

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.015

考虑电网结构脆弱性的配电网网架优化规划

曹昕瑀¹, 卫志农¹, 沈海平², 吴霜¹, 孙国强¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省电力公司无锡供电公司, 江苏 无锡 214061)

摘要: 基于复杂网络理论,从网络拓扑结构角度对配电网网架结构的脆弱性进行评估。建立了以配电网投资及运行费用最小、结构脆弱性指标最优为目标的配电网网架多目标优化规划模型。采用改进最小生成树算法,并将经济性指标的减少率和结构脆弱性指标的增长率之和作为迭代过程中的目标函数,将多目标问题转化为单目标进行求解,通过16节点算例验证了该方法在求解多目标配网优化规划问题中的可行性。算例结果表明,所建立的优化规划模型能够有效地评估配电网的结构脆弱性,并能求得结构稳定、经济性好的规划方案。

关键词: 配电网规划; 电网结构脆弱性; 改进最小生成树算法; 多目标优化规划模型

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0178-06

Planning for distribution network structure optimization in consideration of its vulnerability

CAO Xinyu¹, WEI Zhinong¹, SHEN Haiping², WU Shuang¹, SUN Guoqiang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Wuxi Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: Based on the complex network theory, the structural vulnerability of a distribution network was assessed from the view of topology of structures. A multi-objective planning model for distribution network optimization was built, with aims to minimize the summation of investment and operation cost, as well as to optimize the structural vulnerability index. An improved minimum-cost spanning tree algorithm was adopted to optimize this planning model. By using the sum of the decrement rate of the economic target and the increment rate of the structural vulnerability target as the objective functions in the iteration process, the multi-objective problem could be solved as a single-objective problem. Results of a sample system with 16 nodes verify the feasibility of the proposed method used for multi-objective structure optimization of the distribution network. The developed planning model can effectively evaluate the structural vulnerability of a distribution network, so as to acquire an optimal planning scheme with a stable structure and with little cost.

Key words: distribution network planning; structural vulnerability of distribution network; improved minimum-cost spanning tree algorithm; multi-objective planning model

近年来,电力系统大停电事故频繁发生,造成了巨大的经济损失和严重的社会影响,引起了人们对电网安全性和可靠性的广泛关注。配电网作为连接电力系统和用户的纽带,决定了电力系统能否安全、稳定、经济地供电。研究配电网的脆弱性,有助于发现电网的缺陷和构建更加稳定的电力网络。在配电网网架规划过程中考虑电网脆弱性因素,对于建设稳定电网具有十分重要的现实意义。

随着电网规模的日益扩大和电力系统元件间相互作用的日益复杂,基于微分方程理论的传统电力系统脆弱性分析无法对电力系统的脆弱性水平进行全面、科学地定量评估。复杂网络理论从电网拓扑结构入手,

为分析研究电力系统脆弱性提供了全新思路。对于给定电网,其网络拓扑结构是唯一的,决定了其内在的、本质的特性。电网结构脆弱性是从网络连接性角度描述电网拓扑结构的可靠性,描述了网络抵御破坏的能力,是电网脆弱程度的固有反映。在电力网络中运用复杂网络理论方法,能够对电网的结构脆弱性做出准确评估,寻求稳定的网络拓扑结构。目前,已有许多专家学者运用复杂网络理论对电网结构的脆弱性进行分析研究^[1-6],但主要是针对 110 kV 及以上电压等级的大电网。杨丽徒等^[7-8]借鉴复杂网络理论在大电网结构脆弱性评估中的思路,对配电网网络拓扑结构进行分析,得出了衡量配电网架结构的参数和指标。

