

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200571

多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划

徐杨杨, 张新松, 陆胜男, 郭云翔

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 针对分布式光伏接入背景下的电动汽车(Electric Vehicle, EV)充电网络规划问题, 建立了同时考虑分布式光伏出力与EV充电负荷随机特性的机会约束规划模型。首先, 采用场景概率法分析配电系统规划典型日内的概率潮流特性。在此基础上, 给出EV充电网络机会约束规划模型中的节点电压偏移机会约束与线路潮流越限机会约束。在充电站建设总数和最低建设容量给定的情况下, 模型通过优化充电站的建设位置和建设容量, 尽可能降低配电系统的网损。采用遗传算法对EV充电网络机会约束规划模型进行求解。此外, 为提高遗传算法的寻优性能, 面向EV充电网络机会约束规划模型的物理特征, 对遗传算法中的变异操作算子和交叉操作算子进行了改进。基于IEEE 33节点配电系统的仿真实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 电动汽车; 充电网络规划; 随机特性; 遗传算法; 机会约束

Chance constrained optimization of an electric vehicle charging network with multiple stochastic characteristics

XU Yangyang, ZHANG Xinsong, LU Shengnan, GUO Yunxiang

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: To realize a plan for Electric Vehicle (EV) charging networks with a background of distributed photovoltaics, a chance constrained optimization is developed, in which stochastic characters from EV charging loads and distributed photovoltaic output are considered simultaneously. First, a scenario-based probability method is used to investigate the probabilistic power flow of distribution systems during a typical planning day. On this basis, the chance constraints on the voltage deviations and power flow over limits in the optimization are established. Given the total number of EV charging stations and the minimum construction capacity, the optimization minimizes the network loss of the distribution system by optimizing the construction location and capacity of the EV charging stations. A Genetic Algorithm (GA) is used to establish the optimization. In addition, to enhance the performance of the GA, the mutation operator and the crossover operator in the GA are customized according to the physical characteristics of the chance constrained optimization. A simulation based on IEEE 33-bus distribution systems validates the formulation and method proposed in this paper.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877112), the Natural Science Key Research Program of Jiangsu Colleges (No. 18KJA470003) and the Basic Sciences Research Project of Nantong City (No. JC2019127).

Key words: electric vehicle; charging network planning; stochastic characteristics; genetic algorithm; chance constraints

0 引言

发展以风电、光伏为代表的可再生能源发电和

以电动汽车(Electric Vehicle, EV)为代表的清洁能源交通工具是促进能源变革、实现可持续发展的重要途径^[1-2]。作为EV充电的重要场所, 充电站充电负荷可达数百乃至上千千瓦, 成为配电系统中举足轻重的重要负荷之一, 将对配电系统运行工况产生显著影响^[3]。不合理的充电网络不仅会降低EV车主的用车便利性, 阻碍EV产业的进一步发展, 还可

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877112); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目资助(18KJA470003); 南通市基础科学研究项目资助(JC2019127)

能恶化配电系统运行工况, 威胁配电系统的安全、可靠与经济运行^[4]。因此, 随着 EV 渗透率的不断攀升, 充电网络规划的重要性日益凸显, 引起了学术界和工业界的共同关注。

大规模 EV 充电将对配电系统产生显著影响, 主要体现为网损上升、线路和变压器过载以及节点电压偏移超标等多个方面^[5-9], 对其进行详细分析是充电网络规划的重要基础。文献[5-6]的研究表明, 大规模 EV 充电会导致配电系统网损上升, 从而显著增加配电系统运行成本。文献[7]对瑞典哥德堡市的交流配电系统进行了仿真分析, 研究表明大规模 EV 充电将导致该市包含多个电压等级的交流配电系统出现线路和变压器过载, 显著缩短设备使用寿命。文献[8]的研究表明, 由于将出现大规模线路、变压器过载, 华盛顿的现状配电系统无法满足大规模 EV 充电的需要。文献[9]的研究表明, 大规模 EV 充电将导致配电系统中部分节点电压偏移超标, 威胁配电系统安全、稳定运行。

随着 EV 渗透率的不断攀升, 工业界和学术界对充电网络规划问题进行了大量研究, 取得了显著进展^[10-16]。文献[10]提出了计及全寿命周期成本的充电网络优化规划模型, 并采用量子遗传算法求解模型, 对充电站建设地址与建设容量进行了优化。文献[11]提出了充电站与 EV 之间的相互吸引模型, 并以此为基础建立了考虑未来发展的充电站规划模型, 对充电站建设容量进行了优化。在考虑道路网络对 EV 充电需求影响的基础上, 文献[12]提出了用于充电网络优化规划的两阶段方法, 对充电网络建设方案进行了优化。文献[13]提出了基于计算几何方法的充电站建设地址与建设容量优化模型, 并采用粒子群算法求解优化模型。在对待规划区域内充电负荷进行等效计算与分配的基础上, 文献[14]提出了适用于供地不足城市的充电网络规划方法。文献[15]建立了综合充电站、EV 车主与配电网多方利益的充电网络动态规划模型, 并在模型中考虑了 EV 增长的不确定性。在通过网格法确定充电站候选站址的基础上, 文献[16]提出了同时考虑充电站负荷率、投资回收期、充电行驶里程与综合满意度的充电站站址评价指标体系, 对充电站建设地址进行了优化。

