

基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划

程 杉¹, 许林峰¹, 孙伟斌¹, 苏高参¹, 冯昱璋²

(1. 三峡大学新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司变电检修室, 湖北 武汉 430050)

摘要:电动汽车充电站的无序规划及不合理配置会对配电网运行的稳定性、安全性和经济性产生严重的影响。为解决这一难题,构建基于配电网电压稳定指标的电动汽车充电站最优规划模型。此模型同时兼顾了充电站建设投资的经济性和配电网运行的经济性以及供电电能质量,充分考虑电动汽车的充电需求和便利性。为求解模型内含多约束的非线性优化问题,采用具有收敛速度快、寻优精度高的改进的自适应粒子群优化算法。最后,基于 IEEE 33 节点系统的仿真结果验证该文所提方法的有效性。

关键词:电动汽车;充电站规划;自适应粒子群优化算法;电压稳定指标

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.001 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2020)04-0003-10

Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability of distribution system

CHENG Shan¹, XU Linfeng¹, SUN Weibin¹, SU Gaocan¹, FENG Yuzhang²

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Substation Maintenance Room of Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

Abstract: The disordered planning and unreasonable allocation of electric vehicle charging stations have a serious impact on the safety, stability and economy of the distribution network operation. To solve this problem, this paper constructs an optimal planning model of electric vehicle charging stations based on the voltage stability index of distribution network. The model not only could balance the construction investment of charging stations, the economic operation of distribution system and the quality of power supply, but also take full account of the demand and convenience of the electric vehicle charging. The improved adaptive particle swarm optimization (APSO) algorithm with fast speed and high accuracy is adopted to solve the nonlinear optimization problem with multiple constraints. Finally, the simulation results based on IEEE33-bus system show the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric vehicle; charging station planning; APSO; voltage stability index

电动汽车(EV)因其低噪、节能、高效、零排放等特性的优点而具有良好的发展前景,完善的EV充电体系是促进其发展的前提和保障^[1]。然而,EV充电设施的大规模接入会对配电系统的电压产生较

大影响,尤其是不合理的配置会严重影响配电系统电压的稳定性。充换电设施的合理规划布局,统筹兼顾,可推动电动汽车的规模化推广。因此,如何综合研判,为规划和建设充换电网络提供科学合理的辅助决策,成为电动汽车领域急需解决的问题之一。

国内外学者从不同角度对此问题展开了研究。文献[2]以规划年限内换电站的净现值最大为目标,并考虑了充换电站的全寿命周期成本(LCC)进行最优规划;而文献[3]建立了EV充电站规划的最大收益模型,基于粒子群优化(PSO)算法对充电站进行选址定容和服务区域划分的优化规划;文献[4-5]则以规划区建设费用和网损费用之和最小为目标函数,构造了充电站的最优规划数学模型。为了建立兼顾土地成本和交通流量的充电站规划模型,文献[6]采用以交通流量来模拟EV数量的方法,将EV充电站的建设成本、运行成本、实际交通流量情况等作为约束条件,把用户充电成本、网络损耗费用以及配电变压器的投资加入了目标函数,较为科学、全面地反映了EV充电站规划问题的实质;而文献[7]则研究了市场化背景下的充电站规划问题,同时考虑投资运营商和EV充电用户成本,并通过帝国主义竞争算法对选址优化模型进行优化求解,从而实现充电站的优选。以上对EV充电站选址问题的研究都是从经济性角度考虑的,很少考虑EV使用者得到服务的便捷性或EV充电站的覆盖率。充电站作为EV的必要基础服务设施,其经济利益是规划过程中需要考虑的重要因素,但此外另一些要素的地位也是举足轻重的,比如:考虑用户需求如何使用户满意程度最大、提高服务质量和使需求者的效用最大化等,从而推动EV的大力发展,实现节能减排^[8]。为此,学者们从EV使用者便利性角度出发研究了充电站的规划问题。

文献[9]考虑到充电站建设投资情况,建立了以EV用户能够行驶往返道路为约束条件、以尽可能多地满足EV用户需求为目标函数的充电站选址问题的整数规划模型;而文献[10]则研究了存在EV用户充电需求转移的情况下,使充电站覆盖尽可能多用户的充电站最优布局问题的混合整数规划模型;根据驾驶人的出行习惯,文献[11]结合出行链的概念,对EV一周内的出行活动以及充电过程进行动

态仿真,提出了基于用户出行需求的充电站优化规划模型;文献[12]综合考虑了充电需求及地理位置等因素,以最大化的满足用户充电需求、保证车主充电便利性作为约束条件,建立了以规划区域内建设快速和慢速充电站总费用最小为目标的多等级充电设施规划模型。

