

DOI: 10.7667/PSPC170237

基于 Dijkstra 算法的电网分区方法研究

李通, 薛峰

(广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523000)

摘要: 随着高电压网架的发展, 解开电磁环网, 进行电网分层分区运行是未来电网的发展趋势。电网分区运行可有效缓解目前网架结构错综复杂和短路电流超标严重等问题。提出了一种基于 Dijkstra 算法的电网分区新方法。首先, 结合图论的有关知识将电力网络转换成网络拓扑图, 将网架中的站点和线路阻抗与拓扑图中节点和权值相对应。然后, 利用 Dijkstra 算法寻找距离初始点最短路在规定距离内的站点, 将符合要求的站点与初始点划分为同一分区。以 500 kV/220 kV 电网为例, 由于未来电网的发展趋势为高电压等级网架起支撑作用, 区间通过联络线进行连接, 故选取 500 kV 站点为初始点, 最终确定以 500 kV 站点为支撑的若干分区。所提出的方法可通过编程进行快速运算, 无需多次求解。最后, 以 IEEE30 节点系统和某地区实际电网为例, 验证了所提方法的可行性和实用性。
关键词: 电网分区; 短路电流超标; 主网架; Dijkstra 算法

Power network partitioning method based on Dijkstra algorithm

LI Tong, XUE Feng

(Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Dongguan 523000, China)

Abstract: With the development of the high voltage grid, it is the trend of the future power grid to unlock the electromagnetic loop network and to divide the grid. Grid division operation can effectively alleviate the phenomenon of complex grid structure and exceeded short-circuit current. A new method for power grid division based on Dijkstra algorithm is presented. Firstly, based on the knowledge of graph theory, the power network is transformed into the network topology, with the site and line impedance in the grid corresponding to the nodes and weights in the topology graph. Secondly, it finds the sites of which the shortest path from the initial site to the site within the specified range by Dijkstra algorithm. Taking 500 kV/220 kV power grid as an example, due to the development trend of the future power grid supplying high voltage level network with supporting role, the intervals are connected through the tie line, so 500 kV sites are selected as the initial station and some grid partition supported by 500 kV station can be determined. The proposed method can be calculated fast by programming without repeatedly solving. Finally, an IEEE30 node system and a practical power grid in a certain region are taken as examples, which demonstrates the effectiveness and practicability of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Limited Liability Company (No. 031900KK52160023).

Key words: network partition; short-circuit current exceeding standard; main grid; Dijkstra algorithm

0 引言

随着国民经济的发展, 用电需求逐年增加, 当原有网架结构不能满足新的负荷输送要求时, 高电压等级网架出现了。在新的电压等级出现早期, 网架结构并不完善, 为保证供电的可靠性, 需与低电压网架并列运行, 电磁环网^[1]因此产生。电磁环网在网架结构完善、优化的过程中优点是非常明显

的, 如增加系统的安全稳定性、保证输送容量和减小备用等。但是随着网架结构的完善, 电磁环网的缺点日益显现^[2-4], 电网合环运行, 缩小了站点间的电气距离, 使短路电流增大, 甚至超过断路器的遮断容量。网架结构错综复杂, 不利于调度管理, 故障时易于造成连锁反应, 严重威胁电网的安全运行。同时, 高电压等级网架与低电压等级网架并联运行, 为避免高电压网架故障时潮流转移过大, 造成低电压等级网架过载的情况, 高电压等级网架并不能充分发挥其应有的输送能力。随着网架的不断发展, 上述缺点日益明显, 因此, 在电网发展到一定阶段

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (031900KK52160023)

