

9-14-2020

Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks

Wenbiao MA

Shuozhou Power Supply Company, Stato Grid Shanxi Electric Power Co , Ltd , Shuozhou 036000 , China

Liang CHENG

School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072 , China

Hongkun CHEN

School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

MA, Wenbiao; CHENG, Liang; and CHEN, Hongkun (2020) "Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 11.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.011

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/11>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

考虑电动汽车有序充电的主动配电网网架规划

马文彪¹, 程 亮², 陈红坤²

(1. 国网山西省电力有限公司朔州市供电公司, 山西 朔州 036000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:在电动汽车规模发展的背景下,合理地优化控制电动汽车充电负荷,进行主动配电网网架规划具有重要的现实意义。该文在对电动汽车充电负荷进行优化调度的基础上,建立主动配电网网架规划双层模型。首先,该模型计及分布式电源和负荷的不确定性,研究电动汽车充电负荷预测的主要流程框架并阐述充电负荷调度方法,以此构建主动配电网网架规划的数学模型,模型中规划层以单位用电量的年综合经济代价最小为目标,运行层以负荷曲线方差最小为目标。其次,在模型求解过程中,利用 Prim 算法改进粒子群算法的种群生成过程,通过罚函数形式处理约束条件,提高求解效率与精度。最后利用配电网实际算例验证模型的合理性和有效性。

关 键 词:电动汽车;负荷调节;主动配电网;网架规划

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.011 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)03-0083-09

Framework planning considering coordinated charging of electric vehicles in active distribution networks

MA Wenbiao¹, CHENG Liang², CHEN Hongkun²

(1. Shuozhou Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Shuozhou 036000, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Under the circumstances of development for scaled electric vehicles (EVs), it is of great significance to rationally control and optimize the EV charging load and carry out the structure planning of the active distribution network. This paper establishes a bi-level model for structure planning of active distribution networks based on the regulation of the EV charging load. Firstly, taking the uncertainties of distributed generation and load into consideration, the main process framework for EV charging load forecasting is constructed, and then the dispatching method of the charging load is described and the mathematical model of structure planning for active distribution networks is build up. In such a mathematical model, the planning layer aims at the lowest comprehensive economic cost for kilowatt-hour of electricity and the operational layer is targeted at minimizing the load curve variance. Secondly, in the process of model solving, the Prim algorithm is utilized to improve the population generation process of particle swarm optimization (PSO) and constraints are processed by a penalty function so as to improve the efficiency and precision of algorithm. Finally, the rationality and validity of the model are verified by an actual distribution network.

Key words: electric vehicle; load regulation; active distribution network; framework planning

收稿日期:2017-12-11;修回日期:2018-07-05

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGSXSZ00FCJS1700013)

通信作者:程 亮(1995-),男,硕士研究生,主要从事电力系统规划及电动汽车研究;E-mail:clylly@163.com

随着化石能源的消耗殆尽,分布式电源在配电网中的比例不断攀升,当前配电网正处于从传统配电网向主动配电网转型的重要阶段^[1]。此外,伴随国家交通网络电气化的推进,规模化电动汽车的接入对配电网的规划和运行带来了新的不确定因素^[2]。如何协调主动配电网中网架结构与电动汽车之间的关系,以有效的规划方案应对新元素给主动配电网带来的问题,具有重要的现实意义。

目前,已有学者对电动汽车在配电网中的规划进行了相关研究,文献[3]将城市作为应用场景,构造电动汽车充电设施规划流程,针对不同充电需求的电动汽车进行充电设施规划;文献[4]考虑电动汽车充电站布局优化,提出一种新的辐射状约束条件,构造配电网中电动汽车规划模型;文献[5]考虑电动汽车 V2G 运行模式,通过电价机制合理引导电动汽车用户有序充放电,建立电动汽车选址定容模型;文献[6]充分考虑分时充电电价激励下充电行为的改变,通过排队论优化配置充电桩,采用双层规划方法体现充电站与配电网规划的系统性;文献[7]研究电动汽车充电站与储能系统的协同作用,同时进行配电网扩展规划和电动汽车充电站以及储能系统的选址定容;文献[8]考虑将电动汽车作为移动式分布储能装置通过 V2G 模式参与电网调峰,将电网调峰费用加入目标函数,对配电网和电动汽车进行合理规划。

早期研究大多为针对电动汽车充电站的选址定容,虽然一部分文献考虑了电动汽车有序充电的影响,但都是基于确定的配电网,没有在对电动汽车选址定容的同时进行配电网网架规划。近年来,随着新一轮城网改造的进行,电网公司在配电网方面的投资不断增大,在考虑电动汽车有序充电的同时,合理规划配电网网架,建设主动配电网将成为发展趋势。因此,如何在电动汽车有序充电情况下进行配电网网架的规划是一个值得研究的问题。

