

基于路径描述的配网灾后供电恢复策略^{*}

张林垚¹, 雷勇¹, 施鹏佳¹, 王孝慈², 朱嘉麒², 董树锋²

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院 福州 350012; 2. 浙江大学 电气工程学院 杭州 310007)

摘要: 配电网防灾建设薄弱, 易受自然灾害侵袭而发生元件故障, 导致非故障区域负荷失电。文中通过给出灾后供电恢复策略, 对配电网的开关刀闸进行重构操作, 改变负荷的供电路径, 使失电负荷尽可能恢复供电。通过路径描述方法对配电网拓扑进行建模, 采用深度优先算法在配网模型中搜索出所有可能的供电路径。以“确保所有重要负荷恢复供电, 尽量恢复所有非重要负荷”为优化目标, 建立优化方程组, 求解可得配网的灾后重构拓扑及相应供电恢复策略。此算法不依赖配网潮流计算, 可以显著提升计算效率, 增强灾后供电恢复策略生成的实时性。

关键词: 路径描述建模; 配电网灾后重构; 路径搜索; 深度搜索; 重要负荷

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2020.15.010

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2020)15-0059-06

Power supply recovery strategy for distribution network after disaster based on path description

Zhang Linyao¹, Lei Yong¹, Shi Pengjia¹, Wang Xiaoci², Zhu Jiaqi², Dong Shufeng²

(1. Economic Technology Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350012, China.

2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: The construction of the distribution network is weak in disaster prevention, which leads to component failure and loss of power in non-fault areas. In this paper, in order to restore the power supply as much as possible, the switch brake of distribution network is reorganized to change operation mode of distribution network. In this method, the topology of distribution network is firstly modeled by path description method. And then, all the possible power supply paths are searched in the distribution network model by depth priority algorithm. Based on the principle of ensuring all critical loads to restore power supply and as far as possible to restore all non-critical loads, the optimization equations are established to solve the post-disaster reconstruction topology and power supply recovery strategy of the distribution network. In the process of solving the problem of power supply strategy for power supply recovery after disaster, the possible topology of power distribution network and critical load factors are fully considered in this paper. The strategy proposed in this paper can restore all the critical loads for the massive power outage after a disaster. In contrast to two typical algorithms, our method has a certain advantage, and it does not rely on the flow calculation of distribution network, which can significantly improve the calculation efficiency and enhance the real-time performance of power supply recovery strategy after disaster.

Keywords: path description modeling, post-disaster reconstruction of distribution network, path search, deep search, critical loads

0 引 言

目前, 沿海地区配电网的抗灾建设薄弱, 易受到台风、洪涝等自然灾害的影响发生元件故障, 从而导致负荷失电。对于生产工作来说, 负荷失电会打乱工厂的

生产计划, 带来严重的经济损失。对于居民生活来说, 负荷失电也会造成诸多不便。如果重要负荷失去供电, 则可能造成危及生命安全、国家财产的严重后果。研究配电网的灾后重构供电恢复策略可以快速恢复供电, 提升配电网的抗灾水平, 有效的减小负荷失电所带来的损失。因此, 研究配网灾后重构对于配电网的经

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677165); 国网福建省电力有限公司科技项目(52130N16000J)

济稳定运行具有重要意义。

目前,已有很多针对配网灾后重构的相关研究成果。其求解方案主要分为三种:基于专家系统求解^[1-2]、基于启发式算法求解^[3-6]、人工智能算法求解^[7-9]。基于专家系统的求解方式,需要建立专家知识库,耗时多,主观性强。启发式算法是目前较常见的求解方法,它将求解供电恢复方案抽象为多目标、多约束的组合优化问题,并在求解过程中引入一些启发式信息、规则,使其结果迅速收敛到最优方案。其中,遗传算法^[4-5]与蚁群算法^[6]应用较多。由于配电网拓扑结构和图论中的树结构相似,不少启发式算法中都借鉴图论来解决问题。文献[10]提出了一种基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法,可使非故障失电区均匀恢复供电,且供电路径不会过长。文献[11]提出了基于最小生成树和动态规划算法的分布式电源孤岛划分方法,使孤岛可以稳定运行并且快速并网恢复供电。文献[12-13]基于路径对配电网的拓扑进行了建模,并用遗传算法进行恢复供电策略的求解。文献[14]提出了一种基于开关的电网等值模型,利用宽度优先算法对供电路径进行搜索,使系统能够进行黑启动,快速恢复供电。已有文献表明,启发式算法具有较强的实时性和实用性^[15]。随着人工智能算法的成熟,它也逐渐被应用到灾后配电网供电恢复领域中^[7-9],现有文献表明其效果良好,具有研究价值。