配电网结构优化规划的主要任务是在供电变电站的分布情况、负荷位置及其大小已经确定的前提下,寻求优良的网络拓扑结构,使预设的目标函数达到最优,同时满足辐射状网架结构等约束条件。目前已有多种方法能够得到比较理想的规划结果^[9-10],包括遗传算法^[11]、Tabu 搜索算法^[12]、蚁群算法^[13]、粒子群算法^[14]和基于地理信息系统的方法^[15]等。但这些优化算法计算量大,花费时间长。刘健等^[16]提出了一种改进的最小生成树算法,显著降低了计算复杂度,减少了优化时间。

笔者拟在运用复杂网络理论对配电网结构脆弱性进行评估的基础上,建立考虑经济性指标和电网脆弱性指标的多目标配电网优化规划模型,并通过对迭代过程中条件判据的改进,将多目标模型转化为单目标模型,采用改进的最小生成树算法进行求解,得到了较优的规划方案。

1 基于复杂网络理论的配电网结构脆弱性评估

令负荷及线路交叉点为网络中的节点,线路为网络中的边,将配电网简化为一个无向有权网络 $G=(V,E)$,其中, V 为点集, E 为边集,且节点数为 n ,边的条数为 m 。电源节点的边权值为基本权值加 1,若联络节点连接的边仅有 2 条,则略去该节点,若大于 2 条,则将该节点按负荷节点处理。

要对配电网结构脆弱性进行评估,首先须求得以下参数及指标:

a. 网络各边的权值 w_{ij} :指的是节点 i 和节点 j 之间直接相连边 $\{i,j\}$ 的权值,由线路的等值阻抗即电气距离 L 决定。取网络中最小的 L 为基准值,其权值设为 1;其余各条线路权值的初始值由其电气距离与 L 的比值确定。 w_{ij} 越小,表示节点间的联系越紧密,且由于 G 为无向网络,有 $w_{ij}=w_{ji}$ 。

b. 网络各节点的边权值 s_i :与节点 i 直接相连的全部边的权值倒数和,即

$$s_i = \sum_{j \in N_i} \frac{1}{w_{ij}} \tag{1}$$

式中: N_i ——与节点 i 直接相连边的集合。

由式(1)可见, s_i 越大,节点 i 与周围节点的关系越紧密,在网络中的位置越重要。

c. 节点位置重要度 l_i :节点 i 到其他各节点的最短路径权值的平均值,即

$$l_i = \frac{1}{n} \sum_{j \neq i} l_{ij} \tag{2}$$

式中: l_{ij} ——与节点 i 直接相连的边置 1 后,节点 i 到节点 $j(j=1,2,\cdots,n)$ 间最短路径的权值。

由式(2)可见,节点的位置重要度 l 越小,该节点越重要。

d. 节点的重要度 g_i :

$$g_i = \frac{s_i}{l_i} \tag{3}$$

由式(3)可见, s_i 越大, l_i 越小, g_i 越大,节点 i 在网络中越重要。

采用网络 G 中所有节点的重要度之和 $\sum_{i=1}^n g_i$ 作为网络的结构脆弱性指标。与 l_i 相比, $\sum_{i=1}^n g_i$ 可以全面地反映网络中各个节点间连接的紧密程度。结构脆弱性指标数值越大,网络结构越稳定。网络为全连通时

$\sum_{i=1}^n g_i$ 最大。

2 数学模型

以线路投资运行的总费用最小及电网结构脆弱性指标最大为优化目标,在满足网架结构辐射性约束、线路的容量约束以及节点电压约束的前提下,建立配电网优化规划模型。

2.1 目标函数

以网架投资费用和线路运行费用之和为目标函数 f_1 , 电网结构脆弱性指标 $\sum_{i=1}^n g_i$ 为目标函数 f_2 :

$$\min f_1 = C_f + C_p \tag{4}$$

$$\max f_2 = \sum_{i=1}^n g_i \tag{5}$$

其中 $C_f = \sum_{t \in D} l_t a_t$ $C_p = \sum_{t \in D} \gamma \tau T \Delta P_t$ $\Delta P_t = 3 I_t^2 \frac{\rho l_t}{\alpha_t}$ $I_t = \sum_{j \in \beta} \frac{P_j}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi}$

