

DOI: 10.7667/PSPC170551

# 计及电动汽车充电模式的主动配电网多目标优化重构

张涛, 张东方, 王凌云, 周远化, 张晓林

(新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 电动汽车的入网会影响到电网的经济性和安全性, 而配电网重构是电网优化运行的有效措施。根据主动配电网(ADN)的特点, 提出了含分布式电源(DG)和电动汽车充电的优化重构模型。通过有功网损灵敏度确定 DG 的安装位置和容量, 构造出 DG 出力和 EV 充电的多时段概率模型。建立有功网损、电压偏移指标(VSI)和开关操作次数的多目标优化数学模型以确定系统的最佳重构方案, 并在 IEEE33 节点标准配电系统中, 采用引入小生境技术的改进多目标粒子群算法(IMPSO)进行计算, 提高了算法的全局寻优能力。考虑了电动汽车无序充电和智能充电两种模式, 对比不同场景下得出的结果, 验证了该方法的实用性和有效性。

**关键词:** 分布式电源; 电动汽车充电; 主动配电网重构; 多目标优化

## Multi-objective optimization of active distribution network reconfiguration considering electric vehicle charging mode

ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, ZHOU Yuanhua, ZHANG Xiaolin

(Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid  
(China Three Gorges University), Yichang 443002, China)

**Abstract:** Electric Vehicle (EV) will affect the economy and safety to the power grid, and distribution network reconfiguration is an effective measure for optimal operation of power grid. According to the characteristics of Active Distribution Network (ADN), this paper establishes an optimal reconstruction model with Distributed Generation (DG) and EV. The sitting and sizing of DG is determined by the network loss sensitivity, the multi time probability model is constructed with the output of DG and charging of EV. The network loss, Voltage Deviation Index (VSI) and the number of switching operation are set up as the multi-objective optimization functions to determine the best reconstruction scheme, and in the IEEE33 node standard distribution system, the Improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization (IMPSO) algorithm with niche technology is used to improve the ability of global optimization for computing. The EV disordered charging and intelligent charging models are considered to verify the practicality and effectiveness of the proposed method under the comparison results of different scenarios.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407104) and Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University (No. 2017YYPY036).

**Key words:** distributed generation; electric vehicle charging; active distribution network reconfiguration; multi-objective optimization

## 0 引言

近年来, 传统能源日益枯竭, 电力需求的增长正驱动电网朝着可持续的方式发展, 使得国家对智能电网的建设逐步推进, 而在配网一侧, DG 和 EV 的接入量持续递增, 传统配电网已难以应对, 为此,

主动配电网的概念油然而生<sup>[1-2]</sup>。

主动配电网中新能源和 EV 等柔性负荷具有较高的渗透率, 根据相关数据统计, 截至 2015 年, 中国的电动汽车用户接近 22.3 万辆, 国家也出台相应政策, 大力支持电动汽车的使用, 另外, 电动汽车作为一种清洁能源, 被认为是降低碳排放量、治理雾霾等的重要技术途径, 电动汽车将成为一种重要的交通工具<sup>[3]</sup>。电动汽车虽然能够解决能源和污染问题<sup>[4-5]</sup>, 但是也给电网带来电压下降、功率损耗加

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51407104); 三峡大学学位论文培优基金项目资助(2017YYPY036)

大等压力<sup>[6-7]</sup>，所以大规模电动汽车的入网研究是主动配电网优化运行所要考虑的重要因素。

配电网重构是主动配电网优化运行的一种有效手段，文献[8]在引入分布式电源和电动汽车后通过随机潮流计算方法进行重构，对网损和电压质量的改变有一定的效果；文献[9]在重构过程中考虑到了分布式电源，但是没有考虑到电动汽车的接入；文献[10-11]以降低网损为目标研究分布式电源的选址定容问题；上述文献在系统中考虑到分布式电源，但是对于分布式电源的接入位置和容量的选择没有进一步分析，也没有分析网络重构对系统的优化效果；文献[3, 12]考虑到电动汽车车主服从调度中心安排下的智能充电过程，通过对电动汽车车主的调度来改善系统的运行情况，但是对于电网公司而言，要调控大规模私家车主的充电行为是很困难的。

为此，本文从电力供给侧出发，计及 DG 出力 and EV 充电模式，结合主动配电网的特点，构造了考虑有功损耗、电压偏移指标和开关次数多个指标主动配电网多时段多目标优化重构模型。为解决多目标问题中权重系数的影响，本文采用了 Pareto 多目标优化技术，引入小生境技术的改进多目标粒子群算法求解该优化问题，提升了算法寻找全局最优解的能力。并通过对比不同场景的计算结果，证明了本文方法的有效性。

## 1 含 DG 输出功率和 EV 充电功率的概率模型

分布式电源的接入不仅减少了电网对传统能源的使用，也提高了电网运行的可靠性<sup>[13]</sup>。而大量私家电动汽车接入配网中充电会对配网的电压质量、功率损耗等产生影响<sup>[14-15]</sup>。为了研究 DG 和 EV 接入主动配电网优化重构，本文首先分析了 DG 和 EV 的数学模型。

