

DOI: 10.7667/PSPC161404

考虑时序特性含电动汽车配电网分布式电源优化配置

管志成, 丁晓群, 张木银, 叶晨晖

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 由于电动汽车负荷是一个综合性的影响因素复杂的时空负荷, 因此在配电网分布式电源规划的时候需要对电动汽车负荷的时空特性加以考虑。基于电动汽车时空特性与分布式电源的时序特性, 建立包含可入网电动汽车、分布式电源以及储能装置的配电网分布式电源优化模型。以配电网年度总成本为优化目标, 利用蒙特卡洛模拟得到时空特性的电动汽车负荷, 依据协调控制策略, 采用引入变异和交叉操作的混合粒子群算法对建立的模型进行优化求解。最后通过某实际地区进行算例分析, 验证了所建立模型的正确性以及求解方法的有效性。

关键词: 电动汽车; 分布式电源; 储能装置; 控制策略; 优化配置

Optimal allocation of distributed generation of distributed network containing electric vehicle considering timing characteristics

GUAN Zhicheng, DING Xiaoqun, ZHANG Muyin, YE Chenhui

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Because the electric vehicle load is a complex space-time load with comprehensive influence factors. Therefore, this paper considers the temporal and spatial characteristics of the electric vehicle load and the time sequence characteristics of the distributed generation. It establishes distributed power optimization model of distribution network containing the plug-in electric vehicle and distributed generation and storage device. To optimize the annual total cost of distribution network, it uses Monte Carlo simulation to get the temporal and spatial characteristics of electric vehicle load. Based on the coordinated control strategy, the model is solved by a hybrid particle swarm optimization algorithm with mutation and crossover operation. Finally, a practical example is given to verify the correctness of the established model and the effectiveness of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5206021400NP).

Key words: electric vehicle; distributed generation; energy storage device; control strategy; optimal allocation

0 引言

分布式发电(Distributed Generation, DG)与电动汽车(Electric Vehicle, EV)是智能电网发展的两个重要组成部分。中国作为一个能源生产与消费的大国, 随着能源供应压力的迅速增加, 资源的短缺、不合理的能源结构与环境保护问题的日益突出, 可再生能源的开发利用成为缓解我国能源需求的重要途径。此外, 交通运输业一直以单一的化石能源作为唯一的能源供应, 电动汽车技术的快速发展开拓了交通业的新局面, 同时随着电动汽车数量的增加, 电动汽车也成为现代配电网规划不可或缺的考虑因

素。电动汽车的无序充电加大了电网的供电压力, 使得节点电压下降, 电能质量变差, 但若对电动汽车加以控制, 可以大规模增加电网对电动汽车负荷的容纳能力。同时电动汽车 V2G 模式可以对负荷曲线削峰填谷, 提高负荷利用率, 促进可再生能源消纳, 为系统提供辅助服务^[1-2]。

在电动汽车与分布式电源的规划方面, 国内很多学者已经进行了较为深入的研究。文献[3]考虑了电动汽车充电、负荷与分布式电源出力的不确定性, 以 DG 的总成本最低作为优化目标, 建立了分布式电源的选址定容模型, 并采用蒙特卡洛嵌入 GA 算法进行求解, 但是没有考虑电动汽车负荷的时间与空间特性。文献[4]基于随机潮流, 协调优化了配电公司、DG 投资商和社会之间的利益, 建立了机会

约束的配电网 DG 优化数学模型, 没有考虑电源和负荷的时序特性, 文献[5]考虑了电动汽车充电站对交通网络的影响, 建立路径与交通满意度模型, 以总成本、网损与交通满意度为目标对配电网内的 DG 和充电站进行规划, 但是没有考虑电动汽车 V2G 对于电网规划的影响。

本文考虑了电动汽车的时空特性以及 DG 和负荷的时序特性, 建立了包含可入网电动汽车、DG 与储能的配电网协调规划模型, 以配电网的年度综合成本最小为目标函数, 并采用改进的混合粒子群算法进行优化求解。

1 DG 和 PHEV 的时序建模

1.1 电动汽车的时空模型

电动汽车在电网中是负荷与电源并存的形式, 充电模式一般分为快充与慢充。国外对电动汽车使用者的调查表明, 90%的电动汽车充电是在停车场和车库进行的, 充电时间较长, 以慢充为主, 只有 10%左右的充电需求要在公共的应急充电站完成^[6]。同时电动汽车充电负荷的分布具有时间和空间双重随机特性, 本文以小型家用电动汽车为例, 建立考虑时空特性的电动汽车充电负荷。