故障配电网的灾后重构的本质是开关刀闸的重新组合^[16-18],在求解过程中会产生大量的开关排列组合序列。然而,目前大部分配电网重构求解算法依赖于潮流计算验证,如果对每一种开关组合进行潮流计算,则存在计算量过大等问题。目前已有相关研究针对该问题改进。文献[19]提出了一种以联络开关为中心的待恢复切割树模型,且在求取负荷恢复路径时采用简化的模型考虑电流容量和电压约束,避免了大量的潮流计算。文献[20]通过判断联络开关总备用容量与失电区总负荷的关系,确定是否需要提前转移二级支持馈线的负荷,以有功分配为基础采用广度优先搜索方法确定供电路径方案。因此,在一些无法进行配电网在线潮流计算和校验的场合,依旧能够得出故障配网重构策略。

文章提出了一种基于路径描述的配电网灾后供电恢复策略。该方法基于供电路径对配电网拓扑进行了建模,利用深度优先算法求解可能的供电路径,最终求解出配电网灾后恢复供电的策略。基于路径的配电网拓扑建模方法可以将电网的几何结构准确的映射到代

数方程中,可以确保结果的全面性,以及最优性。本算法不依赖于配电网潮流计算,可以提升计算效率,节约计算成本。同时,本算法可以用于无配网潮流计算条件的场合,如配电网规划阶段的电网结构抗灾性检验、线路参数严重缺失的中低压配电网等,应用范围广泛。

1 负荷供电路径描述模型

1.1 基于路径的配电网拓扑描述

配电网中有两种节点,负荷节点和电源节点。以电源节点为起点,负荷节点为终点的一条通路可以认为是该负荷的供电路径。通过改变配电网中开关的状态,可以改变配电网的拓扑结构,从而改变负荷的供电路径。因此,每个负荷节点拥有多条可能的潜在供电路径。

文献[21]提出了一种基于公共信息模型(CIM)的配电网网络模型简化方法,以及一种基于深度优先遍历的配电网路径搜索算法,为文中的研究奠定了基础。

设负荷节点 i 存在 p 条可能的供电路径,用集合 Π_{node}^i 表示为:

$$\Pi_{\text{node}}^i = \{\pi_1^i, \pi_2^i, \dots, \pi_k^i, \dots, \pi_p^i\} \quad (1)$$

式中 π_k^i 为负荷 i 的第 k 条可能供电路径。定义0-1变量 W_k^i 描述每条可能供电路径的联通状态:

$$W_k^i = \begin{cases} 1, & \text{路径 } \pi_k^i \text{ 连通} \\ 0, & \text{反之} \end{cases} \quad (2)$$

由于配电网辐射状运行,在每一种开关组合状态下,每一个负荷节点有且只有一条确定的供电路径,可表示为:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_{\text{node}}^i} W_k^i = 1, \forall i \in [1, N] \quad (3)$$

式中 N 为节点总数。

为方便对配电网运行时的支路通断状态和其他约束条件进行描述,定义集合如下:

$$\Pi_{\text{source}}^j = \{\text{由电源 } j \text{ 供电的所有路径 } j \in [0, J]\} \quad (4)$$

$$\Pi_{\text{branch}}^m = \{\text{经过支路 } m \text{ 的所有路径 } m \in [0, M]\} \quad (5)$$

式中 J 为电源总数; M 为支路总数。若路径 π_k^i 是电源 j 供电的,则 $\pi_k^i \in \Pi_{\text{source}}^j$;若路径 π_k^i 经过支路 m ,则 $\pi_k^i \in \Pi_{\text{branch}}^m$ 。

配电网可以通过不同的开关刀闸组合,运行在多种方式下。不同运行方式的配电网拓扑结构不同,负荷的供电路径也不同。

1.2 深度优先路径搜索算法

文献[20]利用广度优先算法进行了路径搜索,广度优先算法较深度优先算法所需存储空间大,在节点数量较多的配电网中,深度优先算法更利用工程落地。

深度优先算法是用于图的遍历的一种搜索算法,其主要思想是:沿着树的深度,遍历树的节点,尽可能深的搜索树的分支。当从节点 v 出发的所有边都被探寻过,搜索回溯到发现节点 v 的那条边的起始节点。具体如下:

步骤一:访问顶点 v ;

步骤二:依次从 v 的未被访问的临接点出发,对图进行深度优先遍历;直至图中和 v 有路径相通的顶点均被访问;

步骤三:若此时图中尚有顶点未被访问,则从一个未被访问的顶点出发,重新深度优先遍历,直到图中所有顶点均被访问过为止;

步骤四:深度优先搜索算法可以产生目标图的相应拓扑排序表,将此排序表用到负荷供电路径搜索中,可以得到负荷所有可能的供电路径,建立配电网路径集合。该算法可由堆栈技术实现^[22];

步骤五:栈底元素为电源节点,并从电源节点开始,以“深度优先”为规则进行访问。将每一次新访问的节点入栈,作为“栈顶”元素 v ;每一次新增栈顶元素,均读取从栈底到栈顶的所有元素,存储为一条新的供电路径。搜索 v 的邻接点,并设立搜索条件:(1)该节点不存在于栈中;(2)由该节点新生成的供电路径不同于已搜索到的任一路径;(3)该节点不属于电源节点;

步骤六:若新搜索到的邻接点满足搜索条件,则将其入栈,作为新的栈顶元素;若其不满足搜索条件,则继续搜索 v 的其它邻接点,直到 v 的所有邻接点都不满足搜索条件,将 v 出栈。直到栈内没有任何元素,再将其它电源点入栈,重复上述搜索,完成所有供电路径的搜索。

2 灾后供电恢复模型

2.1 灾后供电恢复模型

当发生灾害后,系统发生元件故障,导致部分非故障区负荷失电,需要求解合理的转供方案,尽可能的恢复失电负荷的供电。因此,以系统通电负荷最大建立目标函数:

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i L_i \quad (6)$$

式中 L_i 为负荷点 i 的负荷值。

配电网运行中受到电源容量与线路载流量的限制,具体如下所示:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_{k,source}^i} W_k^i L_i \leq S_j \quad (7)$$

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_{k,branch}^i} W_k^i \times L_i \leq B_m \quad (8)$$

式中 S_j 为电源 j 的容量; B_m 为支路 m 的容量。

将断电负荷分为两类:一类是重要负荷,需要确保供电;另一类是非重要负荷。恢复供电的原则是:重要负荷优先确保恢复供电;在此基础上,尽可能恢复非重要负荷的供电。

设重要负荷点集合为 set_{pri} ,非重要负荷点集合为 set_{un} 。重要负荷需要满足存在一条通电路径:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i = 1, \forall i \in set_{pri} \quad (9)$$

非重要负荷有两种情况,存在一条通电路径或不存在通电路径:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i \leq 1, \forall i \in set_{un} \quad (10)$$

同时需要满足被包含路径的通断值大于包含路径的通断值,即:

$$W_k^i \leq W_{k'}^{i'}, \forall \pi_{k'}^{i'} \subset \pi_k^i \quad (11)$$

式中 π_k^i 为包含路径; $\pi_{k'}^{i'}$ 为被包含路径。

2.2 求解流程步骤

求解流程步骤如图 1 所示。首先,建立灾后配网模型,确定电源点、重要负荷点和非重要负荷点。然后,进行路径搜索,建立负荷点的供电路径集。之后,建立各项约束式,保证电源、馈线正常工作不过载。最后求解满足重要负荷通电,最大化恢复供电的路径状态集向量。若无解,说明无法满足全部重要负荷的供电,则切除最小重要负荷,再重新进行上面的求解过程,直至问题有解为止。

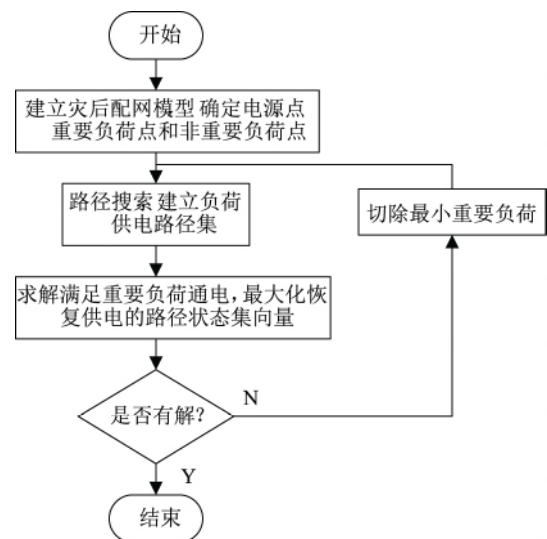


图 1 求解流程图

Fig. 1 Flow chart of solution

2.3 实例说明

图 2 为 7 节点配电网正常运行结构图,其中 S_1 、

S_2 、 S_3 为电源点, A、B、C、D 为负荷点。正常工作时, 负荷点 A、B 由电源点 S_1 带载, 负荷点 C 由 S_2 带载, 负荷点 D 由 S_3 带载, 即边 1、4、7、3 为通, 边 2、5、6、8 为断。