该文主要研究考虑电动汽车有序充电的主动配电网规划问题。首先对配电网中的不确定因素进行建模,提出电动汽车充电负荷的计算方法及充电负荷调度原理,在此基础上构建配电网网架双层规划模型,综合考虑配电网运行约束和电动汽车充电约束,利用朔州某规划区域为算例进行仿真分析,验证模型的可行性和可靠性。

1 不确定性建模

主动配电网中负荷功率和不同类型的分布式电源出力具有很强的随机性,同时负荷类型的不同将使得负荷特性也存在较大的差异^[9],因此在规划期必须合理地考虑上述因素的影响。

1.1 分布式电源出力模型

风力发电机(wind turbine generator, WTG)的输出功率主要受风速控制,WTG 的输出功率 P_w 与风速 v 的关系可用分段函数的近似描述^[10]:

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v > v_{out} \\ nP_N^w \frac{v - v_{in}}{v_N - v_{in}}, & v_{in} \leq v \leq v_N \\ nP_N^w, & v_N < v \leq v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中 n 为风机个数; P_N^w 为单台风机的额定功率; v_{in} 、 v_N 和 v_{out} 为风机的切入风速、额定风速和切出风速。

光伏发电(photovoltaic generator, PVG)的输出功率 P_{PV} 受到光照强度 r 的控制,两者之间的关系为^[11]

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{PV}^r r / r_N, & r \leq r_N \\ P_{PV}^r, & r > r_N \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_{PV}^r 为 PVG 的额定输出功率; r_N 为额定光照强度。

1.2 DG 出力场景构建

由于风电功率受到风速的影响,而光伏功率与光照强度有关,两者的发电特性均有较强的时序特性和季节特性^[12]。该文根据朔州市四季的气象资料,根据概率模型得到 WTG 和 PVG 在四季典型日的出力曲线,如图 1 所示。

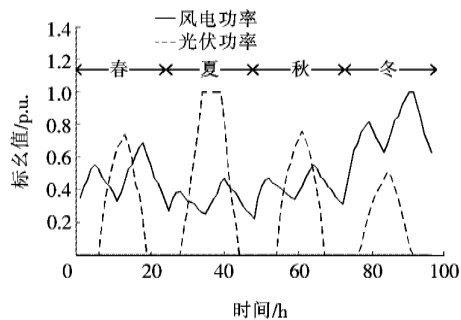


图 1 风电、光伏功率典型日波动情况

Figure 1 Variations of Wind and PV Power in typical days

1.3 负荷特性

不同类型的负荷,其负荷曲线也会存在较大差异,在此,该文主要考虑工业负荷、商业负荷和居民生活负荷^[13],典型日内各种负荷波动情况如图 2 所示。从图中可以看到:商业负荷的高峰期一般在 9:00~22:00 时,而在其余时间其负荷量较小;工业负荷波动性较小,在一天内负荷量变化趋势不大;居民负荷的时序特性最强,在 7:00、12:00 和 20:00 这 3 个时间段负荷量较其他时间段负荷量增长不少。

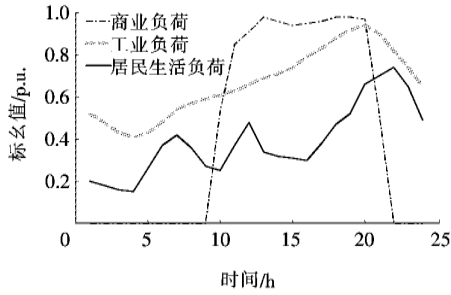


图 2 各类负荷典型日波动情况

Figure 2 Variations of load in typical days

2 电动汽车充电模型

电动汽车作为一种清洁的交通工具,由于具有碳排放低、能源消耗率少的特点,在全世界得到了广泛关注^[6]。电动汽车充电方式主要有慢速充电和快速充电,前者是电动汽车完成一天的行驶任务后进行充电,后者是电动汽车在行驶过程中电池荷电状态(state of charge, SOC)减少至阈值时进行充电。慢速充电使用较多,该文主要考虑这种电动汽车电能补给方式。

2.1 不确定因素的概率模型

影响电动汽车充电负荷主要有电动汽车的数量、充电功率、充电的起始和终止时刻等多个因素^[2]。在不考虑电动汽车长途行驶的前提下,由于市内日平均行驶里程远小于电动汽车动力电池的最大续航里程^[14],因此每天只进行一次慢充即可满足电动汽车一天的行驶需求。

