

计及电动汽车有序充电的智能配电网协调优化控制方法

刘志虹 盛万兴 杜松怀 苏娟 孙若男

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着高渗透率分布式电源与电动汽车的接入,智能配电网运行状态日趋复杂多变,呈现常态化的不确定性与波动性,对协调优化控制提出了更高的要求。针对分布式电源随机性出力制约其消纳与利用、电动汽车无序充电加剧尖峰负荷等问题,根据分布式电源出力与负荷预测结果,提出了一种计及电动汽车有序充电的智能配电网协调优化控制方法。该方法主要对响应分时电价的电动汽车的充电时间、充电顺序与充电位置进行动态优化,高效匹配分布式电源的随机性、波动性出力。综合考虑分布式电源消纳、负荷峰谷差与峰负荷、电动汽车用户的充电成本与充电满意度,构建了多目标协调优化控制模型,并采用粒子群-非支配排序遗传混合优化算法进行求解。算例分析结果表明,所提模型与方法能够有效减少 EV 用户充电成本、提升 EV 用户充电满意度、促进 DG 消纳、削峰填谷以及降低网损。

关键词: 智能配电网; 分布式电源消纳; 电动汽车; 有序充电; 协调优化控制

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0377-08

Coordinated Optimal Control Method for Smart Distribution Network Considering Orderly Charging of Electric Vehicles

LIU Zhihong SHENG Wanxing DU Songhuai SU Juan SUN Ruonan

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the scale access of distributed generations and electric vehicles, the operating state of smart distribution networks is becoming more and more complex and changeable, presenting normalized uncertainty and volatility, and puts forward higher requirements for coordinated optimal control methods. Aiming at the problems of distributed generation output randomness restricting its consumption and utilization, and the disordered charging of electric vehicles exacerbates peak loads, a coordinated optimal control method for smart distribution network considering orderly charging of electric vehicles was proposed, based on distributed generation output and load forecasting results. The method mainly dynamically optimized the charging time, charging sequence and charging position of electric vehicles that responded to the time-of-use electricity price to efficiently match the randomness and volatility of distributed generation output. A multi-objective optimal control model was established, which considered the consumption of distributed generation, peak and valley difference of load and peak load, charging cost and satisfaction degree of electric vehicle users. The hybrid optimization algorithm of particle swarm and non-dominated sorting genetic algorithm II was used to solve the model. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed model and method were verified by simulation results.

Key words: smart distribution network; distributed generation consumption; electric vehicles; orderly charging; coordinated optimal control

0 引言

随着国家对能源危机、环境保护、全球气候变化

等问题日益重视,开发利用可再生能源已成为中国乃至全球的普遍共识^[1-2]。近年来,可再生能源发电技术日益成熟,中国可再生能源发电并网迅猛发

展。同时,电动汽车(Electric vehicle, EV)因其节能环保、防治大气污染的优势被广泛研究与利用^[3-4]。大规模分布式电源(Distributed generation, DG)与EV的接入与应用是智能配电网可持续发展的必然趋势和未来重要特征^[5-8]。现阶段, DG 输出功率的间歇性、随机性、波动性特征,是制约其高渗透率消纳利用的瓶颈之一^[9]。大规模 EV 的随机并网与无序充电,会产生尖峰负荷,增加网络损耗^[10-11]。强波动的电源-强随机负荷使配电网呈现常态化的不确定性和波动性,对其安全可靠运行带来了巨大挑战,对智能配电网的协调优化控制提出了更高的要求。对于含高渗透率 DG 与 EV 的智能配电网,如果各元素不能实现有效的协同, DG 的主动消纳将面临严峻问题,从而影响到配电网运行的经济性,甚至导致配电网无法正常运行。因此,有必要探索含高渗透率 DG 与 EV 的智能配电网协调优化控制方法。

