

DOI: 10.7667/PSPC161862

配电网规划决策中的可计算性问题研究

郑博文¹, 李姝润², 杨隽¹, 杨承辰¹, 鲍小峰¹, 王承民², 刘涌³

(1. 玉溪供电局, 云南 玉溪 653100; 2. 上海交通大学, 上海 200240;
3. 上海博英信息科技有限公司, 上海 200240)

摘要: 为了对配电网规划问题进行简化, 首先针对配电网规划过程中的不确定性进行分析, 研究了配电网规划决策中的可接受偏差和可计算性问题。通过引入可接受偏差, 将配电网规划问题转化为一个可计算性问题, 建立了配电网规划决策的标准数学模型和算法公式。利用该数学模型和算法对 66 kV 变电站的供电半径规划进行建模计算。计算结果表明, 基于可接受偏差的配电网规划模型和算法是有效和实用的。该模型和算法可以简化配电网规划的流程, 为确定配电网规划原则提供参考。

关键词: 配电网规划; 可计算性; 数学建模; 可接受偏差; 供电半径

Study on computable problems in distribution network planning decision

ZHENG Bowen¹, LI Shurun², YANG Jun¹, YANG Chengchen¹, BAO Xiaofeng¹, WANG Chengmin², LIU Yong³

(1. Yuxi Power Supply Bureau, Yuxi 653100, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Shanghai Proinvent Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to simplify the problem of distribution network planning, the acceptable error and computable problems in distribution network planning are studied after analyzing the uncertainties in the process of distribution network planning. By introducing the acceptable error, the distribution network planning problem is transformed into a computable problem, and the standard mathematical model and algorithm formula of the distribution network planning decision are established. The mathematical model and algorithm are used to calculate the power supply radius of 66 kV substation. Calculation results show that the distribution network planning model and algorithm based on acceptable error are effective and practical. The model and algorithm can simplify the process of distribution network planning and provide reference for determining the principle of distribution network planning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377161).

Key words: distribution network planning; computability; mathematical modeling; acceptable error; power supply radius

0 引言

对于某一个特定的问题, 如果存在一个程序, 能够在有限的步骤内对给定的输入给出对应的输出, 那么这个问题就是可计算的。可计算性问题的研究方法是通过建立数学模型, 将复杂的计算抽象化, 从而试图解决各种数学基本问题。配电网(电网)规划问题首先是一个决策问题, 而所有的决策问题都可以描述为一个优化的数学模型的形式, 这个数学模型可以是线性规划、非线性规划、整数规划或者动态规划等形式, 对这些数学模型进行求解, 就

可以得到规划决策的结果。配电网规划过程中所要进行决策的问题较多, 不可能将整个配电网规划描述为一个完整的数学模型进行决策, 只能是分别对其中的单个问题进行建模和求解。早期配电网规划模型包括变电站规划、网架规划、变电站—网架联合规划以及多阶段规划, 近期配电网规划模型在早期模型的基础上从模型的复杂化、地理信息系统以及分布式供电等方面研究了规划模型的发展^[1]。文献[2-5]采用加权 Voronoi 图算法、微分进化算法以及交替定位分配法等算法对变电站的规划进行了研究。文献[6-8]采用改进粒子群算法、人工鱼群算法以及模糊规划等算法对配电网的网架规划进行了研究。对于多阶段规划, 文献[9]运用改进最小生成树

算法以多阶段供电总成本最小为目标,研究了配电网架的多阶段不确定性规划。考虑分布式电源对配电网架结构的影响,文献[10]采用内外层双层规划的方法对配电网线路结构、分布式电源位置和容量进行综合优化。文献[11]研究了主动配电网中的分布式电源优化规划方案。文献[12]采用双层优化模型研究了分布式电源的综合优化(组合优化、容量优化)和分布式电源间的调度优化。目前的对于配电网规划的研究基本上都是将目标函数表示为投资(包括运维)成本最小化或者效益最大化的经济性形式,满足电力电量平衡的等式(或者不等式)约束以及安全性的不等式约束的形式。