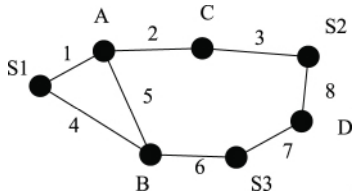


图 2 配电网拓扑关系图

Fig. 2 Topology diagram of distribution network

电源点容量和负荷点负荷值如表 1 所示。

表 1 电源容量和负荷点值

Tab. 1 Power capacity and load point values

容量/(MV·A)		
S_1	300	
S_2	200	
S_3	200	

	负荷值/MW	是否为重要负荷
A	100	是
B	150	否
C	100	否
D	150	否

当 S_3 因故障退出运行, 节点 S_3 与节点 B、D 间断开, 系统故障模型更新如图 3 所示。

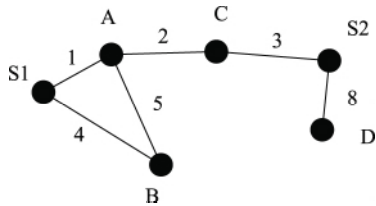


图 3 灾后配电网拓扑关系

Fig. 3 Topological relationship of post-disaster distribution network

步骤 1: 搜索路径。

以 S_1 、 S_2 为起点, 完成相应的路径搜索。路径搜索建立各个负荷点的路径集, 如表 2 所示;

步骤 2: 建立模型。

以系统供电负荷总和最大为目标函数:

$$\max \sum_{i=A}^N \sum_{\pi_k^i \in \Pi_N^i} W_k^i L_i \quad i = A, B, C, D$$

建立电源容量约束条件:

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi_{\text{source}}} W_k^i L_i \leq S_j \quad j = 1, 2$$

表 2 负荷节点路径

Tab. 2 Paths of load nodes

负荷节点	路径	路径节点	路径支路
A	π_1^A	S_1, A	1
	π_2^A	S_1, B, A	4, 5
	π_3^A	S_2, C, A	3, 2
B	π_1^B	S_1, B	4
	π_2^B	S_1, A, B	1, 5
	π_3^B	S_2, C, A, B	3, 2, 5
C	π_1^C	S_1, A, C	1, 2
	π_2^C	S_1, B, A, C	4, 5, 2
	π_3^C	S_2, C	3
D	π_3^D	S_2, D	8

其中 $S_1 = 300$, $S_2 = 200$ 。

分别建立 S_1 、 S_2 的容量约束条件, 以 S_1 为例:

$$(W_1^A + W_2^A)L_A + (W_1^B + W_2^B)L_B + (W_1^C + W_2^C)L_C \leq S_1$$

分别建立边 1、边 2、边 3、边 4、边 5、边 8 载流量约束, 以边 1 为例:

$$W_1^A L_A + W_2^B L_B + W_1^C L_C \leq B_1$$

建立重要负荷通电约束; 负荷点 A 为重要负荷, 需要保证通电:

$$W_1^A + W_2^A + W_3^A = 1$$

非重要负荷无多条供电路径约束; 负荷点 B、C、D 为非重要负荷, 可以通电或不通电, 以负荷 B 为例:

$$W_1^B + W_2^B + W_3^B \leq 1$$

建立路径的包含约束, 以负荷 C 路径 1 为例:

$$W_1^C \leq W_1^A$$

步骤 3 求解模型。

最后求解该 0-1 型整数规划问题可得, 负荷点 A、C 由电源点 S_2 带载, 负荷点 B 由电源点 S_3 带载, 负荷 D 切除。路径 π_3^A 、 π_3^C 、 π_4^B 为连通, 其余路径均为断开。该计算结果应用于配网灾后供电恢复, 可以增强配网灾后应急处置能力, 提升了配电网的供电可靠性。