考虑时空双重特性的电动汽车负荷建模思路如下: 首先预测待规划区在规划年内的电动汽车保有量, 根据规划地区各个区域用地的类型不同, 通过停车生成率模型计算得到待规划区停车需求的时空分布, 再结合电动汽车的驾驶特性等因素, 利用蒙特卡洛模拟得到各个区域的电动汽车负荷时序模型^[7-8]。

采用文献[7]根据统计数据拟合的典型住宅区与典型工商业区域的停车需求函数, 其停车需求函数为

$$D_{\text{res}}(t) = 1 - 0.54e^{-\frac{(t-15.07)^2}{5.84}} - 0.24e^{-\frac{(t-9.68)^2}{2.46}} \quad (1)$$

$$D_{\text{com}}(t) = 0.30 + 0.72e^{-\frac{(t-13.52)^2}{5.09}} \quad (2)$$

式中: $D_{\text{res}}(t)$ 为住宅区停车需求拟合函数; $D_{\text{com}}(t)$ 为工商业区停车需求拟合函数, 拟合函数图像如图 1 所示。

由图 1 可见: 居民区的电动汽车停放高峰在夜晚, 一般早晨出行, 傍晚之后返回, 白天的停车时间一次在 2 h 左右; 而工商业区的停放需求与其互补。

设节点 i 所供电的区域在 t 时刻电动汽车的停车需求为

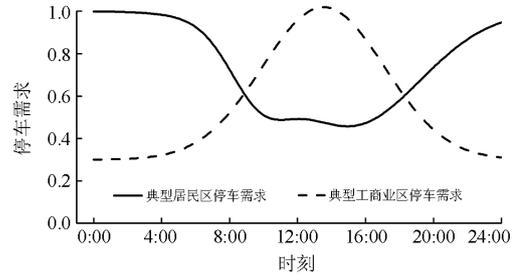


图 1 停车需求曲线

Fig. 1 Parking demand curve

$$D_i(t) = \sum_{j=1}^{N_d} f_{ij} D_{ij}(t) R_{ij} L_{ij} \quad (3)$$

式中: N_d 为区域类型; f_{ij} 为停车生成率修正系数; $D_{ij}(t)$ 为节点 i 区域第 j 类用地的停车需求函数; R_{ij} 为节点 i 区域第 j 类用地的停车需求生成率; L_{ij} 为待规划节点 i 区域第 j 类用地使用量占总用地的比例。

根据不同车辆的停车时间、驾驶特性以及日行驶里程, 用蒙特卡洛模拟得到每个采样时段 t 节点 i 处的电动汽车数量 $N_i(t)$, 模拟采样时段为 1 h, 则电动汽车负荷时空模型为

$$P_{\text{EV},i}(t) = \sum_i^N P_{\text{EV}}(t) N_i(t) D_i(t) \quad (4)$$

式中: N 为规划区节点数; $P_{\text{EV}}(t)$ 为单台电动汽车充放电功率, 正值为充电, 负值为放电。

1.2 DG 时序模型

本文主要考虑风力发电、光伏发电以及储能电池这 3 种典型的 DG。由于 DG 出力具有较强的波动性与随机性, 出力特性取决于当地气候条件和地理位置等因素。风力发电机出力大小主要取决于风速, 光伏发电的出力则主要为光照和温度的函数, 且同一地区的风机和光伏出力随着季节的变化呈现出不同的特性^[9]。根据待规划地区的气象统计资料计算得到 4 个季度典型日风机和光伏的时序特性曲线如图 2、图 3 所示。

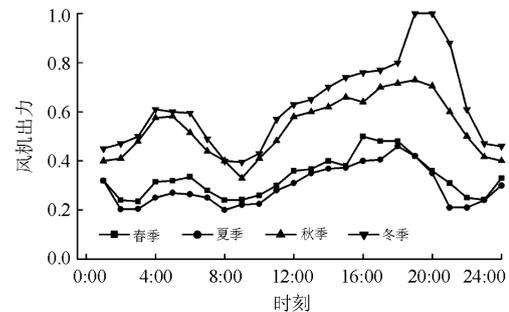


图 2 风机出力时序特性曲线

Fig. 2 Timing characteristic curve of WG

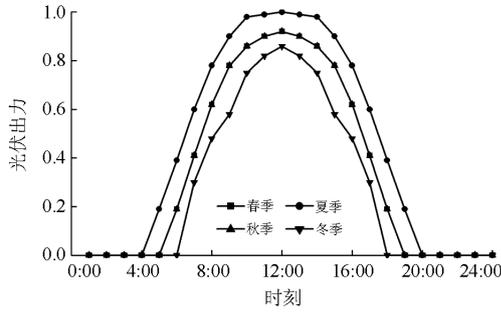


图3 光伏出力时序特性曲线

Fig. 3 Timing characteristic curve of PV

由以上时序特性曲线可见, 风电在春季和冬季出力较大, 光伏在夏季出力最大, 光伏与风电出力在季节上具有一定的互补特性。

则考虑时序特性的分布式电源模型为

$$P_{DG,i}(t) = w_{WG}(i)P_{WG}(t)S_{WG}[i] + w_{PV}(i)P_{PV}(t)S_{PV}[i] + w_{BS}(i)P_{BS}(t)S_{BS}[i] \quad (5)$$

