

基于禁忌搜索及模糊评价的配电网网架规划

刘子俊¹, 于德龙², 胡少强³

(1. 广东电网公司深圳供电局, 广东 深圳 518020; 2. 广东电网公司珠海供电局, 广东 珠海 519000;
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 提出了一种基于禁忌搜索及模糊评价的配电网网架规划优化算法。首先根据地理拓扑, 通过 Dijkstra 最短路径算法生成树生成初始网架。在初始网架的基础上采用禁忌搜索策略按照模糊评分规则及网架的可行扩展供电范围对网架进行调整, 得出基于地理信息的优化网架以及各回馈线出线路径的可行优化方案。随后给出了所述算法在实际算例中的应用。算例结果表明算法是可行而有效的。

关键词: 配电网规划; 禁忌搜索; 模糊评价; Dijkstra 算法; GIS

Distribution network planning based on tabu search and fuzzy evaluation

LIU Zi-jun¹, YU De-long², HU Shao-qiang³

(1. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518020, China; 2. Zhuhai Power Supply Bureau, Zhuhai 519000, China;
3. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: An optimal algorithm of distribution network planning that based on Tabu Search and fuzzy evaluation is presented. Firstly, based on geography topography, an initial network is created referring to the spanning tree of Dijkstra shortest path algorithm. Beginning from the initial network, Tabu Search with fuzzy evaluation is used to adjust the network within its power supply extended area. Then, the optimal network and feasible routes of the feeders based on geography topography are presented through the algorithm. Finally, the application of the optimal algorithm is given. The planning results validate the feasibility and the efficiency of the presented algorithm.

Key words: distribution network planning; tabu search; fuzzy evaluation; disjkstra algorithm; GIS

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0045-06

0 引言

随着我国用电规模的逐步扩大, 近年来配电网网架优化研究开始引起重视。但是由于配网自身规模大、负荷点分散等特点, 同时需考虑配网辐射性约束等问题, 实际规划中需充分应用地理信息数据, 因此涉及到对复杂而庞大的地理信息的处理、搜索和寻优, 在寻优策略上比输电网规划复杂很多。结合地理信息系统 GIS (Geography Information System) 的配电网网架优化是目前配电网规划研究的热点之一^[1~4]。

在进行配电网网架规划时, 一般馈线需沿着街道架设。而在 GIS 中则转换为街道相交节点的处理问题, 如何自动处理和选择节点构造配电网并连接所有负荷点, 同时保证网络的辐射性, 是个较难解决的问题^[1]。

文献[1]在基于地理信息系统的基础上, 运用根

节点融合法来形成配电网接线方案, 直到所有节点(包括负荷点、分支点、中间节点)都已连接在网络中, 用这样的方案执行遗传算法。在计算适应度时将只与分支点和中间节点有关的线路去除, 从而成为一个真正可行的网络接线方案, 并利用这样的方案进行计算。文献[2]按基于GIS的启发式算法对规划区域进行分区, 并在各分区内采用最小生成树算法形成了各自的辐射状配电网架, 在此基础上采用遗传算法进行分段开关和联络开关规划, 得出最终的网架规划结果。对于上述问题虽然国内外进行了大量相关研究, 但这方面的研究尚处于起步阶段。

本文提出了一种基于禁忌搜索及模糊评价的配电网网架规划算法。算法结合实际地理信息, 将优化问题与地理拓扑问题相结合, 采用基于禁忌搜索策略以及模糊评分的方法对初始网架进行优化调整, 通过该算法给出了规划馈线的供电范围及走向, 并在地理拓扑上以图形方式表示。下面将介绍本文

所述算法的原理及步骤，并给出相应算例应用。

1 配电网空间信息的表示及分类

由于配电网规划需对变电站、负荷、配变及已有馈线等数据进行采集和分析，而上述数据信息均按地理位置分布，因此上述配网规划数据的信息存储及表示应结合空间信息。一般来说，如城市街道背景图、线路地理走向，配变位置等信息均是以矢量化形式存储在数据库中。而矢量化的地理信息可以用点、线段、多线段、多边形这四类空间数据结构表示，并分别使用一系列坐标和集合来表示，如表 1 所示。