### 1.1 DG 出力的概率模型

#### 1.1.1 风力发电(WT)数学模型

对风速随机性的描述可用双参数 Weibull 分布来近似拟合<sup>[16]</sup>，其概率密度函数如式(1)所示。

$$f(P_{WT}) = \frac{k_w}{k_1 c_w} \left( \frac{P_{WT} - k_2}{k_1 c_w} \right)^{k_w - 1} \exp \left[ - \left( \frac{P_{WT} - k_2}{k_1 c_w} \right)^{k_w} \right] \quad (1)$$

式中： $k_w$ 为形状指数，反映该地区风速的分布特性； $c_w$ 为尺度参数，体现了该地区的平均风速； $P_{WT}$ 为风机的输出功率； $k_1$ 和 $k_2$ 为系数，可用式(2)表示。

$$\begin{cases} k_1 = P_r / v_r - v_{ci} \\ k_2 = P_r \cdot v_{ci} / v_r - v_r \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_r$ 为风机额定输出功率； $v_{ci}$ 为切入风速； $v_r$ 为额定风速。

风机的输出功率  $P_{WT}$  与风速  $v$  之间的关系可用分段函数表示为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_r, & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $v_{co}$ 为切出风速。

#### 1.1.2 光伏发电(PV)数学模型

太阳辐射强度一般可用 Beta 分布，其概率密度可用式(4)表示<sup>[17-18]</sup>。假定太阳能电池板规模一定，则太阳能发电的输出功率可用式(5)表示。

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{P_{pv}}{P_{pvm}} \right)^{\alpha - 1} \left( 1 - \frac{P_{pv}}{P_{pvm}} \right)^{\beta - 1} \quad (4)$$

$$P_{pv} = r \sum_{n=1}^N A_n \eta_n \quad (5)$$

式中： $\alpha$ 和 $\beta$ 为Beta分布的形状参数； $P_{pv}$ 为光伏发电输出有功功率； $P_{pvm}$ 为光伏阵列最大输出功率； $N$ 为电池组件总数； $A_n$ 、 $\eta_n$ 分别为第 $m$ 个光伏组件的面积和光电转换效率。

对于DG的无功出力，假设注入功率通过并联电容器控制，则功率因数角 $\varphi$ 可为常数，此时可根据文献[19]中的方法计算无功功率。

### 1.2 EV 充电数学模型

住宅小区私家电动汽车车主的充电行为会影响配电网的运行状态，所以需要EV的充电行为进行建模。假设电动汽车的电池特性良好，则影响EV充电功率的主要因素为充电模式和行驶特性等。

#### 1.2.1 EV 出行概率模型

研究表明，若将电动汽车最后到达时刻 $t$ 作为充电的起始时刻，则电动汽车充电起始时刻的概率密度函数近似满足正态分布 $t \sim N(\mu_s, \sigma_s^2)$ ，文中取 $\sigma_s = 3.4$ ； $\mu_s = 17.6$ <sup>[17]</sup>。

电动汽车日行驶里程 $d$ 一般满足对数正态分布 $d \sim \log N(\mu_d, \sigma_d^2)$ ，文中取 $\sigma_d = 0.88$ ； $\mu_d = 3.2$ 。

#### 1.2.2 无序充电模型

电动汽车在无序充电时，私家车车主主要按照自己的出行意愿完成充电，该充电模式下不受相关部门的调控，随机性强，本文采用美国交通部2001年对全美家用车辆调查的统计数据拟合出电动汽车1天当中的充电功率概率，根据文献[20]的方法，假设EV在某一时刻 $t_0$ 的功率需求表示为 $P_{t_0} = \gamma_{t_0} P_c$ ，于是， $P_{t_0}$ 的概率密度分布函数可用式(6)表示。

$$\begin{cases} P(P_{t_0} = 0) = P(\gamma_{t_0} = 0) \\ P(0 < P_{t_0} \leq P_0) = P(\gamma_{t_0} = 1) \cdot P(0 < P_c \leq P_0) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_c$  是 EV 充电功率(kW);  $\gamma_{i_0}$  为 0 或 1, 分别表示 EV 充电完成或正在充电。

### 1.2.3 智能充电模型

智能充电就是电动汽车主要服从调控, 通过调度中心日前对次日私家车主的充电行为进行合理安排, 实现电网的可靠运行<sup>[12]</sup>。充电时, 在空间上文中按照该时段常规负荷占12个时段总负荷的比例智能分配, 计算公式为

$$E_i = (P_{li} / \sum_{i=1}^T P_{li}) \cdot E \quad (7)$$

式中:  $E_i$  为计算得到的 EV 分配数量, 按照各时刻的负荷量成比例分配;  $E$  为电动汽车总数;  $P_{li}$  为时刻  $i$  的负荷值。

