

基于FP-growth算法的大电网关键线路辨识方法

周强明¹,姜盛波²,鲁鸿毅¹,曾鹏¹,罗超²,谭敏¹,雷鸣¹,杨军²

(1. 国网湖北省电力公司,湖北 武汉 430077;2. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:辨识出连锁故障发展过程中的关键线路,对采取有效的连锁故障抑制策略,保障电网安全稳定运行具有重要作用。提出一种基于FP-growth算法的大电网关键线路辨识方法。利用FP-growth算法对基于电网运行可靠性模型进行连锁故障模拟生成的连锁故障事故链集合进行数据挖掘,发掘事故链集隐藏的关联规则,辨识连锁故障发展过程中的关键线路,对关键线路进行风险分析,并分析其对连锁故障的影响。IEEE 118节点系统仿真结果表明,所提方法能够有效辨识出连锁故障发展过程中的危险线路。

关键词:连锁故障;运行可靠性;FP-growth算法;关键线路;风险分析;稳定

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.013

0 引言

伴随特高压电网、智能电网的迅速发展,我国电网的互联程度和复杂性空前提高,这对解决能源分布格局不均、提高电网坚强性具有重要作用,但同时也对电网安全提出了更高要求。近年来,在世界范围内大规模停电事故时有发生,如2003年8月14日发生的美-加大停电^[1],2012年7月30日和31日印度先后2次发生大停电事故^[2],负荷损失巨大,数以亿计平常百姓的生活受到严重影响。现有研究成果表明,大规模停电事故多数由连锁故障引起:电力系统受到初始扰动后,元件退出运行引起潮流发生转移,进而使其他正常支路相继退出运行,其连锁反应最终导致大停电事故^[3-5]。

目前国内外关于大电网连锁故障的研究主要包括2个方向:一是基于潮流计算和稳定分析的研究,包括复杂系统自组织临界性以及模式搜索策略,如OPA模型^[6]、CASCADE模型^[7];二是基于复杂电网拓扑理论的研究,从电网拓扑结构和参数角度分析连锁故障根源,如小世界网络模型^[8]。基于连锁故障的发展机理可知,电网中存在少数薄弱环节对连锁故障发展起推动作用,发现这些关键线路加以改造并进行有效监控,将对预防连锁故障蔓延,降低大停电事故发生概率具有重要作用。文献[9]从电网拓扑结构和潮流分布的不均衡性方面考虑,运用Floyd算法搜索最短传输路径的方法获取危险线路。文献[10]利用层次分析法分析连锁故障集中的事件相关性,利用风险理论分析系统薄弱环节并确定

关键元件。文献[11]综合考虑电网结构和运行状态的影响,基于协同效应分析评估输电线路的脆弱性。文献[12]基于静态能量函数思想,提出改进的状态脆弱性指标,实现电网薄弱环节的准确定位。

从历年来发生的大停电事故事后分析来看,电网连锁故障发展过程与初始故障、关键线路之间存在着一定联系。本文提出了一种基于FP-growth算法的电网关键线路辨识方法,该方法以运行可靠性模型^[13]为基础,对特定初始故障下的电网系统进行连锁故障模拟(模拟过程考虑了电网运行状态以及继电保护装置可靠性对连锁故障发展的影响),运用蒙特卡洛方法对线路进行概率开断,重复模拟过程来生成故障链数据库,然后运用FP-growth算法进行频繁项挖掘,分析故障链与初始故障间的隐藏关系,可以有效发现连锁故障发展过程中的关键线路。

1 基于运行可靠性模型的连锁故障模拟

1.1 连锁故障发展过程分析

连锁故障的发展机理可分为过载主导型、结构主导型和配合主导型3种类型^[14],其故障演变模式具有一定的共性。一般而言,在连锁故障初始阶段,由于天气、温度、设备老化以及人为操作等因素的影响,导致电网中的元件发生故障,继电保护装置动作切除故障元件,引起电网结构和运行状态发生改变;在事故发展阶段,潮流大规模转移使得某些电网线路的运行状态由正常运行转为重载或过载运行从而导致线路开断。考虑继电保护装置存在的缺陷,与开断线路相连的线路保护装置可能发生误动,将引发更多线路断开。故障连锁反应若不能得到有效控制,大量元件设备将会退出运行,造成系统解列、负荷损失、电压失稳等,最终引起大停电事故。