值得指出的是,随着电力市场改革的推进,配电公司、社会资本、政府等投资主体将使充电站的建设主体多元化^[13],交通、城市规划以及供电等部门把如何科学合理地优化布局EV充电站作为重点关注的问题^[6]。如何在规划时反映各方利益是需要解决的关键问题之一。为此,在文献[13]中,为实现集中型充电站独立开发商和配电公司的利益均衡,并考虑多方主体利益,从而建立了集中型充电站多目标二层规划模型。

如前所述,充电站的规划建设要考虑对配电系统诸多方面的影响,如何在满足相关约束条件和合理投资情况下,使充电站既尽量减少对配电系统的负面影响又为EV车主提供便利的充电服务,是一个亟须研究的重要问题^[14]。充电站既是一种公共服务设施,也是一种用电设施,其不合理接入将会导致配电网的稳定性受到严重影响。为解决上述问题,该文针对EV充电设施接入配网所产生的影响,提出基于系统电压稳定性的EV充电站最优规划的新型研究方法,运用改进自适应粒子群优化(APSO)算法以提高全局随机寻优的速度和精度,给出最优规划的求解流程,以IEEE 33节点系统为例证明所提规划方法的可行性和合理性。

1 最优规划模型

在有限的供电范围内,不改变配电网络架构、运用有效的方法对EV充电站接入的位置和容量进行合理规划与配置是十分必要的。近年来,虽然中国10 kV配电网已经初具规模,但是依然存在供电半径过长、功率损耗大、电能质量差、网络结构薄弱等问题^[15]。从电动汽车用户充电的便利性来讲,最佳策略是根据就近原则建站,但从配电网角度来看,该策略并非为最优策略。充电站的接入位置以及容量是极其重要的,选择不当会导致配电网线路损耗过

大、线路末端乃至整个系统的电压质量严重降低。因此,该文考虑电动汽车充电站作为新增负荷接入对配电网的影响,建立计及配电系统安全可靠运行、充电站投资建设经济性以及用户充电便利性的充电站最优规划模型。

1.1 电动汽车充电需求计算

根据目前市场上各类电动汽车的规模和国家及各省市的电动汽车近期发展规划,该文主要研究满足一定区域内电动私家车充电需求的充电站规划。由统计分析可知,电动私家车日行驶里程满足对数正态分布^[16-17],如图 1 所示,概率密度函数为

$$f_L(x) = \frac{1}{x\sigma_1\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (1)$$

式中 μ_1 、 σ_1 分别为对数正态分布函数的平均值和标准差。该文取 $\mu_1 = 3.2$, $\sigma_1 = 0.88$ 。

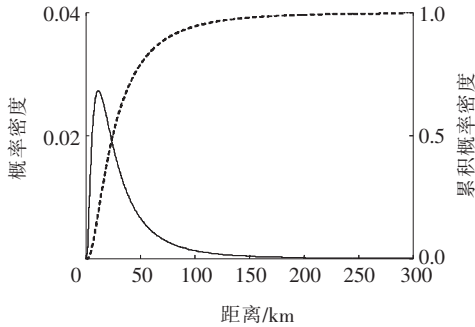


图 1 电动汽车日行驶里程概率密度

Figure 1 Probability density of electric vehicle daily driving mileage

根据电动私家车日行驶里程概率密度函数、100 km 耗电量、规划区域内电动汽车数量和动力电池参数,可计算出规划区域内每天所有电动汽车总充电需求,具体计算过程如下:

1) 根据图 1 及式(1)电动汽车行驶里程概率分布函数,对 N_{ev} 辆电动汽车的行驶里程随机采样。

2) 计算第 i 辆电动汽车的日充电需求:

$$p_i = l_i w \quad (2)$$

式中 w 为电动汽车的 100 km 耗电量; l_i 为第 i 辆电动汽车的日行驶里程。

3) 计算区域内所有电动汽车的日充电需求:

$$P = \sum_{i=1}^{N_{ev}} p_i \quad (3)$$

1.2 充电机数量 N_c 及单机充电功率 P_e 的确定

考虑电动汽车充电排队等待时间期望和动力电

池所允许的最大充电功率等因素,确定规划区域内所需配置充电机的总数量及单机功率。

设 N_c 为规划区域内投入使用的充电机数量, t 为单辆车完成充电的时间,根据排队论模型^[18],电动汽车排队等候时间期望 t_0 表示为

$$t_0 = \frac{N_c \rho^{N_c+1} P_z}{\lambda N_c! (N_c - \rho)^2} \quad (4)$$

$$P_z = \left[\sum_{k=0}^{N_c-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{N_c \rho^{N_c}}{N_c! (N_c - \rho)} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$t = \begin{cases} t_{\min} = \frac{S_e}{\eta P_{\max}} \\ t_{\max} = \frac{S_e}{\eta P_{\min}} \end{cases} \quad (6)$$