## 2 多目标优化重构模型

主动配电网中接入新能源和大量电动汽车后, 系统将面临着新的挑战, 为了研究如何优化 DG 和 EV 接入后的配电系统, 使其稳定运行, 以经济性、电压质量和开关寿命为标准, 建立了考虑有功损耗、电压偏移指标和开关次数多个指标的主动配电网多时段优化重构模型。

### 2.1 有功网损

从经济性角度考虑, 以主动配电网的有功网损为目标函数。

$$P_{\text{loss}} = \min \sum_{i=0}^{\Delta T} \sum_{i=1}^N k_i R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \Delta t \quad (8)$$

式中:  $N$  为系统的支路总数;  $k_i$  为支路  $i$  的开关投切状态, 取值 0 或 1(断开或闭合);  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为支路的有功功率和无功功率;  $U_i$  为支路  $i$  的首端母线电压;  $\Delta T$ 、 $\Delta t$  分别为 EV 充电时间段和计算网损的标准时间段。

### 2.2 电压偏移指标

电压偏移能够反映该母线的实时运行状态, 评估在该时刻母线负荷的大小与电网输入功率的关系<sup>[21]</sup>, ADN 中接入 DG 和 EV 后, 电压质量会有所变化, 所以建立了电压偏移指标的模型。

$$\text{VSI} = \min \sum_{i=1}^M |(V_i - V_m) / V_m| \quad (9)$$

式中: VSI 为系统电压偏移指数;  $M$  为系统节点总数;  $V_i$  和  $V_m$  为节点  $i$  的实际电压和额定电压。

### 2.3 开关次数

网络重构实际上就是开关的开断状态组成, 开关操作会影响开关的使用寿命, 所以应该尽量减少开关的操作次数。

$$F_k = \sum_{i=1}^m (1 - y_{(k-1)i}) + \sum_{j=1}^n z_{(k-1)j} \quad (10)$$

式中:  $k$  为时间段;  $y_{(k-1)i}$  和  $z_{(k-1)j}$  分别表示系统中第  $k-1$  时间段的分段开关、联络开关的当前状态, 开关操作次数均为 2 的倍数;  $m$  为配电网中的分段开关的数量;  $n$  为配电网中联络开关的数量。

### 2.4 约束条件

#### 1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i + P_{\text{DG},i} + P_{\text{EV},i} = P_{L,i} + U_i \sum_{j=1}^N U_j Y \\ Q_i + Q_{\text{DG},i} + Q_{\text{EV},i} = Q_{L,i} + U_i \sum_{j=1}^N U_j Y \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  注入的有功功率和无功功率;  $P_{\text{DG},i}$ 、 $Q_{\text{DG},i}$  依次为 DG 向节点  $i$  注入的有功和无功功率;  $P_{\text{EV},i}$ 、 $Q_{\text{EV},i}$  依次为 EV 向节点  $i$  注入的有功和无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值;  $Y$  为支路导纳矩阵。

#### 2) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (12)$$

式中,  $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$  分别为节点  $i$  电压幅值的下限和上限。

#### 3) 支路电流约束

$$I_l \leq I_l^{\max} \quad (13)$$

式中,  $I_l^{\max}$  为支路  $l$  载流量上限值。

#### 4) 网络拓扑约束

配电网重构后需满足无孤岛存在, 并且满足网络为有效的辐射状。

$$g_k \in G_k \quad (14)$$

式中:  $g_k$  为开关状态组合;  $G_k$  为构成放射形网络的开关位置组合的集合。

#### 5) 开关操作次数限制

$$0 < O_{\text{PT}} \leq O_{\text{PTmax}} \quad (15)$$

式中:  $O_{\text{PT}}$  为总的开关操作次数;  $O_{\text{PTmax}}$  为开关的最大操作次数。

## 3 改进的多目标粒子群算法

### 3.1 位置更新公式的改进

基本粒子群算法的位置更新公式属于十进制数, 不方便进行配电网开关状态的表示, 所以, 通过 Sigmoid 函数来改进粒子群算法的位置更新公式, 将其变为二进制数, 用于表示主动配电网重构时开关的状态。二进制粒子群优化算法速度与位置更新公式如下。

$$v = w \cdot v + c_1 \cdot r_1 (p_{\text{best}} - x) + c_2 \cdot r_2 (g_{\text{best}} - x) \quad (16)$$

$$\begin{cases} S(x) = 1/(1 + e^{-v}) \\ x = 1; & \text{rand} < S(x) \\ x = 0; & \text{rand} > S(x) \end{cases} \quad (17)$$

式中： $v$  是粒子的当前速度； $w$  为惯性权重； $c_1$ 、 $c_2$  是学习因子； $r_1$ 、 $r_2$  是  $[0, 1]$  之间的随机数； $x$  是粒子的当前位置； $p_{\text{best}}$  是个体极值点位置； $g_{\text{best}}$  是全局极值点位置； $\text{rand}$  为随机产生一个介于  $[0, 1]$  之间的正实数的函数； $S(x)$  为 Sigmoid 函数值。