式中: C_f ——网架投资费用,万元; C_p ——线路运行费用,万元; D ——新建线路集合; l_t ——第 t 条线路的长度,km; a_t ——第 t 条线路单位长度的投资费用,万元/km; γ ——单位电量的费用系数,元/(kW·h); τ ——年最大负荷利用小时数,h; T ——规划周期,a; ΔP_t ——第 t 边线路的线损,kW; I_t ——第 t 条线路的电流,A; ρ ——电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$; α_t ——第 t 条边的导线截面面积, mm^2 ; p_j ——节点 j 的负荷,kW; U_N ——配电网额定电压,kV; $\cos \varphi$ ——功率因数; β ——第 t 条边的下游所有顶点的集合。

2.2 约束条件

2.2.1 网络结构约束

网架结构规划首先需要解决网络的连通性与辐射性约束问题,即所谓“孤岛”与“环岛”的情形。

2.2.2 容量约束

$$P_t < P_{t \max} \tag{6}$$

式中: P_t ——第 t 条线路有功功率; $P_{t \max}$ ——第 t 条线路有功功率的最大允许值。

2.2.3 节点电压约束

$$U_{i \min} < U_i < U_{i \max} \tag{7}$$

式中: U_i 、 $U_{i \min}$ 、 $U_{i \max}$ ——节点电压、节点电压最小允许值、节点电压最大允许值。

3 考虑结构脆弱性的多目标配电网规划

3.1 改进最小生成树算法

运用最小生成树算法求解配电网优化规划问题,首先要将配电网转化为一个加权图。以配电网的电源点和负荷点为节点,各个顶点间可能架设线路的走廊为边,线路的投资费用和运行费用(主要为线损)之和为各条边的权。采用基本最小生成树算法(本文采用 Kruskal 算法),求得加权图的最短树,即可得到目标函数最小的初步规划方案。在该方案基础上,通过动态调整各条边权值反复迭代的方法,获得最终优化规划结果^[16],具体步骤如下:

步骤1 将所有线路导线截面取为某特定值,从而确定各边的初始权值。

步骤2 采用 Kruskal 算法,求得最小生成树 T_0 ,迭代次数 $d=0$ 。

步骤3 根据 I_t 表达式计算流过 T_d 中各边的电流,依据电流大小调整各边的导线截面,同时,根据 C_t 的表达式计算线路投资费用,根据 C_p 的表达式计算线路线损,得到此时线路的投资运行费用 C_d 。

步骤4 将 T_d 外各边的权值还原为初值,判断 T_d 外是否存在权值小于 T_d 中各边的线路,若存在则将它们按权值从小到大的顺序放入队列 Q 中;否则结束规划,此时 T_d 即为最优规划结果。

步骤5 选取队列 Q 中权值最小的边加入 T_d ,并将此时环路中权值最大的边删除,形成新树 T_{new} ,计算其投资运行总费用 C_{new} 。

步骤6 若 $C_{\text{new}} < C_d$,则令 $d=d+1$, $C_d=C_{\text{new}}$,清零 Q ,转步骤4。

步骤7 若 $C_{\text{new}} > C_d$,则判断队列 Q 是否为空。

若 Q 为空,则此时的 T_d 就是最优规划结果,规划结束;若 Q 不为空,则转步骤5。

上述方法仅以线路总费用为优化目标,无法用来求解多目标优化规划模型。笔者通过改变迭代过程中的条件判据,对该方法进行一定的调整,使之能够用于多目标问题的求解。

3.2 基于改进最小生成树算法的多目标配电网规划

求解多目标电网规划模型的传统方法有多目标权重法等,其思路是将多目标优化问题转化为单目标优

化问题,再运用成熟的单目标优化方法进行求解。由于各个目标的量纲不统一,且权重的确定易受到主观因素影响,所以这类方法难以得到准确客观的优化结果^[3]。基于 Pareto 最优的多目标优化方法通过先寻优后决策的方式,使结果不断逼近真正的最优解集,能够弥补传统方法的不足,但在实现上比较复杂。笔者分别计算出经济性指标的增长率和脆弱性指标的减少率,将两者之和作为改进最小生成树算法迭代过程中的目标函数,可以简便快捷地将多目标问题转化为单目标问题。