式(4)~(6)中 P_z 为充电机空闲概率;充电机服务强度 $\rho = \lambda / \mu$, $\lambda = N_{ev} p / t_c$ 为电动汽车到达率,其过程服从泊松流, t_c 为电动汽车充电时段, $\mu = 1/t$, 为平均服务速率; P_{\max} 为动力电池所允许的最大充电功率; P_{\min} 为充电机的平均充电功率; η 为充电机充电效率; S_e 为单台电动汽车动力电池容量。

利用式(4),使充电机数量从 $N_c = f_{\text{ceil}}(\rho)$, $N_c \neq \rho$ 开始循环增加,直至满足 $t_0 < t_{0,\max}$ 为止 ($t_{0,\max}$ 表示用户所能接受的最长等待时间,该文取 15 min),从而确定满足 t_0 的 N_c ,当 t 分别取 t_{\min} 、 t_{\max} 时,会得出相应的充电机配置数量 $N_{c,\min}$ 、 $N_{c,\max}$ 。

综上所述,充电机的数量 N_c 取值范围为 $N_{c,\min} \leq N_c \leq N_{c,\max}$,单台充电机功率 P_e 的取值范围为 $P_{\min} \leq P_e \leq P_{\max}$,该文取 $P_{\max} = 100 \text{ kW}$, $P_{\min} = 20 \text{ kW}$ 。

1.3 充电站座数 N_s 的取值约束

虽然所需配置充电机的总数已确定,但不同的分配方案将会对电网的稳定运行产生不同程度的影响。设单座充电站充电机配置的最大和最小台数分别为 $N_{se,\max}$ 、 $N_{se,\min}$,则充电站个数的最小值 $N_{s,\min}$ 和最大值 $N_{s,\max}$ ^[19]可分别表示为

$$N_{s,\min} = f_{\text{ceil}}\left(\frac{N_c}{N_{se,\max}}\right) \quad (7)$$

$$N_{s,\max} = f_{\text{ceil}}\left(\frac{N_c}{N_{se,\min}}\right) \quad (8)$$

其中, f_{ceil} 表示向正无穷方向取整。

因此,充电站个数 N_s 应满足约束:

$$N_{\min} \leq N_s \leq N_{\max} \quad (9)$$

1.4 充电站间距 D 的约束

基于正态拟合曲线和中心极限定理,可确定EV荷电状态低于需充电 SOC_c 值时的可行驶里程 Ran_{sc} ^[20],即

$$\theta(Ran_{sc}, \mu_2, \sigma_2) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Ran_{sc} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (10)$$

式中 μ_2 、 σ_2 分别为标准正态分布函数的均值和标准差。

当 Ran_{sc} 范围内有充电站时,需充电的EV此时应进行充电;同时,当相邻两充电站之间距离太近时会造成资源浪费、增加成本^[21],应避免该情况。根据 Ran_{sc} 在 $1-a\%$ ($a\%$ 表示 $Ran_{sc} \leq Sr$ 的电动汽车数量所占电动汽车总量的比例)置信水平的正态分布确定充电服务半径:

$$Sr = \mu_2 - b\sigma_2 \quad (11)$$

其中, b 为查找与 $1-a\%$ 所对应标准正态函数分布表所确定的系数,即 $1-a\%$ 的电动汽车确保以当前 SOC_c 的荷电状态行驶到充电服务半径 Sr 内的充电站,如图2所示。

因此,任意2个相邻充电站距离 D 满足关系:

$$Sr_1 \leq D \leq Sr_2 \quad (12)$$

式中 Sr_1 、 Sr_2 为满足不同 b 值时所对应的服务半径 Sr 。

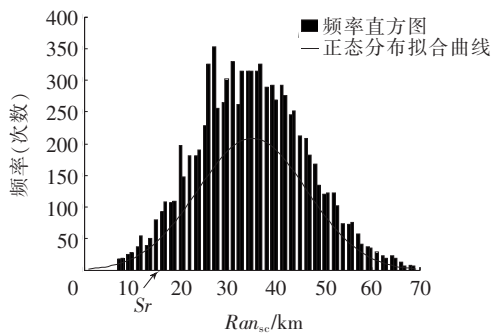


图2 Ran_{sc} 分布示意

Figure 2 Diagram of Ran_{sc} distribution

1.5 充电站规划的数学模型

充电站的接入会对配电网的电压产生较大影响,其不合理的配置将会严重影响配电系统电压稳定性。配电系统电压的稳定性会随着用电负荷的不合理增长而下降,随之可能出现系统电压质量差,当情况比较严重时系统可能崩溃。因此,对于配电网

安全稳定运行,系统电压稳定性是极其重要的,通常用电压稳定指标(voltage stability index, VSI)来描述系统电压稳定性^[22]。

对于支路 k ,计算 VSI 的公式为

$$VSI = \frac{4[(X_{ij}P_j - R_{ij}Q_j)^2 + (X_{ij}Q_j + R_{ij}P_j)V_i^2]}{V_i^4} \quad (13)$$