式中: $P_{DG,i}(t)$ 为节点 i 的 DG 在 t 时刻总的有功出力; $P_{WG}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{BS}(t)$ 分别为节点 i 处单位容量的风机和光伏在 t 时刻的有功出力; w_{WG} 、 w_{PV} 、 w_{BS} 分别为节点 i 处 DG 的安装情况, 为 0-1 变量, 表示节点 i 处是否安装风机、光伏或储能; $S_{WG}[i]$ 、 $S_{PV}[i]$ 、 $S_{BS}[i]$ 则分别为节点 i 安装的风机、光伏或储能的容量。

本文中储能装置采用铅酸蓄电池, 其出力模型为

$$P_{BS}(t) = \begin{cases} -\eta_c P_c(t), & \text{充电} \\ \eta_d P_d(t), & \text{放电} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: η_c 、 η_d 分别为储能充、放电效率; $P_c(t)$ 、 $P_d(t)$ 分别为充、放电功率。

则储能装置 SOC 状态为^[10]

$$S_{OC}(t) = (1 - \delta)S_{OC}(t-1) - \frac{P_{BS}(t)\Delta t}{E_{BS}} \quad (7)$$

式中: δ 为储能装置自放电系数; Δt 为充放电时间; E_{BS} 为储能装置额定容量。

1.3 负荷时序模型

现阶段用电行业将电力负荷主要分为市政生活(I类)、第三产业(II类)、工业(III类)、农业(IV类)等种 4 典型负荷^[11], 本文参考电力负荷曲线的绘制方法, 以市政生活(I类)、第三产业(II类)与工业负荷(III类)为研究对象, 选取一年四季中的典型日进行分析, 得到三类负荷的时序特性曲线如图 4 所示。

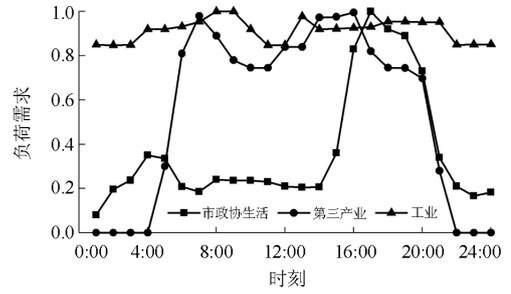


图4 负荷时序特性曲线

Fig. 4 Timing characteristic curve of load

负荷的时序特性曲线中, 负荷需求为标么值, 比较图 4 中不同类型负荷的曲线可知, 不同行业的负荷呈现不同的特征。市政生活负荷白天变化较为平缓, 晚上 16:00—20:00 达到负荷高峰; 第三产业负荷主要集中于 07:00—20:00; 而工业负荷由于受到分时电价的影响, 常为三班制作业, 夜间负荷大, 因而全天负荷率较高, 且负荷波动较小。

则节点 i 的等效负荷为

$$P_{EL,i}(t) = P_{L,i}(t) + P_{EV,i}(t) - P_{DG,i}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{L,i}(t)$ 为节点 i 处负荷功率; $P_{EV,i}(t)$ 为节点 i 处电动汽车充放电功率; $P_{DG,i}(t)$ 为节点 i 处 DG 功率。

2 问题数学模型

2.1 目标函数

配电网分布式电源的规划问题实际是多目标非线性混合整数规划问题, 本文考虑了风光发电的互补特性、电动汽车负荷的时空特性以及不同种类负荷的时序特性, 以包含配电网投资运行成本、供电可靠性以及环境成本的综合年度成本为目标^[12-13], 并将多目标规划问题通过权重系数归纳为单目标问题, 建立如下的目标函数。

$$\min F = \alpha p C_{INV} + \beta C_{OPE} + \gamma C_{REL} + \delta C_{ENV} \quad (9)$$

$$p = r(r+1)^n / [(1+r)^n - 1] \quad (10)$$

式中: α 、 β 、 γ 、 δ 为权重系数, 并满足 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$, 采用文献[3]中多目标综合指标评估方法(层次分析法(AHP))来确定各项指标的最优权重系数; p 为等年值折算系数; r 为折旧率, 取 0.1; n 为配电网规划寿命周期; C_{INV} 为 DG、储能装置以及配电网网架建设费用; C_{OPE} 为 DG、储能、配电网的运行维护费用以及电动汽车 V2G 电池折损的补偿费用、配电网每年的购电费用; C_{REL} 为配电网的年度可靠性成本; C_{ENV} 为环境补偿成本。

