

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210146

一种配电网开路潮流转移危险线路的识别方法

梁小华¹, 杨欢红², 薛冰¹, 程祥群¹, 杨然¹, 傅冬生¹, 孙诗晴¹, 孙彦¹

(1. 国网安徽省电力有限公司宣城供电公司, 安徽 宣城 242000; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 为了避免配电网潮流转移导致输电线路连锁故障跳闸反应, 提出了一种基于改进 Dijkstra 算法的潮流转移情况下对危险线路识别的方法。首先分析了线路发生故障断开后线路潮流转移主要波及的危险线路, 然后将电网转化成加权拓扑图。在此过程中, 综合考虑潮流转移量和功率传输裕度这两个指标, 并引入阻抗修正系数, 将综合阻抗作为线路权重。随后采用改进 Dijkstra 算法搜索最短路径和次短路径, 其所包含的有功潮流转移系数较大的线路即为危险线路。该算法通过 C++ 编程实现, 无需多次求解, 可有效提高运算效率。最后, 采用 IEEE39 节点标准算例开展仿真分析, 论证了所述的方法是有效和实用的。

关键词: 潮流转移; 改进 Dijkstra; 拓扑图; 危险线路; 综合阻抗; 最短路径

An identification method for dangerous lines under power flow transfer in a distribution network open circuit

LIANG Xiaohua¹, YANG Huanhong², XUE Bing¹, CHENG Xiangqun¹, YANG Ran¹, FU Dongsheng¹,
SUN Shiqing¹, SUN Yan¹

(1. Xuancheng Electric Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Xuancheng 242000, China;
2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To avoid cascading overload trips caused by power flow transfer, a method for fast searching of dangerous lines based on an improved Dijkstra algorithm is proposed. First, the main dangerous lines affected by power flow transfer after the line is disconnected because of a fault are analyzed, and the power grid is transformed into a weighted topological graph. In the process, two indices of power flow transfer and line power transmission margin are considered, introducing an impedance correction factor, and taking the integrated impedance of the line as the weight of the line. Then the improved Dijkstra algorithm is used to search the shortest and the second shortest path, and the line with a large active power flow transfer coefficient is taken as a dangerous line. The proposed method can be implemented by C++ without the need for repeated solving, so the computing efficiency is improved. Finally, an IEEE39 node system simulation is analyzed. This demonstrates the effectiveness and practicability of the algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877135) and the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (No. B312G020000G).

Key words: power flow transferring; improved Dijkstra algorithm; topological graph; dangerous lines; integrated impedance; shortest path

0 引言

近年来, 我国配电网结构日益复杂, 随着用电负荷不断增大, 分布式能源接入和用户谐波型负荷增多等情况, 配电网的单相接地故障及相间故障处

理得到了广泛关注^[1], 但对于断线故障识别与处理的相关报道较少。由于配电网断线故障没有及时处理而造成的系统过电压、人畜伤亡和旋转电机损坏等事故时有发生。同时, 高低压电磁环网应势而生^[2-3]。电磁环网的出现有其优点^[4], 但是缺点也是非常明显的, 比如当电磁环网中的高压线路出现故障断开后, 电网系统相互之间的联络阻抗会产生改变, 高电压网架的传输功率将会转移到低电压网架

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877135); 国网安徽省电力有限公司科技项目资助(B312G020000G)

上, 容易导致某些线路产生过载或者电网的电压发生变化, 进一步引发连锁故障的发生^[5]。另外, 目前的继电保护装置, 无论是主保护还是后备保护, 主要是依靠本地的电气量动作, 并不能估计断线对整个网络的影响。若不正常运行或故障情况导致线路从系统中切除, 在潮流转移的影响下, 可能会造成邻近线路过载保护动作, 甚至造成大面积停电事故^[6]。近些年发生的美国加州和中国湖南冰雪灾害停电即为典型案例。同时, 现阶段电网短路电流超标情况严重^[7], 电网分区运行是未来电网的发展趋势, 区间联络线的选取也涉及到断线的问题。因此, 快速搜寻受潮流转移影响较大的线路, 对于电网的实时监测、安全稳定运行、远期规划具有重大意义。