1.2 线路运行可靠性模型

传统的输电线路故障概率采用长期统计数据的平均值,忽略了系统故障信息的时变性及系统运行状态对故障发展的推动作用,难以解释、评估系统在

收稿日期:2017-01-19;修回日期:2017-12-16

基金项目:国家自然科学基金重大项目(51190105);国家自然科学基金资助项目(51277135);湖北省电力公司科技项目
Project supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China(51190105), the National Natural Science Foundation of China(51277135) and the Science and Technology Project of Hubei Electric Power Company

非正常运行方式下的故障事件。线路运行可靠性模型考虑系统潮流变化以及隐性故障对连锁故障发展的影响,结合电网运行状态和线路潮流约束条件,采用折线模型量化线路开断概率。该模型利用分段曲线的模式描述线路停运概率与线路潮流之间的关系,如图 1 所示,图中, L_{limit} 为线路正常运行的潮流限值; L_{max} 为线路运行的潮流限值; P_{H} 为隐性故障概率; P_{T} 为线路潮流超过极限值时线路开断概率。

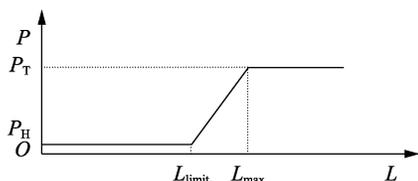


图 1 线路故障概率与潮流关系

Fig.1 Relationship between line failure probability and power flow

模型描述了线路所处的 3 种运行状态:第一种为正常运行状态,线路潮流不高于 L_{limit} ,此时线路开断概率受潮流因素影响较小,继电保护装置的隐性故障发挥作用,开断概率为 P_{H} (通常取 0.1%);第二种为重载运行状态,潮流介于 L_{limit} 和 L_{max} 之间,此时线路开断概率与线路潮流呈线性关系;第三种为过载运行状态,线路潮流不低于 L_{max} ,处于此运行状态下的线路开断概率为 P_{T} (通常取 1)。对应曲线的函数关系为:

$$P = \begin{cases} P_{\text{H}} & L \leq L_{\text{limit}} \\ P_{\text{H}} + \frac{P_{\text{T}} - P_{\text{H}}}{L_{\text{max}} - L_{\text{limit}}} (L - L_{\text{limit}}) & L_{\text{limit}} < L < L_{\text{max}} \\ P_{\text{T}} & L \geq L_{\text{max}} \end{cases} \quad (1)$$

线路开断概率随着潮流的变化而变化,在连锁故障发展过程中,电网拓扑结构发生改变,系统潮流重新分配,因此在发生线路开断后需要及时更新电网潮流信息。为简化模拟过程,本文基于直流潮流法,重点考虑线路有功对其开断概率的影响。直流潮流计算公式为 $\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta}$,其中 \mathbf{P} 为支路有功向量, \mathbf{B} 为节点导纳矩阵, $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量;另外,在利用直流潮流法进行潮流计算时要保证孤岛功率平衡。

1.3 连锁故障模拟流程

本文基于线路的运行可靠性模型,并考虑隐性故障对连锁故障发展的推动作用,进行连锁故障模拟,具体流程如图 2 所示。

a. 初始化电网的运行状态,确定电网的拓扑结构。

b. 选定初始故障线路,并对与初始故障相连的线路进行隐性故障模拟;隐性故障概率通常取为 0.1%^[15],基于蒙特卡洛模拟生成随机数 t ,若 $t < 0.1\%$,则发生故障,否则不发生故障。

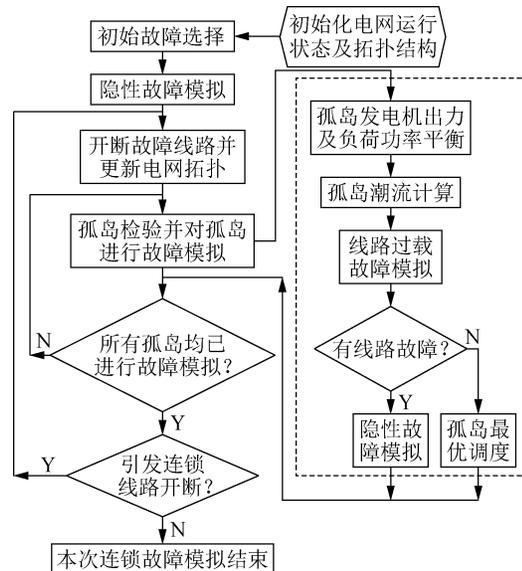


图 2 连锁故障模拟流程

Fig.2 Flowchart of cascading failure simulation

c. 对故障线路进行开断处理,更新电网拓扑结构。

d. 运用图论来检测线路开断是否产生孤岛,并对每个孤岛进行故障模拟。

e. 孤岛内部进行功率平衡,利用直流潮流法计算孤岛内部的线路有功功率,基于线路运行可靠性模型确定开断线路。若有线路退出运行,对与之相连的线路进行隐性故障模拟;若无线路退出运行,则对该孤岛进行最优调度后退出模拟。

