

地区电网故障恢复的实用化研究

刘道兵¹, 顾雪平¹, 赵洁琼²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 070011; 2. 山西省电力勘测设计院, 山西 太原 030001)

摘要: 地区电网的故障恢复是一个多目标、多约束、复杂的优化问题, 其优化的效率是其能否在线应用的关键。对地区电网故障恢复的实用化进行了研究, 构建了一种用于故障恢复处理的电网分析模型, 提出了一种面向在线应用的改进型最小生成树故障恢复处理算法。该算法在对复杂地区电网进行模型化的基础, 根据模型中子系统当前属性和即时路径权值, 动态调整最小树的搜索范围和生长方向, 从而实现最优恢复路径的快速搜索。实际电网故障恢复事例已证明, 本算法能够实现地区电网故障最优恢复路径的快速搜索。

关键词: 地区电网; 最小生成树; 故障恢复; 电网分析模型

Practical research of fault restoration for the regional power grid

LIU Dao-bing¹, GU Xue-ping¹, ZHAO Jie-qiong²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 070011, China;
2. Shanxi Electric Power Exploration and Design Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Fault restoration on regional power grids is a multi-objective, multi-constrained and complex optimization problem, and its efficiency of optimization is the key to its application on line. After studying the application of fault restoration technologies on regional power grids, an analytical model for on-line fault restoration is built and an improved Minimum Spanning Tree algorithm is presented. Based on modeling of the complex regional power grids, the algorithm can dynamically adjust searching space and growing direction of the minimum spanning tree according to the current properties of the subsystem and the present weight of the path in the analytical model to carry out the on-line quick search of the optimal restoration path. The validity of the algorithm has been verified by practical cases of fault restoration.

Key words: regional power grid; minimum spanning tree (MST); fault restoration; analytical model for power grid

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0048-05

0 引言

地区电网网架结构薄弱, 电气设备众多, 运行方式多变, 电网故障时常发生。电网故障发生后, 如果迅速采取正确有效的恢复措施, 可有效地缩短停电时间, 减小停电范围, 降低停电造成的损失。为此, 研究地区电网故障后的快速恢复有重要的现实意义。

地区电网的故障恢复问题是一个多目标、多约束、复杂的优化问题。目前关于故障恢复方法的研究也比较多, 大多采用了人工智能技术, 如遗传算法^[1-3]、专家系统^[4-5]等。遗传算法因随机搜索空间大, 耗时长, 在线系统的时效性难以保证; 而专家

系统学习能力和容错能力弱, 知识的获取和知识库的维护较为困难, 且专家经验通常很难覆盖到故障后所有恢复场景。另外还有蚁群算法^[6]、启发式搜索^[7]、多代理系统^[8]和 Petri 网^[9]等, 这些方法各具特色, 但很难满足地区电网在线故障恢复快速性的要求。

最小生成树算法^[10]是图论和计算机技术紧密结合的产物, 在诸多实际问题中得到应用。由图论可知, 由边和节点相互连接而成的图, 将图中每条边赋予权值, 则为加权图。一棵生成树的权则是其各边的权值之和。在加权图中, 最小权的那棵生成树被称为最小生成树。最小生成树算法有复杂度较小、CPU 资源占用少、计算速度快的优点, 但是将最小生成树理论直接应用于恢复处理算法, 无法保证系统在按生成的恢复策略执行过程中每一步都符

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(10QX34)

合电网运行安全约束,且也存在搜索空间大的问题。为此,本文首先构建一种能反映电网动态拓扑变化的电网故障恢复分析模型,并基于此分析模型提出一种改进型最小生成树的方法。该方法可在最小树的形成过程中,通过动态更新电网模型中子系统的状态属性,来控制最小树的生长方向和搜索范围,分步寻优,逐步校核,可到达快速有效地寻找合理恢复路径的目的。

1 电网故障恢复分析模型的构建

1.1 电网结线分析

电网建模前先对电网进行结线分析,结线分析是根据电网静态拓扑(电网元件间的连接关系),并结合开关、刀闸分合状态,将当前电网进行子系统划分。根据电网的分层结构(厂站层和网络层)特点,结线分析分层分步进行。先在厂站层进行结线分析,将电网划分为多个内部连通的结点,然后进行网络层分析,判断厂站层结点间是否有支路连接。若有支路连接,则把通过该支路连接的结点集合归并成一个子系统。为了保证在线应用的时效性,结线分析需要实时跟踪电网开关、刀闸的分合状态,更新当前的电网动态拓扑(设备之间电气连接关系),并可通过下述两项措施提高处理速度和分析准确性:

