

基于随机匹配的构网型充电桩运行优化研究

葛俊, 杨铎炯, 张子昊, 俞靖一, 马溪原
(南方电网数字电网研究院有限公司, 广州 510700)

摘要: 针对并网型微电网内具有构网能力的电动汽车充电桩的运行问题, 文中研究了基于随机场景匹配的构网型充电桩运行优化方法, 用于为并网型微电网内构网型充电桩的双向功率分配运行优化提供决策支持。文中论述了含构网型充电桩的微电网系统结构及运行模式, 构建了考虑分布式电源、负荷和电动汽车随机性的二阶段随机运行优化模型, 并提出了基于场景树的随机匹配优化方法, 通过实验展示了所述方法的有效性。结果表明, 所述方法能够得到贴近实际系统运行逻辑的控制策略, 为构网型充电桩的功率分配提供有效支持。

关键词: 微电网; 充电桩; 场景树; 运行优化

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.03.007

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2026)03-0070-08

Research on operation optimization of grid-forming charging spot based on stochastic matching

GE Jun, YANG Duotong, ZHANG Zihao, YU Jingyi, MA Xiyuan

(Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510700, China)

Abstract: In response to the operation problem of electric vehicle charging spots with grid forming capabilities within grid-connected micro-grids, this paper studies an optimization method for the operation of grid-forming charging spots based on stochastic scenario matching, which provides decision support for the optimization of bi-directional power allocation operation of grid-forming charging spots in grid-connected micro-grids. This paper first discusses the structure and operation mode of a micro-grid system with grid-forming charging spots. Then, a two-stage stochastic operation optimization model considering the randomness of distributed power sources, loads, and electric vehicles is constructed, and a scenario tree based random matching optimization method is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through experiments. The results show that the proposed method can obtain a control strategy close to the actual system operation logic, providing effective support for the power allocation of grid-forming charging spots.

Keywords: micro-grid, charging spot, scenario tree, operation optimization

0 引言

随着我国“碳达峰”和“碳中和”战略的不断推进,为了在实现低碳和可持续发展的同时应对日益增长的电力需求和环境压力等问题,我国电力系统的结构已经发生了根本性的变化^[1-2]。在能源供给端,以火电等为代表的常规能源占比逐年降低,而以光伏、风电等为代表的可再生能源以大规模集中式或分布式的方式接入电力系统^[3-4],能源占比不断提高;在电力消费端,以电动汽车为代表的用户

终端负荷不断增多^[5-6]。上述高比例新能源和高比例电力电子设备的不断接入形成了当前新型电力系统的发展趋势。然而,新能源和电动汽车等的接入在促进低碳、可持续发展的同时,也给电力系统的安全稳定运行带来了挑战。一方面,新能源发电普遍存在间歇性和波动性等特点,使得电力系统需要频繁地应对新能源并网带来的电网电力波动问题^[7-8]。另一方面,电动汽车的大量使用进一步增加了电网负荷的波动以及稳定控制的难度,这主要来自于两方面:一方面是电动汽车本身具有时空不确定性,其电力消耗与人们的日常行为习惯紧密相

基金项目: 南方电网数字电网研究院有限公司科技项目 (210002KK52222017)

关,导致电动汽车负荷具有较强的随机性,另一方面则由于充电设备等大量电力电子功率设备被接入电网,导致电网稳定性下降^[9-10]。与此同时,电力消费端用户对供电电能质量的要求越来越高,这使得传统的电力系统运行调节方式逐渐难以满足要求。

针对当前新型电力系统中新能源和电动汽车接入导致电力电子设备渗透率增加,而现有设备普遍采用跟网(grid-following)控制导致系统惯性降低、强度变弱易引发稳定性的问题,构网(grid-forming)概念^[11-13]被提出并用于电力电子变流器的控制,构网型变流器采用类似于同步发电机的功率同步策略,无需要借助锁相环便可实现同步,结合储能元件等可为系统提供虚拟惯性和阻尼。构网技术有助于在提高电力供给端与消费端的匹配能力,进而增强整个电力系统的安全性、稳定性和运行效率。

现有针对构网型控制的研究多针对变流器的控制方法,且多处于方法论论证或小规模实验应用阶段,如文献[14]针对高风电占比下功率同步构网型双馈风电机组接入弱电网导致的稳定性问题,基于多环路带宽设计准则在有功环中引入微分前馈方法提高有功功率带宽,并通过在转速环输出中附加转矩补偿以降低 PS-DFIG (power synchronous grid-forming doubly-fed induction generator) 系统传动链低频振荡的风险;文献[15]针对新型电力系统中构网型非同步机电源和同步机电源之间的暂态失稳现象,基于构网型模块化多电平换流器(modular-multilevel-converter, MMC)提出了临界切除角和临界切除时间的解析计算方法,用于解决 MMC 故障期间注入电流幅值和相角、故障位置、同步机和 MMC 对负荷的供电占比等关键因素对系统暂态稳定的影响问题;文献[16]针对含剩余电量(state of charge, SOC)状态反馈的多蓄电池储能系统(energy storage system, ESS)控制问题,基于 ESS-SOC 的动力学模型提出了多 ESS 负荷频率下垂控制方法;文献[17]针对独立微电网风机和储能系统的控制问题,提出了基于变流器电压反馈的无缝切换控制方法。

