

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200871

计及分布式电源的乡村地区变电站动态升压规划

肖异瑶¹, 熊宁², 周晨曦³, 钟士元², 舒娇²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510000; 2. 国网江西省电力有限公司经济技术研究院, 江西 南昌 330096; 3. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对当前低密度负荷地区分布式电源(DG)渗透率不断提高、规划期内变电站电压等级过渡缺乏技术支撑的问题, 提出了一种乡村地区有源配电网变电站升压改造规划模型。首先, 针对 35 kV 变电站提前退役升压等情况, 提出了 35 kV 变电站在原有站址升压改造或者在新址新建等场景的全寿命周期成本折算等年值的度量方法。其次, 以规划期整体全寿命周期成本最优为目标, 建立了一种计及 DG 渗透率的乡村地区变电站升压改造规划模型。再次, 为考虑变电站新建或升压后其供电范围变化, 提出了基于加权 Voronoi 图算法和遗传算法相结合的有源配电网低密度地区变电站动态升压规划求解方法, 得到中间年各变电站新建与升压时序。最后, 通过算例验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词: 分布式电源; 动态升压规划; 全寿命周期成本; 加权 Voronoi 图; 配电网; 遗传算法

Booster planning considering dynamic development of load and distributed generator for substations in low-load density areas

XIAO Yiyao¹, XIONG Ning², ZHOU Chenxi³, ZHONG Shiyuan², SHU Jiao²

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China;
2. Economics and Technology Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China;
3. Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: There is a lack of method support for the transition of substation voltage level in the planning period in the circumstance where the Distributed Generation (DG) permeability continues to increase in rural areas. Thus a dynamic boost planning model and method for substations in low-load areas of an active distribution network are proposed. First, we take the situation of 35 kV substation decommissioning and voltage boost ahead of schedule. A measurement method is proposed to take the equivalent annual value of the whole life cycle cost conversion of the of 35 kV substation to be boosted in the existing site and the scene of the voltage boost. Secondly, aiming at the optimal overall life-cycle cost in the planning period, a mathematical model of rural substation booster planning with DG permeability is established. Thirdly, considering the variation of the power supply area after the substation is built or boosted, a dynamic boost planning method for rural substations of an active distribution network is proposed, and the time sequence of new substations and boost is obtained, based on a weighted Voronoi graph algorithm and a genetic algorithm. Finally, an example is given to verify the effectiveness and practicability of the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807116).

Key words: distributed generation; substation boost planning; full life cycle cost; weighted Voronoi diagram; distribution network; genetic algorithm

0 引言

目前, 我国乡村地区负荷密度较低, 为避免供电线路偏长或变电站负载率偏低等问题, 一般建设

35 kV 变电站^[1-2]。但随着国家乡村振兴和城镇化战略的逐步实施, 未来部分区域负荷密度将达到较高水平, 若仍旧采用 35 kV 变电站, 将出现变电站布点偏多、线路廊道紧张而难以落地且经济性较差等问题, 未来选择 110 kV 作为高压配电网的电压等级将更为合理^[3-5]。随着负荷在时间及空间分布上的发

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807116)

展速度和变电站在其寿命周期后的自然更替, 现状 35 kV 变电站的升压改造时间、新建变电站的电压等级选择等问题十分复杂。另外, 近年来随着分布式电源(DG)接入配电网且渗透率不断提高, 直接影响规划期变电站建设和升压决策, 因此在变电站动态规划中应同时科学合理度量 DG 的容量价值。

针对变电站动态扩展规划问题, 文献[9-11]考虑变电站和线路的建设、运行成本建立了变电站多阶段优化规划模型, 通过动态规划算法求解各阶段变电站建设位置、容量和供电范围, 但以上研究没有考虑 DG 接入对变电站动态规划结果的影响。文献[12]考虑各变电站供电范围内 DG 渗透率的平衡, 基于负荷及 DG 出力的时序特征构建了变电站选址定容的时序模型; 文献[13]建立了 DG 多状态出力模型, 提出了含 DG 的变电站容量概率规划方法; 文献[14]对含有 DG 的微电网, 用 Voronoi 图对融合了充电站的变电站供电范围进行划分, 但没有考虑加权 Voronoi 图。文献[15]构建了基于 DG 置信容量评估的有源配电网变电站规划方法; 文献[16]考虑多种新能源接入的配电网规划, 但涉及的地理范围较小。文献[17]则考虑了多种线路结构和分布式电源不同位置下的优化方式。文献[18]进行了以经济性为目标的考虑分布式电源的配电网规划, 但未将配电网的寿命成本纳入考虑范围。

