

# 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法

石立国<sup>1</sup>, 李延真<sup>1</sup>, 关雪琳<sup>1</sup>, 刘栋<sup>2</sup>, 孙嘉越<sup>1</sup>

(1. 国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东 青岛 266001; 2. 天津相和电气科技有限公司, 天津 300000)

**摘要:**近年来, 电动汽车负荷与分布式电源规模的快速增长, 给配电网规划带来了新的挑战。为此, 提出一种电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法。首先考虑时序特性建立电动汽车分布、分布式电源出力与常规负荷用电的多场景规划模型。然后以经济性、用户用电满意度和碳排放为目标, 建立基于数据包络分析的多阶段规划模型。最后, 以12节点交通网与IEEE 33节点配电网组成的耦合系统为算例, 采用改进的自由搜索算法进行求解多维度非线性寻优问题, 得到各阶段优化配置方案。仿真结果表明, 所提方法避免了单阶段规划前期设备冗余、后期设备不足的问题, 能够较好地满足规划目标, 具有一定的可行性与合理性。

**关键词:** 电动汽车; 分布式电源; 多场景模型; 多阶段规划; 改进自由搜索算法

**中图分类号:** TM651 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2022.05.004

## 0 引言

近年来, 石油、天然气、煤炭等传统化石能源的大量消耗, 使得能源危机与环境问题日益严峻。为降低碳排放、有效应对全球气候变化问题, 我国提出了碳达峰、碳中和目标, 致力于构建以电能为核心的清洁、低碳、高效能源体系。其中, 大力推广电动汽车与可再生分布式电源是节能减排的关键措施, 但电动汽车充电与分布式电源出力具有较大的随机性和间歇性, 给配电网带来了新的挑战<sup>[1-2]</sup>。为此, 亟须研究新的规划策略, 在应对电动汽车和分布式电源接入给电力系统带来冲击的同时推动二者的发展。

已有大量的学者在电动汽车充电设施和分布式电源规划方面进行了相关研究。其中, 文献[3-7]计及电动汽车充放电行为的随机性, 从不同目标角度出发, 建立了多种电动汽车充电设施规划模型。文献[8-11]重点考虑分布式电源的出力不确定性, 采用不同的方式建立了多类型的分布式电源优化配置模型。

以上研究虽然均考虑了电动汽车充放电行为与分布式电源出力的不确定性, 并建立了相关概率模型, 但都将电动汽车充电设施与分布式电源的规划策略割裂展开, 没有研究二者的内在关联性。

文献[12-16]在考虑不确定性因素的基础上, 研究了电动汽车负荷与分布式电源的互补关系, 提出了涉及不同目标的电动汽车充电设施与分布式电源的协同规划方法; 文献[17-18]考虑交通网络, 从不同规划需求出发, 建立了一种电动汽车充电设施与分布式电源的双层规划模型。以上研究引入了交通网络、分布式电源与电动汽车互补等新的规划思路, 使得规划策略更具现实意义与可行性, 但规划目标体系不够完善, 缺乏常规负荷用电情况的模拟。文献[19]针对新型电力系统规划缺乏统一、规范算例的问题, 从我国实际情况出发, 搭建多个算例场景, 能够为分布式电源与电动汽车接入研究提供较好的案例基础。

综上所述, 电动汽车与分布式电源的协同规划策略已经有了较多的研究基础, 但在电动汽车分布、分布式电源出力与常规负荷用电多场景时序性建模方面, 模型精度还有待继续提升。在规划过程中, 需要综合考虑配电网侧、运营商侧和用户侧多方的利益诉求, 同时还需要考虑环保要求, 因此, 建立一个完备

**基金项目:** 国网山东省电力公司科技项目“面向大规模充电需求的配电网与充电设施网络化协调与柔性智能群控技术”(520602210004)。

Supported by State Grid Shandong Electric Power Company (520602210004)。

[引文信息] 石立国, 李延真, 关雪琳, 等. 电动汽车充电桩与分布式电源多阶段协同规划方法[J]. 供用电, 2022, 39(5): 33-40, 53.

SHI Liguang, LI Yanzhen, GUAN Xuelin, et al. Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 33-40, 53.

的多目标规划体系 also 具有重要意义。现有的规划策略主要以单阶段静态规划为主,在规划过程中容易出现设备前期冗余、后期不足的现象,难以有效满足不同时期的规划需求。基于以上问题,研究一种考虑时序特性的多目标、多阶段电动汽车充电桩与分布式电源优化规划模型具有重要意义。

本文的主要研究内容如下:首先,基于时序性特点建立电动汽车分布、光伏出力与常规负荷用电模型,通过Monte Carlo方法分季节、时段生成多个典型规划场景,为后续规划提供可靠的数据支撑;然后,从经济性、用户用电满意度和碳排放<sup>[20]</sup>3个角度出发建立多目标规划与约束体系,提出一种基于数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)评价方法的多阶段规划模型;最后,以IEEE 33节点配电网与12节点交通网耦合系统为算例,通过改进的自由搜索算法求解各阶段的优化配置方案,并对结果展开分析,验证所提方法的有效性和可行性。

## 1 电动汽车分布与分布式电源出力时序性建模方法研究

电动汽车分布、光伏出力和常规负荷用电都具有间歇性强的特点,单一的概率模型难以对其做出准确表述,因此本章在考虑时序性的基础上通过各类概率模型建立多规划场景,为后续规划提供精确的数据支撑。

### 1.1 电动汽车流量分布模型

为建立精细化的电动汽车分布模型,本节通过Monte Carlo抽样方法模拟不同场景下的O-D(origin-destination)需求,再基于Wardrop用户平衡配流原则<sup>[21]</sup>求解实际交通流量分布情况。

