发展路径的搜索是故障建模的难点;其次,结合电力系统数据结构特征,提出了基于图计算的电力系统故障建模方法;最后,通过一个规模较大的省级电网验证了所提方法的有效性。在未来“双碳”“双高”电力系统发展的背景下,所提方法为电力系统在线、离线仿真分析所依赖的全网故障建模提供了新的思路 and 工具。

**关键词:**电力系统; 故障建模; 图计算

**中图分类号:** TM 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)05-0036-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210508

## Power System Fault Modeling Method Based on Graph Calculation

Li Xin, Zeng Zhuolin, Shi Peng, Wang Yongcan

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Fault modeling is crucial for power system simulation. There is no fast, accurate or complete method to model some common type faults (such as  $N-1$  fault,  $N-2$  fault), which troubles the system analysts. Firstly, two factors considering in fault modeling are analyzed, that is, fault route and fault action sequence, in which fault route is the difficulty of fault modeling. Secondly, a power system fault modeling method based on graph calculation is proposed with the consideration of the characteristics of power system data structure. Finally, a case of real power system is demonstrated to verify the availability of the proposed method. In future, the proposed method can be a theoretic foundation and practical tool for both on-line and off-line power system simulation.

**Key words:** power system; fault modeling; graph calculation

## 0 引言

电力系统故障建模是利用电力系统仿真数据模拟系统常见故障以及故障后自动化装置动作的数据工作。故障建模是电力系统安全稳定分析的基础。准确而全面的故障建模,能够让电网方式计算人员了解电力系统暂态稳定以及动态稳定水平,分析并提出提高系统稳定的措施<sup>[1]</sup>。

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上郑重宣布:中国将提高国家自主贡献力度,二

**基金项目:** 国网四川省电力公司科技项目(基于深度学习的电网暂态稳定特性预测、分析及实时决策平台研发 521997200035)

氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,争取2060年前实现碳中和。随着“碳达峰、碳中和”目标以及行动方案<sup>[2]</sup>的提出,国民经济和社会发展对电网这种能源基础设施的依赖将不断加大,电网规模将不断扩大、优化;随着“高比例可再生能源、高比例电力电子设备”电网形态的不断演化<sup>[3]</sup>,新型电力系统运行的复杂度也会不断提高。这对方式计算人员以及电网运行人员把握电力系统安全稳定水平提出了更大的挑战。

电力系统故障建模有两个主要难点。首先,是系统规模大。以某省级电网为例,其500 kV厂站超过50个,但在仿真数据中,为了模拟不同断路器,500 kV计算节点超过700个。其次,是故障类型

多。比如常见的故障有  $N-1$  故障、 $N-2$  故障以及众多新型或连锁型的故障。每一类故障形成的故障数量都与电网线路数量级别相当。由于以上两个主要难点,电力系统故障建模很难做到不重不漏不错地人工建模、人工管理。

电力系统故障建模相关方法研究目前较少,仅限于一些半自动化方法<sup>[4]</sup>。该类方法仅仅是对故障数据的格式转化,依赖调度部门已经编制好的故障数据,并没有实现故障的自动建模。

电力系统能够以图的形式进行表示,是电力系统结构相关问题的共同数学基础。电力系统图计算是将图论中的相关算法应用到电力系统中解决实际问题的一种新思路。下面基于图论相关算法<sup>[5]</sup>,对电力系统故障建模问题进行了研究:第1章分析了电力系统故障建模的关键因素;第2章研究了基于图计算的电力系统故障建模方法;第3章是算例分析,将方法应用于某规模较大的省级电网,并对所提算法的有效性进行了讨论。

## 1 电力系统故障建模的关键因素

电力系统故障建模是为了模拟电力系统故障发生以及后续继电保护装置动作而在电力系统计算数据中进行的一系列设置。电力系统在运行过程中,可能发生多种类型的故障。故障后,继电保护装置将切除故障元件,避免故障影响范围进一步扩大,以最小的代价保证电力系统的安全稳定运行。常见的故障以及故障后系统动作如表1所示。

表1 常见故障及故障后的继电保护装置动作

故障类型	故障后继电保护装置动作
$N-1$ 故障	跳开线路两侧断路器
$N-2$ 故障	跳开本线路两侧断路器,同时跳开同塔另一回线路两侧断路器
全站失电故障	跳开全站所有等级母线上的出线断路器
⋮	⋮

