

考虑交通网络不确定性及SESS与MESS空间配合的分布式储能防灾应急规划

高志海¹, 沈美燕¹, 马龙义², 宋莹², 沈鑫皓², 杨莉¹, 林振智¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027; 2. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东惠州 516000)

摘要:为在大规模停电后提供紧急电力支持,提出一种考虑交通网络不确定性及固定储能系统(SESS)和移动储能系统(MESS)空间配合的分布式储能(DES)防灾应急规划方法。基于正态分布区间数,建立通行时间不确定的MESS调度交通网络模型,提出考虑SESS与MESS空间配合效应的联合应急供电策略。采用机会约束描述交通网络不确定性,构建考虑供电可靠性最优的DES选址定容模型。将机会约束转换为确定性等价类,针对DES防灾应急系统多个供电可靠性衡量指标间的冗余问题,提出基于规格化法平面约束法的多目标优化求解方法。采用改进的IEEE 30节点系统及交通网络进行验证,结果表明所提方法能够实现多区域最优配置,验证了SESS与MESS的空间配合效应,并反映了交通网络不确定性对规划结果的影响。

关键词:防灾应急;分布式储能规划;交通网络;机会约束规划;规格化法平面约束法

中图分类号: TM715

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202405023

0 引言

全球范围内频繁出现极端天气、设备故障、操作失误等事件,导致多次大面积停电事故^[1-2]。2021年2月,美国得州因严重冬季风暴出现大规模停电事件,高峰时有450万户家庭和企业停电,大量网络及通信服务中断,近七成得州人平均停电42 h^[3];2023年1月23日,巴基斯坦在冬季用电高峰因电压异常发生大停电,这是世界上影响人口数量第二多的大停电,一些农村地区停电时间长达24~72 h,多个主要城市的工厂、医院和学校受到严重影响^[4];2023年8月15日,由于可再生能源的电压控制、保护整定等原因,巴西电力系统在10 min内损失负荷约23 368 MW,停电持续6 h 29 min,严重扰乱了巴西多个城市的公共交通、医疗、供水和网络服务,影响了约1/3的巴西人口^[5]。

在此背景下,如何提高配电网的防灾应急能力引起了广泛关注^[6-7]。包含固定储能系统(static energy storage system, SESS)和移动储能系统(mobile energy storage system, MESS)的分布式储能(distributed energy storage, DES)作为一种高灵活性的快速响应资源,其在电力防灾应急中得到了一定应用^[8-9];文献[10]考虑负荷和调配时间不确定性,以城市区域的社会效益最大为目标优化配置防灾应急电源;文献[11]通过MESS应急供电后减少的停

电损失衡量配电网的恢复力,利用纳什谈判均衡考虑配电网经济性和恢复力;文献[12]以经济性为目标在灾害发生前后动态配置MESS;文献[13-14]考虑到检修人员修复道路便于MESS调度,建立了检修人员与MESS协同优化调度模型;文献[15]在台风灾害场景下,建立以线路加固年投资成本、SESS配置年投资成本和年综合失负荷成本最小为优化目标的两阶段鲁棒优化模型;文献[16]通过模拟灾后故障场景,刻画SESS在受灾全过程的应急响应能力,建立双层规划模型,提高配电系统韧性;文献[17]提出配电系统两阶段弹性恢复模型,协同调度电动汽车、MESS以及抢修队。上述文献大多仅针对MESS或SESS中的一种资源进行配置,且没有考虑到不同供电区域在供电可靠性要求、用地成本等方面的差异性对DES选址定容的影响。

停电事故发生后,如果能充分利用在负荷点配置的SESS和在场站点停放的MESS二者间的空间配合效应协调调度,则可以提高配电系统的防灾应急供电效率,降低交通网络不确定性的影响。因此,本文首先考虑道路可能存在的阻塞,对交通网络通行时间不确定性进行建模,并提出SESS与MESS的联合应急供电策略;其次,以机会约束描述交通网络不确定性,在给定预算下构建以系统停电损失、停电用户数量和用户平均停电时间最小为目标函数的DES多目标规划模型;然后,针对上述3个具有一定冗余度的目标函数,使用仅依赖解空间的规格化法平面约束^[18](normalized normal constraint, NNC)法求解优化模型,采用熵权双基点法^[19]取得最优折中解;最后,使用改进的IEEE 30节点系统及交通网络对规划方法有效性进行验证。

收稿日期:2024-04-04;修回日期:2024-05-08

在线出版日期:2024-05-30

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(031300KK52222089)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(031300KK52222089)

1 考虑交通网络不确定性的 DES 防灾应急供电问题描述

配电系统防灾应急规划首先需要明确对应的灾害场景。筛选海量的、不确定的电力系统受损状态数据可得到典型灾害场景集 S , 并确定各场景发生频次和停电时长。灾害场景下用户的停电损失与用户的停电时间、停电功率、负荷类型及负荷重要性等级有关。MESS 调度时间与交通网络的路径、阻塞情况紧密相关, 因此包含 MESS 的 DES 防灾应急供电问题需要综合考虑负荷重要性和交通网络情况。