表 1 配电网空间数据分类

Tab.1 Categories of distribution network spatial data

名称	描述	表示方法	空间实体例子
点	空间坐标	$v_i=(x,y)$ ，其中 $x、y$ 分别为点 v_i 的地理空间上的横坐标和纵坐标。	配变、负荷以及变电站等
线段	一对点的集合，构成多线段、多边形的基本元素	$l_s=(v_1, v_2)$ ，其中 $v_1、v_2$ 分别为线段的两个端点在点集 VT 中的序号。	街道段、线路段、地块边界段等。
多线段	一组有序点的集合，同时也是一系列非封闭的线段集合	$m_l=(v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_t)$ 其中 v_i 为多线段中的一有序点， t 为该组多线段中有序点的数目。	街道、线路等
多边形	一组封闭的有序点的集合，同时也是一系列封闭的列线段	$p_l=(v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_k)$ 其中 v_i 为多边形中的一有序点， k 为该组多边形中有序点的数目。	街区、地块、供电区域等

2 算法原理及步骤

假定在进行配网网架规划之前，负荷/配变的位置、预测值/容量以及变电站的位置和容量均已确定，并假定变电站已明确划分供电范围。本文所述算法主要实现所属变电站供电范围内配网网架生成以及馈线布置、路径走向问题。主要包括三方面：地理拓扑信息生成，初始网架生成以及网架结构优化调整。

2.1 地理拓扑信息生成

对于特定的规划范围，原始空间信息数据中难免存在冗余或缺失规划数据的情况，如地理背景图，由一系列离散点及互不相关联的以多线段表示的街道组成，各空间信息元素之间缺乏直接的联系，而配电网地理布线更关心的是各空间信息元素之间的相互关系，因此在读取以文本或数据库形式存储的空间信息数据后，需对原始空间信息数据进行处理。本文对配网空间信息数据的处理按以下三个步骤进行：

1) 计算街道交叉点，简化街道段，生成基本地

理拓扑（基本地理点集）；

2) 在基本地理拓扑中搜索并生成基本街区；

3) 判别负荷/配变街区归属并计算至所属街区的可行接线位置、生成扩展地理拓扑（包含可行接线点的地理点集）。

2.2 初始网架生成

通过空间信息数据的预处理，得出了网架规划算法所需的地理拓扑信息。但由于基于地理信息的配网网架规划问题，特别是具体馈线路径规划问题，是一个搜索空间庞大而复杂的 NP 难问题。因此选择一个合理的初始可行解对于优化算法在可接受的搜索时间内寻找出一个合理的优化解是非常重要的。算法中初始网架结构生成按以下两个主要步骤进行：生成基于 Dijkstra 最短路径算法的生成树和按生成树布置初始网架。

2.2.1 基于 Dijkstra 最短路径算法的生成树

Dijkstra 最短路径算法采用贪心策略，其核心思想是每次把不属于生成树且通过生成树到达根节点之间路径最短的节点最加入到生成树中，直到所有节点加入到生成树为止。按 Dijkstra 最短路径算法计算的结果是一棵以 O 为根节点的最短路径树，如图 1 实线部分所示。

由此可知，生成树上任一叶节点向上回溯至根节点的路径均是该叶节点至根节点的一条最短路径。如节点 e 到 O 的一条最短路径是 $e \rightarrow d \rightarrow g \rightarrow O$ ，其路径长度为 25。由于生成树是根节点到各树叶节点最短路径的树，因此若以扩展地理拓扑的生成树作为馈线路径，则各负荷点或配变（叶节点）至变电站（根节点）之间的馈线长度将是负荷点或配变到变电站可能的最短长度，并确保了网架的辐射性。