时, 解开电磁环网, 实现电网分层分区运行是未来电网的发展趋势。

分层分区概念是在电网逐渐发展完善的过程中形成的。分层分区是指以高电压等级网架为骨干网架, 形成一个基本供需平衡的区域, 各分区间通过联络线进行连接, 既保证了各分区间之间的联系, 又可在发生严重故障时切除联络线, 避免连锁故障的发生。分层分区运行可以解决上述电磁环网带来的短路电流超标、系统稳定性、运行经济性和供电可靠性等问题。分层分区的上述优点与电磁环网的缺点相对应, 但同时分层分区也有其缺点^[5-6]: 分区完成后, 不同分区的低电压等级网架的联系被削弱, 当高压网架发生故障时, 将会造成大面积的功率缺额, 严重时可能会威胁电网的安全运行。同时由于区间联络线所能输送的功率有限, 当某一分区出现功率缺额时, 分区间功率补给可能需要较长时间。针对以上缺点, 应综合考虑当地网架的发展状况, 逐步进行分层分区运行。

现已有较多针对解环限流方面进行研究的文献。文献[7]对城市电磁环网解环问题进行了研究, 提出了主动处理电磁环网的思想 and 指导原则, 分析了合理确定解环点和解环时机的重要性。文献[8]提出了一种限制短路电流的优化算法, 该算法研究了断开线路对多个超标站点的影响, 通过对网架调整的灵敏度进行分析, 寻求整体最优的限流效果。文献[9]考虑到限流与提高系统稳定性间存在着相互制约的关系, 应用混合粒子群优化算法得到最优的限流方案集。文献[10]根据限流运行方式综合决策模型, 选取加权短路电流灵敏度系数较大的几种断线组合, 进而确定最优开断组合。文献[8-10]所提出的方法均可有效地缓解短路电流超标的现象, 提高系统的安全稳定性, 但所提方法未考虑网架结构优化、分层分区的问题, 导致网架结构错综复杂、管理调度不便等问题并未得到解决, 对电网长远的发展规划并未起到积极的作用。文献[11]利用社团发现算法对实际电网进行新的区间划分, 借助社团结构来分析网架特征, 此方法能很好地体现电网特征。文献[12]较好地地将图论有关知识应用到电网分区中, 打破了原有依靠手动运算的局限, 提出了一种以 500 kV 主变负载尽可能均衡为目标的自动电网分区运算方法。文献[13]提出了一种基于改进汽车接力模型的电网分区方法, 运用该方法寻找距离初始站点电气距离符合要求的站点, 划分为同一分区, 各分区间通过联络线进行连接, 该方法还有可自动分区的优点。传统的电网分区对网架结构的关注较少, 主要依靠工作经验、地理区域而成, 随着

网架结构的不断扩大和完善, 如若网架结构发生变化后, 原有分区则不能很好地反映实际网架特征, 则会出现网架结构复杂、调度不便、短路电流超标和易于发生连锁故障等一系列问题。

电网分区的目标为增大电气距离, 降低短路电流, 梳理网架结构, 方便运行调度^[14]。分区完成后, 分区内部联系较为紧密, 分区间通过联络线进行连接。针对电网分区的目标, 本文以 500 kV 网架为主干网架, 基于 Dijkstra 算法提出了一种新的电网分区方法。本文所提方法与以往分区方法相比, 充分考虑了电网的实际结构, 不仅可有效缓解短路电流超标, 梳理网架结构, 还可通过编程快速、简单、准确地进行分区, 从而达到优化网络布局、降低短路电流的目的。同时本文采用了宽度优先搜索算法的代表算法——Dijkstra 算法^[15-17], 主要特点是以起始点为中心向外层扩展, 直到扩展到终点为止。在没有负权值的情况下, Dijkstra 的时效性、稳定性都很好, 可以达到很快的运算速度, 目前在信息通信、土木工程等领域都已得到很好的应用。首先把电力网络转化为系统拓扑图, 然后采用 Dijkstra 算法, 寻找距离初始点电气距离符合要求的若干个站点, 将符合要求的站点与初始点划入同一分区, 同时为保证供电的可靠性, 将两个相邻的 500 kV 站归为同一分区。最后以 IEEE30 节点标准算例和某地区实际电网为例, 验证了所提方法的可行性和实用性。