由于电网日趋复杂, 线路传输容量增大, 多回并列线路和重载运行线路增多。线路断线故障有可能会引起相邻线路零序过流保护的误动, 同时当故障线路切除后, 电网潮流将在网架中按新的方式分布, 如果将全网潮流都进行监控以找到受潮流转移影响较大的线路, 不仅费时费力, 且容易错过控制闭锁保护的最好时机。经本文定性、定量分析后发现, 对于网络结构固定以及元件参数不变的系统中, 只有少数几条支路所受的潮流转移的影响是比较大的, 且均包含于潮流转移的主要路径上^[8-9]。因此在事故发展初期, 快速识别出因潮流转移产生的具有过载风险的危险线路^[10], 对其详细分析并采取相应的控制措施, 这将极大减少故障发生时不必要的搜索, 减轻电网故障排查工作量, 有效阻止连锁跳闸及大范围停电事故的发生。但是, 为避免线路多选, 需考虑一种情况, 即有些线路虽受潮流转移导致功率骤升, 但由于其原始线路潮流较小, 因此加上潮流转移量后也不一定会造成线路过载。

对于输电线路切断之后引起电力系统潮流转移的问题, 专家学者已经有较多研究^[10-15]。文献[11]提出了一种基于前 k 最短路径的输电断面搜索方法, 但在 k 值固定的情况下易造成线路多选。文献[12-13]提出线路断开后系统的潮流转移大部分是集中在节点间电气距离比较短的路径当中, 将电网转化为拓扑结构后分别采用 Dijkstra 算法^[12-13]和分支界限法^[14]进行处理, 但随着电网规模的扩大, 存在实时搜索耗时过长、不能确定次短路径等不足。文献[14]用汽车接力模型算法搜索前 k 条最短路径, 可避免线路遗漏问题, 但未考虑电网的实时运行状态、线路初始潮流分布等问题。文献[15]将线路电抗值和线路负载率倒数两个数值作为边权值, 避免了只考虑网架结构以及忽略线路初始潮流的缺点, 但是在路径搜索时又出现了仅搜索最短路径, 易出

现线路遗漏的缺点。

为了弥补现有方法的不足, 笔者提出了一种基于改进 Dijkstra 算法的电网潮流转移下危险线路识别新方法。对 Dijkstra 算法进行了改进, 通过搜索两节点间的最短路径及次最短路径^[16], 有效地避免了漏线问题的发生, 通过最短路径及次短路径的搜索, 快速确定因某支路开路所产生的危险路径, 进一步快速定位故障位置。同时本文在网络拓扑图的权值选取时, 综合考虑了线路的电抗和网络的初始潮流分布情况, 引出线路综合阻抗的概念, 选取的线路综合阻抗可较好地反映网络结构和线路潮流分布。首先, 分析了线路发生故障断开后线路潮流转移主要波及的危险线路, 然后结合图论的相关知识, 将电网转化成拓扑图结构, 线路的综合阻抗作为线路的权值。随后运用改进 Dijkstra 算法对节点间的最短路、次最短路径进行搜索, 运用 PSD 电力系统分析软件^[17]进行潮流运算后确定危险线路集。最后利用 IEEE39 节点对文章所提的方法进行了验证。本文通过改进 Dijkstra 算法同时搜寻到最短路径及次短路径, 形成路径集, 受支路断线影响最为严重的线路皆在该路径集中。在断线故障发生后, 应用该算法可有效减小过载线路搜索范围, 缩短过载线路运行时间, 避免连锁故障的发生, 提高电网的安全稳定性。