(1) 为各种形式复杂的电气主接线(如带旁路的双母线接线、3/2接线、环形开关接线等)建立结线分析模型。一般形式复杂的主接线,结线分析也颇为费时,如果将复杂的主接线模型化,则在在线结线分析中只需根据开关的分合状态调用相应模型进行模块化处理,可大大提高整个电网结线分析的速度;

(2) 保存上一次结线分析的电网动态拓扑和分析结果。本次结线分析可根据当前开关刀闸的分合状态,对比前后两次电网动态拓扑的变化。系统只需对动态拓扑有变化的区域进行结线分析。通常,前后两次在线结线分析的电网断面只有少量的开关刀闸状态发生变化,无须对全网重新进行结线分析,计算量也大为减少。

经过结线分析,整个电网可简化为若干个独立的子系统。

1.2 虚子系统的消去

地区电网电气设备数量庞大,接线形式多样,经过结线分析,得到的子系统数目较多。根据子系统内设备当前的带电状态,可将所有子系统划分为带电子系统与不带电子系统两类。在不带电子系统中,可进一步分为失电子系统和离线子系统,所谓

失电,就是指故障前带电而故障后不带电;所谓离线,就是指故障前后都不带电。失电子系统按其是否含有故障设备而分为故障子系统和非故障停电子系统;而离线子系统按其是否含有正在检修的设备又可分为停运子系统和备用子系统。为此,子系统的状态归结为带电、故障、停运、备用、非故障停电五类。故障恢复的目标是从带电子系统避开故障子系统和停运子系统向带有负荷的非故障停电子系统送电。另外,两个断开开关或刀闸间的连接线经过结线分析后会成为一个不带电的子系统,本文称之为虚子系统。对于虚子系统,在电网建模前作消去处理,同样需要作消去处理的还有不含有负荷的备用子系统和非故障停电子系统,如备用母线、变压器、线路或由闭合的开关和/或刀闸连成的区域。图1详细描述了子系统的消除过程。

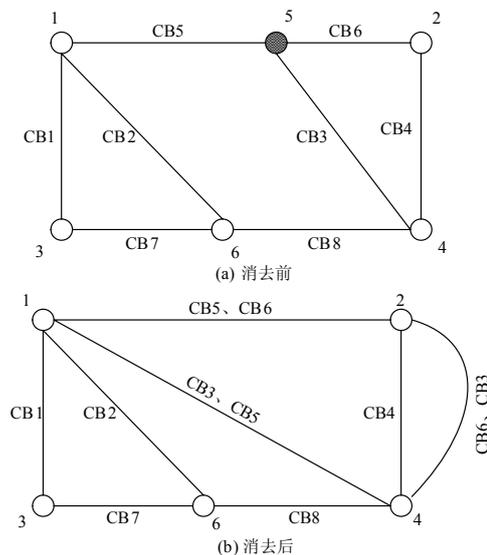


图1 子系统消去过程

Fig.1 The process of eliminating subsystem

图1(a)中,5#子系统是虚子系统,1#、4#、2#子系统分别通过路径(断开的开关或刀闸组) l_{1-5} 、 l_{4-5} 、 l_{2-5} 与5#子系统邻接,5#子系统需要消去。5#子系统消去时,与其连接的路径 l_{1-5} 、 l_{4-5} 、 l_{2-5} 也一同消去。为了弥补因消去子系统而造成的路径信息损失,在邻接的1#、4#、2#子系统的两两之间各新增一条路径,如图1(b)所示,其中新增边 l_{1-2} 、 l_{1-4} 、 l_{2-4} 与消去边 l_{1-5} 、 l_{4-5} 、 l_{2-5} 的关系式为:

$$\begin{aligned} l_{1-2} &= l_{1-5} + l_{2-5} = \text{CB5} + \text{CB6} \\ l_{1-4} &= l_{1-5} + l_{4-5} = \text{CB5} + \text{CB3} \\ l_{2-4} &= l_{2-5} + l_{4-5} = \text{CB6} + \text{CB3} \end{aligned} \quad (1)$$

1.3 电网分析模型

为了恢复算法和模型描述的需要，先为子系统引入能反映其恢复状态的属性。子系统属性值设置有带电、不带电需要恢复和不带电不需要恢复3个，在恢复算法执行过程中可动态调整。经过上述结线分析和子系统消去处理后，剩下子系统的初始属性可按下表1确定。

表1 子系统初始属性

子系统	属性值
带有负荷的备用子系统	不带电不需要恢复
故障子系统	不带电不需要恢复
检修子系统	不带电不需要恢复
带电子系统	带电
带有负荷的非故障停电子系统	不带电需要恢复