式中 R_{ij} 、 X_{ij} 分别为支路 k 的电阻值和电抗值; P_j 、 Q_j 分别为节点 j 的有功和无功功率,节点 j 为支路 k 的功率接收端。

配电网的电压稳定指标 f_{VSI} 定义为系统中所有支路电压稳定指标最大者,与之对应的支路称为该系统的最薄弱支路。系统稳定时最薄弱支路所对应的 VSI 值一定小于 1,如果系统发生电压崩溃,定然是从最薄弱支路开始的,系统电压的稳定程度可根据 f_{VSI} 的值与 1(临界值)的距离来判断,即 f_{VSI} 越小,系统的电压稳定性越好,反之越差;当 f_{VSI} 接近 1 时系统发生电压崩溃。

当配电网系统中某支路电压稳定指标最大时,该支路为系统的最薄弱支路,该指标即定义为配电网的电压稳定指标 f_{VSI} 。最薄弱支路在系统稳定的情况下所对应的 VSI 值必然小于 1,若系统发生电压崩溃,则定然是从最薄弱支路开始的。系统电压的稳定程度可根据 f_{VSI} 值与 1(临界值)的距离来判断,即 f_{VSI} 越小,系统的电压稳定性越好,反之越差;当 f_{VSI} 接近 1 时系统发生电压崩溃。目标函数为

$$\min f_{VSI} = \max\{VSI_1, VSI_2, VSI_3, \dots, VSI_k\} \quad (14)$$

作为规划问题,充电站建设投资会有预算(设为 C_{\max})。考虑建设成本,充电站建设投资年费用^[23]可表示为

$$C = \sum_{i=1}^{N_s} (e_i a + N_{sei} b + c_i) \frac{r_0(1+r_0)^z}{(1+r_0)^z - 1} \quad (15)$$

式中 e_i 为充电站 i 所需装设的变压器数量; a 为变压器的单价;充电站 i 所需配置的充电机数量为 N_{sei} ; b 为充电机的单价; c_i 为充电站 i 的基建费用, z 为充电站预计运行年限; r_0 为贴现率。

若满足经济性要求,则需满足:

$$C \leq C_{\max} \quad (16)$$

除考虑式(9)、(12)和(16)约束外,还要考虑到配电网运行要求和自然条件限制,即电动汽车充电站的接入要满足功率潮流平衡、节点电压偏差限制、支路功率限制等约束条件,分别描述如下。

1) 系统潮流约束:

$$\begin{cases} P_i - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

式中 V_i 、 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; N_{bus} 为系统的节点数; P_i 、 P_{Li} 分别为节点 i 和负载的有功功率; Q_i 、 Q_{Li} 分别为节点 i 和负载的无功功率; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部; θ_{ij} 为节点 ij 的相角差。

2) 电压偏差约束。

电压偏差的定义:在正常运行情况下,配电系统某一节点的实际电压 V_i 与系统标称电压 V_0 之差对系统标称电压的百分比。表达式为

$$f_{vd} = \frac{|V_i - V_0|}{V_0} \times 100\% \quad (18)$$

20 kV 及以下配电网的供电电压所允许最大偏差为标称电压的 7%,即

$$f_{vd} \leq 7\% \quad (19)$$

3) 单台充电机的充电功率:

$$p_{emin} \leq p_e \leq p_{emax} \quad (20)$$

4) 支路电流限制:

$$I_k < I_{max} \quad (21)$$

5) 变压器容量限制:

$$S < S_{max} \quad (22)$$

6) 配置的充电机的总功率应大于规划区内电动汽车的总充电需求:

$$P_s > P \quad (23)$$

1.6 功率损耗

电力系统的经济运行对于企业和社会效益具有重要的意义。因此,使系统的功率损耗处于一个可以接受的水平而体现其经济性^[24]。系统的有功损耗为

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^k r_k \left(\frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_{k0}^2} \right) \quad (24)$$

式中 k 为支路数; P_k 、 Q_k 分别为支路 k 上的有功和无功功率; r_k 为支路 k 的电阻值; V_{k0} 为 k 支路末端的电压数值。

考虑系统运行的经济性,接入充电站后的网损必须满足:

$$P_{loss} \leq P_{0,max} \quad (25)$$

其中, $P_{0,max}$ 表示该规划所允许的最大网损。

2 自适应粒子群优化算法及其应用

在电动汽车充电站规划模型中,目标函数和约束条件存在非线性,且约束条件复杂,必须寻求有效的优化工具。作为一种解决优化问题的新型群体智能算法,PSO 算法对于目标函数和约束条件可微与否不作限制,已成为有效的新型优化工具。虽然 PSO 算法对求解优化问题有一定的优势,但其凸显的缺点不可忽视,比如收敛速度和精度较低以及局部最优问题,依然有待改进。因此,该文采用改进的自适应 PSO 算法对所提模型进行求解计算。