针对变电站动态扩展规划问题, 文献[9-10]考虑变电站和线路的建设、运行成本建立了变电站多阶段优化规划模型, 通过动态规划算法求解各阶段变电站建设位置、容量和供电范围, 但以上研究没有考虑 DG 接入对变电站动态规划结果的影响。文献[11]考虑各变电站供电范围内 DG 渗透率的平衡, 基于负荷及 DG 出力的时序特征构建了变电站选址定容的时序模型; 文献[12]建立了 DG 多状态出力模型, 提出了含 DG 的变电站容量概率规划方法; 文献[13]构建了基于 DG 置信容量评估的有源配电网变电站规划方法。

以上研究均假设变压器从投建一直运行到其退役期限, 未考虑乡村地区负荷的动态发展, 存在未到退役年限而被迫提前退役进行升压改造的情况。本文首先针对规划期内地区负荷密度及 DG 发展程度导致变电站提前退役进行升压改造、全寿命周期结束仍未进行升压改造等场景, 提出变电站在各种场景的全寿命周期成本等年度度量方法; 其次, 建立以规划期整体全寿命周期成本最优为目标、中间年各变电站新建与升压改造时序为对象的变电站升

压规划数学模型; 再次, 提出基于加权 Voronoi 图算法和遗传算法的变电站升压规划求解方法。最后, 通过实例对本文方法的可行性进行了验证。

1 变电站全寿命周期成本等年度度量方法

变电站升压工程将改变原变电站的计划使用寿命, 因而本节将考虑变电站升压工程对全寿命周期成本的影响, 主要包括投资费用、运行维护费用和残值等。等年值法适用于使用寿命不等的投资决策, 可以将各个变电站在规划期内的建设方案置于同一可比的基础上进行比较。为了正确评价不同升压改造方案的经济性, 本文将规划期内变电站及线路全寿命周期成本^[19-21]折算成等年值。变电站升压改造不影响其下级线路电压等级, 即下级线路不会提前退役。因此, 仅针对现状年已有变电站、中间年新建变电站在规划期内的不同场景, 给出全寿命周期等年值成本度量方法。

1.1 不同场景下投资与残值费用的等年度度量方法

1) 现状年已有变电站

现状年已有变电站是指在规划期之前已建成投运的变电站, 其投资费用不影响规划期升压方案的经济性, 因此不计入变电站升压规划模型。现状年已有变电站在退役时存在两种场景: 一是从现状年开始运行到退役期限仍未升压; 二是提前退役进行升压改造至 110 kV。其残值折算的等年值为

$$C_{\text{rem}} = -vC^{35} \frac{r}{(1+r)^{(t^{\text{max}}-t^{\text{al}})\beta^{\text{max}}+t^{\text{bo}}\beta^{\text{bo}}}-1}} \quad (1)$$

式中: C_{rem} 为变电站残值折算的等年值; C^{35} 为 35 kV 变电站的初始投资费用; v 为残值费用比例系数; r 为社会折现率; t^{al} 为变电站在规划期前已投入运行的时间; t^{max} 为全寿命周期; β^{max} 为二进制变量, 若 35 kV 变电站运行到退役期限未升压取 1; t^{bo} 为升压时间; β^{bo} 为二进制变量, 若 35 kV 变电站提前退役升压取 1。

2) 中间年新建变电站

中间年新建变电站站址有两种场景: 一是 35 kV 变电站在原址升压改造; 二是在新址新建。

(1) 35 kV 变电站升压改造

其在规划期内存在两种运行场景: 一是从建成运行至退役期限仍未升压; 二是提前退役升压改造为 110 kV 变电站。投资费用及残值折算等年度度量方法如式(2)、式(3)所示。

$$C_{\text{inv}} = C^{35} \frac{r(1+r)^{(t^{\text{max}}\beta^{\text{max}}+t^{\text{bo}}\beta^{\text{bo}})-t^{\text{ne}}}}{(1+r)^{(t^{\text{max}}\beta^{\text{max}}+t^{\text{bo}}\beta^{\text{bo}})-t^{\text{ne}}}-1}} \quad (2)$$

$$C_{\text{rem}} = -\nu C^{35} \frac{r}{(1+r)^{(t^{\max} \beta^{\max} + t^{\text{bo}} \beta^{\text{bo}}) - t^{\text{ne}}} - 1} \quad (3)$$

式中: C_{inv} 为变电站投资费用折算的等年值; r 为社会折现率; t^{ne} 为新建变电站的时间。

(2) 新建 110 kV 变电站

为规划期内新选址建设的 110 kV 变电站, 可投入运行至规划期结束。等年值度量方法为

$$C_{\text{inv}} = C^{110} \frac{r(1+r)^{T-t^{\text{ne}}}}{(1+r)^{T-t^{\text{ne}}} - 1} \quad (4)$$

$$C_{\text{rem}} = -\nu C^{110} \frac{r}{(1+r)^{T-t^{\text{ne}}} - 1} \quad (5)$$