于是，电网故障恢复分析模型 E 可定义如下：

$$E = (S, L, R, V, F, W) \quad (2)$$

其中： S 是所有上述子系统集合； L 是路径集合； $R \subset S \times L$ 为路径与子系统连接关系的集合； V 为子系统的属性值集合； $F : S \rightarrow V$ 为子系统的查询和处理函数； $W : L \rightarrow N$ 为路径的权值函数，函数值为路径中开关或刀闸的操作数， N 为自然数。开关操作数越少的恢复方案，其执行的恢复过程时间越短。为此，地区电网故障恢复目标就是求取使开关操作数最少，恢复过程满足电网运行安全的故障恢复处理方案。

2 基于改进的最小生成树的故障恢复算法

参照图论中的表示方法，可把子系统当作图中的顶点，子系统与子系统之间连接的路径当作图中的边，边的权重为取路径中断开的开关或刀闸的个数，则整个地区电网经接线分析和子系统化后可表示成一个加权图。借鉴最小生成树中的网络搜索和优化思想，结合本故障恢复处理分析模型，本文发展了一种针对电网故障后能进行快速恢复的网络智能搜索和优化算法。该算法基于故障恢复处理分析模型，对最小生成树算法进行了改进，主要体现在：

(1) 给图论中的顶点引入状态属性。顶点状态属性即为分析模型中子系统的属性（带电、失电需要恢复、不带电不需要恢复）。引入状态属性后，可动态跟踪恢复过程，便于非故障停电区恢复路径的快速寻找。

(2) 分步寻优，逐步校核。按边的当前权重，从优选择，而待选边的须满足这样条件：其一端顶点属性为带电而另一端顶点属性为不带电需要恢

复；同时，待选边还须满足电网运行安全约束。

(3) 顶点属性和边权值的动态更新。在最小树生成过程中，每选中一条边，随即进行顶点属性的更新和待选边权值的计算。即将所选中边的一个属性为不带电需要恢复的顶点改成带电属性，同时将此边所对应的路径的所有断开开关和刀闸置合闸态，并据此重新计算剩下的所有待选边的权重。

(4) 保留并隔离属性为不带电不需要恢复的顶点，而恢复目标为使属性为不带电需要恢复的顶点逐步变成带电属性。为了保证树的完整性和连通性，不妨虚拟一个带电的顶点，并将初始带电的顶点通过权值很小的边连一起。

经结线分析和虚子系统消去后，地区电网模型化，基于改进的最小生成树的算法以孤岛恢复为目标，在满足潮流校验和电网安全约束的条件下，优选开关操作数最少的树（或路径组）。基于改进最小生成树的故障恢复处理算法的流程如图2所示，下面作简要说明。