2.1 改进自适应粒子群优化算法

在粒子群算法中,每一个潜在的解都能够被看作问题空间中的一个粒子,每一个粒子 i 与它的速度 $\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}, v_{id}, v_{iD}]^T$ 和位置 $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD}]^T$ 相关,其中 D 为解空间的维度。在此进化过程中,粒子速度和位置的迭代更新公式为

$$v_{id}^k = \omega v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}^{k-1}) + \quad (26)$$

$$c_2 r_2 (gbest_d - x_{id}^{k-1})$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (27)$$

式(26)、(27)中 v_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行速度矢量的第 d 维分量; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 2 个随机函数,取值范围均为 $[0, 1]$,用来增加搜索随机性; $pbest_{id}$ 表示粒子 i 个体经历过的最优位置; $gbest_d$ 表示种群所经历过的最优位置; x_{id}^{k-1} 为第 $k-1$ 次迭代粒子 i 位置矢量的第 d 维分量; x_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 位置矢量的第 d 维分量。

式(26)、(27)表明,若粒子速度为0则会导致过早收敛陷入局部最优,尤其是在复杂的多模型优化问题中,过早收敛将会导致整个种群的多样性快速的流失。因此,为了控制其收敛,如何适当地提高PSO的多样性是一个非常重要的问题。为帮助粒子跳出局部最优并加强PSO的搜索能力,通常会加入一些变异的粒子而增加种群的多样性,以求解全局最优。变异操作可提高种群多样性,在搜索过程中避免过早收敛,但它的随机性可能会限制PSO的搜索精度。

该文为解决以上问题提出了一种自适应变异策略。在每一个粒子的速度非常小(小于其速度极限值 V_{limit})的情况下会根据预先设定的变异率选择部分粒子,然后根据公式对其进行变异操作,即

$$x_{id} = x_{id} + \text{sign}(2(r_3 - 0.5))\beta V_{maxd} \quad (28)$$

式中 sign 为 sign 函数; r_3 为一个均匀分布在 $[0, 1]$ 中的随机数; $\beta \in [0, 1]$ 为变异程度; V_{maxd} 为在 d^{th} 维度下的最大速度。

对储存在 P_{mut} 中的变异粒子评估并找到最佳的变异粒子 g_{b_mut} ,若它的适应度值小于 g_b ,那么将 g_{b_mut} 替换 g_b 。这种特殊的变异操作保持了粒子的多样性,同时防止陷入局部最优。

此外,由式(26)可以看出,惯性权重为全局搜索能力和局部搜索能力提供了一个平衡且对于PSO的收敛影响较大。而且为了避免计算后期在全局最优解附近出现“震荡”而影响收敛速度的情况,采用惯性权重随着适应度值改变而自动调节的方法^[25]:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{max} - \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f > f_{avg} \\ \omega_{max}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (29)$$

式中 ω_{max} 、 ω_{min} 分别为最大和最小惯性权重; f 为粒子的适应度值; f_{avg} 为每一次迭代产生的适应度值的平均值; f_{max} 为粒子群的最大适应度值; $\omega_{min} = 0.4$, $\omega_{max} = 0.9$ 。

学习因子采用非线性反余弦加速的方法, c_1 先大后小, c_2 先小后大,基本思想:自身的历史信息 c_1 主要影响着粒子飞行的搜索前期,而后期则是更多的注重社会信息 c_2 ^[19]:

$$c_1 = c_{1e} + (c_{1s} - c_{1e}) \left[1 - \frac{\arccos\left(-\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right] \quad (30)$$

$$c_2 = c_{2e} + (c_{2s} - c_{2e}) \left[1 - \frac{\arccos\left(-\frac{2t}{t_{max}} + 1\right)}{\pi} \right] \quad (31)$$

式(30)、(31)中 c_{1s} 、 c_{2s} 为迭代初始值; c_{1e} 、 c_{2e} 为迭代终止值。当前迭代次数为 t ,最大迭代次数为 t_{max} 。该文取 $c_{1s} = 2.0$, $c_{2s} = 0.5$, $c_{1e} = 2.0$, $c_{2e} = 0.5$ 。这种机制贯穿整个过程,进化初期在整个搜索空间内的全局搜索提供了一个高度多样性,并且在最后阶段提高局部搜索能力以求解更精确的最优解。

2.2 基于 APSO 的电动汽车充电站规划优化

运用 APSO 算法,对充电站进行优化规划。

1)初始化参数。输入算法的初始参数,规划区域电动汽车数量 N_{ev} ,根据文1.1节所述计算规划区域内总日充电需求 P ,以及应用文1.2、1.3节所提方法求得的单台充电机功率 P_c 、所需配置充电机总数 N_c 、充电站座数 N_s 。