### 3.2 引入小生境技术的算法改进

常规粒子群算法在进行全局最优粒子的位置搜索时容易陷入局部最优解当中，而适应度共享技术就是要调节群体中每个个体的适应度，依据调整后的适应度，通过轮盘赌方法来进行选择最佳粒子操作，克服了粒子群算法在寻优过程中陷入局部最优的不足。所以本文在粒子群算法的基础上引入小生境技术，以选取群体的全局最优解。共享适应度函数可用式(18)表示。

$$F_i = 1 / \sum_{j=1}^{N_b} f_{\text{sh}}(d_{ij}) \quad (18)$$

式中： $N_b$  为小生境内个体数量； $f_{\text{sh}}(d_{ij})$  为共享函数，可由式(19)表示。

$$f_{\text{sh}}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - (d_{ij} / \sigma_{\text{share}})^\alpha, & 0 < d_{ij} < \sigma_{\text{share}} \\ 0, & d_{ij} \geq \sigma_{\text{share}} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $d_{ij}$  在文中表示小生境个体  $X_i$  和个体  $X_j$  之间的欧式距离； $\sigma_{\text{share}}$  为粒子  $i$  的小生境半径值，根据粒子  $i$  和  $j$  之间的当量距离动态更新，表达式为

$$\sigma_{\text{share}}^i = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} d_{ij} \quad (20)$$

### 3.3 模糊满意度评价决策方法

文中通过精英保留策略计算得到 Pareto 最优解后，需要从中选取一组折衷解，所以选择运用模糊隶属度决策方法来确定最终解，定义模糊隶属度函数为

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i\text{min}} \\ \frac{f_{i\text{max}} - f_i}{f_{i\text{max}} - f_{i\text{min}}}, & f_{i\text{min}} \leq f_i \leq f_{i\text{max}} \\ 0, & f_{i\text{max}} < f_i \end{cases} \quad (21)$$

式中： $f_i$  为第  $i$  个目标函数的适应度值； $f_{i\text{max}}$ 、 $f_{i\text{min}}$  分别为对应目标函数的上、下限。

定义标准化满意度为

$$\mu = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mu_i \quad (22)$$

式中： $\mu$  值越接近 1 越好； $M$  为目标函数的个数。

### 3.4 算法流程

本文所运用的 IMPSO 算法流程如图 1 所示。

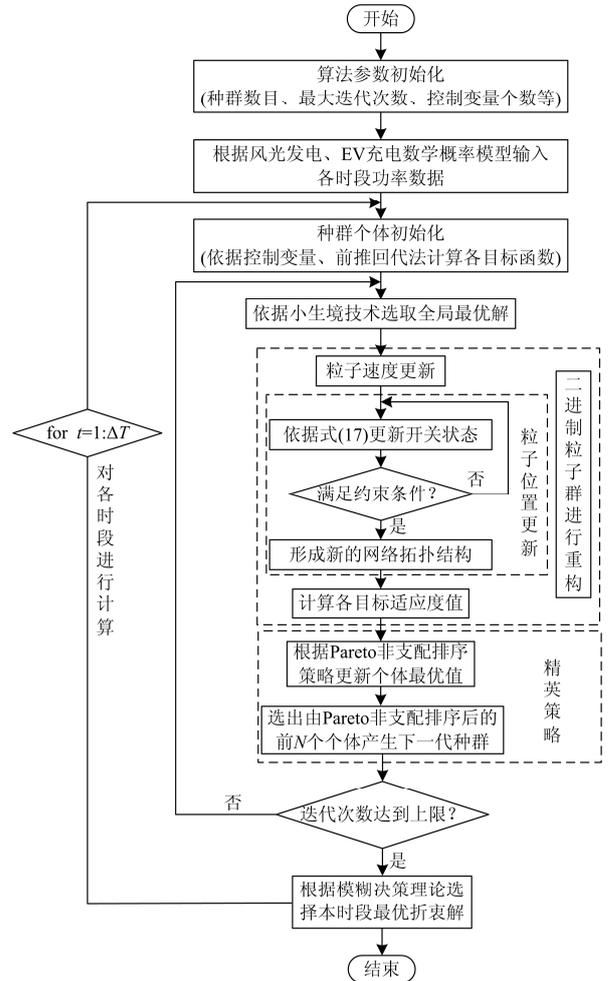


图 1 IMPSO 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of IMPSO algorithm

### 4 配电网重构算例分析

本文对 IEEE33 节点配电系统进行仿真分析，对比 EV 在不同充电模式下网络重构前后对系统运行的影响。标准测试系统总负荷为  $3715 + j2300$  kvar，具体数据可参看文献[22]，将测试系统划分为工业负荷、商业负荷和居民负荷三种区域，如图 2 所示。