配电网,特别是中、低压配电网,因为覆盖范围广泛、设备数量巨大,在规划决策过程中总是面临很大的不确定性,存在如下问题:1)数学建模不能完全描述所要解决的实际规划问题;2)不确定性导致数学模型中的参数具有一定的误差。也就是说,数学建模与实际的物理系统之间存在一定的误差,也必然导致优化决策的结果存在一定的偏差。因此,配电网的规划只能是基于原则(导则)的规划,而原则(导则)是“粗线条”的,国家电网公司以及各地的电力公司都提出了配电网规划导则。数学建模和仿真计算只能是作为确定规划导则的辅助手段,这些导则都是经过详细的技术经济论证的,都是指导配电网规划的“原则”。存在这样一个事实,规划方案是不可能被“计算”出来的。

基于上述原因,本文首先针对配电网规划过程中的不确定性进行分析,基于可接受偏差对配电网规划决策中仿真计算的可行性进行分析,并建立配电网规划决策的标准数学模型和算法公式,说明简单的二次规划模型和算法是确定配电网规划原则(导则)的必要手段和工具。

1 配电网规划决策过程中的不确定性

1.1 规划决策过程描述

配电网的规划过程就是一个决策的过程,可以描述为如下的函数模型。

$$\begin{aligned} C = \min f(x) \\ \text{s.t.} \begin{cases} h(x) \leq P^D \\ g(x) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 为决策变量,可以是电压等级、供电模式、变电站和线路的容量等; $f(x)$ 目标函数一般表示规划的投资成本以及配电网的运行成本;不等式约束 $h(x)$ 表示电力电量平衡方面的约束, P^D 表示负荷;不等式约束 $g(x)$ 则对应安全性和可靠性方面的约

束限制。此外,存在某些约束和资源限制无法建模的问题。

1.2 规划决策中的不确定性

电网规划受到众多不确定性因素的影响,不确定性因素既包括难以确定的随机性因素,如电气设备的故障、系统停电事故的发生以及某负荷水平出现的时间等,也包括因信息资料不足而无法精确预测其数值的模糊性因素,如负荷预测值、发电机出力以及设备价格、贴现率及电价的模糊性等^[13]。

负荷的不确定性是引起规划方案变化的主要原因。由于需求侧管理等技术的推进,负荷预测的难度增加,而且负荷预测由于温度变化和城市发展等因素影响存在一定的误差。为了解决负荷预测不准确的问题,文献[14]提出了区间性负荷条件下的中压配电网规划方法;文献[15]应用盲数理论对含有大量不确定性信息的负荷预测进行建模,以各负荷变化区间的可行度为权系数进行加权平均得到负荷预测值。

成本的不确定性也是影响规划方案的一个重要因素。供电企业担负的输电、变电、配电及售电业务,是电力生产经营过程中的一部分,其所发生的成本属供电成本。往往很多电网规划方案都要以供电总成本最小为决策目标。文献[16]建立了以模糊供电总成本最小为优化目标的电网规划模型,并对其求解方法进行了研究。文献[17]提出了以投资回收费用、设备折旧维修费用和电能损耗费用之和为目标函数,以输送功率、辐射运行及 $N-1$ 原则为约束的最小费用模型。

由于不确定性因素的存在,再精确的数学模型和算法都是没有意义的,配电网规划是基于原则的规划。本文基于可接受偏差建立的二次规划模型可以更简单地求解。

2 可接受偏差与可计算性

配电网规划是一个求解最优化问题的过程,求解最优化问题得到的结果会存在一定的误差。在工程实际中,存在可接受偏差水平的问题。通过计算规划结果的相对误差,将其与可接受偏差进行对比,可以得出规划结果是否可行。由此可见,引入可接受偏差,配电网规划问题成为了一个可计算性问题。

将配电网的投资和运行成本描述为二次函数的形式。

$$f(x) = ax^2 + bx + c + \varepsilon_f \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 表示设备成本以及电价等的常数,本身也存在一定的偏差; ε_f 表示二次函数与 $f(x)$ 的