上述对构网型控制的研究多针对风机变流器、光伏逆变器等电源型电力电子设备,缺乏对电动汽车充电桩等电力电子负荷的构网能力挖掘。电动汽车充电桩属于典型的电力电子设备,然而现有充电桩功能普遍单一,仅定位在对电动汽车简单的充

电和计费等功能,缺乏对电网的主动支撑和参与电力系统互动调控。针对上述问题,文章研究了并网型微电网内考虑分布式电源供给和电动汽车负荷随机性的供电和用电匹配问题,用于为构网型充电桩的功率分配运行优化提供决策支持。文中首先论述了含构网型充电桩的微电网系统结构,然后构建了考虑随机电源供给和随机电动汽车负荷的运行优化模型,最后通过实验展示了所述方法的有效性。

1 含构网型充电桩的微电网系统运行结构

文中所述含构网型充电桩的并网型微电网系统主要由光伏发电系统、蓄电池储能系统、电动汽车充电桩和其它配电网负荷组成。其中,光伏发电系统的额定容量为 1 000 kW,蓄电池的额定容量为 3 000 kWh,充电桩规格为直流最大功率 120 kW,系统总体分层架构^[18-22]如图 1 所示。

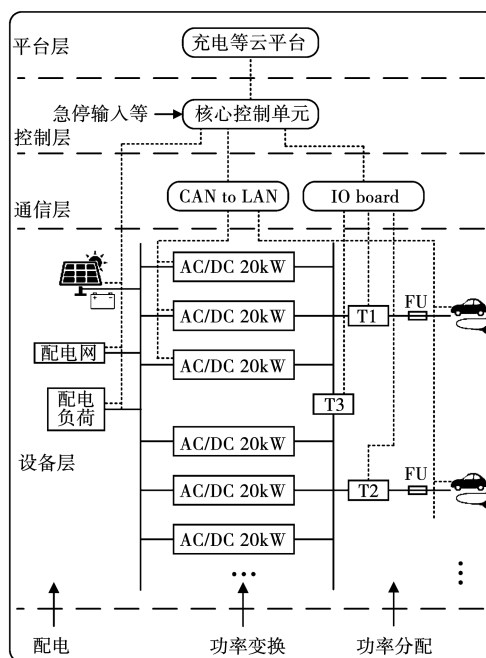


图 1 含构网型充电桩的微电网系统结构

Fig. 1 System structure of micro-grid with grid-forming charging spot

系统架构包含纵向和横向两个方向,纵向基于对系统控制组件的逻辑分层,包含设备层、通信层、控制层和平台层,设备层包含微电网内的光伏发电系统、配电网负荷、充电桩、电动汽车等各类发电、用电设备,通信层起着对设备层和控制层的信息进行转换衔接的功能,平台层则主要包括充电显示等后台显示功能;横向则包含了配电设备、功率变换

类设备(组件)、功率分配组件和电动汽车等,其中,配电接入层包含了设备接入的开关以及电能表设备,是充电桩和电网的交互接口,功率变换层由具有构网功能的电力电子设备组成,主要功能是实现双向功率的控制,可以将交流电整流成直流,用于电动汽车的充电,同时也可以将来自于电动汽车的直流电逆变成交流电,用于微电网内的统一调度,此外,充电桩的对外虚拟同步特性也是由功率变化层完成。功率分配层的核心是三个接触器,T1、T2和T3,其中,T1接触器和T2接触器分别与充电枪1和充电桩2相连,T3接触器用于实现功率的重新分配,当只有单枪接入的时候,可以通过T3闭合,将充电功率升级到120 kW,电动汽车部分则主要包括充电枪线、计量表计等车桩接口设备。

功率变换单元是实现电动汽车与电网双向互动的基础,文中功率变换单元的电气拓扑示意图如图2所示。每个AC/DC双向整流器包含前级AC/DC变换器和后级DC/DC变换器两级:前级AC/DC变换器主要实现AC电网和直流电压的转换,考虑电动汽车放电过程中,输出电流可控,且对电网不会造成二次污染,采用三相电压型桥式变流器作为前级变换器,桥臂由具备强制换向能力的开关组成;后级DC/DC变换器的主要功能为,在充电时将AC/DC整流后的直流电压调节为适合电动汽车电池充电要求的直流电压,实现高效充电,而在电动汽车放电反馈电网时,由于电动汽车电压较低,不能直接逆变并网,DC/DC变换器作为直流升压单元,将电动汽车电池电压抬升至合适的逆变直流电压,然后通过前级AC/DC变换器逆变并网。