由于电力系统仿真软件的数据组织形式不同,每一种类型的故障针对不同的线路特征可能会有不同的表达。例如在综合稳定程序 PSASP 的  $N-1$  故障建模中,故障线路两侧是否带高压电抗器将决定故障建模最终的形式。一个典型的 PSASP 电网数据结构如图1所示。甲变电站拥有6个子节点:主节点“甲50”、分支节点“甲51”“甲52”“甲53”“甲54”,同时还具有一个高压电抗器节点“甲丙1”。甲

变电站与丙变电站共有两回线路,在 PSASP 数据中称为实体边,分别为“甲丙1—丙53”“甲53—丙51”。甲变电站与乙变电站共有一回线路,为“甲54—乙51”。除实体边之外,数据结构中的其他边称为虚拟边,仅仅表示站内母线分串等结构信息以及必要的断路器位置信息,如图1中“甲50—甲54”“甲54—甲丙1”等。

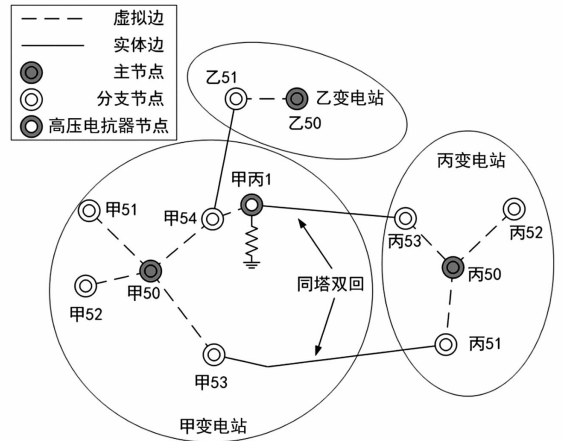


图1 典型的 PSASP 电网数据结构

发生在“甲丙1—丙53”线路上的  $N-1$  故障,可以描述为1.00 s时“甲丙1—丙53”线路出口处发生三相接地短路故障,在建模中体现为“甲丙1—丙53”线路在1%处三相接地短路。1.09 s和1.10 s时,线路保护动作分别跳开“甲丙1—丙53”线路两侧断路器,在建模中体现为1.09 s时“甲54—甲丙1”线路在100%处断开以及1.10 s时“甲丙1—丙53”在99%处断开。整个  $N-1$  故障的物理过程以及建模体现形式如表2所示。

表2 典型前侧带高压电抗器线路  $N-1$  故障物理过程及建模体现形式

物理过程	物理过程归类	建模体现形式
1.00 s“甲丙1—丙53”线路出口处发生三相接地短路	故障	1.00 s“甲丙1—丙53”线路在1%处三相接地短路
1.09 s“甲丙1—丙53”线路故障近端断路器跳开	继电保护装置动作	1.09 s“甲54—甲丙1”线路在100%处断开
1.10 s“甲丙1—丙53”线路故障远端断路器跳开	继电保护装置动作	1.10 s“甲丙1—丙53”线路在99%处断开

发生在“甲53—丙51”线路上的  $N-1$  故障,可以描述为1.00 s时“甲53—丙51”线路出口处发生三相接地短路故障,在建模中体现为“甲53—丙

51”线路在 2% 处三相接地短路。1.09 s 和 1.10 s 时,线路保护动作分别跳开“甲 53—丙 51”线路两侧断路器,在建模中体现为 1.09 s 时“甲 53—丙 51”线路在 1% 处断开以及 1.10 s 时“甲 53—丙 51”在 99% 处断开。整个  $N-1$  故障的物理过程以及建模体现形式如表 3 所示。

表 3 典型不带高压电抗器线路  $N-1$  故障物理过程及建模体现形式

物理过程	物理过程 归类	建模体现形式
1.00 s“甲 53—丙 51”线路出口处发生三相接地短路	故障	1.00 s“甲 53—丙 51”线路在 2% 处三相接地短路
1.09 s“甲 53—丙 51”线路故障近端断路器跳开	继电保护装置动作	1.09 s“甲 53—丙 51”线路在 1% 处断开
1.10 s“甲 53—丙 51”线路故障远端断路器跳开	继电保护装置动作	1.10 s“甲 53—丙 51”线路在 99% 处断开

显然,不同的故障线路类型将决定在故障建模中保护等自动化装置动作发生的对象。因此,包含故障发展路径的建模与故障动作时序是电力系统故障建模的两个关键因素,而故障发展路径尤为关键。故障的发生与演化大多数都是以实际物理系统中的线路为基础,因此故障发展路径与实际线路的类型密切相关。

