

多电压等级电网协同规划的容载比优化配置方法

王凯亮¹, 何卓怡¹, 叶健鹏¹, 林译涵², 马雨欣²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523287; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 容载比作为指导电网规划的重要指标, 对变电站定容选址、线路规划建设起到决定性影响。计及多电压等级电网差异性提出了一种多层级电网协同规划的容载比优化配置方法。模型以建设成本为目标函数, 考虑多电压等级变电站和线路协同规划, 结合贝叶斯优化算法(Bayesian optimization algorithm, BOA)与遗传算法(genetic algorithms, GA), 提出规划模型的BOA-GA求解算法。所提模型能够自动形成多电压等级电网规划方案, 并测算多电压等级电网最优容载比配比和电网建设各部分最优投资配比。研究表明, 长时间尺度下电网多电压等级容载比配比与电网整体建设投资大体呈现为二次函数关系, 关系曲线呈向上开口的椭圆抛物面形状。实际地区配网算例证明, 该模型能实现多电压等级容载比的优化配置和网架结构的自动规划, 在满足各项技术指标的同时, 电网建设成本显著减少, 经济性得到有效提升, 所提方法能为多电压等级电网协同规划提供有效的理论和方法指导。

关键词: 电网协同规划; 容载比优化配置; 多电压等级; BOA-GA 算法

Optimization Method of Capacity-to-Load Ratio in Collaborative Planning of Multi-Voltage Level Power Grid

WANG Kailiang¹, HE Zhuoyi¹, YE Jianpeng¹, LIN Yihan², MA Yuxin²

(1. Dongguan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523287, China; 2. College of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The capacity-to-load ratio is an important indicator to guide the power grid planning, and has a decisive influence on the selection of substation capacities and the construction of power lines. A capacity-to-load ratio optimization method considering collaborative planning of multi-voltage level power grids is proposed in this paper, which aims to minimize the construction cost and takes into account the synergetic planning of substations and power lines of multi-voltage levels. By combining the Bayesian optimization algorithm (BOA) and genetic algorithms (GA), a BOA-GA solving algorithm for the planning model is proposed. This algorithm automatically generates planning schemes for multi-voltage level power grids, and obtains the optimal capacity-to-load ratio, as well as the optimal investment of the power grid construction. Additionally, the study reveals that the relationship between capacity-to-load ratio and the overall investment of power grid construction is a quadratic function over a long time scale, and the curve is a parabola going upwards. Case studies demonstrate that the proposed model can achieve optimal configuration of multi-voltage level capacity-to-load ratio and automatically plan the network structure. The construction cost is significantly reduced while various technical indicators are satisfied. The proposed method can provide effective theoretical and methodological guidance for multi-voltage level power grid synergetic planning.

Key words: network collaborative planning; optimization of capacity-to-load ratio; multi-voltage levels; BOA-GA algorithm

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077080); 广东电网电力规划专题研究项目(031900QQ00210003)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077080); the Power Planning Special Research Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(031900QQ00210003).

0 引言

容载比是指在某一电压等级下供电区域内变电容量总和与该区域内年网供最大负荷的比值,是反映特定供电区域内电网宏观供电能力、检验电网供电可靠性和经济性的重要指标之一^[1-3]。容载比取值过大,变电站容量在实际运行过程中得不到充分利用,电网投资效益不明显;容载比取值过小,电网适应性差,调度困难,电网安全性难以得到保障,且为满足电网可靠性指标,下级线路的投资成本将大幅上升^[4-5]。因此,容载比不仅与网架结构和供电可靠性有直接联系,而且还影响配电网建设资金的合理投入与利用。

现有针对容载比的研究大多数都针对单一电压等级电网,探讨容载比的理论计算方法。文献[6]给出了容载比的定义、推荐范围以及容载比理论计算各相关因素的取值,认为变电容载比大小与变电站布点位置、数量、相互转供能力相关,即与电网结构有关。文献[7]通过BP神经网络的方法,对负荷同时率进行预测,求得负荷分散系数与推荐容载比数值。文献[8]从经济性的角度出发,考虑了扩建投资费用、机会成本、运行维护费用以及变压器设备的残值问题,通过比较满足可靠性的各类扩建方案的经济性,确定了储备系数及容载比。文献[9]针对偏远山区配电网经济发展落后、负荷分布分散,容载比偏高的情况,计及地域因素、负荷分散度、经济性与技术性,提出一种针对偏远地区的容载比算法改进模型。

对于多电压等级电网,如果上级电网容载比取值过大,上级电网建设冗杂,建设效益低下;如果上级电网容载比取值过小,为了保障供电稳定性,下级电网的建设费用会大幅增长。此时,电网整体建设费用增加电网整体投资效益同样降低。因此,研究不同电压等级的容载比协同优化,具有深刻的研究意义。针对不同电压等级容载比对比对电网规划的影响,文献[10]建立一种以经济性整体最优为目标函数的多电压等级配电网容载比优化模型,但该模型对经济性的考虑较为简单,只计及变电站的建设成本及内部设备的购置成本,没有考虑容载比对比的变化对线路分布的影响。文献[11]通过优化模型求取变电站的最优储备寿命周期,从而求得负荷发展储备系数,并推导得到最优容载比;文献