受制于车主交通行为与充电习惯的随机特征, 充电负荷是典型的随机负荷^[17], 也就是说, 对充电负荷的随机特性进行考虑是提高充电网络规划质量的关键之一。文献[10-16]在研究中并未对充电负荷的随机特性进行充分考虑, 将充电网络优化问题建模为确定性优化模型, 在一定程度上影响了规划结果的实用性。此外, 受制于一次能源的随机特性, 配电

系统中的分布式光伏电站出力同样具备随机特性^[18]。在 EV 充电负荷随机特性和分布式光伏出力随机特性的双重影响下, 配电系统运行工况将呈现强随机特征, 此时, 必须借助概率潮流对其进行描述^[19]。也就是说, 应在对配电系统进行概率潮流分析的基础上, 将 EV 充电网络规划问题建模为随机优化模型。

为解决这一问题, 本文建立了同时考虑分布式光伏出力与充电负荷随机特性的充电网络机会约束规划模型。优化目标为配电系统规划典型日内的网损电量期望最小, 约束条件包括: 充电站建设数目约束, 充电站总建设容量约束, 节点电压偏移约束与线路潮流约束。考虑到配电系统运行工况的随机特性, 本文将节点电压偏移约束与线路潮流约束均建模为机会约束, 采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对充电网络机会约束规划模型进行求解。此外, 为提高 GA 的寻优性能, 面向 EV 充电网络机会约束规划模型的物理特征, 对 GA 中的变异操作算子和交叉操作算子进行了改进。最后, 基于 IEEE 33 节点配电系统^[20]的仿真实验验证了本文所提模型和求解方法的有效性。

1 配电系统典型日概率潮流分析

在充电负荷和分布式光伏出力双重随机特性的影响下, 配电系统的运行工况呈现较强的随机特性。此时, 规划人员应基于概率潮流计算结果对配电系统运行工况进行概率评估, 并以此为依据进行充电网络规划方案比选。本文采用文献[19]提出的场景概率方法对配电系统规划典型日内的概率潮流进行分析, 该方法的关键是根据各随机因素的概率场景集构建典型日内的潮流分析概率场景集。与配电系统中的常规负荷相比, 充电负荷与分布式光伏出力的随机特性更为显著, 因此, 在对配电系统进行规划典型日内的概率潮流分析时仅考虑充电负荷与分布式光伏出力的随机特性, 而暂时忽略常规负荷的随机特性。

用于配电系统规划典型日概率潮流分析的场景概率方法步骤如下所述。

首先, 采用 K-means 聚类方法^[18,21]对充电站日充电负荷曲线集和分布式光伏日出力曲线集进行聚类, 构造充电负荷与分布式光伏出力的概率场景集。现阶段, EV 充电负荷实测数据较少, 可在考虑充电开始时间、充电起始荷电状态、充电模式、充电持续时间等多种随机因素的基础上, 采用蒙特卡洛模拟技术^[22]对充电站日充电负荷进行模拟, 生成充电站日充电负荷曲线集^[19]。对分布式光伏电站来说, 可根据其数据采集与监视控制系统(Supervisory

为满足式(2)给出的约束(即充电站建设总数为 M), 各染色体中有且仅有 M 个码位的取值为非“0”整数。为确保染色体满足这一要求, 按如下方法生成初始种群中的染色体: 首先, 将染色体所有码位赋值为“0”; 接着, 从染色体中随机挑选 M 个码位, 将赋值由“0”改为不大于 Q 的随机整数。

3.2 求取适应度

首先, 对当前种群中的各染色体进行解码, 确定 M 个充电站的建设位置、各充电站的建设容量与充电站的总建设容量 C_{total} ; 在此基础上, 采用上文提到的场景概率法进行规划典型日内的配电系统概率潮流计算, 确定配电系统规划典型日内的网损电量期望 F_{loss} 、各配电节点电压的概率分布特性与各配电路潮流的概率分布特性; 最后, 采用罚函数法处理式(3)一式(5)给出的约束, 最终获得各染色体的适应度 V_{fit} 为

$$V_{fit} = \frac{F_{max}}{F_{loss}} - \eta_1 \times V_{p1} - \eta_2 \times V_{p2} - \eta_3 \times V_{p3} \quad (6)$$

式中: F_{max} 为事先给定的比较大的正数, 用以确保染色体适应度非负, 且越优秀的染色体对应的适应度值越高; η_1 、 η_2 与 η_3 为预先指定的惩罚系数; V_{p1} 、 V_{p2} 与 V_{p3} 分别表示式(3)一式(5)给出约束的违背程度, 可分别由式(7)一式(9)计算。

$$V_{p1} = \max[C_{min} - C_{total}, 0] \quad (7)$$

$$V_{p2} = \sum_{k \in \Omega_{bus}} \max \left[P_r \left\{ \frac{|U_k - U_N|}{U_N} \times 100\% > \alpha\% \right\} - \beta_1, 0 \right] \quad (8)$$

$$V_{p3} = \sum_{l \in \Omega_{tr}} \max [P_r \{I_l > I_{l, max}\} - \beta_2, 0] \quad (9)$$