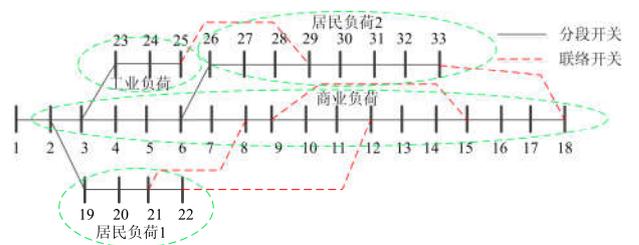


图 2 IEEE33 节点拓扑结构图

Fig. 2 Topology structure of IEEE33 node

## 4.1 基于 DG 出力和 EV 充电的优化重构

### 4.1.1 分布式电源的出力配置

系统节点处的负荷是引起有功损耗的主要原因, 而主动配电网中 DG 的接入比较普遍, DG 合理安装后可以适当调整节点处的等效负荷, 改善该节点对系统的有功损耗。

系统负荷节点的有功网损灵敏度可以反映在该节点注入有功时对系统网损改善的幅度指标, 所以可以通过有功网损灵敏度  $L$  来确定 DG 的位置和容量<sup>[10-11]</sup>。

为了避免重构过程对 DG 安装过程的影响, 本文以系统原始结构为基础, 找到适合 DG 安装的位置和容量。文中假定接入 DG 数量为三个, 根据节点负荷的有功网损灵敏度原则, 节点的  $L$  值越大, 说明该节点引起的配网有功损耗越大, 反之, 说明该节点引起的配网有功损耗越小。计算得到在 30、32、25 三处节点是安装 DG 的首选位置, 则本文在 30, 32 这两个负荷节点处安装风电机组, 在 25 这一个节点处安装光伏发电组, 功率因数为 0.9, 按照 DG 总装机容量不超过系统总有功负荷的 40%, 考虑 DG 的备用容量, DG 的输出功率不能超过系统总有功负荷的 35%, 采用文中方法得到最优输出功率, 同时考虑到设备实际制造情况, DG 的额定容量在规定范围内取整数, 则结果如表 1 所示。

表 1 IEEE33 节点系统中 DG 的安装位置与容量

Table 1 Position and capacity of DG in IEEE33 power system

DG 位置(DG 类型)	25(WT1)	30(WT2)	32(PV)	合计
输出功率计算值/kW	293.891	646.406	359.953	1 300.25
DG 额定安装容量/kW	300	700	400	1 400

由表 1 可见, DG 额定装机容量为 1 400 kW, 占系统总有功负荷的 37.7%。

本文选择 1 天为周期进行研究, 其中 1 天当中典型的风速数据和光照强度数据可参看文献[23], 参数设定如下所述。

(1) 风力发电: 切入风速  $v_{ci}=4$  m/s、切出风速  $v_{co}=24$  m/s、额定风速  $v_n=14$  m/s;

(2) 光伏发电: 光伏面板面积  $A=9\ 000$  m<sup>2</sup>, 换能效率 15%。

根据以上数据计算得到所安装的三处 DG 在 1 天当中的有功出力分布如图 3 所示。

### 4.1.2 电动汽车无序充电功率分布

根据 EV 充电数学模型中的充电时间的概率分布式, 得到充电时间大约为 2 h 的概率最大, 所以本文以 2 h 为 EV 的充电时间段将 1 天划分为 12 个时间段以便进行仿真分析。EV 正常充电功率为 3 kW,

充电功率因数为 0.95, 根据 1.2 节中 EV 无序充电概率模型, 可以得到单台汽车 1 天的充电概率需求, 假定文中所涉及到的私家车都分布在居民负荷区进行充电, 居民负荷区有电动汽车 1 000 辆, 则所有电动汽车一天当中在 12 个时间段充电时的功率需求分布如图 4。

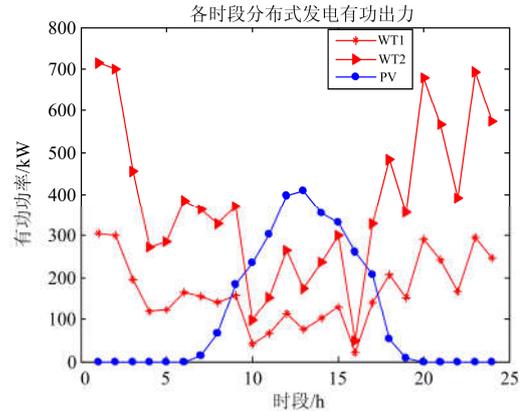


图 3 各时段 DG 的有功出力情况

Fig. 3 Active output of DG at each period

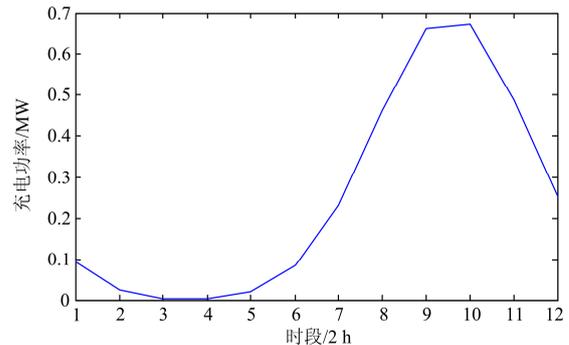


图 4 1 000 辆 EV 各时段充电功率需求

Fig. 4 Demand of 1 000 EVs charging at each period

本文将 IEEE33 节点测试系统分出两个居民负荷区, 根据有功网损灵敏度原则, 电动汽车在充电过程中可以作为一种恒功率负荷, 接入到系统后会加大系统的有功网损, 所以电动汽车的接入位置应该是居民负荷区有功网损灵敏度值较小的地方, 文中将 1 000 辆电动汽车平均分配到 19 和 26 两个节点处进行充电。