f. 判断所有孤岛是否均已进行故障模拟。若存在孤岛没有进行模拟,则转入步骤 **e**; 否则进行下一步。

g. 判断是否产生连锁开断线路。若有新的线路因连锁反应发生开断,则转入步骤 **c**; 否则本次连锁故障模拟终止,并记录连锁故障事故链。

2 基于 FP-growth 算法的频繁项挖掘

大数据时代,数据挖掘技术在互联网搜索引擎、医药科学等诸多领域得到广泛应用,成为从海量信息数据中挖掘潜在规律联系、有价值信息的有力工具。FP-growth 算法是数据挖掘技术在关联规则发现领域的重要应用^[16-17],可以高效发现数据集中的频繁项集以及数据间隐藏的关联规则。FP-growth 算法主要分为 FP-tree 的构建和递归挖掘 FP-tree 这 2 个步骤。

2.1 基于数据集构建 FP-tree

FP-tree 是 FP-growth 算法的特殊数据结构,用于存储原始数据集中的信息。仅通过 2 次数据扫描,可将原始数据中的事务压缩到一个 FP-tree 中,该 FP-tree 类似于前缀树,相同前缀的路径可以共用,从而达到压缩数据的目的,这对提高算法效率至

关重要。

假设存在数据集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 其中 c_i 为一条事务; 任一事务 c_i 为多个元素组成的集合, $c_i = \{l_1, l_2, \dots, l_v, \dots\}$, l_v 为事务中的元素, 下面以 C 为例介绍 FP-tree 的构建过程。

a. 第一次遍历数据集 C , 记录每一个元素项 l_v 出现的频率 f_v 。将各元素项按照 f_v 降序排列, 然后将各元素项 l_v 标识信息 (item_name) 及其出现频率 f_v 保存于头指针表 Tab_{head} 中; 预先设置最小支持度 f_{min} , 若 $f_v < f_{\text{min}}$, 则从头指针表中去掉该元素项。针对头指针表中所剩的各元素项建立指针 (node_link), 用于指向 FP-tree 中与该元素项具有相同标识信息的第一个节点, 后续 FP-tree 各节点都将建立指针, 在具有相同标识信息的元素项节点之间建立链接关系。

b. 第二次遍历数据集 C , 对 C 中的每一个子集 c_i 进行筛选和排序处理。首先将 c_i 中 $f_v < f_{\text{min}}$ 的元素项滤除, 然后对剩余元素项按照头指针表 Tab_{head} 中的排列顺序进行重新排序得到新数据集 C_N , $C_N = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 。该步骤实现数据集重新扫描及再处理, C_N 将直接用于 FP-tree 构建。

c. 由 C_N 构建 FP-tree。从空集开始, 将 C_N 中的各事务 c_i 依次添加到树中。首先判断 FP-tree 中是否存在与事务 c_i 相同的前缀分支; 若存在, 则共同前缀分支包含节点的元素项计数值增加 1; 若不存在, 则在共同前缀分支最后一个节点的子节点处建立新的分支, 新的分支所含节点的计数值赋值为 1。所有事务 c_i 递归处理, 直至 FP-tree 构建完成。

数据集 C 总共包含 9 条事务, 其中: $c_1 = \{l_1, l_2, l_3, l_4\}$, $c_2 = \{l_2, l_4, l_5, l_6\}$, $c_3 = \{l_2, l_3, l_4\}$, $c_4 = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6\}$, $c_5 = \{l_1, l_3, l_6\}$, $c_6 = \{l_2, l_3, l_6\}$, $c_7 = \{l_1, l_3, l_4\}$, $c_8 = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_7\}$, $c_9 = \{l_1, l_2, l_4, l_7\}$ 。

取最小支持度为 $f_{\text{min}} = 3$, 按照上述步骤构建 FP-tree, 从空集 \emptyset 开始生长得到图 3 所示的 FP-tree。图 3 所示的头指针表包含数据集所含的元素项及其出现次数, 并通过曲线链接 FP-tree 中所有同类元素项; 直线相连节点表示父代与子代关系, 父代在上。

