

井下高压电网保护定值仿真校验系统*

王福忠 杨茜惠 王新良

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454003)

摘要: 井下高压供电系统中,不能通过在现场做短路实验判断保护定值是否满足选择性与可靠性要求,故本文提出了煤矿井下高压电网保护定值仿真校验系统,通过该系统模拟井下故障检验保护定值的选择性与可靠性。提出了井下高压电网保护定值仿真校验系统整体设计方案,基于广度优先搜索算法对井下供电系统进行拓扑自学习,以获取的拓扑模型为基础提出了故障电流计算方法和定时过流保护、瞬时速断保护、过负荷保护的仿真校验算法。实验结果表明,系统能够检验速断保护与定时过流保护配合是否合理,以及各段保护当前设置是否会造成停电面积扩大等问题,有效实现了井下高压供电系统继电保护定值的仿真检验。

关键词: 继电保护;整定计算;广度优先算法;故障电流;仿真校验

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Simulation and verification system of relay protection setting value in coal mine high voltage power network

Wang Fuzhong Yang Qianhui Wang Xinliang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In the coal mine high voltage power supply system, the protection setting value whether meets the selectivity and reliability cannot be determined by short circuit experiment in the field, so this paper propose the simulation test system of protection setting value in coal mine underground high voltage network, to simulate the selectivity and reliability of underground fault detection protection setting value. The whole design scheme of simulation protection setting value in coal mine underground high voltage power network is introduced, breadth-first search algorithm based topology self-learning of coal mine underground supply systems is carried out, based on the obtained topology model, the simulation calibration algorithm of the fault current calculation, timing over-current protection, transient speed circuit protection and overload protection is proposed. The experimental results show that the system can test whether the coordination between timing over-current protection and transient speed circuit protection is reasonable, and whether the current settings of each segmental will cause blackout area expanding, and effectively realize the simulation test of underground high-voltage power system relay protection setting.

Keywords: relay protection; relay calculation; breadth-first algorithm; fault-current; simulation calibration

1 引言

由于煤矿井下的特殊性,一切工作都要以安全为基准^[1],同时煤矿的生产条件特别恶劣^[2],所以在继电保护定值整定完成后,工人不可能在现场做短路故障实验来确保保护定值的选择性与可靠性是否满足要求,在实际的运行过程中很可能出现越级跳闸或者拒动的情况。因此需要开发一套井下高压电网保护定值的校验系统,可以及时发现不合理的保护整定值,对提高矿井生产效率、增强矿井安全

生产水平具有重要的意义^[3]。

目前已开发的继电保护整定计算软件,大都是以图形建模为基础,开发设计了包括整定计算模块、故障计算模块、数据管理模块的系统。文献[4-5]采用图形文件识别的方法实现图形建模的自动化,研究了智能化的发电厂继电保护整定计算系统。文献[6]研制开发了面向对象的电网继电保护整定计算管理系统。该系统针对传统继电保护整定计算相关软件的局限性,利用面向对象技术、数据库技术和.NET 插件技术使整定计算软件具有通用性、可靠性和

灵活性等特点。文献[7]针对各地整定计算工作独立造成的“信息孤岛”问题，提出了一种基于图模拼接搭建整定计算数据中心的方法。精确的继电保护定值是防止事故发生和扩大的基础，但以上系统还停留在整定计算阶段，缺少了对继电保护定值的校验。文献[8]通过校验判断整定值的选择性和可靠性，但是该软件应用在地面电网中，地面电网的供电系统复杂并不适合应用于煤矿井下高压供电系统。

针对上述问题本文提出了井下继电保护定值校验系统，通过灵活的井下电网故障仿真，实现对井下电网继电保护定值的仿真校验，摆脱了目前继电保护装置动作行为只能在其动作后才能判断是否正确的被动状况，提高了井下电网的安全运行和灵活性。最后以某煤矿为例，校验保护定值是否满足的选择性与可靠性的要求。