2.1.1 投资成本

投资成本 C_{INV} 包括配电网中 DG 的建设费用 C_{DG} 、储能装置的建设费用 C_{BS} 以及配电网架的建设或者改建费用 C_{NET} 。

$$C_{\text{INV}} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} c_k S_{k,i} + \sum_{i=1}^N c_{\text{BS},i} S_{\text{BS},i} + \sum_{i,j \in N} n_{ij} c_{\text{line}} L_{ij} \quad (11)$$

式中: N 为规划区域节点数; N_{DG} 为节点 i 处安装 DG 的种类数, 取值为 1 和 2, 分别表示风力发电与光伏; c_j 为单位容量的 DG 的成本; $S_{i,j}$ 表示节点 i 处安装的 DG 的容量; c_{BS} 为单位储能的成本; $S_{\text{BS},i}$ 为节点 i 处安装储能的容量; n_{ij} 为线路改建的决策变量, 取值为 0、1; c_{line} 为单位线路建设成本; L_{ij} 为节点 i, j 之间的线路长度。

2.1.2 运行维护成本

运行维护成本 C_{OPE} 包括 DG、储能和配电线路每年的维护费用, 网络损耗费用, 配电网年度购电费用以及电动汽车 V2G 的购电费用与电动汽车 V2G 电池折损的补偿费用。

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\text{OPE}} = C_{\text{mt}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{pt}} + C_{\text{v2g}} \\ C_{\text{mt}} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{N_{\text{DG}}} c_{\text{mdg},k} P_{i,k} + \sum_{i=1}^N c_{\text{mbs},i} P_{\text{bs},i} + c_1 \\ C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}} \sum_t \sum_{i,j \in N} I_{ij}^2(t) R_{ij} \\ C_{\text{pt}} = c_{\text{pt}} \sum_t \sum_i P_{\text{EL},i}(t) \\ C_{\text{v2g}} = (c_{\text{v2g}} + c_{\text{bat}}) \sum_t \sum_i P_{\text{EV},i}(t), P_{\text{EV},i}(t) < 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: $c_{\text{mdg},k}$ 为不同种类的 DG 发单位有功功率的维护费用; $P_{i,k}$ 为节点 i 处各种类型 DG 所发功率; $c_{\text{mbs},i}$ 为不同种类的 DG 发单位充放电功率的维护费用; $P_{\text{bs},i}$ 为节点 i 处储能充放电功率; c_1 为年度配电线路维护费用; c_{loss} 为电能损耗的单位成本; $I_{ij}(t)$ 为节点 ij 之间的电流; R_{ij} 为节点 ij 之间的线路电阻; c_{pt} 为配电网购电电价; c_{v2g} 为电动汽车将电能回馈配电网的补偿电价; c_{bat} 为电动汽车 V2G 电池折损补偿费用; $P_{\text{v2g}}(t)$ 为 t 时刻电动汽车 V2G 的总功率。

2.1.3 供电可靠性成本

供电可靠性 C_{REL} 采用年缺供电量成本表示, 系统缺供电量仅考虑线路与 DG 的故障率与故障持续

时间^[14-15]。

$$C_{\text{REL}} = \sum_i \sum_j \sum_t [c_{r,j} T_i P_{i,j}(t)] / 8760 \quad (13)$$

$$T_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^i \lambda_{1,k} \gamma_1 \mathbf{E}_{k,i}, & i \notin \Phi \\ \sum_{k=1}^i (\lambda_{1,k} \cap \lambda_{\text{DG},i}) \mathbf{E}_{k,i} \gamma_{\min(\text{L,DG})}, & i \in \Phi \end{cases}$$

式中: N_i 为节点负荷类型数; $c_{r,j}$ 为不同类型的负荷单位功率的停电损失; T_i 为节点 i 的故障持续停电时间; $P_{i,j}(t)$ 为节点 i 处 j 类型的负荷在时段 t 的功率, 采样时段为 1 h。假定 DG 发生故障时能够可靠与电网解列, 不影响其他节点负荷供电; 假设线路故障时, 故障线路可以被可靠隔离, 需经过故障线路供电的下游节点受到影响, 其他节点正常运行。 $\lambda_{1,k}$ 为线路 k 段的故障率; γ_1 为线路故障平均时间; \mathbf{E} 为系统的连通性矩阵, 即从节点 k 到 i 存在连通关系, 矩阵中相应位置的值为 1, 否则为 0; $\lambda_{\text{DG},i}$ 为节点 i 处 DG 的故障率; $\gamma_{\min(\text{L,DG})}$ 为线路和 DG 同时故障持续时间; Φ 为安装 DG 的节点集合。