## 2 基于图计算的电力系统故障建模方法

### 2.1 图论基础

一个简单无向图  $G$  由节点集合  $V$  以及节点之间连接的边的集合  $E$  组成,记作:

$$G = (V, E) \quad (1)$$

式中:  $V$  为图  $G$  所有的节点组成的集合;  $E$  为图  $G$  所有的边组成的集合。 $|V| = n, |E| = m$  表明  $V$  拥有  $n$  个节点,  $E$  拥有  $m$  条边。如图 1 所示局部电网中,  $V = \{\text{“甲 50”}, \text{“甲丙 1”}, \text{“乙 51”}, \dots\}$ ,  $E = \{\text{“甲丙 1—丙 53”}, \text{“甲 54—甲丙 1”}, \text{“乙 50—乙 51”}, \dots\}$ 。

$\eta(v, G)$  表示节点  $v$  在图  $G$  中的邻居节点集合,即与节点  $v$  所直接相连的节点的集合:

$$\eta(v, G) = \{v_i \mid v_i \in V, (v_i, v) \in E\} \quad (2)$$

如图 1 中,  $\eta(\text{“甲 54”}, G) = \{\text{“甲 50”}, \text{“甲丙$

1”}, \text{“乙 51”}\}。

$\varepsilon(v, G)$  表示节点  $v$  在图  $G$  中的度,即节点  $v$  所连接边的数量:

$$\varepsilon(v, G) = |\eta(v, G)| \quad (3)$$

如图 1 中,  $\varepsilon(\text{“甲 54”}, G) = 3$ , 表明节点“甲 54”拥有 3 个邻居。

定义节点类型函数  $\sigma: V \rightarrow C$  表示集合  $V$  中每个节点的类型  $c_i \in C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$ 。

$$\forall v \in V, \sigma(v) \in C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\} \quad (4)$$

如图 1 中所示的一个简单分类就是  $C = \{\text{主节点}, \text{分支节点}, \text{高压电抗器节点}\}$ 。实际电网由于管理的需要,自然会根据节点的类型按照一定规则进行节点命名,因此可以通过边的命名反向获取这些节点的类型。

定义边类型函数  $\tau: E \rightarrow C$  表示集合  $E$  中每条边的类型  $d_i \in D = \{d_1, d_2, \dots, d_p\}$

$$\forall e \in E, \tau(e) \in D = \{d_1, d_2, \dots, d_p\} \quad (5)$$

如图 1 中所示的一个简单分类就是  $D = \{\text{实体边}, \text{虚拟边}\}$ 。下面提出的建模方法会针对边的分类进一步细化。

### 2.2 基于图计算的电力系统故障建模方法框架

算法首先需要对电力系统计算网络进行初始化,形成式(1)形式图的结构。然后对所有的边进行分类,即将电力系统线路在 PSASP 中的实体边模型与虚拟边模型细分为:两侧都不带高压电抗器、前侧带而后侧不带高压电抗器、前侧不带而后侧带高压电抗器以及两侧都带高压电抗器 4 类,形成式(5)的映射形式。接着完善所有节点的附加信息以及实体边的附加信息,如根据节点所属变电站并以式(4)的形式确定节点归属信息,根据线路命名确定同塔信息等。再根据实体边的类型,结合需要形成的故障卡类型寻找故障发展路径。最后,根据寻找到的故障发展路径进行故障动作时序的分配,完成故障建模。整体的算法框架如图 2 所示。

### 2.3 考虑电力系统数据结构特征的故障发展路径搜索方法

基于图计算的电力系统故障建模方法框架的重点在于图 2 的第 4 步。不同的故障类型在此步骤有不同的体现。下面以故障发展路径较长、较为复杂的“中开关拒动(3/2 接线方式的中断路器拒动)”故障为例,说明考虑电力系统数据结构特征的图计算方法内核。