目前,国内外学者已经在含 DG 智能配电网协调优化控制方面进行了积极探讨。文献[12]提出基于最优潮流法的全局优化控制策略,以解决配电网对多个 DG 的协调控制,但没有考虑电力市场环境下 DG 与 EV 协同交互对配电网优化运行的作用;文献[13]建立了配电网系统与站级系统的 EV 与 DG 的协同有序控制模型,由于配电网实际运行状态复杂多变,该模型将预测的日配电网系统运行情况作为协同控制基准,会产生一定的控制误差,在实时调控方面有失灵活性,此外没有考虑 EV 用户等方面的经济效益;文献[14]基于微电网的 DG 与负荷的不平衡率,发布对应电价信息,通过 EV 参与微电网的调度,实现微电网中 DG 与 EV 的协调控制,但提出的动态电价调整策略实施难度较大,电价变化容易对用户用电行为造成影响,产生新的负荷尖峰和低谷。这些研究均较少涉及含高渗透率 DG 配电网环境下 EV 与 DG 的协同增效控制。此外,目前配电网优化运行的目标侧重于降低网损、减少成本、增加收益以及提升电网安全可靠运行水平,没有充分考虑高渗透率 DG 并网后的消纳与利用^[15-16]。文献[17]提出了 EV 优化调度模型以提升含高渗透率光伏发电并网型微网的光伏发电利用率,没有充分考虑 EV 用户的经济效益。在这种研究背景下, DG 与 EV 协调交互以促进高渗透 DG 消纳利用的智能配电网协调优化运行方法值得深入研究。

本文围绕高渗透率 DG、EV 接入的智能配电网优化运行需求,基于分时电价,提出计及 EV 有序充电的智能配电网协调优化控制方法,构建包含 DG

消纳、负荷峰谷差与峰负荷、EV 用户充电成本与充电满意度的多目标协调优化控制模型,并改进粒子群与遗传混合算法。最后,通过算例分析验证协调优化控制方法的正确性和有效性。

1 智能配电网协调优化控制研究思路

智能配电网协调优化控制是平衡间歇性 DG 功率波动的重要手段。在高渗透率 DG、EV 等柔性负荷并网条件下,智能配电网对协调优化运行方法的要求越来越高。根据 DG 最大消纳以及配电网供需平衡需求,计及 EV 有序充电的智能配电网协调优化控制研究思路如图 1 所示。

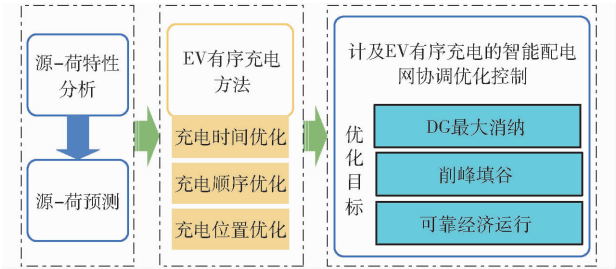


图 1 智能配电网协调优化控制研究思路框图

Fig. 1 Coordinated optimal control framework of smart distribution network

根据 DG 与负荷历史数据,分析 DG 出力特征以及用户用电规律,研究 DG 与负荷预测方法,为智能配电网协调优化控制提供基础数据。

根据源-荷预测结果,充分考虑 EV 有序充电对 DG 消纳的增效作用,提出动态响应分时电价的 EV 有序充电方法。该方法主要是基于分时电价,引导 EV 用户合理安排充电时间。当 EV 充电站内出现充电拥堵时,在满足 EV 用户充电需求的前提下,动态优化站内排队等待充电的 EV 充电时间、充电顺序以及充电位置。通过 EV 负荷平移手段削峰填谷、均衡负载,促进 DG 的就地完全消纳,提高 DG 出力与负荷曲线的匹配度,有效平抑 EV 接入给电网带来的负荷波动。同时达到降低 EV 用户充电成本、提高充电满意度的目的。动态响应分时电价的 EV 有序充电控制流程如图 2 所示。

构建含 DG 消纳、负荷峰谷差与峰负荷、EV 用户充电成本与充电满意度的多目标协调优化控制模型,融合遗传算法对粒子群标准算法进行改进,通过算例仿真验证模型与算法的正确性与有效性。

