

基于新能源消纳/负荷平抑的电动汽车 能量管理策略

刘其辉¹, 余 培¹, 祝培鑫²

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网山东省电力公司 烟台供电公司, 山东 烟台 264001)

Electric vehicle energy management strategies for renewable energy consumption / load smoothing

LIU Qihui¹, YU Pei¹, ZHU Peixin²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Yantai 264001, China)

摘要:针对分布式新能源与电动汽车在配网中的有序能量管理进行了研究,分析了分布式风光的概率分布特点,基于概率方法建立了风光等效负荷模型;分析了基于随机出行模拟的电动汽车负荷建模,细化并完善了出行特征量的建立方法;构建了电动汽车三层能量管理模型,明确了网侧调度中心与充电服务商的职责与分工,并在能量管理策略中提出了紧耦合和松耦合两种工作模式。仿真结果表明,所提的能量管理模型能有效促进新能源消纳与负荷平抑,实现了配网侧新能源消纳/负荷平抑,并满足充电服务商接受指导与自主调控所辖区域内电动汽车的需求。

关键词:分布式新能源;电动汽车;负荷模型;能源消纳;负荷平抑

Abstract: The orderly energy management of distributed new energy and electric vehicle (EV) in distribution network is studied. The probability distribution of distributed wind and solar are analyzed, and the wind and solar equivalent load model is established by probabilistic method. The electric vehicle load model based on random travel simulation is analyzed, and the method of establishing the travel feature quantity is refined and improved. The three-layer energy management model of the EV is constructed, the duties and division of the network side dispatching center and the charging service provider are clarified, the energy management strategy of tight coupling and loose coupling is proposed. The simulation results show that the energy management model proposed could effectively promote new energy consumption and load stagnation, realize new energy consumption/load stagnation on the distribution network, and the guidance and self-regulation of EV in the area under the jurisdiction of the demand of the charging service provider could be accepted.

Key words: distributed new energy; EV; load model; energy consumption; load leveling

中图分类号: TM732; TK018 文献标志码: A

0 引言

发展坚强智能电网需要以新型能量管理策略为依托,对系统进行平滑控制以满足运行灵活性和可靠性的要求。作为灵活可控的可调度单元,电动汽车与随机性、间歇性强的可再生新能源形成互补。因此,利用有效控制策略对电动汽车充电和分布式发电进行协调管理有望大幅提升电力系统对风电、光伏发电等间歇性电源的消纳能力,保障系统安全可靠运行的同时满足自身经济安全等运行指标要求^[1]。

目前,国内外学者通过以下3种途径对风速进行模拟^[2]: Weibull模型,蒙特卡洛模型和灰色模型

预测法进行模拟;对光照的模拟途径也有2种:利用Bata分布模型模拟或利用可再生电力混合优化软件(HOMER)模拟^[3],利用上述模型得到风速和光照强度的数据后,可根据分布式发电基本原理得到太阳能光伏发电和风力发电的出力模型。为了能够与可再生新能源形成互补,针对不同类型和区域的电动汽车建立充电负荷模型,需要得到电动汽车在某一区域的充电负荷,进而研究电动汽车充电负荷对电网的影响或提出相应的控制策略。其中,文献[4]—文献[6]综合分析了科学合理地控制电动汽车充电功率对电网运行产生的积极作用;文献[7]中所提出的以系统损耗最小化为目标的有序充电模型是提高电网运行经济性的直接体现之一,文献[8]以电网损耗和充电电能等因素构成的综合充、用电成本最小化为目标函数构建了一种多约束的优化模型。

但是,目前的电动汽车能量管理策略分层结构多为上层电网调度和下层电力服务商两层,对于平抑负荷、电网线路约束等方面考虑较少,局限性较

收稿日期:2019-05-16;修回日期:2019-06-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904000);国家电网公司科技项目(SGJB0000TKJS1801242)

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB0904000); Science and Technology Project of State Grid Corporation (No.SGJB0000TKJS1801242)

大。因此,为了弥补现有电动汽车能量管理策略的不足,本文在建立风光等效出力波动带和电动汽车负荷模型的基础上,提出了电动汽车三层能量管理架构。通过网侧调度中心、充电服务商与底层充电桩集群的有效交互来实现促进新能源消纳与负荷平抑。提出了松耦合和紧耦合两种网侧调度中心与电动汽车充电服务商的工作模式,并进行了两种模式下的仿真。算例分析证明,该能量管理模型能有效的实现促进新能源消纳与负荷平抑。