一般认为用户的充电起始时刻与充电结束时刻近似服从于高斯分布,其概率密度函数表达式:

$$f_{(T)}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

而日行驶里程近似服从于对数正太分布,其概率密度表达式:

$$f_{(L)}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中 μ 和 σ 分别为变量的平均值与标准差。

2.2 充电负荷计算

假定每辆电动汽车的充电起始时间、终止时间和日行驶里程之间没有相关性,相互独立,那么充电负荷计算步骤如下。

1) 根据概率分布,得到数量为 m 的电动汽车的充电起始时间、充电终止时间以及日行驶里程。

2) 模拟充电过程,更新动力电池的 SOC,每台电动汽车行驶后和充电后的 SOC 分别由式(5)、(6)所示:

$$SOC_i(t_1) = SOC_i(t_0) - \frac{d_i}{D_i} \quad (5)$$

$$SOC_i(t_2 + \Delta t) = SOC_i(t_2) + \frac{\eta P_{\text{Charge}} \Delta t}{C_i} \quad (6)$$

式中 t_0 、 t_1 和 t_2 分别为第 i 台电动汽车旅途开始时间、旅途结束时间和充电开始时间; d_i 和 D_i 为第 i 台电动汽车日行驶里程和续航里程; η 为充电效率; Δt 为充电时间; C_i 为第 i 台电动汽车电池容量。

3) 计算单台电动汽车的充电负荷。

4) 将充电负荷进行叠加得到规模化电动汽车的充电负荷曲线:

$$P_{EV}(t) = \sum_{i=1}^m P_{\text{Charge}}(i, t) \quad (7)$$

式中 $P_{EV}(t)$ 为电动汽车集群的充电负荷; $P_{\text{Charge}}(i, t)$ 为第 i 台电动汽车在 t 时刻的充电负荷。

按照以上计算步骤,根据朔州市居民的行驶特性(表 1),电网对电动汽车的充电行为不进行引导和控制,充电功率 $P_{\text{Charge}} = 3.5 \text{ kW}$ 时,对不同规模电动汽车无序充电的负荷曲线进行预测,如图 3 所示。

表 1 用户充电特性参数

Table 1 Parameters of users' charging habit

参数值	充电起始时间	充电结束时间	日行驶里程(对数)
平均值	7:26	18:43	3.66
标准差	0.67	1.38	0.51

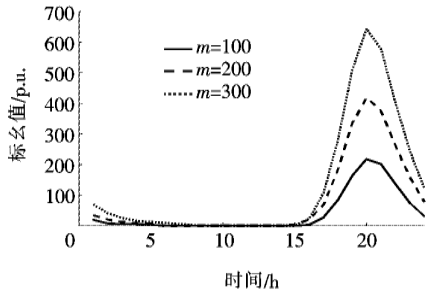


图3 不同规模电动汽车充电负荷曲线

Figure 3 Charging load curve of EVs for different scales

2.3 有序充电优化

大规模电动汽车接入电网后将导致新一轮的负荷增长,若电动汽车都集中在晚间负荷高峰时段充电,将改变配电网负荷结构和特性,加剧负荷曲线的峰谷差,增加电力系统的负担。

一般而言,电动汽车在夜间慢充时其实际充电时间较汽车停放时间短,因此具有较高的充电灵活性,可以在满足电动汽车能量需求的前提下采用有序充电策略来减少运行成本。图4表示2种典型的电动汽车充电过程。

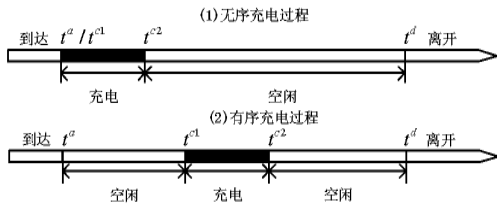


图4 2种电动汽车充电过程

Figure 4 Two kinds of charging process for EVs

从图4可以看到,电动汽车使用慢充时停车时间($t^d - t^a$)比所需要的充电时间($t^c2 - t^c1$)要长,在绝大多数时段(图4无序充电过程的 $t^d - t^c2$ 、有序充电过程的 $t^c1 - t^a$ 和 $t^d - t^c2$)电动汽车没有充电行为。无序充电时通常将电动汽车到达时间 t^a 当做充电起始时间 t^c1 ,而充电结束时刻 t^c2 远比电动汽车离开时刻 t^d 小,存在一段较长的空闲期。因此通过充电时间的控制可以有效地对电动汽车充电负荷进行调度,在满足充电能量需求的前提下规避晚间负荷高峰时段,避免电力系统“峰上加峰”的出现,实现“填谷作用”。

3 考虑EV有序充电的主动配电网网架规划模型

该文的规划内容主要包括电网线路的选型以及拓扑结构的改变,此外还包括电动汽车充电负荷的优化控制,以达到最优网架结构的目的。该文依据多层规划理论^[15]建立双层规划场景模型。