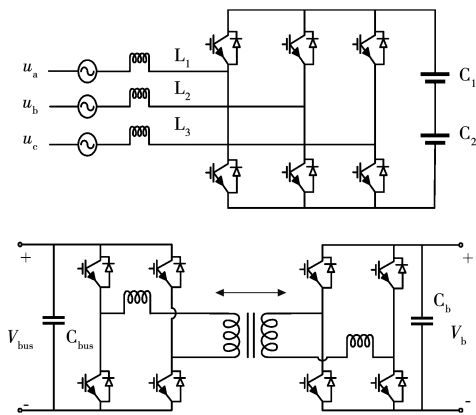


图 2 构网型功率变换单元电气结构示意图

Fig.2 Electrical structure schematic of grid-forming power converter unit

2 系统供需匹配运行模型

文中所述含构网型充电桩的微电网系统包含分布式光伏发电设备,光伏发电系统的输出功率主要受太阳辐射强度以及环境温度的影响,这两个因素也是导致光伏电源输出不确定性和波动性的主要原因,系统输出功率与太阳辐射强度以及环境温度的关系^[23-25]如式(1)所示:

$$\begin{cases} p_{pv} = v[i_{pv} - i_0(\exp(\frac{q(v + R_s i)}{akn_s T_e}) - 1) - (v + R_s i)/R_p] \\ i_{pv} = n_p [i_{pv,n} + K_i(T_e - T_n)] G_i / G_n \\ i_0 = \frac{N_p [I_{sc,n} + K_1(T_e - T_n)]}{\exp[(V_{oc,n} + K_v(T_e - T_n))/(aV_{t,n})] - 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_{pv} 、 i_{pv} 和 i_0 分别为光伏输出总功率、光生电流和等效二极管的逆饱和电流; T_e 和 T_n 分别为光伏电池板等效P-结的实际运行温度和标称运行温度; G_i 和 G_n 分别为实际环境的太阳辐射强度和标称的辐射强度。其余参数的意义可参考文献[23-25]。根据式(1),通过测量和预测分布式光伏发电系统的环境温度 T_e 和太阳辐射强度 G_i ,即可计算光伏发电的功率输出。

附属于光伏发电系统的蓄电池主要起着平抑光伏发电输出波动性的作用,其荷电状态在 $t+1$ 时刻与 t 时刻之间的动态关系和运行约束^[26-27]可表示为:

$$\begin{cases} s_{t+1} = s_t - (\rho_d p_{d,t} I_{d,t} - \rho_c p_{c,t} I_{c,t}) \Delta t / Q_n \\ p_{c,t} \in [P_{c,min}, P_{c,max}], \quad p_{d,t} \in [P_{d,min}, P_{d,max}] \\ I_{c,t} + I_{d,t} \leq 1, \quad I_{c,t}, I_{d,t} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: s_t 为荷电状态; Q_n 为蓄电池充满电时的电量; ρ_c 和 ρ_d 为充、放电系数; $p_{c,t}$ 和 $p_{d,t}$ 为充、放电功率; $I_{c,t}$ 和 $I_{d,t}$ 为蓄电池的充、放电决策,取值为0或1,取0表示蓄电池不动作,取1则表示进行相应地充电、放电,同时,蓄电池充电、放电时的功率大小受到约束。

作为可灵活参与微电网运行的组成单元,电动汽车在充电时视作微电网内的负荷,在V2G(vehicle to grid)模式放电时则视作微电网的电源,其运行状态的动态过程与储能蓄电池类似,可表示为:

$$\begin{cases} E_{t+1} = E_t - (\gamma_d p_{d,t}^{ev} k_{d,t} - \gamma_c p_{c,t}^{ev} k_{c,t}) \Delta t \\ p_{c,t}^{ev} \in [P_{c,min}, P_{c,max}], \quad p_{d,t}^{ev} \in [P_{d,min}, P_{d,max}] \\ k_{c,t} + k_{d,t} \leq 1, \quad k_{c,t}, k_{d,t} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_t 为电动汽车的电量; \square_c 和 \square_d 为充电、放电系数; $p_{c,t}^{ev}$ 和 $p_{d,t}^{ev}$ 为充电、放电功率; $k_{c,t}$ 和 $k_{d,t}$ 为充电、放电决策, 取值为 0 或 1, 0 表示不充、放电, 1 则表示进行充、放电, 功率大小受电动汽车自身条件约束。