2 定值仿真检验系统整体方案的设计

本文是基于VC开发的“煤矿井下高压电网定值仿真检验系统”。该系统主要是针对煤矿井下高压开关整定值（瞬时速断、定时过流、过负荷保护）设置是否合理进行检验，发现继电保护整定方案中可能存在的各种缺陷。该系统整体设计方案如图1所示：

- 1) 根据煤矿井下实际的供电系统，绘制煤矿高压供电系统图。
- 2) 根据各个设备之间的供电关系和高爆开关的状态建立拓扑模型。
- 3) 基于拓扑模型计算故障电流。
- 4) 按照整定规则对各个电气原件进行整定计算。
- 5) 对瞬时速断保护、定时过流保护、过负荷保护整定值的选择性与可靠性进行仿真校验。

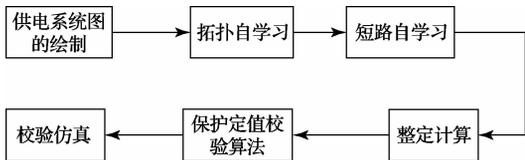


图1 整体方案设计图

3 系统核心算法

3.1 基于广度优先搜索的拓扑自学习算法

把计算机网络的拓扑快速搜索应用到矿井中，不仅能提高矿井高爆开关的搜索速度还能降低重复率^[9]。本文基于广度优先搜索的网络拓扑自学习算法对井下各个设备及线路进行拓扑自学习^[10]。把实际的煤矿井下高压供电图简化为逻辑关系的节点-支路关系图。把设备与设备之间的电气连接点等效为节点类，把电气设备等效为支路类。利用节点-支路邻接表存储煤矿电力网络的连接信息。为了避免系统重复地搜索支路，在支路记录中添加访问标志。

基于广度优先搜索的拓扑自学习算法的具体过程为：

首先从某一条母线的节点开始，利用已经建立的节点-支路邻接表，搜索所有与该节点连接的支路，并通过相连的支路搜索未被访问的节点，再从该节点出发，按照广度优先搜索下一层节点，直到所有与该母线节点相关联的电气设备都被访问，这样就可以得到一个子系统，接着从下一个未被访问的节点出发，按照上述步骤划分第二个，直到所有的母线节点全被访问，拓扑结束^[11]。图2为某煤矿局部供电系统图，以此为例具体的说明基于广度优先搜索的拓扑自学习算法。