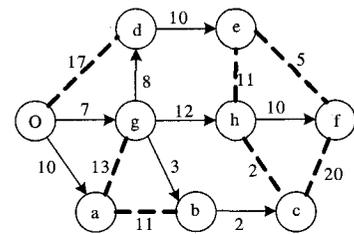


图 1 Dijkstra 最短路径算法的生成树

Fig.1 Spanning tree of dijkstra shortest path algorithm

需要注意的是计算生成树时不需要遍历所有扩展拓扑的节点，只需把所有和负荷点或配变接线位置上对应的节点遍历后，即可停止搜索。并删除由这些接线位置回溯至根节点未经过的树枝及节点，对生成树进行简化。

2.2.2 生成初始网架结构

由于受到线路传输容量的限制, 在大多数情况下, 不能简单地按照该生成树路径布置初始网架。在布置初始网架前, 应先计算该生成树上各树枝通过的负荷, 或与电流相对应的各树枝向下遍历至各叶节点所挂接的配变总容量。然后按照生成树每条树枝上通过的负荷/配变容量不超过该树枝上各馈线最大允许负荷/配变容量之和去配置每条树枝(街道段)上通过的馈线, 并使通过各树枝上的馈线总数最小。显然, 与根节点相连的树枝上配置的馈线数量之和为初始馈线出线回数。然后根据每条树枝上配置的馈线数量, 由近至远, 即由生成树根节点遍历至每一负荷/配变叶节点, 连接每回馈线的路径; 按负荷/配变位置由远及近, 即由生成树每一负荷/配变叶节点回溯至根节点, 根据各回馈线已挂接的负荷/配变总量由小到大, 并在满足最大电流/容量约束的和条件下, 分配给各回初始馈线, 直到所有负荷或配变分配完毕, 初始网架布置完成。

2.3 网架结构优化调整

由于初始网架仅考虑了最短供电路径及最大负荷约束, 因此初始网架只是一个可行解, 并不是最优解, 各线路之间分配的负荷或挂接的配变容量并不均衡、其总工程量或网损等因素并未达到最优化。这里采用禁忌搜索 (Tabu Search) 策略结合模糊评价对初始网架进行优化调整。

禁忌搜索的基本思想是根据已进行的优化过程判别下一步的搜索方向。寻优过程从初始解开始, 通过迭代在邻域中搜索最优解。每步迭代称为“移动”, 为防止搜索过程迁于局部最优点, 对已实现了的移动的逆移动存储在一个具有一定长度按先进先出 (FIFO) 原则更新的禁忌列表中。为使一些列入禁忌列表的优化移动不被禁忌, 所以在优化过程中为禁忌列表设置了一个释放准则, 满足释放准则的移动将从禁忌列表中释放。

这里以基于最小路径生成树的初始网架为搜索起始点, 在当前“最佳”网架配置方案的邻域里, 即当前网架的可行扩展供电范围里, 通过调整馈线所供负荷/挂接配变的模糊评价逐步搜索优化网架。可行扩展供电范围是指馈线调整时可延伸的范围, 为避免馈线调整后出现供电区域交叉情况, 可行扩展供电范围除包括原供电范围外, 应只包括与原供电范围内街区及街道段相邻接的街区上的街道段。

配电网网架方案可通过多个方面进行评价, 在变电站供电范围确定的情况下, 不失一般性, 这里主要考虑总工程量、出线间隔利用效率两个因素。可通过馈线总长度 L 以及馈线挂接配变最大最小容量比 D 两个参考量进行评价, 其中 $L = \sum l(k)$,

$D = \max(\{d(k)\}) / \min(\{d(k)\})$, $l(k)$ 、 $d(k)$ 分别为第 k 条馈线的总长度及其所带总负荷/配变总容量。算法步骤如下, 流程如图2所示。