1 电网转化为网络拓扑图

1.1 图论的相关知识

定义 1: 一个图^[18] G 是指一个二元组 $(V(G), E(G))$, 其中, $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 叫作顶点集, $E(G)$ 是 $V(G)$ 中的无序或有序的元素偶对, 即称为边集。用 $G = (V(G), E(G))$ 表示图, 简记 $G = (V, E)$ 。

定义 2: 如果对图 $G = (V(G), E(G))$ 的每一条边 e 均采用一个实数 $w(e)$ 进行定量赋值, 那么把 $w(e)$ 叫作边 e 的权。 G 连同边上的权称为赋权图^[19]。

加权邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 可定义为

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, & \text{若 } (v_i, v_j) \in E, \text{ 且 } w_{ij} \text{ 为其权} \\ \mathbf{0}, & i = j \\ \infty, & \text{若 } (v_i, v_j) \notin E \end{cases} \quad (1)$$

1.2 电网转化为拓扑图

文献[20]详述了电网转化成加权拓扑图的过程, 此处不再赘述。但受潮流转移导致线路过载的情况, 原有文献仅考虑电网的拓扑结构是远不准确的, 因为有些线路虽受潮流转移导致功率骤升, 若原始线路潮流较小, 发生故障后并不一定出现线路

过载。所以结合电力系统实际情况, 在电网转化为拓扑图的时候, 为保证算法的准确性, 本文同时将潮流转移量、线路功率传输裕度两个指标考虑在内, 通过阻抗修正系数将多电压等级的线路阻抗归算到同一电压级上。本文选取综合阻抗作为拓扑图的边权值, 综合阻抗公式如式(2)、式(3)所示。

$$Z'_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\varepsilon_{ij}} = \frac{Z_{ij}}{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{I}{I_N}, \varepsilon_2 = \frac{V_{ij}}{V_0} \quad (3)$$

式中: Z_{ij} 为线路初始阻抗; $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$, 其中 ε_1 为线路的饱和系数, 该值可反映潮流转移量和线路功率传输裕度, ε_2 为线路阻抗修正系数; I 为线路电流值; I_N 为线路额定电流值; V_0 为电压基准; V_{ij} 为 $i-j$ 线路的电压等级。

具体步骤描述如下:

- 1) 化简网架结构, 消去对地支路和电源支路, 将母线视为图的端点, 输电线路或变压器视为边;
- 2) 消去悬挂节点, 如图 1(b)即为将节点 n_1 消去后的网络图;
- 3) 引入阻抗修正系数和线路饱和系数, 选取 Z'_{ij} 为线路的边权值;
- 4) 形成加权邻接矩阵 \mathbf{W} , 若拓扑图存在 n 个顶点, 则 \mathbf{W} 为 $n \times n$ 阶对称阵。



图 1 消去节点 n_1

Fig. 1 Delete the node n_1

2 潮流转移路径分析

2.1 简单系统定性分析

首先进行如下假设: 不计网络的非线性元件; 线路开断前后, 认为系统出力和负荷不变。由线性网络叠加原理可知, 线路断开后的电网潮流, 等同于开断前电网的潮流加上开断后线路的潮流转移量^[21]。图 2(a)为原网络图, 在支路 1-2 断开后, 为计算开断后线路的潮流转移量, 将系统中电源与负荷移除, 用一个与原支路电流大小相等方向相反的电流源代替。经过变换之后得到的电力网络就是潮流转移部分的等值电力网络图, 如图 2(b)所示。