偏差,其中包括了由常数 a 、 b 、 c 不确定性带来的偏差;如果不包括常数 a 、 b 、 c 带来的偏差,则 ε_f 实际上为 $f(x)$ 泰勒展开后的三次以上项总和。将不等式约束进行线性化。

$$h(x) = dx + e + \varepsilon_h \leq P^D + \varepsilon_p \quad (3)$$

$$g(x) = wx + q + \varepsilon_g \leq 0 \quad (4)$$

式中, ε_h 、 ε_g 、 ε_p 分别表示等式约束、不等式约束与负荷预测的误差。当不考虑参数偏差情况下, ε_h 、 ε_g 为不等式约束 $h(x)$, $g(x)$ 泰勒展开后二次以上项的总和。增广的拉格朗日函数为

$$L = ax^2 + bx + c + \varepsilon_f + \alpha(dx + e + \varepsilon_h - P^D - \varepsilon_p) + \beta(wx + q + \varepsilon_g) \quad (5)$$

因为拉格朗日函数代表了整个决策过程的经济性,因此规划决策过程的误差可以由下式得出:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \alpha(\varepsilon_h - \varepsilon_p) + \beta\varepsilon_g \quad (6)$$

相对误差可以表示为

$$\gamma = \frac{\varepsilon_f + \alpha(\varepsilon_h - \varepsilon_p) + \beta\varepsilon_g}{ax^2 + bx + c} \times 100\% \quad (7)$$

针对式(5)的拉格朗日函数,库恩-塔克条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x} = 2ax + b + \alpha d + \beta w = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x} = dx + e + \varepsilon_h \leq P^D + \varepsilon_p \\ \frac{\partial L}{\partial x} = wx + q + \varepsilon_g \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

解得

$$x^{(*)} = \arg \min f(x) \in \left\{ -\frac{b}{2a}, \frac{P^D - e + (\varepsilon_p - \varepsilon_h)}{d}, \frac{-(q + \varepsilon_g)}{w} \right\} \quad (9)$$

式中:上标 $(*)$ 表示最优解;当 $x^{(*)} = -\frac{b}{2a}$ 时,

$\alpha^{(*)} = \beta^{(*)} = 0$; 当 $x^{(*)} = \frac{P^D - e + (\varepsilon_p - \varepsilon_h)}{d}$ 时,

$\alpha^{(*)} = -2a(P^D - e + \varepsilon_p - \varepsilon_h) - bd$, $\beta^{(*)} = 0$; 而当

$x^{(*)} = \frac{-(q + \varepsilon_g)}{w}$ 时, $\beta^{(*)} = 2a(q + \varepsilon_g) - bw$, $\alpha^{(*)} = 0$ 。

将上述最优化的结果代入式(7)中,可以计算出相对误差的值。

在工程实际中,存在可接受偏差水平的问题。例如,我国工程项目的投资估算在规划阶段的误差要求不超过30%。也就是

$$\gamma = \frac{\varepsilon_f + \alpha^{(*)}(\varepsilon_h - \varepsilon_p) + \beta^{(*)}\varepsilon_g}{ax^{(*)2} + bx^{(*)} + c} \times 100\% \leq \gamma_0 \quad (10)$$

式中, γ_0 表示可接受的偏差水平。可接受偏差说明了项目投资的可行性,如果一个项目的投资估算偏差过大,则此项目实施的可行性就较差。因此,可接受偏差水平是论证一个项目可行与否的关键因素。

如上所述,当对函数 $f(x)$ 、 $h(x)$ 、 $g(x)$ 进行泰勒展开、二次化和线性化后,偏差 ε_f 、 ε_h 、 ε_g 取决于 $(x - x_0)$,以拉格朗日型余项来表示。

$$\begin{cases} \varepsilon_f = \frac{f^3(\xi)}{6}(x - x_0)^3 \\ \varepsilon_h = \frac{h^2(\xi)}{2}(x - x_0)^2 \\ \varepsilon_g = \frac{g^2(\xi)}{2}(x - x_0)^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x \leq \xi \leq x_0$; $x \rightarrow x_0$ 时,偏差 ε_f 、 ε_h 、 ε_g 可以认为是比 $(x - x_0)^n$ 还高阶的无穷小量。实际应用时,通常认为 $x \rightarrow x_0$,所以偏差 ε_f 、 ε_h 、 ε_g 可以忽略。忽略掉偏差 ε_f 、 ε_h 、 ε_g 后,式(6)中的规划决策过程的误差变为