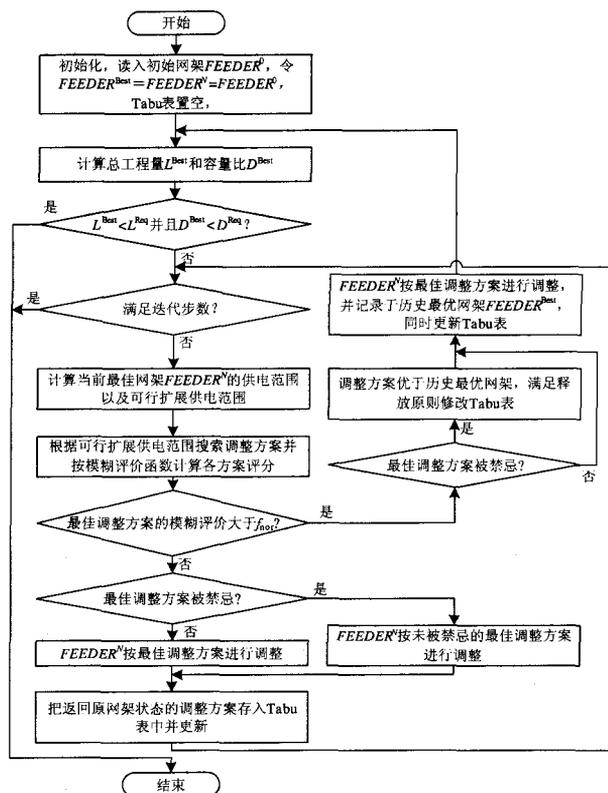


图2 网架优化调整算法流程图

Fig. 2 Flow chart of optimal network adjustment

2.3.1 算法步骤

步骤1: 读取地理拓扑信息以及基于最小生成树的初始网架 (馈线集) $FEEDER^0$, 其中初始网架 $FEEDER^0$ 中每条馈线 $feeder(k)$ 均是上述Dijkstra最短路径算法生成树的一棵子树, 且 $feeder(k)$ 的根节点均是变电站出线节点。

步骤2: 置当前最佳网架 $FEEDER^N$ 及历史最优网架 $FEEDER^{Best}$ 为初始网架 $FEEDER^0$, Tabu表置空。

步骤3: 计算总工程量, 这里按馈线主干长度 L^{Best} 考虑, 并计算网架中馈线挂接配变最大最小容量比 D^{Best} , 计算容量比时最小容量应是不为零的最小容量, 若最小容量为零则删除这条馈线。

步骤4: 判断迭代步数 $step$ 是否达到最大迭代步数 $MAXSTEPS$, 若是, 则停止迭代, 并输出结果; 若否, 则继续下面判断。判断 L^{Best} 及 D^{Best} 是否均在所期望的范围 L^{Req} 及 D^{Req} 之内, 若是, 则停止迭代并输出结果; 若否, 则进行步骤5。

步骤5: 计算当前最佳网架 $FEEDER^N$ 中各馈线供电范围 $Area^N(k)$, $Area^N(k)$ 为 $p \times l$ 矩阵, 其中 p 为街区总数, l 街道段总数。若配变 t 由馈线 k 供电, 配变 t 属于街区 i , 且其接线点位置在街道段 j 上, 则供电范围 $Area^N(k)$ 中矩阵元素 (i, j) 为1, 其余为0。并由各馈线供电范围 $Area^N(k)$ 计算可行扩展供电范围 $Area^N(k)'$, 若 $Area^N(k)$ 位置 (i, j) 上的元素为1, 则其可行扩展供电范围应为与街区 i 邻接的所有街区上的街道段, 同时这些街道段应满足与街道段 j 相邻接。可按下式计算: $Area^N(k)' = sign(P \times Area^N(k) \times L)$, 其中 P 为街区邻接矩阵($p \times p$), L 为街道段邻接矩阵($l \times l$), 上述 P 、 L 两矩阵中对应地理元素相邻时为1, 否则为0。

步骤6: 搜索网架 $FEEDER^N$ 最佳可行调整方案。每回馈线依次在其可行扩展供电范围中搜索不属于该馈线供电的所有配变。同时在保持馈线放射状供电的原则下搜索该回线路挂接该配变的接线路径及位置, 并对调整后的原供电馈线进行简化, 删去不必要的支路。若存在馈线不带负荷/配变则删除此回馈线。然后计算各方案调整网架后工程量 L 及其馈线最大最小容量比 D 。每步搜索中根据方案集中网架与历史最优网架工程量的差值 dL 、最大最小容量比的差值 dD 计按照模糊评分规则动态对每个调整方案进行评价。

