面向可靠性提升的电动汽车充电基础设施协同优化规划

孟锦鹏1,向 月1,顾承红2,陈诗杰1,刘俊勇1

(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 巴斯大学 电子与电气工程系,英国 巴斯 BA2 7AY)

摘要:为了在电动汽车规模化发展的趋势下实现充电基础设施的科学配置,提出了一种"车-路-网"耦合系统的充电基础设施协同服务优化规划方法。以充电需求分析为基础,提出了一种电动汽车集群控制策略,用于模拟电网供电不足情况下弥补可靠性损失的控制模式;基于准序贯蒙特卡罗模拟方法,考虑用户对充电功率的选择偏好,设计了站内多类型充电设施协同服务模型;针对充电基础设施规划问题,提出了一种新的面向电网运行可靠性与电动汽车出行可靠性协同提升的多目标优化规划模型,并同时考虑投资成本和用户满意度的影响。通过对"车-路-网"耦合系统在多种场景与目标下进行仿真与分析,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:电动汽车:可靠性:准序贯蒙特卡罗模拟;充电基础设施规划:多类型充电设施

中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI: 10.16081/j.epae.202102019

0 引言

电动汽车充电桩的建设是国家开展"新型基础设施建设"(简称为"新基建")工作的核心领域之一,因此面临着重要的发展机遇[1]。在未来几年中,随着"新基建"政策的落地,公共充电桩的建设很有可能迎来井喷式增长,但是大量充电桩接入电网给用户带来便捷的同时,高速增长的充电负荷也给电网可靠性带来了新的挑战和威胁[2]。电动汽车既可以看作储能装置,也可以看作电网中的可控负荷,其具有更大的灵活性,但也可能导致电力系统的可靠性下降和电能质量问题,因此在大力发展充电基础设施的前提下,如何最大限度保证电网可靠性以及合理配置投资规划是亟需解决的问题。

电动汽车集群的充放电行为受其所在电网的供电能力和路网的车流量信息等因素影响,作为"车-路-网"耦合系统的中间环节,分析电动汽车的充放电过程需要综合考虑多方面的因素^[3]。电动汽车对耦合系统的影响主要由充放电过程中的时空不确定性引起,已有大量研究分析了电动汽车充放电控制技术对电网的影响,如:文献[4]在综合分析电网和交通网络的基础上,提出了一种时空模型用于评估大规模部署插电式电动汽车对城市电网的影响;文献[5]提出了一种基于多周期最优潮流框架的电力系统主动管理方案,实现了对发电削减量和电动汽车集群的统一智能控制;文献[6]提出了将电动汽车

收稿日期:2020-09-04;修回日期:2020-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807127);四川省科技计划项目(2019YFH0171,20SYSX0233)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51807127) and the Science and Technology Program of Sichuan Province (2019YFH0171, 20SYSX0233)

充电需求集成到基于投资成本模型中的解决方案,同步考虑电网和交通网之间的相互作用,确定了充电站的选址和容量;文献[7]考虑用车紧急度、节点电压偏差和实时电价3个因素,提出了一种基于模糊逻辑控制的分布式电动汽车充放电功率实时控制方法,用于维护电网的稳定运行。然而,上述研究主要集中在电动汽车充放电行为对电网可靠性的影响方面,而很少考虑电动汽车集群所导致的可靠性损失,甚至可能出现因电动汽车过度放电而无法完成预定行程的情况。

大量研究表明,电动汽车充电负荷的时空不确定性特征会对电网的可靠性产生不利的影响,如造成电力负荷波动、峰时供电不足等问题^[8]。目前,针对电网可靠性的研究通常利用序贯蒙特卡罗模拟方法仿真电网元件的运行状态,并用概率分布函数描述充电负荷特性。文献[9]提出了一种集成电动汽车全轨迹空间的充电负荷模型,以电动汽车全轨迹空间状态量为基础对电网可靠性进行评估;文献[10]考虑了电动汽车的开始充电时刻和行驶里程等随机因素,从电动汽车的电池类型、接入位置和汽车数量3个方面分别对系统的可靠性指标进行量化分析。然而,上述研究忽略了电动汽车可视为日周期充电负荷的特征,通过每日更新行驶计划可以极大地改善仿真效率,这克服了序贯蒙特卡罗模拟方法运算速度慢的缺点。

在现有关于充电基础设施规划方法的研究中,规划目标通常是最小化全社会年总成本、最小化电动汽车充电时间成本或最小化碳排放等[11]。然而,以上研究只针对某一特定方向进行优化,容易忽略其他规划因素的重要影响。关于多目标规划的研究,文献[12]考虑了建设总成本、网络损耗和交通满意度3个方面,但仍然缺乏同时考虑电网可靠性和



电动汽车出行可靠性的优化方法,基于可靠性提升的耦合系统充电设施规划方法也很少被提及。另外,随着充电桩技术的发展,目前充电服务市场中不同类型充电基础设施的参数区别很大,用户对充电功率产生了一定的差异性需求。文献[13]将电动汽车用户按照充电需求分类,并由不同类型充电设施满足需求,优化得到各类充电设施的规划方案。但关于不同类型的充电桩是否有协同服务的潜力,则很少有研究提及。

为了解决上述研究的不足,本文提出了基于可 靠性提升的包含多类型充电需求的城市充电基础设 施协同规划方法。首先,在"车-路-网"耦合系统模 型的基础上,按照充电功率将充电模式分类,并给出 电动汽车集群的类型划分;其次,引入充放电控制的 概念,以电动汽车的充放电控制策略作为耦合系统 的媒介,提出了供电不足情况下电动汽车集群的控 制策略;然后,引入电能供应不足期望、充电时间期 望、抛锚时间期望和总消耗时间期望指标对耦合系 统的可靠性进行定量计算,并基于准序贯蒙特卡罗 模拟方法对系统元件进行状态仿真,为面向可靠性 提升的充电基础设施选址定容问题提供数据支持; 为了实现站内不同功率充电设施的有机组合配置, 设计了多类型充电基础设施协同服务模型;最后,建 立了面向电网运行可靠性与电动汽车出行可靠性协 同提升的耦合系统多目标优化规划模型,综合考虑 电网可靠性指标、电动汽车出行可靠性指标、总投资 成本和充电满意度建立优化目标模型,并进行算例 仿真分析。

1 充电需求分析及类型划分

目前,我国主要的电动汽车类型可以分为私家车、出租车、公务车和公交车4类,其中由于公交车通常由交通运输部门统一管理,其行驶路线和充电计划比较固定,因此本文研究的重点主要集中于私家车、出租车、公务车3类。

电动汽车充电设施的规划问题首先需要确定规划区内电动汽车集群的规模及类型,并由此推演得到本年度的充电需求,为规划方案的制定提供数据支持。基于本年度规划区内的机动车保有量和电动汽车渗透率可以得到电动汽车的保有量,如式(1)所示。

$$N_{a,y} = N_{a,y-1} (1 + \gamma_a)$$
 (1)

其中, $a(a \in A)$ 为电动汽车类型,A为电动汽车类型集合;y为当前年度; $N_{a,y}$ 、 $N_{a,y-1}$ 分别为a类型电动汽车在第y年、第y-1年的保有量; γ_a 为a类型电动汽车的年增长率。