本文的研究对象为私家电动汽车,其O-D需求与私家燃油汽车相似。O-D需求用以描述交通网络中不同节点间的出行需求量,是交通系统规划的重要基础。文献[22]详细统计了城市区域内私家车的出行情况,本文基于此分析得到规划区域内私家电动车出行始发地、目的地的概率分布情况。

不同城市功能区在不同时段、节假日与工作日的O-D需求存在较大差异,基于各不同时段出行与到达概率,采用重要性的Monte Carlo抽样方法,确定不同场景下的O-D需求分布。在获得O-D需求后,还需要继续求解交通网络的车流量分布情况,为模拟堵车等问题给流量分布带来的影响,获得贴合实际的车流量分布情况,本文采用Wardrop平衡配流原则进行求解。

$$c_{\tau,rs} = \sum_a t_a \delta_{a,\tau,rs}, \quad \forall r, s, \tau \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{rs} - c_{\tau,rs} = 0, f_{\tau,rs} > 0 \\ u_{rs} - c_{\tau,rs} \leq 0, f_{\tau,rs} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c_{\tau,rs}$ 为O-D对 $rs$ 的第 $\tau$ 条路径的实际通行费时; $r$ 和 $s$ 为交通网节点; $\tau$ 为某一O-D间的联通过路;  $t_a$ 为路段的实际通行费时; $\delta_{a,\tau,rs}$ 为一个二进制数,当该O-D对的路径经过该路段时 $\delta_{a,\tau,rs}=1$ ,否则 $\delta_{a,\tau,rs}=0$ ;  $u_{rs}$ 表示在平衡状态下该O-D对的通行费时; $f_{\tau,rs}$ 为在O-D对下路径的交通流量。

在Wardrop平衡态下,任意O-D间可选路径的通行费时均相等,即所有车辆在出行时都选择耗时最短的路径,符合实际生活中车辆的出行原则,避免了传统最短路径的缺陷,能够较好地模拟交通网中私家车的实际分布情况。但其求解是一个复杂的非线性规划问题,本文采用Murchland<sup>[23]</sup>等人提出的F-W(Frank-Wolfe)算法求解各场景下的交通网络车流量分布。

### 1.2 光伏出力模型

分布式光伏出力主要由光照强度决定,根据大量的统计与分析,某一时段内光照强度能够通过Beta分布<sup>[2]</sup>进行模拟。

$$P_{PV} = \begin{cases} P_{PV,cap} \frac{s}{s_N}, & 0 < s < s_N \\ P_{PV,cap}, & s > s_N \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{PV}(s) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{s}{s_{max}} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{s}{s_{max}} \right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中: $P_{PV}$ 为光伏电源的实际输出功率; $P_{PV,cap}$ 为分布式光伏的额定容量; $s$ 为实际光照强度,  $\text{kW/m}^2$ ;  $s_N$ 为额定光照强度,  $\text{kW/m}^2$ ;  $f_{PV}(s)$ 为光照强度的概率密度函数; $s_{max}$ 为该时段历史统计光照强度的最大值; $\alpha$ 和 $\beta$ 为Beta分布中的2个形状参数,基于历史统计数据得出。光照强度的时序特性如图1所示。