1 风光出力模型与电动汽车负荷模型

1.1 等效分布式风光出力波动区域

根据 Weibull 分布,可得风速模拟表达式为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中: v 为风速; k 为形状参数; c 为尺度参数。

一定时间内光照强度的变化规律可近似利用 Beta 分布函数模拟

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中: r 和 $r_{\max}$ 分别为特定时间段内实际光照强度和最大光照强度; α 和 β 为形状参数。

假设某地区共有风电场、光伏电站数分别为 n 、 m ($i=1,2,3,\dots,n, j=1,2,3,\dots,m$), 每台风机额定功率为 P_i 且每个电池组件额定功率相等, 则可根据 Weibull 分布和 Beta 分布表达式分别求出风力发电和光伏发电有功出力的半不变量。利用半不变量的可加性可得一天内 24 个时间点的区域风光总出力变量的半不变量

$$\gamma_k = \sum_{i=1}^n \delta_{k,i} + \sum_{j=1}^m \varepsilon_{k,j} \quad (3)$$

式中: γ_k 为第 k 个小时的区域风光总出力随机变量的半不变量, $k=1,2,3,\dots,24$; $\delta_{k,i}$ 为风电场 i 第 k 个小时的有功出力随机变量的半不变量; $\varepsilon_{k,j}$ 为光伏电站 j 第 k 个小时的有功出力随机变量的半不变量。

计算出了每小时时间跨度内地区风光总有功出力的半不变量 γ_k , 还可求得区域风光总有功输出概率密度函数 $f_k(p)$ 、区域风光总有功出力随机变量的均值 μ_k 和标准差 σ_k , $k=1,2,3,\dots,24$ 。通常根据概率密度函数曲线可近似认为区域风光总发电总输出随机变量集中分布在区间 $(\mu_k - 3\sigma_k, \mu_k + 3\sigma_k)$ 内。因此, 如图 1 所示, 结合某地有功功率日负荷曲线, 可得叠加风光出力后该区域有功功率负荷曲线的变化情况。

由图 1 可知, 负荷曲线变为按一定规律波动的区域, 原始负荷曲线叠加风光出力后造成随机波动的负荷峰谷差难以直接求解。为解决这一问题, 将一种基于概率检验的方法用于对峰谷差进行评估。假设 t_1, t_2 时间点随机负荷变量 M_{t_1}, M_{t_2} 分别满足概率密度函数 $g_{t_1}(m), g_{t_2}(m)$, 且假设 t_2 点负荷均值

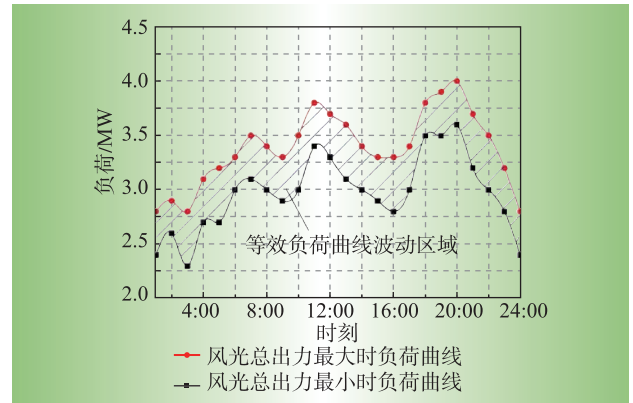


图1 等效风光负荷波动曲线

Fig. 1 Fluctuation curve of equivalent wind and solar load

较 t_1 点负荷均值偏大, 即 $\mu_{t_2} > \mu_{t_1}$, 则可以利用概率密度函数计算两个时间点负荷差率不大于某特定百分比概率 P 的概率为

$$P = (1 - \theta) M_{t_2} - M_{t_1} \leq 0 \quad (4)$$

即在给定 θ 的情况下, 根据概率 P 的大小即可比较不同曲线的峰谷差异, 峰谷差率小于或等于某个特定值 θ 的概率越大, 说明峰谷差越小, 负荷曲线就越趋于平坦。

1.2 基于出行随机模拟的电动汽车负荷模型

出行随机模拟概念来自于交通领域, 表示将多个出行目的地连接, 可以表征电动汽车的出行特征, 每一次的电动汽车出行的起点与终点都由概率分布决定。为了定义电动汽车行驶过程中的预期行程, 本文以 SOC 作为电动汽车电池的荷电量, 设置用户心理最高 SOC ($SOC_{\max}$) 作为电动汽车首次出行的起始 SOC , 心理最低 SOC ($SOC_{\min}$) 作为电动汽车需要充电的下限 SOC , 当电动汽车电量到达此阈值时必须进行充电。在出行模拟过程中的任意时刻, SOC 介于这两值之间。