3 算例分析

文中算例数据在文献 [23] 中的 33 节点系统上进行了修改, 如图 4 所示。其系统基准电压为 12.66 kV, 系统总负荷为 3 135 kW。线路 7-8、9-10、28-29、32-33 为联络开关所在线路, 其余线路装有分段开关。节点 7、8、12、24、25、30、32 为重要节点。

本算例将对比大范围灾后停电场景下, 文中算法和不考虑切负荷与不考虑重要负荷因素的灾后供电恢复策略的效果, 具体如下:

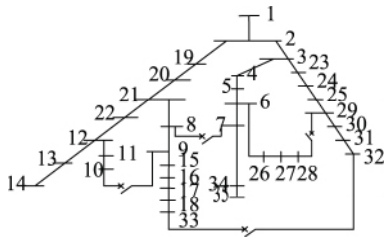


图 4 33 节点电网拓扑结构
Fig. 4 33-node network topology

(1) 文中算法在无法恢复所有失电负荷供电的情况下,会优先保证重要负荷,切除非重要负荷;
(2) 不考虑切负荷:在求解灾后供电恢复策略时不考虑切负荷情况,如果转供结果依然存在失电负荷则算法不收敛;
(3) 不考虑重要因素:在无法恢复所有失电负荷供电的情况下,会考虑切除负荷,其切负荷的主要依据是恢复供电功率最大,不考虑负荷的重要程度。
假设线路 24-25,19-20 同时发生故障,此时失电 1 660 kW,其中包括重要负荷 8,12,25,30,32 失去供电。应用文中方法进行计算,供电恢复策略如表 3 所示。

表 3 灾后大范围停电供电恢复策略
Tab. 3 Power supply restoration strategies for large-scale power outage after disaster

算法	计算时长 (ms)	开关操作		重要负 荷停电功 率(kW)	停电 负荷功率 (kW)
		闭合	断开		
文中算法	1 023		9-15	0	420
		7-8	10-11		
		9-10	11-12		
		28-29	18-33		
		32-33	20-21		
不考虑切负荷	不收敛		34-35	200	410
		7-8	29-30		
		9-10	34-35		
		28-29	31-32		
		32-33			

文中算法输出的供电恢复后拓扑结构如图 5 所示,可见:
(1) 策略生效后切除了负荷 11,15,16,17,18,20,35;
(2) 重要负荷 7,8,12,24,25,30,32 都存在供电路径;

(3) 较策略实施前恢复供电 1 240 kW。

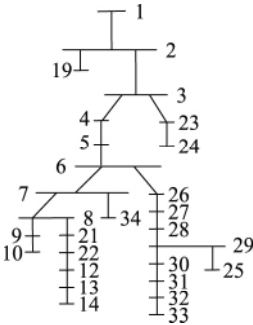


图 5 灾后恢复策略生效配电网结构图
Fig. 5 Structure diagram of distribution network after disaster recovery strategy

在灾后大范围停电下,由于电网本身不存在完全转供策略,因此不考虑投切负荷的算法不能输出结果^[24];对比本文算法和不考虑重要负荷的算法,由于不考虑重要负荷的算法以最大程度恢复供电为目标,不考虑负荷重要程度因素,所以不考虑重要负荷的算法比本文算法负荷失电功率少 10 kW。但是文中算法给出的恢复策略不存在重要负荷失电问题,而不考虑重要负荷的策略会导致 200 kW 的重要负荷失电。在实际情况,不能允许发生重要负荷失电,否则会带来比较严重的经济损失或人身安全事故。

4 结束语

文章通过路径描述的方法对配电网拓扑进行建模,采用深度优先算法在配网模型中搜索出所有可能供电路径。以“确保所有重要负荷恢复供电,尽量恢复所有非重要负荷”为原则,求解配网的灾后拓扑结构以及供电恢复策略。文中方法具有以下特点:

- (1) 通过把路径描述应用到配电网的灾后恢复中,解决了配网灾后恢复供电策略问题,完整考虑了配网可能存在的拓扑情况;
- (2) 文中方法通过考虑重要负荷因素,进行切负荷操作,保证了重要负荷优先恢复供电;并在此基础上,尽可能地恢复了非重要负荷供电;
- (3) 本算法不需要配电网潮流计算,提升了计算效率,可以应用于不具备潮流计算条件的场景。