[12]以供电能力最大为目标函数,提出一种基于离散粒子群算法的多电压等级交流电网容量配置优化方法,但却缺少对经济性优化的考量。文献[13]提出了一种基于多参数规划的主配网协同优化运行方法,讨论了配网装机水平对系统运行产生的影响,其侧重在了主配网内发电资源的协同优化配置,缺少了规划层面的考虑。

目前,对容载比优化配置的研究大多集中在单电压等级的理论计算上。为了考虑不同地区负荷分布、电网发展建设差异性对容载比配置的影响,本文提出一种多电压等级电网协同规划的容载比配比优化方法,所提方法满足电网精准投资需求,能为地区电网规划建设提供更有效的指导。

本文的主要贡献如下。

1) 结合多电压等级电网协同规划模型和黑盒优化模型,建立多电压等级电网协同规划的容载比优化配置方法,有效实现对多电压等级电网的容载比配比和投资配比的优化。

2) 建立多电压等级电网协同规划模型,综合考虑220 kV、110 kV和10 kV多个电压等级的电网规划,智能生成最优容载比配比下的变电站布点规划和网架设计方案,为电网规划的数智赋能、高效管理提供技术支持。

3) 提出多电压层级电网协同演化模型和推演算法,实现长时间尺度、不同规划场景下进行配电网网络演化发展模拟,提出协同规划投资策略,为多电压层级电网规划建设时序安排提供理论论证。

1 多电压等级电网协同规划模型

1.1 规划模型的目标函数

多电压等级电网协同规划是在满足系统运行约束的前提下,考虑系统负荷矩与线路建设成本,通过对变电站选址、线路连接关系的优化配置,达到规划整体建设及运维成本最优,因此建立以下的目标函数。

$$\min z = P_1 z_1 + P_2 (z_2 + z_3) \quad (1)$$

式中: z_1 为变电站负荷矩; z_2 、 z_3 分别为110 kV、10 kV线路建设成本,由于线路建设成本与线路长度正相关,所以后续计算将采用线路长度代表线路建设成本; $P_i(i=1, 2)$ 为多目标规划模型的优先因子,表示多目标规划模型中各个目标的优先级。由于线路的规划建设取决于变电站选址, P_1 对比 P_2 具

有更大优先级。针对该多目标规划模型,本文将采用序贯式算法将其分解为多个单目标规划问题。

1.2 序贯式算法分解

序贯式算法是根据目标函数优先级的先后次序,将规划问题分解成一系列的单目标规划问题,再依次求解的优化方法。该方法可与其他优化算法兼容,具有适应性好、计算速度快等优点。式(1)提出的多目标规划模型可以依据优先级分别分解为各级变电站选址规划、110 kV线路规划和10 kV线路规划3个单目标规划模型,再通过其他优化算法进行计算。

1.2.1 变电站选址规划

变电站选址规划以系统负荷矩最小为规划目标^[14-15],认为当系统内所有负荷矩的总和最小时变电站能够深入负荷分布中心,电网的经济性与稳定性达到最优^[16]。因此,建立的相应的变电站选址规划模型表示为:

$$\min z_1 = \sum_{i=1}^{n_G} \sum_{j=1}^{n_L} W_j l_{ij} d_{ij} \quad (2)$$

$$d_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_G} d_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n_L \quad (4)$$

式中: n_G 为待规划的变电站数量; n_L 为待规划区域负荷分布点数量; $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 为变电站 i 与负荷点 j 的距离; W_j 为负荷等效节点的负荷总量; d_{ij} 表示变电站 i 与负荷点 j 的连接关系,存在连接关系为1,没有为0。

假设每个变电站容量一定,已知规划区域负荷数据和220 kV和110 kV电压等级容载比要求,可求得220 kV和110 kV变电站的数量为:

$$n_G \geq \frac{R_{G,\min} \sum P}{S_G} \quad (5)$$

式中: n_G 为220 kV和110 kV变电站数量; S_G 为单个220 kV和110 kV变电站容量; $R_{G,\min}$ 为规划区域220 kV和110 kV电压等级容载比最低要求; $\sum P$ 为规划区域的负荷总量。

1.2.2 110 kV线路规划

实际配电网中,线路交叉迂回,供电、联络关系复杂,电网规划模型及其求解过程数据量大、计算复杂^[16]。因此,对于规模庞大的配电网可以采用分区规划方法,将复杂的区域电网规划问题转化为

若干个相对独立的小规模供电分区电网规划^[18],如图1所示。

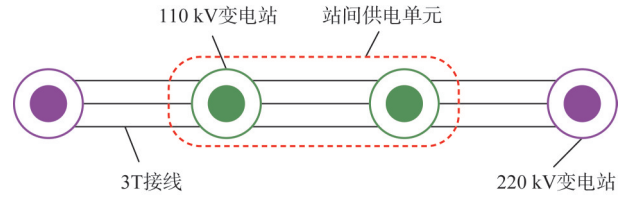


图1 110 kV供电分区方式

Fig. 1 110 kV power supply zoning mode

对110 kV线路规划,以线路建设成本最小为规划目标,由于线路建设成本与线路长度正相关,将目标函数简化为线路长度。相应的110 kV线路规划优化模型可表示为:

$$\min z_2 = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h L_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

$$x_{ij} = 1 \text{ 或 } 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{h-1} x_{ij} = 1, j = 2, 3, \dots, h-1 \quad (8)$$