根据推演得到的各类型电动汽车的保有量,并与其他交通流信息(如电动汽车的行驶距离、电池容

量、充电类型决策变量等)相结合,可得到各类型充电桩的日均充电需求数据,如式(2)—(4)所示。

$$H_{k} = \sum_{a \in A} \sum_{\Delta t=1}^{r^{\text{day}}} D_{a, \Delta t}^{\text{day}} \frac{B_{a}}{\eta_{c} E_{a}} U_{a, \Delta t}^{\text{day}}$$
 (2)

$$H_K = \sum_{a \in A} \sum_{\Delta i=1}^{T^{\text{day}}} D_{a, \Delta i}^{\text{day}} \frac{B_a}{\eta_c E_a}$$
 (3)

$$0 \leq \sum_{a \in A} U_{a, \Delta t}^{\text{day}} \leq 1 \tag{4}$$

其中, $H_k(k \in K)$ 为 k 类型充电桩的日均充电需求,K 为快速充电、常速充电和慢速充电 3 类充电桩类型集合; Δt 为采样时间间隔; $T^{\rm day}$ 为采样日内采样时间间隔总数; $D^{\rm day}_{a,\Delta t}$ 为 a 类型电动汽车在 Δt 时间间隔内的行驶距离; B_a 为 a 类型电动汽车的电池容量; η_c 为 充电效率,本文设置为 90%; E_a 为 a 类型电动汽车的 续航里程; $U^{\rm day}_{a,\Delta t}$ 为 a 类型电动汽车的充电类型决策变量,取决于快速、常速或慢速充电模式的选择; $B_a I(\eta_c E_a)$ 表示电动汽车每行驶 1 km的耗电量; H_K 为 日均总充电需求。

根据充电桩电压和电流额定值的大小可以将电动汽车的充电模式分为快速充电、常速充电和慢速充电3类,充电桩的具体参数见附录A表A1^[13]。不同类型电动汽车的比例及其相关样本参数^[14]见附录A表A2。

2 电动汽车集群控制策略

电动汽车集群与电网的能量交互过程是"车-路-网"耦合系统的核心,本文提出一种充放电控制策略,用于模拟电网供电不足情况下电动汽车集群的控制模式,有助于维护耦合系统的可靠性。该控制策略包括充电控制和放电控制2种基本模式。

2.1 充电控制和放电控制

对于某一区域内保有量为 $N_{\rm EV}$ 的电动汽车集群而言,路网中的电动汽车可以采用集合 $S_{\rm EV}$ = $\left\{{\rm EV}_{\rm I}, {\rm EV}_{\rm 2}, \cdots, {\rm EV}_{N_{\rm EV}}\right\}$ 表示 $\left\{{\rm EV}_{\rm 1}, {\rm EV}_{\rm 2}, \cdots, {\rm EV}_{N_{\rm EV}}\right\}$ 表示 $\left\{{\rm EV}_{\rm 1}, {\rm EV}_{\rm 2}, \cdots, {\rm EV}_{N_{\rm EV}}\right\}$ 表示电动汽车电池的电量状态。在电网中充电的电动汽车集合用 $S_{\rm CHG}$ 表示,如式 $\left\{{\rm Chg}\right\}$ 所示。

$$S_{\text{CHG}} = \left\{ \text{EV}_i \middle| S_i^{\text{SOC}} < 100 \%, \text{EV}_i \in S_{\text{Cnet}} \right\}$$
 (5)

其中, S_{Cnet} 为连接到电网的电动汽车集合; S_i^{soc} 为 EV_i 的 SOC_{\circ}

充电控制的基本思想是将若干连接于电网充电的电动汽车切断能量供给,从而缓解供电不足的问题。在通常情况下,为了满足用户的出行需求,充电控制不应该应用于SOC过低的电动汽车。因此,引入阈值 δ ,,得到充电控制所能包含的最大控制范围内的电动汽车集合 $S_{\mathrm{CHG,max}}$,如式(6)所示。

$$S_{\text{CHG, max}} = \left\{ \text{EV}_i \middle| S_i^{\text{SOC}} > \delta_i, \text{EV}_i \in S_{\text{CHG}} \right\}$$
 (6)

设某时刻电网存在的电力缺额为 ΔP_{c} ,可根据式(7)计算得到。

$$\Delta P_{\rm G} = \max \left\{ P_{\rm L} + \sum_{\rm EV_i \in S_{\rm CHG}} P_{\rm C,i} + P_{\rm LOSS} - P_{\rm G}, 0 \right\}$$
 (7)

其中, P_c 为电网供电功率; P_L 为除电动汽车以外的总用电负荷; $P_{C,i}$ 为 EV_i 的充电功率; P_{LOSS} 为网损。

当 $\Delta P_{\rm G} > 0$ 时,表明供电不足,此时应实行充电控制策略以缓解电力供应不足。在最坏的情况下,当 $S_{\rm CHG,\,max}$ 中的电动汽车均已与电网断开连接时,充电控制达到最大响应功率 $P_{\rm CHG,\,max}$,如式(8)所示。

$$P_{\text{CHG, max}} = \sum_{\text{EV}_i \in S_{\text{CHC}}} P_{\text{C}, i}$$
 (8)

当功率缺额过大, $P_{\text{CHC,max}}$ 无法满足时,放电控制可作为其补充。放电控制不仅切断部分电动汽车的充电进程,而且使其向电网倒送电能,即车网互动V2G(Vehicle-to-Grid)技术。然而,由于储能技术的限制,放电控制将导致电动汽车电池性能下降,因此放电控制应作为充电控制的补充措施,并给予参与放电控制的用户相应的电池损耗补偿,补偿额度由分时峰谷电价和放电时长共同决定。放电控制最大控制范围内的电动汽车集合 $S_{\text{DSC,max}}$ 可以根据式(9)获得。

$$S_{\text{DSC, max}} = \left\{ \text{EV}_i \middle| S_i^{\text{SOC}} > \delta_t, \text{EV}_i \in S_{\text{Cnet}} \right\}$$
 (9)

放电控制的最大响应功率 $P_{DSC, max}$ 为:

$$P_{\text{DSC, max}} = \sum_{\text{EV.} \in S_{\text{DSC, max}}} P_{\text{D}, i} \tag{10}$$

其中, P_{n} ,为EV,的放电功率。

2.2 电动汽车集群的控制策略

电动汽车集群控制策略的思路如下:当出现供 电不足情况时,应首先实施能最大限度降低电动汽 车损耗、有效缓解供电不足的充电控制,如果充电控 制不能完全弥补电力缺额,需要进行放电控制;在极 端的情况下,如果充电控制和放电控制都无法弥补 功率缺额,则必须切断一部分电力负荷以维护电网 的安全。集群控制策略的具体步骤如下。

(1)如果 $0<\Delta P_{\rm G} \le P_{\rm CHG,max}$,则表示充电控制可以完全弥补电力缺额。一般而言,SOC较高的电动汽车应优先于SOC较低的电动汽车进行控制。因此,先按照SOC值的大小对 $S_{\rm CHG,max}$ 中的电动汽车进行降序排序,然后根据式(11)得到充电集合 $S_{\rm G}$ 。

$$S_{\rm C} = \left\{ \text{EV}_i \middle| i \le n_{\text{CHG}}, \text{EV}_i \in S_{\text{CHG, max}} \right\}$$
 (11)