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \alpha(\varepsilon_h - \varepsilon_p) + \beta\varepsilon_g = -\alpha\varepsilon_p \quad (12)$$

由此可见,实际计算时,可以忽略偏差 ε_f 、 ε_h 、 ε_g ,只考虑负荷预测的偏差,而负荷预测的偏差可以根据规划的年限来进行估计。

3 案例分析

配电网变电站规划包括对主变压器数量和容量的规划以及供电半径的规划等。本文假设变压器的数量和容量已知,采用文献[18]提出的供电半径优化模型进行建模计算。

(1) 目标函数

假设规划区域的总面积为 A ,待建的变电站数量为 $A/(\pi x^2)$,考虑固定资产折旧系数为 λ ,则规划模型的目标函数为

$$C = \frac{A}{\pi x^2} [\lambda(C_1^b + C_1^{H1} + C_1^{L1}) + C_2^b + C_2^{H1} + C_2^{L1}] \quad (13)$$

式中: C_1^b 表示变电站投资成本; C_1^{H1} 表示进线投资成本; C_1^{L1} 表示出线投资成本; C_2^b 表示变压器年运行成本; C_2^{H1} 表示进线年运行成本; C_2^{L1} 表示出线年运行成本。

(2) 约束条件

不等式约束为主变压器容量满足“N-1”约束。

$$\frac{\sigma\pi x^2}{(M-1)\cos\varphi_b} \leq \Delta S \quad (14)$$

式中, 平均负荷密度 σ 可用式(15)表示。

$$\sigma = \frac{P^D + \varepsilon_p}{A} \quad (15)$$

综上, 变电站规划总成本最小的优化模型如下:

$$\begin{cases} \min C = \frac{A}{\pi x^2} [\lambda(C_1^B + C_1^{H1} + C_1^{L1}) + C_2^b + C_2^{H1} + C_2^{L1}] \\ \text{s.t. } \frac{\sigma\pi x^2}{(M-1)\cos\varphi_b} \leq \Delta S \end{cases} \quad (16)$$

当将目标函数进行二次化、约束条件线性化表示之后, 规划决策模型及其求解过程实际上可以通过如式(9)所示的方式求解, 非常简便。因为配电网规划的关键是确定规划原则, 按照式(9)所示的结果来确定原则也可以满足工程需要。

沈阳市和平区砂山街道占地面积 4.28 km², 该区域预测负荷为 175.48 MW。在该区域建设 66 kV 变电站, 并对变电站的供电半径进行规划, 规划各部分投资成本及参数如表 1 所示。

表 1 66 kV 变电站电气设备投资成本及参数表

Table 1 Investment costs and parameters of electric equipment for 66 kV substation

电气设备	设备型号	造价
主变压器	2×31.5 MV·A	16 万元/(MV·A)
	$\Delta P_d = 145 \text{ kW}$	
	$\Delta P_0 = 28 \text{ kW}$	
66 kV 进线	YJLV22-3×300	10 万元/km
10 kV 出线	$r^H = 0.1295 \Omega/\text{km}$	7 万元/km
	$r^L = 0.1612 \Omega/\text{km}$	

变压器和线路的功率因数为 $\cos\varphi_b = \cos\varphi_l = 0.95$, 出线回数为 $N=4$, 最大负荷利用小时数 $\tau=5600 \text{ h}$, 电价取 $\omega=0.646 \text{ 元/kWh}$, 固定资产折旧率 $\lambda=2.5\%$ 。则优化模型为

$$\begin{cases} \min f(x) = \min[\frac{4.28}{\pi x^2}(1536.1x^5 + 485.4x^4 + 2.4x + 56.89)] \\ \text{s.t. } h(x) = \frac{40.78}{x^2} \geq P^D + \varepsilon_p \end{cases} \quad (17)$$