$$\sum_{j=2}^h x_{ij} = 1, i = 2, 3, \dots, h-1 \quad (9)$$

$$u_j \geq u_i + Mx_{ij} - M + q_j, 1 \leq i \neq j \leq h-1 \quad (10)$$

$$u_i \leq \sqrt{3} I_{\max} U \eta, i = 1, 2, \dots, h-1 \quad (11)$$

式中: L_{ij} 为变电站 i 与变电站 j 的距离; x_{ij} 为变电站 i 与变电站 j 的连接矢量关系; h 为供电分区内规划变电站的数量; M 为任一极大的辅助参数; q_j 为第 j 个变电站的负荷总量及自身厂用电负荷; 站间供电单元中 u_i 的最大值为该站间互联线路的承载负荷总和; $I_{\max}$ 为线路最大安全运行电流; U 为当前电压等级; η 为特定接线下的负载率上限,假设110 kV线路选取3T典型接线方式,则 η 为67%。

约束条件参考了旅行商问题,式(8)~(9)考虑了线路线行的路径约束,保障每一个110 kV变电站都有两个220 kV变电站作为上级电源;式(10)~(11)中的辅助参数 u 与 M ,是防止110 kV线路发生闭环的约束,并通过计算每条线路的负载总量,提出线路负载率约束。

1.2.3 10 kV线路规划

对于10 kV线路规划,同样以线路建设成本最小为规划目标,由于线路建设成本与线路长度正相关,将目标函数简化为线路长度。相应的10 kV线

路规划优化模型可表示为:

$$\min z_3 = \sum_{i=1}^{n_G} \sum_{j=1}^{n_L} l_{ij} d_{ij} \quad (12)$$

$$d_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{n_G} d_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n_L \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{n_L} W_j d_{ij} \leq e_i S_i \cos \varphi, i = 1, 2, \dots, n_G \quad (15)$$

式中: e_i 为第 i 个变电站的负载率; S_i 为第 i 个变电站的容量; φ 为变电站的功率因数。式(15)考虑了 110 kV 变电站的负载率约束。10 kV 线路拟采用“三供一备”(三回主供线路, 一回备用线路)的接线方式, 其中, 三条主供线路均来自主供站, 备供线路来自备供站。

1.2.4 规划模型的经济性计算

多电压等级电网协同规划模型主要需要考虑 220 kV、110 kV 变电站建设成本及 110 kV、10 kV 线路的建设成本, 具体如下:

$$C = C_{\text{sub}} + C_{\text{line}} \quad (16)$$

式中: C 为电网规划整体建设成本; C_{sub} 为变电站整体建设成本; C_{line} 为线路整体建设成本。

其中, 变电站整体建设成本为:

$$C_{\text{sub}} = \sum C_1 + C_2 + C_3 \quad (17)$$

式中: C_1 为变电站建造土地费用; C_2 为变电站建造施工费用; C_3 为变电站建造设备费用。

线路整体建设成本为:

$$C_{\text{line}} = (C_{L,110\text{kV}} + C_{T,110\text{kV}}) l_{110\text{kV}} r + (C_{L,10\text{kV}} + C_{T,10\text{kV}}) l_{10\text{kV}} r \quad (18)$$

式中: $C_{L,110\text{kV}}$ 、 $C_{L,10\text{kV}}$ 分别为 110 kV、10 kV 线路单位长度造价; $C_{T,110\text{kV}}$ 、 $C_{T,10\text{kV}}$ 分别为 110 kV、10 kV 电缆沟、管单位长度造价; $l_{110\text{kV}}$ 、 $l_{10\text{kV}}$ 分别为 110 kV、10 kV 线路的规划长度; r 为线路铺设路径的曲折系数。

2 多电压等级电网容载比的黑盒优化

黑盒优化算法是在无法求解函数或数学模型梯度的情况下将函数或数学模型视作一个黑盒, 忽略内部机制, 直接通过目标函数输出和输入函数进行最优解搜索的优化算法。现有的黑化算法主要包括网格搜索法、随机搜索法、贝叶斯优化算法等。

通过多电压等级电网协同规划模型确立了特定容载比配下的电网最优规划方案, 本文将以规划

方案的建设成本作为优化目标, 以式(5)的多电压等级容载比配 $R_{G,\min}$ 作为决策变量, 通过黑盒优化模型, 通过对 $R_{G,\min}$ 进行最优解搜索, 对多电压等级电网的容载比配进行优化计算。

多电压等级电网容载比的黑盒优化模型如图 2 所示。

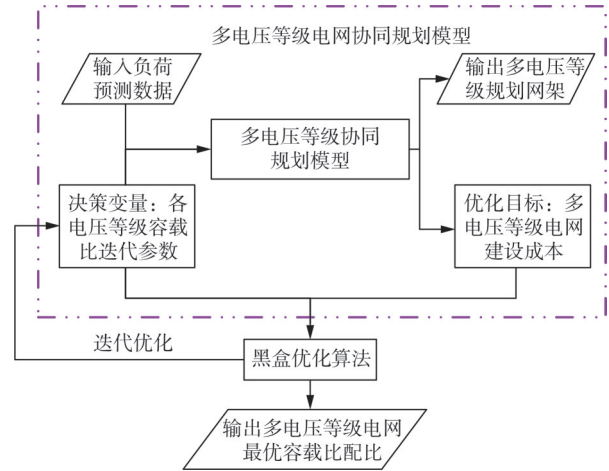


图2 多电压等级电网容载比的黑盒优化

Fig. 2 Black-box optimization of capacity-load ratio of multi-voltage power grid

多电压等级电网的容载比配优化, 以特定容载比配下的电网最优规划方案建设成本为优化目标, 各电压等级容载比迭代参数作为决策变量, 通过黑盒优化算法, 可以求得多电压等级电网的最优容载比配, 并根据多电压等级电网协同规划模型, 输出多电压等级最优规划网架及相应建设成本。