1 图论和最短路问题的相关知识

1.1 图论相关概念

图^[18]是表示物件与物件关系的数学对象, 是图论的主要研究对象。图的用途取决于将图中的点和映射关系反映到现实生活中的哪个方面, 例如点可以对应为城市, 边可对应城市间的公路长度, 这就是一张城市交通网络图。

定义 1 一个图 G 是指一个二元组 $(V(G), E(G))$, 其中: $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是非空有限集, 称为顶点集 (Vertices Set), 其中元素称为图 G 的顶点。 $E(G)$ 是顶点集 $V(G)$ 中的无序或有序的元素偶对 (v_i, v_j) 组成的集合, 即称为边集 (Edges set), 其中元素称为边。用 $G = (V(G), E(G))$ 表示图, 简记 $G = (V, E)$, 也用 $v_i v_j$ 来表示边 (v_i, v_j) , 亦可写成 $V(G)$ 和 $E(G)$ 。对应于图 1, 设 $G = (V(G), E(G))$, 其中: $V(G) = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$, $e_1 = v_1 v_2$, $e_2 = v_2 v_3$, $e_3 = v_2 v_3$, $e_4 = v_3 v_4$, $e_5 = v_2 v_4$, $e_6 = v_4 v_4$ 。

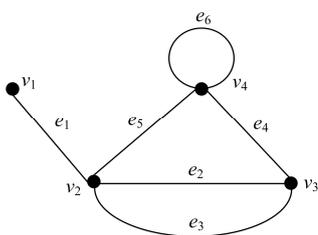


图 1 图 G

Fig. 1 Figure G

定义 2: 若图 $G = (V(G), E(G))$ 的每一条边 e 都赋以一个实数 $w(e)$, 称 $w(e)$ 为边 e 的权, 其中边的权值可以为距离、质量和线路阻抗等数值。 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

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

如图 2 所示的拓扑结构图, 线路电抗已标于图上。其中 $V = [1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6]^T$, 则所求的加权邻接

矩阵为 $A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 4 & 5 & \infty \\ 3 & 0 & 7 & \infty & 8 \\ 4 & 7 & 0 & 6 & 4 \\ 5 & \infty & 6 & 0 & \infty \\ \infty & 8 & 4 & \infty & 0 \end{bmatrix}$ 。

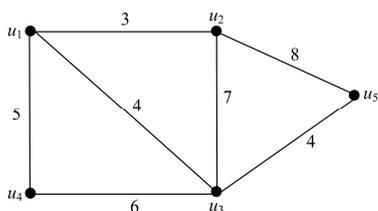


图 2 加权图

Fig. 2 Weighted graph

1.2 最短路的问题

在加权图中, 找出两个指定点(一般为不相邻点)之间的最短路径, 通常将其称为最短路问题^[20]。最短路问题是图论应用中的典型问题, 如货物配送问题、管网系统布线问题、城市道路建设等很多实际问题, 均可通过最短路问题模型得到正确的答案。解决最短路问题存在几个不同的算法^[21], 如: Dijkstra 算法、Floyd 算法和 Warshall 算法。其中 Dijkstra 算法主要是求出任意两顶点之间的最短路。考虑到本文自动生成策略的特点及需要, 采用 Dijkstra 算法计算网络中的最短路问题。

Dijkstra 算法^[22]是荷兰计算机科学教授 Dijkstra

在 1959 年发现的一个算法。其基本原理是: 以起始点为中心, 遍历所有节点, 每次迭代后, 新扩展一个距离最短路, 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。

Dijkstra 算法: 求加权图中从一点到其余点的最短距离, 其中图 G 必须为赋权图且其权值不能为负值。对每个顶点, 定义两个标记 $(l(v), z(v))$, 算法的过程就是在每一步改进这两个标记, 最终使 $l(v)$ 为从顶点 u_0 到 v 的最短路的权。其中: $l(v)$ 表示从顶点 u_0 到 v 的一条路的权; $z(v)$ 表示 v 的先驱点, 用以确定最短路的路线; S 表示具有永久标号的顶点集。