通过分析图 2(b)可知, 系统潮流转移量仅受图中唯一的电流源影响, 潮流转移遍布于由开断支路组成的每个回路上, 并且当回路的阻抗值越小, 回路电流的值越大。

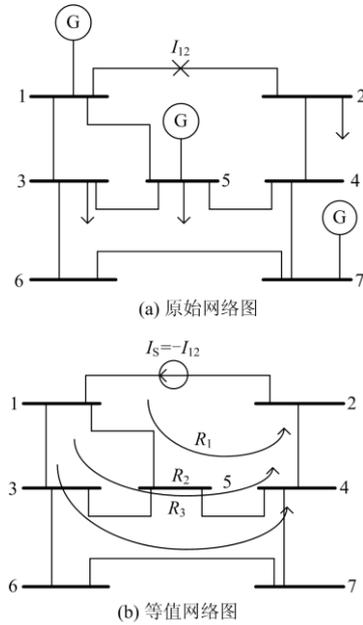


图 2 原网络图和等值网络图

Fig. 2 Original network graph and equivalent network graph

2.2 定量分析功率增量在电网中分布

结合网络直流模型与多端口网络理论的诺顿定理^[22], 对等效功率增量在整个网络中的分配情况进行定量计算。由于本文只关注输电线路的潮流有无越限情况的发生, 而对于电压越限的情况不予考虑, 所以仅仅分析节点的注入有功 ΔP_{ij} 以及 $-\Delta P_{ij}$ 在整个网络中的分配。在不考虑网络中线路的电阻以及线路的对地电容, 而且近似地将各节点的电压视作与基准电压值相等的假设条件下, 所要研究的系统可采用一个直流网络进行等价表征。当角度较小时, 可以认为 $\sin(\theta_m - \theta_n) = (\theta_m - \theta_n)$, 那么系统中任何两个节点 m 、 n 之间的功率 P_{mn} 可以表征为

$$P_{mn} = \frac{\theta_m - \theta_n}{X_{mn}} \quad (4)$$

式中: θ_m 、 θ_n 分别为节点 m 、 n 的相位角; X_{mn} 为线路 m 与 n 间的电抗。

把原网络中的支路电抗 X_{mn} 替换为直流电阻 r_{mn} , 电压相位角 θ_m 替换成直流网络中的电位 V_m , 故支路电流 I_{mn} 与有功功率 P_{mn} 是相互对应的, 即为

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_N}{r_{mn}} \quad (5)$$

本文对简单的七节点系统进行研究, 解析网络的功率增量在网络中的分布特征。如图 3 所示的七节点系统, 图中的数字代表阻抗值, 节点 $i-j$ 间连接的电流源是 I_0 , 从节点 i 到节点 j 之间有三条路径,

分别为 $R_1: j \rightarrow k \rightarrow i$, $R_2: j \rightarrow m \rightarrow k \rightarrow i$, $R_3: j \rightarrow n \rightarrow m \rightarrow k \rightarrow i$, 路径长度分别为 8、7、5。

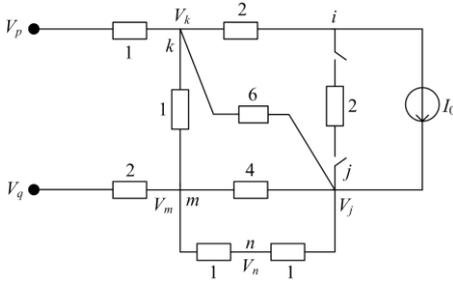


图3 七节点系统
Fig. 3 Seven-node system

根据直流电路的欧姆定律，可以求出系统中各个支路的电流大小，结果如表 1 所示。

表 1 注入电流在网络中的分布

Table 1 Distribution of injected current in the network

支路	电流	支路	电流
$j-m$	$0.24I_0$	$j-k$	$0.28I_0$
$j-n$	$0.48I_0$	$m-k$	$0.72I_0$
$n-m$	$0.48I_0$	$k-p$	0
$m-q$	0	$k-i$	I_0

分析图 3 和表 1 可以知道， R_3 是三条路径中最短的一个，组成该路径的三条支路所对应的电流值 ($I_m, I_{nm}, I_{mk}, I_{ki}$) 均比其他支路对应的电流值要大。用公式可以描述为

$$\min(I_i / I_s \mid i \in R_3) \geq \max(I_s / I_s \mid s \notin R_3) \quad (6)$$