如图 2 为典型的以任意区域为始末点的出行模拟。一个完整的随机模拟电动车出行过程应包含以下要素: 在首次出发前, 需模拟出行时刻、出行次数、 SOC ; 在行程中, 需模拟行驶里程和行驶时间; 在每次路程的终点, 需确定电动车的停车时长、充电时长、电动汽车停车数。

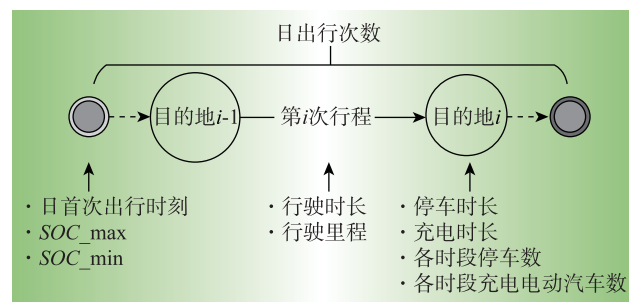


图2 基于出行随机模拟的出行要素

Fig. 2 Traveling elements based on random simulation

基于出行地点的相似特性, 本文将电动汽车的出行区域分为 4 类^[9]; 分别统计工作日和周末中基于

不同起点随时间段变化的车辆目的转移频率。考虑到电动汽车行驶时段行为特征,以4h为一时间段建立概率转移矩阵,即一天从0点起共有6个时间段的概率转移矩阵

$$P_T = \begin{bmatrix} p_{T,1,1} & \cdots & p_{T,1,4} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{T,4,1} & \cdots & p_{T,4,4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} 0 \leq p_{T,k,l} \leq 1 \\ \sum_{l=1}^4 p_{T,k,l} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为时间; k 和 l 为不同区域编号, k 和 l 取1,2,3,4。

运用蒙特卡洛法随机模拟抽取特征量的随机数,进行电动汽车停放行为的模拟,进而得到区域的充电负荷曲线,流程图如图3所示。

对所有车辆模拟结束后,可得到不同区域的停放特性,即区域停车数量 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 。

基于以上模拟,可得到不同区域充电电动汽车数随时间的变化曲线,记为 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 。结合相应电动车快慢充电功率即可得到该区域的充电负荷曲线, $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$, $P_i = P_{i,s} N_s + P_{i,f} N_f$, $P_{i,s}$ 与 $P_{i,f}$ 为慢充与快充功率, N_s 与 N_f 为对应时段内的快充与慢充车的数量。

2 电动汽车能量管理架构及电网侧双模式能量管理策略

2.1 电动汽车三层能量管理架构

本文提出一种具有良好适应性的电动汽车三层控制架构。EV需求状态信息按照“自下而上”方式进行采集:区域的单个充电站(μ -EMS)负责获取充电站内EV的状态信息和用户的充电行为调整意愿,并上报区域调度(A-EMS);A-EMS汇集每一个 μ -EMS的需求状态边界信息向调度中心上报,上层调度中心根据A-EMS上发的该区域具体电动车负荷情况和自身新能源消纳与平抑负荷的需求按照“自上而下”的方式下达给A-EMS指导功率或电价。在电动汽车三层架构中, μ -EMS与A-EMS的分配与传统两层结构中底层根据最小购电费用或峰谷最优指标进行控制分配相似,而调度中心与A-EMS交互方式发生改变,本文着重建立A-EMS与配网侧的交互模型。

2.2 电动汽车三层能量管理架构工作模式

在调度中心与A-EMS的交互中,存在电能交易与直接调度两种工作模式。电能交易是指调度中心通过收集A-EMS上传的区域边界信息,整合自己的负荷峰谷平抑需求与新能源消纳需求,向A-EMS下达多阶指导电价。该多阶电价是服务商从电网购电的价格,以引导电动汽车充电服务商在向下层分配功率时满足网侧需求。这种模式下,网侧调度中