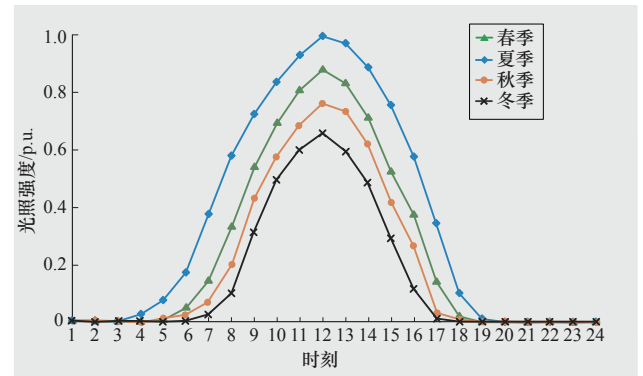


图1 光照强度时序

Fig.1 Sequence diagram of light intensity

### 1.3 常规负荷用电模型

常规负荷能够大致分为民用负荷、商用负荷和工业负荷三大类,各类型负荷在不同季节节假日、工作

日的不同时段中,用电情况存在较大差异,根据不同场景下各类负荷用电需求的历史数据,其时序性曲线如图2至图4所示。

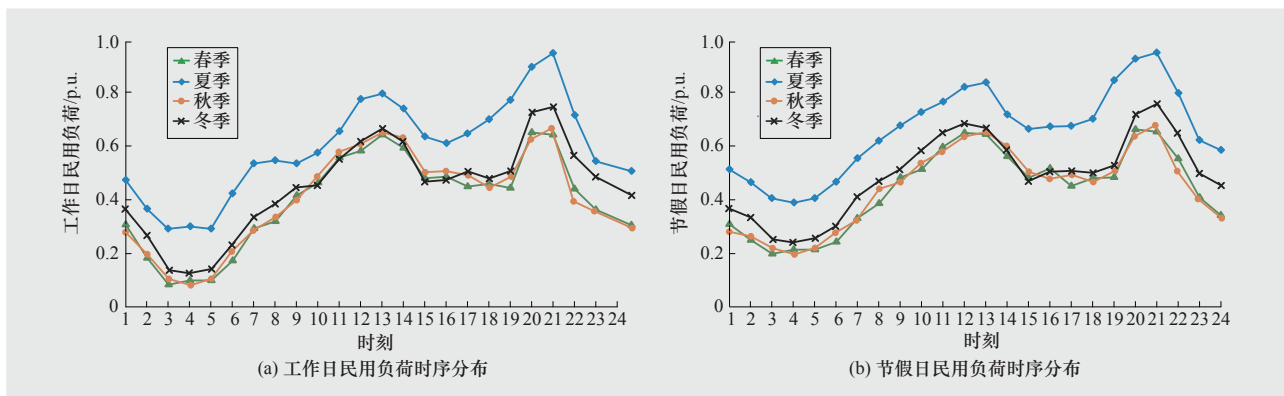


图2 民用负荷时序

Fig.2 Sequence diagram of civil load

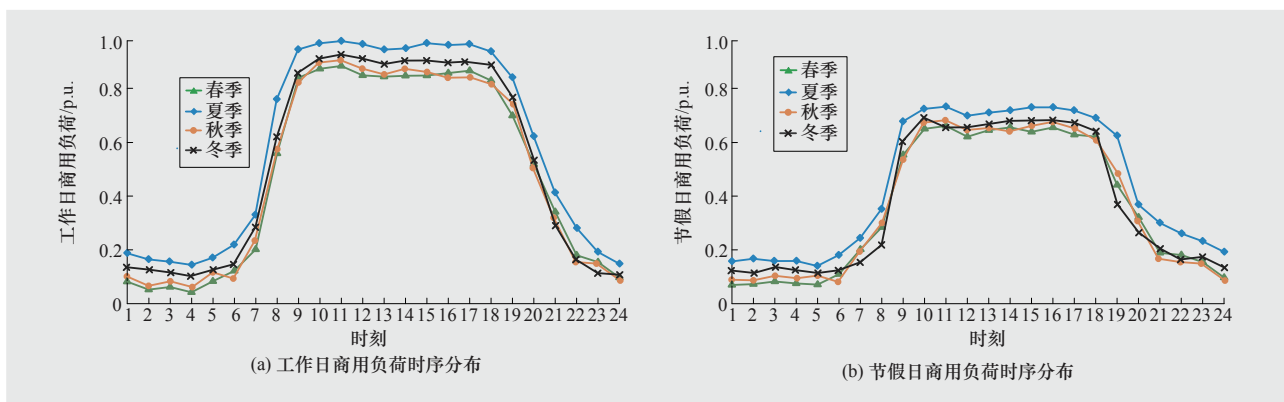


图3 商用负荷时序

Fig.3 Sequence diagram of commercial load

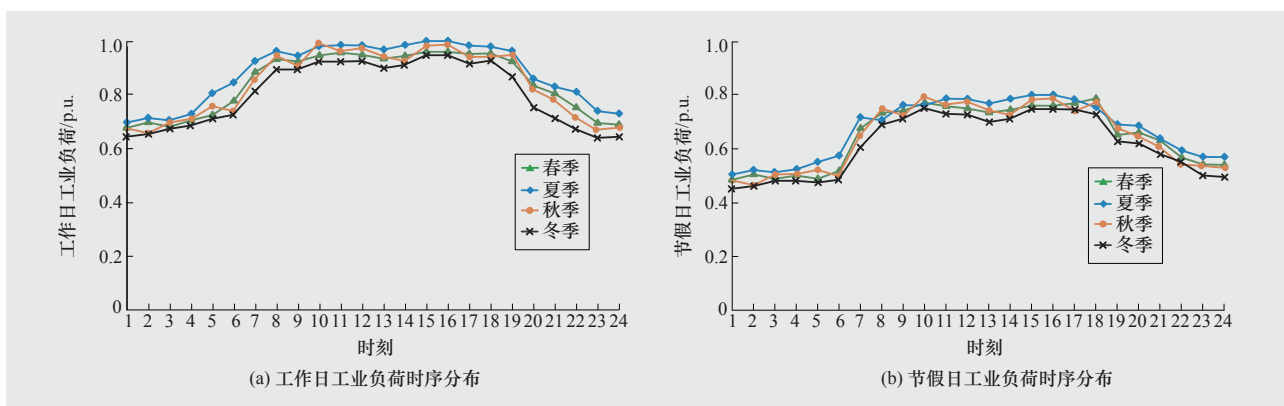


图4 工业负荷时序

Fig.4 Sequence diagram of industrial load

常规负荷的实际出力情况能够通过截断Gaussian分布来模拟,其概率密度 $f_L(P_L)$ 表达式如下:

$$f_L(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_L^2}} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_L)^2}{2\delta_L^2}\right] \quad (5)$$

式中:  $P_L$ 为负荷功率;  $\mu_L$ 、 $\delta_L$ 分别为依据历史数据求得的各时段负荷功率均值和标准差。

### 1.4 考虑时序性的多场景模型构建

如果将全年8 760 h的电动汽车分布、光照强度与

负荷用电数据全部计算一次,则存在计算量大,结果难以分析等问题。因此,本文采用季节场景、时段场景、Monte Carlo抽样协同划分方法得出考虑时序性的典型规划场景。

首先,划分出春、夏、秋、冬4个季节场景,再将每个季节划分出工作日、节假日2个场景,形成8个典型日。然后,将每个典型日划分为24个时段,每个季度中,工作日约为65天,节假日约为26天,基于历史数据,计算得出不同典型日中各时段的O-D需求、Beta分布和截断Gaussian分布模型。最后,通过Monte Carlo抽样方法得到各场景的实际计算数值,为后续规划提供准确的数据支撑。

## 2 多目标规划与约束体系

### 2.1 经济性指标

综合考虑各方利益主体间的诉求关系,将分布式电源与电动汽车充电桩投资建设、运行维护、系统网损、从上级电网购电等费用的年化总成本最低作为规划的经济性评价指标,其函数表达式 $f_{\text{cost}}$ 如下:

$$\min f_{\text{cost}} = C_1 + C_{\text{O\&M}} + C_L \quad (6)$$

式中:  $C_1$ 为投资建设年化费用;  $C_{\text{O\&M}}$ 为运行维护年费用;  $C_L$ 为系统年网损费用。

1) 投资建设年化费用 $C_1$ :

$$C_1 = R \left( \sum_{i=1}^N (c_{\text{DG},i,M} S_{\text{DG},M,i}) + \sum_{i=1}^N (c_{\text{EV},i} N_{\text{CF},i}) \right) \quad (7)$$