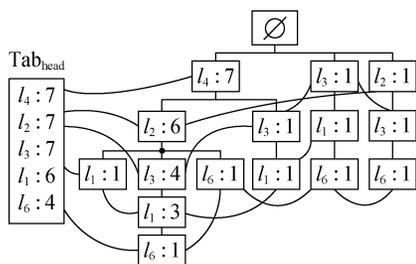


图 3 FP-tree 结构
Fig.3 Structure of FP-tree

2.2 基于 FP-tree 挖掘频繁项集

频繁项集挖掘的核心思想在于递归挖掘 FP-tree, 发现各元素项的条件模式基并构建条件 FP-tree, 在递归过程中挖掘频繁项集。定义条件模式基为以某元素项为结尾的路径集合, 路径包含介于该元素项与根节点之间的所有子节点项。定义条件 FP-tree 为以某元素项的条件模式基为输入数据构建的 FP-tree。具体步骤如下。

a. 从 FP-tree 中获得某元素项的条件模式基。从头指针表某元素项 l_v 指向的第一个节点开始, 遍历该元素项在 FP-tree 中存在链接关系的所有节点。每当遇到一个节点, 便进行一次上溯, 并记录该节点至根节点间保存的所有元素项, 生成一条前缀路径, 并为该前缀路径赋值, 该值取起始节点元素项的计数值。该元素项的多条前缀路径集合即为条件模式基。

b. 由条件模式基构建条件 FP-tree。首先建立频繁项集列表, 并将 l_v 加入频繁项集列表中, 然后以 l_v 为根节点, l_v 对应的条件模式基作为输入数据构建 FP-tree, 得到结果即为 l_v 的条件 FP-tree (条件 FP-tree 根节点由空集改为 l_v)。将条件 FP-tree 中的元素项 (除根节点外) 分别加入到频繁项集列表中。

c. 递归挖掘条件 FP-tree 中的频繁项。对条件 FP-tree 中的各元素项 (除根节点外) 递归获取条件模式基, 构建条件 FP-tree, 保存频繁项, 直到 FP-tree 仅存一条分支终止递归, 得到最终的频繁项集列表, 该列表保存含 l_v 的频繁项。

d. 针对头指针表中的元素项按照支持度进行升序排列, 然后对每一个元素项进行步骤 a—c 处理, 可得各元素项的频繁项集。

3 关键线路风险评估

3.1 关键线路挖掘

关键线路挖掘按如图 4 所示流程进行。首先设定初始故障, 基于运行可靠性模型对电网进行 N 次连锁故障模拟, 生成故障链集合; 然后对故障链进行数据格式化处理, 选取合适的最小支持度, 利用基于 FP-growth 算法的频繁项挖掘程序对故障链进行频繁项挖掘, 得到与初始故障具有强关联关系的频繁项集合, 可知频繁项集所包含的线路即为连锁故障演变进程中的关键线路。

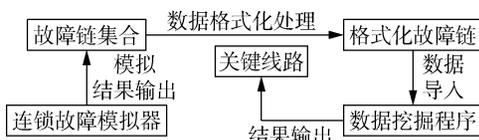


图 4 关键线路挖掘流程
Fig.4 Process of critical line mining

3.2 关键线路风险分析

电力系统连锁故障发展过程中,引起输电线路相继开断,并切除大量负荷,可运用风险理论^[18]对故障造成的负荷损失后果进行评价。定义输电线路风险为 $R = p_{\text{trip}} L_{\text{ol}}$, 其中 R 为线路风险值; p_{trip} 为线路故障概率; L_{ol} 为线路故障造成的平均负荷损失。

连锁故障模拟过程中,记线路 l_v 发生故障的概率为 $p_{\text{trip}}(l_v)$, 则:

$$p_{\text{trip}}(l_v) = \frac{\sum_{i=1}^N S_i(l_v)}{N} \quad (2)$$

其中, N 为连锁故障模拟次数之和; $S_i(l_v)$ 表征在第 i 次模拟过程中 l_v 是否故障,若 l_v 故障,则 $S_i(l_v)$ 取值为 1, 否则取值为 0。

连锁故障造成的负荷损失是由故障链中所有线路开断造成的结果,记线路 l_v 单独造成的负荷损失为 $P_{\text{loss}}(l_v)$, 则:

$$P_{\text{loss}}(l_v) = w_i(l_v) P_{\text{loss}}(i) \quad (3)$$

其中, $P_{\text{loss}}(i)$ 为第 i 次连锁故障模拟造成的负荷功率损失; $w_i(l_v)$ 为线路 l_v 所占权重。

线路 l_v 故障造成的平均负荷损失为:

$$L_{\text{ol}}(l_v) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(l_v) P_{\text{loss}}(i)}{\sum_{i=1}^N S_i(l_v)} \quad (4)$$