电动汽车的充电、放电行为主要与用户的使用习惯相关, 文中采用基于正态分布类函数描述^[28-29]的用户行驶里程对电动汽车的起始充电、放电状态进行描述, 同时认为充电、放电近似为恒功率, 假设各电动汽车用户的行为模式相互独立, 那么 N 辆电动汽车在 t 时刻的充电、放电负荷可采用聚合的形式表示为:

$$p_{EV,t} = \sum_{i=1}^{N_c} p_{c,t,i}^{ev} - \sum_{j=1}^{N_d} p_{d,t,j}^{ev} \quad (4)$$

式中: $p_{EV,t}$ 为 N 辆电动汽车聚合的充电、放电功率; $p_{c,t,i}^{ev}$ 和 $p_{d,t,j}^{ev}$ 分别为第 i 辆和第 j 辆电动汽车的充电、放电功率; N_c 和 N_d 分别为充电、放电电动汽车数量。

除上述各运行约束外, 在 T 时段的运行过程中, 微电网需要在每个运行时段 $t(t=1, 2, \dots, T)$ 满足系统内部的功率平衡。

$$\begin{cases} p_{pv,t} + p_{b,t} + p_t = p_{l,t} + p_{EV,t} \\ p_{b,t} = \rho_d p_{d,t} I_{d,t} - \rho_c p_{c,t} I_{c,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $p_{l,t}$ 为微电网内配网的负荷; $p_{b,t}$ 为蓄电池充电、放电功率, 充电时视作微电网的负荷, 放电时则视作电源; $p_{l,t}$ 为当微电网内光伏发电、蓄电池及电动汽车 V2G 无法满足需求时, 从外部配网的购电量。

系统的运行目标是在满足前述各类约束的条件下, 使得运行成本最低, 进而为构网型充电桩的“双向”运行提供决策支持, 运行目标主要考虑以下两方面因素: 一方面, 系统内的分布式光伏发电、负荷、电动汽车均含有随机变量, 导致运行存在不确定因素, 另一方面, 微电网能够完全主动控制的设备为储能蓄电池, 对于分布式光伏发电系统、电动汽车多为被动式控制, 即微电网无法决定光伏发电的输出功率和电动汽车的充放电时间。基于上述因素, 系统的运行目标为最小化期望的买电成本。

$$\text{minc}(\tilde{p}_t) + E[c(p_t) - c(\tilde{p}_t)] \quad (6)$$

式中: $c(p_t)$ 表示 T 时段的购电成本。

$$c(p_t) = \sum_{i=1}^T p_i r_{b,i} \quad (7)$$

式(6)以最小化两阶段的购电成本为目标^[30-31]。其中, \tilde{p}_t 为基于 T 决策时段前预测值的系统各时段购电量; p_t 为实际运行中各决策 t 时段的购电量; $c(\tilde{p}_t)$ 为第一阶段基于 T 时段预测信息的购电成

本, 相应的决策变量为基于预测信息的决策; $c(p_t)$ 为第二阶段的购电成本, 即基于实际信息的购电成本, 相应的决策变量为基于实际信息的决策。由于两阶段的系统信息存在差异, 导致基于预测信息的决策和实际决策不同, 因此存在期望的追索成本 (recourse cost), 系统运行的目标即最小化预测成本和期望的追索成本, 两阶段以储能蓄电池的充放电决策为共同决策约束变量。该两阶段问题可描述如下:

$$\begin{cases} \text{minc}(\tilde{p}_t) + E[c(p_t) - c(\tilde{p}_t)] \\ \text{s. t.} \begin{cases} \text{第一阶段约束: } (\tilde{1}) \sim (\tilde{5}) \\ \text{第二阶段约束: } (1) \sim (5) \\ \text{共同约束: } I_{c,t}, I_{d,t} \\ t = 1, 2, \dots, T \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)所得到的决策 $p_{c,t}^{ev}$ 和 $p_{d,t}^{ev}$ 即为构网型充电桩的双向优化运行充、放电功率。

3 基于随机场景匹配的运行优化

式(6)是含有非线性约束的随机规划^[32]问题, 包括光伏发电输出功率、配网负荷、电动汽车等随机性约束和充放电决策等非线性约束。文中采用基于场景树^[33]的随机匹配方法对问题进行求解。前述问题的场景树构建过程如下:

1) 以 e_G 、 e_T 和 e_l 分别表示太阳辐射强度、环境温度以及配电网负荷的预测误差, 分别服从高斯分布 $e_G \sim N(\mu_G, \sigma_G)$ 、 $e_T \sim N(\mu_T, \sigma_T)$ 和 $e_l \sim N(\mu_l, \sigma_l)$;

2) 针对 t 时段, 通过随机采样的方式生成随机误差场景 s , 得到随机场景下的太阳辐射、温度和负荷 $G_{t,s}$ 、 $T_{t,s}$ 和 $p_{l,t,s}$;

3) 根据式(1)计算光伏系统的输出功率 $p_{pv,t,s}$, 进而可得到 t 时段的一个场景 $s_t = (p_{pv,t,s}, p_{l,t,s})$;