式中:  $R$ 为年化成本计算辅助变量;  $c_{\text{DG},i,M}$ 为第 $M$ 类分布式电源的单位容量建设投资建设成本;  $c_{\text{EV},i}$ 为单个充电桩的建设投资建设成本;  $S_{\text{DG},M,i}$ 为节点 $i$ 处第 $M$ 类分布式电源的配置容量;  $N_{\text{CF},i}$ 为节点 $i$ 处充电桩建设数量。

2) 运行维护年费用 $C_{\text{O\&M}}$ :

$$C_{\text{O\&M}} = \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N (c_{\text{DG},\text{O\&M},M} P_{\text{DG},M,i,k} + c_{\text{EV},\text{O\&M}} P_{\text{EV},i,k}) \quad (8)$$

式中:  $\zeta_k$ 为第 $k$ 类场景的总时长;  $c_{\text{DG},\text{O\&M},M}$ 为第 $M$ 类分布式电源单位功率运行维护年费用;  $c_{\text{EV},\text{O\&M}}$ 为单个充电桩运行维护年费用;  $P_{\text{DG},M,i,k}$ 和 $P_{\text{EV},i,k}$ 分别为节点 $i$ 处第 $M$ 类分布式电源和充电桩在场景 $k$ 中的实际运行功率。

3) 系统年网损费用 $C_L$ :

$$C_L = \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i,j \in N} c_{L,k} I_{ij,k}^2 R_{ij} \quad (9)$$

式中:  $c_{L,k}$ 为场景 $k$ 所处时段的单位功率用电价格;  $I_{ij,k}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间馈线在场景 $k$ 中的实际电流值;  $R_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的电阻值。

### 2.2 用户用电满意度指标

电力系统用户包括一般电力用户和电动汽车用

户,因此该指标需考虑常规用电与充电2个方面需求,其函数表达式 $f_{\text{satisfied}}$ 如下:

$$\min f_{\text{satisfied}} = \omega_1 M_{\text{UF}} + \omega_2 M_{\text{W}} - \omega_3 M_{\text{C}} \quad (10)$$

式中:  $M_{\text{UF}}$ 为电压波动性指标,用以表示一般用户的用电满意度;  $M_{\text{W}}$ 为电动汽车用户最短充电排队时间指标;  $M_{\text{C}}$ 为充电桩最大覆盖率指标;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 为各指标的权重系数。

1) 电压波动性指标 $M_{\text{UF}}$ :

$$M_{\text{UF}} = \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N \frac{|U_i - U_N|}{U_N} \quad (11)$$

式中:  $U_i$ 为节点 $i$ 的电压幅值;  $U_N$ 为标准电压幅值。

2) 最短充电排队时间指标 $M_{\text{W}}$ <sup>[24]</sup>: 电动汽车充电服务的排队模型是一种服从负指数分布<sup>[25]</sup>,容纳客源数量有限的先到型服务系统,各项指标的计算公式如下。

节点 $i$ 处待充电的电动汽车数量 $\lambda_i$ 为:

$$\lambda_i = p_{\text{probability}} x_i \quad (12)$$

充电设施服务强度 $\rho_i$ 为:

$$\rho_i = \lambda_i / c_i \mu_i \quad (13)$$

充电设施的空置概率 $\rho_{0i}$ 为:

$$\rho_{0i} = \left\{ \sum_{n=0}^{c_i-1} \frac{\rho_i^n}{n!} + \frac{\rho_i^{c_i} [1 - (\rho_i / c_i)^{K_i - c_i + 1}]}{(1 - \rho_i / c_i) c_i!} \right\}^{-1} \quad (14)$$

节点 $i$ 处 $n$ 量车接受充电服务的概率 $P_{n,i}$ 为:

$$P_{n,i} = \begin{cases} \rho_i^n \rho_{0i} / n! & , 0 \leq n < c_i \\ \frac{\rho_i^n \rho_{0i}}{c_i! c_i^{n-c_i}} & , c_i \leq n < K_i \end{cases} \quad (15)$$

电动汽车用户的平均等待队长 $L_{s,i}$ 为:

$$L_{s,i} = \sum_{n=c_i}^{K_i} (n - c_i) P_{n,i} + c_i + \rho_{0i} \sum_{n=0}^{c_i-1} \frac{(n - c_i) \rho_i^n}{n!} \quad (16)$$

最短充电排队时间指标 $M_{\text{W}}$ 为:

$$M_{\text{W}} = \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N L_{s,i} \quad (17)$$

式中:  $p_{\text{probability}}$ 为途经电动汽车的充电概率;  $x_i$ 为节点 $i$ 所在路段的交通流量;  $c_i$ 为节点 $i$ 处充电桩数量;  $\mu_i$ 为单个充电桩的服务效率;  $K_i$ 为节点 $i$ 处最大可接纳电动汽车数量。

3) 电动汽车充电桩最大覆盖率指标 $M_{\text{C}}$ 为:

$$M_{\text{C}} = \sum_i \kappa_i \sum_r \sum_s f_{rs} \sigma_{rs,i} \quad (18)$$

式中:  $f_{rs}$ 为O-D对 $rs$ 间的交通流量;  $\sigma_{rs,i}$ 为二进制决策变量,若该O-D对 $rs$ 间车流量经过充电设桩建节点 $i$ 处,



则 $\sigma_{rs,i}=1$ , 否则 $\sigma_{rs,i}=0$ ;  $\kappa_i$ 为充电桩建设节点 $i$ 处地源位置的权重系数。

### 2.3 碳排放指标

碳排放指标定义为系统的实际碳排放量, 其函数表达式 $f_{\text{emission}}$ 如下:

$$\min f_{\text{emission}} = W_{\text{load}} - W_{\text{EV}} - W_{\text{PV}} \quad (19)$$