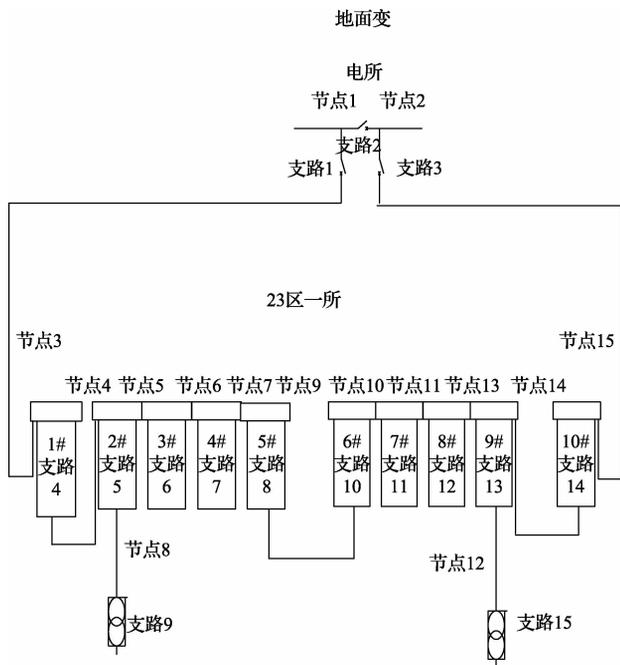


图2 某煤矿接线示意图

图2中，高爆开关和变压器均为支路类，设备之间的节点为节点类，对图2建立节点-支路邻接表，增加了访问标志避免重复，如图3所示：

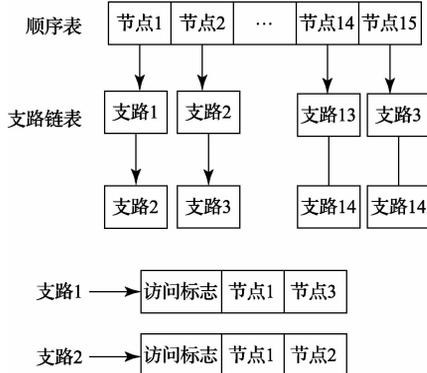


图3 节点-支路邻接表

从节点1出发，利用建立起的节点-支路邻接表进行拓扑自学习，搜索顺序如图4所示：

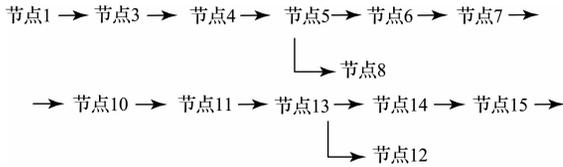


图 4 节点搜索次序

广度优先搜索的拓扑自学习算法,不存在回溯的过程,也就是系统中有多少个节点它就遍历多少个节点,每个节点只遍历一次,这样节省了运行时间。当某条线路发生故障而导致开关状态的变化时,节点-支路邻接表也发生了变化,采用广度优先搜索的方法进行网络拓扑分析,根据全网拓扑中形成的节点和支路所属的电压等级、所属子系统等相关信息,筛选出受开关变化影响的节点类和支路类,对变化的网络重新进行拓扑分析。这样,极大地减少了网络拓扑范围,提高了搜索各电气设备供电关系的速度。

3.2 基于拓扑自学习的故障电流计算模型

当某条线路发生短路故障时,通过广度优先搜索的拓扑自学习算法快速地搜索各个电气设备的供电关系,能有效地检测流过供电系统每个高爆开关的电流是否因短路故障发生变化。以图 5 为例详细说明基于拓扑模型的故障电流计算算法。

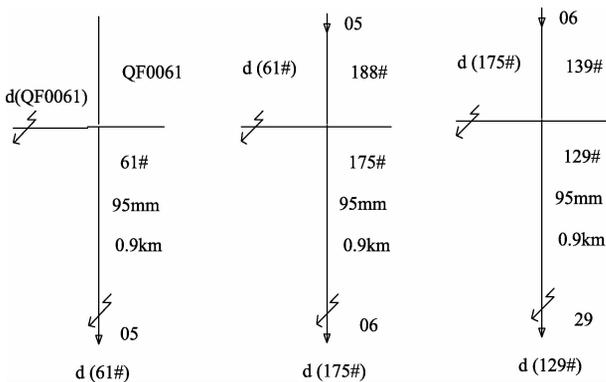


图 5 某煤矿故障电流计算模型图

图 5 所示的短路计算图中用相同的线号代替连接线实现电气连接。所有线路末端对应的短路点在短路计算图上均有标注。

当线路 129 号发生两相或三相短路故障,根据广度优先搜索拓扑自学习算法可知连接短路点 d(129 号)的高爆开关为 129 号、175 号、61 号且这些高爆开关所捕获到的故障电流是相同的。假定线路发生两相故障,则故障点所对应的 129 号开关的故障电流为:

$$I_{129\#}^{(2)} = \frac{U_P}{2 \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (1)$$

当线路发生三相故障时,则故障点所对应的 129 号开关的故障电流为:

$$I_{129\#}^{(3)} = \frac{U_P}{\sqrt{3} \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2)$$

式中: U_P 为短路点所在线路的平均电压, R 为短路点以前的、归算到短路点所在处电压等级的总电阻, X 为短路点以前的、归算到短路点所在处电压等级的总电抗。图 5 所示的是 3 条电缆线,所以总电阻 R 为:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3)$$

R_1 、 R_2 、 R_3 分别为 3 条电缆的电阻值。3 条电缆总电抗值 X 为:

$$X = X_1 + X_2 + X_3 \quad (4)$$

X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 3 条电缆的电抗值。当发生两相故障时,61 号开关所对应的故障电流 $I_{61\#}^{(2)}$,188 号开关所对应的故障电流 $I_{188\#}^{(2)}$ 、175 号开关所对应的故障电流 $I_{175\#}^{(2)}$ 、139 号开关所对应的故障电流 $I_{139\#}^{(2)}$ 、QF0061 号开关所对应的故障电流 $I_{QF0061}^{(2)}$ 均等于 $I_{129\#}^{(2)}$ 。