2 模型构建

2.1 EV 无序并网模型

EV 可分为两类,即规律性强的公共 EV 和随机性强的家用 EV,其中,家用 EV 约超过 95% 的时间

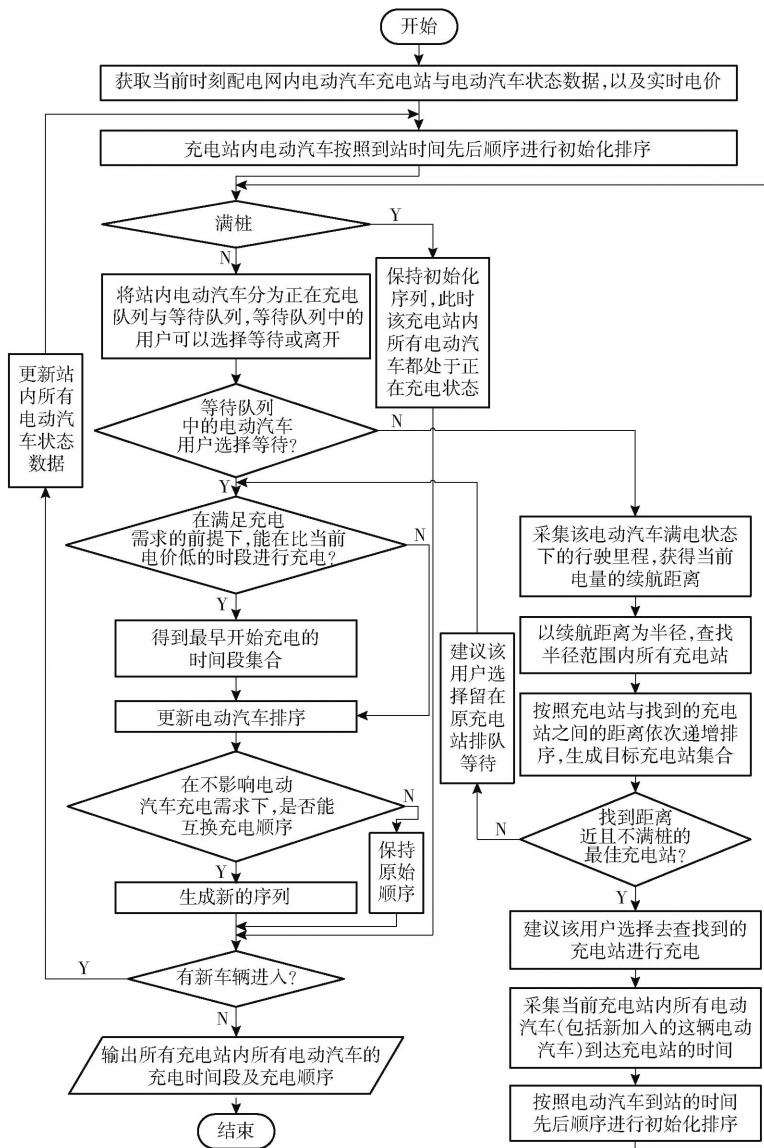


图2 动态响应分时电价的EV有序充电控制流程

Fig. 2 Flow chart for EVs orderly charging control with dynamic response time-of-use electricity price

处于停运状态,平均每天行驶时间不超过1 h,具有良好的可引导性。本文选择家用EV作为研究对象,当前家用EV并网多是随机无序的,根据大数定理^[18],将EV作为随机变量,当EV接入配电网的规模较大时,则EV充电时间近似服从正态分布,其概率密度函数可表示为

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_t} \exp\left(-\frac{(x-\mu_t)^2}{2\delta_t^2}\right) & (\mu_t - 12 < x \leq 24) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_t} \exp\left(-\frac{(x+24-\mu_t)^2}{2\delta_t^2}\right) & (0 < x \leq \mu_t - 12) \end{cases} \quad (1)$$

式中 x ——EV 充电时间

μ_t ——数学期望,取 21.75

δ_t ——标准差,取 1.83

2.2 智能配电网协调优化控制模型

2.2.1 多目标函数

(1) DG 最大化消纳

提高 DG 消纳水平,要求 DG 出力在最大功率状态,可表示为

$$f_1 = \min \sum_{d=1}^{N_{DG}} (P_{DG_d}^{\max} - P_{DG_d}) \quad (d \in \mathbf{N}) \quad (2)$$

式中 f_1 ——第 1 个目标函数

N_{DG} ——DG 的数量

d ——DG 的序号

$P_{DG_d}^{\max}$ ——第 d 个 DG 允许的最大出力

P_{DG_d} ——第 d 个 DG 实际并网的有功功率

(2) 负荷峰谷差率最小且峰负荷最小

为改善配电网负荷特性,以负荷峰谷差和峰负荷为优化目标,分别表示为

$$f_2 = \min \left(\frac{\max P'_L(t) - \min P'_L(t)}{\max P'_L(t)} \right) \tag{3}$$

$$f_3 = \min(\max P'_L(t)) \tag{4}$$

其中
$$P'_L(t) = P_L(t) + \sum_{i=1}^{N_{EV}} P_{i, EV}(t) \tag{5}$$

式中 $f_2、f_3$ ——第 2、3 个目标函数
 $P_L(t)$ —— t 时段常规负荷
 N_{EV} ——EV 的数量
 $P_{i, EV}(t)$ —— t 时段第 i 个 EV 的充电负荷
 $P'_L(t)$ ——叠加 EV 充电负荷后 t 时段的配电网总负荷
 $\max P'_L(t)、\min P'_L(t)$ ——配电网总负荷的最大值、最小值