式中: C^{110} 为 110 kV 变电站的初始投资费用; r 为社会折现率; T 为规划期。

1.2 运行维护费用的等年值度量方法

从资金的时间价值角度分析, 由于变电站每年都会进行运行维护, 根据其费用的属性和特点, 变电站的运行维护费用采用等年值法计算, 如式(6)所示。

$$C_{\text{ope}} = uC \quad (6)$$

式中: u 为运行维护比例系数; C 为变电站的投资费用。

2 计及 DG 的乡村地区变电站升压规划

变电站规划分为只针对目标年负荷的静态规划和考虑规划期内负荷变化的多阶段规划两种形式, 变电站升压规划属于后者, 需要确定变电站中间年各阶段变电站电压等级升压顺序。另外, 当 DG 接入配电网后, 其出力将可能为配电网分担一部分负荷, 变电站需要承担的负荷将相应减少, 因而变电站动态升压规划时需要合理计及各阶段 DG 接入对减少网供负荷的影响。

2.1 变电站全寿命周期成本等年值优化模型

本文以规划期内变电站及线路的全寿命周期成本等年值、综合损耗成本之和最小为目标, 如式(7)所示。

$$LCC = C_{\text{Station}} + C_{\text{Feeder}} + C_{\text{loss}} \quad (7)$$

式中: LCC 为规划期内变电站及线路的全寿命周期成本等年值之和; C_{Station} 、 C_{Feeder} 、 C_{loss} 分别为规划期内变电站全寿命周期成本等年值、线路全寿命周期成本等年值、变电站高压和低压侧线路损耗及变压器损耗成本。

变电站的全寿命周期成本等年值模型如式(8)一式(11)所示。

$$C_{\text{Station}} = C_{\text{station.inv}} + C_{\text{station.ope}} + C_{\text{station.rem}} \quad (8)$$

式中, $C_{\text{station.inv}}$ 、 $C_{\text{station.ope}}$ 、 $C_{\text{station.rem}}$ 分别为变电站在规划期内的投资费用、运行维护费用和残值费用等年值。

$$C_{\text{station.inv}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[C^{35} \frac{r(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - (t^{\max} - t_i^{\text{al}}) \beta_{i,t}^{\text{re}} - t_i^{\text{ne}} \beta_{i,t}^{\text{ne}}}}{(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - (t^{\max} - t_i^{\text{al}}) \beta_{i,t}^{\text{re}} - t_i^{\text{ne}} \beta_{i,t}^{\text{ne}}} - 1} + \right. \quad (9)$$

$$\left. C^{110} \frac{r(1+r)^{T-t_i^{\text{bo}}}}{(1+r)^{(T-t_i^{\text{bo}}) \beta_{i,t}^{\text{bo}}} - 1} \right]$$

$$C_{\text{station.ope}} = \sum_{i=1}^N u \left[C^{35} (\beta_{i,t}^{\text{al}} + \beta_{i,t}^{\text{re}} + \beta_{i,t}^{\text{ne}}) + C^{110} \beta_{i,t}^{\text{bo}} \right] \quad (10)$$

$$C_{\text{station.rem}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left[-\nu (C^{35} \beta_{i,t}^{\text{re}} \frac{r}{(1+r)^{t^{\max} - t_i^{\text{al}}} - 1} + C^{35} \frac{r}{(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - (t^{\max} - t_i^{\text{al}}) \beta_{i,t}^{\text{re}} - t_i^{\text{ne}} \beta_{i,t}^{\text{ne}}} - 1} + C^{110} \beta_{i,t}^{\text{bo}} \frac{r}{(1+r)^{T-t_i^{\text{bo}}} - 1}) \right] \quad (11)$$

式中: N 为变电站总个数; T 为规划期; C^{35} 、 C^{110} 分别为 35 kV、110 kV 变电站的投资成本; $\beta_{i,t}^{\text{al}}$ 、 $\beta_{i,t}^{\text{re}}$ 、 $\beta_{i,t}^{\text{ne}}$ 、 $\beta_{i,t}^{\text{bo}}$ 为二进制变量, 取 1 时分别表示变电站 i 在第 t 阶段是初始变电站不需重建或升压、在已有站址重建变电站、新建 35 kV 变电站、新建或升压成 110 kV 变电站; t_i^{al} 为初始变电站 i 在规划期之前已经投入运行的时间; t_i^{ne} 为非初始变电站 i 新建成 35 kV 变电站的时间; t_i^{bo} 为变电站 i 升压成 110 kV 的时间; r 为社会折现率; u 为变电站及线路的维护费用比例; ν 为变电站及线路的残值费用比例。

线路的全寿命周期成本等年值模型如式(12)一式(15)所示。

$$C_{\text{Feeder}} = C_{\text{Feeder.inv}} + C_{\text{Feeder.ope}} + C_{\text{Feeder.rem}} \quad (12)$$