考虑到连锁故障演变过程的级联性^[19], 认为先开断线路对负荷损失的影响高于后开断线路, 即 $w_i(l_v) > w_i(l_{v+1})$, 进行线路风险分析时权重取:

$$w_i(l_v) = \frac{1+v^\partial}{n_i + \sum_{v=1}^{\partial} v^\partial} \quad (5)$$

其中, v 为线路 l_v 的开断顺序; n_i 为第 i 次连锁故障模拟中线路开断条数; $\partial < 0$, 保证线路在连锁故障中的权重随开断顺序递减。

4 算例验证

本文采用图 5 所示的 IEEE 118 节点系统进行算例分析, 对特定初始故障下的电网进行关键线路识别并运用风险理论进行验证。

4.1 关键线路识别

预分析 IEEE 118 节点系统初始运行状态, 选定线路负载率最高的线路 30 (23-24, 图 5 中点线标注) 作为初始故障线路, 然后对其进行 20 000 次连

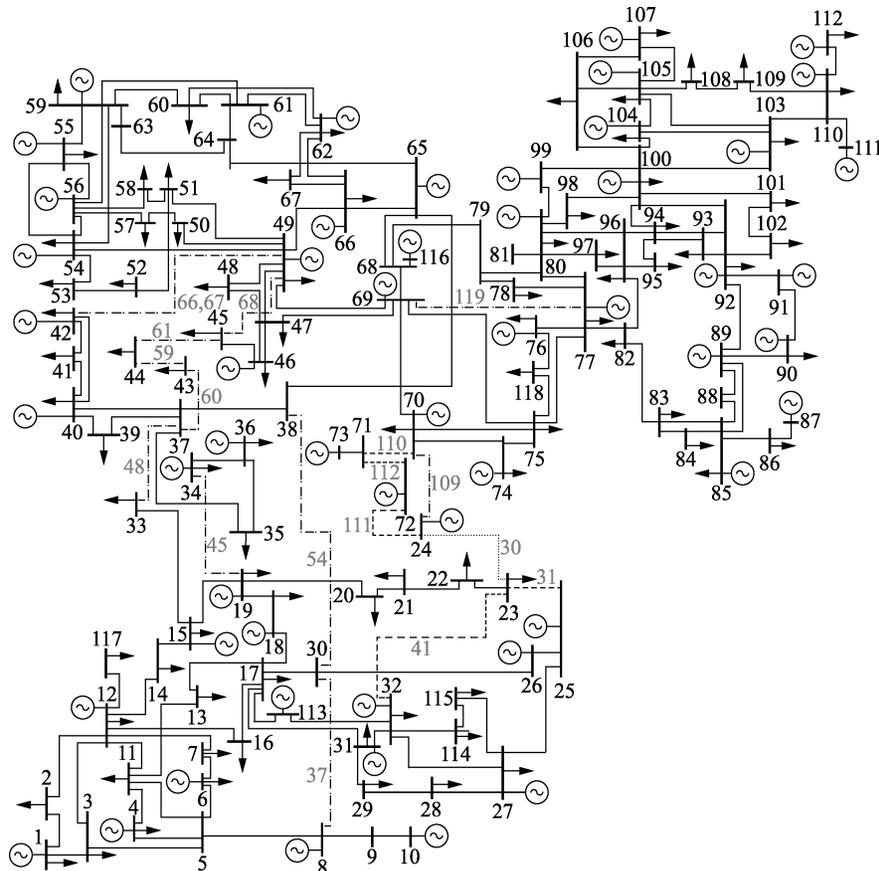


图 5 IEEE 118 节点系统

Fig.5 IEEE 118-bus system

锁故障模拟,生成 20 000 条故障链;选取最小支持度为 2 000,对 20 000 条故障链进行频繁项挖掘,得到在初始故障为线路 30 条件下的电网关键线路集,并将关键线路用点划线在图 5 中标注。