下面通过伪代码和实例两种方式分别介绍 Dijkstra 算法的具体步骤。

1) 伪代码^[23]的方式

$\{G$ 带有顶点 $a = v_1, \dots, v_n$ 和权值 $w(v_i, v_j)$
若 $\{v_i, v_j\}$ 不是 G 中的边, 则 $w(v_i, v_j) = \infty$

For $i: 1$ to n

$L(v_i) := \infty$

$L(a) := 0$

$S := \emptyset$

{初始化标记 a 的标记为 0, 其余的节点标 ∞ , S 为空集}

While $z \notin S$

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 $L(u) + \omega(u, v) \leq L(v)$

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

{这样就给 S 中添加了新的最小点}

End { $L(v)$ 是从 a 到 z 的最短路长度 }

2) 通过一个实例来说明如何应用 Dijkstra 算法计算顶点 a 到 z 两点之间的最短路长度, 实例的加权图如图 3 所示, 具体的迭代过程参见表 1。

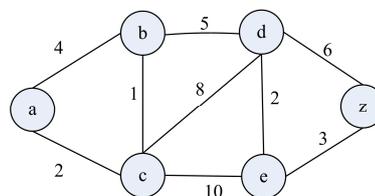


图 3 加权图

Fig. 3 Weighted graph

表 1 实例迭代过程

Table 1 Instance iteration process

0 次迭代 (初始化)	$L(a) = 0$ $L(b) = L(c) = L(d) = L(e) = L(z) = \infty$ $S = \phi$
一次迭代	$U = a, s = \{a\}$ $L(a) + \omega(a, b) = 0 + 4 = 4 < L(b)$ $L(a) + \omega(a, c) = 0 + 2 = 2 < L(c)$ $L(a) + \omega(a, d) = 0 + \infty = \infty$ $L(a) + \omega(a, e) = 0 + \infty = \infty$ $L(a) + \omega(a, z) = 0 + \infty = \infty$
	$L(b) = 4, L(c) = 2, L(d) = L(e) = L(z) = \infty$
二次迭代	$U = c, s = \{a, c\}$ $L(c) + \omega(c, b) = 2 + 1 = 3 < L(b)$ $L(c) + \omega(c, d) = 2 + 8 = 10 < L(d)$ $L(c) + \omega(c, e) = 2 + 10 = 12 < L(e)$ $L(c) + \omega(c, z) = 2 + \infty = \infty$
	$L(b) = 3, L(d) = 10, L(e) = 12, L(z) = \infty$
三次迭代	$U = b, s = \{a, c, b\}$ $L(b) + \omega(b, d) = 3 + 5 = 8 < L(d)$ $L(b) + \omega(b, e) = 3 + \infty = \infty$ $L(b) + \omega(b, z) = 3 + \infty = \infty$
	$L(d) = 8, L(e) = 12, L(z) = \infty$
四次迭代	$U = d, s = \{a, c, b, d\}$ $L(d) + \omega(d, e) = 8 + 2 = 10 < L(e)$ $L(d) + \omega(d, z) = 8 + 6 = 14 < L(z)$
	$L(e) = 10, L(z) = 14$
五次迭代	$U = e, s = \{a, c, b, d, e\}$ $L(e) + \omega(e, z) = 10 + 3 = 13 < L(z)$
	$L(z) = 13$
结束	$U = z, s = \{a, c, b, d, e, z\}$ 从 a 到 z 的最短路的长度为 13, 最短路为 $\{a, c, b, d, e, z\}$

通过表 1 可知, 经过 5 次迭代后循环结束, 最终可确定图 3 中节点 a 到节点 z 的最短距离为 13, 最短路径为 $\{a, c, b, d, e, z\}$ 。将 Dijkstra 算法应用到电力系统中, 在确定起始点后, 可求出起始点到指定站点的最短距离以及最短路径所经过的其他站点。当边的权重对应线路或变压器的阻抗时, 边的权重值则可反映站点间电气距离的大小。本文首次将 Dijkstra 算法模型应用到电网分区中, 用以寻找距离起始点符合规定电气距离的其他站点, 从而将电气距离较近的站点划分为同一分区。