其中, n_{CHG} 为充电集合中电动汽车的数量。

(2)如果 $P_{CHG, max}$ < $\Delta P_{G} \leq P_{CHG, max} + P_{DSG, max}$,则表示充电控制无法解决供电不足问题,此时应进行放电控制。与充电控制类似,对 $S_{DSG, max}$ 中的电动汽车按照 SOC 值的大小进行降序排序,然后根据式(12)得

到放电集合 S_n 。

$$S_{\mathrm{D}} = \left\{ \mathrm{EV}_{i} \middle| i \leq n_{\mathrm{DSC}}, \, \mathrm{EV}_{i} \in S_{\mathrm{DSC, \, max}} \right\}$$
 (12)

其中,n_{DSC}为放电集合中电动汽车的数量。

(3)在最恶劣的条件下,若 $\Delta P_{\rm G} > P_{\rm CHG, max} + P_{\rm DSC, max}$,表明充电集合和放电集合中的电动汽车都无法解决供电不足问题。此时切负荷是保证电力系统功率平衡的必然选择,切负荷量 $P_{\rm cul}$ 可表示为:

$$P_{\text{cut}} = \Delta P_{\text{G}} - P_{\text{CHG, max}} - P_{\text{DSC, max}}$$
 (13)

综上所述,参与充电和放电控制的电动汽车的功率 P_{cs} 可根据式(14)计算得到。

$$P_{\text{CS}} = \begin{cases} \eta \sum_{i=1}^{n_{\text{CHG}}} B_i (S_i^{\text{SOC}} - \delta_t) & 0 < \Delta P_{\text{G}} \leq P_{\text{CHG, max}} \\ \eta P_{\text{CHG, max}} + \eta \sum_{i=1}^{n_{\text{DSC}}} B_i (S_i^{\text{SOC}} - \delta_t) \\ P_{\text{CHG, max}} < \Delta P_{\text{G}} \leq P_{\text{CHG, max}} + P_{\text{DSC, max}} \\ \eta P_{\text{CHG, max}} + \eta P_{\text{DSC, max}} & \Delta P_{\text{G}} > P_{\text{CHG, max}} + P_{\text{DSC, max}} \end{cases}$$

$$(14)$$

其中, B_i 为 EV_i 的电池容量; η 为电动汽车的充放电效率。

3 耦合系统的可靠性计算方法

如第2节所述,采用充放电控制策略可以缓解紧急供电不足的情况,提升电力系统的可靠性,但是该控制策略不利于电动汽车电池的充电进程,且可能影响电动汽车用户计划中的未来行程。因此,有必要建立一种新的方法来定量计算"车-路-网"耦合系统的可靠性指标。本文所提耦合系统的可靠性计算方法兼顾了电网运行可靠性与电动汽车出行可靠性,能避免上述不利情况的发生。

3.1 电网运行可靠性计算

对于电网而言,采用传统的电能供应不足期望 LOEE(Loss Of Energy Expectation)量化其可靠性, 计算式为:

$$E_{\text{LOEE}} = \frac{\int_0^{T_{\text{MC}}} P_{\text{LC}, y} \, \mathrm{d}y}{T_{\text{MC}}}$$
 (15)

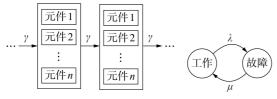
其中, E_{LOEE} 为电网的LOEE,单位为MW·h/a; T_{MC} 为蒙特卡罗模拟的基准时间,以年为单位进行测量; P_{LC} ,为第 γ 年的负荷削减量。

采用综合了序贯方法和非序贯方法优点的准序 贯蒙特卡罗模拟方法[16]实现耦合系统的可靠性仿真 过程。准序贯蒙特卡罗模拟方法既能模拟电力系统 的时序特征以及在时域上相互关联的电动汽车驾驶 行为,也能以工作日为周期对电动汽车的驾驶行为 进行周期性采样,保证计算精度的同时大幅提高了 仿真效率。

准序贯蒙特卡罗模拟方法的基础是多级非聚集



马尔可夫过程,其示意图见图1(a),表示了时间序列 中整体系统与单体元件的状态变化过程,图中γ为 状态变化率。该过程通过考虑一系列多级元件的状 态表示连续的时间序列,可以由此对任意时间断面 下的系统状态进行采样。双状态马尔可夫过程是一 种简化的多级非聚集马尔可夫过程,示意图见图 1(b),可用于对仅包含工作、故障2种元件状态的发 电机组状态空间进行建模,通过叠加元件状态即可 计算得到系统的发电容量。图中λ和μ分别为故障 率和修复率。



(a) 多级非聚集 马尔可夫过程

(b) 双状态马尔

图1 马尔可夫过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of Markov process

对发电单元在正常投运时的运行状态进行采 样,通过计算每台发电机组的状态转移概率0,可以 得到发电机组在各时段内的运行状态,如式(16)和 式(17)所示。

$$Q = 1 - e^{\lambda_g \Delta t} \approx \lambda_{\sigma} \Delta t \tag{16}$$

$$Q = 1 - e^{\lambda_g \Delta t} \approx \lambda_g \Delta t$$

$$S_{g,t} = \begin{cases} S_{g,t-1} & R_g \ge Q \\ 1 - S_{g,t-1} & R_g < Q \end{cases}$$

$$(16)$$

其中,若发电机组g正常运行,则 λ_s 为故障率,否则, λ_g 为修复率; R_g 为随机数, $R_g \in [0,1]$; $S_{g,t} \setminus S_{g,t-1}$ 分别 为时段t,t-1下发电机组g的运行状态。

3.2 电动汽车出行可靠性计算

对于电动汽车集群而言,由于参与充放电控制 策略会导致可靠性损失,为了保障用户的出行需求, 定义充电时间期望CTE(Charging Time Expectation) 指标,用于量化电动汽车出行可靠性水平,其表示电 动汽车寻找充电站花费的年累计期望时间,计算 式为:

$$T_{\text{CTE}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_{\text{CHG},i}} (\Delta D_{i,j,\text{CHG}} / v_i + T_{i,j,\text{CHG}})}{N_c T_{\text{MC}}}$$
(18)

其中, T_{CTE} 为电动汽车的CTE,单位为h/a; N_c 为寻 找充电站的电动汽车数量;N_{CHC,i}为EV_i寻找充电站 的总次数; $\Delta D_{i,i,CHG}$ 、 $T_{i,i,CHG}$ 分别为第j次寻找充电站 时 EV_i 的额外行驶距离、充电持续时间; v_i 为 EV_i 的行 驶速度。

定义抛锚时间期望ATE(Anchorage Time Expectation)指标为因故障而抛锚的电动汽车求救的 年累计期望时间,计算式为:

$$T_{\text{ATE}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{A}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{ANC},i}} (T_{i,j,\text{ANC}}/v_i + T_{i,j,\text{WAT}})}{N_{\text{A}}T_{\text{MC}}}$$
(19)

其中, T_{ATE} 为电动汽车的ATE,单位为h/a; N_a 为抛 锚的电动汽车数量; $N_{ANC,i}$ 为 EV_i 的总抛锚次数; $T_{i,i,ANC}$ 、 $T_{i,i,WAT}$ 分别为 EV_i 在第 j 次抛锚时救援到充电 站的持续时间、等待救援时间。