## 4.2 随机性负荷

为了使计算更加贴近实际, 根据文献[24]所用的负荷数据模拟方法, 以标准 IEEE33 节点总负荷为最大值动态模拟出 1 天各时段的负荷数据。

电动汽车充电过程中可作为一种负荷进行分析。结合 EV 充电模型公式, 其中智能充电模式下, 根据式(7)对次日需要充电的电动汽车按比例分配到各时段进行充电, 在用电高峰期, 安排充电的电

电动汽车尽可能少, 反之, 尽可能多, 最后得到不同充电模式下各时段总负荷曲线如图 5。

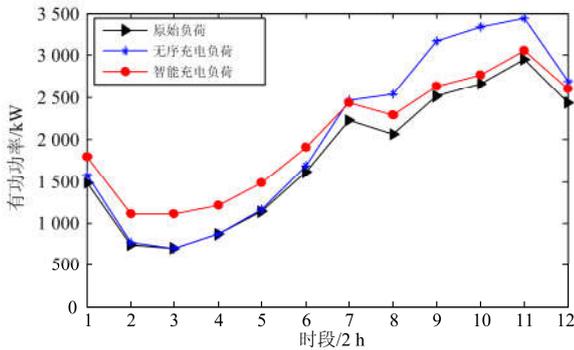


图 5 不同 EV 充电模式下负荷曲线  
Fig. 5 Load curve under different EV charging modes

### 4.3 含 DG 和 EV 的主动配电网动态重构

本文将改进前后的 MPSO 算法的性能进行了比较, 取第一个时间段通过 Matlab 连续计算 30 次, 允许电压偏移为额定电压的  $\pm 7\%$ , 对比改进前后输出的 Pareto 最优解集个数如图 6 所示, 取出负荷最大的第 11 个时间段进行计算, 得到 Pareto 最优解集如图 7 所示。

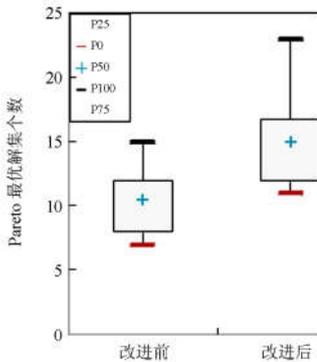


图 6 MPSO 算法改进前后性能比较箱线图  
Fig. 6 Comparison before and after improvement of MPSO algorithm with boxplot

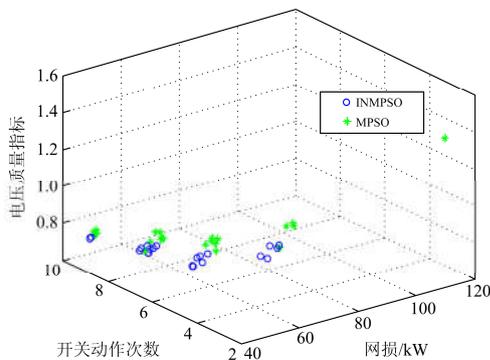


图 7 INMPSO 和 MPSO 得到的 Pareto 最优解集对比图  
Fig. 7 Comparison of Pareto optimal solution set by INMPSO and MPSO

由图 6 和图 7 可见, 改进后的算法在寻优能力上优于改进之前的算法, 比较结果说明 IMPSO 算法用于主动配电网多目标优化重构时在寻优性能上有所提升。

## 5 电动汽车充电模式对配电网重构的影响分析

为了研究电动汽车充电模式对主动配电网重构的影响, 本文根据所提方法分别对 EV 无序充电和智能充电两种充电模式下进行多时段重构, 设置以下四种场景进行结果对比分析。

- 场景 1: 无序充电模式下不进行重构;
- 场景 2: 智能充电模式下不进行重构;
- 场景 3: 无序充电模式下进行重构;
- 场景 4: 智能充电模式下进行重构。

本文从用户考虑设置了场景 2, 这种模式需要约束电动汽车车主的充电行为, 从电网公司角度考虑设置了场景 3, 此种方式不需要电动汽车车主参与电力调度安排, 为了进一步说明本文重构方法的有效性, 设置场景 1 和场景 4 进行综合对比。

在 IMPSO 算法计算时, 每个时段设置种群规模为 20, 最大迭代次数为 30, 由模糊决策理论得到最优折衷解, 不同场景下各时段重构后的结果如表 2 和表 3 所示。