步骤7: 判别方案集中是否存在评价价值大于历史最优网架的评价价值 f_{nor} 的调整方案。若存在更优网架 $FEEDER^S$, 则判断该方案是否被禁忌, 若该方案未被禁忌, 则该方案为目前搜索到的最优网架方案并替代历史最优网架 $FEEDER^{Best}$; 若该方案被禁忌, 由于该网架方案比历史最优网架更佳, 满足释放准则替代历史最优网架并更新Tabu表。然后把返回原状态的调整方案存入Tabu表中, 令 $FEEDER^N = FEEDER^S$ 作为下步搜索始点, 并返回步骤3。若不存在更优网架, 则进行步骤8。

步骤8: 若不存在比历史最优网架 $FEEDER^{Best}$ 更优方案, 则以该搜索范围里未被禁忌的评价价值最高的最佳网架 $FEEDER^B$ 作为下步搜索始点, 把返回原状态的调整方案存入Tabu表中并更新Tabu表, 返回步骤3。

2.3.2 模糊评分规则

由于对网架方案的评价, 构造精确的评价函数的数学表达式较为困难。因此, 采用语言模式推理的模糊评分方法, 构造网架调整评价函数较为容易且较为合理。这里采用TS(Takagi-Sugeno)结构的模糊推理函数以及“钟形”隶属度函数。输入变量为工程量变化量 dL 及容量比变化量 dD , 其语言变量均分

为负大NB(Negative Big)、负小NS(Negative Small)、零Z(Zero)、正小PS(Positive Small)和正大PB(Positive Big)。上述两输入变量隶属函数如图3及图4所示。

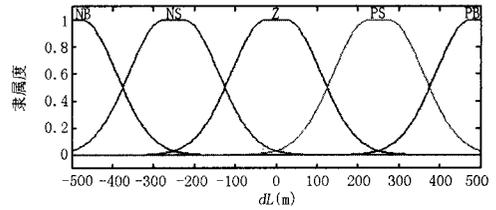


图3 输入变量 dL 的隶属度函数示意图

Fig.3 Membership functions of dL

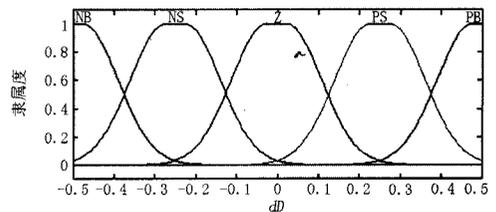


图4 输入变量 dD 的隶属度函数示意图

Fig.4 Membership functions of dD

输出变量为方案评分 f , 其语言变量分别为适宜P(Prefer)、一般N(Neutral)、不适宜A(Against), 分别取为常数 $P=1$ 、 $N=0.5$ 、 $A=0$ 。模糊推理规则如表2所示。

表2 方案评价模糊推理规则表

Tab.2 Fuzzy inference rules of scheme evaluation

f	dL				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	P	P	P	P	N
NS	P	P	P	N	A
dD	Z	P	N	N	A
PS	N	N	A	A	A
PB	A	A	A	A	A

采用权值平均法对推理后的模糊值进行反模糊化。模糊推理函数曲面如图5所示。

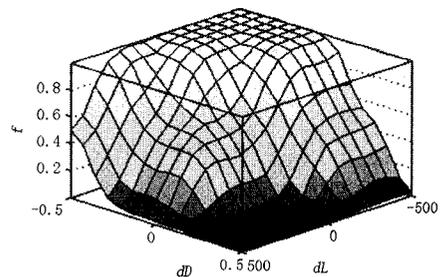


图5 方案评价的模糊函数曲面

Fig.5 Fuzzy inference surface of scheme evaluation

3 算例应用

下面给出本文所述算法的一个实例应用, 对面积约为 31.2 公顷、配变总容量为 23 930 kVA 的实际供电区域进行配网馈线规划。如图 6 所示, 图 6 是该供电区域的地理背景图, 图中实线表示地理轮廓, 主要为街道, 而点划线线表示街道中心线, 红色小圆圈表示实际配变位置, 圆圈内数值为该配变的容量, 单位为 kVA, 变电站位于规划区域西南方。