频繁项挖掘结果为: $\{30, 48\}$, $\{45, 30\}$, $\{68, 30\}$, $\{30, 119\}$, $\{30, 59\}$, $\{60, 30\}$, $\{61, 30\}$, $\{30, 37\}$, $\{109, 30\}$, $\{54, 30\}$, $\{66, 67\}$, $\{30, 66, 67\}$, $\{30, 66\}$, $\{30, 67\}$ 。结果显示在初始故障线路 30 与线路 $\{48, 45, 68, 119, 59, 60, 61, 37, 109, 54, 66, 67\}$ 之间存在的关联规则,即线路 30 发生初始故障后,存在关联规则的部分线路会以较大的概率出现在连锁故障发展路径上。

由系统拓扑图 5 可见,线路 30 连接着系统的上下 2 个半区,是区域功率交换的重要线路。当线路 30 发生初始故障后,位于同一输电断面的其他线路会因线路潮流的增加导致开断风险加大,位于该输电断面内的线路 $\{48, 45, 54, 109\}$ 均被挖掘得到,符合实际运行经验,很好地验证了本文所提方法的有效性。

针对初始故障线路 30 挖掘出的关键线路,任选其中一条作为初始故障线路进行重新挖掘,可得关键线路编号如表 1 所示。

表 1 不同初始故障下的关键线路编号

Table 1 Numbering of critical lines under different initial failures

初始故障 线路编号	起始 节点	末端 节点	关键线路编号
54	30	38	68, 109, 60, 59, 61, 48, 45, 41, 37, 66, 67, 30
37	8	30	30, 66, 67, 54, 41, 45, 48, 109, 61, 60
45	19	34	30, 54, 66, 67, 48, 37, 44, 41, 109
48	33	37	30, 54, 45, 37, 66, 45, 67, 41, 26, 109
59	43	44	30, 66, 67, 54, 37, 41, 109
60	34	43	30, 67, 66, 37, 54, 41, 45, 109
68	45	49	30, 66, 67, 54, 37, 41, 62, 109, 61, 48
61	44	45	30, 67, 66, 54, 37, 41, 109
66	42	49	30, 54, 37, 67, 41, 61, 59, 109, 45, 60, 68
67	42	49	30, 54, 37, 66, 41, 61, 59, 109, 45, 68, 60
109	24	70	30, 110, 112, 67, 66, 37, 54, 41, 111, 61, 119, 59, 60
119	69	77	30, 37, 67, 66, 54, 41, 109, 60

可以发现,表 1 中不同初始故障对应的关键线路存在交集 $\{30, 37, 54, 66, 67, 109\}$ 。即关键线路中任意一条发生故障时,交集所含线路会是连锁故障的重要环节,以较大概率发生开断。可据此确定交集线路为该电网系统存在的薄弱环节,这对电网规划、运行具有重要的指导意义。

连锁故障发展过程中具有显著的级联性,故障链前部的线路较故障链后部的线路对连锁故障具有更强的推动作用,在负荷损失方面造成更大的影响。基于此,筛选事故链中位于连锁故障发展前 3 个阶段的线路集合,降低最小支持度要求,取最小支持度

为 500 进行数据挖掘,结果为: $\{41, 110, 31, 112, 67, 37, 111, 109\}$ 。其中线路 31、41、110、111、112 为新挖掘得到的线路,用短线线条在图 5 中标注,这些线路均靠近初始故障线路 30,位于连锁故障发展前期。通过对关键线路进行补充,可较为有效地避免推动连锁故障前期蔓延并造成较大停电风险的线路因出现频次较低而被忽略。

4.2 线路风险分析

选取 $\rho = -1$,对 IEEE 118 节点系统(初始故障为线路 30)中的输电线路进行风险分析,取风险值为前 20 的线路如表 2 所示。

表 2 线路 30 发生初始故障后的输电线路风险对比

Table 2 Comparison of line risks after initial failure of Line 30

线路 编号	起始 节点	末端 节点	$L_{ol}(L_v)$	$P_{trip}(L_v)$	$R(L_v)$
30	23	24	0.036 810	1	0.036 81
37	8	30	0.072 650	0.135 15	0.009 82
66	42	49	0.055 860	0.170 05	0.009 50
54	30	38	0.057 420	0.164 55	0.009 45
67	42	49	0.055 990	0.165 30	0.009 26
8	8	5	0.111 890	0.065 20	0.007 29
61	44	45	0.053 799	0.125 00	0.006 72
22	16	17	0.070 747	0.092 10	0.006 52
59	43	44	0.052 686	0.121 40	0.006 40
183	68	116	0.106 702	0.058 10	0.006 20
60	34	43	0.052 926	0.116 10	0.006 14
45	19	34	0.053 538	0.109 35	0.005 85
48	33	37	0.056 188	0.101 90	0.005 73
18	13	15	0.066 849	0.085 50	0.005 72
19	14	15	0.066 543	0.085 65	0.005 70
68	45	49	0.049 135	0.112 90	0.005 55
109	24	70	0.031 597	0.163 95	0.005 18
17	12	14	0.060 518	0.083 90	0.005 08