式中, $C_{\text{Feeder.inv}}$ 、 $C_{\text{Feeder.ope}}$ 、 $C_{\text{Feeder.rem}}$ 分别为变电站低压侧线路在规划期内的投资费用等年值、运行维护费用等年值和报废残值费用等年值。

$$C_{\text{Feeder.inv}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J_i} C^{10} l_{ij} (\beta_{i,t}^{\text{ne}} \frac{r(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - t_i^{\text{ne}}}}{(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - t_i^{\text{ne}}} - 1} + \beta_{i,t}^{\text{bo}} \frac{r(1+r)^{T-t_i^{\text{bo}}}}{(1+r)^{T-t_i^{\text{bo}}} - 1}) \quad (13)$$

$$C_{\text{Feeder.ope}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J_i} u C^{10} l_{ij} (\beta_{i,t}^{\text{al}} + \beta_{i,t}^{\text{ne}} + \beta_{i,t}^{\text{bo}}) \quad (14)$$

$$C_{\text{Feeder.rem}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J_i} \left[-\nu C^{10} l_{ij} (\beta_{i,t}^{\text{re}} \frac{r}{(1+r)^{t^{\max} - t_i^{\text{al}}} - 1} + \frac{r}{(1+r)^{t_i^{\text{bo}} - (t^{\max} - t_i^{\text{al}}) \beta_{i,t}^{\text{re}} - t_i^{\text{ne}} \beta_{i,t}^{\text{ne}}} - 1} + \beta_{i,t}^{\text{bo}} \frac{r}{(1+r)^{T-t_i^{\text{bo}}} - 1}) \right] \quad (15)$$

式中: C^{10} 为变电站低压侧线路的单位建设成本; l_{ij} 为变电站 i 与负荷点 j 之间的输电距离。

变电站高压侧和低压侧线路及变压器损耗成本如式(16)所示。

$$C_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J_{i,t}} k(M_{i,t}) \times \mu^l P_{t,j}^2 l_{ij} (\beta_{i,t}^{\text{al}} + \beta_{i,t}^{\text{ne}} + \beta_{i,t}^{\text{bo}}) + \tau c_0 (\alpha \gamma l r (S_l / U_N)^2 \times 10^{-3} + \Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_k) \quad (16)$$

式中: $J_{i,t}$ 为第 t 阶段变电站 i 所带负荷集合; $M_{i,t}$ 为第 t 个阶段变电站 i 的 DG 渗透率; $k(M_{i,t})$ 为考虑 DG 的线路运行损耗系数; μ^l 为低压侧 10 kV 线路的损耗折算系数; $P_{t,j}$ 为第 t 阶段负荷点 j 的有功功率; τ 为最大负荷损耗时间; c_0 为电价; α 为变电站高压电网接线模式系数; γ 为线路曲折系数; l 为变电站的站间平均输电距离; r 为高压线路电阻; S_l 为高压线路输送功率; U_N 为变电站高压侧电压; β 为负载系数; ΔP_0 、 ΔP_k 分别为变压器空载损耗、额定负载有功损耗。

DG 渗透率为 DG 置信容量与负荷最大值的比值, 本文应用 DG 时序模型^[22], 并采用基于可靠性准则及考虑负荷特性的 DG 置信容量评估方法^[23]得到 DG 置信容量评估结果。

2.2 约束条件

上述模型计算的约束条件介绍如下。

1) 变电站建设时序约束

变电站新建和升压应满足建设时序约束条件, 即

$$\beta_{i,t}^{\text{ne}} \leq \beta_{i,t+1}^{\text{ne}} \quad (17)$$

$$\beta_{i,t}^{\text{bo}} \leq \beta_{i,t+1}^{\text{bo}} \quad (18)$$

2) 变电站容量约束

$$\sum_{j \in J_i} P_{i,t} - S_{i,\text{DG},t} \leq S_{i,t} \lambda_{i,t} \cos \varphi \quad (19)$$

式中: $P_{i,t}$ 为第 t 阶段负荷点 i 的有功功率; $S_{i,\text{DG},t}$ 为第 t 阶段变电站 i 供电范围内 DG 的置信容量; $S_{i,t}$ 为第 t 阶段变电站 i 的容量; $\lambda_{i,t}$ 为第 t 阶段变电站 i 的负载率; $\cos \varphi$ 为功率因数。

3) 变电站供电范围不交叉约束

$$\sum_{i=1}^N \beta_{ij,t} = 1 \quad (20)$$

式中: $\beta_{ij,t}$ 为二进制变量; 1 表示第 t 阶段负荷点 j 由变电站 i 供电。

$$l_{ij} \leq R_{i,t} \times \psi_{i,t,j} \quad (21)$$

式中: $R_{i,t}$ 为第 t 个阶段变电站 i 传统配电网中的供

电半径限制; $\psi_{i,t,j}$ 为第 t 个阶段变电站 i 考虑 DG 后在负荷点 j 方向的半径变化因数, 影响负荷点 j 的 DG 置信容量越大, $\psi_{i,t,j}$ 取值越大, 具体计算如式(22)、式(23)。