3.3 遗传操作

1) 选择操作

常用的选择操作包括“轮盘赌”法与“锦标赛”法两种, 本文采用“轮盘赌”法进行选择操作。“轮盘赌”法主要利用个体适应度所占种群所有个体适应度之和的比例择优保留, 具体操作方法可见文献[28], 此处不再累述。

2) 交叉操作

为确保交叉后的染色体中有且仅有 M 个码位的取值为非“0”整数, 本文对交叉操作算子进行了改进, 具体如图2所示。

图2中给出的交叉操作算子分为三步, 具体如下所述。

步骤1: 从当前种群中随机选取两条染色体作为待交叉染色体。

步骤2: 反复随机生成待选交叉位 $N_{can}(1 < N_{can} <$

$N_{sta})$, 直至找到可行交叉位 N_{cr} 。判断 N_{can} 是否为可行交叉位的标准如下: 两条待交叉染色体第 N_{can} 个码位后取值非“0”的码位数一致。

步骤3: 以交叉概率 P_c 交换两条染色体交叉位 N_{cr} 后染色体码串, 完成交叉操作。

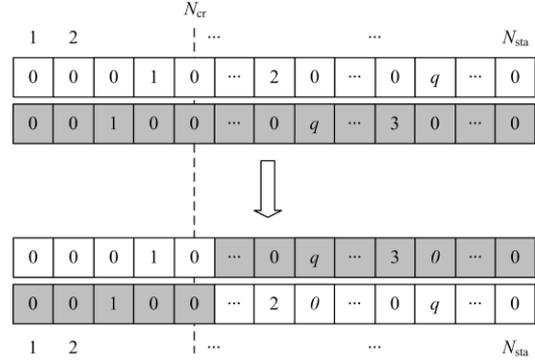


图2 染色体交叉操作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of chromosome crossover operation

3) 变异操作

为确保变异后的染色体中有且仅有 M 个码位的取值为非“0”整数, 本文同样对变异操作算子进行了改进, 具体如图3所示。

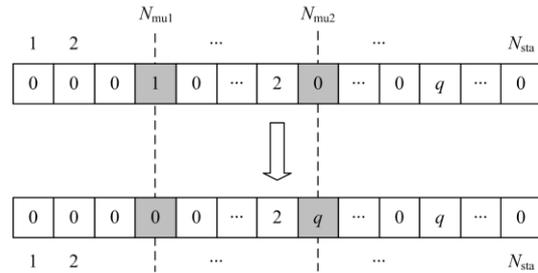


图3 染色体变异操作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of chromosome mutation operation

图3中给出的变异操作算子分为三步, 具体如下所述。

步骤1: 从当前种群中随机选取一条染色体作为待变异染色体。

步骤2: 随机生成两个待变异码位 N_{mu1} 与 $N_{mu2}(1 < N_{mu1} < N_{sta}, 1 < N_{mu2} < N_{sta})$, 确保两个待变异码位的取值一个为“0”, 一个为非“0”整数。

步骤3: 以变异概率 P_m 同时对待变异位 N_{mu1} 与 N_{mu2} 进行变异操作, 取值为“0”的待变异位变异为不大于 Q 的随机整数 q , 取值为非“0”的变异位变异为“0”。

3.4 收敛性判断

本文事先设定最大进化代数 G_{max} , 一般来讲, GA 何时收敛难以确定, 一旦 GA 进化到该最大进

化代数, 即可认为 GA 收敛。

3.5 算法流程

采用 GA 对充电网络机会约束规划模型进行求解的具体流程如图 4 所示。

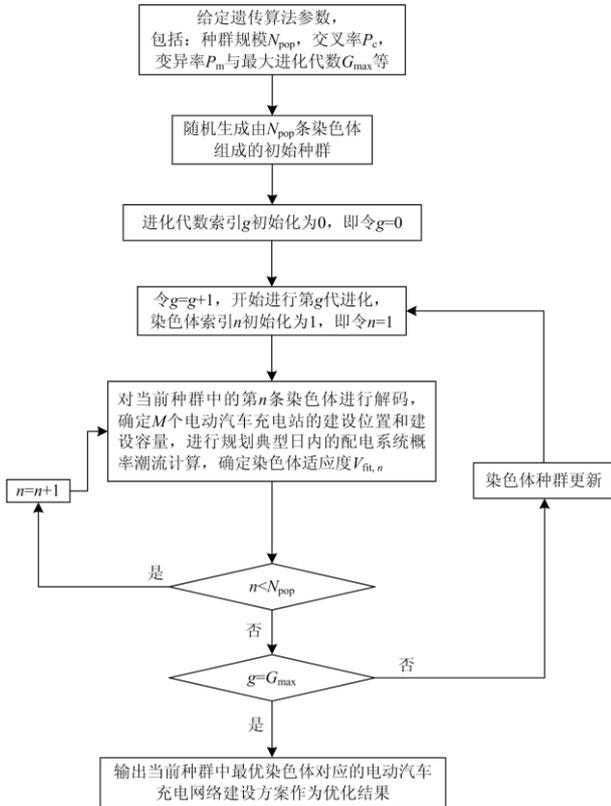


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the algorithm

4 算例分析

为验证上文所提模型与方法的有效性, 本节以 IEEE 33 节点配电系统为例进行仿真计算, 并基于仿真结果分析了分布式光伏接入对充电网络规划的影响。

4.1 算例介绍

IEEE 33 节点配电系统由 33 个配电节点和 32 条配电线路组成, 拓扑结构如图 5 所示。各配电线路阻抗参数和各配电节点的基准有功、无功负荷可见文献[20]。对配电系统进行概率潮流计算时, 将规划典型日等分为 24 个潮流分析时段(即式(1)中的 T_f 取为 24), 此时, 单个潮流分析时段的长度为 1 h。各节点规划典型日内的有功负荷(p.u.)曲线如图 6 所示。