将TCTE与TATE相加可得到总消耗时间期望ETE (Extra Time Expectation)指标 T_{ETE}(单位为 h / a),如 式(20)所示。

$$T_{\text{ETE}} = T_{\text{CTE}} + T_{\text{ATE}} \tag{20}$$

另外,本文还设计了充电集合电量期望 CSEE (Charging Set Energy Expectation)指标 Ecser 和放电 集合电量期望DSEE(Discharging Set Energy Expectation)指标 E_{DSEE}(单位均为 MW·h/a),用于量化参 与充放电控制的电动汽车的电量期望值,计算式分 别为:

$$E_{\text{CSEE}} = \frac{\int_{0}^{T_{\text{MC}}} \sum_{\text{EV}_{i} \in S_{\text{C}, i}} P_{\text{C}, i, t} dt}{T_{\text{MC}}}$$

$$E_{\text{DSEE}} = \frac{\int_{0}^{T_{\text{MC}}} \sum_{\text{EV}_{i} \in S_{\text{D}, i}} P_{\text{D}, i, t} dt}{T_{\text{CC}}}$$
(21)

$$E_{\text{DSEE}} = \frac{\int_{0}^{T_{\text{MC}}} \sum_{\text{EV}_{i} \in S_{\text{D},t}} P_{\text{D},i,t} dt}{T_{\text{MC}}}$$
(22)

其中, $S_{C,t}$ 、 $S_{D,t}$ 分别为时段t的充电、放电集合; $P_{C,t,t}$ 、 $P_{D,i,t}$ 分别为 EV_i 在时段t的充电功率、放电功率。根 据所提耦合系统的可靠性计算方法,定量计算得到 电网的可靠性指标和电动汽车出行的可靠性指标, 为面向耦合系统可靠性提升的多目标优化规划模型 提供数据支持。

4 多类型充电基础设施协同服务模型

为了保证充电站能够提供足够的服务能力,在 规划之初需要考虑候选点的充电需求,决定与之相 匹配的充电桩的数量。定义充电站的服务水平指标 为电动汽车用户能够匹配到期望充电桩的概率,这 一指标能够较好地描述充电站的服务质量,如式 (23)所示。

$$P_{r}(p_{t,a}^{E} = p_{t,a}^{R}) \geqslant \beta \tag{23}$$

其中,P,为充电站的服务水平指标; β 为设定的服务 水平的下限; p_{ta}^{E} , p_{ta}^{R} 分别为时段t内a类型电动汽车 的期望充电桩数量、剩余充电桩数量。

在电动汽车类型集合A中,对于 $a(a \in A)$ 类型电 动汽车,其期望充电桩数量应小于充电站所能提供 的充电桩数量上限,由此可得:

$$P_{r}(p_{t,a}^{E} = p_{t,a}^{R}) = P_{r}(N_{Cnct} \leq N_{P}) \geq \beta$$
 (24)

其中, N_{Cnct} 为时段t内充电站中的电动汽车数量; N_{P}

为站内充电桩的数量。

拓展到所有的电动汽车类型 $A \supset T_k$ 个时段,式 (24)可被进一步推演为:

$$\int_{-\infty}^{N_{\rm P}} f(N_{\rm Cnet}) dN_{\rm Cnet} = F(N_{\rm P}) = \phi \left(\frac{N_{\rm P} - \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{k}} N_{t,a}}{\sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{k}} N_{t,a}}} \right) \geqslant \beta (25)$$

其中, $f(N_{\text{Cnet}})$ 为充电站内电动汽车的数量函数; $F(N_{\text{P}})$ 为充电站内充电桩的数量函数; ϕ 为数量修正系数,用以调整计算所得数量为正整数; $N_{t,a}$ 为时段t 充电站内正在充电的a类型电动汽车的数量; T_{k} 为时段数。

由此可得充电桩布置数量的约束条件为:

$$N_{\rm P} \ge F^{-1}(\beta) = \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_k} N_{t,a} + \phi^{-1}(\beta) \sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_k} N_{t,a}}$$
 (26)

假设电动汽车用户在有多类型充电设施满足功率需求时,会按照一定的充电偏好选择最适合的功率进行充电。充电偏好是由充电需求的不同导致的,高功率充电设施的收费单价相对更高,且可能对充电时长以外的停留时长征收额外的费用,因此用户在选择充电设施功率时通常会权衡自身对充电时间与充电费用的需求,选择最适合的充电方式。为此,本文对使用不同于期望类型的充电设施设置了惩罚因子ω,用于表征用户的满意度损失程度。

在运营过程中,当用户期望功率的充电设施数量不足时,若较低一级功率的充电设施能够在其预期充电停留时间内将电量充满,则优先为其安排较低一级功率的充电设施;否则,充电需求将被转移至更高功率的充电设施。3种功率类型的充电设施建设数量约束为:

$$N_{j}^{FC} \ge \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{1}} N_{t,a} + \phi^{-1}(\beta) \sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{1}} N_{t,a}}$$
 (27)

$$N_j^{\text{FC}} + N_j^{\text{NC}} \ge \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_2} N_{t,a} + \phi^{-1}(\beta) \sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_2} N_{t,a}} \quad (28)$$

$$N_{j}^{\text{FC}} + N_{j}^{\text{NC}} + N_{j}^{\text{SC}} \ge \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{3}} N_{t,a} + \phi^{-1}(\beta) \sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_{3}} N_{t,a}}$$
 (29)

其中, N_j^{FC} 、 N_j^{NC} 、 N_j^{SC} 分别为站址j处快速充电桩、常速充电桩、慢速充电桩的数量; T_1 、 T_2 、 T_3 分别为使用快速充电桩、常速充电桩、慢速充电桩的时段数。

5 多目标优化规划模型

在提出可靠性计算方法以及多类型充电设施协同服务模型后,基于"车-路-网"耦合系统模型,建立多目标优化规划模型来解决充电基础设施选址定容的优化问题。从电网和电动汽车出行过程两方面

获取可靠性指标,兼顾了投资成本和用户满意度指标,实现了多个目标之间的均衡决策[17]。综合目标如式(30)所示。

$$\begin{cases} \min R_{EN} = E_{LOEE} \\ \min R_{TN} = \sum_{i=1}^{n_{EV}} R_{EVi} = \left(\sum_{i=1}^{n_{EV}} T_{ETE}\right) / n_{EV} \\ \min C = C_{S} + C_{P} + C_{O\&M} + C_{C} \\ \min W = \sum_{i=1}^{n_{EV}} \sum_{i=1}^{n_{CS}} \omega_{i,j} \end{cases}$$
(30)

其中, R_{EN} 为电网运行可靠性水平; R_{TN} 为电动汽车出行可靠性水平; n_{EV} 为参与控制方案的电动汽车数量; R_{EVi} 为 EV_i 的平均额外时间期望;C为总投资成本; C_s 为充电站的建设成本; C_p 为充电桩的建设成本; C_{ORM} 为运行维护成本; C_c 为给予参与放电控制的电动汽车用户的电池损耗补偿;W为满意度惩罚量; n_{CS} 为充电站数量; $\omega_{i,j}$ 为 EV_i 在充电站 j 处的满意度惩罚量。

需满足的约束条件如下。

(1)功率平衡约束。

$$P_{\rm L} + \sum_{\rm EV_i \in S_{\rm CHG}} P_{\rm C, i} + P_{\rm LOSS} = P_{\rm G} + E_{\rm CSEE} + E_{\rm DSEE} + P_{\rm C}$$
 (31)

(2)SOC约束。

$$S_{\min}^{\text{SOC}} \leq S_i^{\text{SOC}} \leq S_{\max}^{\text{SOC}} \tag{32}$$