通过曲线拟合将目标函数二次化为式(2)的形式

$$f(x) \approx 10970x^2 - 14640x + 5562 + \varepsilon_f \quad (18)$$

由于城区中压线路供电半径不宜大于 3 km, 不

宜小于 0.2 km。因此本文取 0.2~3 km 的部分进行曲线拟合。原函数曲线与拟合函数曲线对比如图 1 所示。

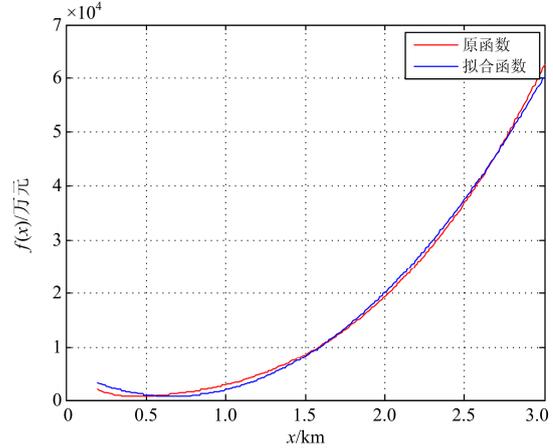


图 1 原函数与拟合函数曲线对比

Fig. 1 Contrast of the original function and the fitting function curve

对于不等式约束, 由于 1 km 是变电站典型的供电半径, 所以, 将 $h(x)$ 在 $x=1$ 处进行泰勒展开, 得到

$$h(x) = -81.56x + 122.34 + \varepsilon_h \quad (19)$$

忽略偏差 $\varepsilon_f, \varepsilon_h$ 。负荷预测偏差与规划年限之间的曲线关系如图 2 所示。该地区配电网规划周期为 20 年, 可从曲线图中估计出负荷预测偏差 $\varepsilon_p = 19.5\%$ 。

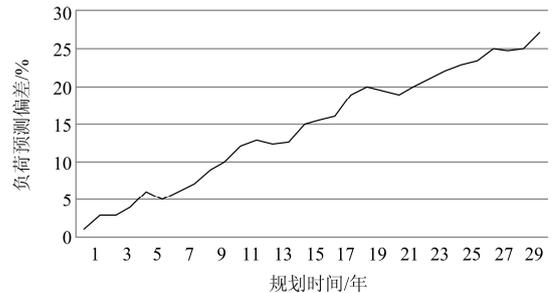


图 2 负荷预测偏差与规划年限关系曲线图

Fig. 2 Load forecast deviation and the planning period curve

在将目标函数进行二次化、约束条件线性化表示之后, 利用式(9)进行求解, 得: $x^{(*)} = 0.667 \text{ km}$, 将该结果代入式(10)中, 计算出相对误差: $\gamma = 10.23\% \leq 30\%$, 在可接受的偏差范围之内, 因此该计算结果满足工程需要。

4 结论

在配电网规划阶段, 无论是中长期、短期还是

滚动规划都面临众多不确定性因素的影响, 导致规划方案与实际配电网之间有很大的差距, 造成规划结果的可执行程度较差。由于不确定性因素的存在, 再精确的数学模型和算法都是没有意义的, 配电网规划是基于原则的规划。本文在针对配电网规划过程中的不确定性进行分析的基础上, 基于可接受偏差建立了配电网规划决策的数学模型, 并通过一个实际的规划算例验证了模型和算法的可行性。在实际工程应用时, 应用本文提出的数学模型进行规划可以更加简单快捷地进行求解。