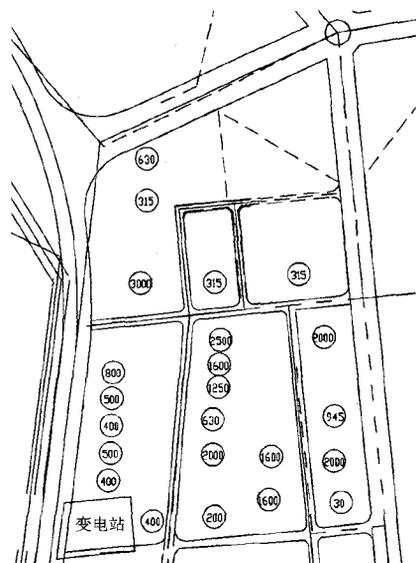


图 6 规划区域的地理背景图

Fig.6 Geography background of planning region

这里假定该供电区域本身无供电馈线, 并且馈线为理想线路且最大供电距离在分区中已得到保证, 因此不进行潮流计算。并假定规划的所有馈线均为公用线路, 不考虑专用线路情况。这里, 按每回馈线最大配变挂接容量为 10 000 kVA, 线路最大长度为 5 000 m 对供电区域进行网架规划。

1) 载入初始街道地理信息

抽取主要地理信息, 将街道以折线化的多线段表示, 街道拐点在图中以小圆点表示。初始化街道共有 8 条, 初始街道端点及拐点共有 28 个。

2) 基本地理拓扑生成

基本地理拓扑生成包括街道段的生成、简化以及各街区的搜索。处理后的地理拓扑图如图 7 所示, 图中以数字标识的小圆点为简化后的街道段端点, 由图 7 上可看出简化共有端点 16 个; 图中粗斜体数字表示搜索到的街区编号, 共有 6 个。

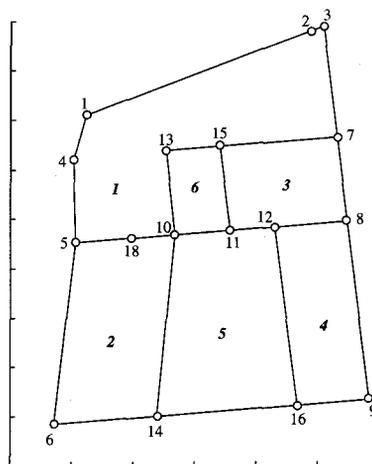


图 7 简化后的基本地理拓扑图

Fig.7 Simplified basic geography topology

3) 配变接线点的搜索

如图 8 所示, 为配变到街道段的最近可行接线点。图中斜体数字表示配变容量及其地理拓扑中的位置。细线为配变至街道段的可行接线方案。

4) 扩展拓扑生成

扩展拓扑生成是指配变的接线位置插入到基本拓扑并简化后的地理拓扑, 如图 8 所示。这里为简化问题, 只考虑配变的最近接线方式。由图中可看出, 插入接线点后, 共有 38 个节点。

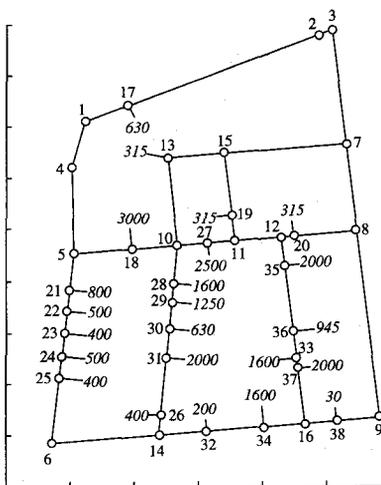


图 8 扩展拓扑生成示意图

Fig.8 Firntuif extent topology

5) Dijkstra 最短路算法的生成树

最短路算法的生成树如图 9 所示, 图中粗线为该算法的生成树。初始网架按此树布置, 初始馈线见表 3。共有 3 回初始馈线, 最大最小容量比为 $D^0=1.591$ 。