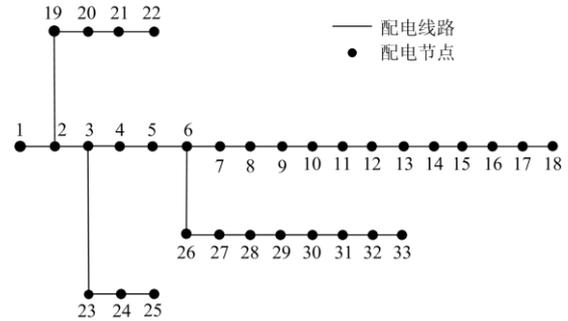


图 5 IEEE 33 节点配电系统拓扑结构

Fig. 5 Topology of IEEE 33-bus distribution systems

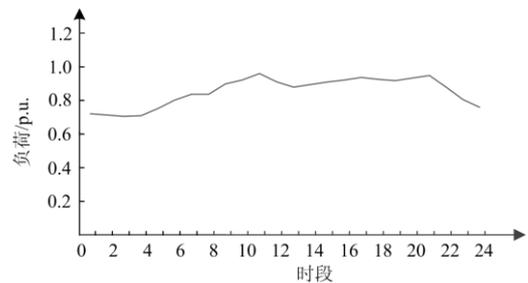


图 6 典型日 24 h 有功负荷曲线(标么值)

Fig. 6 Typical daily 24 h active power curve (p.u.)

此外, 假定各节点负荷功率因数在规划典型日内保持不变, 各配电线路最大允许电流由基准负荷下的负荷电流上浮 10% 而来, 如表 1 所示。显然, 该算例系统可模拟负载率较高的现状配电系统。

表 1 配电线路允许的最大电流

Table 1 Maximum available current of the lines

线路	$I_{l, \max}/A$						
1	230.10	9	34.6	17	4.94	25	68.01
2	203.96	10	31.26	18	19.84	26	64.9
3	144.72	11	28.05	19	14.88	27	61.78
4	136.44	12	25.04	20	9.89	28	58.4
5	132.16	13	21.44	21	4.94	29	51.45
6	60.82	14	14.33	22	52.17	30	23.66
7	49.41	15	11.30	23	47.05	31	15.27
8	37.97	16	8.12	24	23.41	32	3.62

充电站充电负荷和分布式光伏出力在规划典型日内的概率场景集分别如图 7、图 8 所示^[19]。图 7 给出的充电站充电负荷概率场景集由 5 个标么化后的充电负荷场景组成, 基准值为充电站建设容量, 场景概率分别为 0.228、0.196、0.203、0.164 与 0.209。图 8 给出的分布式光伏出力概率场景集同样由 5 个标么化后的出力场景组成, 基准值为光伏电站的装机容量, 场景概率分别为 0.257、0.151、0.203、0.189 与 0.2。

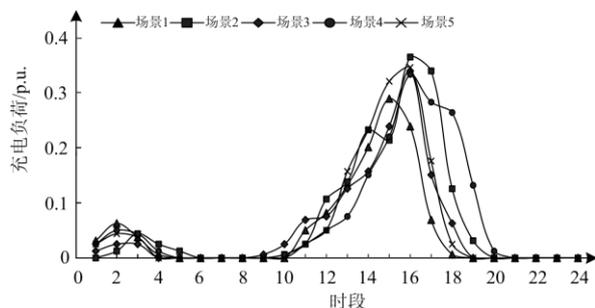


图 7 充电负荷概率场景集(标么值)

Fig. 7 Charging load scenarios (p.u.)

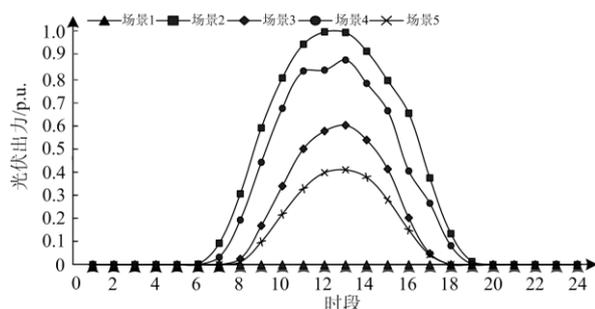


图 8 光伏出力概率场景集(标么值)

Fig. 8 PV output scenarios (p.u.)