4) 从时段 $t+1$ 直至 T , 可得到 T 时段的一个场景 $s_T = (s_1, s_2, \dots, s_T)$, 重复上述过程, 可得到 S 个场景用于式(6)的求解。计算过程图 3 所示。

利用上述生成的 S 个场景, 式(8)可以表示为如下等价形式:

$$\begin{cases} \min c(\tilde{p}_t) + \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T [c_s(p_{s,t}) - c(\tilde{p}_t)] \\ \text{s. t.} \begin{cases} \text{第一阶段: } (\tilde{1}) \sim (\tilde{5}) \\ \text{第二阶段: } (1)_s \sim (5)_s \\ \text{共同约束: } I_{c,t}, I_{d,t} \\ t = 1, 2, \dots, T, s = 1, \dots, S \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

利用 Monte Carlo 采样^[29]对充电站的电动汽车

数量、状态进行估算,式(9)成为含 S 个场景的混合整数规划问题,进而可对原问题进行近似求解。

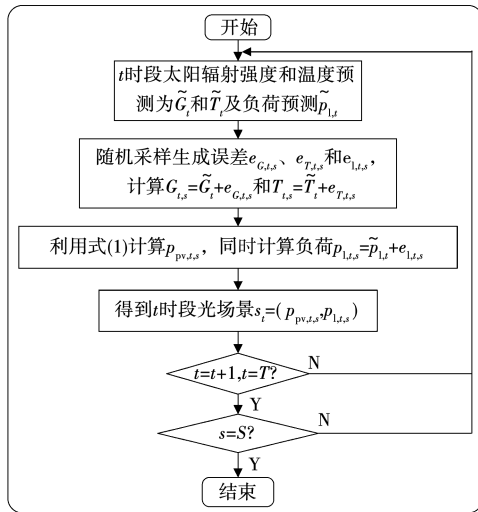


图 3 场景生成流程

Fig. 3 Flowchart of scenario generation

4 实验结果与分析

文中采用计算机仿真实验对所述基于随机匹配的构网型充电桩运行优化模型及求解方法的有效性进行验证,实验中对式(9)的求解采用 CPLEX。考虑 $T=24$ h 的系统运行优化问题,系统内分布式光伏发电系统和储能蓄电池相关参数设置如表 1 所示;系统内充电桩充电枪数量为 20;微电网从外部电网的买电价格如表 2 所示,单位为元/千瓦时,其中,8 点—12 点和 17 点—22 点为峰时电价时段,0 点—7 点和 23 点—24 点为谷时电价时段;光伏发电系统的太阳辐射强度和环境温度预测值采用某地 2023 年 5 月份的观测数据,预测误差服从以观测值为均值,以观测值的 10% 为方差的高斯分布;微电网系统内配网负荷采用某地的观测数据为预测值,预测误差服从以观测值为均值,以观测值的 5% 为方差的高斯分布,基于上述太阳辐射强度、环境温度和负荷,并采用文中所述场景方法所生成的光伏发电量样本和负荷样本示例如图 4 所示,图中所示为 50 个样本;系统内电动汽车总数为 30 辆,每辆电动汽车的电池额定容量为 60 kWh,充放电功率为 $[0, 20$ kW],充放效率为 0.96,电动汽车负荷采用随机采样的方式生成,电动汽车是否能够进行 V2G 由随机采样所生成的后续使用状态决定,随机采样得到的后续行驶里程状态决定了放电后电池容量的下限,通过随机采样所得到的充放电电动汽车数目如表 3 所示,其中,c 表示充电,d 表示放电。

表 1 光伏发电系统参数

Tab. 1 Parameters of photovoltaic (PV) generation system

PV 系统	
额定容量	1 000 kW
蓄电池容量	3 000 kWh
充、放电功率	$[0, 500$ kW]
充、放电系数	0.94
SOC、初值	$[0.2, 0.95]$ 、0.7

表 2 分时电价

Tab. 2 Time-of-use electricity price

时段	0:00—7:00, 23:00—24:00	8:00—12:00, 17:00—22:00	13:00—16:00
价格	0.390 8	0.837 4	0.558 3