2 Dijkstra 算法在电网分区中的应用

2.1 电网分区理念

随着高一级网架的不断发展, 地区电网将逐步进行分区运行。目前电网分区尚未有明确的指导原则, 但总的目标为以高电压等级网架为支撑网架, 分区内部连接紧密, 分区间通过联络线起到连接作用, 既可保证区间的连接又可有效避免连锁故障的发生^[24]。本文以 500 kV 网架为支撑网架, 为保证供电的可靠性, 每个分区保证有两个 500 kV 站, 若不能满足要求, 则实行弱开环方式, 相邻区间互为备用以保证供电可靠性。

2.2 基于 Dijkstra 算法对电网进行分区的过程

1) 应用 PSD 电力系统分析软件绘制网络拓扑图, 消去悬挂节点, 网络拓扑图中的顶点对应实际网架中的电厂、变电站, 节点间连线对应实际网架中变压器、输电线路和等值线路, 线路的权值对应实际网架中变压器、输电线路和等值线路的阻抗值。

2) 选取作为起始点的各 500 kV 站点, 确定规定的值 X_m , 按照 Dijkstra 算法, 求图中起始点到特定的节点的最短路, 进而判断其距离 500 kV 站点的电气距离是否在规定值 X_m 内。

3) 输出各起始点下满足电气距离要求的站点。

4) Dijkstra 算法中以单个顶点发起搜索形成一个分区, 但实际电网分区中, 要考虑单个 500 kV 站故障另外 500 kV 站为备用的情况, 所以以两个较近的 500 kV 站点为起始点形成的分区要合并为一个电网分区。

另注意: 截止电抗 X_m 的数值应考虑尽量大些, 以确保网架中所有站点都归入分区中, 但是具体数值应根据网架具体结构来确定, 确定的原则是令所有子站点都能找到其所在的以 500 kV 站点为起始点的电网分区, 使分区过程中不存在孤立的节点。同时截止电抗 X_m 数值较大也会造成某一子站同时进入两个以 500 kV 站点为起始点的分区中, 这种情况下, 选择将该子站划分至电气距离较近的 500 kV 站点确定的分区中; 电网分区完成后, 区间通过联络线进行连接, 一方面要考虑梳理网架结构, 为 220 kV 站点寻求较近的电源支撑点, 断开跨度较大的线路, 同时断线过程也应避免线路潮流转移造成的线路过载等问题。

3 算例分析

3.1 IEEE30 节点系统

采用 IEEE30 节点系统对 Dijkstra 算法的步骤进行验算, 消去悬挂节点, 确定网络拓扑结构如图 4

所示, 其中选取的起始点为 4、15、22、28 节点, 线路电抗代替边长度。因 IEEE30 节点系统不是实际电网, 因此不考虑互为备用的情况, 只是应用 Dijkstra 算法对分区的步骤进行验证。分区后的结果如图 5 所示。