(3) EV 用户的充电成本最低且对实际充电量的满意度最高

设充电站 k 当前 EV 数量为 n , 其中第 i 辆 EV 到达该充电站的时间为 $T_{i, arrive}$, 预计离开时间为 $T_{i, leave}$, 到站时当前电池荷电状态为 $SOC_{i, remain}$ (即 EV 当前电池电量与其电池总容量的比例), 预期离开时电池荷电状态为 $SOC_{i, expect}$, EV 的充电功率可假定为恒功率, 该车充电功率为 $P_{i, charge}$, 则该车满足充电需求所需时间 $T_{i, need}$ 为

$$\begin{cases} T_{i, need} = \frac{Q_{i, need}}{P_{i, charge} \eta} \\ T_{i, stay} = T_{i, leave} - T_{i, arrive} \\ Q_{i, need} = (SOC_{i, expect} - SOC_{i, remain}) Q_{i, total} \end{cases} \tag{6}$$

式中 $T_{i, stay}$ ——第 i 辆 EV 在充电站 k 预计停留时间
 $Q_{i, need}$ ——第 i 辆 EV 的充电需求量
 $Q_{i, total}$ ——第 i 辆 EV 的电池额定容量
 η ——充电站 k 内充电桩的充电效率因数, 一般情况下 $\eta \geq 90\%$, 本文假设充电站内所有充电桩的充电效率因数 η 一致, 取 98%

在满足用户充电需求的前提下, 基于分时电价, 充电站 k 内的 EV 有序充电, 该充电站内的第 i 辆 EV 实际开始充电时间 $T_{i, charge}$ 为

$$T_{i, charge} = \begin{cases} T_{i, arrive} & (T_{i, need} \geq T_{i, stay}) \\ \min S & \text{(其它)} \\ \min S + T_{j, need} & (T_{i, need} < T_{i, stay} \text{ 且 } T_{j, need} \geq T_{j, stay} \\ & \text{且 } j = i + 1 \text{ 且 } T_{j, stay} + T_{i, need} \leq T_{i, stay} \\ & \text{且 } T_{charging, need} + T_{i, need} + T_{j, need} \leq T_{i, leave}) \end{cases} \tag{7}$$

其中
$$T_{charging, need} = \sum_{i=1}^n T_{i, need} \tag{8}$$

式中 S ——充电成本最小的开始充电时间的合集

$$f_4 = \min \sum_{i=1}^n C_i \tag{9}$$

$$f_5 = \min \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_{i, satisfaction}} \tag{10}$$

其中
$$C_i = \sum_{t=T_s}^{T_s+T_{i, need}} P_{i, charge} p_t \quad (T_s \in S) \tag{11}$$

$$D_{i, satisfaction} = \frac{Q_{i, charge}}{Q_{i, need}} \times 100\% \tag{12}$$

式中 p_t —— t 时刻的充电电价
 T_s ——EV 有序充电优化的起始时间
 C_i ——第 i 辆电动车最小充电成本
 $f_4、f_5$ ——第 4、5 个目标函数
 $D_{i, satisfaction}$ ——第 i 辆 EV 用户对实际充电量的满意度
 $Q_{i, charge}$ ——第 i 辆 EV 的实际充电量

2.2.2 约束条件

节点潮流和功率平衡约束为

$$\begin{cases} P_i + P_{i, DG} - P_{i, L} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i + Q_{i, DG} - Q_{i, L} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \tag{13}$$

式中 $P_i、Q_i$ ——配电网节点 i 的有功、无功功率
 $P_{i, DG}、Q_{i, DG}$ ——DG 向节点 i 注入的有功、无功功率
 $P_{i, L}、Q_{i, L}$ ——节点 i 处所连接负荷 (包括 EV 充电负荷) 消耗的有功功率和无功功率
 $U_i、U_j$ ——节点 $i、j$ 的电压
 j ——所有与节点 i 直接相连的节点, $j \in i$
 $G_{ij}、B_{ij}$ ——节点导纳矩阵的实部和虚部
 θ_{ij} ——节点 i 和节点 j 之间的相角差

节点电压约束为

$$U_{i, min} \leq U_i \leq U_{i, max} \tag{14}$$

式中 $U_{i, min}、U_{i, max}$ ——配电网节点 i 的电压下限、上限

DG 出力约束为

$$P_{i, DG, min}(t) \leq P_{i, DG}(t) \leq P_{i, DG, max}(t) \tag{15}$$

式中 $P_{i, DG}(t)$ ——第 i 个 DG 在 t 时段实际输出的有功功率
 $P_{i, DG, min}(t)、P_{i, DG, max}(t)$ ——第 i 个 DG 在 t 时段最小、最大输出功率