设 f'_1 为上一步迭代过程结束后配电网投资运行总费用 f_1 的值, f'_2 为上一步迭代过程结束后结构脆弱性指标 f_2 的值,则在仅考虑经济性的情况下,迭代过程中的条件判据为

$$f_1 < f'_1$$

(8)

综合考虑配电网脆弱性时,将条件判据改进为

$$\frac{f_1 - f'_1}{f'_1} + \frac{f'_2 - f_2}{f'_2} < 0$$

(9)

式中: $(f_1 - f'_1)/f'_1$ ——经济性指标 f_1 增长的比例; $(f'_2 - f_2)/f'_2$ ——脆弱性指标 f_2 减少的比例。

$(f_1 - f'_1)/f'_1$ 与 $(f'_2 - f_2)/f'_2$ 之和可以表示 f_1 和 f_2 总体的变化趋势。若比例之和小于零,则可能为以下3种情况: f_1 减少且 f_2 增大; f_1 、 f_2 均减少,但 f_1 减少的比例大于 f_2 减少的比例; f_1 、 f_2 均增大,但 f_2 增大的比例大于 f_1 增大的比例。此时 f_1 、 f_2 在总体上优于上一步迭代的结果,达到了使线路总费用尽可能小、脆弱性指标尽可能大的优化目的。

4 配电网规划模型求解

将第3节介绍的改进最小生成树算法以及多目标求解方法运用到考虑结构脆弱性的配电网规划问题中,具体求解步骤如图1所示。

5 算例分析

算例采用由16个节点、28条待架支路组成的10 kV辐射形网络^[17],如图2所示。图2中数字为各节点的编号,0号节点为供电首端,带字母F的节点表示负荷点,其余为交叉节点。虚线表示可以架线的走廊。补充如下数据:单位电量费用系数为0.5元/(kW·h),规划周期10 a,年最大负荷利用小时数4 000 h,配电网额定电压10 kV,各个负荷点负荷大小均为350 kW,各个负荷的功率因数 $\cos\varphi$ 为0.85。导线提供LGJ-50、LGJ-70、LGJ-95、LGJ-120、LGJ-150、LGJ-180、LGJ-240共7种型号,且只能单回路架线。