3.1 目标函数

该文中上层目标函数是用户单位用电量年经济总代价最小。年经济总代价包括电网线路投资的年等值费用 C_1 、向上级电网的年购电费用 C_{buy} 、分布式电源的年运行维护费用 C_{DG} 和年网损费用 C_{loss} 。具体形式:

$$\min F = \frac{C_1 + C_{\text{buy}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{loss}}}{\sum_{j \in \text{NB}} E_j^{\text{total}}} \quad (8)$$

式中 NB 为负荷节点集合, E_j^{total} 为节点 j 的年用电量。具体计算:

$$C_1 = F_{\text{line}} \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (9)$$

$$C_{\text{buy}} = \alpha \left(\sum_{j \in \text{NB}} E_j^{\text{total}} + E_{\text{loss}} - E_{\text{DG}} \right) \quad (10)$$

$$C_{\text{DG}} = F_{\text{DG}} \cdot \sum E_{i, \text{DG}} \quad (11)$$

$$C_{\text{loss}} = \alpha \sum P_{\text{loss}}(t) \Delta t \quad (12)$$

式中 F_{line} 为网架的初始投资费用; n 为线路的使用年限,取 20 年; r 为折现率,取 10%; α 为电价; E_{loss} 为年网损电量; $E_{i, \text{DG}}$ 为第 i 台 DG 的年发电量; F_{DG} 为分布式电源单位发电量所需要的运行维护费用; $P_{\text{loss}}(t)$ 为 t 时段系统的网损; Δt 为时间尺度。由于 EVs 的接入将导致系统网损发生变化,因此需要进行多时段潮流计算,网损计算:

$$P_{\text{loss}}(t) = \sum_{j=1}^{\text{NB}} U_j(t) \sum_{k \in j} U_k(t) G_{kj} \cos \delta_{kj}(t) \quad (13)$$

式中 $U_j(t)$ 和 $U_k(t)$ 分别为节点 j 和节点 k 在 t 时刻的电压幅值; G_{kj} 为节点导纳矩阵元素的实部; $\cos \delta_{kj}$ 为 2 个节点的相位差。

为了避免由于大规模电动汽车接入所带来的配电网峰荷增加,降低配电网的运行成本,该文通过充电时间控制对电动汽车充电负荷曲线进行优化。由

于降低电网损耗、提升电网负荷率和缩小电网负荷方差这三者在电动汽车充电负荷调节问题中具有等价性^[16],故将以负荷曲线方差最小作为下层目标函数,即

$$\min f = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{load}}(t) + P_{\text{EV}}(t) - \bar{P})^2 \quad (14)$$

式中 $P_{\text{load}}(t)$ 为常规负荷, $P_{\text{EV}}(t)$ 为电动汽车充电负荷, \bar{P} 为负荷平均值,其计算表达式:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{load}}(t) + P_{\text{EV}}(t)) \quad (15)$$

3.2 约束条件

因为国内配电网均为开环运行,结合电动汽车行驶特性,将考虑以下约束条件。

1) 辐射网运行约束。

$$n = m + 1 \quad (16)$$

式中 n 为节点数; m 为支路数。

2) 线路容量约束。

$$S^{\text{line}} \leq S_{\text{max}}^{\text{line}} \quad (17)$$

式中 S^{line} 为流过线路的视在功率; $S_{\text{max}}^{\text{line}}$ 为线路传输功率的容量极限。

3) 节点电压约束。

$$U_{\text{min}}^j \leq U^j \leq U_{\text{max}}^j \quad (18)$$

式中 U^j 为节点 j 的电压幅值; U_{max}^j 和 U_{min}^j 分别为节点 j 所允许电压幅值的上下限。

4) 系统功率约束。

$$\sum_{i=1}^{NB} P_{\text{load}}(i, t) + P_{\text{loss}}(t) + P_{\text{EV}}(t) = P_{\text{Grid}}(t) + P_{\text{DG}}(t) \quad (19)$$

式中 $P_{\text{load}}(i, t)$ 为第 i 个节点在 t 时刻的负荷功率; $P_{\text{loss}}(t)$ 和 $P_{\text{EV}}(t)$ 分别为 t 时刻网损功率和电动汽车充电总功率; $P_{\text{DG}}(t)$ 为分布式电源发电总功率; $P_{\text{Grid}}(t)$ 为上级电网向配电网系统的注入功率。

5) 分布式电源功率约束。

$$P_{\text{min}}^{i, \text{WTG}} \leq P^{i, \text{WTG}}(t) \leq P_{\text{max}}^{i, \text{WTG}} \quad (20)$$

$$P_{\text{min}}^{i, \text{PVG}} \leq P^{i, \text{PVG}}(t) \leq P_{\text{max}}^{i, \text{PVG}} \quad (21)$$