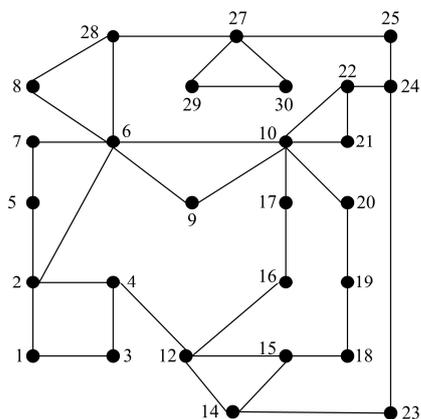


图 4 网络拓扑图

Fig. 4 Network topology

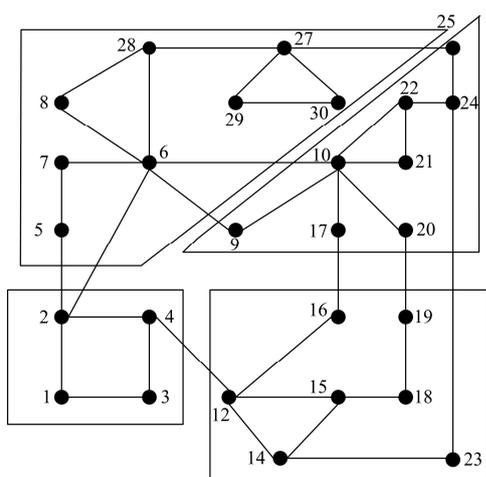


图 5 分区后的结构图

Fig. 5 Structure diagram of network partition

结论: 按地理位置进行分区划分时, 发现 5 节点距离 4 节点较 5 节点距离 28 节点更近, 但是按 Dijkstra 算法进行计算后发现, 5 节点与 28 节点的电气距离更短, 电网分区时, 应将 5 节点归入 28 节点所确定的分区中。在电网的实际架构中, 节点数目较多, 基于 Dijkstra 算法的电网分区方法可以有效地将电气联系紧密的站点划分为同一分区。

3.2 某实际地区电网

本文选取河北某地区电网进行分区规划, 消去悬挂节点后得到如图 6 所示的拓扑结构图。应用 PSD-SCCPC 电力系统短路电程序进行仿真分析, 得到短路电流超标的站点有 3 个, 接近断路器遮断容

量 50 kA 的站点有 3 个, 分别为 HY220 kV、AZ220 kV、TPZ220 kV 和 TBZ220 kV、ZDZ220 kV、YYL220 kV, 短路电流大小分别为 59.365 kA、54.473 kA、51.648 kA 和 49.633 kA、47.532 kA、47.434 kA。

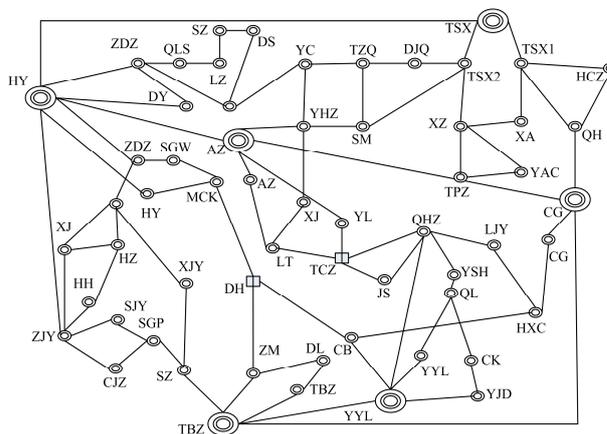


图 6 分区前电网结构图

Fig. 6 Power grid structure diagram before partition

应用基于 Dijkstra 算法的电网分区方法进行分区规划, 按所编程序进行搜索, 找到分别以 HY500 kV、AZ500 kV、TBZ500 kV、YYL500 kV、TSX500 kV 为初始点的分区, 随着靠近 TSX500 kV 站的 CG 500 kV 站的建成, 可将靠近 TSX500 kV 站的部分 220 kV 线路断开, 由新建的 CG500 kV 站作为供电来源, 届时该地区可分为 3 个分区。

分区完成后网架结构清晰, 各分区间通过联络线进行连接, 区间联络线主要是依据线路潮流判断, 选取断开潮流较大的线路, 保留潮流较小的线路, 且断线后应用 PSD 电力系统分析软件进行校验, 以确保不存在因潮流转移而造成线路过载的情况。分区后如图 7 所示。