EV 充电功率约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i, EV}(t) \leq a_{i, t}^{ch} P_{i, EV, max} \\ SOC_{i, EV, min} \leq SOC_{i, EV}(t) \leq SOC_{i, EV, max} \end{cases} \tag{16}$$

式中 $P_{i, EV}(t)$ ——第 i 个 EV 充电站 t 时刻充电功率

$P_{i, EV, \max}$ ——EV 电池最大允许充电功率

$a_{i, t}^{\text{ch}}$ ——EV 充电控制变量, 取 0 或 1, 1 表示充电, 0 表示不充电

$SOC_{i, EV}(t)$ ——EV 的当前荷电状态

$SOC_{i, EV, \min}$ 、 $SOC_{i, EV, \max}$ ——电池最小、最大剩余电量水平, 分别取 10% 和 90%

3 模型求解

3.1 混合优化算法

上述协调优化控制模型是混合非线性约束多目标优化模型, 控制变量包含 EV 负荷的充电时间段 T_{EV}^{ch} 、充电控制变量 a^{ch} 等离散变量, 以及 DG 出力 P_{DG} 等连续变量。

粒子群优化算法 (Particle swarm optimization, PSO) 在求解多目标寻优问题上, 具有算法容易实现、收敛速度较快等优点, 在配电网领域已得到广泛应用, 但粒子群算法存在早熟收敛、易陷于局部最优解的问题, 而非支配排序遗传算法 2 (Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) 在全局性最优解的搜索上有着独特的高效性, 但算法实现复杂、参数过多、收敛速度慢^[20-21]。可以看出, PSO 与 NSGA-II 的优劣势具有互补性, 将两者融合可提高全局寻优能力、加快收敛速度。本文基于粒子群标准算法, 对初始种群进行随机划分, 有利于保持种群的多样性, 防止全局较优的个体在整个种群的扩散, 降低了陷入局部最优解的概率, 并且引入 NSGA-II 算法中的非劣排序策略以及选择、交叉、变异算子, 对子种群中的粒子择优选取进行交叉、变异操作, 有利于加快收敛速度、扩大最优解的搜索空间、跳出局部最优的局限, 达到粒子群快速收敛于全局最优解的目的。PSO-NSGA-II 算法流程如图 3 所示。

3.2 多目标最优解决策

由于考虑时序因素, 故在进行动态重构过程中先前时段的重构结果会影响后续求解, 因而动态重构也是多阶段优化问题。但通过 PSO-NSGA-II 算法得到的多目标优化结果是 Pareto 解集, 而最终能作为调度方案实施的只有一个解, 故运行决策者需要进行事后评价从解集中选取最符合其需求的折中解, 作为当前阶段的最优解。本节将模糊集理论应用于 Pareto 解集的每个目标值来获取模糊隶属度, 通过隶属度反映决策者对该目标优化的满意程度, 再综合各目标函数的模糊隶属度求取最优解。

首先, 遍历 Pareto 解集, 针对每个目标函数选取其最大值 $f_k^{\max}$ 和最小值 $f_k^{\min}$; 其次, 计算 Pareto 解集中第 s 个解针对第 k 个目标的隶属度 μ_k^s , 即