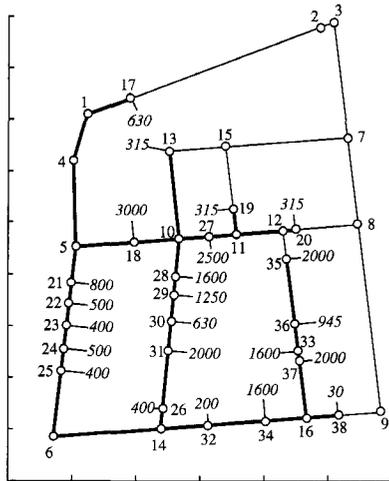


图 9 最短路径算法生成树

Fig.9 Spanning tree of shortest path algorithm

表 3 初始馈线配置表

Tab.3 Arrangement of Initial Feeders

线路编号	挂接配变节点编号	挂接容量 /kVA	线路长度 /m
F1	13、17、18、19、20、21、22、 23、24、25、27	9 675	1 271
F2	26、28、29、30、31、32	6 080	547
F3	33、34、35、36、37、38	8 175	759
总计	—	23 930	2 577

6) 馈线调整

按上述步骤的初始布线进行优化调整后的馈线地理走向如图 10 所示。本算例中置最大迭代步数为 10 步，期望容量比 $D^{Req}=1.2$ ，但未设置馈线期望总长度 L^{Req} 。经 4 步迭代后满足收敛条件算法停止，调整后仍为 3 回馈线，详见表 4。最大最小容量比为 $D^{Best}=1.167$ ，而总工程量只仅比初始网架增加 39 m。

表 4 优化馈线配置表

Tab.4 Arrangement of optimal feeders

线路编号	挂接配变节点编号	挂接容量 /kVA	线路长度 /m
F1	13、17、18、19、20、21、22、 23、24、25	7 175	1 271
F2	26、27、28、29、30、31	8 380	586
F3	32、33、34、35、36、37、38	8 375	759
总计	—	23 930	2 616

由上述馈线布置的结果可以看出，每回馈线均有清晰且互不交错的供电范围及路径，馈线挂接配变容量分配也较为均匀，最大最小容量比在期望值之内，规划结果符合工程实际。由此可见本文所述算法在一定计算规模下，能较为有效地搜索出可行的优化网架方案，并在地理拓扑图上实现馈线布置，

如图 10 所示。

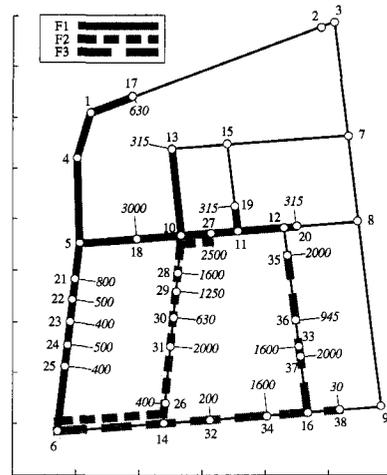


图 10 优化馈线的地理拓扑图

Fig.10 Geography topography of optimal feeders

4 结论

当算例规模增大时，由于算法在网架优化搜索上需遍历可行扩展范围内的配变，因而所耗费的时间也大为增加，算法效率也明显降低。但是由于采用了模糊评价的方法，符合人们的思维方式，较有效地进行方案选择，使算法在较少的迭代步数里达到优化目的。本算法中只考虑了配变单一接线点的情况，而实际情况中配变一般有若干可行接线点，因此本算法可作为遗传算法的子算法，使用遗传算法对网架进行全局优化。另外，若规划区域中已存在供电馈线，则可以把现有网架作为初始网架，采用所述算法实现现有馈线及新增馈线的调整与规划。

参考文献

[1] 王春生, 赵凯, 彭建春. 基于地理信息系统和遗传算法的配电网优化规划[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 48-51.
WANG Chun-sheng, ZHAO Kai, PENG Jian-chun. GIS Based Optimal Planning for Distribution System Using GA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14):48-51.