四种场景下各目标 1 天的计算结果数据如表 4 所示。

从表 4 中的结果得知, 场景 2 的网损 323.19 kW、电压偏移指标 5.81, 分别比场景 3 的网损 238.27 kW、电压偏移指标 3.68 高出 35.6%和 57.9%, 说明从电

表 2 场景 3 多时段重构后结果

Table 2 Result of multi period reconstruction of scene 3				
时段	网损/kW	VSI	开关次数	打开开关
1	5.924 4	0.103 3	6	[11,14,22,33,34]
2	1.643	0.044 8	6	[4,10,13,33,34]
3	1.170 7	0.045 7	4	[10,13,16,24,33]
4	1.709 2	0.067 3	2	[10,13,15,24,33]
5	2.947 7	0.088 1	4	[11,12,15,24,33]
6	11.279	0.320 3	4	[6,12,15,24,35]
7	24.388	0.416 1	4	[6,10,12,15,37]
8	21.950 2	0.279 2	2	[6,10,12,29,37]
9	38.166 2	0.580 1	6	[7,10,14,36,37]
10	55.644 2	0.723	2	[7,10,14,27,36]
11	49.473 6	0.661 3	4	[7,10,14,16,28]
12	23.969 7	0.354 7	4	[7,11,14,28,29]

表 3 场景 4 多时段重构后结果

Table 3 Result of multi period reconstruction of scene 4

时段	网损/kW	VSI	开关次数	打开开关
1	8.135 1	0.146 4	4	[10,14,33,34,37]
2	2.347 8	0.064 9	6	[7,8,10,14,25]
3	2.677 4	0.108 6	4	[7,10,14,26,36]
4	2.800 8	0.123 2	4	[6,10,14,26,34]
5	4.253 1	0.140 7	4	[6,8,14,15,26]
6	12.602	0.317 3	2	[6,8,13,15,26]
7	22.543 6	0.432 3	4	[7,8,13,15,28]
8	14.932 1	0.316 6	4	[7,9,13,15,27]
9	29.014 9	0.503 3	4	[7,10,13,15,28]
10	45.093 9	0.637 6	4	[7,10,14,16,28]
11	43.075	0.629 4	2	[7,10,14,15,28]
12	20.357 9	0.379 1	2	[7,10,14,15,37]

表 4 不同场景 1 天的结果对比

Table 4 Comparison of different scenes in 1 day

场景	网损/kW	VSI	开关次数
1	365.58	5.91	0
2	323.19	5.81	0
3	238.27	3.68	48
4	207.83	3.79	44

网公司一侧考虑, 能够使系统更加优化, 虽然需要通过开关操作进行优化, 但是能够满足电动汽车车主的用电需求。进一步对四种场景综合分析, 智能充电和无序充电时进行重构前后的网损和电压偏移指标值均有明显的改善, 场景 4 比场景 3 的开关次数少 4 次, 说明文中所用的重构方法是可行的。

四种场景 12 个时段的网损值和各时段的最小电压值分别如图 8 和图 9 所示。

根据图 5 可知接入电动汽车充电后系统负荷在第 9 到第 12 个时间段(即 18:00—24:00)达到高峰期, 而此时, EV 在两种充电模式下进行重构后网损、电压偏移指标均有较大改善, 从图 8 以及表 2、表 3

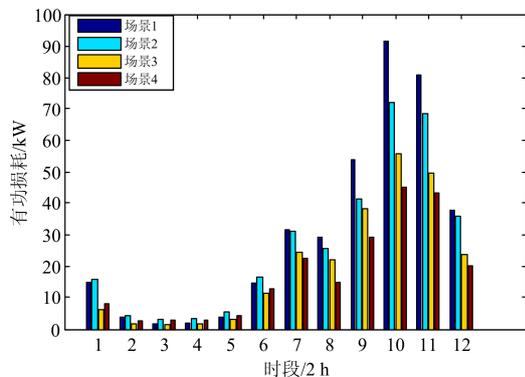


图 8 各场景 12 个时段网损比较

Fig. 8 Loss comparison of each scene in 12 periods

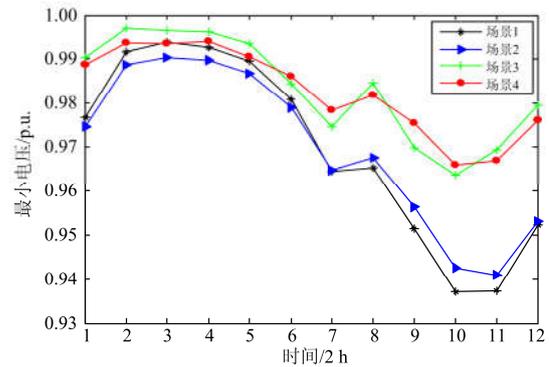


图 9 各场景 12 个时段节点最小电压值曲线

Fig. 9 Minimum voltage curve of each scene in 12 periods

中可以看出 9:00—12:00 时间段内重构后效果最为明显; 图 9 给出了各时段重构时通过潮流计算得出的 IEEE33 节点中的最小电压标么值曲线, 不难发现, 重构后电压值有了明显的提高, 尤其是在系统负荷高峰期, 说明本文所用的方法在提高系统稳定性上是有效果的。