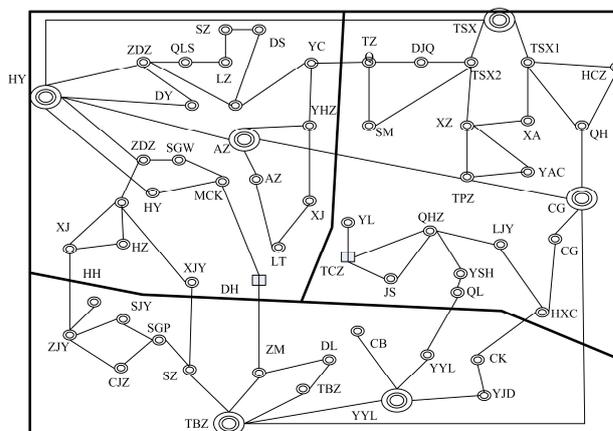


图 7 分区后电网结构图

Fig. 7 Power grid structure diagram after partition

选取部分站点进行分区前后短路电流情况的对比,对比发现站点的短路电流均下降至断路器遮断容量范围内,如表2所示。

表2 分区前后短路电流对比

Table 2 Comparison of short-circuit current before/after partition

站点名称	before/after partition		
	断路器遮断容量/MVA	三相短路电流/kA	分区后短路电流/kA
HY220 kV	50	59.365	47.658
AZ220 kV	50	54.473	47.641
TPZ220 kV	50	51.648	44.743
TBZ220 kV	50	49.633	45.754
ZDZ220 kV	50	47.532	43.245
YYL220 kV	50	47.434	43.744
GS220 kV	50	45.753	41.737
JK220 kV	50	45.795	43.639
YN220 kV	50	44.673	41.466
JSJ220 kV	50	43.685	41.757
LG220 kV	50	43.434	40.636
HY500 kV	63	54.467	47.868
YYL500 kV	63	51.456	40.936

结论:该地区整体短路电流较高,原有短路电流超标的站点3个,短路电流接近遮断容量的站点较多。应用基于Dijkstra算法的电网分区方法进行分区完成后,短路电流均下降至断路器遮断容量以下,且整体短路电流水平降低,达到了整体较优的效果。同时,电网进行分区后,区间通过联络线进行连接,网架结构清晰,更加便于调度管理。随着网架结构的不断发展扩大,此分区方法仍有很好的适用性。

4 结语

电磁环网伴随着电网的发展而存在,但随着网架的发展完善,电磁环网的弊端逐渐显现,如造成电气距离减小、短路电流超标、运行调度不便、网架结构复杂和连锁故障易于发生等问题。本文为解决上述问题,从电网分区角度出发,提出了一种基于Dijkstra算法的电网分区新方法。该方法通过编程可快速进行路径搜索,找到距离起始点电气距离符合要求的站点,根据电气距离进行区间划分。应用IEEE30节点对Dijkstra算法模型步骤进行验算,证明该算法的可行性。最后,利用河北某地区电网进行实例仿真分析,应用PSD电力系统分析软件进行短路电流和潮流的计算,所得结论验证了该方法对短路电流降低和网架结构优化有很好的适用性。