元件可靠性数据如表 1 所示。

表 1 元件可靠性参数数据

Table 1 Component reliability parameter data		
元件名称	元件年故障率	平均修复时间/h
架空线路	0.0176/(次/km·年)	3
DG	5.791/(次/台·年)	60

2.1.4 环境成本

本文根据文献[16], 将常规机组排放污染物的环境价值与罚款标准折算为系统的环境成本。

$$C_{\text{ENV}} = (E_{\text{Load}} - E_{\text{DG}}) \sum_{k=1}^p e_k (V_k + V'_k) \quad (14)$$

式中: E_{Load} 为年度用电总量; E_{DG} 为年度 DG 总发电量; p 为污染物种类, 本文取 NO_x 、 CO_2 、 SO_2 三种污染物; e_k 为常规发电中污染物 k 的排放系数; V_k 为污染物 k 的环境价值; V'_k 为污染物 k 的罚款标准; 污染物环境评价标准如表 2 所示。

表 2 污染物环境评价标准

Table 2 Assessment standards for pollutants			
污染物	环境价值/ (元/kg)	罚款标准/ (元/kg)	排放系数/ (kg/MWh)
NO_x	8.000	2.000	1.544
CO_2	0.023	0.010	639.2
SO_2	6.000	1.000	3.587

2.2 约束条件

1) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{L,i} - P_{DG,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{L,i} - Q_{DG,i} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{L,i}$ 为节点 i 的有功注入; $P_{DG,i}$ 为节点 i 处 DG 的有功注入; $Q_{L,i}$ 为节点 i 的无功注入; $Q_{DG,i}$ 为节点 i 处 DG 的无功注入; U_i 为节点 i 处电压; 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 i 、 j 之间的相位角差。

2) 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad i \in N \quad (16)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压幅值; U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 为节点 i 电压幅值的下限与上限。

3) DG 安装容量约束

$$S_i^k \leq S_{i,\max}^k, \quad i \in N, \quad k \in N_{DG} \quad (17)$$

式中: S_i^k 为节点 i 处 k 种类型的 DG 安装容量; $S_{i,\max}^k$ 为节点 i 处 k 种类型的 DG 最大安装容量。

4) 储能充放电功率与荷电状态约束

$$\begin{cases} -P_{\text{bat},d} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{bat},c} \\ S_{\text{OC},\min}^{\text{BS}} \leq S_{\text{OC}}^{\text{BS}}(t) \leq S_{\text{OC},\max}^{\text{BS}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{bat}}(t)$ 为储能装置充放电功率; $-P_{\text{bat},d}$ 、 $P_{\text{bat},c}$ 分别为储能装置最大充电、放电功率; $S_{\text{OC}}^{\text{BS}}(t)$ 为储能装置荷电状态; $S_{\text{OC},\min}^{\text{BS}}$ 、 $S_{\text{OC},\max}^{\text{BS}}$ 分别为储能电池荷电状态的下限与上限, 分别取值为 0.1、0.95。

5) 电动汽车充放电功率与荷电状态约束

$$\begin{cases} -P_{\text{EV},d} \leq P_{\text{EV}}(t) \leq P_{\text{EV},c} \\ S_{\text{OC},\min}^{\text{EV}} \leq S_{\text{OC}}^{\text{EV}}(t) \leq S_{\text{OC},\max}^{\text{EV}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{EV}}(t)$ 为单台 EV 充放电功率; $-P_{\text{EV},d}$ 、 $P_{\text{EV},c}$ 分别为单台 EV 最大充电、放电功率; $S_{\text{OC}}^{\text{EV}}(t)$ 为单台 EV 荷电状态; $S_{\text{OC},\min}^{\text{EV}}$ 、 $S_{\text{OC},\max}^{\text{EV}}$ 分别为单台 EV 电池荷电状态的下限与上限, EV 电池荷电状态上限取值为 0.95, 下限的取值以满足用户出行需求为前提^[17-18]。参考美国交通部(National Household Travel Survey, NHTS)统计的家庭车辆行驶调查数据, 对家庭用车日行驶里程数据进行拟合, 得到日行驶距离的概率密度函数, 再通过 EV 的单位能耗将其转换为最低 S_{OC} 作为 EV 荷电状态下限值^[19]。