参考文献

- [1] 孔涛, 程浩忠, 李钢, 等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 92-99.
KONG Tao, CHENG Haozhong, LI Gang, et al. Review of power distribution network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 92-99.
- [2] 曹昉, 孟琦斌, 苗培青, 等. 基于改进加权 Voronoi 图和遗传算法的变电站规划[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 511-516.
CAO Fang, MENG Qibin, MIAO Peiqing, et al. Optimal substation planning based on improved weighted Voronoi diagram and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 511-516.
- [3] 王玉瑾, 王主丁, 张宗益, 等. 基于初始站址冗余网格动态减少的变电站规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 39-43.
WANG Yujin, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. Substation planning based on initial substation site decrease in redundant meshes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 39-43.
- [4] 刘自发, 张伟. 基于地理信息因子及自适应小生境微分进化算法的变电站规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 42-47.
LIU Zifa, ZHANG Wei. Substation planning based on geography information factor and adaptive niche differential evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 42-47.
- [5] 葛少云, 王世举, 路志英, 等. 基于分布式电源置信容量评估的变电站规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 61-67.
GE Shaoyun, WANG Shiju, LU Zhiying, et al. Substation optimization planning method based on capacity credit evaluation of distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 61-67.
- [6] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-125, 16.
SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125, 16.
- [7] 程晓荣, 张秋亮, 王智慧, 等. 基于人工鱼群算法的配电网网架优化规划[J]. 继电器, 2007, 35(21): 34-38.
CHENG Xiaorong, ZHANG Qiuliang, WANG Zhihui, et al. Distribution network structure planning based on AFSA[J]. Relay, 2007, 35(21): 34-38.
- [8] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 基于模糊期望值模型的配电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 200-206.
YANG Yi, WEI Gang, ZHOU Bing, et al. Distribution network planning based on fuzzy expected value model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 200-206.
- [9] 杨文宇, 刘健. 配电网架的多阶段不确定性规划[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 89-95.
YANG Wenyu, LIU Jian. Distribution network multi-stage planning considering uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 89-95.
- [10] 张彼德, 何颀, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.
- [11] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [12] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on

- two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.
- [13] 赵书强, 李勇, 王春丽. 基于可信性理论的输电网规划方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 166-171.
ZHAO Shuqiang, LI Yong, WANG Chunli. Transmission network expansion planning based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 166-171.
- [14] 王赛一. 不确定性条件下的城市配电网规划方法探讨[J]. 华东电力, 2008, 36(4): 66-69.
WANG Saiyi. Urban distribution network planning with consideration of uncertainties[J]. East China Electric Power, 2008, 36(4): 66-69.
- [15] 常勇, 束洪春, 朱文涛, 等. 电网规划的负荷预测盲数建模方法研究[J]. 云南水力发电, 2007, 23(4): 1-4, 8.
CHANG Yong, SHU Hongchun, ZHU Wentao, et al. The unascertained number modelling method research of load forecast in electric power network plan[J]. Yunnan Water Power, 2007, 23(4): 1-4, 8.
- [16] 张焰, 陈章潮, 谈伟. 不确定性的电网规划方法研究[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 16-19, 23.
ZHANG Yan, CHEN Zhangchao, TAN Wei. An approach for transmission system planning incorporating uncertainties[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 16-19, 23.
- [17] 刘晓飞, 彭建春, 高效, 等. 基于单亲遗传算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 52-56.
LIU Xiaofei, PENG Jianchun, GAO Xiao, et al. Distribution network planning based on partheno-genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 52-56.
- [18] 王璞, 王承民, 张焰, 等. 城市配电网规划中变电站最佳供电半径及容量的实用计算方法[J]. 电气应用, 2011, 30(23): 38-41.
WANG Pu, WANG Chengmin, ZHANG Yan, et al. A practical method to determine the optimal power supply radius and the capacity of transformers in urban distribution network planning[J]. Electrotechnical Application, 2011, 30(23): 38-41.

收稿日期: 2016-11-08; 修回日期: 2017-01-19

作者简介:

郑博文(1983—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力可靠性管理和研究; E-mail: 52586066@qq.com

李姝润(1993—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: shurun_li@163.com

杨隽(1982—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为科技管理和研究。E-mail: 576764646@qq.com

(编辑 张爱琴)