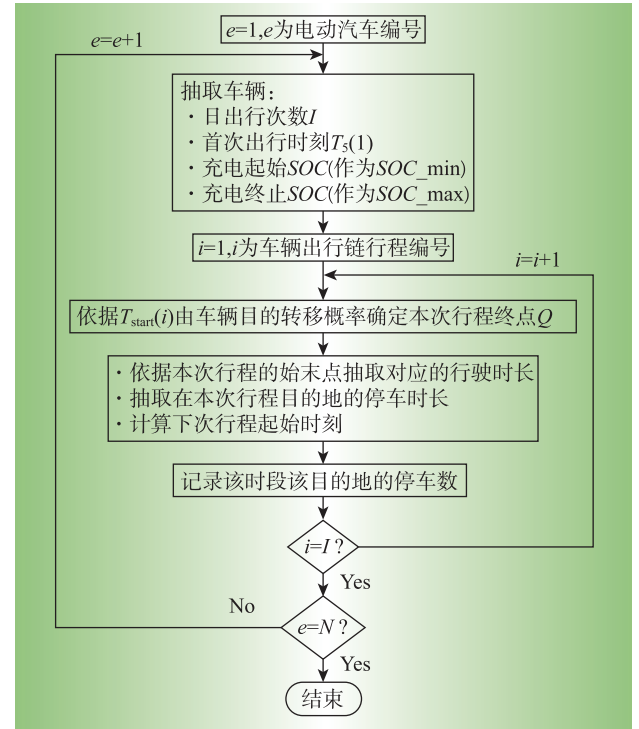


图3 蒙特卡洛法模拟电动车出行流程图

Fig. 3 Flow chart of Monte Carlo simulation of electric vehicle travel

心与电动汽车充电服务商之间是一种“松耦合”的关系,即上层下达的电价指令对服务商只起引导作用,服务商可根据自身利益和充电桩集群实时情况从网侧购电并制定底层充电桩充电策略,这种模式称之为“松耦合模式”。

在直接调度模式下,电网根据自身消纳部分负荷、满足新能源出力等要求、或线路故障和线路检修等特殊状态下,网侧调度中心直接根据自身需求向A-EMS直接下发指导功率。此时A-EMS在根据自身实际情况分配 μ -EMS功率,尽可能满足网侧下发的指导功率总额。由于此时A-EMS自由度变小,松耦合方式下电网调度中心与电动汽车充电服务商的电价交互模式也不复存在,这种模式称之为“紧耦合模式”。两种工作模式可同时存在,网侧调度中心根据实际情况选择合适的模式,并提前通知下层A-EMS。

2.3 两种工作模式下的电网侧能量管理方法

2.3.1 紧耦合模式下的模型算法

模型可使用多目标算法进行求解和为保证网侧调度中心需求、充电服务商需求、底层充电桩集群的需求,使用多目标粒子算法进行求解。

为保证网侧安全经济运行,根据第1节中等效负荷曲线峰谷评价方法,寻找平抑负荷指标最优解

$$F_1 = \max \left[P \left(\frac{M_{l,p} - M_{l,v}}{M_{l,p}} \leq \theta \right) \right] \quad (7)$$

式中: $M_{l,p}$ 为可能成为峰的负荷随机变量; $M_{l,v}$ 为可能成为谷的随机变量。

同时,最大化新能源利用率

$$F_2 = \max \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_W} P_{W,j}^t + \sum_{k=1}^{N_V} P_{V,k}^t}{\sum_{j=1}^{N_W} P_{W,j,\max}^t + \sum_{k=1}^{N_V} P_{V,k,\max}^t} \right) \quad (8)$$

式中: $P_{W,j}^t$ 、 $P_{V,k}^t$ 分别为第 j 个风电接入节点 t 时间点出力、第 k 个光伏接入节点 t 时间点出力; N_W 、 N_V 为风电接入节点和光伏接入节点的总数量。

考虑全网有功功率的平衡,得到约束条件

$$P_S + \sum_{j=1}^{N_W} P_{W,j}^t + \sum_{k=1}^{N_V} P_{V,k}^t = P_L^t + \sum_{m=1}^{N_{EV}} P_m^t \quad (9)$$

式中: P_S 为配网从主网获得的功率; N_{EV} 为电动汽车接入节点总数量; P_L^t 、 P_m^t 为常规负荷 t 时刻总功率值、第 m 个电动汽车节点 t 时刻功率值,即为该节点出行随机模拟产生的在该时刻的功率。考虑节点功率方程约束条件

$$\begin{cases} P_i - P_{i,\text{load}} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{i,\text{load}} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (11)$$

式中: P_i 、 $P_{i,\text{load}}$ 、 $Q_{i,\text{load}}$ 分别为节点 i 电动汽车充电功率和有功、无功负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点导纳阵 i 行 j 列的实部与虚部、 i 与 j 节点电压相角差; $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 分别为节点最大电压约束、节点最小电压约束。

对任意的变压器、输电线路支路,流过该支路的功率不超过最大功率约束,得到约束条件

$$|V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij}| \leq P_{l,\max} \quad (12)$$