式中:  $W_{\text{load}}$ 为电力系统总碳排放量;  $W_{\text{EV}}$ 为电动汽车取代传统化石燃料汽车减少的碳排放量;  $W_{\text{PV}}$ 为光伏电源发电减少的碳排放量。

1) 电力系统总碳排放量 $W_{\text{load}}$ :

$$W_{\text{load}} = w_c \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N P_{\text{load},i,k} \quad (20)$$

式中:  $w_c$ 为每发出1 kWh电量需要排放的 $\text{CO}_2$ 的气体质量, 一般取值为0.62 kg/kWh;  $P_{\text{load},i,k}$ 为节点 $i$ 处常规负荷在场景 $k$ 下的用电功率。

2) 电动汽车减碳排量 $W_{\text{EV}}$ :

$$W_{\text{EV}} = \xi_{\text{EV}} \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N P_{\text{EV},i,k} \quad (21)$$

式中:  $\xi_{\text{EV}}$ 为电动汽车较传统化石燃料汽车的减碳排量, 一般取值为0.75 kg/kWh;  $P_{\text{EV},i,k}$ 为节点 $i$ 处充电桩在场景 $k$ 下的充电功率。

3) 光伏电源减碳排量 $W_{\text{PV}}$ :

$$W_{\text{PV}} = w_c \sum_{k=1}^K \zeta_k \sum_{i=1}^N P_{\text{PV},i,k} \quad (22)$$

式中:  $P_{\text{PV},i,k}$ 为节点 $i$ 处光伏电源在场景 $k$ 下的发电功率。

### 2.4 规划约束

1) 系统潮流约束:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点 $i$ 的有功功率、无功功率;  $\theta_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的电压相角差;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中第 $i$ 行第 $j$ 列元素的实部、虚部。

2) 节点电压约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (24)$$

式中:  $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 $i$ 处允许的电压幅值最小值与最大值。

3) 馈线最大电流约束:

$$|I_{ij}| \leq I_{ij,\max} \quad (25)$$

式中:  $I_{ij,\max}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间馈线允许通过的最大电流。

4) 充电桩安装位置与容量约束:

$$P_{\text{EV},i,\min} \leq P_{\text{EV},i} \leq P_{\text{EV},i,\max}, i \in \Omega_{\text{EV}} \quad (26)$$

式中:  $P_{\text{EV},i}$ 为节点 $i$ 处计划建设的充电桩数量;  $P_{\text{EV},i,\min}$ 、 $P_{\text{EV},i,\max}$ 分别为根据地区实际情况确定的充电站容量的最小值与最大值;  $\Omega_{\text{EV}}$ 为允许建设充电站的节点位置集合。

5) 分布式电源安装位置与容量约束:

$$P_{\text{DG},i,\min} \leq P_{\text{DG},i} \leq P_{\text{DG},i,\max}, i \in \Omega_{\text{DG}} \quad (27)$$

式中:  $P_{\text{DG},i}$ 为节点 $i$ 处计划建设的分布式电源容量;  $P_{\text{DG},i,\min}$ 、 $P_{\text{DG},i,\max}$ 分别为根据地区实际情况确定的充电站容量的最小值与最大值;  $\Omega_{\text{DG}}$ 为允许建设充电站的节点位置集合。

## 3 多阶段规划方法研究

### 3.1 基于DEA评价的多阶段规划方法

电动汽车充电桩和分布式电源优化规划问题面向的是一个变化幅度大、变化速度快的动态场景, 而不是情况单一的静态场景。如果采用单阶段规划方法进行选址定容问题的研究, 则无法避免会出现前期超前投资、配置冗余, 后期设备不足、供电可靠性下降等问题。为此, 本文采用多阶段规划的方法对电动汽车充电桩和分布式电源规划问题进行研究, 多阶段规划示意如图5所示。

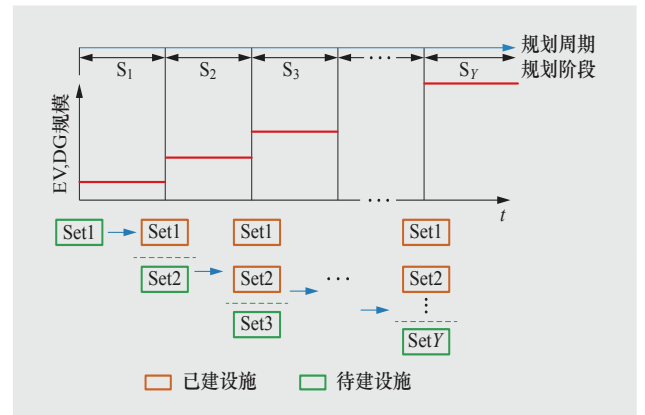


图5 多阶段规划示意

Fig.5 Schematic diagram of multi-stage planning

从图5能够分析得出, 电动汽车充电桩和分布式电源各个阶段的选址定容策略是互相联系、相互影响的, 需要统筹整个规划周期选取各阶段最优方案, 同时此规划问题包含多维的输入、输出变量。为解决多阶段、多维度规划方案优选问题, 引入DEA评价法<sup>[26]</sup>。

面向多输入多输出的DEA评价方法, 能够解决多目标规划中各阶段的方案择优难题。在对各阶段方案评价过程中, 首先将目标函数归一化, 再通过超效率DEA评价方法求解各方案权值, 其数学描述如下:

$$F_{\varphi,y} = (f_{\varphi,y} - f_{\varphi,\min}) / (f_{\varphi,\max} - f_{\varphi,\min}) \quad (28)$$

$$\min E_{\text{stage}, Y} = \sum_{\varphi=1}^{\Phi} u_{\varphi} F_{\varphi, Y} / \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_{\delta} X_{\delta, Y} \quad (29)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_{\delta} X_{\delta, Y} = 1 \\ \sum_{\varphi=1}^{\Phi} u_{\varphi} F_{\varphi, Y} - \sum_{\delta=1}^{\Delta} v_{\delta} X_{\delta, Y} \leq 0 \end{cases} \quad (30)$$