根据式(6)，结合支路电流与支路的有功功率的相互对应关系可以知道，当等效有功增量是在节点 i 与 j 之间时，支路功率变化的最大值应该出现在这两个节点之间的最短路径上：

$$\min(\Delta P_i / I_s \mid i \in R_3) \geq \max(\Delta P_s / I_s \mid s \notin R_3) \quad (7)$$

3 基于改进 Dijkstra 算法的介绍

3.1 Dijkstra 算法在图论中的应用

因改进 Dijkstra 算法是在原 Dijkstra 算法基础上进行完善的，所以本文先对 Dijkstra 算法进行介绍。

Dijkstra 算法^[23-24]基本原理是：以起始点中心，遍历所有节点，每次迭代后，新扩展一个距离最短点，并更新顶点集 S ，在迭代过程中，用邻接矩阵存储图。迭代过程中不能出现负的边权值，否则会破坏已经更新的点的距离。在没有负权的情况下，Dijkstra 的时效性、稳定性都很好，可以达到很快的运算速度，目前在交通运输、土木工程等领域都已得到很好的应用。

在利用 Dijkstra 算法求加权图中从一点到其余

点的最短距离时，图 G 必须为赋权图且权值不能为负值，算法执行过程中，对源点到访问节点的最短路进行记录或更新，直至搜索到目标点为止。

下面用伪代码的方式介绍 Dijkstra 算法的具体步骤：

Proceduce Dijkstra(G)

For $i:=1$ to n

$L(v_i)=\infty$

$L(a):=0$

$S:=\phi$

While $z \in S$

Begin

$u:=$ 不属于 S 的 $L(u)$ 最小的一个顶点

$S:=S \cup \{u\}$

For 所有不属于 S 的顶点 v

If $L(u)+\omega(u,v) < L(v)$

Then $L(v)=L(u)+\omega(u,v)$

End { $L(z)$ 是从 a 到 z 的最短路的长度}

3.2 改进 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法只可求出一个节点到其余节点的最短路径，但在寻找潮流转移下危险线路的过程中，为确保包含有全部的危险路径，可能要搜索网络中的次短线路。因此，改进 Dijkstra 算法，使改进后的方法可以同时搜寻到最短路径及次短路径，这样便可弥补文献[25]出现的线路漏选问题。

改进 Dijkstra 算法是对原方法的延伸，目的是增加对次短路径的搜寻。次短路径为由原点出发，经过最短路径的某一邻近点到达终点的一条路径。求取次短路径的思路为：应用 Dijkstra 算法求出最短路径，随后找出这些路径的所有邻近点，便可以通过计算找出次短路径，利用 D_2 表示其距离，如式(8)所示。

$$D_2 = \min_{i \in V_n, j \in V_1} (d_i + d_{ij} + D_1 - d_j) \quad (8)$$

式中： V_n 为最短路邻近点集； V_1 为最短路上的节点集合； D_1 表示第一条最短路径的距离。关于这个公式的详细证明过程在此不作赘述，过程可见文献[26]。

改进 Dijkstra 算法的实现过程如下：

1) 将所要研究的电力网络等效转化为加权拓扑结构图；

2) 利用 Dijkstra 算法求出最短路径；

3) 找出最短路径邻近点，并存入数组 Neighbours；

4) 依次计算经过邻近点的路径长度，并对其路径进行编号存入数组 TempPaths，长度存入数组 TempDists；

5) 将数组 TempDists 中的距离数值进行排序，

找出最小值及对应的路径编号, 即为次短路径。

算法的应用如下:

图 4 为无向网络图, 节点为 $v_i (i=1, 2, \dots, 17)$, 权重已标于线路上, 黑色粗线表示节点 1-16 的最短路径, 灰色点表示最短路径的邻近点。