其中, S_{\min}^{SOC} 、 S_{\max}^{SOC} 分别为电动汽车电池允许的最小、最大SOC 值。

(3) 电压幅值约束。

$$V_{\min} < V_{i,t} < V_{\max} \tag{33}$$

其中, $V_{i,t}$ 为时段t节点i的电压幅值; V_{max} 、 V_{min} 分别为节点i电压幅值的上、下限。

(4) 充电站容量约束。

$$\sum_{i=1}^{N_{EV,j}} P_{C,i,j} \leq P_{CS,j}$$
 (34)

其中, $N_{\text{EV},j}$ 为充电站j内的电动汽车数量; $P_{\text{C},i,j}$ 为 EV_i 在充电站j 的充电功率; $P_{\text{CS},j}$ 为充电站j 的容量。

(5) 充电站间的地理距离约束。

$$D_{m-n} \geqslant D_{\min} \tag{35}$$

其中, $D_{m-n} = \zeta \sqrt{(X_m - X_n)^2 + (Y_m - Y_n)^2}$, X_m 、 Y_m 和 X_n 、 Y_n 分别为节点m和节点n在路网中的横、纵坐标; ζ 为距离修正系数; D_{\min} 为充电站间的最小地理距离。

(6)新建充电桩数量约束。

$$N_{\rm P} \ge \sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_k} N_{t,a} + \phi^{-1}(\beta) \sqrt{\sum_{a \in A} \sum_{t=1}^{T_k} N_{t,a}}$$
 (36)

(7)收敛约束条件。

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{std}}(\rho_{n_{\text{MC}}})}{M_{\text{mean}}(\rho_{n_{\text{c}}})} \le \varepsilon_{c}$$
 (37)

其中, ε 为变异系数; S_{std} 为标准差函数; M_{mean} 为均值



函数; $\rho_{n_{MC}}$ 为 n_{MC} 次模拟后的可靠性指标; ε 。为模拟的收敛标准。

6 算例分析

6.1 算例介绍及参数设置

以改进IEEE RTS系统[18]为测试算例,其是一个 包含24个节点、32台发电机组、38条支路的复合电 网,风力发电机安装在电网节点15处,拓扑结构如 附录B图B1所示。测试算例对应的规划区域见附 录B图B2,含有住宅、娱乐、商业3种区域类型。为 了简化仿真,认为电动汽车充电站位于交叉路口(路 网节点)处,电网节点与路网节点的编号对应关系见 附录B表B1(后续所述节点均指路网节点)。单座 充电站的建设成本(不含充电桩)为115.73万元,单 个快速充电桩、常速充电桩、慢速充电桩的建设成本 分别为3.976、2.3075、0.284万元, 充电站的年运行 维护成本为其总建设成本的10%。分时峰谷电价 设置如下:07:00-23:00为平峰和高峰时段,电价为 0.4657元/(kW·h);23:00至次日07:00为低谷时 段,电价为0.1510元/ $(kW\cdot h)$ 。电池损耗补偿系数 设置为80%,即按照实时电价的80%对参与放电控 制的电动汽车用户进行补偿。

商业区已经设置了慢速充电桩,可供公务车充电,测试算例已建设了3座充电站,分别位于节点10、12、16,可对其进行扩建改造。规划区内的日用电负荷曲线和日充电负荷曲线分别见附录B图B3和图B4。耦合系统的相关参数设置见附录B表B2,对使用不同于期望类型充电设施设置的惩罚因子ω见附录B表B3,ω的值越小,表明用户越期望在此类充电桩进行充电。

采用线性加权方法处理多目标优化规划模型, 本文设置每个目标的权重相同,并采用改进的遗传 算法求解该优化问题^[19]。

初始条件下耦合系统的可靠性指标计算结果如表 1 所示。表中, E_{LOEE} 指标用来量化电网的可靠性, T_{CTE} 、 T_{ATE} 、 T_{ETE} 指标用于量化电动汽车的出行可靠性。当模拟次数达到最大次数 N_{MCmax} 或满足收敛标准 $\varepsilon \leq \varepsilon_c = 0.01$ 时,终止蒙特卡罗模拟。

表1 初始条件下可靠性指标的计算结果

Table 1 Calculative results of reliability indexes under initial condition

指标	计算结果	指标	计算结果
$E_{\text{LOEE}} / (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	1339.4	$E_{\text{CSEE}} / (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	1633.4
$T_{\mathrm{CTE}} / (\mathrm{h} \cdot \mathrm{a}^{-1})$	1.8027	$E_{\text{DSEE}} / (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	1625.7
$T_{\mathrm{ATE}} / (\mathrm{h} \cdot \mathrm{a}^{-1})$	1.8157	满意度惩罚量	5 466.2
T_{ETE} / $(\mathrm{h} \cdot \mathrm{a}^{-1})$	3.6184	故障次数	428

6.2 初始条件的仿真结果分析

为了评价耦合系统的可靠性,模拟所有电动汽

车的行驶行为,计算得到耦合系统的可靠性指标。 因此可以通过记录电动汽车抛锚的位置,以便进一步分析规划方案。规划方案的仿真结果如附录C图 C1 所示,坐标平面上的故障分布频次情况如附录C 图C2 所示。

为了研究不同的 SOC 阈值对耦合系统可靠性指标的影响,改变 δ ,的值,设定取值为0.20%.40%.60%.80%.100%进行了一系列的仿真模拟,模拟结果如图<math>2所示。

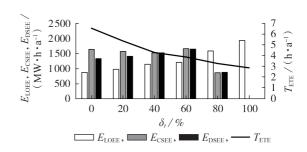


图 2 不同 SOC 阈值下耦合系统的可靠性指标结果

Fig.2 Reliability index results of coupled system with different SOC threshold values

由图 2 可看出,随着 δ_ι 减小, E_{LOEE} 减小, T_{ETE} 、 E_{CSEE} 、 E_{DSEE} 增大。这是因为较高的 δ_ι 产生了较大的 $S_{\text{CHG,max}}$ 和 $S_{\text{DSC,max}}$,电动汽车充放电控制策略的实施有利于电网的可靠性提升,但不利于电动汽车用户的正常出行。随着 δ_ι 从 0 增加到 100 %,电动汽车出行可靠性指标 T_{ETE} 降低了 43.95 %,而电网运行可靠性指标 E_{LOEE} 增加了 2 倍以上。

6.3 典型场景设置及分析

随着电动汽车的不断普及,需要新增充电桩来 保障电动汽车的充电需求。考虑在电动汽车最有可 能抛锚的地方建设新的充电站或扩建原有的充电 站,可以采用本文所提面向可靠性提升的优化规划 方法实现。

由附录 C 图 C1 可看出,由于距离充电站较远或充电站容量不足以支持所有电动汽车同时充电,某些区域内故障位置分布密集,这意味着大量电动汽车在这些位置抛锚等待救援。为了减少故障位置的数量,在最密集的区域新建或扩建原有充电站是合理的。在这种情况下,本文设计了若干典型场景以模拟不同输入工况数据下的规划结果,各场景中SOC 阈值δ,的值分别为 40%、60%、80%,电动汽车渗透率分别为 10%、20%,风电渗透率分别为 15%、25%。由于 SOC 阈值、电动汽车渗透率和风电渗透率这 3 个变量之间相互独立,则生成 12 个独立场景,具体见附录 C 表 C1。