式中 $P^{i, \text{WTG}}(t)$ 和 $P^{i, \text{PVG}}(t)$ 分别是 t 时刻第 i 个风力发电机输出功率和光伏发电系统输出功率; $P_{\text{max}}^{i, \text{WTG}}$ 、 $P_{\text{min}}^{i, \text{WTG}}$ 、 $P_{\text{max}}^{i, \text{PVG}}$ 和 $P_{\text{min}}^{i, \text{PVG}}$ 分别是风力发电功

率和光伏发电功率的上下限值。

6) 充电时间约束。

$$T_{i, \text{start}} \leq T_i \leq T_{i, \text{end}} \quad (22)$$

式中 $T_{i, \text{start}}$ 和 $T_{i, \text{end}}$ 分别为第 i 台电动汽车充电起始时间和充电结束时间。

7) 电动汽车电池剩余容量约束。

在 t 时段,电动汽车电池 SOC 为

$$\text{SOC}(i, t) = \text{SOC}(i, t-1) + \frac{\eta_c P_c^i \Delta t}{C_i} - \frac{P_{\text{Dis}}^i \Delta t}{\eta_{\text{Dis}} C_i} \quad (23)$$

式中 $\text{SOC}(i, t)$ 为第 i 台电动汽车 t 时段的电池荷电状态; η_c 和 η_{Dis} 分别为电池充电和电池放电的效率; P_c^i 和 P_{Dis}^i 分别是第 i 台电动汽车充电功率和放电功率; Δt 为 2 个时间段的时间间隔; C_i 为第 i 台电动汽车电池容量。

在任意时刻,电动汽车电池储能系统的 SOC 状态均满足:

$$\text{SOC}_{\text{min}}(i, t) \leq \text{SOC}(i, t) \leq \text{SOC}_{\text{max}}(i, t) \leq 1 \quad (24)$$

8) 为保证电动汽车用户每天的正常出行,充电结束后电动汽车电池容量不得小于前一天出行时的电池容量。

$$\text{SOC}(i, 0) \geq \text{SOC}(i, T) \quad (25)$$

9) 充电能量需求约束。

$$\frac{\sum_{i=1}^m x_{i, \text{EV}}}{m} \geq \eta_{\text{PV}, \text{min}} \quad (26)$$

式中 $x_{i, \text{EV}}$ 为表征第 i 辆电动汽车充电能量需求状态的逻辑变量,当能量需求得到满足时, $x_{i, \text{EV}} = 1$, 否则 $x_{i, \text{EV}} = 0$, $\eta_{\text{PV}, \text{min}}$ 表示电动汽车集群最小充电能量满足率。

3.3 双层规划的关系

双层规划中各层的关系如图 5 所示。上层规划是配电网网架规划问题,下层规划是电动汽车充电负荷调度问题。上层规划求得网架方案后传递给下层,然后下层规划对电动汽车充电负荷进行优化,并将其返回给上层,以此来计算网损、年用电量,同时对目标函数进行修正。

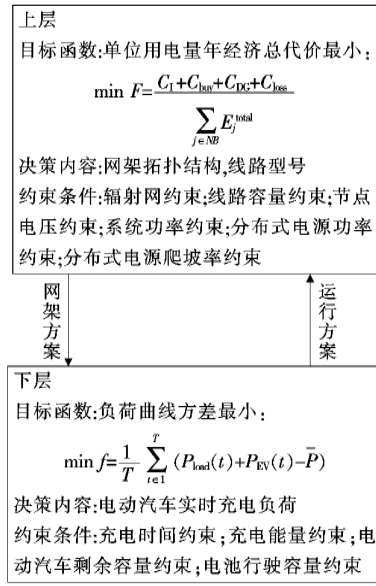


图 5 双层规划模型传递

Figure 5 The relationship for the bi-level model

4 模型求解

该文所构建的规划模型属于复杂的高维度、非线性且多约束、双层不确定性问题,依靠经典数学优化方法难以求解,故将选择粒子群算法(PSO)进行求解,规划流程如图 6 所示。

图 6(a)为双层规划模型求解过程,算法通过迭代不断更新最优粒子的位置与飞行速度,当前后 2 次迭代的误差精度达到要求或者迭代次数达到设定值时,算法结束并输出最终结果。图 6(b)为下层规划模型求解过程,在上层的规划方案下进行模拟分析,得到运行成本反馈至上层规划中。