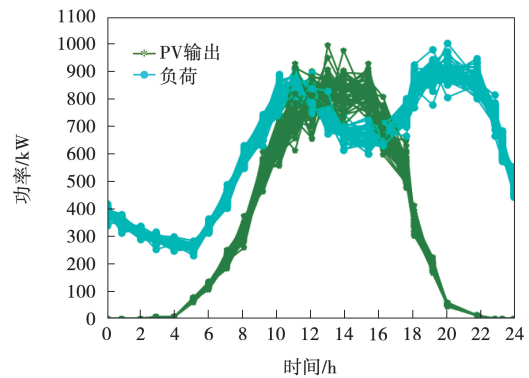


图 4 光伏输出功率样本和负荷样本

Fig. 4 PV output power and load samples

表 3 电动汽车充、放电数目

Tab. 3 Number of charging/discharging electric vehicles

时段	c/d	时段	c/d	时段	c/d	时段	c/d
1:00	16/8	7:00	11/3	13:00	7/3	19:00	15/2
2:00	15/10	8:00	11/2	14:00	8/2	20:00	12/3
3:00	17/16	9:00	3/2	15:00	11/2	21:00	10/5
4:00	15/18	10:00	2/4	16:00	9/5	22:00	11/15
5:00	19/12	11:00	4/1	17:00	13/4	23:00	13/11
6:00	14/6	12:00	5/1	18:00	15/1	24:00	18/9

实验中首先测试了场景样本数目对运行成本的影响,如图 5 所示,系统的运行成本随着样本数目的增多呈逐步下降的趋势,原因在于随着规划问题样本数目的增多,式(9)中基于样本的期望成本逐渐逼近式(8)中的实际期望成本,同时,随着样本

数目的增多,目标函数的波动逐渐减小,计算时间逐渐增加。

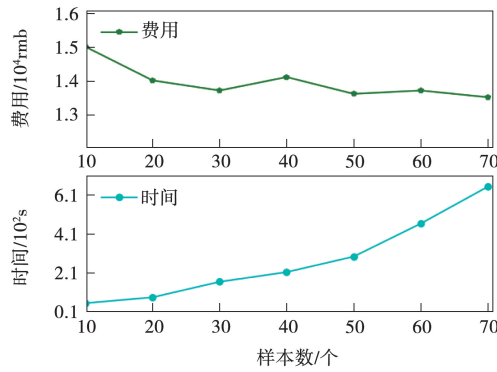


图 5 样本数目对运行成本的影响

Fig. 5 Influence of sample numbers on operation cost

由图 5 可知,样本数为 50 时,所得到的目标函数趋于稳定,图 6 所示为 $S = 50$ 时,两阶段共有决策变量储能蓄电池的充、放电动态运行过程。可知,蓄电池倾向于在 1:00—4:00 时段以及 12:00—15:00 进行充电,原因在于两个时段分别为配电网电价的谷时时段和光伏发电输出功率的峰值时段,而在上午和夜间则倾向于放电,原因在于这两个时段均为用电高峰和峰值电价时段,由此可知,所得到的储能蓄电池运行策略符合系统的实际运行需求。

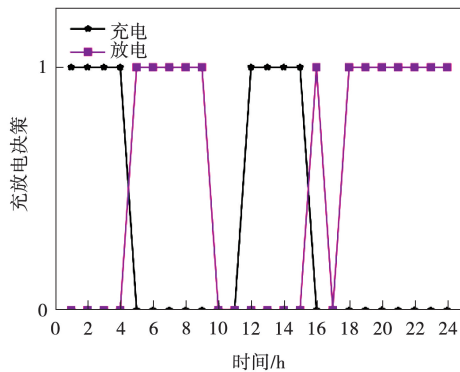


图 6 蓄电池充放电决策

Fig. 6 Charging/discharging strategy of storage battery

图 7 所示为基于上述样本数目 $S = 50$ 时的储能蓄电池控制策略和新的随机样本,所得到的电动汽车充、放电功率,该充、放电功率即为构网型充电桩基于微网随机匹配的近优功率分配策略。由图 7 可知,电动汽车充、放电的集中时段均为夜间和凌晨时段,这是因为电动汽车用户在该时段对电动汽车的使用率较低,电动汽车在此时间段更多地集中

于充电桩设施,因此为 V2G 的工作模式提供了可能,充电桩在此时段可充分利用电动汽车的 V2G 能力为微电网的运行提供构网支持,进而为微电网的高效、稳定运行提供保障。

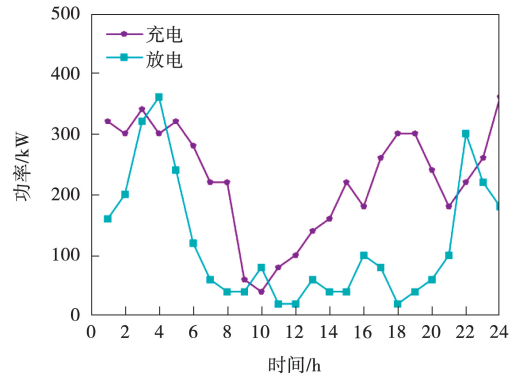


图 7 电动汽车充放电功率

Fig. 7 Charging/discharging power of electric vehicles

5 结 论

文章针对含构网型充电桩的微电网运行优化问题,研究了基于随机匹配的充电桩运行优化策略。构建了基于供用电随机匹配的二阶段随机规划模型用于描述含光伏发电、配电网负荷、电动汽车负荷等随机量的运行规划问题,同时提出了基于随机场景的匹配优化方法对问题进行求解。实验结果表明,所述方法能够得到接近实际系统运行逻辑的控制策略,为实际系统中构网型充电桩的功率分配和双向运行优化提供最优的控制策略支持,在提高分布式新能源和电动汽车等利用效率的同时降低对电网运行的影响。文中问题主要基于用户行为统计的模式对电动汽车的充放电进行建模,在后续研究中,可考虑融合用户行为激励模型,鼓励用户支持自有电动汽车的 V2G 工作模式,从而为充电桩的构网运行提供更好的支撑。