3 模型求解

3.1 改进 GA 算法

遗传算法(genetic algorithms, GA)是 60 年代中期提出的一种基于自然选择原理和自然遗传机制的优化方法^[19-20], 它的本质是通过群体搜索技术和迭代寻优过程。改进 GA 算法的具体算法流程如下。

为实现迭代寻优, 改进 GA 算法首先针对变量, 采用一定形式的码串进行编码, 本文采用十进制编码, 用随机数列 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 作为染色体, 其中 $0 \leq \omega_i \leq 1$, 并由随机数决定染色体的值, 形成初始群体。针对每条染色体, 根据目标函数求取相应的适应度值, 根据个体的适应度决定算子是否被保留^[21-22], 若个体适应度大则被保留的概率大, 反之

则越容易被淘汰,从而选取一定比例的精英个体。采用改进型交叉操作,根据“门当户对”的交叉原则,将父代依照适应度值进行排序,适应度值高的父代与适应度值高的父代交叉配对,适应度值低的父代与适应度值低的父代交叉配对,并采用混沌序列决定交叉点,对配对父代个体进行交叉操作^[23]。改进GA算法的变异操作作为与交叉操作并列的独立模块,将根据给定的变异率,随机选取染色体,对随机染色体的特定基因采用混沌序列进行变异,从而得到新的子代染色体。重复进行以上的遗传过程,直到满足迭代寻优条件。

3.2 BOA算法

贝叶斯优化算法(Bayesian optimization algorithm, BOA)是一种黑盒优化算法,用于求解表达式未知的函数的极值问题^[24-27]。为了求解未知函数 $f: x \rightarrow \mathbb{R}$ 的最小值对应变量 $x^* = \operatorname{argmin} f(x)$, BOA算法首先初始化采样点数据集 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i)\}$,其中 $y_i = f(x_i)$ 。针对现有的观测数据, BOA算法采用概率代理模型 M 代替评估代价高昂的复杂目标函数进行评估,概率代理模型较常见采用GP高斯过程回归来计算每一处 $f(x)$ 函数值的方差和均差。根据均值和方差构造采集函数 S ,求得采集函数极大值的所在点 $x_{i+1} = \operatorname{argmin} S(x, p(y|x, D))$,以确定下一个采样点,并计算得采样点的函数值 $y_{i+1} = f(x_{i+1})$ 。将该采样点 $D_i = (x_i, y_i)$ 加入现有数据集,不断重复直至迭代停止,最终从数据集中选得 y_i 最小值即为函数 $f(x)$ 的最优解 $x^* = \operatorname{argmin} f(x)$ 。

3.3 模型的BOA-GA算法求解方法

基于BOA-GA算法的多电压等级电网容载比优化求解过程如图3所示。

通过将改进GA算法与BOA算法相结合,可以在优化多电压等级容载比配比的同时,输出电网最优规划方案。BOA-GA算法可以有效的根据最优建设成本为优化目标,输出多电压等级电网最优容载比配比及规划方案。BOA-GA算法求解步骤如下。

1) 初始化各电压等级容载比采样数据点 X_n ,其中 $X_n \rightarrow \mathbb{R}$ 为多电压等级的容载比配比。

2) 根据 X_n 确定变电站规划分布数量,对不同电压等级变电站选址及接线关系进行种群编码及初始化。

3) 根据多电压等级电网协同规划模型的目标

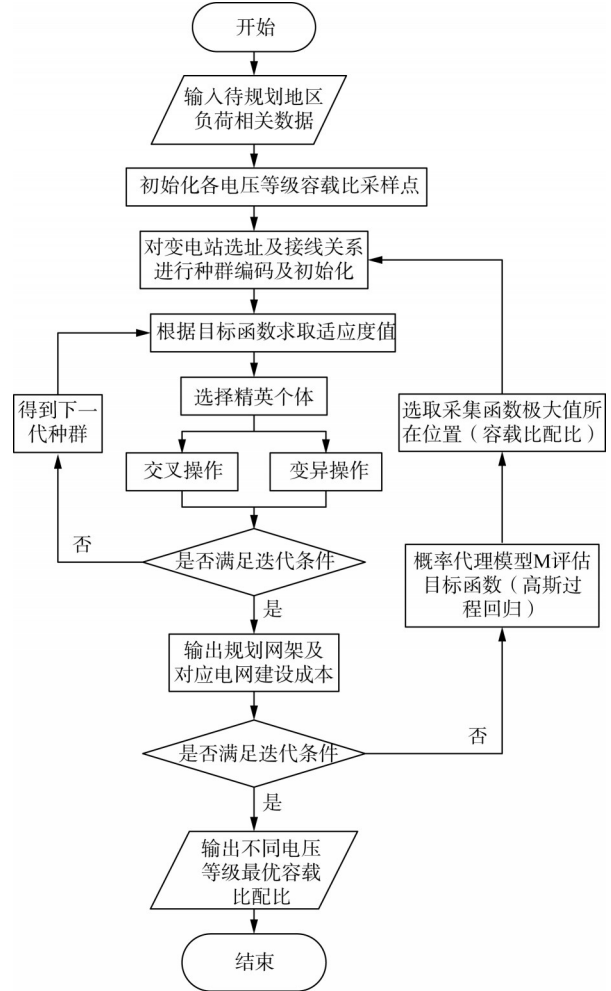


图3 基于BOA-GA算法的多电压等级电网容载比优化求解

Fig. 3 Optimization of multi-voltage power grid capacity-load ratio based on BOA-GA algorithm