1.1 基于正态分布区间数的 MESS 调度交通网络建模

1.1.1 交通网络拓扑图

MESS 调度交通网络拓扑图如图 1 所示。将交通网络拓扑图记为 $G(E, R)$, 其中 E 为节点集, R 为路径集, 根据负荷点类型的不同, 定义集合 E^{MESS} 和 E^{user} 分别包含 I 个 MESS 场站点和 J 个用户负荷点。在实际的交通网络中, 有些节点既不属于场站点又不属于负荷点, 例如交叉路口、工业园区的大门, 它们决定了交通路径的实际走向, 是交通路径上不可缺少的中转点。

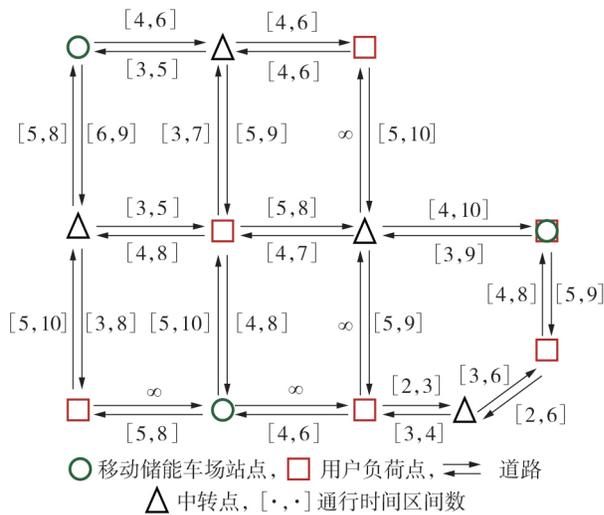


图 1 MESS 调度交通网络拓扑图

Fig.1 Topological diagram of transportation network for MESS dispatching

1.1.2 考虑不确定性的 MESS 通行时间区间数

交通网络可能发生的阻塞使 MESS 在道路上的移动速度具有不确定性, 可通过交通拥堵系数反映其运动速度与等效通行距离之间的空间调度关系, 从而建立移动储能通行时间与移动速度倒数的双射函数关系^[20], 因此可认为本文考虑 MESS 通行时间同时考虑了其移动速度。通过对大量历史数据的统计分析可确定通行时间范围, 以区间数 $t_r^s = [t_r^-, t_r^+]$ 表示道路 r 的通行时间^[21], 对于单行线而言, 逆行侧通

行时间设置为 ∞ 。在此基础上, 根据 Dijkstra 算法^[22] 得到 MESS 场站点 i 到用户负荷点 j 的最短调度时间 $t_{i,j}^s = [t_{i,j}^-, t_{i,j}^+]$ 。假定 $t_{i,j}^s$ 为正态分布区间数, 根据正态分布的 3σ 原则, $t_{i,j}^s$ 的均值 $\nu_{i,j}$ 和方差 $\sigma_{i,j}$ 分别如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$\nu_{i,j} = (t_{i,j}^- + t_{i,j}^+) / 2 \quad (1)$$

$$\sigma_{i,j} = (t_{i,j}^+ - t_{i,j}^-) / 6 \quad (2)$$

1.2 考虑 SESS 与 MESS 空间配合效应的联合应急供电策略

SESS 与 MESS 的联合应急供电是指在灾害发生后, 通过调度能覆盖某负荷点的移动储能车与配置于该点的固定储能, 满足其在受灾时间内的供电功率与电量要求。在调度过程中, MESS 虽然具有灵活的可移动性, 但能否及时到达指定负荷点取决于停放的场站位置和交通网络状况, 具有较高的不确定性。与之相反, SESS 只能为所在的负荷点提供电力, 但却更加稳定。因此, 在规划和调度过程中, 需要考虑两者之间的空间配合效应。

假设用户负荷点 j 允许停电时间为 t_j^{crit} , 其为用户重要性及其自备应急电源的持续供电时间有关。MESS 场站点 i 覆盖用户负荷点 j , 是指 MESS 场站点 i 能在 t_j^{crit} 内为用户负荷点 j 提供电力应急服务, 覆盖系数 $m_{i,j}$ 定义如式 (3) 所示。

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1 & t_{re} + t_{i,j} \leq t_j^{\text{crit}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m_{i,j} = 1, m_{i,j} = 0$ 分别表示覆盖、未覆盖; t_{re} 为场站从接到调度指令到移动储能车出发的固有应急响应时间, 假设为给定值; $t_{i,j}$ 为 MESS 场站点 i 到用户负荷点 j 的实际最短调度时间, 与交通网络不确定性有关, 是一个随机变量, $t_{i,j} \in t_{i,j}^s = [t_{i,j}^-, t_{i,j}^+]$ 。