文中提供了配网的灾后供电恢复一种新的思路,后续将进一步研究供电恢复后的抢修策略,结合抢修策略,实时改变灾后配电网恢复供电措施,形成一套完整的灾后应急方案。

参 考 文 献

[1] Imakura K, Inagaki J, Matsunoki Y, et al. A knowledge-based method

- for making restoration plan of bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 7(2): 914-920.
- [2] Yuan-Yih Hsu and Han-Ching Kuo, A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration[J]. in IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 948-953.
- [3] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, (2): 56-62.
- [4] Luan W P, Irving M R, Daniel J S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks[J]. 2002, 149(2): 145-151.
- [5] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
- Liu Li, Chen Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings-Chinese society of electrical engineering, 2000, 20(2): 66-69.
- [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.
- [7] 赵晶晶, 杨秀, 符杨. 考虑分布式发电孤岛运行方式的智能配电网供电恢复策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 45-49.
- Zhao Jingjing, Yang Xiu, Fu Yang. Smart distribution system service restoration using distributed generation islanding technique[J]. Power system protection and control, 2011, 39(17): 45-49.
- [8] 徐玉琴, 李雪冬, 张丽. 基于多智能体免疫算法的配电网供电恢复[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2010, 37(2): 15-19.
- Xu Yuqin, Li Xuedong, Zhang Li. Application of multi-agent immune algorithm for distribution service restoration[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2010, 2: 2.
- [9] 吴建中, 余贻鑫. 一种高效的配电网供电恢复算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 82-86.
- Wu Jianzhong, Yu Yixin. An efficient algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Technology-Beijing, 2003, 27(10): 82-86.
- [10] 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.
- Zhang Haibo, Zhang Xiaoyun, Tao Wenwei. A breadth-first search based service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 103-108.
- [11] 冯雪平, 梁英, 郭炳庆. 基于图论的含分布式电源配电网供电恢复动态规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 24-29.
- Feng Xueping P, Liang Ying, Guo Bingqing. A dynamic programming method based on graph theory for restoration of distribution system with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 24-29.
- [12] Ramos E R, Exposito A G, Santos J R, et al. Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 556-564.
- [13] Duan D L, Ling X D, Wu X Y, et al. Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliability improvement based on an enhanced genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64(64): 88-95.
- [14] 张亦凌. 地区电网故障恢复系统的设计与实现[J]. 山西电力, 2015, (6): 12-15.
- Zhang Yiling. Design and Realization of Fault Restoration System for Regional Power Grid[J]. Shanxi Electric Power, 2015, (6): 12-15.
- [15] 茅逸斐, 韩蓓, 李国杰, 等. 基于网络等效的配电网快速供电恢复策略并行化实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, (11): 99-108.
- [16] 刘健, 徐精求, 程红丽. 紧急状态下配电网大面积断电快速恢复算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 132-138.
- Lu Jian, Xiu Jingqiu, Cheng Hongli. Algorithms on fast restoration of large area breakdown of distribution systems under emergency states[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132-138.
- [17] 胡键, 郭志忠, 刘迎春, 等. 故障恢复问题和发电机恢复排序分析[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 1-4.
- Hu Jian, Guo Zhizhong, Liu Yingchun, et al. Power system restoration and analysis of restoration sequence of generating sets[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 1-4.
- [18] 刘明慧, 张东英, 邹品元, 等. 能在线应用的地区电网故障恢复系统[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 35-39.
- Liu Minghui, Zhang Dongying, Zou Pinyuan, et al. Regional network fault restoration system applied in on-line mode[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 35-39.
- [19] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
- [20] 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, (7): 103-108.
- Zhang Haibo, Zhang Xiaoyun, Tao Wenwei. A breadth-first search based service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 103-108.
- [21] 徐成司, 董树锋, 孙洲, 等. 基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 170-176.
- [22] 孙明, 董树锋, 夏圣峰, 等. 基于路径描述的馈线分区 N-1 可装机容量计算方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 1-10.
- [23] 黄弦超, 杨雨, 范闻博. 配电网多故障抢修与供电恢复联合优化模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 68-73.
- [24] 刘鑫, 滕欢, 宫毓斌, 等. 基于改进卡尔曼滤波算法的短期负荷预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 42-46.

作者简介:



张林垚(1980—),男,高级工程师,硕士,主要从事电力系统规划设计研究。

Email: 317758179@qq.com

雷勇(1963—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事电力系统规划设计研究。

施鹏佳(1990—),男,工程师,硕士,主要从事能源互联网、电力系统规划设计研究。

收稿日期: 2019-03-16; 修回日期: 2019-06-11
(杜景飞 编发)