新能源风光出力满足上下界约束

$$P_{W,j,\min}^t \leq P_{W,j}^t \leq P_{W,j,\max}^t \quad (13)$$

$$P_{V,j,\min}^t \leq P_{V,j}^t \leq P_{V,j,\max}^t \quad (14)$$

A-EMS上传的功率 P_A 由式(15)和式(16)确定

$$P_A \geq \underline{P}_t = 0 \quad (15)$$

$$P_A \leq \overline{P}_t = \min \left(\sum_{t \in \tau_n} R_n, P_{\text{limit}} \right) \quad (16)$$

式中: $\underline{P}_t = 0$ 代表电动汽车总充电功率下限为 0; $\tau_n = [\tau_{\text{begin},n}, \tau_{\text{end},n}]$ 为第 n 辆车可充电时段; R_n 为电动汽车 n 最大充电功率; P_{limit} 为线路或变压器容量等因素限制的功率上限。

A-EMS上传的能量 E_A

$$E_A \geq \underline{E}_t = \sum_{\tau_{\text{end},n} \leq t} E_n^* \quad (17)$$

$$E_A \leq \overline{E}_t = \sum_{\tau_{\text{begin},n} \leq t} E_n^* \quad (18)$$

式中: E_n^* 为第 n 辆电动汽车所需的能量。下限含义为所有在 t 时刻已经完成充电的电动汽车所需总能量。汽车总充电能量的上限含义为在 t 时刻已经开始或完成充电的电动汽车所需总能量。

2.3.2 松耦合模式下的模型算法

该模式下,网侧调度中心不用下发指导功率,只需下发指导电价来指导充电服务商调控电动汽车负荷。建立阶梯电价 $f(t) = B_i$, 定义阶梯电价比即某一阶电价与最低阶电价 B_1 比值

$$\beta_i = \frac{B_i}{B_1} \quad (19)$$

式中: B_i 为不同阶电价, $i = 1, 2, \dots, 5$ 。当电动汽车进行充电时,车主对于行驶需求的迫切程度是不同的,电动汽车用户的响应比例 λ 的取值受阶梯电价的影响和时间因素制约。

将用户对电动汽车使用需求的迫切程度分为 T_A, T_B, T_C, T_D 4 个跨度相同的时间段。

$$T = \begin{cases} T_A & \tau_n \in [\tau_s, \tau_s + 1/4(\tau_e - \tau_s)) \\ T_B & \tau_n \in [\tau_s + 1/4(\tau_n - \tau_s), \tau_s + 1/2(\tau_e - \tau_s)) \\ T_C & \tau_n \in [\tau_s + 1/2(\tau_n - \tau_s), \tau_s + 3/4(\tau_e - \tau_s)) \\ T_D & \tau_n \in [\tau_s + 3/4(\tau_n - \tau_s), \tau_e) \end{cases} \quad (20)$$

式中: τ_n 为电动汽车当前充电时间; τ_s 、 τ_e 分别为充电开始与结束时间。

图4为考虑行驶需求时,用户对阶梯电价的响应曲线。

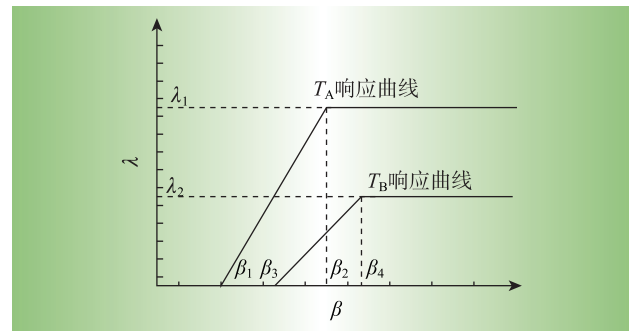


图4 不同需求迫切程度的响应曲线

Fig. 4 Response curve of different demand urgency

由图4可知, T_B 的需求程度大于 T_A , 迫切程度不同时,起始响应电价 $\beta_3 > \beta_1$ 。用户响应最大值 $\lambda_1 > \lambda_2$, 因为需求程度越低时,电动汽车用户对于价格的敏感程度更高,较小的电价变动就能引导电动汽车用户进行充电。