采用改进最小生成树算法,分别求出单目标模型和多目标模型的优化规划方案,并分析引入结构脆弱

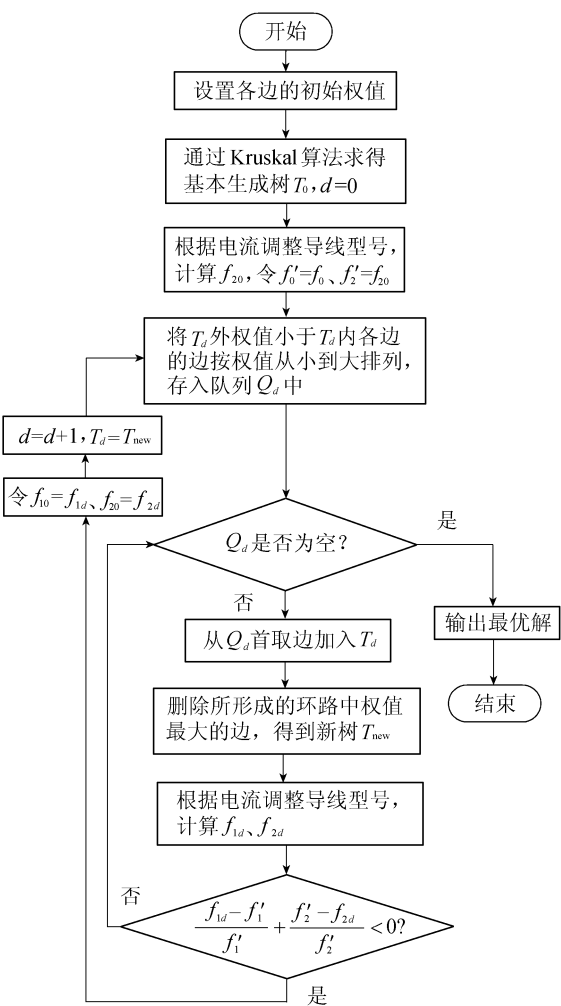


图1 多目标规划求解流程
Fig. 1 Flow chart of multi-objective planning

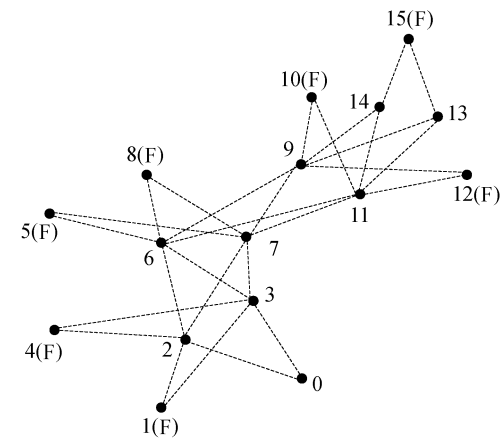


图2 待规划的配电网网络
Fig. 2 Initial distribution network to be planned

性因素对配电网规划结果的影响。图3为仅考虑总费用 f_1 时的规划结果,称之为方案A,选用导线规格如下:路径0—2和6—9的导线截面面积为 95 mm^2 ,路径0—3和3—6的导线截面面积为 240 mm^2 ,其他路径的导线截面面积皆为 50 mm^2 。此时,网架投资运行总费用 f_1 为124.770万元,电网结构脆弱性指标 f_2 为29.541。

图4为综合考虑总费用 f_1 和电网结构脆弱性指标 f_2 时的多目标规划结果,称之为方案B,选用导线规格如下:路径0—2的导线截面面积为 240 mm^2 ,路径0—3、3—7、6—9的导线截面面积为 95 mm^2 ,其他路径的导线截面面积皆为 50 mm^2 。此时,网架投资运行总费用 f_1 为127.935万元,电网脆弱性指标 f_2 为39.643。

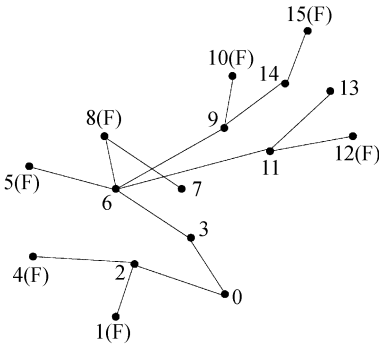


图3 仅考虑经济性的单目标规划结果
Fig. 3 Single-objective planning result considering only economic factors

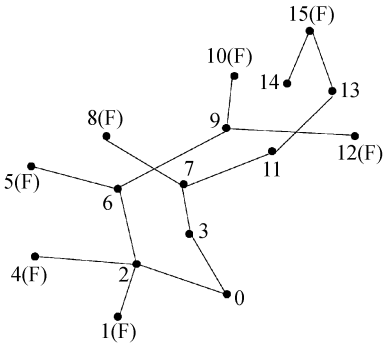


图4 考虑脆弱性时的多目标规划结果
Fig. 4 Multi-objective planning result considering structural vulnerability