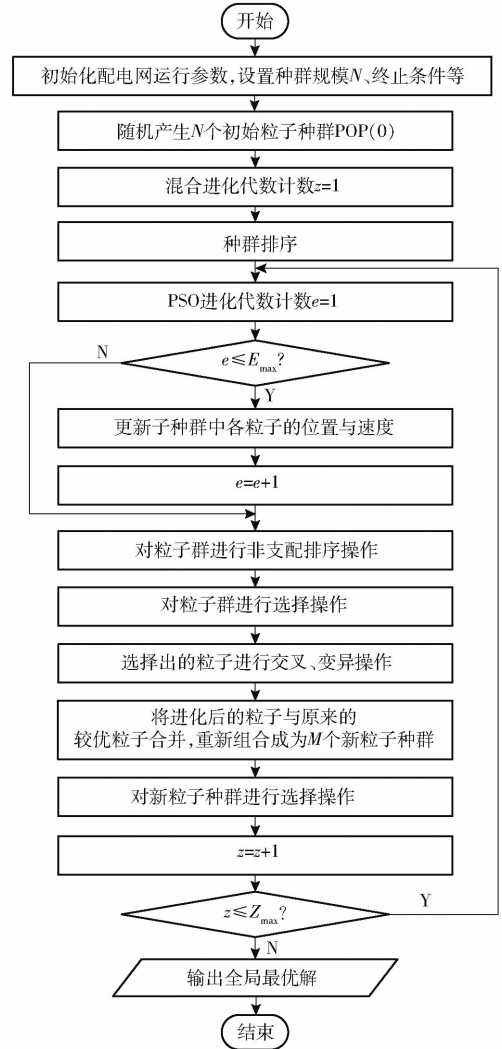


图 3 PSO-NSGA-II 流程图

Fig. 3 Flow chart of hybrid PSO-NSGA-II

$$\mu_k^s = \begin{cases} 1 & (f_k = f_k^{\min}) \\ \frac{f_k^{\max} - f_k}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} & (f_k^{\min} < f_k < f_k^{\max}) \\ 0 & (f_k = f_k^{\max}) \end{cases} \quad (17)$$

式中 f_k ——第 k 个目标函数

最后, 多目标的最优解可由各单个优化目标的隶属度值加权得到。考虑到 5 个目标函数等权重, 则 μ_k^s 所得的最大值对应 Pareto 解, 即该次优化的最优解为

$$\mu^s = \frac{\sum_{k=1}^{N_{\text{obj}}} \mu_k^s}{\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_{\text{obj}}} \mu_k^s} \quad (18)$$

式中 N_{obj} ——优化目标个数

N_s ——Pareto 解集中解的数目

4 算例分析

4.1 基础数据

在 IEEE 33 节点配电系统改进的基础上进行算

例验证,系统的结构拓扑图如图 4 所示,相关参数见文献[22]。DG 与柔性负荷配置参数见表 1,分时电价见表 2。

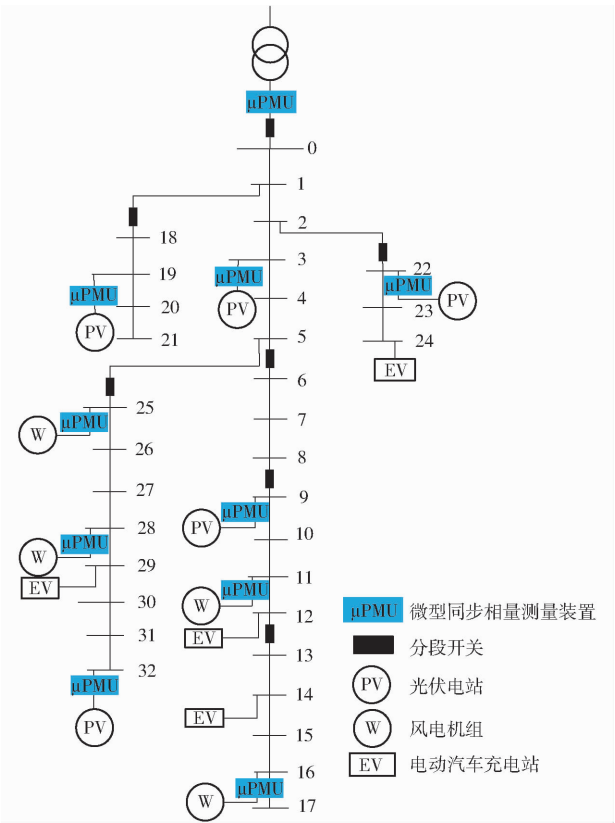


图 4 配电网络拓扑结构图
Fig. 4 Distribution network topology diagram

表 1 DG 与柔性负荷配置参数

连接节点	类型	额定容量/(MW·h)
3、9、19、22	光伏电站	3
11、16、25、28	风电机组	2
12、14、24、29	EV 充电站	1.4

表 2 分时电价

时段	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
高峰 08:30—11:30;16:00—17:00; 18:00—23:00	0.929 2
平段 07:00—08:30;11:30—16:00; 17:00—18:00	0.625 5
低谷 23:00—07:00	0.337 8

设定家用 EV 白天采用快充充电方式,充电功率为 40 kW,夜间采用常规充电方式,充电功率为 7.5 kW。本文所建立的目标函数综合考虑了电网公司与用户的多方面利益,结合配电网的实际运行需求,侧重于提升智能配电网对分布式电源的消纳利用能力,利用模糊隶属度获得最佳妥协解。

4.2 算例结果分析

基于微型 PMU 装置的规模应用,采用文献[23]