函数计算种群适应度,并记录种群的最优染色体及最佳适应值。

4) 选取精英个体进行交叉操作及变异操作,更新种群并重新计算种群适应度。

5) 判断种群适应度是否满足迭代条件,本阶段迭代条件为:在一定迭代次数内,种群最小适应度已无法继续下降。若满足迭代条件,则输出规划网架及对应规划建设成本,否则转入步骤4)重复执行该流程。

6) 整合各电压等级容载比采样数据点 X_n 及对应规划建设成本 Y_n ,形成初始化采样点数据集 $D = \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$,采用GP高斯过程回归对 X_n 与 Y_n 间的关系进行评估,并采用EI采集函数确定下一个采样点位置 X_{n+1} 。

7) 重复步骤2)~6),直至满足迭代条件,本

阶段迭代条件为：已进行 30 轮的贝叶斯优化迭代。输出采样点数据集记录的最优采样点，得到多电压等级最优容载比配比及对应规划建设成本。

4 算例分析

本文采用某地区电网的现状数据进行算例分析，计算环境和相关说明如下。

1) 使用 MATLAB 编写程序，运行环境为 AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics 2.90 GHz, 16G RAM。

2) 变电站选址规划中改进遗传迭代次数 epoch 取 2000；种群规模 INDIVIDUAL_NUM 取 216；交叉概率 CROSS_RATE 选取 0.5；变异概率 UPTATE_RATE 选取 0.003。

3) 线路规划中改进遗传迭代次数 epoch 取 200；种群规模 INDIVIDUAL_NUM 取 800；交叉概率 CROSS_RATE 选取 0.5；变异概率 UPTATE_RATE 选取 0.5。

5) 在变电站布址规划模型中，每一座 220 kV 变电站容量选取为 3×240 MVA，占地 0.01 km^2 ；每一座 110 kV 容量选取为 3×63 MVA，占地 0.0033 km^2 。

6) 规划模型中工程建设成本相关参数选取如表 1 所示。

表 1 工程建设成本相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of project construction cost

工程名称	单位造价
110 kV 变电站建造施工及设备费用 ($3/3 \times 63$ MVA)	6 177 万元/座
220 kV 变电站建造施工及设备费用 ($3/3 \times 240$ MVA)	17 600 万元/座
110 kV 电缆工程(不含管沟)	605 万元/km
110 kV 电缆通道(电缆沟)	574 万元/km
110 kV 电缆通道(排管)	455 万元/km
10 kV 电缆工程(不含管沟)	33 万元/km
10 kV 电缆通道(电缆沟)	330 万元/km
10 kV 电缆通道(埋管)	262 万元/km
城区占地费用	28 800 万元/ km^2

针对某待规划地区的负荷现状数据进行仿真分析，其负荷分布如图 4 所示，负荷分区着色深浅代表该负荷分区负荷密度的高低，圆点为负荷分区的位置中心，视为对应负荷分区的等效负荷节点。该算例共有 220 个等效负荷节点，2020 年共计负荷 2 013.74 MW。该地区 2025 年和 2035 年预测负荷

值分别为 2 734.83 MW 和 3 316.22 MW，前五年负荷增长率为 35.81%，后 10 年负荷增长率为 21.26%。

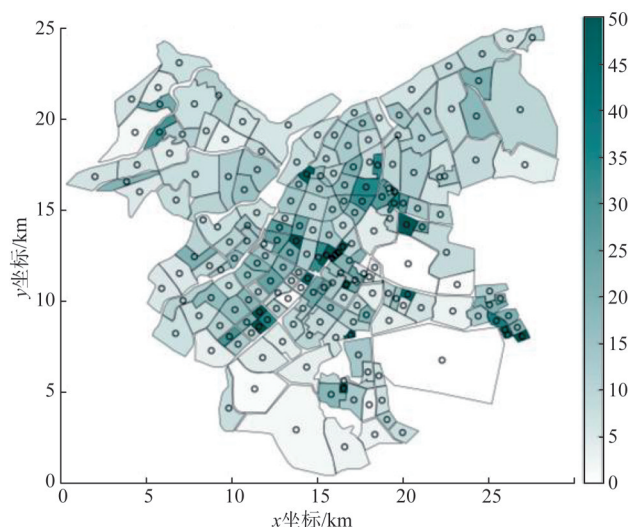


图 4 某地区电网的负荷分布数据

Fig. 4 Load distribution data of a regional power grid

采用本文提出的多电压等级电网容载比优化方法对该待规划地区进行规划，贝叶斯优化算法构建的代理模型的概率分布如图 5 所示，各建设成本如表 1 所示，由图 5 可见，目标函数(多电压等级电网规划的建设成本)的最小值集中在 220 kV 电压等级容载比为 1.7 和 110 kV 电压等级容载比为 1.9 的邻近区域。其中，求得目标函数最小的 220 kV 与 110 kV 电压等级的最优容载比配比为 1.704 3:1.93。根据《城市电力网规划设计导则》^[6]，220 kV 变电站容载比的推荐值为 1.6~1.9，110 kV 变电站容载比的推荐值为 1.8~2.2，本文多电压等级电网容载比优化方法求得容载比最优配比符合《城市电力网规划设计导则》对应规范要求。