$$\psi_{i,t,j} = \begin{cases} \prod_{g \in G_{i,t}} \left(1 + \frac{R_{i,t,g}^2}{R_{i,t}^2} \right) & (R_{i,t,g} > l_{i,g}) \\ \prod_{g \in G_{i,t}} \left(R_{i,t} + \frac{\pi^2 R_{i,t,g}^2}{4 \times R_{i,t}^2 \arcsin(R_{i,t,g} / l_{i,g})} \right) & (R_{i,t,g} < l_{i,g}) \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{i,t,g} = (T_{i,t}^{\text{PV}} + T_{i,t}^{\text{WTG}}) \times S_{i,t,g} / (\rho_{i,t} \times \sum_{g \in G_{i,t}} S_{i,t,g}) \quad (23)$$

式中: $G_{i,t}$ 为第 t 个阶段向变电站 i 供电的 DG 集合; g 为 DG 节点; $S_{i,t,g}$ 与 $R_{i,t,g}$ 分别为第 t 个阶段向变电站 i 供电的 DG 节点 g 的装机容量与等效供电半径; $l_{i,g}$ 为变电站 i 与 DG 节点 g 的距离; $\rho_{i,t}$ 为第 t 个阶段变电站 i 供电范围内的负荷密度。

3 优化模型求解步骤

变电站升压规划属于大规模混合整数非线性规划问题, 不同规划阶段具有耦合特性, 考虑 DG 接入后模型进一步复杂, 难以用单一方法进行求解, 利用遗传算法^[24-26]的二进制编码能够较好地完成整数变量的求解, 而加权 Voronoi 图^[27-29]能够根据空间中的控制点结合加权的欧氏距离完成空间的分割, 适用于规划期各阶段变电站地理上的供电范围划分, 因此本文采用遗传算法与加权 Voronoi 图算法联合进行求解, 具体求解流程如图 1 所示。

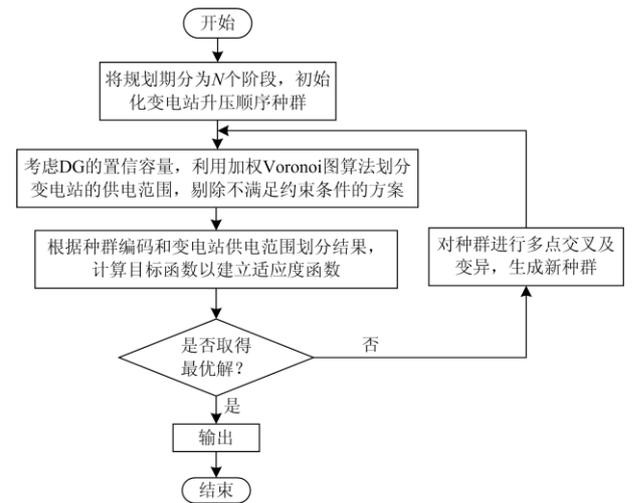


图 1 模型求解流程

Fig. 1 Solving process of the model

3.1 加权 Voronoi 图划分供电范围

为反映变电站的负载供应能力，利用加权 Voronoi 图^[21-22]划分变电站供电范围时将供电区域的负荷与变电站容量比值的平方根作为权值，公式为

$$\omega_{i,t,m+1} = \sqrt{P_{i,t,m} / S_i} \quad (24)$$

式中： $\omega_{i,t,m+1}$ 为第 t 阶段第 $m+1$ 次加权 Voronoi 图迭代时变电站 i 的权值； $P_{i,t,m}$ 为第 t 阶段变电站 i 第 m 次迭代时供电范围内的总负荷； S_i 为变电站 i 的容量。

DG 接入配电网后就地消纳部分负荷，变电站供电范围内的网供负荷减少，在 DG 供电区域方向的供电半径应相应增加。因此，对各变电站的权值进一步调整计算，如式(25)。

$$\omega_{i,j,t,m}^{DG} = \omega_{i,t,m+1} / \psi_{i,t,j} \quad (25)$$

式中， $\omega_{i,j,t,m}^{DG}$ 为变电站 i 在第 t 阶段第 m 次加权 Voronoi 图迭代中考虑 DG 后在负荷点 j 方向的权值。

3.2 基于遗传算法的变电站升压时序优化

遗传算法是一种常用的全局优化算法，求解流程包括染色体编码、计算种群中个体的适应度、交叉、变异，并通过不断迭代最终收敛至稳定的近似最优解。为提高遗传算法的全局搜索能力，文献[25]对交叉率和变异率进行自适应调整。

结合本文变电站升压规划问题，规划期内变电站的升压时序场景主要包括两种：①现状年原站址初始变电站在规划期内某阶段直接升压为 110 kV 变电站；②中间年新站址非初始变电站直接建成 110 kV 变电站；③中间年先新建 35 kV 变电站，而后再升压为 110 kV 变电站。以规划期分四个阶段为例，遗传算法使用四位二进制编码，基因编码方式及含义如表 1 所示。