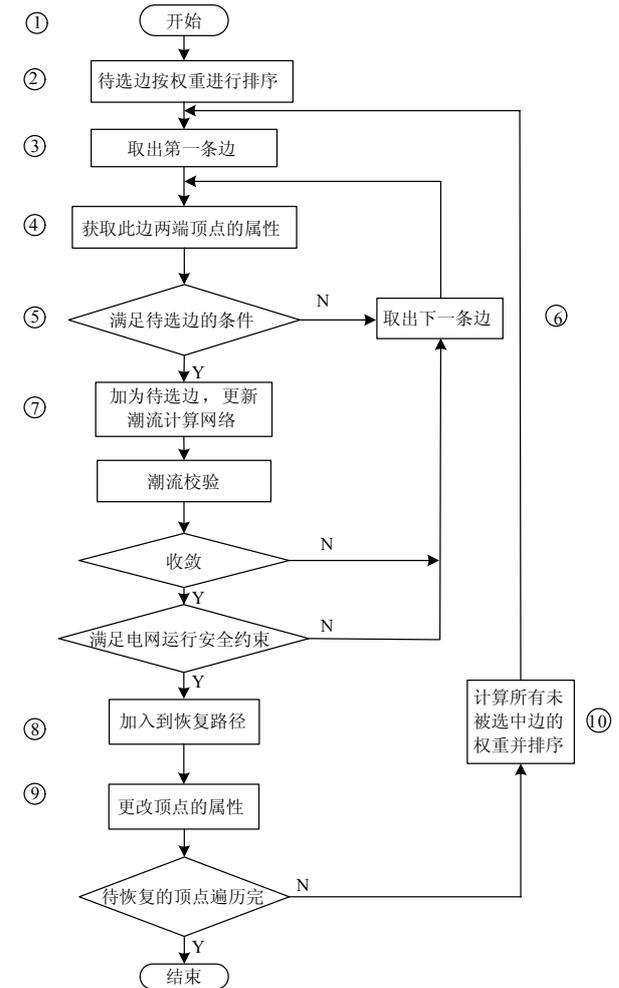


图2 改进生成树算法流程图

Fig.2 Flow chart of the improved MST algorithm

框①为原始数据的输入和程序的初始化, 输入数据有当前开关、刀闸的分合位置, 电网的遥测数据以及电网的静态拓扑等; 程序的初始化包括结线分析、虚拟子系统消去及创建电网恢复处理分析模型。框②根据每一条边含有断开的开关、刀闸数计算边的权重 $W(l), l \in L$, 并按权重从小到大排序。框③在每次重新排序后从最优的第一条待选边开始, 随着树的生长, 排序是动态变化的。框④通过式 (3) 来获取边 l 对应端点的属性:

$$F(s) \in V, s \in \{s | s \in S, (s, l) \in R\} \quad (3)$$

框⑤中待选边的条件是边 l 两端点属性分别为“带电”、“不带电需要恢复”, 其表达式如下:

$$F(s_1) = \text{“带电”} \text{ 且 } F(s_2) = \text{“不带电需要恢复”}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } s_1, s_2 \in \{s | s \in S, (s, l) \in R\}$$

框⑥在待选边条件不满足或者虽满足但不符合潮流校验或电网运行安全约束时进行, 此时因顶点属性和边的权值均未变化, 故此时边无须重新排序。框⑦将待选边加入到相应网络中, 即将边中所含的断开开关和刀闸置合位, 形成新的潮流计算网络。框⑧表现为树的生长, 即待选边被选入到恢复的路径中。框⑨使边 l 对应的两个端点的属性都为“带电”, 即在式 (4) 的前提下, 使得:

$$F(s_2) = \text{“带电”}$$

框⑩对所有未被选中的边进行权重计算, 在权重计算过程中, 需要计及上述顶点属性的变化和选中边导致其中开关刀闸的分合状态变化, 权重的排列一般会有变化。

3 实例分析

本文以沧州电网作为应用对象来验证所提出方法的有效性。在沧州地区电网中, 110 kV 和 220 kV 电压等级的变电站共有 94 座; 开关和刀闸共有 2 324 个; 元件有 2 540 个 (其中与开关或刀闸有直接联系的元件数目为 2 051 个, 与支路相关的元件有 489 个); 支路 (包括线路和变压器的支路) 共有 703 条; 利用实时数据进行结线分析后, 形成了 746 个结点 (其中 257 个结点是由闭合的开关或刀闸连接的元件形成的; 489 个结点是由与支路相联接的元件直接形成的), 746 个结点中, 无支路连接的结点有 57 个, 直接形成 57 个子系统; 余下的 689 个结点通过支路连接, 形成了 18 个子系统。在所有的 75 个子系统中, 仅由闭合的开关或刀闸组成的虚子系统 34 个, 而包含有母线、线路或变压器的实子系统 41 个。

图3所示的为消去虚子系统以后的41个实子系

统的分布图, 图3中的点为实子系统, 边为子系统之间的路径, 即断开的开关或刀闸组, 边的权重为断开的开关或刀闸的个数。其中, 19号子系统为含故障设备的子系统, 6号子系统为停运子系统, 19号和6号子系统状态属性应为“不带电不需要恢复” 5号子系统为非故障失电子系统, 状态属性为“不带电需要恢复”, 需要对其进行恢复路径的寻找。与5号子系统相连接的1号子系统为带电的子系统。经过执行恢复算法后得到: 5号子系统的恢复路径为港口站171开关, 对该路径进行潮流校验, 满足潮流约束的条件。故5号子系统的故障恢复方案是: 港口站171开关。5号子系统(港口站)的厂站层的接线示意图如图4所示。