算例假定待规划区域内的充电站建设总数为 4, 即 $M=4$; 待建充电站分为 6 类, 即 $Q=6$, 建设容量分别为 0.2 MW、0.4 MW、0.6 MW、0.8 MW、1.0 MW 与 1.2 MW; 为满足规划区域内 EV 的充电需求, 充电站最小总建设容量为 1.2 MW, 即 $C_{\min}=1.2$ MW; 配电系统节点最大电压允许偏移 $\alpha\%$ 为 10%; 电压越限置信度 β_1 为 5%; 潮流越限置信度 β_2 为 5%。

4.2 规划结果

作为电网消纳光伏的主要场所之一, 配电系统中可能存在一定容量的分布式光伏电站, 因此, 本节假定在配电系统中的节点 3 建有装机容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站, 并在此假定下进行充电网络规划。

采用 GA 对充电网络机会约束规划模型进行求

解, GA 相关参数如下: 种群规模 N_{pop} 取为 50, 最大进化代数 G_{max} 取为 200, 交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 分别取为 0.2 和 0.08。式(6)中, 参数 F_{max} 取为 5 000, 罚系数 η_1 、 η_2 与 η_3 分别取 0.6、0.02 与 0.03。为提高 GA 求解效率, 设计了专门的交叉操作算子和变异操作算子, 算法收敛性能如图 9 所示。

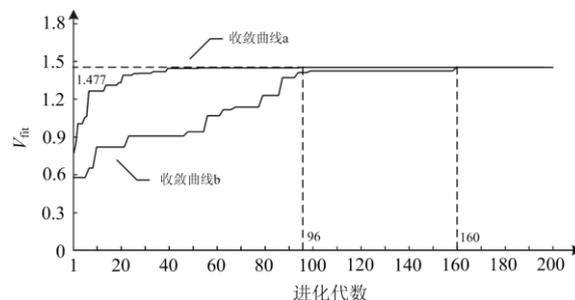


图 9 算法收敛性

Fig. 9 Algorithm convergence

图 9 中的收敛曲线 a 给出了 GA 进化中每代最优染色体的适应度, 从该曲线可看出, 每代最优染色体的适应度随种群进化而逐步提升, 当进化到第 47 代左右时, GA 趋于收敛, 并在第 96 代收敛于最优解 1.477。当采用传统的单点交叉算子和变异操作算子进行交叉、变异操作时, 各代最优染色体的适应度如图 9 中的收敛曲线 b 所示, 此时, GA 也能最终收敛于最优解 1.477, 但收敛速度要慢得多。从图 9 可看出, GA 可对本文提出的 EV 充电网络机会约束规划模型进行有效求解, 且图 2、图 3 所示的交叉操作算子和变异操作算子可有效提升算法的收敛性能。

充电网络规划方案如图 10 所示, 即分别在节点 1、2、19 和 23 建设容量分别为 1.2 MW、0.4 MW、0.2 MW 与 0.2 MW 的充电站各一座, 总建设容量为 2.0 MW, 此时, 配电系统在规划典型日内的网损电量期望为 3 384.97 kWh。

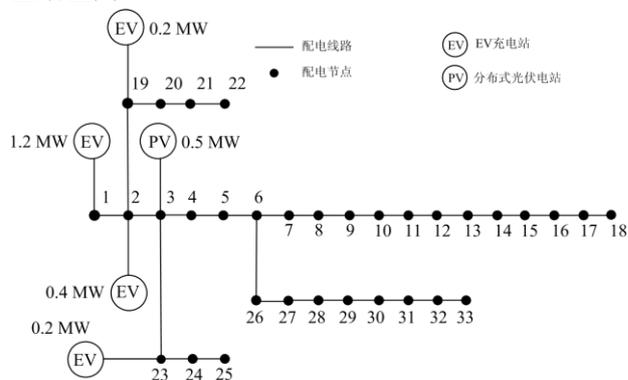


图 10 EV 充电网络规划结果

Fig. 10 EV charging network planning results

由于充电网络机会约束规划模型中考虑了节点电压偏移与支路潮流越限机会约束，配电系统在规划典型日内没有出现节点电压越限，仅线路 18 出现了潮流越限，越限概率为 4.46%，小于允许置信度 5%，具体如图 11 所示。配电系统中出现的少量潮流越限可在运行中通过需求侧管理措施消除，而无需对现状配电系统进行改造。这说明本文提出的充电网络机会约束规划模型可给出合理的充电网络规划方案，在最小化配电系统运行成本的同时，能够确保配电系统的运行状况满足要求。

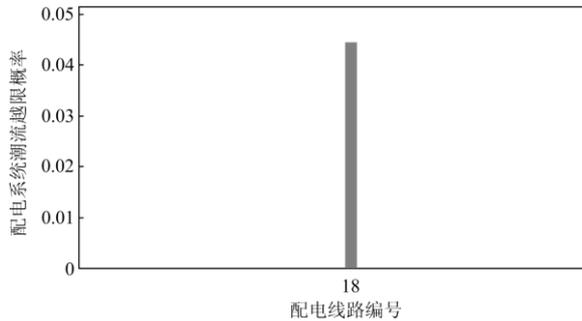


图 11 典型日内潮流越限概率

Fig. 11 Probabilities of current over limit

4.3 分布式光伏接入对充电网络规划的影响

分布式光伏接入将对配电系统运行工况产生显著影响，进而可能改变充电网络规划结果。为分析分布式光伏接入对充电网络规划的影响，本节给出了四种光伏接入边界条件下的充电网络规划。四种光伏接入边界条件如下所述。

光伏接入边界条件 A：配电系统中未接入分布式光伏电站，光伏总接入容量为 0 MW。

光伏接入边界条件 B：配电系统中的节点 3 接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站，光伏总接入容量为 0.5 MW。