式中： $F_{\varphi, Y}$ 和 $f_{\varphi, Y}$ 分别为第 $\varphi$ 个输出变量的归一化数值和实际数值； $f_{\varphi, \max}$ 、 $f_{\varphi, \min}$ 分别为第 $\varphi$ 个输出变量的最大值和最小值； $E_{\text{stage}, Y}$ 为阶段 $Y$ 的DEA评价指标； $X_{\delta, Y}$ 为阶段 $Y$ 中规划方案 $y$ 的第 $\delta$ 个输入； $\Delta$ 、 $\Phi$ 分别为规划中输入和输出的数量； $v_{\delta}$ 和 $u_{\varphi}$ 分别为第 $\delta$ 个输入和第 $\varphi$ 个输出的权重系数，用以评估决策者的偏好。

### 3.2 自适应邻域与搜索步的自由搜索算法

电动汽车与分布式电源协同规划本质上是一类基于既定目标与约束的复杂非线性多维度寻优问题，广泛地通过各类智能搜索算法进行求解，但智能算法容易陷入局部最优解，求解速度与精度都有待进一步提升。对此，本文在自由搜索算法的基础上提出一种自适应邻域与搜索步的改进方法，即在迭代计算的过程中自适应的改变搜索范围与搜索步，设置方式如下式：

$$R_z(h+1) = R_z(h) e^{\frac{-hS_z}{wH}} \quad (31)$$

$$T_z(h+1) = \text{INT} \left( T_z(0) e^{\frac{whS_z}{H}} \right) \quad (32)$$

式中： $R_z(h)$ 和 $R_z(h+1)$ 分别为个体 $z$ 在第 $h$ 次和第 $h+1$ 次迭代过程中的搜索邻域范围； $H$ 为总迭代次数； $h$ 为当前迭代次数； $T_z(0)$ 和 $T_z(h+1)$ 分别为个体 $z$ 在初始时和第 $h+1$ 次迭代过程中的搜索步；INT为取整函数； $w$ 为调整因子，一般取值为5。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真情形设定

算例选取为IEEE 33节点配电网与12节点交通网耦合系统，并将规划区域划分为不同功能区，其拓扑如图6所示。

待建规划设施包括有分布式光伏、储能和电动汽车充电桩。其中，光伏电源选择在配电网线路中间偏末端的位置接入，待建节点为{15, 21, 24, 30}，储能作为间歇性电源的补充，采取就地补偿策略，容量配置为光伏电源的20%。充电桩待建节点为{3, 6, 20, 25, 27, 31}。充电桩与各类分布式电源的计算参数值如表1所示。

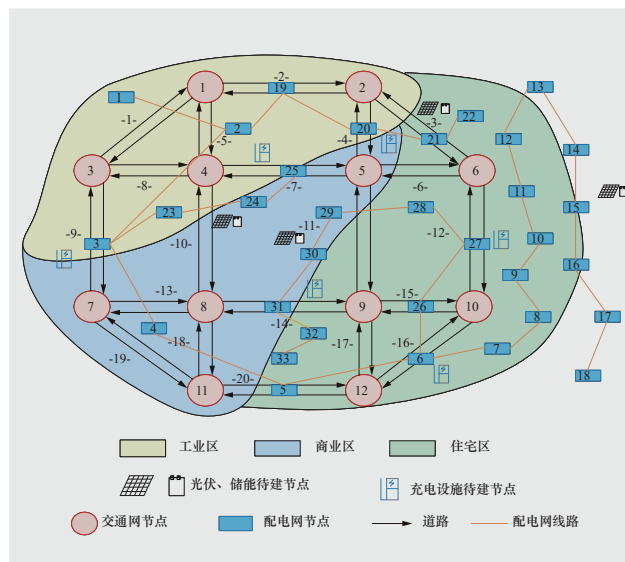


图6 IEEE 33节点配电网与12节点交通网耦合系统

Fig.6 The coupling system of IEEE 33-bus distribution network and 12-node transportation network

表1 分布式电源与充电桩计算数据

Table1 DGs and EV charging piles calculation data sheet

项目	光伏	储能	充电桩
总投资成本	1.2万元/kVA	0.6万元/kWh	2万元/kVA
年运维费用	1 200元/kVA	600元/kWh	2 000元/kVA
单位容量	1 kVA	0.2 kWh	30 kVA
经济寿命	15年	15年	15年

规划周期选取为15年，每5年为一个阶段。在阶段1中，规划区域的车辆总规模为5 000辆，其中EV占比为10%，充电桩数量上限是5台，光伏最大渗透率为10%。阶段2中，车辆总规模上升至6 000辆，EV占比升至25%，充电桩数量上限是10台，光伏最大渗透率升至25%。阶段3中，车辆总规模继续增加到7 000辆，EV占比增加到50%，充电桩数量上限是20台，光伏最大渗透率为50%。

在ANSFS算法寻优中，设置初始种群数目为100个，个体的搜索步 $T$ 初始值为20，搜索邻域搜索范围 $R$ 初始值为1，最大迭代次数为100次。

### 4.2 结果分析

在阶段1的规划中，电动汽车保有量较低、环保压力较轻，在DEA评价中设置经济性目标权重为0.5，其他2个目标为0.25。在阶段2的规划中，电动汽车保有量规模迅速扩大，用户用电需求成为规划中需要重点考虑的因素，因此该阶段规划侧重于用电满意度指标。在阶段3中，我国处于实现碳达峰的关键时期，环保要求高，因此在方案选择中侧重于碳排放指标。各阶段优化配置结果如表2所示。

