

基于最小生成树算法的配电网网架优化规划

傅 昌¹, 洪彬倬²

(1. 广东电网有限责任公司河源供电局, 广东 河源 517000;

2. 广东电网有限责任公司阳江供电局, 广东 阳江 529500)

摘 要:配电网是连接输电系统和用电系统的重要环节,因此配电网网架结构的合理性直接影响到整个电网的高效运行。文章基于最小生成树算法实现配电网网架的合理性优化规划,建立了包含目标函数和一系列约束条件的配电网网架优化规划的数学模型,阐述了配电网潮流计算的方法。然后,详细介绍了最小生成树算法的理论基础,针对直接运用 Kruskal 算法求解得到的结果往往不够理想,对算法进行了一些合理化处理,并利用最小生成树算法对配电网网架优化规划进行了研究。最后应用两个 10 kV 单电源辐射型网络的算例对该研究方法进行验证,结果表明最小生成树算法对实现配电网网架优化规划是可行且有效的。

关键词:配电网;网架优化规划;最小生成树算法;导线调整

文章编号:2096-4633(2018)02-0038-07 **中图分类号:**TM63 **文献标志码:**B

相比于输电网架,电力系统配电网规划建设比较落后,过去配电网建设规划的不尽合理,致使大部分地区电网出现混乱的网体结构,供电质量和供电可靠性也较低。配电网网架优化规划是根据配电网中变电站的分布地点、地区供电负荷及其大小,求得配电网规划的拓扑结构,满足其基本要求^[1-2]。

目前针对配电网网架优化规划的研究已经取得了很多成果,其研究重点主要在求解方法上,主要包括启发式方法、数学优化方法和智能优化算法。

启发式方法是基于直观分析的算法,在现代启发式方法中蚁群算法是用转换概率确定每个新节点的向上节点,但在转换概率中添加新的选择因素就要有新的表达式,这影响了规划结果的稳定性,不易灵活应用^[3]。数学规划方法包括确定性方法和不确定性方法两大类,其实质是用数学规划模型描述配电网规划的设计要求,然后运用算法求解。配电网规划属于大规模的数学优化问题,因此在实际优化过程中建立模型时不得不对具体问题大量简化,所以由数学优化方法求得的可能只是局部最优解。智能优化算法大多属于随机搜索算法,如蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法、粒子群算法等。文献[4-7]采用蚁群算法求

解配电网网架优化问题。文献[8]研究了模拟退火算法,该算法具有跳出局部最优的本领,但随着温度的下降,跳出局部最优的几率也相应下降。文献[9]中粒子群算法通过记忆与反馈机制实现了高效寻优。

配电网规划往往分为两步进行,一是确定变电站的地点、负荷大小、供电范围,二是根据供电区域的实际情况确定配电网的网络结构^[10-11]。文章提出的最小生成树算法仅针对配电网规划的第二步:在已知供电范围和待扩建线路的基础上,将投资及运行费用之和作为目标函数,将配电网规划域转化为加权图,基于最小生成树算法实现配电网网架优化规划。通过算例验证最小生成树算法在解决配电网网架优化规划问题上的可行性。

1 数学模型建立

以线路的建设和运行费用总和最小作为优化目标。

$$\min. W = W_1 + W_2 \quad (1)$$

式中: W 为总费用, W_1 是建设费用, W_2 是运行费用。

设线路 i 的长度为 L_i , 单位长度的综合投资为 α_i , 则线路 i 的建设费用为:

$$W_{1,i} = \alpha_i L_i \quad (2)$$

线路 i 的运行费用为:

$$W_{2,i} = \gamma \Delta P_i T \quad (3)$$

$$\Delta P_i = 3 (I_i)^2 R_i \quad (4)$$

$$R_i = \rho L_i / a_i \quad (5)$$

式中: γ 是每千瓦时电量的费用系数, T 是规划周期, ΔP_i 是第 i 条边的线损, I_i 是第 i 条边的电流, R_i 是第 i 条边的电阻, ρ 是电阻率, a_i 是第 i 条边的导线截面。