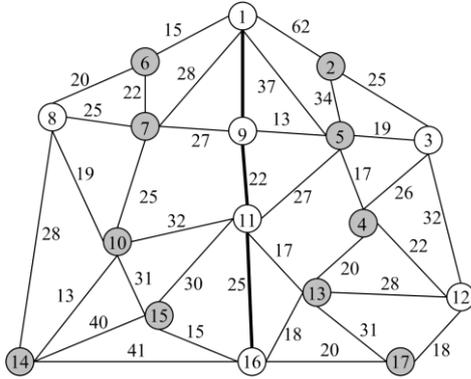


图 4 网络图

Fig. 4 Network diagram

依据本文算法产生的邻近点路径有 1-5-11-16, 长度为 89; 1-5-9-11-16, 长度为 97; 17-9-11-16, 长度为 102; 1-9-11-13-11-16, 长度为 108; 1-9-11-13-16, 长度为 84; 1-7-10-11-16, 长度为 110; 1-9-11-15-16, 长度为 94; 1-9-11-15-11-16, 长度为 134; 1-6-8-14-16, 长度为 104; 1-5-4-12-17-16, 长度为 114。其中路径 1-9-11-13-16 最短, 是从节点 1 到节点 16 的次短路径, 黑色粗线表示最短路径和次短路径。

4 潮流转移危险线路的确定

危险输电线路定义^[27]为: 电力系统中的某条线路在故障被切断之后, 与被切断线路联系较为紧密并受故障潮流转移影响比较大的线路。

开断线路 L_i 的有功潮流分布系数 $\lambda_j^{(i)}$ 如式(9)所示。

$$\lambda_j^{(i)} = \frac{P_j^{(i)} - P_j^{(0)}}{P_i^{(0)}} \quad (9)$$

式中, $\lambda_j^{(i)}$ 表征线路 L_j 在 L_i 断开后受其潮流转移影响的严重程度。应用 PSD 电力系统分析软件求取公式(9)中各值, 其中, $P_j^{(0)}$ 和 $P_i^{(0)}$ 分别代表未发生故障时线路 L_j 和线路 L_i 的有功潮流, $P_j^{(i)}$ 为发生故障后线路 L_j 的有功潮流数值。 $\lambda_j^{(i)}$ 值越大, 表示线路 L_i 断开后带给 L_j 的影响也就越大。本文通过改进 Dijkstra 算法进行某支路 L_i 断线后最短路径及次短路径的识别, 通过式(9)求出开断线路 L_i 对应的有功潮流分布系数 $\lambda_j^{(i)}$ 。对最短路径和次短路径中的线

路逐条进行相关计算, 得到若干分布系数值, 一般认为 $\lambda > (0.2 \sim 0.3)$ 的线路就是危险线路。

5 算例分析

5.1 IEEE39 节点系统算例

IEEE39 节点系统接线如图 5 所示, 该系统共有 39 个节点, 46 条边, 其中 10 个发电机节点, 1 个负荷节点, 12 个变压器节点。

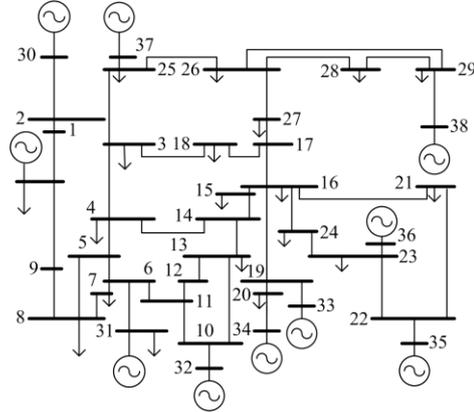


图 5 IEEE39 节点系统接线

Fig. 5 Wiring of IEEE39 node system

5.2 危险线路识别及仿真分析

采用 IEEE39 节点系统进行分析:

- 1) 建立 IEEE39 节点系统的无权网络模型。
- 2) 根据电网的拓扑结构建立以综合阻抗为边权值的加权电网模型。
- 3) 应用由 C++ 编程的改进 Dijkstra 算法计算两节点之间的最短路径和次最短路径。
- 4) 运用 PSD 电力系统分析软件进行线路潮流的运算, 计算出有功潮流分布系数较大的线路, 即为受潮流转移影响较为严重的线路。