由图5可知,在仅考虑经济性时,投资运行总费用迭代曲线平滑递减;由于在规划过程中未考虑脆弱性因素,脆弱性指标迭代曲线无规律波动。在综合考虑脆弱性时,总费用迭代曲线波动递减,脆弱性指标迭代曲线波动递增,这是因为本文所采用的多目标优化算法无法保证下一步迭代结果中的2个指标都优于上一步迭代结果,仅能使其总体上得到一定的优化。以第3步迭代结果为例,总费用虽然比第2步迭代增加了约0.8%,但脆弱性指标比第2步迭代增加了约5%,整体上优于上一步迭代结果。可以看出,本文所采用的基于改进最小生成树算法的多目标规划方法可以综合考虑2个优化指标,得到一个整体最优的规划方案。

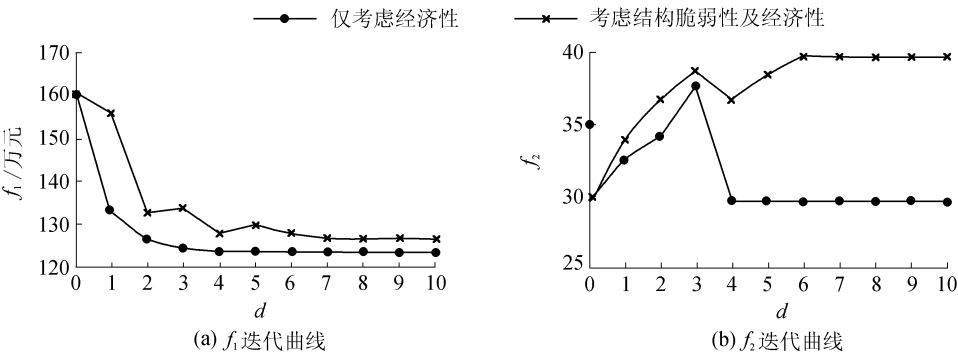


图5 单目标模型及多目标模型优化指标迭代曲线比较

Fig. 5 Comparison of iteration curves of optimal indexes obtained by single and multi-objective models

经比较可知,虽然方案B中 f_1 比方案A增加了2.537%,但是 f_2 却比方案A增加了34.197%,电网结构脆弱性指标得到很大的提高。由图3可知,方案A中大部分节点都通过节点3与供电首端相连,一旦线路0—3出现故障,有12个节点将会失去供电。图4所示的方案B有7个节点通过节点2与供电首端相连,另有6个节点通过节点3与供电首端相连,支路0—2和0—3所连接的负荷节点数量大致相当,使整个网络抵御风险的能力大幅度增强。可以看出,在配电网规划阶段考虑电网结构脆弱性因素有利于提高系统的可靠性。

6 结 语

笔者建立了包含经济性及脆弱性的多目标配电网优化规划模型,并通过对改进最小生成树算法的进一步调整和改进,将多目标模型转化为单目标模型求解。算例结果表明,在规划阶段考虑配电网结构脆弱性,

可以有效提高系统的供电可靠性。结合其他算法进一步提高最终规划方案的性能,将是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等. 电力系统脆弱性理论研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):38-42. (WEI Zhenbo,LIU Junyong,ZHU Guojun, et al. Power system vulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):38-43. (in Chinese))

[2] 蔡泽祥,王星华,任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2012,36(11):114-121. (CAI Zexiang,WANG Xinghua,REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power systems[J]. Power System Technology,2012,36(11):114-121. (in Chinese))

[3] 郭超,彭显刚,王星华,等. 基于复杂网络理论的电网脆弱性研究述评[J]. 广东电力,2011,24(12):23-28. (GUO Chao,PENG Xiangang,WANG Xinghua,et al. Vulnerability analysis of power grid based on complex network theory[J]. Guangdong Electric Power,2011,24(12):23-28. (in Chinese))