结合式(1),则有:

$$\min. W = \sum_{i \in D} \theta_i \alpha_i L_i + \sum_{i \in D} 3\gamma (I_i)^2 \rho L_i T / a_i \quad (6)$$

式中: D 是所有线路的集合, θ_i 为系数; θ_i 定义如下:

$$\theta_i = \begin{cases} 1 & \text{待选线路 } i \text{ 被选中} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

约束条件有如下几个。

1.1 电流约束

$$I_{lk} \leq I_{lk, \max} \quad (8)$$

式中: $I_{lk, \max}$ 为流过型号为 k 的导线的安全载流量。 $k \in D$, D 是备选导线型号的集合。

1.2 电压约束

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \quad i \in N_b \quad (9)$$

式中: $V_{i, \min}$, V_i , $V_{i, \max}$ 表示节点 i 的电压下限、正常运行电压和电压上限, N_b 为总的节点数。

2 配电网潮流计算

不同于高压输电网,配电网环网结构,开环运行,且正常运行时一般为辐射型树状;线路长度较短 r/x 的值比较大等。配网的一些因素对传统的潮流算法属于病态条件,针对配电网特点,人们提出了很多算法^[12-14],本文采用前推回代法。

首先需要对支路进行分层和编号,并且在推算过程中根据变化量更新电流、电压,如图1所示。

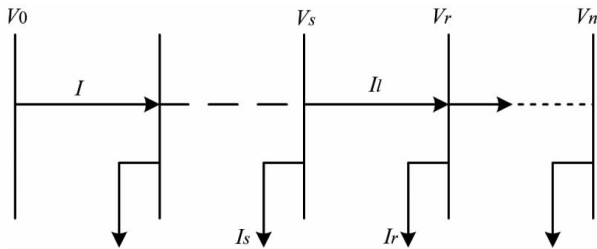


图1 前推回代潮流算法

回代过程:

依据节点电压, $i = 1, 2, \dots, n$, 计算节点负荷电流, 然后利用负荷电流更新支路电流。

前推过程:

利用前推过程求得各个节点电压。从变电站节点向主干线和分支线的末端推进, 变电站节点电压已知, 如在图1中节点 r 的电压为:

$$V_r = V_s - Z_l I_l \quad (10)$$

为了能够处理环状结构, 很多文献采用了补偿的方法。

很多文献在计算 PV 节点时也采用了补偿的方法, 大致步骤是:

(1) 将 PV 节点看作 PQ 节点, 进行潮流计算;

(2) 计算 PV 节点给定的电压幅值与计算电压的幅值的差值, 根据该差值得出补偿电流;

(3) 补偿电流注入到 PV 节点上, 返回 1), 当 PV 节点给定电压与计算电压的差值小于收敛精度迭代终止。

3 基于最小生成树算法的配电网网架优化

3.1 算法介绍

构造最小生成树^[15-17]可以有多种算法, 最常用的是 Prim 算法, Kruskal 算法和简易算法。

3.1.1 Prim 算法

Prim 算法的基本思路是通过在生成树上逐个添加顶点以此构造出连通网的最小生成树。

具体步骤如下:

(1) 开始: 在连通网中选择任一个顶点, 把它添加到最小生成树中。

(2) 重复执行以下操作:

① 连通网的顶点分为两部分, 分别为已添入到和未添入到最小生成树中的顶点集合;

② 所有连通这两个集合中的顶点的边找出来;

③ 选择权值最小的边, 把它添入生成树中, 与此同时把跟此边相连的顶点添入进去。

(3) 结束: 通过以上操作, 构造的最小生成树中包含所有的顶点。

3.1.2 Kruskal 算法

该算法的基本思路是通过在生成树上逐个地添入边来构造连通网。

具体步骤如下:

(1) 把所有顶点添入最小生成树中;