光伏接入边界条件 C：配电系统中的节点 13 与 30 各接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站，总光伏接入容量为 1.0 MW。

光伏接入边界条件 D：配电系统中的节点 5、13、20 与 26 各接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站，总光伏接入容量为 2.0 MW。

光伏接入边界条件 A 下的充电网络规划结果如图 12 所示。为降低配电系统规划典型日内的网损电量，EV 充电站均建于配电系统的前端节点，即 4 座 EV 充电站分别建在节点 1、2、3 与 19，建设容量分别为 1.2 MW、0.2 MW、0.2 MW 与 0.2 MW，总建设容量为 1.8 MW。

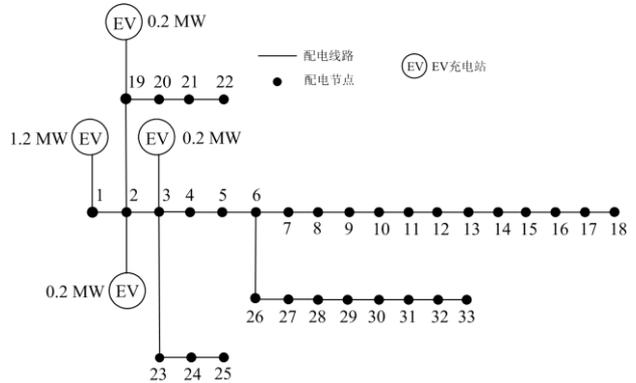


图 12 EV 充电网络规划结果(光伏接入边界条件 A)

Fig. 12 EV charging network planning results (boundary condition A of PV integration)

光伏接入边界条件 B 下的充电网络规划结果如图 10 所示。配电系统中的节点 3 接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站，此时，与光伏接入边界条件 A 相比，4 座 EV 充电站中，有 1 座 EV 充电站的建设位置发生改变，由节点 3 改建到节点 23。此外，建于节点 2 的 EV 充电站建设容量由 0.2 MW 增至 0.4 MW，总建设容量增至 2.0 MW。

光伏接入边界条件 C 下的充电网络规划结果如图 13 所示。配电系统中的节点 13 与 30 分别接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站，此时，4 座 EV 充电站分别建于节点 1、4、19 与 29，建设容量分别为 1.2 MW、0.2 MW、0.6 MW 与 0.2 MW，总建设容量为 2.2 MW。

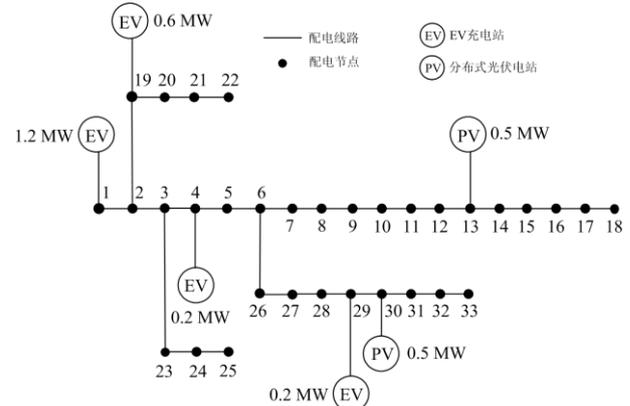


图 13 EV 充电网络规划结果(光伏接入边界条件 C)

Fig. 13 EV charging network planning results (boundary condition C of PV integration)

光伏接入边界条件 D 下的充电网络规划结果如图 14 所示。配电系统中的节点 5、13、20 与 26 分别接入容量为 0.5 MW 的分布式光伏电站。此时，与光伏接入边界条件 C 相比，4 座 EV 充电站中，有 1 座 EV 充电站的建设位置发生改变，由节点 29

改建到节点 7, 此外, 各 EV 充电站的建设容量也发生相应变化, 总建设容量由 2.2 MW 上升至 2.6 MW。

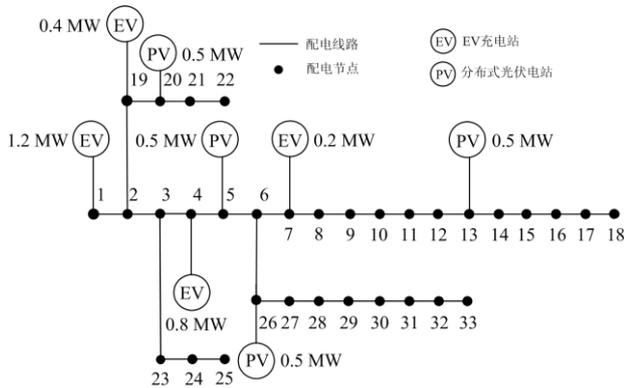


图 14 EV 充电网络规划结果(光伏接入边界条件 D)

Fig. 14 EV charging network planning results (boundary condition D of PV integration)

图 15 给出了四种光伏接入边界条件下的 EV 充电站总建设容量和配电系统规划典型日的网损电量期望。从图中可看出, 不同光伏接入边界条件下, 随着光伏接入容量增加, 尽管充电站建设总容量逐步增大, 但配电系统规划典型日内的网损电量期望逐步下降, 由光伏接入边界条件 A 下的 3467.67 kWh 下降至光伏接入边界条件 D 下的 2892.49 kWh, 降幅为 17.3%。