[2] 宋蒙, 刘健, 刘玟权. 基于优化分区的城市配电网架规划[J]. 继电器, 2005, 33(23): 31-35.
SONG Meng, LIU Jian, LIU Gong-quan. Urban Distribution Network Planning Based on Optimal Partitioning [J]. Relay, 2005, 33(23):31-35.

[3] 杨丽徙, 王金凤, 陈根永. 基于GIS和Tabu搜索的配电网优化规划[J]. 电力系统自动化, 2002, 23(3): 75-77.

(下转第 57 页 continued on page 57)

- 北京: 北京机械工业出版社, 1998.
- WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Compensation of the None Power[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [8] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
- FAN Rui-xiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. Modeling and Control Strategy Analysis of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61.
- [9] 赵勇, 韩春立, 李建华, 等. 兼顾降低网损和抑制谐波要求的配电系统优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 6-10.
- ZHAO Yong, HAN Chun-li, LI Jian-hua, et al. Balance to Reduce Net Loss and Harmonic Suppression Requirements of the Distribution System Optimized Operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 6-10.
- [10] 林琳. 企业供电系统有源滤波技术的研究和工程应用[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- LIN Lin. Technology Research and Engineering Applications of the Enterprise Power Supply System Active Filter[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [11] 张鹏鹰, 王向军, 曹跃云. 并联型电力有源滤波器直流侧电容电压控制的研究[J]. 电力电子技术. 2000 (3): 3-6.
- ZHANG Peng-ying, WANG Xiang-jun, CAO Yue-yun. Study of Parallel APF DC Bus Voltage Control[J]. Power Electronics. 2000 (3): 3-6.
- [12] 于瑞红. 并联混合型有源电力滤波器的研究[D]. 成都: 西华大学, 2006.
- YU Rui-hong. Study of Parallel Hybrid Type of APF[D]. Chengdu: Xihua University, 2006.
- [13] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
- FAN Rui-xiang, LUO An, LI Xin-ran. Design Parameters and Applied Research of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111.
- [14] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] 黄永安, 马路, 刘慧敏. Matlab7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用. 北京: 清华大学出版社. 2005.

收稿日期: 2008-02-10; 修回日期: 2008-05-05

作者简介:

陈艳(1969-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统谐波抑制与无功补偿. E-mail:chengyan1988@163.com

(上接第 44 页 continued from page 44)

- [12] Tiak Thakur & Jaswanti. Study and Characterization of Power Distribution System Network Reconfiguration[A]. In: IEEE PES Transmission and Distribution conference & Exposition[C]. Latin America: 2006.
- [13] ZHU Ji-zhong, XIONG Xiao-fu, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network[A]. In: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007. 1-7.

收稿日期: 2008-03-01; 修回日期: 2008-04-03

作者简介:

戴伟华(1969-), 男, 副教授, 研究方向为电工与电力电子技术;

梅贱生(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电网的优化调度;

熊宁(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电网可靠性. E-mail:civilaviation@hotmail.com

(上接第 50 页 continued from page 50)

- YANG Li-xi, WANG Jin-feng, CHEN Gen-yong. GIS-Based Optimal Planning for Distribution System by Tabu Search[J]. Journal of Zhengzhou University, 2002, 23(3):75-77.
- [4] Boulaxis N G, Papadopoulos M P. Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1):242-247.

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-05-07

作者简介:

刘子俊(1980-), 男, 主要研究方向为继电保护及人工智能在电力系统中的应用; E-mail:tedljz@163.com

于德龙(1981-), 男, 主要研究方向为电力系统运行与规划等;

胡少强(1955-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动装置、故障检测等。