Fig. 1 Forward-backward sweep power flow algorithm

(2) 根据权值对所有边进行由小到大的排序;

(3) 利用已排好的顺序向生成树里添入边并且不产生回路,如产生回路则不添加,然后试验下一条边。

3.1.3 简易算法

其构造最小生成树的基本思路与(1)、(2)不同,通过在连通网中依次逐个删除边来实现。

具体做法如下:

(1) 根据权值对所有边进行由小到大的排序;

(2) 在连通网中,利用已排好的顺序依次逐个去掉权值最大的边,并且要求删除该边后子图仍然连通,假如去掉后子图不能连通则此边留下,然后试验去掉下一条边直到得到的子图中任何一条边都不能删去。

Prim 算法对顶点进行操作,时间复杂度为 $O(n^2)$ (n 为连通网中顶点的个数),该算法适用于求边稠密的连通网的最小生成树。Kruskal 算法和简易算法主要对边进行操作,时间复杂度为 $O(e \log e)$ (e 表示边的个数),适用于求边稀疏的连通网的最小生成树。篇幅所限,本文选择 Kruskal 算法来构造最小生成树。

3.2 算法应用

利用最小生成树进行配电网网架优化时,由于需要考虑的目标函数和约束条件很多,直接运用 Kruskal 算法求解,得到的结果往往还不够理想,需要进行一些处理。

3.2.1 节点的处理

为方便计,把所有的节点先当做一般顶点处理。最小生成树得到后,将连通电源点和负荷点的树枝作为路径,删去以交叉点为末的分支路径。

3.2.2 线路走廊约束处理

在配电网网络优化过程中,根据实际情况,供电部门对配网主干线路走廊一般都有初步设想或明确预案,如果不加约束,则得到的结果往往很难满足实际情况。较好的做法是先把已经确定的主干线的边放入集合中,然后再处理剩余的边。

3.2.3 权值计算处理

设置各条边的权值为 W_i ,

$$W_i = W_{1,i} + W_{2,i} \quad (11)$$

式中: W_i 为第 i 条边的权的初值, $W_{1,i}$ 为第 i 条边的建设费用,一般按照供电部门提供的单位工程造价计算得到。 $W_{2,i}$ 为第 i 条边的运行费用。

$W_{2,i}$ 的计算公式同式(3-5),即:

$$W_{2,i} = \gamma \Delta P_i T \quad (12)$$

$$\Delta P_i = 3 (I_i)^2 R_i \quad (13)$$

$$R_i = \rho L_i / a \quad (14)$$

认为系统沿线电压压降不大、负荷功率因数相同,则可以得到第 i 条边的电流。

$$I_i = \sum_{j \in \theta} \frac{P_j}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} \quad (15)$$