表 2 中粗体线路编号为关键线路。由表 2 可见,通过 FP-growth 算法对故障链进行挖掘得到的关键线路绝大多数风险值较大,这意味着当线路 30 发生故障时,这些关键线路在连锁故障的发展过程中起着推动作用,将造成大量的负荷损失。同时可以看到,关键线路 119 的风险值不在前 20 之内,这是因为线路 119 处于连锁故障发展相对较后的阶段,占连锁故障整体负荷损失的比重相对较小,但因其开断概率较大,是连锁故障规模扩大的重要环节,也必须加以重视。线路 8、22、183 等风险值较大的线路,对负荷损失影响较大,但其开断概率相对较低,对故障发展的推动力相对较小,因此在最小支持度取值较大时 FP-growth 算法会将其忽略。

4.3 关键线路对连锁故障影响分析

针对初始故障为线路 30 时的关键线路进行改造(如线路扩容等),将线路传输容量扩展为之前的 1.2 倍。同时运用文献[9]所提方法对 IEEE 118 节点系统进行初始故障点为线路 30 时的危险线路识

别,得到危险线路为{31,32,36,38,39,41,42,54,96,104,107,108,109},然后利用相同的方法对危险线路进行扩容。对扩容后的系统分别进行连锁故障风险分析,并与改造之前的系统进行对比,得到各线路风险值降序排列后的对比曲线如图6所示。

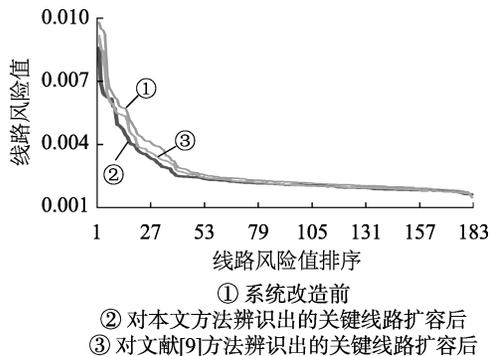


图6 系统改造前后的线路风险对比

Fig.6 Comparison of line risks before and after system transformation

图6表明,在对系统的关键线路进行扩容之后,线路风险值较改造之前都有较明显的降低。同时可以发现:针对基于本文方法辨识出的关键线路进行扩容,和基于文献[9]方法辨识的关键线路进行扩容相比,除极少数线路风险值略高外,绝大多数线路风险值均明显降低,表明本文方法辨识出的关键线路对于连锁故障发展过程的影响更重要。

5 结论

在大规模电网中,由简单故障触发的连锁故障可能会引起大停电的灾难性后果。为了找出对连锁故障产生重要影响的关键线路,本文基于运行可靠性模型,在考虑系统潮流、继电保护装置误动作以及调控人员稳控措施的基础上模拟连锁故障的发展过程,进而提出了基于FP-growth算法的电网关键线路辨识方法:利用FP-growth算法挖掘故障链集合,发现与初始故障线路之间存在关联规则的关键线路。IEEE 118节点系统仿真结果表明,本文所提方法可有效辨识连锁故障发展过程中的关键线路,对关键线路的风险分析证明了该方法的正确性。

辨识电网故障后的关键线路并进行重点监控,进而采取相应的控制策略减轻线路潮流,将有效抑制连锁故障的发展。因此,本文所提方法在提高电网供电可靠性、预防大停电事故方面具有重要意义。

参考文献:

[1] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31[J]. Proceedings of

the CSEE,2012,32(25):167-174.