提出的 DG 与负荷预测方法,得到某地区 9 月局部电网的 DG 出力与负荷曲线,如图 5 所示。

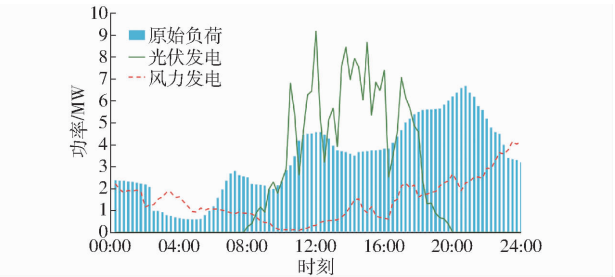


图 5 DG 出力与负荷曲线对比
Fig. 5 Comparison of DG output and load curves

由图 5 可以看出,该区域风力发电波动较大,由于该区域没有安装储能装置,夜间 02:30—05:45 时段,风电的消纳利用率低,存在弃风现象;白天风电与光伏共同出力,部分时间内 DG 出力远大于负荷需求,尤其在 13:15—14:45 时段 DG 的消纳利用率最低;负荷峰谷差也较大,负荷峰值远远超出 DG 最大出力。以上问题严重制约了该区域配电网的安全稳定经济运行水平。

对改进的 IEEE 33 节点配电网使用 PSO-NSGA-II 算法进行协调优化控制,PSO-NSGA-II 算法中的初始种群规模为 200,最大迭代次数取 1 000,学习因子 C_1 、 C_2 均取 1.49,交叉概率 P_c 取 0.56,变异概率 P_m 取 0.1。并且,在相同初始条件下(种群数量为 200),分别与 PSO、GA 的寻优实验进行比较,校验算法的精度与收敛性。以上算法的收敛标准均为:在多次迭代后如果最优粒子的适应度值不再变化即认为此时算法已经达到收敛。

为量化各目标函数的总体差异定义 5 个指标:日 DG 消纳利用率 E_1 (全天 DG 消纳利用率平均值)、日负荷峰谷差率 E_2 (全天负荷峰谷差率平均值)、日负荷峰值 E_3 (全天负荷峰值平均值)、日 EV 用户充电成本 E_4 (全天 EV 用户充电成本之和)、日 EV 用户满意度 E_5 (全天 EV 用户满意度平均值)。不同多目标优化算法分别进行了 50 次计算,其 5 个指标见表 3。

表 3 不同算法优化结果比较

Tab. 3 Comparison of different algorithm optimization results						
算法	E_1 / %	E_2 / %	E_3 / MW	E_4 / 万元	E_5 / %	总耗 时/s
PSO	87.32	76.15	7.30	3.38	55.72	637
GA	73.41	78.09	8.26	4.13	50.84	746
PSO-NSGA-II	89.96	73.88	6.70	3.29	56.39	807

由表 3 可以看出,PSO 算法总体性能较好,其计算过程最少、数据结构最简单,因此计算速度最快;

GA 算法计算精度均低于粒子群系列算法; PSO - NSGA - II 算法的寻优能力最强, 优化效果较好。

综合目标函数最小的 PSO - NSGA - II 算法寻优结果, 如图 6 所示。

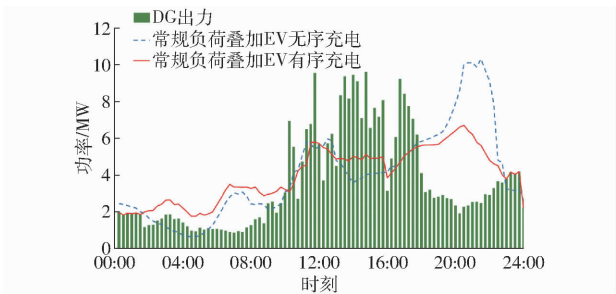


图 6 控制方案对比

Fig. 6 Comparison of control soultion

本文将 EV 有序充电负荷与无序充电负荷分别与常规负荷叠加, 得到协调优化控制前后的负荷曲线。由图 6 可知, EV 无序充电, 主要集中在傍晚时段, 与常规负荷高峰时段重叠, 产生了尖峰负荷, 进一步加剧了负荷峰谷差, 对配电网的安全稳定运行造成了影响。

响应分时电价的 EV 充电负荷, 经过协调优化控制, 有效地平移到夜间谷电价时段进行充电, 与 DG 出力特征匹配度较高, 负荷峰值显著减小, 负荷曲线的峰谷差也有所降低, 协调优化控制后的负荷曲线较原始负荷曲线更加平滑均衡, 有效平抑了 DG 波动性出力对负荷需求的影响, 实现了提高 DG 消纳利用率、优化负荷曲线、降低用户充电成本的目的。综上可以证明, 本文提出的计及 EV 有序充电的智能配电网协调优化控方法有效可行。