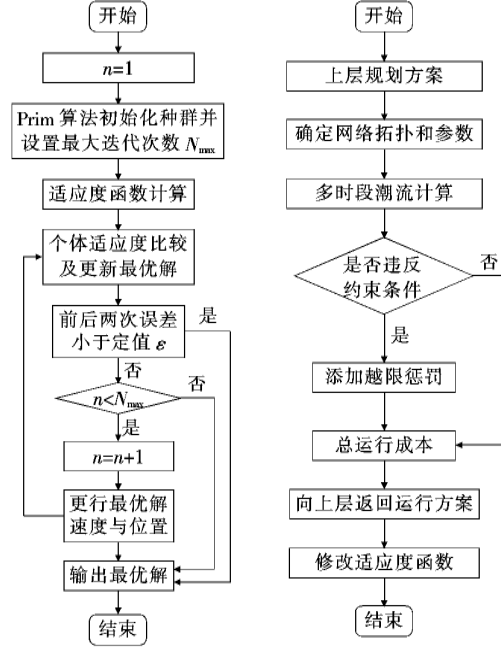
由于配电网是辐射状的连通性网络,可以采用图论中的树来表示,因此为了避免粒子群算法在随机生成种群时产生大量不可行解,可以将最小生成树 Prim 算法嵌入到粒子群算法中改进其种群质量,生成较优初始网架方案。

随着对规划算法的研究^[17],在求解具有约束的优化问题时,罚函数法具有更快的收敛速度和求解精度。因此在构建算法适应度函数时考虑将约束条件加入目标函数,其适应度函数:

$$fitness = \frac{C_1 + C_{buy} + C_{DG} + C_{loss}}{\sum_{j \in NB} E_j^{total}} + \sigma L \quad (27)$$

$$L = \begin{cases} 0 & \text{理论约束未被违反} \\ M & \text{任一理论约束被违反} \end{cases} \quad (28)$$

式中 σ 为惩罚因子; L 为惩罚值; M 为一较大整数。



(a) PSO 算法流程

(b) 下层成本计算流程

图 6 双层规划求解流程

Figure 6 The flow chart of bi-level model

5 算例分析

5.1 算例介绍

该文以朔州某区域 10 kV 电网为例,其中 1 号节点为 35/10 kV 变电站节点,即上级电源点。现在一部分节点规划接入了分布式电源,另一部分节点规划建设电动汽车充电站,如表 2 所示。算例具体参数如表 3 所示。备用线路型号为架空线路

表 2 DG 和 EV 接入数据

Table 2 Data of DG, EV nodes

节点编号	类型	额定出力/kW	台数
3	电动汽车	—	100
5	风电	100	1
10	风电	100	2
17	光伏	100	1
20	电动汽车	—	60
20	光伏	100	1
22	电动汽车	—	70

表 3 节点数据
Table 3 Data of nodes

节点号	x/km	y/km	P/kW	Q/kVar	类型
1	2.276	1.040	—	—	—
2	1.356	0.976	192	127	2
3	0.780	1.254	185	131	2
4	0.496	1.026	235	162	1
5	0.824	0.864	221	189	1
6	3.176	1.758	184	128	2
7	0.484	1.552	196	141	2
8	1.308	1.536	172	129	1
9	0.964	1.772	195	133	3
10	3.660	0.854	273	203	3
11	0.848	0.380	288	214	1
12	1.216	0.132	215	167	1
13	3.156	0.132	198	141	2
14	3.572	1.688	254	196	3
15	3.176	1.510	233	167	3
16	2.648	0.062	179	127	2
17	2.428	0.284	231	183	1
18	3.600	0.424	257	198	3
19	3.740	1.440	226	168	3
20	2.604	1.506	178	120	1
21	1.472	0.304	190	134	1
22	2.688	0.456	261	205	3
23	3.244	1.146	188	135	2
24	3.916	0.688	207	146	1

注:1. x 、 y 分别表示节点横、纵坐标;2. P 、 Q 分别表示节点的有功、无功功率;3. 1、2、3 分别表示居民负荷、商业负荷、工业负荷

LGJ-35、LGJ-50 和 LGJ-70,相关参数及造价见文献[18],向上级电网购电成本为 0.376 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$,风力、光伏发电系统的运行维护费用分别为 0.1、0.2 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

5.2 规划结果及对比分析

在 MATLAB 环境下,算例采用 PSO 算法和 Matpower 工具包求解,设置 PSO 算法种群规模为 70 个,最大迭代次数为 300 代,惯性因子为 0.75,学习因子 c_1 和 c_2 分别为 0.5 和 1.25,得到规划方案如图 7 所示。

5.2.1 负荷曲线分析

在该文双层规划模型中,对电动汽车充电负荷的控制将影响全局的结果,以夏季典型日为例,图 8 为考虑有序充电和无序充电 2 种情况下该区域负荷曲线,对比情况如表 4 所示。