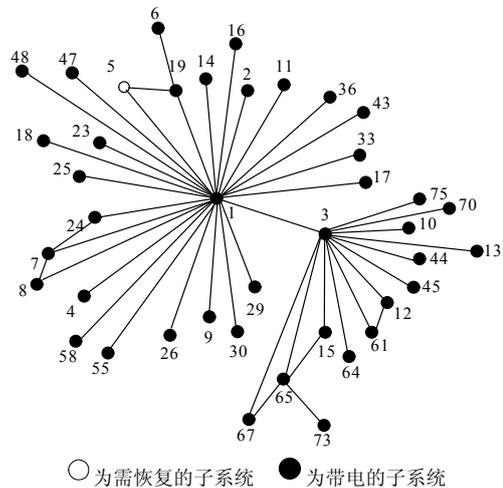


图3 实子系统分布图

Fig.3 Schematic distribution of actual subsystems

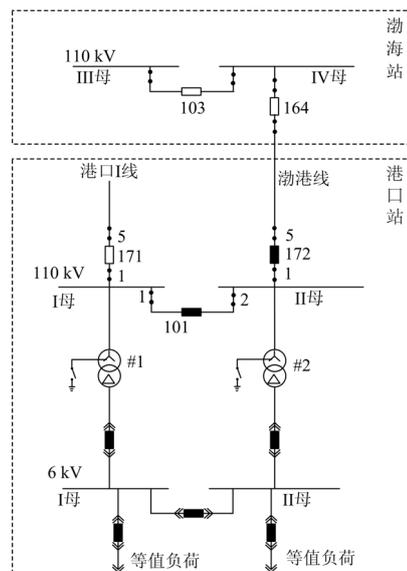


图4 5号子系统厂站层接线示意图

Fig.4 The schematic topology of No. 5 subsystem on the station layer

实际运行得到的多个故障恢复实例表明：对于地区电网故障引起的非故障停电区，利用改进的最小生成树的故障恢复算法，可快速寻找选恢复路径并生成故障恢复处理方案，且恢复方案合理可行。另外，从故障诊断到故障恢复方案生成，计算耗时在 10 s 以内，完全符合故障后恢复处理的快速性的要求。

4 总结

本文针对地区电网故障恢复处理的实际情况，提出了一种适用于在线应用的故障恢复实用化算法。该算法是在最小生成树算法的基础上，以开关操作数最小为准则，通过更新电网故障恢复分析模型中的动态属性，控制最小树的生长方向，分步寻优，逐步校核，实现快速、有效地寻找最优的恢复路径。本算法作为地区电网在线故障恢复处理系统的一个重要组成部分，已随系统投入到实际运行中。实际电网故障恢复事例已证明，本算法能够实现地区电网故障最优恢复路径的快速搜索，对于地区电网的在线故障恢复处理具有实用价值。

参考文献

- [1] 盛四清, 梁志瑞, 张文勤, 等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (8): 53-55.
SHENG Si-qing, LIANG Zhi-rui, ZHANG Wen-qin, et al. Fault restoration of distribution network based on genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (8): 53-55.
- [2] 沈广, 陈允平, 刘栋. 基于最小生成树编码的配电网恢复遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (14): 81-84.
SHEN Guang, CHEN Yong-ping, LIU Dong. Distribution network restoration based on the genetic algorithm with minimum spanning tree decoding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (14): 81-84.
- [3] SHENG Si-qing, MA Zhi-gang, et al. Distribution network fault restoration based on improved adaptive genetic algorithm[C]. //Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. 2009: 318-321.
- [4] 杨成峰, 乐秀璠. 配电网故障恢复专家系统的一种实现[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (11): 28-31.
YANG Cheng-feng, LE Xiu-fan. An implementation of service restoration expert system for power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21 (11): 28-31.
- [5] 赵冬梅, 万彦栋, 高曙, 等. 电网故障恢复系统软件的设计与实现[J]. 现代电力, 2002, 19 (4): 38-42.
ZHAO Dong-mei, WAN Yan-dong, GAO Shu, et al. Design and implement of electrical network fault restoration system software[J]. Modern Electric Power, 2002, 19 (4): 38-42.
- [6] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32 (7): 51-55.
ZHANG Zhao, FENG Ya-qin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7): 51-55.
- [7] 徐海, 王宏, 梁志珊. 基于启发式搜索的配电网供电恢复系统[J]. 东北电力学院学报, 2001, 21 (2): 8-12.
XU Hai, WANG Hong, LIANG Zhi-shan. Heuristic-search service restoration in distribution networks[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2001, 21 (2): 8-12.
- [8] Nagata T, Tao Y, Kimura K, et al. A multi-agent approach to distribution system restoration[C]. //The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems. 2004: 333-336.
- [9] 马骞, 杨以涵, 刘文颖, 等. 基于对象Petri网技术的电力系统故障恢复方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 23-28.
MA Qian, YANG Yi-han, LIU Wen-ying, et al. Method of power system restoration based on object-oriented Petri-net technique[J]. Power System Technology, 2005, 29 (3): 23-28.
- [10] 刘瓚武. 应用图论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
LIU Zan-wu. Graph theory[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2006.

收稿日期: 2010-05-08

作者简介:

刘道兵 (1975-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用; E-mail: liudb@sohu.com

顾雪平 (1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定评估与控制、电力系统安全防御与恢复控制、智能技术在电力系统中的应用;

赵洁琼 (1984-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统安全防御与恢复控制、电力系统规划与设计。