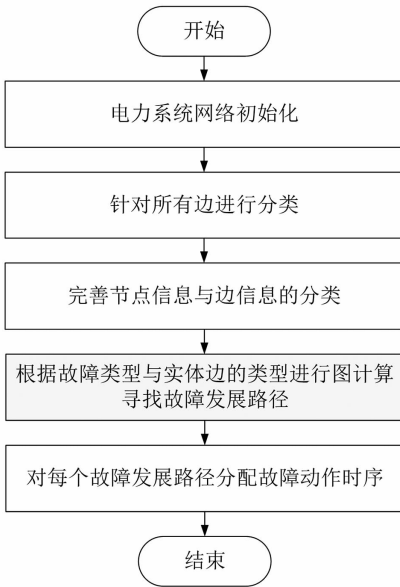


图 2 基于图计算的电力系统故障建模方法框架

如图 1 所示,一个发生于线路“甲丙 1—丙 53”的“中开关拒动”故障的物理过程是 1.00 s“甲丙 1—丙 53”线路出口处发生三相接地短路故障。1.09 s 和 1.10 s,线路保护动作,跳开“甲丙 1—丙 53”线路两侧断路器,但故障近端有一相未跳开。由于仍然存在短路接地点,在 1.45 s 时跳开“甲 50—甲 54”以及“甲 54—乙 51”。整个“中开关拒动”故障的物理过程以及建模体现形式如表 4 所示。

表 4 “中开关拒动”故障物理过程及建模体现形式

物理过程	物理过程 归类	建模体现形式
1.00 s“甲丙 1—丙 53”线路出口处发生三相接地短路	故障	1.00 s“甲丙 1—丙 53”线路在 1% 处三相接地短路
1.09 s“甲丙 1—丙 53”线路故障近端断路器非全相跳开	继电保护装置非正确动作	1.09 s“甲 54—甲丙 1”线路在 100% 处 BC 相断开
1.10 s“甲丙 1—丙 53”线路故障远端断路器跳开	继电保护装置动作	1.10 s“甲丙 1—丙 53”线路在 99% 处断开
1.45 s 剩余同串边断路器跳开	后备保护装置动作	1.45 s“甲 50—甲 54”线路在 0% 处断开
1.45 s 同串出线末端断路器跳开	后备保护装置动作	1.45 s“甲 54—乙 51”线路在 99% 处断开

由表 4 可知,该故障发展路径有 3 个关键点:

- 1) 有两条实体边:“甲丙 1—丙 53”与“甲 54—乙 51”;
- 2) 涉及两条边串联的甲、乙、丙 3 个变电站;
- 3) 涉及中间串的分支节点“甲 54”,而且该分支

节点除了主节点外仅有两个邻居节点。

因此算法首先需要寻找分支节点;然后再从分支节点出发迈向邻居节点,直到到达下一个分支节点,进而找到所有与该分支节点相关的线路;最后再进行“中开关拒动”故障动作时序的分配,完成“中开关拒动”的故障建模。由于高压电抗器节点的度均为 2,分支节点的度小于等于 3,因此在路径寻找的过程中,整个算法的时间复杂度为  $O(n + m)$ 。程序流程如图 3 所示。

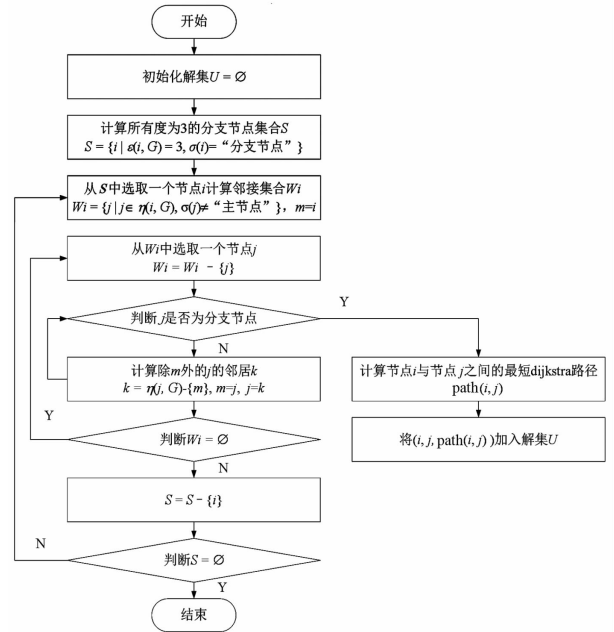


图 3 考虑电力系统数据结构特征的建模方法

### 3 算例应用

以某省级 500 kV 电网计算网络为例,按照图 2 的流程,首先进行网络初始化分析,得到该网络有 703 个计算节点,818 条计算边。其中不同种类节点与边的分布如图 4 所示。