式中: p_j 为第 j 个顶点的负荷, U_N 为额定电压, $\cos \varphi$ 为功率因数, θ 表示第 i 条边下游所有顶点的集合。

3.3 算法流程

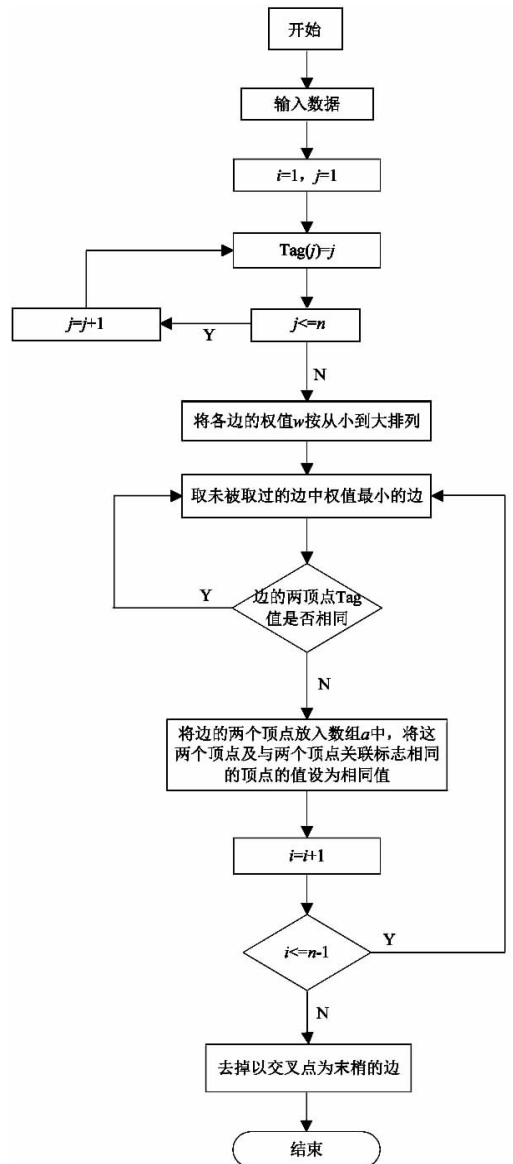


图 2 算法结构流程图

Fig. 2 Algorithm structure flow chart

4 算例分析

4.1 算例 1

采用一个网架结构如图 3 所示的 10kV 单电源辐射型网络,有 16 个节点、28 条待架支路。

图中数字为各节点编号,0 号节点为供电首端,带字母 L 的节点为负荷点,其余为交叉节点,虚线表示可以架线。参数如下: $\gamma = 0.5 \text{ ¥/kW} \cdot \text{h}$, $T = 10$ 年,年最大负荷利用小时数 4 000 h, $U_N = 10 \text{ kV}$,各负荷点的负荷均为 350 kW, $\cos\varphi = 0.85$ 。导线有 LGJ - 50, LGJ - 70, LGJ - 95, LGJ - 120, LGJ - 150, LGJ - 180, LGJ - 240, LGJ - 400 八种型号,均为单回路。

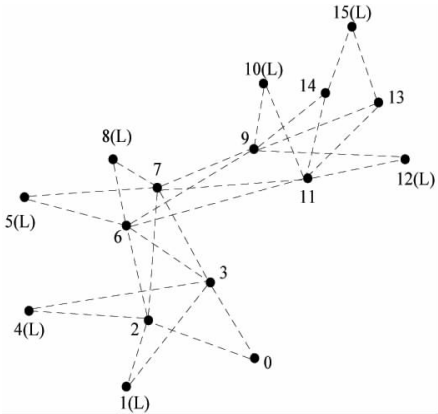


图 3 算例 1 网架结构图

Fig. 3 Structure chart of example 1

相关参数如表 1 至表 3 所示。

确定配电网初步方案时统一选取 LGJ - 120 的导线,则各边的权值如表 4 所示。

表 1 导线参数			
Tab. 1 Wire parameters			
导线截面	电阻率 /(Ω/km)	安全载流量 /A	造价 /(万元/km)
50	0.65	220	6.65
70	0.4217	275	8.23
95	0.3058	335	9.53
120	0.2422	380	11.84
150	0.21	445	12.33
180	0.17	515	14.03
240	0.132	610	16.14
400	0.046	610	20.13

表 2 线路长度					
Tab. 2 Line length					
路径起—终	长度 /km	路径起—终	长度 /km	路径起—终	长度 /km
0 - 2	0.75	5 - 6	0.8	9 - 13	0.7
0 - 3	0.82	5 - 7	1.143	9 - 14	0.6
1 - 2	0.6	6 - 8	0.6	10 - 11	0.9
1 - 3	0.71	6 - 9	0.75	11 - 12	0.65
2 - 4	0.8	6 - 11	0.75	11 - 13	0.68
2 - 6	0.75	7 - 8	0.27	11 - 14	0.6
2 - 7	0.99	7 - 9	0.469	13 - 15	0.853
3 - 4	0.99	7 - 11	0.531	14 - 15	0.8
3 - 6	0.69	9 - 10	0.8		
3 - 7	0.93	9 - 12	0.75		