2)随机产生 N_s 个充电站的接入位置,并编译为粒子群粒子的初始位置。

3)根据产生的充电站接入位置及对应功率进行潮流计算,根据式(14)计算配电系统电压稳定指标,考虑约束条件后得到 APSO 算法的适应度值,记录个体极值和全局极值。

4)判断是否达到设置的迭代次数或收敛精度,“是”,执行第6步,“否”,执行第5步。

5)根据式(26)~(31),更新粒子的速度和位置,编译为新的充电站的接入位置,进入算法循环。

6)判断充电站的配置座数 N_s 是否取到最大值 N_{smax} ,“是”,执行第7步,“否”, $N_s = N_s + 1$ 后执行第2步。

7)判断充电机总数 N_c 是否取得最大值 N_{cmax} ,若“是”,则执行第8步,若“否”,则 $N_c = N_c + 1$ 后执行第2步。

8)当输出 N_s 取各值时,分别对应电压稳定指标、单台充电机功率、单座充电站配置的充电机数量以及接入充电站的节点号。

由上述步骤形成的流程如图 3 所示。

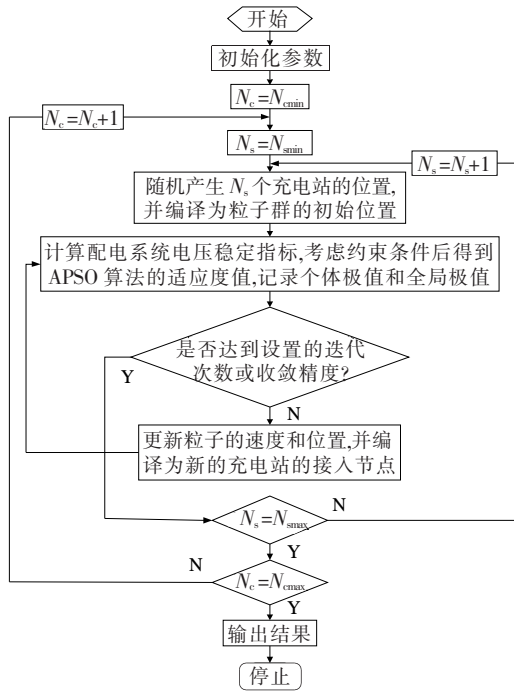


图 3 充电站规划流程

Figure 3 Flow chart of charging station planning

3 数字仿真及分析

以 IEEE 33 节点系统作为算例,如图 4 所示。未接入充电站时,系统的电压稳定指标为 0.099 6,

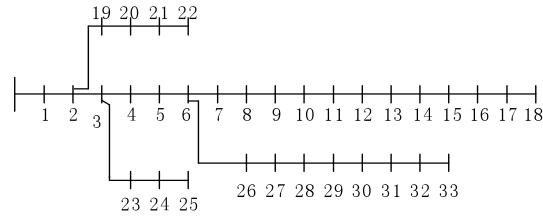


图 4 IEEE 33 节点测试系统

Figure 4 Modified 33-bus test system

有功损耗为 201.5 kW。设规划年限内的汽车数量为 2 500 辆,根据现在电动汽车市场占有率以及政府发展电动汽车的鼓励政策,预计规划年内的电动私家车占汽车总量可达到 500 辆,单台电动汽车动力电池容量设为 23 kW · h,计算可得出总充电需求为 1 150 kW。

当电动汽车总充电需求确定后,充电站的规模将会影响系统的电压稳定性,其接入配电系统中不同的节点,运用上述规划方法及模型,可得到对应的仿真结果,如表 1 所示;系统电压稳定指标如图 5 所示。由表 1 和图 5 可见,当建设 7 座充电站并通过节点 2、7、12、14、21、23、27 接入,且单台充电机的功率为 42.6 kW 时,系统的电压稳定指标达到最小值,为 0.031 1。

从仿真结果也可以发现,当充电站座数过少或过多时,VSI 都比较大,主要是由于充电站座数过少时单座充电站的规模相对较大,造成大负荷集中;充电站座数过多时充电站数多而分散,但又安装在支路末端或原本负荷就比较大、VSI 相对大的节点。

表 1 充电站最优规划结果比较

Table 1 Comparison of optimal planning results for charging stations

充电站座数 N_s	每座站充电机台数 N_{se}	单台充电机功率 P_e /kW	接入节点号	电压稳定指标 (VSI)	节点电压偏移之和	系统网损 P_{loss} /kW
3	10	38.5	3 22 33	0.262 8	1.476 9	273.443 0
4	8	36.0	3 13 20 26	0.214 5	1.472 0	271.960 1
5	6	38.5	2 7 12 21 25	0.091 6	1.448 5	263.195 0
6	5	38.5	3 7 12 16 30 33	0.137 3	1.521 2	291.038 7
7	4	42.6	2 7 12 14 21 23 27	0.031 1	1.405 0	261.393 4
8	4	36.0	3 5 11 16 21 23 30 33	0.399 9	1.488 9	279.251 5
9	3	42.6	4 8 12 15 18 22 23 27 33	0.404 0	1.511 1	285.949 8
10	3	38.5	4 7 10 14 18 20 25 27 30 33	0.773 7	1.502 1	281.963 1