表 1 编码方法

Table 1 Coding method

编码方式	编码含义
1000、0100、0010、0001	分别在阶段 1、2、3、4 升压
1100、1010、1001	阶段 1 新建 35 kV 变电站，分别在阶段 2、3、4 升压
0110、0101	阶段 2 新建 35 kV 变电站，分别在阶段 3、4 升压
0011	阶段 3 新建 35 kV 变电站、在阶段 4 升压

4 算例分析

4.1 基本情况

某地区规划区域总面积 63.08 km²，以负荷饱和

年作为规划目标年，规划期为 20 年，以 5 年为一个阶段，分四个阶段进行规划。规划区域内现状年变电站及供电范围、目标年负荷点的分布如图 2 所示。

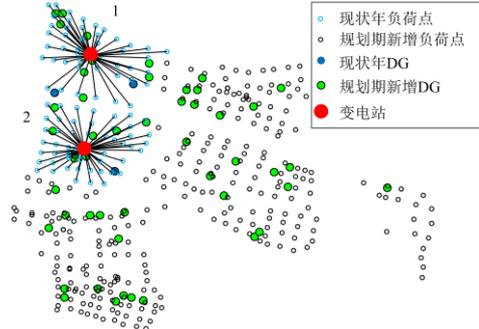


图 2 现状年及目标年负荷点及 DG 的分布图

Fig. 2 Distribution of current year and target year load points and DG

其中，现状年有两座 35 kV 变电站和 107 个负荷点(蓝色空心圆)，总负荷为 35.33 MW，功率因数为 0.9。预测规划期内将新增 368 个负荷点(黑色空心圆)，预测总负荷为 262.93 MW。现状年 DG 分布如图 2 中蓝色实心圆，总安装容量为 1.5 MW；目标年 DG 分布位置如图 2 中绿色实心圆，总安装容量为 39 MW。假设 35 kV、110 kV 变电站的容量规格分别选取 2×20 MVA、2×40 MVA，其初始建设费用分别为 1 000 万元、2 000 万元，低压侧 10 kV 线路的单位建设成本为 50 万元。

4.2 不计及 DG 的升压改造规划结果

不计及 DG 的各阶段变电站建设状态如图 3 所示。目标年变电站均升压成为 110 kV 变电站。其中，黑色、绿色、红色、蓝色分别表示与上一规划阶段相比变电站没有变化、新建 35 kV 变电站、新建 110 kV 变电站、由 35 kV 升压成 110 kV 变电站。

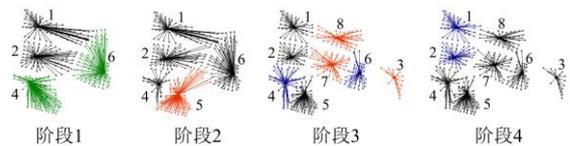


图 3 不计及 DG 的规划期四个阶段变电站建设及升压情况

Fig. 3 Substation construction and voltage boost in the four stages of the planning period without considering DG

各阶段变电站的建设和升压时序如表 2 所示。

4.3 计及 DG 的升压改造规划结果

通过对 DG 容量价值进行评估，得到各阶段变电站总装机容量、DG 置信容量和渗透率结果如表 3 所示。由表 3 可知，有源配电网规划期内 DG 的置信容量增加了 20.88 MW，DG 渗透率由 1.51% 提高至 8.30%。

表 2 不计及 DG 的变电站建设和升压时序表

Table 2 Schedule of substation construction and boost without considering DG

变电站编号	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
1				升压
2				升压
3			110 kV	
4	35 kV		升压	
5			110 kV	
6	35 kV		升压	
7			110 kV	
8			110 kV	

表 3 各阶段 DG 的置信容量和渗透率

Table 3 Confidence capacity and permeability of DG in each stage

规划阶段	变电站总装机容量/MVA	DG 置信容量/MW	DG 渗透率/%
1	160	0.95	1.51
2	240	3.42	2.73
3	480	9.27	5.31
4	640	21.83	8.30

计及 DG 的各阶段变电站建设状态如图 4 所示。其中黑色、绿色、红色、蓝色分别表示与上一规划阶段相比变电站没有变化、新建 35 kV 变电站、新建 110 kV 变电站、由 35 kV 升压成 110 kV 变电站。

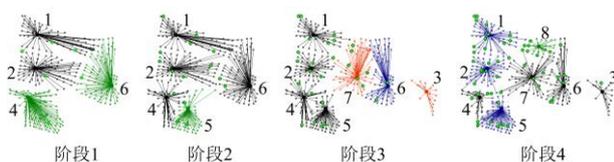


图 4 计及 DG 的规划期四个阶段变电站建设及升压情况

Fig. 4 Substation construction and voltage boost in the four stages of the planning period considering DG