若特定区域电动汽车的保有量为 N , 对应任意一组 $\beta_i(t), T_i(\tau_n), \tau_{s,i}(t), \tau_{e,i}(t)$ 都将存在进行有序充电的电动汽车数量为 λN , 并且有 $(1 - \lambda)N$ 辆电动汽车因为没有响应到峰谷电价政策,选择继续进行无序充电行为。对风光等效负荷曲线波动区域峰谷指标进行优化,建立目标与约束函数为

$$\max P_{\theta}(\beta_i(t), T_i(\tau_n), \tau_{s,i}(t), \tau_{e,i}(t)) \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 1 \leq \beta_i(t) \leq \beta_{\text{limit}} \\ T = \begin{cases} T_A & \tau_n \in [\tau_s, \tau_s + 1/4(\tau_e - \tau_s)) \\ T_B & \tau_n \in [\tau_s + 1/4(\tau_n - \tau_s), \tau_s + 1/2(\tau_e - \tau_s)) \\ T_C & \tau_n \in [\tau_s + 1/2(\tau_n - \tau_s), \tau_s + 3/4(\tau_e - \tau_s)) \\ T_D & \tau_n \in [\tau_s + 3/4(\tau_n - \tau_s), \tau_e) \end{cases} \\ 0 \leq \tau_{s,i}(t) < \tau_{e,i}(t) \leq 96 \end{cases} \quad (22)$$

式中: β_{limit} 为阶梯电价比的上限。

以风光等效负荷曲线的峰谷平抑指标小于等于 θ 的概率 P 最大作为寻优目标, 对应任意一组阶梯电价比 $\beta_i(t)$ 、需求迫切程度 T 、充电时刻 τ_n 形成的负荷曲线进行寻优, 通过寻优后可以得到 P_θ 对应的一组自变量, 网侧在制定阶梯电价时要考虑销售利益不受其影响。得到

$$Q_c B_0 = \sum_{i=1}^5 Q_{c,i} B_i \quad (23)$$

式中: Q_c 、 $Q_{c,i}$ 分别为电动汽车总充电量、电动汽车在 i 阶电价时充电量; B_0 为未实行阶梯电价之前的常规电价。求解过程通过遗传算法, 寻找松耦合模式下目标的最优解。

3 算例分析

3.1 系统配置及参数

以 IEEE33 节点配电系统典型结构算例来验证电动汽车能量管理模型。该算例中, 基准电压为 12.66 kV, 三相功率基准值为 10 MVA。节点 1 作为平衡节点与无穷大电网相连。在 22、24、30 节点处接入 1 MW、1 MW、2 MW 的风光等效源。

3.2 优化结果分析

3.2.1 紧耦合能量管理模式下的仿真结果

根据 IEEE33 节点系统典型参数, 可以得到等效风光源出力波动曲线; 同时, 令 $\Delta t = 15 \text{ min}$, 故 1d 共 96 时间节点, 从 0 点开始为第一个时间节点。在 9、12、15 和 33 节点存在不同区域类型的电动汽车负荷, 各有 80、100、100、120 辆可供调度电动汽车, 设慢充/快充的功率为 7 kW/30 kW, 电池容量 32 kWh。

得到等效风光源出力波动范围与电动汽车负荷曲线后, 取等效曲线峰谷指标 $\theta = 25\%$, 得到目标函数 F_1 、 F_2 的 Pareto 前沿集如图 5 所示。

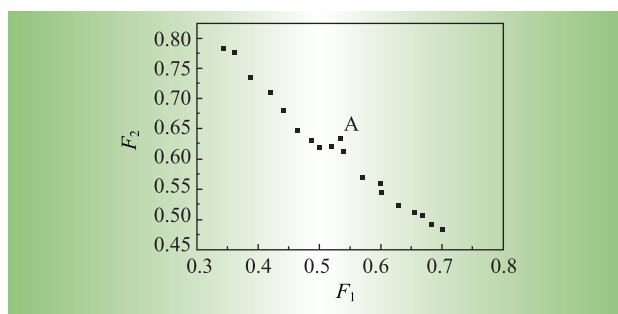


图5 F_1 、 F_2 的 Pareto 前沿集
Fig. 5 Pareto frontier set of F_1 、 F_2

为了使峰谷率尽量小, 本文取等效曲线峰谷指标 $\theta = 25\%$, 计算目标函数 F_1 、 F_2 的 Pareto 前沿集, 根据具体时刻网侧调度需求, 当 $\max P_\theta = 0.535$ 时, 将 A(0.535, 0.635) 点作为调度运行工作点。A 工作点所对应的调度后风光等效出力曲线如图 6 所示。