图 6 为多电压等级电网容载比优化方法输出的最优多层级电网规划网架与该地区实际电网的 220 kV 变电站分布及 110 kV 线路分布的对比，其中，紫色变电站为规划/实际电网的 220 kV 变电站，绿色变电站为规划/实际电网的 110 kV 变电站，棕色线路为 110 kV 线路走线。

由图 6 可见，模型输出的 220 kV 布点同样分布于东北、东侧、西北、西南、东南 5 个方向，但规划更贴近中心部分，可以进一步减少线路的建设成本；同时，规划模型极大节省了 10 kV 线路的建设

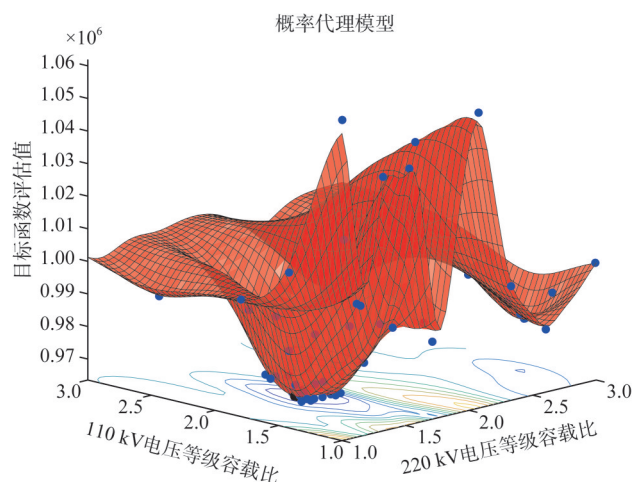


图5 贝叶斯优化算法构建的概率代理模型

Fig. 5 Probabilistic agent model based on Bayesian optimization algorithm

长度,降低了线路对负荷供电的网损成本;并且模型对原网架中的线路接线模型进行了优化,将原有的放射式接线模型改为了3T接线方式和三供一备的接线方式,提高了对供电范围内负荷的供电稳定性。模型输出网架方案计及负荷转供路径规划,满足 $N-1$ 原则,供电可靠性高。

根据式(16)~(18)可求得所提模型的规划方案建设成本,与实际电网建设成本进行对比,呈现如表2所示。

如表2所示,规划地区的容载比配比合理,220 kV变电站与110 kV变电站的建设成本符合实际电网建设需求;我们的模型考虑110 kV线路的 $N-1$,增强了110 kV线路的投资建设,进一步提高供电可靠性。同时,规划方案合理分布110 kV变电站和线路,大幅减少了10 kV线路的建设投资,使得整体电网建设成本降低。基于BOA-GA算法和容载比优化的多电压等级协同规划方案建设成本总计221.34亿元,与实际电网建设成本239.64亿元相比,节约了18.30亿元,配网投资削减7.64%,变电站布点更为合理,电网运行更可靠经济。

结合前文图5可得,长时间尺度下电网多电压等级容载比配比与电网整体建设投资大体呈现为二次函数关系,关系曲线呈向上开口的椭圆抛物面形状,抛物面焦点对应电网整体投资最小的多电压等级容载比配比,此时,220 kV变电站与110 kV变电站投资比例为40.42% : 59.58%,高压配电网(考虑220 kV变电站、110 kV变电站及110 kV线