如前所述,该文所提模型既考虑了充电站建设经济性,又考虑了其接入后电网运行经济性及供电电能质量。充电站最优规划方案所对应的系统各节点电压、系统节点电压偏差之和和系统有功损耗与其他方案所对应指标值的比较如图6~8所示。图6中虽然各种方案的电压水平都满足要求,但最优方案中对电压水平的降幅最小,而且从图7可以看到,此时系统电压偏差最小。当充电站作为负荷接入系统时,定会降低电压水平,若未接入分布式电源和无功补偿设备,这种情况下只能选择对系统供电

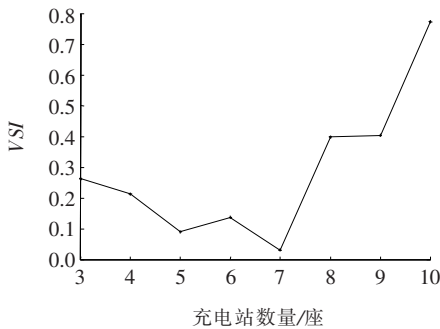


图5 系统电压稳定指标

Figure 5 System voltage stability index

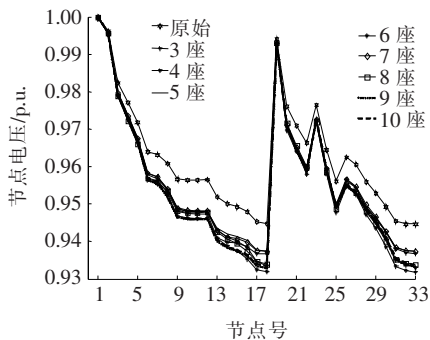


图6 充电站接入前、后系统节点电压

Figure 6 Node voltage of charging station before and after accessing to the system

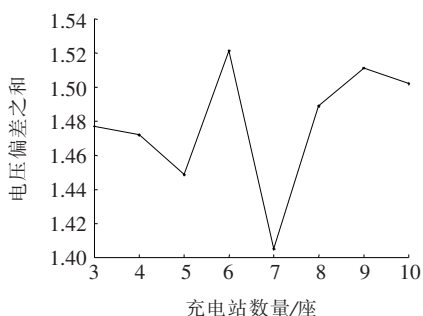


图7 节点电压(p.u.)偏差之和

Figure 7 Sum of the bus voltage (p.u.) deviation

电能质量影响最小的方案。同时,系统网损亦在最优规划方案时达到满足要求中的最小值(图8)。此外,表明最优规划配置方案的经济性亦优于其他方案,如图9所示。

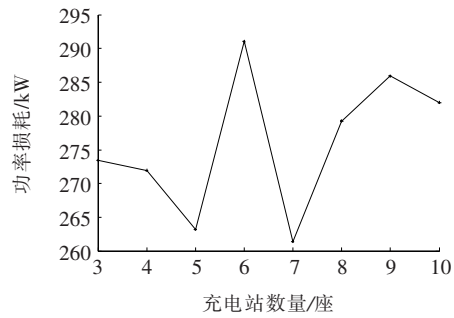


图8 系统功率损耗

Figure 8 System power loss

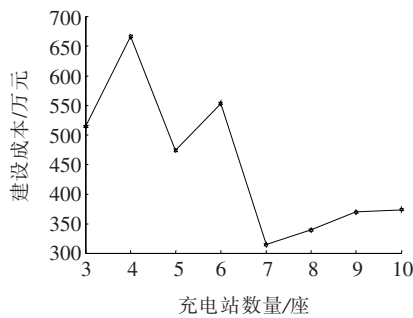


图9 建设成本

Figure 9 Cost of construction

4 结语

正如文献[8]指出,模型和算法是解决电动汽车充电站规划问题有效方法。该文考虑到电动汽车充电站的不合理规划与配置会严重影响配电系统的稳定性,根据电动私家车的充电需求,运用排队论来确定所需配置充电机总数及单机充电功率,建立了基于电压稳定指标的电动汽车充电站最优规划数学模型,给出了运用改进自适应粒子群优化算法的求解该非线性、多约束的优化问题流程。

基于算例的仿真结果显示,在采用该方法所得最优规划方案在满足投资经济性的前提下,配电网的电压稳定性最好,且系统有功损耗受充电站接入的影响最小。值得指出的是,在最优规划方案下,系统的电压稳定指标比原系统的更小,这是由于充电站的接入位置较为分散且对应节点的原始负荷较小造成的。

虽然采用该文方法所得充电站规划方案对配电网运行的稳定性、经济性和电能质量影响最小,但在不改变网架情况下,势必降低相关指标,因此,作为下一步的研究方向,将同时考虑无功补偿配置问题,以充分保证系统电压质量,进一步降低配电网的电能损耗。