参 考 文 献

- [1] 鲁宗相, 黄瀚, 单葆国, 等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [2] 于东民, 王晓鹏, 孙钦斐, 等. 基于 VPP 碳流计算的多目标多时间尺度优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(1):

- 30-38.
YU Dongmin, WANG Xiaopeng, SUN Qinfei, et al. Multi-objective multi-timescale optimal scheduling based on VPP carbon flow calculation[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 30-38.
- [3] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Current status and development trend on capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 101-107.
- [4] 孟令哲, 周翔, 曾新华, 等. 基于特征构造和改进 PSO 算法的分布式光伏功率预测[J]. 电源技术, 2024, 48(2): 325-330.
MENG Lingzhe, ZHOU Xiang, ZENG Xinhua, et al. Distributed photovoltaic power prediction based on feature construction and improved PSO algorithm[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(2): 325-330.
- [5] 朱永胜, 杨振涛, 丁同奎, 等. 考虑用户动态充电需求的电动汽车充电站规划[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 82-90.
ZHU Yongsheng, YANG Zhentao, DING Tongkui, et al. Electric vehicle charging station planning considering users' dynamic charging demand[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2023, 44(2): 82-90.
- [6] 江晨, 杨俊杰, 邓正臣. 电动汽车和能量云在家庭微网中的协同调度研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 42-49.
JIANG Chen, YANG Junjie, DENG Zhengchen. Research on synergetic scheduling of electric vehicles and energy cloud in residential microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 42-49.
- [7] 孙晶琪, 王愿, 郭晓慧, 等. 考虑环境外部性和风光出力不确定性的虚拟电厂运行优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 50-59.
SUN Jingqi, WANG Yuan, GUO Xiaohui, et al. Optimal operation of virtual power plant considering environmental externality and output uncertainty of wind and photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 50-59.
- [8] 黄代雄, 汪志军, 袁俑斌, 等. 考虑多源协同的主动配电网故障恢复策略[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 210-215, 222.
HUANG Daixiong, WANG Zhijun, YUAN Yongbin, et al. Fault recovery strategy considering multi-source collaborative active distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 210-215, 222.
- [9] 范培潇, 杨军, 温裕鑫, 等. 基于可进化模型预测控制的含电动汽车多微电网智能发电控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 699-713.
FAN Peixiao, YANG Jun, WEN Yuxin, et al. A multi microgrid intelligent generation control strategy with electric vehicles based on evolutionary model predictive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 699-713.
- [10] 杨昕然, 吕林, 向月, 等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 102-108, 122.
YANG Xinran, LV Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under “EV-road-grid” coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-108, 122.
- [11] ROSSO R, WANG X, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends-a review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021(2): 93-109.
- [12] 张兴, 李旭, 田杰, 等. 构网型储能与调相机的暂态过电压抑制能力对比研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 88-95.
ZHANG Xing, LI Xu, TIAN Jie, et al. Comparison of transient overvoltage suppression capability of grid-forming converter and synchronous condenser[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 88-95.
- [13] 刘广义, 曹蕤, 卢阳, 等. 发射光谱法诊断空气电弧的稳态电子密度分布[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 144-150.
LIU Guangyi, CAO Rui, LU Yang, et al. Diagnosis of steady state electron density distribution in air arc by emission spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 144-150.
- [14] 谢震, 高翔, 张悬光, 等. 弱电网下功率同步构网型DFIG的阻尼分析及转矩振荡抑制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 29-38.
XIE Zhen, GAO Xiang, ZHANG Xuanguang, et al. Damping analysis and torque oscillation suppression of power synchronized grid-forming doubly-fed induction generator in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 29-38.
- [15] SHIM J W, VERBIC G, KIM H, et al. On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 166353-166364.
- [16] CHAUHAN P J, REDDY B D, BHANDARI S, et al. Battery energy storage for seamless transitions of wind generator in standalone microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 69-77.
- [17] 孙鹏, 赵晋斌, 潘超, 等. NPC型直挂储能变流器桥臂断路器故障下低电压穿越的容错控制[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 93-103.
SUN Peng, ZHAO Jinbin, PAN Chao, et al. Fault-tolerant control of low voltage ride-through under bridge arm open-circuit fault of NPC direct-mounted energy storage converter[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 93-103.
- [18] 张美霞, 王晓晴, 杨秀, 等. 考虑路网和用户满意度的集群电动汽车主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统