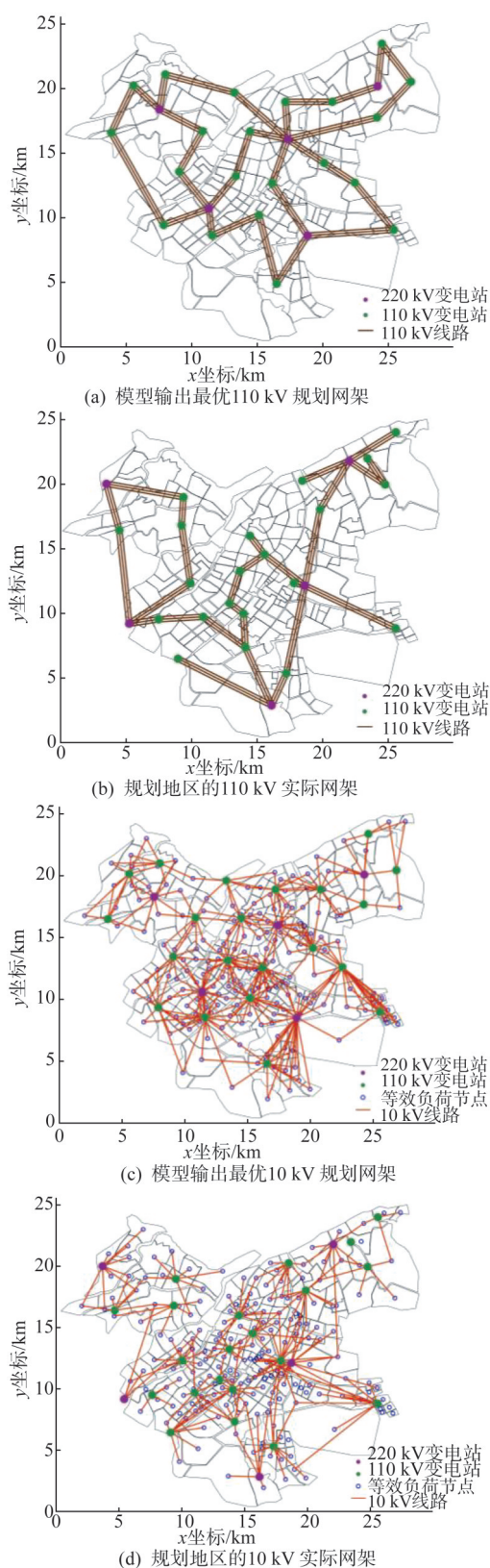


图6 模型输出最优规划网架与实际网架对比

Fig. 6 Comparison between the model output optimal planning power grid and the actual power grid

表 2 模型规划电网与实际电网建设成本对比

Tab. 2 Comparison of construction costs between model planned power grid and actual power grid 万元

规划项目	实际网架建设成本	规划方案建设成本
220 kV 变电站	88 000. 00	88 000. 00
110 kV 变电站	129 717. 00	129 717. 00
110 kV 线路	213 127. 73	245 032. 89
10 kV 线路	1 965 576. 60	1 750 634. 19
总计	2 396 421. 33	2 213 384. 07

路)与中压配电网(考虑 10 kV 线路)投资比例为 20.91%:79.09%。

基于本文构建模型,针对不同负荷体量电网进行算例验证,得到表 3 的容载比推荐值。

表 3 不同体量电网实验容载比推荐值

Tab. 3 Recommended value of capacity load ratio of power network with different load capacity

负荷密度 (MW·km ⁻²)	负荷增长率/%	220 kV:110 kV 容载比推荐配比
<10	<6	1.62:1.86
<10	6~20	1.90:2.09
>10	<6	1.70:1.93
>10	6~20	1.96:2.14

可以看到,不同地区、不同电网发展水平、不同负荷体量下最优容载比推荐值存在差异,所提方法能对地区电网容载比的优化配置和电网建设方案制定提供理论参考。

5 结语

本文提出多电压等级电网协同规划容载比配比优化方法,该模型能够结合待规划区域的实际负荷分布情况,获取多电压等级的最优容载比配比,并输出该容载比配比下的最优网架规划;提出基于 BOA-GA 的规划模型求解算法,该方法具有全局寻优能力强、适应性高、求解速度快等优点。

所提方法对多电压等级电网协同规划和建设具有理论指导意义。针对实际电网进行算例分析,结果表明,长时间尺度下电网多电压等级容载比配比与电网整体建设投资大体呈现向上开口的椭圆抛物面关系;模型输出的容载比最优配比符合规划导则要求,规划方案合理,有助于提高电网的可靠性,电网建设投资大大减少,电网运行更经济。

参考文献

- [1] CHEN X, TANG J, LI W, et al. Operational reliability and economy evaluation of reusing retired batteries in composite power systems[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(5): 3657–3673.
- [2] 李慧, 罗奇, 张柏林, 等. 直流电抗器对 VSC-MTDC 输电系统稳定性的影响分析[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2641–2650.
- [3] LI Hui, LUO Qi, ZHANG Bolin, et al. Impact of DC reactors on stability of VSC-MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2641–2650.
- [4] 王凌谊, 陈允鹏, 王志敏, 等. 面向电网产能优化的设备利用效率评价及应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(11): 73–78.
- [5] WANG Lingyi, CHEN Yunpeng, WANG Zhimin, et al. Equipment utilization efficiency evaluation aiming at power grid capacity optimization and its application[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 73–78.
- [6] 杨楠, 黎索亚, 李宏圣, 等. 考虑负荷预测误差不确定性的配电网中压线路差异化规划方法研究[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1907–1916.
- [7] YANG Nan, LI Suoya, LI Hongsheng, et al. Differential planning method of MV lines of distribution network considering load forecasting error uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1907–1916.
- [8] 潘龙, 王合闯, 楚明月, 等. 联网运行下微型电网电压自愈控制方法[J]. 电源学报, 2019, 17(4): 140–147.
- [9] PAN Long, WANG Hechuang, CHU Mingyue, et al. Method of voltage self-healing control for micro-grid under network operation[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(4): 140–147.
- [10] 中华人民共和国能源部、建设部. 城市电力网规划设计导则: Q-GDW 156—2016[S]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [11] 尚晋, 何奉禄, 蔡广林, 等. 基于神经网络算法的 10kV 配电变压器容载比[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 143–148.
- [12] SHANG Jin, HE Fenglu, CAI Guanglin, et al. Capacity-load ratio of 10 kV power distribution transformer based on neural network algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 143–148.
- [13] 张建波, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于经济性分析的城网变电容载比取值方法研究[J]. 继电器, 2007, 35(13): 39–43.
- [14] ZHANG Jianbo, LUO Diansheng, YAO Jiangang, et al. Research on value of capacity-load ratio in urban power network planning based on the economical analysis[J]. Relay, 2007, 35(13): 39–43.
- [15] 李世新, 周步祥, 唐浩, 等. 偏远地区配电网容载比的算法改进模型[J]. 电测与仪表, 2016(10): 27–31.
- [16] LI Shixin, ZHOU Buxiang, TANG Hao, et al. The improved algorithm model of capacity-load ratio in distribution network of remote areas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016(10): 27–31.
- [17] 陈浩, 张焰, 俞国勤, 等. 多电压等级配电网最优容载比的计算方法[J]. 电气应用, 2011, 30(1): 25–29.
- [18] CHEN Hao, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Calculation method of optimal capacity load ratio for multi-voltage distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2011, 30(1): 25–29.
- [19] LI Z K, LIU D W, WEI C F, et al. Optimal capacity-load-