参考文献:

- [1] 杨亚雄,杨洪明,张俊. 电动汽车代理商电力市场竞价策略研究[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(2):104-110.
YANG Yaxiong, YANG Hongming, ZHANG Jun. Research on bidding strategy of electricity market for electric vehicle aggregators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2):104-110.
- [2] Zheng Y, Dong Z Y, Xu Y, et al. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):221-229.
- [3] 唐现刚,刘俊勇,刘友波,等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化,2012,38(1):13-30.
TANG Xiangang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 38(1):13-30.
- [4] 刘志鹏,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):54-59.
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3):54-59.
- [5] Phonrattanasak P, Leeprechanon N. Optimal location of fast charging station on residential distribution grid[J]. International Journal of Innovation, Management and Technology, 2012, 3(6):675-681.
- [6] 刘自发,张伟,王泽黎. 基于量子粒子群优化算法的城市电动汽车充电站优化布局[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22):39-45.
LIU Zifa, ZHANG Wei, WANG Zeli. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on quantum PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22):39-45.
- [7] 张港,李明,潘浩,等. 市场化的电动汽车充电站规划布局研究[J]. 陕西电力,2015,43(4):40-44.
ZHANG Gang, LI Ming, PAN Hao, et al. Marketization of electric vehicle charging station layout research[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(4):40-44.
- [8] 周文峰,李珍萍,崔晓洁,等. 电动汽车充电站选址问题研究[J]. 数学的实践与认识,2016,46(11):187-194.
ZHOU Wenfeng, LI Zhenping, CUI Xiaojie, et al. Research on location problem of electric vehicle charging station[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(11):187-194.
- [9] You P S, Hsieh Y C. A hybrid heuristic approach to the problem of the location of vehicle charging stations[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 70(1):195-204.
- [10] Cavadas J, Correia G H D A, Gouveia J. A MIP model for locating slow-charging stations for electric vehicles in urban areas accounting for driver tours[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2015, 75:188-201.
- [11] 陈静鹏,艾芊,肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):34-39.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):34-39.
- [12] 韩煜东,郭锦锦. 基于遗传算法的快慢充充电站综合布局优化研究[J]. 数学的实践与认识,2016,46(3):77-88.
HAN Yudong, GUO Jinjin. Research on the layout planning of fast-charging and slow-charging station based on genetic algorithm[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(3):77-88.
- [13] 所丽,向驰,唐巍,等. 均衡不同主体利益的集中型充电站多目标二层规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):100-107.
SUO Li, XIANG Chi, TANG Wei, et al. Multi-objective bilevel programming of centralized charging station considering benefits balance for different subjects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12):100-107.
- [14] 王辉,王贵斌,赵俊华,等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):63-69.
WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al.

- Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 63-69.
- [15] 竺炜, 张玉龙, 茹梁, 等. 基于负荷安全域的 10 kV 配网无功配置方法研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(4): 73-79.
- ZHU Wei, ZHANG Yulong, RU Liang, et al. Research on reactive power configuration method of 10 kV distribution network based on load security region[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(4): 73-79.
- [16] 陈丽丹, 张尧. 电动汽车随机充电对配电网影响的研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(1): 62-69.
- CHEN Lidan, ZHANG Yao. Study on the influence of electric vehicles random charging on distribution network[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(1): 62-69.
- [17] 沈依婷, 张菁, 武鹏, 等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. *中国电力*, 2020, 53(4): 139-146.
- SHEN Yiting, ZHANG Jing, WU Peng, et al. Bi-uncertainty network frame planning method for distribution network with electric vehicles[J]. *Electric Power*, 2020, 53(4): 139-146.
- [18] 吴凤平. 运筹学——方法与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2009.
- [19] 熊虎, 向铁元, 祝勇刚, 等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(23): 65-70.
- XIONG Hu, XIANG Tieyuan, ZHU Yonggang, et al. Electric vehicle public charging stations location optimal planning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(23): 65-70.
- [20] Dong X H, Mu Y F, Jia H J, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(4): 1452-1461.
- [21] 程杉, 吴思源, 孙伟斌. 考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 12-21.
- CHENG Shan, WU Siyuan, SUN Weibin. Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 12-21.
- [22] Cheng S, Chen M Y, Wai R J, et al. Optimal placement of distributed generation units in distribution systems via an enhanced multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2014, 15(4): 300-311.
- [23] 冯亮. 电动汽车充电站规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [24] Cheng S, Chen M Y. Multi-objective reactive power optimization strategy for distribution system with penetration of distributed generation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 62(62): 221-228.
- [25] Liu Z F, Zhang W, Ji X, et al. Optimal planning of charging station for electric vehicle based on particle swarm optimization[C]//*IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, Tianjin, China*, 2012.