- 保护与控制, 2024, 52(3): 1-11.
- ZHANG Meixia, WANG Xiaoqing, YANG Xiu, et al. Stackelberg game optimization scheduling strategy for aggregated electric vehicles considering customer satisfaction and the road network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 1-11.
- [19] 张响, 段俊东, 康博阳. 考虑电动汽车灵活储能的微电网双重激励优化调度[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2556-2564.
- ZHANG Xiang, DUAN Jundong, KANG Boyang. Dual incentive optimal scheduling of microgrid considering flexible energy storage of electric vehicles[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(8): 2556-2564.
- [20] 李渊, 李钊, 宋建青, 等. 机式光-油综合能源系统设计研究[J]. 电源技术, 2024, 48(1): 168-173.
- LI Yuan, LI Chuan, SONG Jianqing, et al. Design and research of mobile light-oil integrated energy system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(1): 168-173.
- [21] 周卓, 芦翔, 刘海涛, 等. 含新能源发电的电动汽车充电站充电功率在线优化策略研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 101-107.
- ZHOU Zhuo, LU Xiang, LIU Haitao, et al. Research on on-line charging power optimization strategy for EV charging station with renewable energy generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 101-107.
- [22] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [23] ISHAQUE K, SALAM Z, SYAFARUDDIN. A comprehensive Matlab simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model[J]. Solar Energy, 2011, 85(9): 2217-2227.
- [24] 叶清泉, 倪佳华, 吴旭光, 等. 直流网光伏系统多时间尺度调度算法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 125-137.
- YE Qingquan, NI Jiahua, WU Xuguang, et al. Multi-timescale dispatching algorithm of PV systems in DC grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 125-137.
- [25] 曹文君, 张岩, 张安彬, 等. 弱电网条件下分布式光伏并网系统谐振机理及影响特性[J]. 电力建设, 2024, 45(3): 149-159.
- CAO Wenjun, ZHANG Yan, ZHANG Anbin, et al. Resonance mechanism and influence characteristics of distributed photovoltaic grid-connected system under weak grid conditions[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 149-159.
- [26] 吴圳宾, 夏祥武, 谭新, 等. 基于MPC的直接电流控制光伏最大功率点跟踪[J]. 电源技术, 2024, 48(2): 331-336.
- WU Zhenbin, XIA Xiangwu, TAN Xin, et al. Maximum power point tracking of PV system based on MPC-DCC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(2): 331-336.
- [27] TAYLOR M J, ALEXANDER A. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009: 1-6.
- [28] 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.
- [29] 胡治国, 李永杰, 张磊冲. 基于混合储能荷电状态的光伏直流微网系统能量分配策略[J]. 电源技术, 2024, 48(2): 337-344.
- HU Zhiguo, LI Yongjie, ZHANG Leichong. Energy allocation strategy for photovoltaic DC microgrid system based on hybrid energy storage state of charge[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(2): 337-344.
- [30] 王政, 韩方煜, 王立新, 等. 基于二阶段随机规划的不确定条件下过程优化研究[J]. 计算机与应用化学, 2005, 22(5): 392-396.
- WANG Zheng, HAN Fangyu, WANG Lixin, et al. Study on process optimization under uncertainty based on 2S-SLP[J]. Computers and Applied Chemistry, 2005, 22(5): 392-396.
- [31] 陈黎军, 潘熙, 黄茜, 等. 电网企业代理购电风险及其策略优化研究[J]. 广东电力, 2024, 37(1): 39-48.
- CHEN Lijun, PAN Xi, HUANG Qian, et al. Study on electricity purchasing agent service and strategy optimization of power grid enterprises[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(1): 39-48.
- [32] NALAN G, BERG R, REUBEN S. Simulation and optimization approaches to scenario tree generation[J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 2004, 28(7): 1291-1315.
- [33] HOLGER H, WERNER R. Scenario tree modeling for multistage stochastic programs[J]. Mathematical Programming, 2009, 118(2): 371-406.

收稿日期: 2024-04-09; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

葛俊(1991—),男,通信作者,博士,工程师,研究方向为新能源与微电网、电网数字化技术。E-mail:gej@csg.cn

杨铎炯(1988—),男,博士,正高级工程师,研究方向为新能源微网、嵌入式开发、PMU、STATCOM、电力系统建模。

张子昊(1996—),男,硕士,工程师,研究方向为新能源控制及预测、微电网、虚拟电厂。

俞靖一(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为新能源、新型电力系统数字化技术。

马溪原(1986—),男,博士,正高级工程师,研究方向为新能源预测与控制、碳监测、电力系统仿真与人工智能应用。

(编辑 田春雨)