计及 DG 的变电站的建设和升压时序如表 4 所示。

表 4 计及 DG 的变电站建设和升压时序表

Table 4 Schedule of substation construction and boost considering DG

变电站编号	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
1				升压
2				升压
3			110 kV	
4	35 kV			
5		35 kV		升压
6	35 kV		升压	
7			110 kV	
8				35 kV

由表 4 可见, 由于 DG 能够为配电网分担一部分负荷, 降低变电站的网供负荷, 进而降低变电站的负载率。规划期内随着 DG 渗透率的不断提高, DG 降低网供负荷的效果越发明显, 将降低变电站升压改造的需求, 因此, 考虑 DG 的容量价值将在一定程度上起到延缓变电站建设升压的作用, 从而进一步起到降低规划期内变电站全寿命周期成本的等年值费用的作用。

将不计及 DG 的升压与计及 DG 的升压改造结果进行比较, 由表 2 和表 4 所示的变电站建设和升压时序表可见, 计及 DG 的升压方案在规划期结束时变电站 4 和 8 无需升压, 其中变电站 4 在第 1 阶段新建 35 kV 且规划期结束无需升压; 变电站 5 由第 3 阶段直接建成 110 kV 改为第 2 阶段新建 35 kV、第 4 阶段升压成 110 kV; 变电站 8 由第 3 阶段升压改为阶段 4 新建 35 kV。由结果可知, 计及 DG 容量价值后的变电站升压方案延缓了变电站的建设时间。

若不计及 DG 容量价值, 所建立的升压规划模型中不考虑 DG 渗透率对网供负荷、网络损耗的影响以及 DG 对变电站供电半径的影响, 通过算法对生成的不同方案迭代寻优, 并进行经济性对比, 得到不计及 DG 容量价值的规划期内经济性最优升压方案的全寿命周期成本等年值费用为 12 938 万元。而根据本文所提模型计及 DG 容量价值时, 通过本文所提方法得到规划期内经济性最优升压方案等年值费用为 11 955 万元, 与不计及 DG 的升压方案相比, 节省 983 万元, 降低了 7.60%。

5 结论

本文考虑负荷和 DG 的动态发展, 建立了乡村地区变电站动态升压规划模型。通过算例验证得到如下结论: 在本文的乡村地区变电站动态升压规划模型中, 既考虑了规划期内负荷的动态发展又考虑了 DG 渗透率对变电站网供负荷的影响, 充分计及了“源-荷”空间分布对变电站容量和电压等级选择的影响, 合理划分变电站供电范围, 能够降低变电站及线路的投资成本, 延缓变电站的建设, 保证变电站建设的经济性。

参考文献

- [1] 李金芳, 刘宗岐, 张建华, 等. 中压配电电压等级选择研究[J]. 现代电力, 2009, 26(4): 51-55.
LI Jinfang, LIU Zongqi, ZHANG Jianhua, et al. Choice of medium voltage level for power distribution network[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(4): 51-55.