当发生三相故障时,61 号开关所对应的故障电流 $I_{61\#}^{(3)}$ 、188 号开关所对应的故障电流 $I_{188\#}^{(3)}$ 、175 号开关所对应的故障电流 $I_{175\#}^{(3)}$ 、139 号开关所对应的故障电流 $I_{139\#}^{(3)}$ 、QF0061 号开关所对应的故障电流 $I_{QF0061}^{(3)}$ 均等于 $I_{129\#}^{(3)}$ 。

3.3 继电保护定值校验算法

当故障发生时,供电系统通过预先设置的保护完成对故障点的隔离,避免因故障造成供电系统大面积停电。因此针对继电保护整定值准确性的检测就非常重要,瞬时速断保护、定时过流保护、过负荷保护整定值校验的工作原理如下所示。

3.3.1 定时过流保护整定值仿真校验算法

仿真系统通过模拟综保装置的定时过流功能,实现对所有高压开关定时过流定值校验。具体步骤如下:

步骤 1: 从所有开关中取出一个开关,判断该开关是否合闸,如果合闸执行步骤 2; 否则,执行步骤 1;

步骤 2: 判断该开关是否设置了定时过流保护,如果设置了定时过流,则执行步骤 3; 如果未设置定时过流,则从所有开关中取出下一个开关,执行步骤 1;

步骤 3: 针对该开关,进行网络拓扑自学习,获取由该开关供电的所有变电所开关集合,寻找在由其供电的开关集合中是否存在短路故障。如果存在短路故障,则执行步骤 4; 否则,说明由该开关供电的变电所不存在短路故障,则执行步骤 1;

步骤 4: 如果存在短路故障,则获取流过该开关的故障电流,并依据故障电流值和定时过流动作值来判断该开关是否需要分闸。如果故障电流没有达到定时过流的动作值,则执行步骤 1; 如果故障电流达到定时过流的动作值,则执行步骤 5;

步骤 5: 针对该开关开始计时,记录故障电流达到定时过流动作值持续的时间 T 。如果 T 没有达到定时过流的动作延时,则执行步骤 1; 否则执行步骤 6;

步骤 6: 该开关执行跳闸动作,并且依据高压供电图

的网络拓扑,将由该开关供电的所有开关跳闸,执行步骤7;

步骤7:是否还有没有完成高压开关定时过流仿真的,如果有则执行步骤1,如果没有则执行步骤8。

步骤8:按照系统设定的仿真持续时间,重复步骤1-步骤7,仿真持续时间用完后,仿真结束。

具体的流程图如图6所示:

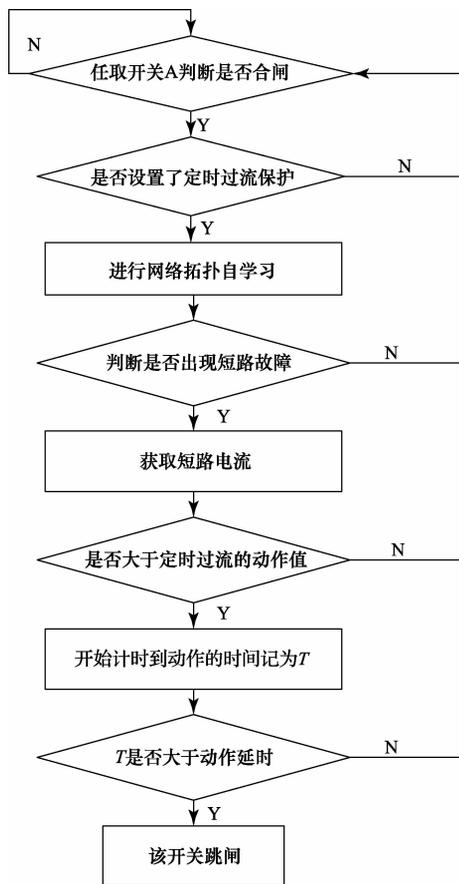


图6 过流保护定值检验算法流程图

3.3.2 瞬时速断保护整定值仿真校验算法

当系统模拟瞬时速断保护时,仿真系统通过模拟高爆综保装置的瞬时速断功能,实现对瞬时速断保护的校验。具体的步骤如下:

步骤1:从所有开关中取出一个开关,判断该开关是否合闸,如果合闸执行步骤2;否则,执行步骤1;

步骤2:判断该开关是否设置了瞬时速断保护,如果设置了瞬时速断,则执行步骤3;如果没有设置瞬时速断,则从所有开关中取出下一个开关,执行步骤1;

步骤3:针对该开关,进行网络拓扑自学习,获取由该开关供电的所有变电所开关集合,寻找在由其供电的开关

集中是否存在短路故障。如果存在短路故障,则执行步骤4;否则,说明由该开关供电的变电所不存在短路故障,则执行步骤1;

步骤4:如果存在短路故障,则获取流过该开关的故障电流,并依据故障电流值和瞬时速断动作值来判断该开关是否需要分闸。如果故障电流没有达到瞬时速断的动作值,则开关不动作,执行步骤1;如果故障电流达到瞬时速断的动作值,则开关动作,执行步骤5;

步骤5:该开关执行跳闸动作,并且依据高压供电图的网络拓扑,将由该开关供电的所有开关跳闸,执行步骤6;

步骤6:是否还有没有完成高压开关瞬时速断仿真的,如果有则执行步骤1,如果没有则瞬时速断定值检验结束。

具体的流程如图7所示:

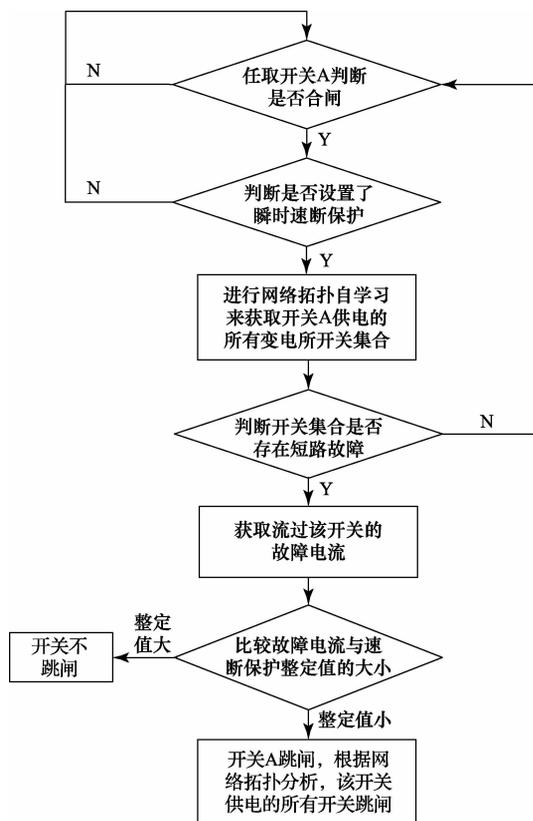


图7 瞬时速断校验流程图

本文还设置了过负荷保护,其校验算法和瞬时速断相类似。

4 实例

以某煤矿井下部分高压供电系统图为例如图8所示,验证该软件的可行性。

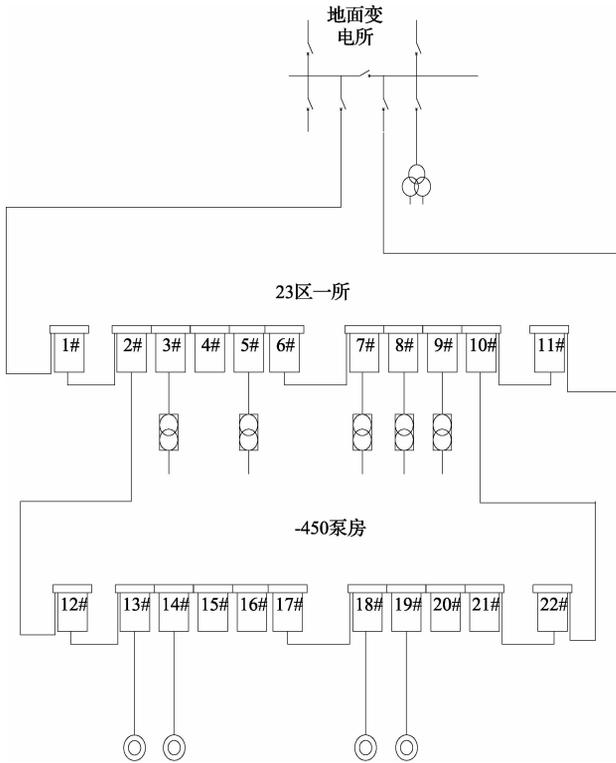


图 8 跃进煤矿井下高压供电系统

当故障为两相短路故障时,故障电流比较小,而且瞬时速断保护不能保护线路的全长只能保护线路的 80%~85%,需要瞬时速断保护与定时过流保护相配合,以 13 号开关的跳闸试验结果说明瞬时速断保护与定时过流保护的配合,实验结果如表 1 所示:

表 1 13 号开关跳闸试验

13 号连接线路 发生故障	发生故障时的 线路长度/km	开关跳闸 的时间/s
1	0.6	0
2	0.7	0
3	0.8	0
4	0.9	0.25
5	1	0.25

表 1 中的跳闸时间是指软件中的提示框显示的是瞬时速断而致高爆开关跳闸时,高爆开关跳闸的时间为 0 s,当提示框显示的是定时过流而致高爆开关跳闸时,开关跳闸的时间为 0.25 s。发生故障时的线路长度是指线路发生在离线路首端到故障点的线路的距离。把表 1 的实验结果用曲线图表示为图 9 所示:

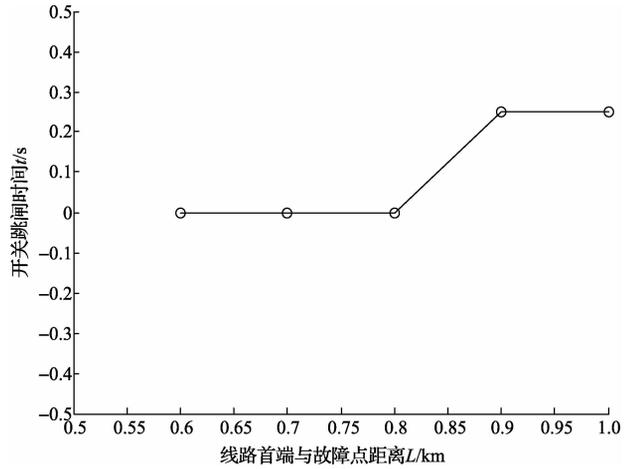


图 9 瞬时速断保护与过流保护配合

由图 9 可以看出当线路发生两相故障且故障点时全长的 90%以后瞬时速断不启动,启动的是定时过流保护。此次试验结果表明该软件中设置的继电保护整定值是合理的,瞬时速断保护和过流保护能相互的配合。

该软件不仅可以模拟线路的故障,还可以对影响开关跳闸的因素进行设置,观察开关跳闸个数从而把造成越级跳闸故障的概率降到最低。例如模拟电缆线路的长度观察高爆开关跳闸的个数,把电缆线路的长度设置为最优的长度。下面对 15 号和 18 号开关进行实验。实验的结果如表 2、表 3 所示:

表 2 15 号开关跳闸试验

15 号开关 跳闸次数	1 号电缆长度 /km	开关跳闸个数
1	0.1	5
2	0.5	5
3	0.9	5
4	1.5	1
5	2	1

表 3 18 号开关跳闸试验

18 号开关 跳闸次数	2 号电缆长度 /km	开关跳闸个数
1	0.1	6
2	0.5	6
3	0.9	6
4	1.5	1
5	2	1

表1、表2的结果用曲线图表示,如图10所示:

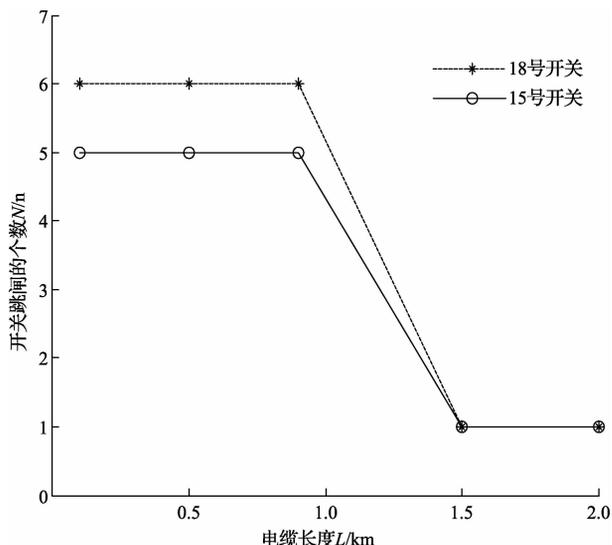


图10 电缆长度与开关跳闸个数的关系

如图10所示虚线代表的是18号开关长度与开关跳闸个数的关系,实线圈线代表的是15号高爆开关与开关跳闸个数的关系,由这两条曲线可知,电缆长度的长短与越级跳闸事故有着密不可分的关系,电缆长度过长会造成资源的浪费,电缆长度过短可能发生越级跳闸事故。由仿真图可知1.5 km的电缆不仅不会造成资源浪费也不会发生越级跳闸的事故。

5 结 论

本文提出的煤矿井下高压电网保护定值仿真校验系统,对该系统主要的研究成果如下:

1)本系统基于广度优先搜索的网络拓扑自学习算法提高了搜索各电气设备供电关系的速度。

2)基于拓扑自学习的故障电流计算模型能自动地获取每个高爆开关的故障电流。

3)本系统提出的瞬时速断保护、定时过流保护、过负荷保护整定值仿真校验算法,校验了保护定值的选择性与准确性。

该系统已应用到跃进煤矿井下高压供电系统中,结果表明,该软件运行稳定,功能实用,适应性强,很好地实现了全矿高压电网定值校验功能,对提高井下高压电网运行的安全性有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 焦尚彬,宋丹,张青,等.基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿监测系统[J].电子测量与仪器学报,2013,27(5):436-442.
- [2] 雷文礼,任新成,张扬.一种基于 WSN 的矿井人员生命体征监测终端的研究[J].国外电子测量技术,2013,32(10):12-25.
- [3] 魏振春,吕增威,杨成,等.基于 RSS 正确性判定的矿井机车无线定位方法[J].仪器仪表学报,2014,35(1):178-184.
- [4] 赵冬梅,张旭,刘燕华,等.发电厂继电保护整定计算系统的智能化研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):100-104.
- [5] 张虹,赵冬梅,张旭.电厂继电保护整定计算智能系统图模库一体化工具的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(12):117-139.
- [6] 邓丰强,吕飞鹏,张向亮,等.面向对象的电网继电保护整定计算管理系统[J].华北电力大学学报(自然科学版),2012,39(4):36-41.
- [7] 李江华,宋微,周庆捷,等.基于图模拼接的整定计算数据中心研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):9-13.
- [8] 王增平,刘国平,仇向东,等.继电保护定值在线整定功能的实现[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):127-130.
- [9] 唐东明,卢显良,李驹光.网络编码在拓扑推断中的应用研究[J].电子测量与仪器学报,2012,26(11):960-965.
- [10] 陈东明,徐晓伟.一种基于广度优先搜索的社区发现方法[J].东北大学学报(自然科学版),2010,31(3):346-349.
- [11] 张海波,张晓云,陶文伟.基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J].电网技术,2010,34(7):103-108.

作者简介

王福忠,博士,教授,硕士生导师,主要从事工业过程控制及电力电子方面的研究。

E-mail: wangfzh@hpu.edu.cn

杨茜惠,硕士研究生,主要研究方向为矿山信息化及自动化。

E-mail: 624491500@qq.com