基于加权网络拓扑结构图, 得到线路 4-14 断开后, 开断线路所对应的最短路径为 4-5-6-11-10-13-14 以及次短路径为 4-3-18-17-16-15-1。选择出 λ 较大的 8 个数值如表 2 所示。

表 2 危险线路识别

Table 2 Identification of dangerous lines

线路	4-5	6-11	11-10	10-13
λ	0.658	0.647	0.563	0.563
线路	3-18	18-17	17-16	15-14
λ	0.395	0.396	0.455	0.457

由表 2 可知, 线路 4-14 断开后, 最短路径对应线路 5-6、13-14 所对应的 λ 值并未进入 λ 较大的前 8 位, 即小于次短路径中线路 17-16、15-14。所得

结果再次证明了仅将最短路径所对应的线路作为危险线路的判断是不正确的。

6 结论

针对过负荷和线路故障引起的系统危险线路过载导致的连锁故障反应。本文综合考虑了潮流转移量、线路功率传输裕度两个指标,选取综合阻抗为网络拓扑图的边权值;定量和定性分析了切除过载线路后网络中潮流转移的特征,提出了基于改进 Dijkstra 算法的电网潮流转移下危险线路识别的新方法,该方法无需进行大量的数学运算,通过编程进行路径的搜索,并且改进后算法可同时求取最短路径和次短路径,避免了单一搜索最短路径造成漏线问题;应用 PSD 电力系统分析软件进行有功潮流分布系数的求取,路径中所包含的有功潮流转移系数较大线路即为危险线路。最后应用 IEEE39 节点系统展开仿真分析,验证了文中所述方法是有效的。

参考文献

- [1] 万信书,方连航,梁钰,等.基于三相电流幅值分析的小电流单相接地故障区段定位方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):49-57.
WAN Xinshu, FANG Lianhang, LIANG Yu, et al. Method of fault section location for the small current single-phase-to-ground fault based on the amplitude analysis of three-phase current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 49-57.
- [2] 何培颖,房鑫炎.基于聚类算法的关键输电断面快速搜索[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):97-101.
HE Peiying, FANG Xinyan. Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 97-101.
- [3] 杨溢,郭志忠.含电磁环网的输配电网全局动态潮流主从分裂算法[J].电力系统自动化,2019,43(14):143-150.
YANG Yi, GUO Zhizhong. Master-slave splitting algorithm of global dynamic power flow for transmission and distribution networks with electromagnetic loop networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 143-150.
- [4] 董张卓,刘魁,张倍倍.含分布式电源配电网通用故障电流计算方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(18):161-168.
DONG Zhangzhuo, LIU Kui, ZHANG Beibei. A general fault current calculation method for distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 161-168.
- [5] 于群,王琪,曹娜.基于异质元胞自动机的互联电网连锁故障控制措施[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):118-132.
YU Qun, WANG Qi, CAO Na. A control measure for interconnection power grid cascading failure based on heterogeneous cellular automata[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 118-132.
- [6] 孙歌,刘俊,赵彬,等.基于模糊熵权的黑启动方案评估方法[J].上海电力大学学报,2020,36(5):466-470,499.
SUN Ge, LIU Jun, ZHAO Bin, et al. Black-start scheme evaluation method based on fuzzy entropy weight[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2020, 36(5): 466-470, 499.
- [7] 徐玉琴,李文帅,赵蓓蓓.基于改进汽车接力模型的电网分区方法[J].电网技术,2016,40(11):3546-3551.
XU Yuqin, LI Wenshuai, ZHAO Beibei. Power network partitioning method based on improved automotive relay[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3546-3551.
- [8] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 323-336. DOI: 10.1186/s41601-019-0140-6.
- [9] 龚锦霞,郑元黎.基于内点法的含风电场电力系统随机最优潮流[J].上海电力学院学报,2019,35(6):518-524.
GONG Jinxia, ZHENG Yuanli. Improved interior point method for stochastic optimal power flow including wind Power[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(6): 518-524.
- [10] 王辉,梁苗,朱梦博.基于单纯形-最短路径射线追踪的微震震源混合定位算法[J].中国矿业,2020,29(10):110-115,121.
WANG Hui, LIANG Miao, ZHU Mengbo. A hybrid microseismic source location algorithm based on simplex and shortest path ray tracing[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(10): 110-115, 121.
- [11] 王增平,李刚,任建文.基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J].电工技术学报,2012,27(4):193-201.
WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-201.
- [12] 赵慧梅,宋琳莉.基于图论的潮流转移快速搜索[J].水电站设计,2009,25(2):40-45.
ZHAO Huimei, SONG Linli. A fast search algorithm for flow transferring based on graph theory[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2009, 25(2): 40-45.
- [13] 倪宏坤,徐玉琴.基于动态规划原理分支界限算法的