3 协调控制策略与求解算法

3.1 协调控制策略

本文研究了 EV、储能与配电网内的 DG 协调

优化规划, 利用可入网电动汽车的特性优化负荷曲线和削峰填谷, 提高电能品质, 与可再生能源发电协调互补。本文中含有可入网电动汽车与储能装置两种不同类型的储能方式, 考虑到储能装置的建设成本, 本文设定在协调控制时, 可入网电动汽车的调度优先级高于储能装置, 即在负荷高峰时, 调度次序为 EV 延时充电、V2G 放电、储能放电; 在负荷低谷时, 则优先给 EV 充电^[20-21]。

采样时段为 1 h, 假定 1 h 内风、光出力恒定, 根据一年四季的新能源出力特性与负荷特性, 在四个季度分别选取典型日, 以一天 24 h 为周期进行分析。节点 i 处的等效负荷 $P_{\text{EL},i}(t)$ 如式(8)所示, 则平均等效负荷为

$$P_{\text{AVL},i}(t) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{\text{EL},i}(t) \quad (20)$$

考虑到 V2G 的服务成本较高, 只有在满足一定的条件时电动汽车才入网放电, 控制策略如下。

假定每个时段更新 EV 参数后, 若 $S_{\text{OC}}(t)$ 低于下限, 则以额定功率充电, 若 $S_{\text{OC}}(t)$ 高于下限, 则延时充电等待系统调度; 若负荷曲线突然降低, 则按照优先级增加电动汽车的充电功率或使储能装置储存多余的电能; 若负荷曲线突然增加, 则按照优先级, 在满足电动汽车最低 S_{OC} 的前提下, 先减少电动汽车充电功率, 再者电动汽车 V2G 向电网放电, 最后储能装置放电。

(1) 当 $P_{\text{EL},i}(t) < P_{\text{AVL},i}(t)$ 时, 在满足式(21)的情况下, 依次增加电动汽车充电功率和储能装置充电功率。

$$P_{\text{EL},i}(t) + \Delta P_{\text{EV},i}^c(t) + \Delta P_{\text{BS}}^c(t) \in \sigma P_{\text{AVL},i}(t) \quad (21)$$

式中: $\Delta P_{\text{EV},i}^c(t)$ 为 t 时段增加的电动汽车充电功率; $\Delta P_{\text{BS}}^c(t)$ 为 t 时段增加的储能装置的充电功率; σ 为节点等效负荷在平均等效负荷处的参考波动系数, 取值为一个范围区间。

(2) 当 $P_{\text{EL},i}(t) > P_{\text{AVL},i}(t)$ 时, 在满足式(22)的情况下, 依次增加电动汽车 V2G 放电功率和储能装置放电功率。

$$P_{\text{EL},i}(t) + \Delta P_{\text{EV},i}^d(t) + \Delta P_{\text{BS}}^d(t) \in \sigma P_{\text{AVL},i}(t) \quad (22)$$

式中: $\Delta P_{\text{EV},i}^d(t)$ 为 t 时段增加的电动汽车充电功率; $\Delta P_{\text{BS}}^d(t)$ 为 t 时段增加的储能装置的充电功率。

3.2 优化算法

本文在电动汽车与储能装置协调控制策略的基础上建立了时序特性含电动汽车的分布式电源规划数学模型, 优化模型是包含多目标和多约束的非线性优化问题, 模型采用混合粒子群优化算法求解。

基于标准粒子群算法跟踪个体极值与群体极值

完成寻优, 在求解后期容易陷入局部最优, 造成求解精度降低, 因此本文使用改进的混合粒子群算法, 引入遗传算法中的交叉与变异操作, 通过粒子与个体极值与群体极值的交叉以及粒子自身的变异方式寻优, 并使用精英个体保持策略, 使算法具有良好的收敛性与精度。求解流程图如图 5。

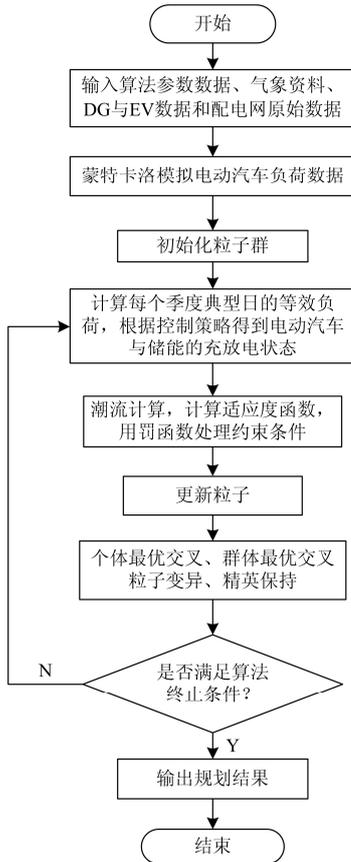


图 5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart

4 算例分析

本文根据某地区城市配电网线路简化构造了一个包含 14 个节点和 13 条支路的算例, 网络拓扑图如图 6 所示, 参数如表 3 所示。其中节点 1 为 35 kV/10 kV 出线侧节点, 在规划过程中将含有 DG 的节点作为 PQ 节点处理, 规划期为 20 年, 本文考虑了 EV 接入电网 3 种情况下的规划方案, 规划方案如表 4 所示。