表 3 节点负荷	
Tab. 3 Node load	
节点	负荷/kW
1	350
4	350
5	350
8	350
10	350
12	350
15	350

表 4 各边权值初始值					
Tab. 4 Initial value of each edge weight					
边起—终	权值	边起—终	权值	边起—终	权值
0 - 2	8.88	5 - 6	9.47	9 - 13	8.29
0 - 3	9.71	5 - 7	13.53	9 - 14	7.10
1 - 2	7.10	6 - 8	7.10	10 - 11	10.66
1 - 3	8.41	6 - 9	8.88	11 - 12	7.70
2 - 4	9.47	6 - 11	8.88	11 - 13	8.05
2 - 6	8.88	7 - 8	3.20	11 - 14	7.10
2 - 7	11.72	7 - 9	5.55	13 - 15	10.10
3 - 4	11.72	7 - 11	6.29	14 - 15	9.47
3 - 6	8.17	9 - 10	9.47		
3 - 7	11.01	9 - 12	8.88		

通过最小生成树算法 (Kruskal) 程序得到如下配电网网架结构示意图如图 4 所示。

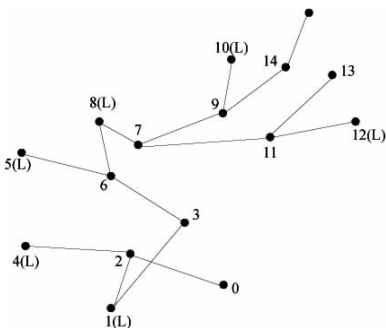


图 4 网架结构示意图

Fig. 4 Grid structure diagram

把交叉点为末梢的边去掉,得到新的配电网网架结构如图 5 所示。

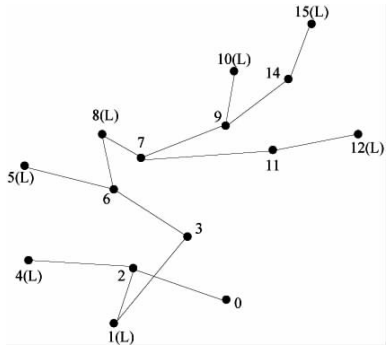


图 5 优化后的网架结构

Fig. 5 Optimized grid structure

在得到配电网网架结构的基础上,再用程序调整每条边的导线截面,最终得到费用最省的运行方案如表 5 所示。

表 5 算例 1 新的网架线路和导线型号

Tab. 5 New grid line and wire model of example 1

边起 —终	导线 型号	边起 —终	导线 型号	边起 —终	导线 型号
7—8	5	9—14	1	0—2	1
7—9	3	11—12	1	2—4	1
7—11	1	11—13	8	5—6	1
1—2	8	3—6	8	9—10	1
6—8	8	1—3	8	14—15	1