- 关键输电断面搜索方法[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2009, 36(4): 11-15.
- NI Hongkun, XU Yuqin. Fast search for the key transmission section based on dynamic-programming principle[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2009, 36(4): 11-15.
- [14] 郑曙光, 刘观起, 刘献超. 基于汽车接力的潮流转移快速搜索算法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 34-40.
- ZHENG Shuguang, LIU Guanqi, LIU Xianchao. A fast search algorithm for flow transferring based on automotive relay[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(15): 34-40.
- [15] 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.
- [16] 谢建平, 陈治亚, 邓连波, 等. 改进 Dijkstra 算法在大型城市轨道交通网计价系统中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 109-116.
- XIE Jianping, CHEN Zhiya, DENG Lianbo, et al. Application of improved Dijkstra algorithm in large urban rail transit network valuation system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(1): 109-116.
- [17] 廖国栋, 谢欣涛, 侯益灵, 等. 特高压接入湖南电网后 500 kV 母线三相短路电流超标问题分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 747-753.
- LIAO Guodong, XIE Xintao, HOU Yiling, et al. Analysis on the problems of three-phase short-circuit current over-limited of 500 kV bus when UHV connected to Hunan power grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 747-753.
- [18] 刘志颖, 缪希仁, 陈静, 等. 电力架空线路巡检可见光图像智能处理研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 1057-1069.
- LIU Zhiying, MIU Xiren, CHEN Jing, et al. Review of visible image intelligent processing for transmission line inspection[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1057-1069.
- [19] 靳现林, 赵迎春, 吴刚. 考虑分布式光伏和电动汽车接入的配电网空间负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 10-19.
- JIN Xianlin, ZHAO Yingchun, WU Gang. Space load forecasting of distribution network considering distributed PV and electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 10-19.
- [20] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [21] 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.
- [22] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 28-33.
- PAN Wei, LIU Wenyong, YANG Yihan. Point estimate method for probabilistically optimal power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 28-33.
- [23] ILIE A, ȘTEFĂNICĂ C, DINU O, et al. Development of non-motorized infrastructure network in Oradea City using Dijkstra algorithm in ArcGIS[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015, 809-810: 1067-1072.
- [24] 何培颖, 房鑫炎. 基于聚类算法的关键输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 97-101.
- HE Peiyong, FANG Xinyan. A search algorithm for transmission section based on affinity propagation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 97-101.
- [25] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
- ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.
- [26] 柴登峰, 张登荣. 前 N 条最短路径问题的算法及应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2002, 36(5): 531-534.
- CHAI Dengfeng, ZHANG Dengrong. Algorithm and its application to N shortest paths problem[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2002, 36(5): 531-534.
- [27] XIAO Q. Evaluating correlation coefficient for Nataf transformation[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 37: 1-6.

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-04-08

作者简介:

梁小华(1967—), 男, 学士, 高级工程师, 从事电力营销管理;

杨欢红(1965—), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统优化调度、控制, 电力系统安全运行, 智能电网相关技术。E-mail: yang196407@126.com

(编辑 葛艳娜)