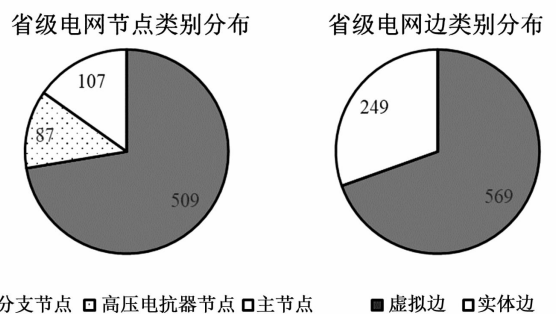


图 4 某省级电网节点、边不同类型的分布情况以全网  $N - 1$  故障建模为例,针对全网 249 条

实体边,结合铁塔信息仅需分析的线路条数为 123 条。针对其中带高压电抗器的线路,故障发展路径包含高压电抗器节点所连接的另一段虚拟线路,每条线路又可以分为前侧故障与后侧故障。最后,将故障动作时序分配给故障发展路径,综合得到的故障模型如图 5 所示。

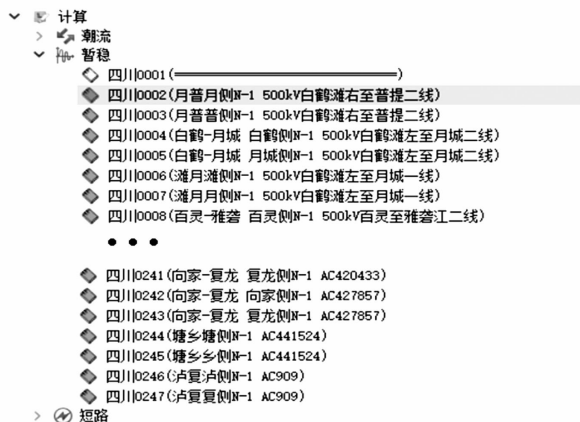


图 5 某省级电网全网  $N-1$  故障在 PSASP 中建模

可以看出,通过对节点与边的分类分析能够大为降低故障建模的时间复杂度。

针对该省级电网,不同类故障的建模时间如表 5 所示。秒级的处理速度不仅能够应用于离线故障建模,还能够推广到在线系统,为电力系统在线安全稳定分析提供支持。

表 5 不同类故障建模所需时间

故障类型	所提方法所需时间/s
$N-1$ 故障	0.306
$N-2$ 故障	0.403
“中开关拒动”故障	1.246

目前,已经完成基于图计算的电力系统故障建模软件的开发。该软件包含电网数据读写、网络分析以及常见故障类别的故障建模等功能模块,已经在年方式计算、2~3 年电网安全稳定分析等工作中得到应用,软件界面如图 6 所示。

## 4 结 论

通过对电力系统故障模型的分析,结合故障发展路径与故障动作时序以及电力系统数据结构特征,提出了基于图计算的电力系统故障建模方

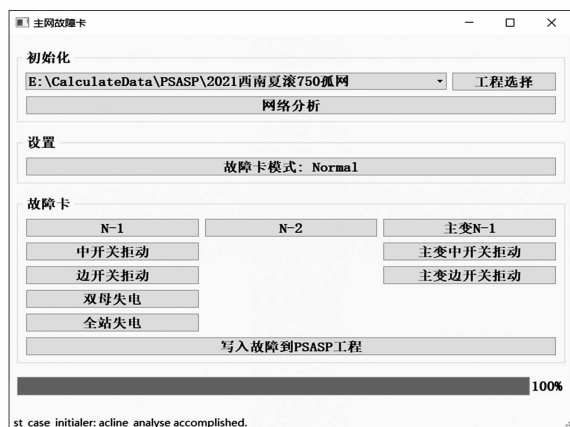


图 6 基于图计算的电力系统故障建模软件

法,并进行了算例应用。结果表明,所提出的方法能够迅速建立大型电网的仿真故障模型,为电力系统在线、离线仿真分析所依赖的全网故障建模提供了新的思路和工具。

## 参考文献

- [1] 电力系统安全稳定导则:GB 38755—2019[S], 2019.
- [2] 国家发改委. 加快推进碳达峰、碳中和顶层设计文件制定[EB/OL]. (2021-05/18) [2021-07-09]. [http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-05/18/c\\_1127460853.htm](http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-05/18/c_1127460853.htm).
- [3] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2):461-474.
- [4] 丘晓茵,孙志媛,周柯,等. 一种基于 PSD\_BPA 的故障卡库建立方法:中国 CN109470973A [P]. 2020. 11. 13.
- [5] Narsingh D. Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1974.

## 作者简介:

李鑫(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统安全稳定分析工作;

曾琢琳(1988),女,硕士,工程师,从事电能质量技术监督工作;

石鹏(1991),男,博士,工程师,从事电力系统安全稳定分析工作;

王永灿(1991),男,博士,工程师,从事电力系统安全稳定分析工作。

(收稿日期:2021-07-21)