由于夜间可调度电动汽车较多, 所以在夜间时

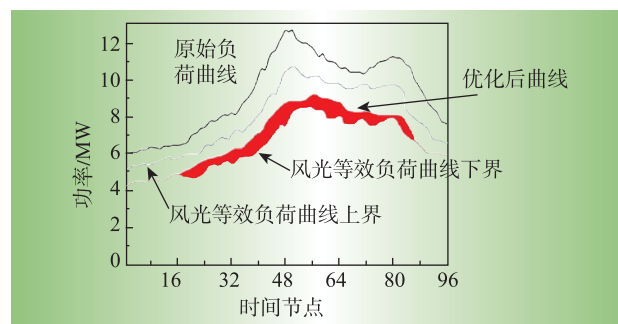


图6 A 运行点对应的风光等效负荷曲线

Fig. 6 Equivalent load curve of wind and solar of point A

刻新能源出力可全部被电动汽车消纳, 图 6 中体现在调度后曲线在 0—17、84—96 时间节点调度后曲线与下界重合。优化后曲线与风光等效负荷曲线下界之间的差值等于 t 时刻风光源最大可出力与实际出力的差值, 红色面积即为一天中风光源最大可输出能量与实际输出能量的差值。在其余时段 A 工作点对应的等效出力曲线相较于波动带已平滑很多, 在保证分布式风电、光伏发电尽可能多发的同时大幅降低了系统运行的峰谷差。

选取典型电动汽车负荷节点 9, 其优化前后的负荷曲线如图 7 所示。

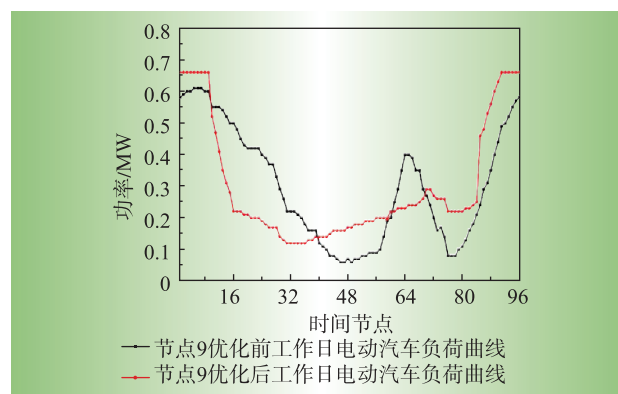


图7 节点9优化前后工作日电动汽车负荷曲线

Fig. 7 Workday EV load curve of point 9 before and after optimization

9 节点经优化后, 部分白天的充电负荷向夜晚转移, 这是因为优化前夜间基础负荷和电动汽车负荷不足以消纳分布式能源出力, 而在白天时段, 负荷曲线相较优化前更为平滑, 平抑了白天时段的负荷波动。

3.2.2 紧耦合模式下电动汽车渗透率的影响

随着电动汽车的发展, 电动汽车的渗透率也会越来越高, 假设 9、12、15、33 节的电动汽车数量增至原来的 1.5 倍, 变为 120、150、150、180 辆。此时经上述优化过程后的风光等效出力曲线如图 8 所示。

由图 8 可见, 电动汽车数量增多, 使电动汽车汽车可供调度的功率增加, 同时时间范围也变得更加灵活, 图 8 中调度后曲线与下界重合的时间段变长, 表明经能量管理调度后有足够的电动车负荷去消纳这些时段的新能源出力, 同时非重合区域峰谷差进一步缩小, 电动汽车负荷的有效管理对平抑区域

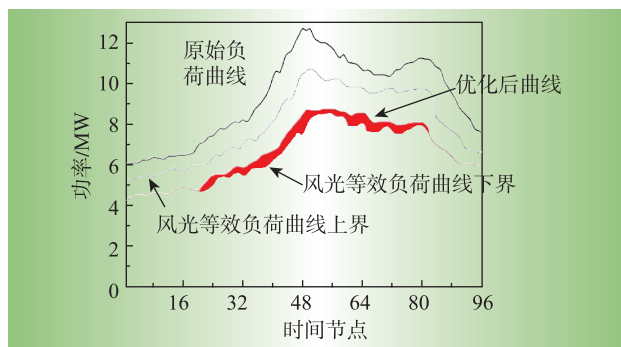


图8 电动汽车数量增多后风光等效负荷曲线

Fig. 8 Wind and solar equivalent load curve of more EV

负荷、促进新能源消纳效果显著。

3.2.3 松耦合能量管理模式下的阶梯电价仿真结果

在松耦合模式下,仍采用例中配网参数,取 $\theta=25\%$,此时 $\max P_{\theta}=0.7622$,迭代次数设为300。用户响应曲线设定如图9所示。