- [2] 朱立蓉, 王璞, 王承民, 等. 配电网规划中电压等级的优化选择方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(11): 16-18, 43.
ZHU Lirong, WANG Pu, WANG Chengmin, et al. Voltage level optimum option in power distribution network planning[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(11): 16-18, 43.
- [3] 由建. 35 kV 变电站升压扩容施工期间过渡方案[J]. 农村电气化, 2019(6): 18-20.
YOU Jian. 35 kV substation booster capacity during the construction of the transition plan[J]. Rural Electrification, 2019(6): 18-20.
- [4] 郭振武, 王晓雨. 城区 35 kV 变电站升压改造工程主变压器室通风降噪设计优化[J]. 供用电, 2017, 34(8): 64-67, 73.
WU Zhenwu, WANG Xiaoyu. Research and optimization on the ventilation and noise-reduction of main transformer room in urban 35 kV substation[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 64-67, 73.
- [5] 姚锐. 35 kV 变电站升压改造工程主要电气设备选择及布置[J]. 电工技术, 2017(2): 23-25.
YAO Rui. Selection and arrangement of main electrical equipment for 35 kV substation booster renovation project[J]. Electric Engineering, 2017(2): 23-25.
- [6] 毛晓明, 吴涛. 城市高负荷密度新区电压层级方案适用性研究[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 782-788.
MAO Xiaoming, WU Tao. Applicability study on voltage levels for new urban district with high load density[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 782-788.
- [7] 张勇军, 李启峰, 梁锦照. 220/20 kV 电压序列的技术经济性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 155-160.
ZHANG Yongjun, LI Qifeng, LIANG Jinzhao. Techno-economical analysis on 220/20 kV distribution voltage series[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 155-160.
- [8] 陈根永, 张新民, 孙启伟. 农网规划建设配网电压等级的选择分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 119-123.
CHEN Genyong, ZHANG Xinmin, SUN Qiwei. Voltage grade selection analysis of rural power network planning and construction[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 119-123.
- [9] 葛少云, 贾鸥莎. 配电变电站多阶段优化规划模型[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 113-118.
GE Shaoyun, JIA Ousha. Multi-stage model for optimal distribution substation planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 113-118.
- [10] 孟琦斌. 计及改进加权 Voronoi 图的变电站多期规划[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
MENG Qibin. Substation multi-stage planning based on improve weighted Voronoi diagram[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [11] 林卓琼, 彭显刚. 基于帕累托最优法的中低压配电网多属性规划方案比选方法[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 46-53.
LIN Zhuoqiong, PENG Xiangang. Comparison and selection method of multi-attribute planning schemes for medium and low voltage distribution network based on Pareto optimal method[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 46-53.
- [12] 李振坤, 岳美, 胡荣, 等. 计及分布式电源与可平移负荷的变电站优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4883-4893, 5112.
LI Zhenkun, YUE Mei, HU Rong, et al. Optimal planning of substation considering distributed generation and shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4883-4893, 5112.
- [13] 谭笑, 王主丁, 李强, 等. 变电站容量和 DG 置信容量概率规划[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2267-2275.
TAN Xiao, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Probabilistic planning of substation capacity and capacity credit of distribution generators[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2267-2275.
- [14] 李笑蓉, 王婕, 丁健民, 等. 基于 Voronoi 图的多站融合变电站选址定容优化[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(2): 44-54.
LI Xiaorong, WANG Jie, DING Jianmin, et al. Site selection and capacity optimization of multi-station integrated substation based on Voronoi diagram[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2): 44-54.
- [15] 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.
- [16] 陈永进. 考虑园区能源互联网接入及其需求响应的配电网规划方法[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 45-52.
CHEN Yongjin. Distribution network planning method considering park energy internet access and its demand response[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 45-52.
- [17] 刘永强, 郑宁宁, 邵云峰, 等. 基于混合粒子群优化的含分布式电源配电网分层规划方法研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 85-92, 109.
LIU Yongqiang, ZHENG Ningning, SHAO Yunfeng, et al.

- Study on the hierarchical planning method of distribution network containing distributed power based on hybrid particle swarm optimization[J]. *Smart Power*, 2019, 47(12): 85-92, 109.
- [18] 郭红霞, 任智君. 考虑不同投资主体储能运行策略的主动配电网多目标规划[J]. *智慧电力*, 2019, 47(11): 22-28, 34.
GUO Hongxia, REN Zhijun. Multi-objective planning of active distribution network considering energy storage operation strategies of different investment entities[J]. *Smart Power*, 2019, 47(11): 22-28, 34.
- [19] 刘田. 基于效能—全寿命周期成本的变电站经济性评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LIU Tian. The economic evaluation of substations based on utility-LCC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [20] HUMAYUN M, SAFDARIAN A, ALI M, et al. Optimal capacity planning of substation transformers by demand response combined with network automation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 134: 176-185.
- [21] 辛建波, 康琛, 陈田, 等. 基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 181-187.
XIN Jianbo, KANG Chen, CHEN Tian, et al. Life cycle cost analysis of power transmission and transformation equipment based on dynamic data[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 181-187.
- [22] 方鑫, 郭强, 张东霞, 等. 考虑天气不确定性的光伏电站置信容量评估[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(10): 27-32.
FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation considering weather uncertainty[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(10): 27-32.
- [23] 王世举. 考虑供电能力提升和分布式电源接入的变电站优化规划[D]. 天津: 天津大学, 2015.
WANG Shiju. Substation optimization planning considering the improvement of supply capacity and the access of DG[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [24] 宋倩芸. 计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 53-61.
SONG Qianyun. A bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 53-61.
- [25] 丁明, 刘先放, 毕锐, 等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(15): 47-52.
DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 47-52.
- [26] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [27] HUANG W, SUN K, QI J, et al. Optimal allocation of dynamic var sources using the Voronoi diagram method integrating linear programming[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4644-4655.
- [28] 刘洪, 王博, 李梅菊, 等. 基于改进加权 Voronoi 图算法的有源配电网变电站规划[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 45-52.
LIU Hong, WANG Bo, LI Meiju, et al. Substation planning of active distribution network based on improved weighted Voronoi diagram method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 45-52.
- [29] 张海燕, 王东, 樊平, 等. 基于加权 Voronoi 图和 GA-PSO 的电动汽车充电站最优规划[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(5): 77-82.
ZHANG Haiyan, WANG Dong, FAN Ping, et al. Optimal planning of electric vehicle charging station based on weighted Voronoi diagram and GA-PSO[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(5): 77-82.

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-14

作者简介:

肖异瑶(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划; E-mail: 472799723@qq.com

熊宁(1975—), 男, 博士, 高工, 研究方向为配电网规划;

周晨曦(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行. E-mail: cxzhou_1996@tju.edu.cn

(编辑 魏小丽)