假定节点负荷类型与节点区域类型重合。区域电动汽车的保有量为 300 辆, EV 模型采用长安 C6 型电动汽车, 其续航里程为 160 km, 电池容量 29.1 kWh, 电池价格为 2500 元/kWh, 可循环次数为 300 次, 额定充电功率为 2 kW, 放电功率与充电功率相

同, 采用层次分析法确定目标函数中的权重系数为 $\alpha=0.17$, $\beta=0.29$, $\gamma=0.23$, $\delta=0.31$ 。

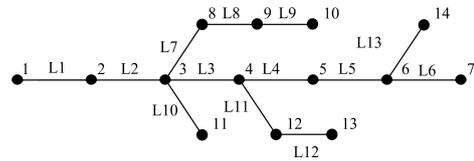


图 6 配电网拓扑图

Fig. 6 Structure of distribution network

表 3 系统参数

Table 3 System parameter

节点	有功/kW	无功/kvar	区域类型	支路	线路阻抗/ Ω
2	63.18	10.18	III	L ₁	0.02524+j0.0336
3	100.67	18.43	II	L ₂	0.02705+j0.0328
4	299.03	32.07	II	L ₃	0.02705+j0.0360
5	451.77	72.80	III	L ₄	0.01923+j0.0256
6	50.55	8.15	III	L ₅	0.03125+j0.0416
7	161.71	26.31	I	L ₆	0.10854+0.0226
8	331.59	5.68	II	L ₇	0.10805+j0.0230
9	631.85	101.82	III	L ₈	0.03408+j0.0236
10	41.07	6.72	II	L ₉	0.01172+j0.0156
11	387.67	53.43	I	L ₁₀	0.16520+j0.0466
12	138.32	41.88	I	L ₁₁	0.07308+j0.0349
13	400.89	58.85	III	L ₁₂	0.1314+j0.05712
14	505.48	81.23	III	L ₁₃	0.18303+j0.1123

表 4 规划方案

Table 4 Planning scheme

方案	电动汽车入网方式
1	随机充电
2	延时充电
3	V2G

根据本文提出的规划模型, 利用混合粒子群算法优化后得到优化结果如表 5 所示, 并将各个规划方案的年度综合成本进行对比如表 6 所示。

表 5 DG 规划结果

Table 5 DG planning results

方案	DG 安装配置 (位置/容量)		
	风电/MW	光伏/MW	储能/MWh
1	5/0.1,9/0.3,13/0.2, 14/0.2	5/0.1,9/0.15,14/0.1	9/2.5,13/2
2	5/0.2,9/0.3,11/0.2, 13/0.2,14/0.2	9/0.1,13/0.1, 14/0.15	9/1,13/2,14/1
3	5/0.2,9/0.25,11/0.2, 13/0.2,14/0.3	5/0.1,9/0.2,13/0.1,14/0.1	9/0.5,14/1

表 6 规划方案对比

Table 6 Comparison of planning schemes

方案	C_{INV} / 万元	C_{OPE} / 万元	C_{REL} / 万元	C_{ENV} / 万元	综合成本 / 万元
1	58.78	1038.89	32.41	17.92	1148.00
2	67.43	970.37	29.45	11.58	1079.10
3	62.46	958.23	15.63	6.478	1042.79

比较 DG 规划方案可以看出, 规划方案 3 中新能源发电渗透率为 29.7%, 相比规划方案 1 与方案 2 的 20.67% 与 26.3% 有所提升, 由于电动汽车 V2G 将电能回馈至电网, 使得电网对可再生能源随机特性的适应能力有了一定的提升, 并且由于电动汽车的入网放电减少了所需储能装置的容量, 减少了电网不必要的投资。

分析表 6 中各个规划方案的成本可以发现, 方案 2 比方案 1 的 DG 渗透率也有着一定的提升, 原因在于方案 2 中延时充电的方式使得电动汽车在负荷较低的时候(例如夜间 22:00—凌晨 5:00)进行充电, 避免了负荷峰时对负荷“峰上加峰”, 减少了节点电压的越限, 从而使 DG 接入能力提升, 随着 DG 渗透率的提高, 折算后的年度投资成本有了增加, 但是随着 DG 入网发电, 减少了系统的购电成本, 提高了系统的供电可靠性, 减少了系统可靠性成本, 新能源发电比例的提高, 也减少了环境成本。