4.2 算例 2

算例 2 的给出的条件如算例 1,但线路 9—12 和线路 13—15 是已规划好的线路,即这两条线路为必选线路,则该算例的配电网网架结构如图

6 所示。

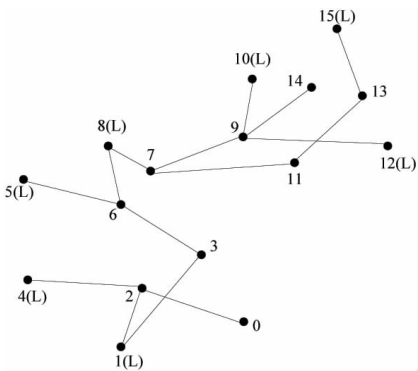


图 6 优化后的网架结构

Fig. 6 Optimized grid structure

把交叉点为末梢的边删除,得到新的配电网网架结构如图 7 所示。

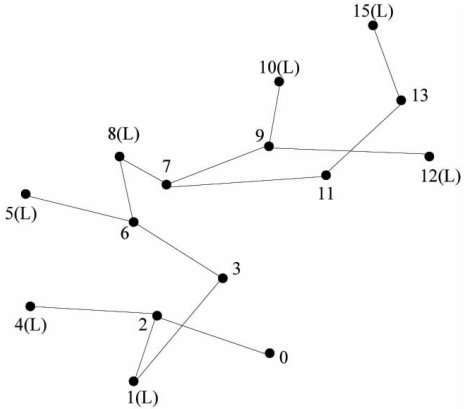


图 7 优化后的网架结构

Fig. 7 Optimized grid structure

在得到配电网网架结构的基础上,再用程序调整每条边的导线截面,最终得到费用最省的运行方案如表 6 所示。

表 6 算例 2 新的网架线路和导线型号

Tab. 6 New grid line and wire model of example 2

边起 —终	导线 型号	边起 —终	导线 型号	边起 —终	导线 型号
9—12	1	1—2	8	0—2	8
13—15	1	6—8	8	2—4	1
7—8	5	11—13	1	5—6	1
7—9	3	3—6	8	9—10	1
7—11	1	1—3	8		

上面两个算例分别从待建线路中有无已确定线路两个方面,运用最小生成树算法,很好地验证了该算法在配电网网架优化规划中的可行性。通过两个

算例的比较可知,如果供电部门对网架规划线路没有特别要求,则运用最小生成树算法可得到最优的规划结果,但若由于一些地理等其它因素导致某些线路为必选线路,则得到的结果可能在经济上不是最优的但却是最符合实际的最优方案。

5 结论

配电网规划是一个复杂的大规模的数学组合优化问题,文章从配电网网架规划的数学模型入手,将线路的建设费用和运行费用之和作为目标函数,利用最小生成树算法,求解优化结果^[18]。两个算例分析验证了该算法的可行性和有效性。

需要说明的是,文章采用的基于最小生成树规划方法是属于传统启发式方法,适用于小规模配电网网架规划,针对大规模配电网规划,需要采用现代启发式方法,这是进后研究的重点。

参考文献:

- [1] 蒋泽甫,何向刚,张莎. 基于可靠性的配电网规划的思考[J]. 贵州电力技术,2014,17(5):11-13.
JIANG Zepu, HE Xianggang, ZHANG Sha. Consideration on distribution network planning based on reliability[J]. Guizhou Electric Power Technology,2014,17(5):11-13.
- [2] 肖小兵,陈建国,高吉普,等. 基于地区电网的配电网规划及其评估研究[J]. 贵州电力技术,2014,16(6):24-26.
XIAO Xiaobing, CHEN Jianguo, GAO Jipu, et al. Research on distribution network planning and evaluation based on regional power grid[J]. Guizhou Electric Power Technology,2014,16(6):24-26.
- [3] 陈根军,王磊,唐国庆. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划[J]. 电网技术,2001,25(6):21-24.
CHEN Genjun, WANG Lei, TANG Guoqing. An ant colony optimization method for transmission network expansion planning[J]. Power System Technology,2001,25(6):21-24.
- [4] MARCO DORIGO, VITTORIO MAIE, ALBERTO COLORNI. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transaction on Systems Man & Cybernetics - Part B,1996,26(3):1-13.
- [5] 谢敏东,王磊,唐国庆. 遗传算法在多目标电网优化规划中的应用[J]. 电力系统自动化,1998,22(10):20-22.
XIE Jingdong, WANG Lei, TANG Guoqing. Application of genetic algorithm in multi-objective power network optimization planning[J]. Automation of Electric Power System,1998,22(10):20-22.
- [6] 陈根军,王磊,唐国庆,等. 基于 Tabu 搜索的配电网规划[J]. 电力系统自动化,2001,25(7):40-44.
CHEN Genjun, WANG Lei, TANG Guoqing, et al. Distribution system planning by TABU search approach[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(7):40-44.
- [7] MARCO DORIG, LUCA MARIA GAMBARDILLA. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,1997,1(1):53-66.
- [8] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [9] 李炳宇,萧蕴诗,汪镭. PSO 算法在工程优化问题中的应用[J]. 计算机工程与应用,2004,18(3):74-76.
LI Bingyu, XIAO Yun, WANG Lei. Application of Particle Swarm Optimization in engineering optimization problem[J]. Computer Engineering and Applications,2004,18(3):74-76.
- [10] DAI Hongwei, YU Yinxin, HUANG Chunhua, et al. Optimal planning of distribution substation locations and sizes-model and algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System,1996,18(6):353-357.
- [11] 余始鑫,张崇见. 城市电网中压配电变压器的模糊优化规划[J]. 中国电机工程学报,2000,20(4):23-28.
YU Yixin, ZHANG Chongjian. Fuzzy optimal planning of MV/LV transformers in urban distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(4):23-28.
- [12] 吴文传,张伯明. 三相不平衡配电网的潮流故障统一分析方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(20):50-54.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. A uniform approach for power flow analysis and fault analysis of asymmetrical three-phase distribution system[J]. Automation of Electric Power System,2002,26(20):50-54.
- [13] T. H. CHEN, M. S. CHEN, K. J. HWANG, et al. Distribution system rigid approach[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1991,6(3):1146-1152.
- [14] TENG Jenhao. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2003,18(3):882-887.
- [15] 刘宗歧,鲍巧敏,孙春山,等. 基于改进 Kruskal 算法的含分布式发电的配网孤岛划分算法[J]. 电工技术学报,2013,28(9):164-171.
LIU Zongqi, BAO Qiaomin, SUN Chunshan, et al. Islanding algorithm of distribution system with distributed generations based on improved Kruskal Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):164-171.
- [16] 曹昕璐,卫志农,沈海平,等. 考虑电网结构脆弱性的配电网网架优化规划[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):178-183.
CAO Xinyu, WEI Zhinong, SHEN Haiping, et al. Planning for distribution network structure optimization in consideration of its vulnerability[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(2):178-183.
- [17] 刘健,杨文宇. 基于最小生成树算法的配电网架扩展规划[J]. 电力系统自动化,2005,29(17):34-39.
LIU Jian, WANG Wenyu. Distribution networks expansion

planning based on improved minimum-cost spanning tree [J].

Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 34-39.

- [18] 杨志平, 文波, 洪彬倬. 基于不确定规划理论的配电网优化规划[J]. 广东电力, 2016, 29(5): 46-53.

YANG Zhiping, WEN Bo, HONG Binzhao. Optimization planning for power distribution network based on uncertain programming theory[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(5): 46-53.

收稿日期: 2018-01-22

作者简介:



傅 昌(1987), 男, 本科, 工程师, 主要从事基建配电网项目管理及其运行研究工作。

(本文责任编辑: 王 燕)

Research on distribution network optimization planning based on Minimum Spanning Tree Algorithm

FU Chang¹, HONG Binzhao²

(1. Heyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Heyuan 517000 Guangdong, China;

2. Yangjiang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Yangjiang 529500 Guangdong, China)

Abstract: Distribution network is an important part which connects transmission system and electric auxiliary system, so the rationality of the distribution network affects the efficient operation of the entire power grid directly. This paper achieved the reasonable optimal planning of distribution network based on the minimum spanning tree algorithm. First, it builds the distribution network structure optimization mathematical mode with an objective function and a set of constraints and introduces a power flow calculation of distribution network. Then it illustrates the basic theory of the minimum spanning tree algorithm and uses the minimum spanning tree algorithm to make a research on the structure optimization of distribution network. For the results of direct Kruskal algorithm use are not satisfied, some reasonable processing is made. Finally, using two examples of 10 kV single-source radiation networks to verify the method, the result shows that the minimum spanning tree algorithm in this paper is feasible and effective to realize the structure optimization of distribution network.

Key words: distribution network; optimal planning of distribution network; minimum spanning tree algorithm; traverse adjustment