表2 各阶段优化配置结果  
Table2 Planning resultsof each stage

阶段	充电设施配置数量/台										经济性/万元	用电满意度/ p.u.	碳排放/ $10^7$ kg	DEA指标/p.u.
	3	6	15	20	21	24	25	27	30	31				
1	2	1	63	3	51	47	5	1	68	4	257.04	0.697 3	1.653 9	0.321 5
2	4	3	230	7	162	144	10	4	208	9	528.23	0.495 7	1.261 1	0.470 8
3	6	6	389	10	370	418	16	8	437	15	731.67	0.732 8	0.562 8	0.566 2

因光伏与储能为协同配置,故在结果中只展示光伏配置结果。通过分析表2可知,经济性目标、用电满意度目标和碳排放目标具有负相关性。其中,阶段1方案主要侧重于经济性,分布式电源与电动汽车充电桩配置容量相对较少时,故投资建设与运营维护费用会大大降低,但电动汽车充电桩配置不足会导致用户的用电满意度指标较差,光伏配置容量低也会导致减碳排放效果差。阶段2和阶段3的规划方案也具有相同特点。因此,侧重点不同的3个规划目标之间的负相关关系是难以调和的,反映到实际工程项目,即经济性、可靠性和环保性难以兼顾。故本文所提出的目标体系能够充分反映现实规划中会遇到的决策难题,避免了单目标规划的缺陷,使得规划策略更具有实际应用价值。

在本文所提的多阶段规划方法中,能够依据每个阶段的规划需求和各阶段间的关联关系,在每个阶段的首年进行一次电动汽车充电桩与分布式电源优化配置。对3个规划阶段进行整体比对分析可知,在阶段1中电动汽车保有量较低,环保要求不高,故在规划方案中设施配置数量较少,提高经济性指标;在阶段2中,电动汽车保有量迅速提升,故充电桩配置数量大大提升;在阶段3中,环保要求高,故光伏、储能配置规模大幅度提高。由此可见,多阶段规划策略能够灵活的满足不同阶段的规划的实际需求,同时还可以避免单阶段规划中前期设备冗余、后期设备不足的问题。

在各阶段规划的方案抉择过程中,DEA评价方法能够让决策者根据每个阶段的需求特点,对不同目标所占的权重进行修改。然后求解多目标问题多个非劣方案的DEA评价价值,进行排序选出最适应于当前阶段的方案。因此,DEA评价方法既解决了多目标寻优中的方案抉择难题,又能够让决策者依据实际需求进行灵活决策。

## 5 结语

本文首先建立电动汽车分布、光伏出力和常规负

荷用电的时序性多场景模型,然后从经济性、用电满意度和碳排放三个角度出发建立多目标规划约束体系,最后提出一种基于DEA评价方法的多阶段规划模型,再通过改进自由搜索算法进行算例分析,得出结论如下:

1) 考虑时序性的电动汽车分布、光伏出力和常规负荷用电多场景模型能够为后续规划提供可靠的数据支撑。

2) 所提的多目标规划体系能够充分反应实际规划中不同主体的各类需求,使得规划更具有实际意义。

3) 基于DEA评价的多阶段规划策略既弥补了单阶段规划的缺陷,又解决了多目标抉择难题,让决策者能够根据实际需求灵活选择规划方案。

本文没有考虑电动汽车的V2G功能,在后续的研究工作中,可重点研究一种将电动汽车作为灵活储能的规划策略。

DU

## 参考文献

- [1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10,25.  
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [2] 王成山,王守相.分布式发电供能系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2008,32(20):1-4,31.  
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [3] 田梦瑶,汤波,杨秀,等.综合考虑充电需求和配电网接纳能力的电动汽车充电站规划[J].电网技术,2021,45(2):498-509.  
TIAN Mengyao, TANG Bo, YANG Xiu, et al. Planning of electric vehicle charging stations considering charging demands and acceptance capacity of distribution network [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 498-509.
- [4] WEI G W, LEI F, LIN R, et al. Algorithms for probabilistic uncertain linguistic multiple attribute group decision making based on the GRA and CRITIC method: application to location planning of electric vehicle charging stations [J]. Economic Research-Ekonomska Istraživanja, 2020, 33(1): 828-846.
- [5] 严干贵,刘华南,韩凝晖,等.计及电动汽车时空分布状态的充电站选