- ratio research of the multi-voltage distribution network [J]. Advanced Materials Research, 2013(614): 733 – 742.
- [12] 任鹏, 牛为华, 李鹏, 等. 多电压等级交流电网容载比计算方法[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 170 – 178.
- REN Peng, NIU Weihua, LI Peng, et al. Calculation method of capacity load ratio of multi voltage AC power network [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 170 – 178.
- [13] 姜拓, 方必武, 陈亦平, 等. 基于多参数规划的主配网协同优化运行方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9): 10 – 19.
- JIANG Tuo, FANG Biwu, CHEN Yiping, et al. Coordinative optimal operation method of transmission and distribution networks based on multi-parametric programming [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9): 10 – 19.
- [14] 张林垚, 王凯, 吴桂联, 等. 基于归一负荷矩的配电网台区负荷裕度分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 10 – 15.
- ZHANG Linyao, WANG Kai, WU Guilian, et al. Normalization load moment based analysis for distribution area's load margin [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 10 – 15.
- [15] 王漪. 建筑工程电气负荷中心的矢量计算[J]. 建筑电气, 2019, 38(12): 45 – 49.
- WANG Yi. Vector calculation of electrical load center of building engineering [J]. Building Electricity, 2019, 38 (12): 45 – 49.
- [16] 胡斌, 王绪利, 叶斌, 等. 一种基于改进负荷矩的台区电压快速估算方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 46 – 51.
- HU Bin, WANG Xuli, YE Bin, et al. A fast estimation method of station voltage based on improved load moment [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 46 – 51.
- [17] 明煦, 王主丁, 王敬宇, 等. 基于供电网格优化划分的中压配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 159 – 164, 186.
- MING Xu, WANG Zhuding, WANG Jingyu, et al. Medium-voltage distribution network planning based on mesh optimization generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 159 – 164, 186.
- [18] 任泓宇, 王主丁, 张超, 等. 高压配电网网格化规划优化模型和方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 151 – 158.
- REN Hongyu, WANG Zhuding, ZHANG Chao, et al. Optimization model and method for mesh planning for high-voltage distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 151 – 158.
- [19] MIRJALILI S. Genetic algorithm [M]//Evolutionary algorithms and neural networks, Berlin: Springer, 2019: 43 – 55.
- [20] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future [J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 8091 – 8126.
- [21] 陈玮光, 胡晓静, 郑鑫, 等. 基于改进遗传算法的变电站巡检机器人行驶轨迹优化[J]. 广东电力, 2021, 34(6): 48 – 54.
- CHEN Weiguang, HU Xiaojing, ZHENG Xin, et al. Optimization of traveling track of inspection robot in substation based on improved genetic algorithm [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(6): 48 – 54.
- [22] 吴斌, 杨旭红. 基于改进遗传 PI 和重复控制的三相逆变器并网研究[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 151 – 156.
- WU Bin, YANG Xuhong. Research on grid-connected three-phase inverter based on improved genetic PI and repetitive control [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 151 – 156.
- [23] 李锰, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30 – 38.
- LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30 – 38.
- [24] CHOI W, YANG W, NA J, et al. Feature optimization for gait phase estimation with a genetic algorithm and Bayesian optimization [J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8940 – 8952.
- [25] FRAZIER P I. Bayesian optimization: recent advances in optimization and modeling of contemporary problems [J]. Informatics, 2018(1): 255 – 278.
- [26] 王栋, 李达, 王合建. 基于深度 PCA 与贝叶斯优化的区块链异常交易检测[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 78 – 87, 105.
- WANG Dong, LI Da, WANG Hejian. blockchain abnormal transaction detection based on deep PCA and Bayesian optimization [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 78 – 87, 105.
- [27] 康田雨, 覃智君. 基于超参数优化和双重注意力机制的超短期风电功率预测[J]. 南方电网技术, 2022, 16(5): 44 – 53.
- KANG Tianyu, QIN Zhijun. An ultra-short-term wind power forecasting method based on hyperparameter optimization and dual-stage attention mechanism [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(5): 44 – 53.

收稿日期: 2023-08-17; 网络首发日期: 2024-07-02

作者简介:

王凯亮(1988), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为配电网规划;

何卓怡(1989), 男, 工程师, 学士, 研究方向为配电网规划;

林译涵(1998), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划和中长期负荷预测, from74@163.com。