以场景 5 为例,根据最优改造方案在节点 19 建设新的充电站,并在节点 10 和节点 12 扩建原有充电站。将所提方法应用于新规划的网络,所得电动汽车抛锚位置分布见附录 C图 C3 和图 C4。可见,随着

新建和扩建充电站改造措施的实施,故障位置总数较之前明显减少。

12个独立场景的建设方案及可靠性指标结果见表 2,各指标的具体变化情况见附录 C图 C5—C8。与表 1 中结果相比,场景 5 的 E_{LOEE} 指标降低了 9.48%, T_{ETE} 指标降低了 33.83%, 满意度惩罚量也明显减小。另外,根据表 2 中 E_{LOEE} 指标的变化情况可知,新建或者扩建充电站对电网可靠性的影响有限,但是当电动汽车渗透率提高,参与充放电控制策略的电动汽车负荷增加时,具有极大充电灵活性的电动汽车集群对电网可靠性的提升作用是非常明显的。这是因为本文主要考虑电网出现发电故障而导致电力缺额情况下的可靠性补救场景,电动汽车集群的存在将大幅提升耦合系统面对紧急故障时的可靠性。

随着电动汽车市场规模的逐步扩大以及私家车用户对电动汽车越来越青睐,可以预见未来电动汽车在私家车中的比重会越来越高。为了验证该发展趋势对耦合系统可靠性产生的影响,设计若干场景计算可靠性指标,其中电动私家车比例设置为50%、60%、70%,出租车和公务车的比例虽被挤占,但其相对比例保持不变,优化结果如附录C图C9所示。由图可见,随着电动私家车比例提高,电力系统的可靠性随之降低,这是因为电动私家车的日行驶里程通常较少,在日常行驶过程中需要紧急充电的情况不太常见,同时电动私家车用户很少在电能充满之后仍停驻在充电站,因此电动私家车的比例增

大并不能够有效保障电力系统供电不足的紧急情况。此外,正是由于电动私家车的充电需求并没有出租车和公务车高,其出行的可靠性大幅提升,说明用户因缺电而额外消耗的时间相比之前得到了很大的改善。

为了验证用户充电偏好对耦合系统可靠性的影响,同时验证本文设置的充电偏好数值的合理性,在上述场景5的基础上设计如下3种拓展场景进一步分析:场景a,交换电动私家车和公务车的充电偏好;场景b,交换电动私家车和出租车的充电偏好;场景c,交换公务车和出租车的充电偏好。3种拓展场景的充电设施规划方案以及可靠性指标结果如表3所示。

由表3可知,因为私家车和出租车在电动汽车 集群中占比较大,成为影响充电设施建设和可靠性 指标的主要因素,当这2类电动汽车用户的充电偏 好改变时,对应类型的充电桩建设数量就会相应的 增加。同时,系统的可靠性水平也发生了较大幅度 的波动,证明了用户充电偏好对耦合系统的可靠性 有重要的影响。虽然投资成本提高,但用户充电病 意度却很难随之改善,这是因为当前环境中充电桩 的数量已经由用户充电偏好决定,很难在短时间内 随着用户充电偏好的改变而动态调整。充电偏好改 变导致充电需求得不到满足,进而致使耦合系统的 可靠性降低,一方面是因为电动汽车需要紧急 充电的情况增加。

表2 不同场景的优化规划结果

Table 2 Optimal planning results of different scenarios

	E /	E /	E /	T /	新建充电站		新建充电	桩数量		总投资	满意度
场景	が景 E_{LOEE} / $(MW \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	$E_{\text{CSEE}} / E_{\text{DSEE}} / (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}) (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	$(\mathbf{MW} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{a}^{-1})$	$T_{\text{ETE}} / (\mathbf{h} \cdot \mathbf{a}^{-1})$	数量/座	快速 充电桩	常速 充电桩	慢速 充电桩	总和	成本 / 万元	惩罚量
1	1 049.1	859.6	869.3	2.6164	1	8	26	57	91	285.2116	4984.4
2	1 151.9	898.7	912.2	2.6941	1	11	31	61	103	316.0282	5351.3
3	294.4	2294.4	2397.9	2.4618	2	14	85	89	188	664.8989	7249.1
4	363.7	2593.6	2597.3	2.5486	2	17	92	99	208	705.0877	7819.6
5	1212.4	698.5	731.9	2.3943	1	0	15	27	42	206.7471	4161.0
6	1 464.8	706.2	797.8	2.4891	1	0	16	30	46	213.9858	4891.5
7	384.6	2351.6	2461.9	2.2384	1	0	63	66	132	411.2310	6484.1
8	406.5	2564.8	2597.3	2.2946	1	2	66	71	137	440.0363	6841.9
9	1 494.7	449.9	453.2	2.1367	1	0	13	22	35	188.9267	3398.4
10	1 684.9	521.3	529.1	2.2935	1	0	15	26	41	198.3669	3891.1
11	467.5	1 397.1	1 399.5	2.0029	1	0	49	60	109	331.9993	5719.8
12	531.6	1506.6	1508.7	2.0493	1	0	57	67	124	360.8056	6019.2

表3 3种拓展场景的优化规划结果

Table 3 Optimal planning results of three extended scenarios

	F / F / F /		F /	T /	新建充电站	新建充电桩数量			总投资	满意度	
场景	$E_{\text{LOEE}} / E_{\text{CSEE}} / (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1}) (\text{MW} \cdot \text{h} \cdot \text{a}^{-1})$	E_{CSEE} / (MW-h- $^{-1}$)	$E_{\text{DSEE}} / T_{\text{ETE}} /$	$(\mathbf{h} \cdot \mathbf{a}^{-1})$	1) #4. 🗎 / 🗠	快速	常速 慢速	总和	心汉页 成本 / 万元	概息及 惩罚量	
		(MW-II-a) (MV	(MW-II-a)	MW That (hat)		充电桩	充电桩	充电桩	心下小山	风平 / 刀儿	心 四 里
a	1 343.9	660.2	687.9	2.7438	1	13	11	31	55	261.7061	4791.1
b	1 187.6	730.5	747.1	2.4671	1	0	14	42	56	211.1572	4346.3
c	1479.2	613.4	638.2	2.9618	1	27	19	12	58	338.7633	5 947.7



7 结论

为了解决大规模电动汽车接入的充电站规划问题,本文提出了一种面向可靠性提升的耦合系统多目标规划模型,考虑充电基础设施协同服务理论,通过分析多种典型场景已验证所建模型的有效性。

算例结果表明,电动汽车充放电控制策略的实施有利于提高电网可靠性,但不一定满足电动汽车用户的正常出行需求。随着SOC 阈值的增大,电动汽车出行可靠性指标 T_{ETE} 迅速降低,而电网运行可靠性指标 E_{LOFE} 显著提高。

随着电动汽车普及率的不断提高,所提规划方法可以有效地求解最优规划方案,在保证电网运行可靠性与电动汽车出行可靠性协同提升的前提下,兼顾了规划投资成本以及用户满意度的影响,为统筹考虑充电设施规划问题提供了新方法。当电动私家车的占比逐渐提高时,电力系统面临的压力将会更大,这是因为电动汽车集群无法提供足够抵消电能缺额的充放电电量,电网升级改造势在必行。