- [2] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11,16.
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America Power Grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology,2003,27(10):8-11,16.
- [3] Ministry of Power. Report of the enquiry committee on grid disturbance in Northern region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North-Eastern region on 31st July 2012[EB/OL]. [2016-08-10]. <http://powermin.nic.in/>.
- [4] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):1-9.
XUE Yusheng, XIE Yunyun, WEN Fushuan, et al. A review on cascading failures in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(19):1-9.
- [5] 陈晓玲,杨军,罗超,等. 一种大电网潮流转移路径快速搜索方法[J]. 电网技术,2015,39(4):1045-1052.
CHEN Xiaoling, YANG Jun, LUO Chao, et al. A high-speed searching method for power flow transferring paths in large power grid[J]. Power System Technology,2015,39(4):1045-1052.
- [6] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts[C]//Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii:IEEE,2001:51.
- [7] 曹一家,陈彦如,曹丽华,等. 复杂系统理论在电力系统中的应用研究展望[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):1-9.
CAO Yijia, CHEN Yanru, CAO Lihua, et al. Prospects of studies on application of complex system theory in power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(19):1-9.
- [8] 肖盛,张建华. 基于小世界拓扑模型的电网脆弱性评估[J]. 电网技术,2010,34(8):64-68.
XIAO Sheng, ZHANG Jianhua. Assessment of power grid vulnerability based on small-world topological model[J]. Power System Technology,2010,34(8):64-68.
- [9] 沈瑞寒,刘涤尘,赵洁,等. 基于加权网络模型的电网潮流转移下危险线路识别[J]. 电网技术,2012,36(5):245-250.
SHEN Ruihan, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. Weighted network model based recognition of dangerous lines under power flow transferring[J]. Power System Technology,2012,36(5):245-250.
- [10] 程林,刘满君,易俊,等. 基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J]. 电网技术,2016,40(5):1488-1494.
CHENG Lin, LIU Manjun, YI Jun, et al. The power system cascading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability model[J]. Power System Technology,2016,40(5):1488-1494.
- [11] 刘利民,刘俊勇,魏震波,等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):30-37.
LIU Limin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on synergetic effect analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(5):30-37.
- [12] 张程,于永军,李华强,等. 考量能量裕度及权重因子的电力系统节点综合脆弱性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):136-141.
ZHANG Cheng, YU Yongjun, LI Huaqiang, et al. Analysis of nodal comprehensive vulnerability considering energy margin and weight factor for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):136-141.
- [13] 邹欣,程林,孙元章. 基于线路运行可靠性模型的电力系统连锁

- 故障概率评估[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):7-11.
ZOU Xin, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. Cascading failure probabilistic assessment of power systems based on operational reliability model for transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 7-11.
- [14] 丁明,肖遥,张晶晶,等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):821-829.
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [15] 梅生伟,何飞,张雪敏,等. 一种改进的OPA模型及大停电风险评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(13):1-5,57.
MEI Shengwei, HE Fei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model and the evaluation of blackout risk [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 1-5, 57.
- [16] 章志刚,吉根林. 一种基于FP-Growth的频繁项目集并行挖掘算法[J]. 计算机工程与应用,2014,50(2):103-106.
ZHANG Zhigang, JI Genlin. Parallel algorithm for mining frequent item sets based on FP-Growth [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(2): 103-106.
- [17] 张同启. 基于关联规则和用户喜好程度的综合电子商务推荐系统的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2015.
ZHANG Tongqi. The research of e-commerce recommendation system based on association rules and user preference [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [18] 卢恩,鲁晓军,龙霏,等. 电力系统停电风险评估指标及方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):68-74.
LU En, LU Xiaojun, LONG Fei, et al. Indexes and method of power system outage risk assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 68-74.
- [19] 丁理杰,刘美君,曹一家,等. 基于隐性故障模型和风险理论的关键线路辨识[J]. 电力系统自动化,2007,31(6):1-5,22.
DING Lijie, LIU Meijun, CAO Yijia, et al. Power system key-lines identification based on hidden failure model and risk theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 1-5, 22.

作者简介:



周强明

周强明(1984—),男,湖北大悟人,副高级工程师,硕士,主要从事电力系统调度运行工作(E-mail:116530079@qq.com);

姜盛波(1994—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:1069985627@qq.com)。

Critical line identification method based on FP-growth algorithm for large power grid

ZHOU Qiangming¹, JIANG Shengbo², LU Hongyi¹, ZENG Peng¹,
LUO Chao², TAN Min¹, LEI Ming¹, YANG Jun²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The identification of critical lines in the development process of cascading failure is important for adopting effective restriction strategy to ensure the secure and stable operation of power grid. A critical line identification method based on FP-growth algorithm is proposed for large power grid. The cascading failure chain sets generated by the cascading failure simulation based on the operational reliability model of power grid are mined by the FP-growth algorithm to discover the association rules hidden in the sets. Therefore, the critical lines in the development process of cascading failure are identified. The risk analysis of those critical lines is carried out and their impact on the cascading failure is analyzed. The simulative results of IEEE 118-bus system show that, the proposed method can effectively identify the dangerous lines in the cascading failure development process.

Key words: cascading failure; operational reliability; FP-growth algorithm; critical line; risk analysis; stability