方案 2 与方案 3 相比, 由于电动汽车 V2G 入网放电, 进一步平抑了 DG 接入带来的波动性, 提高了 DG 的接入能力, 但是由于电动汽车 V2G 入网放电代替了一部分储能装置的作用, 并且由于电动汽车的时空分布特征比储能装置更为灵活, 进一步提高了系统对新能源的适应性, 减少了系统所需储能装置的配置, 从而降低了方案 3 中系统的投资成本。但是高昂的 V2G 补偿费用增加了方案 3 的系统运行成本, 方案 3 的年度运行成本中有 56.14 万元为电动汽车 V2G 电池折损的补偿费用。

5 结论

本文考虑了电动汽车的时空特性, 建立了包含可入网电动汽车的配电网分布式电源规划时序模型。依据等效负荷与电动汽车的协调控制策略, 以配电网年度综合成本最小为目标对配电网内分布式电源进行了优化配置。得出主要结论如下:

(1) 电动汽车根据控制策略在负荷低谷时段充电, 在负荷高峰时段放电, 提高了可再生能源的发电比例, 使得电网对新能源具有更好的适应能力, 减少发电对环境的影响, 积极响应国际上对节能减

排的号召。

(2) 电动汽车的 V2G 接入电网, 对负荷曲线有着平抑作用, 提高了等效负荷率与电力设备的使用效率, 减少了对储能装置的投资。在提高供电可靠性的同时, 充分挖掘了电网对新能源的支撑能力, 促进了可再生能源的消纳。

参考文献

- [1] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [2] 王锡凡, 邵成成, 王秀丽, 等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 1-10.
WANG Xifan, SHAO Chengcheng, WANG Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 1-10.
- [3] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 11-16.
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 11-16.
- [4] 李振坤, 田源, 董成明, 等. 考基于随机潮流的含电动汽车配电网内分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 60-66.
LI Zhenkun, TIAN Yuan, DONG Chengming, et al. Distributed generators programming in distribution network involving vehicle to grid based on probabilistic power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 60-66.
- [5] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 450-456.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun, et al. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 450-456.
- [6] 李慧玲, 白晓明, 谭闻, 等. 电动汽车与分布式发电入网的协调控制研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2018-2115.
LI Huiling, BAI Xiaoming, TAN Wen, et al. Coordination control for grid-connection of plug-in hybrid electric vehicles and distributed generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2018-2115.
- [7] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A

- prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [8] 刘青, 戚中译. 考虑空间运动特性的规模化电动汽车接入电网负荷预测模型[J]. 现代电力, 2015, 32(1): 76-82.
LIU Qing, QI Zhongyi. The load forecast model for power grid with the accessing of large-scale electric vehicles by considering spatial motion characteristics[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(1): 76-82.
- [9] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 914-921.
- [10] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3333.
ZENG Jun, XU Dongdong, LIU Junfeng, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid considering dynamic loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3325-3333.
- [11] 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.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristic[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 58-63.
- [12] 苏海峰, 胡梦锦, 梁志瑞. 基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 56-63.
SU Haifeng, HU Mengjin, LIANG Zhirui. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 56-63.
- [13] 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.
- [14] 唐念, 夏明超, 肖伟栋, 等. 考虑多种分布式电源及其随机特性的配电网多目标扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 45-52.
TANG Nian, XIA Mingchao, XIAO Weidong, et al. Influence mechanism of feeder links on total supply capability for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 45-52.
- [15] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [16] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 考虑环境成本和需求侧管理项目的电源规划模型[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2809-2814.
ZHANG Xiaohui, YAN Pengda, ZHONG Jiaqing, et al. Generation expansion planning model incorporating environment cost and demand side management programs[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2809-2814.
- [17] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [18] 何晨颖, 耿天翔, 许晓慧, 等. 利用电动汽车可调度容量辅助电网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 134-140.
HE Chenying, GENG Tianxiang, XU Xiaohui, et al. Research on grid frequency regulation using schedulable capacity of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 134-140.
- [19] 王辉, 文福栓, 辛建波. 电动汽车充放电特性及其对配电系统的影响分析[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 18-24.
WANG Hui, WEN Fushuan, XIN Jianbo. Charging and discharging characteristics of electric vehicles as well as their impacts on distribution systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 18-24.
- [20] 沈欣炜, 朱守真, 郑亮宏, 等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.
SHEN Xinwei, ZHU Shouzhen, ZHENG Jinghong, et al. Active distribution network planning-operation co-optimization considering the coordination of ESS and DG[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1913-1920.
- [21] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399.
SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multi-objective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.

收稿日期: 2016-08-29; 修回日期: 2016-12-08

作者简介:

管志成(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电运行与规划。E-mail: 1021731935@qq.com

(编辑 葛艳娜)