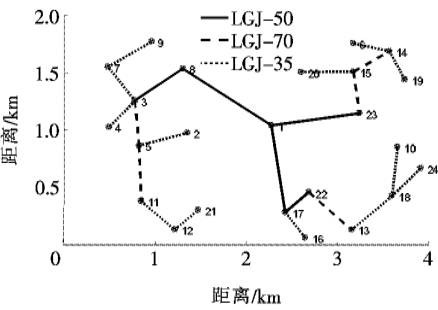


图 7 考虑电动汽车有序充电的最优网架方案
Figure 7 Optimal framework considering EV's coordinated charging

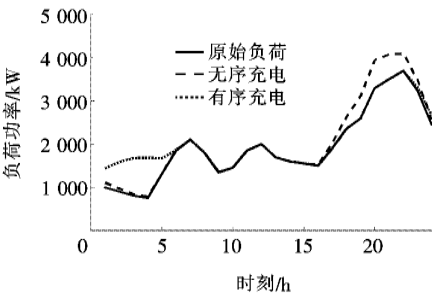


图 8 不同情况下区域负荷曲线
Figure 8 Load curve for different occasions

表 4 负荷曲线指标分析
Table 4 Analysis of load curve

方案	最大功率/ kW	最小功率/ kW	峰谷差/ kW	方差
无电动汽车	3 678.2	756.3	2 921.9	474 915.3
无序充电	4 123.6	779.5	3 344.1	684 214.4
有序充电	3 678.2	1 378.3	2 299.9	372 845.5

从图 8 和表 4 中看到,在无序充电方案下电动汽车接入电网将增大配电网负荷,使负荷曲线出现“峰上加峰”的现象。而考虑有序充电的方案中电动汽车充电负荷集中在凌晨 0:00~5:00 的负荷低谷时段,峰谷差下降至 2 299.9 kW,较另外 2 种方案均有减小,产生了明显的填谷效果,不仅没有提高配电网对调峰容量的要求,还延缓了在输变电设备上的投资。与此同时,考虑有序充电方案中负荷曲线方差较无电动汽车接入和无序充电方案分别下降了 21.5%和 42.6%,有效地改善负荷了曲线特性。

5.2.2 综合成本分析

为了进行对比分析,在电动汽车无序充电情况下重新对该算例进行求解计算,得到的规划方案如图 9 所示,结果对比如表 5 所示。

从表 5 可以看到,电动汽车无序充电将导致负荷曲线峰值增加,增大峰时导线载流量,故无序充电

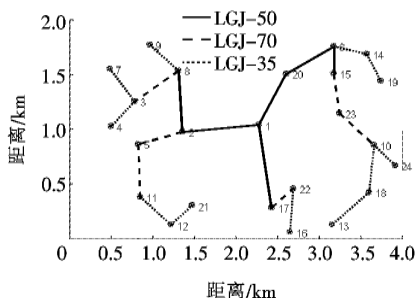


图 9 考虑电动汽车无序充电的最优网架方案

Figure 9 Optimal framework considering EV's random charging

表 5 考虑是否有序充电的成本对比

Table 5 Comparison with/without coordinated charging

规划方案	费用/万元	
	有序充电	无序充电
年综合费用	427.4	469.3
年线路投资成本	29.3	34.1
年网络损耗成本	17.7	20.2
年购电成本	349.2	386.9
年 DG 运维成本	31.2	28.1

方案下网架线路选择了更多较大容量的线型,因此增加了其年线路投资成本。从年购电成本和年 DG 运维成本的比较上可以看到,考虑电动汽车有序充电后,配电网减少了向上级电网的购电量,增加了对 DG 发电量的消纳,实现了经济效益和环境效益的双重优化。此外,考虑有序充电情况下的年综合投资费用比无序充电情况下的年综合投资费用少投入 41.9 万元,这表明在规划阶段考虑电动汽车有序充电,可以充分发挥电动汽车充电负荷的可调度性,优化建设线路选择,降低建设成本,提高设备利用率。

5.2.3 不确定模型分析

在传统规划方式下,负荷采用恒最大功率进行模拟,DG 也是作为一个恒定功率的电源。为了进行对比分析,将时序特性和季节特性去掉,采用传统场景法模拟负荷、DG 的不确定性,采用优化后的电动汽车充电负荷,规划结果如图 10 所示,各部分成分对比结果如表 6 所示。

对比负荷和分布式电源的 2 种不确定性模型,可以看到在不考虑时序性后,年线路投资成本从 29.3 万元上升至 36.9 万元,线路选型上除了配电线路末端外,也都是由大容量线型组成。引入时序模型后,由于各类负荷的负荷特性不同,存在错峰效应,其夏季典型日负荷峰值为 3.678 MW,而不考虑时序模型时的夏季典型日峰值负荷为 4.958 MW。此外,利用负荷的时序模型进行潮流计算将会得到较