- 址定容优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6271-6284.  
YAN Gangui, LIU Huanan, HAN Ninghui, et al. An optimization method for location and capacity determination of charging stations considering spatial and temporal distribution of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6271-6284.
- [6] 王延杰, 徐国智, 赵振杰. 基于投资效益分析的电动汽车充电设施建设策略与应用研究[J]. 供用电, 2021, 38(2): 77-85.  
WANG Yanjie, XU Guozhi, ZHAO Zhenjie. Research on construction strategy and application of electric vehicle charging facilities based on investment benefit analysis[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(2): 77-85.
- [7] EHSAN A, YANG Q. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—part I: uncertainty modeling and problem formulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 970-978.
- [8] 曹振其, 彭敏放, 沈美娥. 考虑源荷不确定性的分布式电源选址定容[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 59-65.  
CAO Zhenqi, PENG Minfang, SHEN Meie. Siting and sizing of distributed generations considering uncertainties in source and load[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33(2): 59-65.
- [9] 李化林, 戴承承, 黄重阳, 等. 考虑需求侧管理的配电网分布式电源优化配置研究[J]. 供用电, 2020, 37(7): 24-29.  
LI Hualin, DAI Chengcheng, HUANG Chongyang, et al. Study on optimal allocation of distributed generation in distribution network considering demand side management[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(7): 24-29.
- [10] MUHAMMAD M A, MOKHLIS H, NAIDU K, et al. Distribution network planning enhancement via network reconfiguration and DG integration using dataset approach and water cycle algorithm[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2019, 8(1): 86-93.
- [11] PARIZAD A, HATZADONIU K. Security/stability-based Pareto optimal solution for distribution networks planning implementing NSGAII/FDMT[J]. Energy, 2020(192): 116644.
- [12] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕伟, 等. 考虑分布式储能与电动汽车充电网络的配电网多目标规划[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 106-116.  
KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Multi-objective planning of distribution network considering distributed energy storage and electric vehicle charging network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 106-116.
- [13] 钱仲豪, 江志辉, 吴茜, 等. 计及不确定性因素的分布式电源与电动汽车充电站协调优化[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 131-137.  
QIAN Zhonghao, JIANG Zhihui, WU Xi, et al. Coordinate doptimization of distributed power and electric vehicle charging stations considering uncertain factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 131-137.
- [14] 陈红坤, 夏方舟, 袁栋, 等. 直流配电网中含光伏的电动汽车快速充电站优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 53-60.  
CHEN Hongkun, XIA Fangzhou, YUAN Dong, et al. Optimal configuration scheme of fast electric vehicle charging station with photovoltaic in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 53-60.
- [15] LIU L J, ZHANG Y, DA C, et al. Optimal allocation of distributed generation and electric vehicle charging stations based on intelligent algorithm and bi-level programming[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(6): e12366.
- [16] LI M Y, NIU Y G, HU H D, et al. Optimal siting and sizing of SOPs in distribution networks with DG and EV charging[C]//2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe. October 26-28, 2020, The Hague, Netherlands. IEEE, 2020: 675-679.
- [17] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等. 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.  
XIE Linyu, TANG Zhong, HUANG Xingyu, et al. Bi-layer dynamic reconfiguration of a distribution network considering the uncertainty of distributed generation and electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 1-11.
- [18] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 41-48.  
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41-48.
- [19] 孙充勃, 李敬如, 罗凤章, 等. 考虑分布式电源接入的配电系统典型算例设计[J]. 电力建设, 2020, 41(10): 47-62.  
SUN Chongbo, LI Jingru, LUO Fengzhang, et al. Typical case design of distribution system considering DG integration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(10): 47-62.
- [20] RIETMANN N, HÜGLER B, LIEVEN T. Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO<sub>2</sub> emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121038.
- [21] 四兵锋, 高自友. 交通运输网络流量分析与优化建模[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 56-79.
- [22] 北京交通发展研究中心. 2021年北京市交通发展年度报告[R]. 北京: 2021.
- [23] MURCHLAND J D. Road network traffic distribution in equilibrium[J]. Operations Research-Verfahren, 1970(8): 143-183.
- [24] 韩中庚. 实用运筹学: 模型、方法与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 195-223.
- [25] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589.  
GE Shaoyun, FENG Liang, LIU Hong, et al. Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 582-589.
- [26] 韩伟强, 王贵斌, 文福拴. 电动汽车充电设施多阶段最优规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 23-30.  
HAN Weiqiang, WANG Guibin, WEN Fushuan. Multi-stage optimal planning of electric vehicle charging facilities[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2014, 41(5): 23-30.

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-04-04

#### 作者简介:

石立国(1984—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力营销技术。

李延真(1986—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力营销管理。

关雪琳(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力营销。

刘栋(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划。

(下转第 53 页 continued on page 53)



control for distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 ( 16 ): 137-143.

为配电系统及其自动化技术。

张志华 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电系统及其自动化技术。

张小庆 (1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

收稿日期: 2021-08-01; 修回日期: 2021-08-26

#### 作者简介:

刘健 (1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向

## New technology of single-phase grounding fault processing in neutral non-effectively grounded systems

LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing

(State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to improve single-phase grounding fault processing of neutral non-effective grounded system, based on the introduction of two voltage arc suppression technologies, such as fault phase grounding approach and flexible grounding approach, this paper discusses in detail four typical single-phase grounding fault treatment application modes which are arc suppression coil + fault phase grounding + line selection trip, arc suppression coil + fault phase grounding + line selection trip + feeder automation, arc suppression coil + flexible grounding + line selection trip and arc suppression coil + flexible grounding + line selection trip + feeder automation. expounds their technical principle, implementation scheme and technical characteristics respectively. The application of these four modes at home and abroad is also introduced.

**Key words:** neutral non-effectively grounded systems; distribution network; single-phase grounding faults; arc suppression; line selection; fault phase grounding; flexible grounding; feeder automation

( 上接第 40 页 continued from page 40 )

## Combined multi-stage planning method of EV charging piles and distributed generations

SHI Liguol<sup>1</sup>, LI Yanzhen<sup>1</sup>, GUAN Xuelin<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>2</sup>, SUN Jiayue<sup>1</sup>

(1. State Grid Shandong electric power company Qingdao power supply company, Qingdao 266001, China; 2. Tianjin Xianghe Electric Co., Ltd., Tianjin 300000, China )

**Abstract:** In recent years, the rapid growth of electric vehicles (EVs) load and distributed generations (DGs) have brought new challenges to the planning of distribution network. Therefore, this paper proposes a multi-stage collaborative planning method for EVs charging piles and DGs. Firstly, a multi-scenario planning model of EVs distribution, DGs output and conventional load power consumption were established considering the timing characteristics. Then, a multi-stage planning model based on data envelopment analysis (DEA) is established with the objectives of economy, user's electricity satisfaction and carbon emission. Finally, taking IEEE 33-bus distribution network and 12-node traffic network as examples, the improved free search algorithm was used to solve the multidimensional nonlinear optimization problem, and the optimal configuration scheme of each stage is obtained. The simulation results show that the proposed method can avoid the problem of equipment redundancy in the early stage and insufficient equipment in the later stage of single-stage planning, and can better meet the planning objectives, what is more the method is feasibility and rationality.

**Key words:** electric vehicle; distributed generation; multi-scenario; multi-stage planning; improved free search algorithm