参考文献

- [1] 白宏坤,李干生.关于电磁环网弱开环方式的探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(2):60-63.
BAI Hongkun, LI Gansheng. Discussion on weak open-loop mode of electromagnetic loop[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 60-63.
- [2] 刘明松,张健,张文朝,等.弱电磁环网运行控制若干问题及对策[J].电力系统自动化,2014,38(4):109-114.
LIU Mingsong, ZHANG Jian, ZHANG Wenchao, et al. Problems and countermeasures for operation and control of weak electromagnetic loops[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 109-114.
- [3] 周莉梅,范明天,张祖平,等.合肥城市电网电磁环网解环分析[J].电网技术,2008,32(20):73-76.
ZHOU Limei, FAN Mingtian, ZHANG Zuping, et al. Analysis of electromagnetic loop network in Hefei City[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 73-76.
- [4] 孙艳,凌武能,李如琦,等.采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式[J].电力系统保护与控制,2015,43(17):22-28.
SUN Yan, LING Wuneng, LI Ruqi, et al. Power flow control of electromagnetic loop network based on distribution coefficient and phase angle matching analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 22-28.
- [5] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [6] 黄飞,宋璇坤,周晖,等.基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价指标体系研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(11):142-148.
HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Study on the comprehensive evaluation index system of power grid intelligent level based on the interaction of effect and foundation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.
- [7] 张祖平,范明天,周莉梅.城市电网电磁环网的解环问题研究[J].电网技术,2008,32(19):42-44.
ZHANG Zuping, FAN Mingtian, ZHOU Limei. Research of breaking up electromagnetic ring in urban power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 42-44.
- [8] 张永康,蔡泽祥,李爱民,等.限制500kV电网短路电流的网架调整优化算法[J].电力系统自动化,2009,33(22):34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2009, 33(22): 34-39.
- [9] 杨冬, 周勤勇, 刘玉田. 基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 111-118.
YANG Dong, ZHOU Qinyong, LIU Yutian. Optimal decision method of current limiting scheme based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 111-118.
- [10] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38.
- [11] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 116-121.
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 116-121.
- [12] 郝文斌, 夏春, 王彪, 等. 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 38-44.
HAO Wenbin, XIA Chun, WANG Biao, et al. A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 38-44.
- [13] 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.
- [14] 许立雄, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于负荷电流场的电网分区方法[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1039-1044.
XU Lixiong, LIU Junyong, LIU Yang, et al. A load current field-based algorithm for partitioning power networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1039-1044.
- [15] REN C X, HAO X G, WANG Y R, et al. Research on the optimization and simulation of the shortest path based on algorithm of Dijkstra[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 162(S1): 199-201.
- [16] 叶品勇, 都洪基, 沈曦. Dijkstra 算法在最佳抢修路径计算中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34(12): 39-41.
YE Pinyong, DU Hongji, SHEN Xi. Application of the Dijkstra algorithm in the best repairing path[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34(12): 39-41.
- [17] KAZUO M, AKIYOSHI S. Dijkstra's algorithm and L-concave function maximization[J]. Mathematical Programming, 2014, 145(1): 163-177.
- [18] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 121-126.
YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Adaptive decision strategy for the final circuit breaker of UHVDC project based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 121-126.
- [19] 姚春龙, 李旭, 沈岚. 公交出行最优路径搜索的有向赋权图模型[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(4): 1058-1063.
YAO Chunlong, LI Xu, SHEN Lan. A directed weighted graph model for optimal path search in transit[J]. Computer Application Research, 2013, 30(4): 1058-1063.
- [20] 严寒冰, 刘迎春. 基于 GIS 的城市道路网最短路径算法探讨[J]. 计算机学报, 2000, 23(2): 210-215.
YAN Hanbing, LIU Yingchun. The shortest path algorithm of urban road network based on GIS[J]. Journal of Computer Science, 2000, 23(2): 210-215.
- [21] 徐良, 彭勇波, 李杰, 等. 城市供水管网抗震可靠性分析与设计优化[J]. 灾害学, 2010, 25(B10): 227-231.
XU Liang, PENG Yongbo, LI Jie, et al. Seismic reliability analysis and design optimization of urban water supply network[J]. Disaster Science, 2010, 25(B10): 227-231.
- [22] DENG Y, CHEN Y, ZHANG Y, et al. Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(3): 1231-1237.
- [23] BACKES M, BERG M, UNRUH D. A formal language for cryptographic pseudocode[C] // Logic for Programming, Artificial Intelligence, and Reasoning, International Conference, Lpar 2008, Doha, Qatar, November 22-27, 2008, Proceedings, 2008: 353-376.
- [24] 苗友忠, 汤涌, 李丹, 等. 局部振荡引起区间大功率振荡的机理[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 73-77.
MIAO Youzhong, TANG Yong, LI Dan, et al. Tentative study of inter-area large power oscillation mechanism caused by the local mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 73-77.

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-05-16

作者简介:

李通(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划与调度, 电网信息规划与管理, 设备故障检测等。E-mail: 251673054@qq.com

(编辑 魏小丽)