## 6 结论

本文采用多时段重构策略对 IEEE33 节点配电系统进行优化仿真分析, 主要结论如下:

1) 通过有功网损灵敏度对 DG 的位置和容量进行配置, 模拟了 DG 出力以及 EV 无序充电和智能充电场景, 建立了网损、电压偏移指标和开关操作次数的多目标主动配电网多时段重构数学模型;

2) 相对于多目标粒子群算法, 本文引入小生境技术对算法进行改进, 加强了算法的全局搜索能力, 使算法的全局寻优性能提高, 对比重构前后两种充电模式下各目标函数的计算值, 说明文中方法的可行性;

3) 从电网公司一侧考虑系统优化的方式比从电动汽车用户一侧考虑优化的效果更加明显, 同时也可以满足电动汽车车主的用电需求。

## 参考文献

- [1] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.
- [2] 蒋煜, 丁晓群, 郑程拓, 等. 含电动汽车的主动配电网分布式电源规划[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 1-6.  
JIANG Yu, DING Xiaohun, Zheng Chengtuo, et al.

- Distributed generation planning for active distribution network with electric vehicle[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(7): 1-6.
- [3] 胡文平, 何立夫, 陈杰军, 等. 考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(21): 22-28.  
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(21): 22-28.
- [4] SUN Bo, SU Zhongpei, WEI Dajun. Research on optimal control of electric vehicle charging in residential area[C] // 35th Chinese Control Conference (CCC), July 27-29, 2016, Chengdu, China : 8617-8621.
- [5] 窦晓军. 电动汽车充电负荷预测模型及对城市负荷影响研究[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(2): 103-108.  
DOU Xiaojun. Study on forecasting model of electric vehicle charging load and its impacts on the urban load[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(2): 103-108.
- [6] 徐浩, 夏鑫珏, 李辉, 等. 计及充电请求预测补偿的电动汽车有序充电策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 1-8.  
XU Hao, XIA Xinjue, LI Hui, et al. An ordered charging strategy for electric vehicles accounting the compensation of predicted charging requests[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 1-8.
- [7] 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.  
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.
- [8] 朱正, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(14): 82-88.  
ZHU Zheng, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(14): 82-88.
- [9] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 22-28.  
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 22-28.
- [10] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 广义电源多目标优化配置与运行[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3505-3512.  
PAN Chao, MENG Tao, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimal configuration and operation of generalized power sources[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3505-3512.
- [11] 庄园, 王磊. 分布式电源在配电网中优化选址与容量的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(20): 73-78.  
ZHUANG Yuan, WANG Lei. Research of distributed generation optimal layout and capacity confirmation in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(20): 73-78.
- [12] 张聪, 许晓慧, 孙海顺, 等. 基于自适应遗传算法的规模化电动汽车智能充电策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(14): 19-24.  
ZHANG Cong, XU Xiaohui, SUN Haishun, et al. Smart charging strategy of large-scale electric vehicles based on adaptive genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(14): 19-24.
- [13] 谢海波, 武小梅, 林翔, 等. 含分布式电源的配电网无功优化研究综述[J]. *广东电力*, 2017, 30(2): 102-109.  
XIE Haibo, WU Xiaomei, LIN Xiang, et al. Review on reactive power optimization for power distribution network with distributed generation[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(2): 102-109.
- [14] 葛少云, 王龙, 刘洪, 等. 计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(8): 2316-2321.  
GE Shaoyun, WANG Long, LIU Hong, et al. An optimization model of peak-valley price time-interval considering vehicle-to-grid[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2316-2321.
- [15] 彭显刚, 林利祥, 刘艺, 等. 计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2188-2194.  
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generation considering uncertainties of plug-in electric vehicles and renewable energy sources[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2188-2194.
- [16] 和敬涵, 李智诚, 王小君. 柔性直流环节对配电网优

- 化运行作用的概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 342-349.
- He Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun. Probabilistic evaluation on the benefits of flexible dc link for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 342-349.
- [17] 陈光, 戴攀, 周浩, 等. 计及入网电动汽车和分布式电源的配电系统重构[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 82-88.
- CHEN Guang, DAI Pan, ZHOU Hao, et al. Distribution system reconfiguration considering distributed generators and plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 82-88.
- [18] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 考虑分布式发电供电概率的配电网重构[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 113-118, 12.
- YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Network reconfiguration of distribution system considering power supply probabilities of distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 113-118, 12.
- [19] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [20] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
- TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [21] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
- CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2124-2131.
- [22] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [23] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1431-1436.
- YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [24] 车仁飞. 配电网潮流计算及重构算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2003.

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-05-16

作者简介:

张涛(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术; E-mail: unifzhang@hotmail.com

张东方(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网。E-mail: zdongfang@foxmail.com

(编辑 葛艳娜)