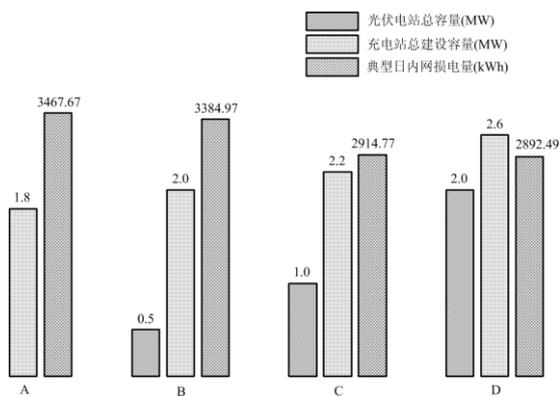


图 15 不同光伏接入边界条件下的充电站总建设容量和网损电量期望

Fig. 15 Total capacity of EV charging station and the expected power loss of the grid under different boundary conditions of PV integration

从以上分析看出, 分布式光伏接入对 EV 充电网络规划存在显著影响, 主要体现在以下两方面。

1) 显著影响 EV 充电站建设位置: EV 充电站接入配电系统后, 部分线路供电负荷相应增加, 整个

配电系统的网损电量也随之增大, 且 EV 充电站建设容量越大, 配电系统网损电量越大。因此, 分布式光伏接入之前, 为降低配电系统规划典型日内的网损电量, EV 充电站均建于配电系统的前端节点, 如光伏接入边界条件 A 下, EV 充电站建于节点 1、2、3 和 19。分布式光伏接入后, 部分 EV 充电站改建到分布式光伏接入点附近, 如光伏接入边界条件 C 下, 一座 EV 充电站建于光伏接入点附近的节点 29, 由分布式光伏对其就近供电, 减少配电系统规划典型日内的网损电量。

2) 显著影响配电系统中可接入的 EV 充电站总容量: 为避免引起线路潮流越限和节点电压偏移超标, 配电系统中可接入的 EV 充电站总容量存在上限。分布式光伏接入后, 出力可在一定程度上抵消充电负荷, 可削弱大规模 EV 充电对配电系统运行的不利影响。因此, 随着分布式光伏接入容量的增加, 配电系统中可接入的 EV 充电站总容量将随之增大。光伏接入边界条件 A 下, 配电系统可接纳的 EV 总容量仅为 1.8 MW, 而随着光伏接入容量的增加, 光伏接入边界条件 B、C 与 D 下, 配电系统可接纳的 EV 总容量分别增至 2.0 MW、2.2 MW 与 2.6 MW。

总的来说, 分布式光伏接入后, EV 充电站的接入位置和容量将同时发生改变。随着分布式光伏的逐步接入, 部分 EV 充电站将由配电系统前端节点改建到分布式光伏接入点附近, 就近消纳分布式光伏电量, 与此同时, 配电系统中可接入的 EV 充电站总容量也将随之增大。

5 总结

随着 EV 技术^[29]的不断革新和环境污染的日益加剧, EV 产业得到快速发展, EV 充电设施的大量接入, 加之车主的随机充电需求行为, 必然会给配电网带来影响。本文提出了一种考虑充电负荷与分布式光伏电站出力双重随机特性的充电网络规划方法。首先, 采用场景概率法进行配电系统规划典型日内的概率潮流分析。接着, 基于概率潮流计算结果建立了考虑充电站容量约束、配电网电压偏移约束、潮流约束等配电系统中的技术约束的机会约束规划模型。最后, 以配电系统网损最小为优化目标, 采用改进遗传操作的 GA 进行求解。基于 IEEE 33 节点配电系统的仿真实验验证了本文所提方法的有效性, 并基于仿真结果分析了分布式光伏接入对 EV 充电网络规划的影响。