5 结论

(1) 提出了一种响应分时电价的 EV 有序充电方法, 充分利用了 EV 充电负荷的调节能力, 通过动态优化 EV 的充电时间、充电顺序与充电位置, 实现了 EV 充电负荷与 DG 的协调互动。

(2) 采用 IEEE 33 节点算例验证了本文所提模型与方法的可行性与有效性, 实现了减少 EV 用户充电成本、提升 EV 用户充电满意度、促进 DG 消纳、削峰填谷以及降损等技术要求。

参 考 文 献

[1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999 - 5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999 - 5008. (in Chinese)

[2] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699 - 3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699 - 3705. (in Chinese)

[3] 杜习超, 刘永民, 徐则诚, 等. 电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 124 - 130.
DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 124 - 130. (in Chinese)

[4] MEDIWATTHE C P, SMITH D B. Game-theoretic electric vehicle charging management resilient to non-ideal user behavior[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 19(11): 3486 - 3495.

[5] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 2015.

[6] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147 - 158.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147 - 158. (in Chinese)

[7] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2 - 11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2 - 11. (in Chinese)

[8] 姚良忠, 朱凌志, 周明, 等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 36 - 43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36 - 43. (in Chinese)

[9] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664 - 3673.
YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664 - 3673. (in Chinese)

- [10] 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 Systems, 2010, 25(1): 371–380.
- [11] SORTOMME E, HINDI M, MACPHERSON S, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198–205.
- [12] BORGHETT A, BOSETTI M, GRILLO S, et al. Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 313–322.
- [13] 杨冰, 王丽芳, 廖承林, 等. 电动汽车与分布式电源协同有序控制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 419–426. YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin, et al. Study of coordinated charging control for electric vehicles in correlation with distributed power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 419–426. (in Chinese)
- [14] 赵兴勇, 王帅, 吴新华, 等. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3732–3740. ZHAO Xingyong, WANG Shuai, WU Xinhua, et al. Coordinated control strategy research of micro-grid including distributed generation and electric vehicles[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3732–3740. (in Chinese)
- [15] LYSIKATOS I, HATZIARGYRIOU N. Fully distributed economic dispatch of distributed generators in active distribution networks considering losses[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(3): 627–636.
- [16] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17–23, 32. PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17–23, 32. (in Chinese)
- [17] 杨晓东, 张有兵, 蒋杨昌, 等. 微电网下考虑分布式电源消纳的电动汽车互动响应控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 390–400. YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, JIANG Yangchang, et al. Renewable energy accommodation-based strategy for electric vehicle considering dynamic interaction in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 390–400. (in Chinese)
- [18] LUO Z, HU Z, SONG Y, et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis-part II: a case study in China[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3556–3565.
- [19] 潘旭, 王金丽, 赵晓龙, 等. 智能配电网多维数据质量评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1375–1384. PAN Xu, WANG Jinli, ZHAO Xiaolong, et al. Multi dimensional data quality evaluation method for intelligent distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1375–1384. (in Chinese)
- [20] 刘志虹, 王金丽, 盛万兴, 等. 农村有源配电网电压无功优化控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 318–323, 346. LIU Zhihong, WANG Jinli, SHENG Wanxing, et al. Voltage reactive power optimization control method for rural distribution network with distributed generation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 318–323, 346. (in Chinese)
- [21] 王岩河, 肖志刚, 陈丽, 等. 基于改进遗传算法的农村配电网无功优化算法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 148–150, 147. WANG Yanhe, XIAO Zhigang, CHEN Li, et al. Reactive power optimization based on improved GA for rural distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 148–150, 147. (in Chinese)
- [22] 刘丽军, 笪超, 罗宁, 等. 基于出力曲线聚合与区间潮流典型场景耐受度评价的新能源发电规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4400–4410, 4721. LIU Lijun, DA Chao, LUO Ning, et al. New energy power generation planning method based on output curve aggregation and tolerance evaluation of interval tidal current typical scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4400–4410, 4721. (in Chinese)
- [23] 董雷, 刘梦夏, 陈乃仕, 等. 基于随机模型预测控制的分布式能源协调优化控制[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3219–3227. DONG Lei, LIU Mengxia, CHEN Naishi, et al. Coordinated optimal control of distributed energy based on stochastic model predictive control[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3219–3227. (in Chinese)