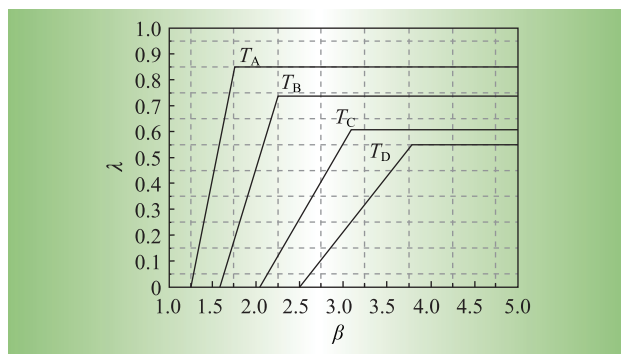


图9 用户响应参数示意图

Fig. 9 User response parameter diagram

在该用户响应曲线和配网工况下,取 $\beta_i \leq 3.8$ 较为合适,此区域内各 T_n 皆具有良好电动汽车用户响应。根据北京市电动汽车阶梯电价情况,设 $B_1=0.45$ 元, $\beta_1=1, \beta_2=1.7, \beta_3=2.4, \beta_4=3.1, \beta_5=3.8$,实际应用 B_i 可由网侧调度中心设定。得到 $\beta_i(t)$ 如图10所示。

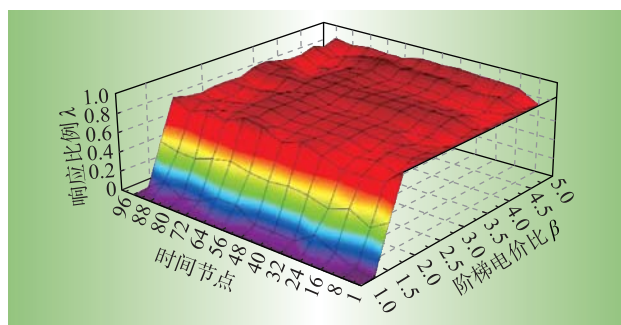


图10 阶梯电价比随时间变化图

Fig. 10 Step price ratio change with time

由图10可知,对应的最低两阶阶梯电价 B_1 和 B_2 主要存在于上午10:00前和晚上20:00后,夜间常规负荷处于谷时期,而新能源出力需要消纳,此时电价能很好地引导用户在此时段进行有序充电。最高阶电价主要存在于中午和晚上两个高峰时段,此时常规负荷处于峰时期,通过电价调控可以减少

此时接入充电的电动汽车数量, $\beta_i(t)$ 起到了良好的指导作用,此时 λ 对应的响应曲面如图10所示,可供调度中心实际选取。

4 结束语

分布式发电具有明显的间歇性与波动性大规模接入电网会带来冲击,电动汽车大规模接入电网随机充电也会加重电网的调度负担。本文建立了促进可再生能源消纳/平抑负荷的电动汽车三层能量管理模型,通过网侧调度中心与A-EMS的有效交互实现网侧和充电服务提供商不同需求的划分,建立了松耦合模式下发指导电价和紧耦合模式下发指导功率两种可并行的工作模式,算例分析证明,该能量管理模型能有效的实现促进新能源消纳与负荷平抑。D

参考文献:

- [1] 卫婧菲,刘其辉. 居民小区电动汽车光伏充电站三分段能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 249-255.
WEI Jingfei, LIU Qihui. Tri-period energy management strategy for PV-assisted EV charging station in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 249-255.
- [2] 丁明,吴伟,吴红斌,等. 风速概率分布参数预测及应用[J]. 电网技术, 2008, (14): 10-14.
DING Ming, WU Wei, WU Hongbin, et al. Research on forecasting of probabilistic distribution parameters of wind speed and its application[J]. Power System Technology, 2008, (14): 10-14.
- [3] PAULINA W, PETER L, JANI M, et al. Combining solar resource mapping and energy system integration methods for realistic valuation of urban solar energy potential[J]. Solar Energy, 2016, 135: 325-336.
- [4] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 802-810.
- [5] 高逸,吴耀武,宋新甫,等. 可再生能源配额政策对新能源发展影响分析及消纳策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1): 56-61.
GAO Yi, WU Yaowu, SONG Xinfu, et al. Analysis on the effect of renewable portfolio standards on renewable energy development and accommodation strategies study[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1): 56-61.
- [6] 马进劫,徐正安. 江苏电网“填谷”需求响应的探索与实践[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 50-52.
MA Jinjie, XU Zhengnan. The exploration and practice of “valley shaft” demand response in Jiangsu grid[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6): 50-52.

(下转第16页)