参考文献

[1] CAI H, CHEN Q Y, GUAN Z J, et al. Day-ahead optimal

- charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [2] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车发展战略与对策[J]. *汽车工程*, 2006, 28(4): 317-321.
OUYANG Minggao. Chinese development strategy and countermeasure of energy-saving and new energy automotive[J]. *Automotive Engineering*, 2006, 28(4): 317-321.
- [3] 刘卓然, 陈健, 林凯, 等. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. *电力建设*, 2015, 36(7): 25-32.
LIU Zhuoran, CHEN Jian, LIN Kai, et al. Domestic and foreign present situation and the tendency of electric vehicles[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(7): 25-32.
- [4] 王建明, 潘志新, 李春, 等. 配电网电动汽车接纳能力分析[J]. *供用电*, 2019, 36(5): 42-47.
WANG Jianming, PAN Zhixin, LI Chun, et al. Distribution network electric vehicle hosting capability assessment[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(5): 42-47.
- [5] PIELTAIN F L, GOMEZ S R T, COSENT R, et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 206-213.
- [6] GREEN R C, WANG L, ALAM M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 544-553.
- [7] BABAEI S, STEEN D, TUAN L A, et al. Effects of plug-in electric vehicles on distribution systems: a real case of Gothenburg[C] // 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), October 11-13, 2010, Gothenberg, Sweden: 1-7.
- [8] CHEN T D, KARA K, KHAN M. Locating electric vehicle charging stations: parking-based assignment method for Seattle, Washington[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013(1): 28-36.
- [9] AKHAVAN-REZAI E, SHAABAN M F, EL-SAADANY E F, et al. Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: normal and fast charging comparison[C] // 2012 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-8.
- [10] 黄小庆, 杨秀, 陈颖, 等. 基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电站优化规划[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 176-182.
HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 176-182.
- [11] 程宏波, 肖永乐, 王勋, 等. 基于引力模型的电动汽车充电站选址规划[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(5): 61-66.
CHENG Hongbo, XIAO Yongle, WANG Xun, et al. Site planning of electric vehicles charging station based on gravity model[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(5): 61-66.
- [12] 舒隽, 唐刚, 韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(3): 10-17.
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two-stage method for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(3): 10-17.
- [13] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(8): 24-30.
TANG Xiangang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(8): 24-30.
- [14] 崔扬, 颜湘武. 城市供地不足的电动汽车充电网络规划方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(8): 138-144.
CUI Yang, YAN Xiangwu. Planning of electric vehicle charging network for urban areas with insufficient land supply[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2020, 32(8): 138-144.
- [15] 臧海祥, 傅雨婷, 陈铭, 等. 基于改进自适应遗传算法的 EV 充电站动态规划[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(1): 163-170.
ZANG Haixiang, FU Yuting, CHEN Ming, et al. Dynamic planning of EV charging stations based on improved adaptive genetic algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(1): 163-170.
- [16] 张成, 滕欢. 电动汽车充电站规划模型及评价方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26(1): 49-52.
ZHANG Cheng, TENG Huan. Planning model and evaluation method for electric vehicle charging station[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2014, 26(1): 49-52.
- [17] 杨冰, 王丽芳, 廖承林, 等. 不确定充电习惯对电动汽车充电负荷需求及充电负荷调节的影响[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 226-232.

- YANG Bing, WANG Lifang, LIAO Chenglin, et al. Effects of uncertainty charging habits on electric vehicles' charging load demand and the charging load regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 226-232.
- [18] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.
- PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [19] 钱科军, 刘乙, 张新松, 等. 考虑电动汽车充电负荷的配电系统场景概率潮流分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 62-70.
- QIAN Kejun, LIU Yi, ZHANG Xinsong, et al. Scenario-based probabilistic power flow calculation of distribution systems with electric vehicle charging loads[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 62-70.
- [20] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [21] 刘季昂, 刘友波, 程明畅, 等. 基于分位数半径动态 K-means 的分布式负荷聚类算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 15-22.
- LIU Ji'ang, LIU Youbo, CHENG Mingchang, et al. A distributed load clustering algorithm based on quantile radius dynamic K-means[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 15-22.
- [22] 陈蓉珺, 何永秀, 陈奋开, 等. 基于系统动力学和蒙特卡洛模拟的电动汽车日负荷远期预测[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 126-134.
- CHEN Rongjun, HE Yongxiu, CHEN Fenkai, et al. Long-term daily load forecast of electric vehicle based on system dynamics and Monte Carlo simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 126-134.
- [23] 沈依婷, 张菁, 武鹏, 等. 含电动汽车的配电网双重不确定性网架规划方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 139-146.
- SHEN Yiting, ZHANG Jing, WU Peng, et al. Bi-uncertainty network frame planning method for distribution network with electric vehicles[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 139-146.
- [24] 张新松, 袁越, 傅质馨. 基于隐性备用约束的机组组合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 136-142.
- ZHANG Xinsong, YUAN Yue, FU Zhixin. The unit commitment formulation with implicit reserve constraint[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 136-142.
- [25] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 6-9.
- ZHANG Lizi, SHU Jun, LIN Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 6-9.
- [26] 周建平, 林韩, 温步瀛. 改进量子遗传算法在输电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 90-95.
- ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Application of improved quantum genetic algorithm in transmission network expansion planning[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 90-95.
- [27] 陈刚, 区允杰, 孙景涛, 等. 基于改进遗传算法的含 VSC-MTDC 交直流混联系统最优无功潮流计算方法[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 132-140.
- CHEN Gang, OU Yunjie, SUN Jingtao, et al. Optimal reactive power flow calculation method of AC-DC hybrid system with VSC-MTDC based on improved Genetic Algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 132-140.
- [28] 张琛, 詹志辉. 遗传算法选择策略比较[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(23): 5471-5474, 5478.
- ZHANG Chen, ZHAN Zhihui. Comparisons of selection strategy in genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(23): 5471-5474, 5478.
- [29] 冷祥彪, 孙成龙, 袁太平, 等. 电动汽车有序充放电的控制与关键问题综述[J]. 广东电力, 2020, 33(11): 34-43.
- LENG Xiangbiao, SUN Chenglong, YUAN Taiping, et al. Review on control strategies and key problems of coordinated charging and discharging of electric vehicles[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 34-43.

收稿日期: 2020-05-22; 修回日期: 2020-11-25

作者简介:

徐杨杨(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术与电动汽车充放电技术; E-mail: 1064890987@qq.com

张新松(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电动汽车并网、可再生能源发电技术与电力系统规划; E-mail: prettypebble@163.com

郭云翔(1988—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源发电技术。E-mail: guoyx@ntu.edu.cn

(编辑 魏小丽)