[4] 黄映,李杨,翁蓓蓓,等. 考虑电网脆弱性的多目标电网规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):36-41. (HUANG Ying,LI Yang,WENG Beibei,et al. Multi-objective transmission network planning considering power grid vulnerability[J]. Automation of Electric Power System,2010,34(23):36-41. (in Chinese))

[5] 梁颖,方瑞明,卢小芬,等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(20):151-155. (LIANG Ying,FANG Ruiming,LU Xiaofen,et al. Research status of power system vulnerable line identification based on complex-network theory[J]. Power System Protection and Control,2012,40(20):151-155. (in Chinese))

[6] 吴莹燕,林韩,温步瀛,等. 考虑电网状态和网络结构的脆弱线路评估[J]. 华东电力,2013,41(3):519-523. (WU Yingyan,LIN Han,WEN Buying,et al. Vulnerable line evaluation considering power grid running state and structure[J]. East China Electric Power,2013,41(3):519-523. (in Chinese))

[7] 杨丽徙,林茂盛,张宏伟,等. 中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):28-31. (YANG Lixi,LIN Maosheng,ZHANG Hongwei,et al. Invulnerability evaluation of typical network structures for medium voltage distribution network [J]. Automation of Electric Power System,2012,36(1):28-31. (in Chinese))

[8] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等. 基于抗毁性分析的中压配电网络拓扑结构[J]. 电力系统自动化,2013,37(8):65-69. (YANGLixi,ZENGXinmei,FANGQianghua,et al. Medium voltage distribution network topology based on survivability analysis [J]. Automation of Electric Power System,2013,37(8):65-69. (in Chinese))

[9] 章文俊,程浩忠,程正敏,等. 配电网优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(5):16-23,55. (ZHANG Wenjun,CHEN Haozhong,CHEN Zhengmin,et al. Review of distributionnetwork optimal planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2008,20(5):16-23,55. (in Chinese))

[10] 卫志农,陈淮金,洪佩舫,等. 配电系统优化规划[J]. 河海大学学报:自然科学版,1995,23(3):113-116. (WEI Zhinong,CHEN Huaijin,HONG Peisun, et al. Optimal planning for distribution system[J]. Journal of Hohai University: Natural Science,1995,23(3):113-116. (in Chinese))

[11] 鞠平,王勇,李靖霞. 配电网综合规划的遗传算法[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(1):87-90. (JU Ping,WANG Yong,LI Jingxia. Comprehensive planning of distribution networks with genetic algorithm[J]. Journal of Hohai University: Natural Science,2003,31(1):87-90. (in Chinese))

[12] 陈根军,李继洸,王磊,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,LI Jiguang,WANG Lei,et al. Distribution system planning by Tabu search approach[J]. Automation of Electric Power System,2001,25(7):40-44. (in Chinese))

[13] 王志刚,杨丽徙,陈根永. 基于蚁群算法的配电网网架优化规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2002,14(6):73-76. (WANG Zhigang,YANG Lixi,CHEN Genyong. Ant colony algorithm for distribution network planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2002,14(6):73-76. (in Chinese))

[14] 张宪,宛津莎,杨薛明,等. 基于粒子群算法的配电网网架规划[J]. 华北电力大学学报,2006,33(3):14-17. (ZHANG Xian,WAN Jinsha,YANG Xueming,et al. Distribution network planning based on particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University,2006,33(3):14-17. (in Chinese))

[15] 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):48-51,58. (WANG Chunsheng,ZHAO kai,PENG Jianchun. GIS based optimal planning for distribution system using GA[J]. Automation of Electric Power System,2000,24(14):48-51,58. (in Chinese))

[16] 刘健,杨文字,余健明,等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):103-108. (LIU Jian,YANG Wenyu,YU Jianming,et al. An improved minnum-cost spanning tree based optimal planning of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(10):103-108. (in Chinese))

[17] SATISH J,ROY B. Minimum cost analysis of feeder routing in distribution system planning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(4):1935-1940.