另外,当电动汽车用户的充电偏好在短时间内 大幅度改变时,目前的充电服务体系将很难继续提 供稳定的充电服务,这是因为现有充电服务体系依 据用户的充电需求而建,无法适应充电需求的剧烈 改变,可见预测电动汽车用户未来的充电需求变化 趋势有利于充电服务网络的建设。本文所提方法可 为电动汽车充电基础设施规划方案优选提供理论 依据。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 张建兴,杜笑天."新基建"形势下充电桩关键技术发展展望 [J]. 大众用电,2020,35(4):20-22.
 - ZHANG Jianxing, DU Xiaotian. Prospects for development of key technologies of charging piles under the circumstances of "new infrastructure" [J]. Popular Utilization of Electricity, 2020, 35(4):20-22.
- [2] XIANG Yue, HU Shuai, LIU Youbo, et al. Electric vehicles in smart grid; a survey on charging load modelling[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(1):25-33.
- [3] 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, LÜ 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.
- [4] MU Yunfei, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. A spatial-temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 114:456-465.
- [5] XIANG Yue, LIU Junyong, LIU Yong. Optimal active distribution system management considering aggregated plug-in electric vehicles [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 131: 105-115.
- [6] XIANG Yue, LIU Junyong, LI Ran, et al. Economic planning

- of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. Applied Energy, 2016, 178:647-659.
- [7] 陈丽丹,欧阳慧林. 考虑用车紧急度的电动汽车充放电模糊逻辑控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):62-74. CHEN Lidan,OUYANG Huilin. Fuzzy logical control strategy of EV charging / discharging considering perceived urgency [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(5):62-74.
- [8] 刘畅,刘洪,李香龙,等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车 充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):28-34. LIU Chang,LIU Hong,LI Xianglong, et al. Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):28-34.
- [9] 蒋卓臻,向月,刘俊勇,等.集成电动汽车全轨迹空间的充电负荷建模及对配电网可靠性的影响[J].电网技术,2019,43 (10):3789-3799.
 - JIANG Zhuozhen, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Charging load modeling integrated with electric vehicle whole trajectory space and its impact on distribution network reliability [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3789-3799.
- [10] 殷自力,郑佩祥,陈宇星,等. 含电动汽车和分布式电源的配电 网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(24):77-83
 - YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation for distribution network with electric vehicle and distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24):77-83.
- [11] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(6);34-39. CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6);34-39.
- [12] 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.
- [13] 贾龙,胡泽春,宋永华. 考虑不同类型充电需求的城市内电动汽车充电设施综合规划[J]. 电网技术,2016,40(9):2579-
 - JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua. An integrated planning of electric vehicle charging facilities for urban area considering different types of charging demands [J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2579-2587.
- [14] TANG Shuoya,LIU Junyong,XIANG Yue,et al. Combined planning strategy for charging infrastructures and distribution network integrated with district information[C]//IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles (ICV 2016). Chongqing, China: Institution of Engineering and Technology, 2016:1-7.
- [15] 侯恺. 电力系统可靠性评估方法改进与应用研究[D]. 天津: 天津大学,2016. HOU Kai. Power system reliability assessment methodology improvement and its application[D]. Tianjin: Tianjin University,
- [16] ARMANDO M, LEITE D S, REINALDO A, et al. Reliability assessment of time-dependent systems via quasi-sequential Monte Carlo simulation[C]//2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. [S.l.]:IEEE, 2010;697-702.
- [17] 柴雁欣,向月,刘俊勇. 面向可靠性提升的关联规则驱动下配



电网投资规划优选模型与方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):85-92.

CHAI Yanxin, XIANG Yue, LIU Junyong. Optimization model and method of distribution network investment planning driven by correlation rules for reliability improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3):85-92.

- [18] SUBCOMMITTEE P. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98 (6):2047-2054.
- [19] XIANG Yue, ZHOU Lili, SU Yunche, et al. Coordinated DGtie planning in distribution networks based on temporal scenarios[J]. Energy, 2018, 159:774-785.

作者简介:



孟锦鹏

孟锦鹏(1995—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车与智能电网交互(\mathbf{E} -mail;mystmeng@163.com);

向 月(1987—),男,重庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电动汽车与智能电网交互(E-mail:xiang@scu.edu.cn); 顾承红(1981—),男,安徽合肥人,讲师,博士,主要研究方向为综合能源系统(E-mail:c.gu@bath.ac.uk)。

(编辑 陆丹)

Collaborative optimization planning of electric vehicle charging infrastructure for reliability improvement

MENG Jinpeng¹, XIANG Yue¹, GU Chenghong², CHEN Shijie¹, LIU Junyong¹ (1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK)

Abstract: In order to realize the scientific configuration of charging infrastructure under the large-scale development trend of EVs(Electric Vehicles), an optimal planning method of charging infrastructure collaborative service is proposed for the "EV-road-grid" coupled system. Based on the analysis of charging demand, an EV cluster control strategy is proposed to simulate the control mode for reliability loss consumption under the condition of insufficient power supply. Based on quasi-sequential Monte Carlo simulation method and considering users' preference for charging power, a collaborative service model of multi-type charging infrastructures within the station is designed. Aiming at the charging infrastructure planning problem, a new multi-objective optimal planning model is proposed, which is oriented to the collaborative improvement of power grid's operation reliability and EVs' travel reliability, and the influence of investment cost and user satisfaction is considered. The feasibility and validity of the proposed method are verified by the simulation and analysis of the "EV-road-grid" coupled system under various scenarios and objects.

Key words: electric vehicles; reliability; quasi-sequential Monte Carlo simulation; charging infrastructure planning; multi-type charging infrastructures

(上接第35页 continued from page 35)

Decentralized optimization of ordered charging and discharging for charging-storage station considering spatial-temporal access randomness of electric vehicles

CHENG Shan¹, WEI Zhaobin¹, ZHAO Zikai¹, WANG Yeqiao¹, ZHAO Mengyu²

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Xuchang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the spatial-temporal access randomness of EVs(Electric Vehicles), a decentralized optimization scheduling method of ordered charging and discharging for CSS(Charging-Storage Station) based on ILDRM (Improved Lagrange Dual Relaxation Method) is proposed. Firstly, according to the trip chain and Markov decision theory, the spatial-temporal access model of EVs considering the randomness of the travel paths and the energy consumption model per unit mileage of EVs under different temperatures and traffic conditions are established. Secondly, considering the charging and discharging constraints of EVs and the operation constraints of CSS and distribution, the optimization mathematical model of CSS side is established with the objective function of maximizing the revenue of CSS. Then, based on ILDRM, a decentralized optimization solving method is proposed. Finally, taking a typical urban road topology as an example, the revenue of each CSS, load curve and computational efficiency under different travel paths, temperatures, traffic conditions and scheduling strategies are compared and analyzed. The results show that, considering various environmental factors comprehensively, the proposed method makes the scheduling results of CSS more comprehensive and practical, and the computational efficiency is greatly improved.