小的网络损耗值,降低年网络损耗成本,虽然减少了 DG 的消纳量,但是可以得到更加经济合理的网架方案,这对延缓电网投资,优化电网建设具有重要意义。

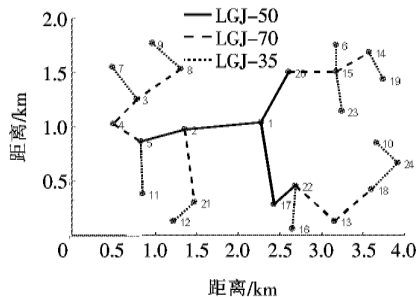


图 10 传统方式下最优网架方案

Figure 10 Optimal framework in traditional way

表 6 不同不确定性模型的成本对比

Table 6 Comparison for uncertainty model

规划方案	费用/万元	
	时序模型	传统模型
年综合费用	427.4	483.6
年线路投资成本	29.3	36.9
年网络损耗成本	17.7	19.4
年购电成本	349.2	393.5
年 DG 运维成本	31.2	33.8

6 结语

该文在规划阶段考虑电动汽车有序充电,主要研究大规划电动汽车接入背景下的主动配电网网架规划问题,通过算例分析得到以下结论:

1)通过对电动汽车充电时间的控制,可以实现电动汽车充电负荷优化调度,具有“填谷”效果,还能避免电动汽车接入后充电负荷与配电网原有负荷“峰上加峰”现象的出现,有效地改善了配电网负荷曲线特性;

2)通过该文模型的分析,规划阶段考虑电动汽车有序充电可以有效减小配电网在投资层面和运行层面的成本,从而生成的网架方案在经济性上具有较大优势;

3)规划过程中不确定性模型至关重要,引入负荷、DG 和负荷的时序模型后,场景建模将更加精确,不同类型负荷间的错峰现象以及不同 DG 之间的相互配合将有利于配电网的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.

- YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] 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.
- [3] 贾龙, 胡泽春, 宋永华. 考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2579-2587.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands[J]. Power system technology, 2016, 40(9): 2579-2587.
- [4] 杜爱虎, 胡泽华, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.
- DU Aihu, HU Zechun, SONG yonghua, et al. Distribution network planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[J]. Power system technology, 2011, 35(11): 35-42.
- [5] 艾圣芳, 林湘宁, 万云飞, 等. 考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 122-129.
- AI Shengfang, LIN Xiangning, WAN Yunfei, et al. Study of the active distribution network planning considering multiple electric vehicle charging station participating in V2G applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 122-129.
- [6] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 103-110.
- DUAN Haoxiang, LV Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 103-110.
- [7] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.
- JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage system and electric vehicle charging stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [8] 杨洪明, 黄雨翔, 刘保平, 等. 考虑分布式电动汽车参与电网调峰的配电网规划[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 48-53.
- YANG Hongming, HUANG Yuxiang, LIU Baoping. Distribution network planning considering distributed EVs for peak shaving[J]. Journal of electric power science and technology, 2012, 27(1): 48-53.
- [9] Mazidi M, Zaakariazadeh A, Jadid S, et al. Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 1118-1127.
- [10] Atwa A M, El-Saadany E E, Salama M M A, et al. Optimal renewable resource mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2010, 25(1): 360-370.
- [11] 邓威, 李欣然, 刘志勇, 等. 考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 80-88.
- DENG Wei, LI Xinran, LIU Zhiyong. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation considering reactive power compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 80-88.
- [12] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63+128.
- LI Liang, TANG Wei, BAI Muke. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63+128.
- [13] 邱起瑞, 李更丰, 潘雨晴. 基于用电行为综合指标的用户负荷分类研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 26-31.
- QIU Qirui, LI Gengfeng, PAN Yuqing. Research on user load classification based on synthetic index of electricity consumption behavior[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 26-31.
- [14] Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power System, 2010, 25(1): 371-380.
- [15] 刘博, 姜秉梁, 郝宁, 等. 分时阶梯电价-微电网联合优化调度的不确定二层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 75-83.
- LIU Bo, JIANG Bingliang, HAO Ning, et al. Coordinated optimization of TOU & tiered pricing and optimal scheduling model combining microgrid under uncertain bilevel programming[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 75-83.
- [16] Eric S, Mohammad M. Coordinated Charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [17] 朱德通. 最优化模型与实验[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [18] 陕西省电力建设定额站. 电力建设 110kV 及以下送变电工程限额设计参考造价指标[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.