Key words: electric vehicles; trip chain; charging-storage station; Markov decision theory; decentralized optimization; ordered charging and discharging

附录 A 不同类型充电桩及电动汽车参数设置

表 A1 电动汽车充电模式分类

Table A1 Classification of EV charging modes

•	充电桩类型	充电模式	额定电流/A	额定电压/V
	快速充电桩	直流	200	750
	常速充电桩	交流	32	220
	慢速充电桩	交流	16	220

表 A2 电动汽车参数

Table A2 Parameters of EVs

电动汽车类型	比例/%	电池容量/(kW·h)	日行驶距离/km	续航里程/km
私家车	50	15~57	0~150	120~300
出租车	40	50~57	200~400	200~300
公务车	10	15~57	0~250	120~300

附录 B 测试算例拓扑结构及参数设置

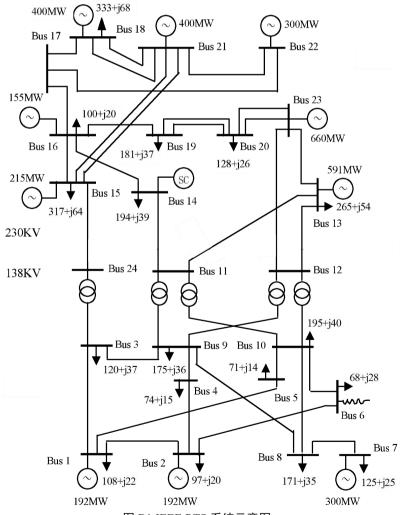


图 B1 IEEE RTS 系统示意图

Fig.B1 Schematic diagram of IEEE RTS system

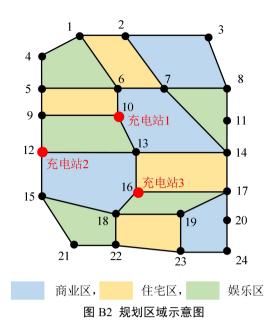


Fig.B2 Schematic diagram of planning area

表 B1 电网节点与路网节点编号对应表

Table B1 Corresponding node numbers between electrical network and transportation network

电网节点	路网节点	电网节点	路网节点	电网节点	路网节点
1	21	9	16	17	4
2	22	10	17	18	1
3	15	11	13	19	6
4	18	12	14	20	7
5	19	13	11	21	2
6	20	14	10	22	3
7	24	15	9	23	8
8	23	16	5	24	12

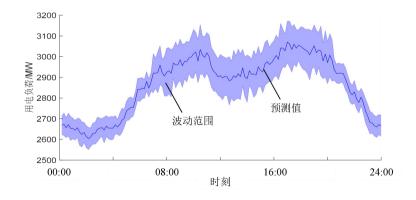


图 B3 日用电负荷曲线 Fig.B3 Curve of daily load demand

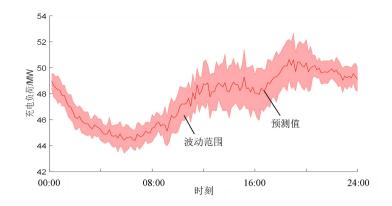


图 B4 日充电负荷曲线 Fig.B4 Curve of daily charging load

表 B2 耦合系统的参数

Table B2 Parameters of coupled system

	•
参数	取值
风电渗透率/%	15
区域电动汽车总数/辆	30000
电动汽车渗透率/%	10
充放电控制的 SOC 阈值 δ_{ι} /%	60
寻找充电站的 SOC 阈值 $\delta_{\rm c}$ /%	20
模拟收敛标准 ε_{c}	0.01
模拟时间间隔 Δt /h	1/6
电动汽车额定电池容量 C_e /(kW·h)	U(30,50)
电动汽车行驶速度/(km·h-1)	U(20,50)
电动汽车电池的最小 SOC	0.05
电动汽车电池的最大 SOC	0.99

表 B3 不同类型电动汽车的充电偏好

Table B3 Charging preference of different types of EVs

电动汽车类型	比例/% -	惩罚因子 ω				
电幼八千矢至	LL [9]/70 —	快速充电桩	常速充电桩	慢速充电桩		
私家车	50	0.2	0	0.1		
出租车	40	0	0.1	0.3		
公务车	10	0.5	0.1	0		

附录 C 测试算例仿真结果分析

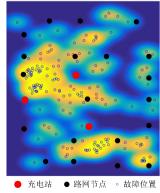


图 C1 初始条件下故障位置分布

Fig.C1 Distribution of fault location under initial condition

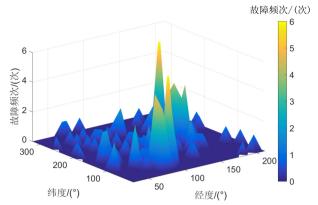


图 C2 初始条件下的故障分布频次

Fig.C2 Frequency of fault distribution under initial condition 表 C1 典型场景设置

Table C1 Setting of typical scenarios

场景	SOC 阈值 δ, /%	电动汽车渗透率/%	风电渗透率/%
1	40	10	15
2	40	10	25
3	40	20	15
4	40	20	25
5	60	10	15
6	60	10	25
7	60	20	15
8	60	20	25
9	80	10	15
10	80	10	25
11	80	20	15
12	80	20	25

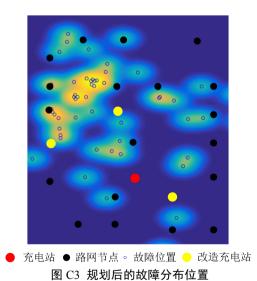


Fig.C3 Location of fault distribution after planning

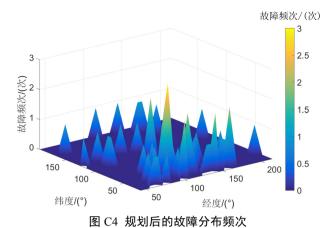


Fig.C4 Frequency of fault distribution after planning

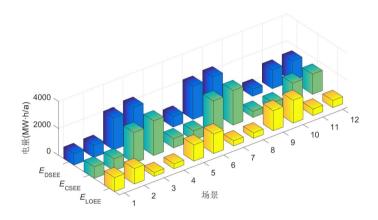


图 C5 电网运行可靠性优化规划结果 Fig.C5 Optimal planning results of power grid reliability

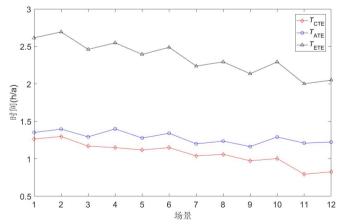


图 C6 电动汽车出行可靠性优化规划结果 Fig.C6 Optimal planning results of EV travel reliability

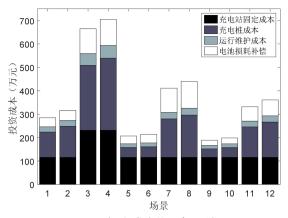


图 C7 总投资成本优化规划结果

Fig.C7 Optimal planning results of total investment cost

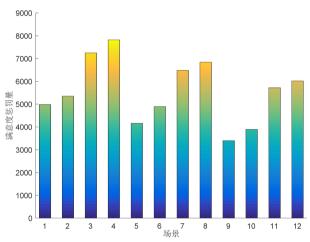


图 C8 满意度惩罚量优化规划结果

Fig.C8 Optimal planning results of satisfaction penalty

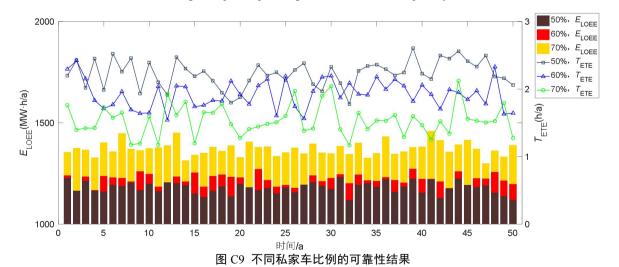


Fig.C9 Reliability results of different proportion of private EVs