当且仅当用户负荷点 j 在 MESS 场站点 i 的调度覆盖范围内, 即 $m_{i,j} = 1$ 时, MESS 场站点 i 才能调度移动储能车至用户负荷点 j 进行供电, 如式 (4) 所示。

$$0 \leq x_{s,i,j,k} \leq \Gamma m_{i,j} \quad s \in S \quad (4)$$

式中: $x_{s,i,j,k}$ 为灾害场景 s 下 MESS 场站点 i 调度至用户负荷点 j 的 k 型移动储能车数量; Γ 为一极大数; S 为灾害场景集合。

本文配置的 DES 面向防灾应急场景, 认为灾害发生前储能均处于满容量状态, 即荷电状态为 1, 在调度中不进行充电与变更接入点。假设用户负荷点 j 的停电功率为 d_j , 其在灾害场景 s 下需持续应急供电时间长度为 $t_{s,j}^{\text{need}}$, 该值与灾害场景 s 下的大停电恢复时间、该负荷特征、自备应急电源情况有关; 灾害场景 s 下用户负荷点 j 恢复、不恢复供电分别以 $\mu_{s,j} = 1, \mu_{s,j} = 0$ 表示, 满足如下约束:

$$P_{s,j}^{\text{total,MESS}} + P_{s,j}^{\text{total,SESS}} \geq \mu_{s,j} d_j \quad (5)$$

$$E_{s,j}^{\text{total,MESS}} + E_{s,j}^{\text{total,SESS}} \geq \mu_{s,j} d_j t_{s,j}^{\text{need}} \quad (6)$$

式中： $P_{s,j}^{\text{total,MESS}}$ 、 $E_{s,j}^{\text{total,MESS}}$ 分别为场景灾害 s 下用户负荷点 j 的 MESS 功率、电量； $P_{s,j}^{\text{total,SESS}}$ 、 $E_{s,j}^{\text{total,SESS}}$ 分别为灾害场景 s 下用户负荷点 j 的 SESS 功率、电量。

2 考虑供电可靠性最优的 DES 选址定容模型

2.1 目标函数

配电系统常用的供电可靠性指标要考虑系统或用户平均停电时间和频率,同时还要考虑负荷密度、产电比等因素^[23]。本文结合 DES 防灾应急背景,以系统停电损失、停电用户数量以及用户平均停电时间 3 个目标函数综合衡量 DES 防灾应急供电对于配电系统的供电可靠性提升效果。

1) 系统停电损失最小化。

不同供电区域的经济水平和发展水平和主要产业类型不同,它们的单位停电损失也不同。用户负荷点 j 的平均产电比系数 η_j 表征了该地区 GDP 与消耗电能量之比,单位为元 / (kW·h)。假设灾害场景 s 发生频次为 α_s (单位为次 / a),通过 DES 应急供电而恢复的负荷总价值为 B_s ,该值亦为系统停电损失的减小量,最小化系统停电损失表示为:

$$\min f_1 = -\sum_{s \in S} \alpha_s B_s = -\sum_{s \in S} \alpha_s \sum_{j \in E^{\text{user}}} \eta_j d_j t_{s,j}^{\text{need}} \mu_{s,j} \quad (7)$$

2) 停电用户数量最小化。

大停电发生后,应通过 DES 尽可能恢复用户供电,最小化停电用户数量表示为:

$$\min f_2 = \sum_{s \in S} \alpha_s \sum_{j \in E^{\text{user}}} N_j (1 - \mu_{s,j}) \quad (8)$$

式中： N_j 为用户负荷点 j 的用户数量。

3) 用户平均停电时间最小化。

用户平均停电时间越短,整体供电可靠性越高,最小化用户平均停电时间表示为:

$$\min f_3 = \sum_{s \in S} \alpha_s \left[\sum_{j \in E^{\text{user}}} N_j t_{s,j}^{\text{need}} (1 - \mu_{s,j}) \right] / \sum_{j \in E^{\text{user}}} N_j \quad (9)$$

2.2 约束条件

1) 供电功率 / 电量约束。

考虑到 DES 具有不同型号,假设 K 、 H 分别为 MESS、SESS 的可选型号集合, P_k^{MESS} 、 E_k^{MESS} 分别为 k 型移动储能车的最大输出功率、最大容量, P_h^{SESS} 、 E_h^{SESS} 分别为 h 型固定储能的最大输出功率、最大容量,用户负荷点 j 配置的 h 型固定储能数量为 $r_{j,h}$,将式 (5)、(6) 分别改写为式 (10)、(11)。

$$\sum_{i \in E^{\text{MESS}}} \sum_{k \in K} P_k^{\text{MESS}} x_{s,i,j,k} + \sum_{h \in H} P_h^{\text{SESS}} r_{j,h} - \mu_{s,j} d_j \geq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in E^{\text{MESS}}} \sum_{k \in K} E_k^{\text{MESS}} x_{s,i,j,k} + \sum_{h \in H} E_h^{\text{SESS}} r_{j,h} - \mu_{s,j} d_j t_{s,j}^{\text{need}} \geq 0 \quad (11)$$

2) 投资成本限额约束。

假设投资额度为 C_{max} ,建设周期为 1 a,不考虑资金的时间价值。投资成本包括 MESS 场站基础建设成本、移动储能车购买成本以及 SESS 单位建设(含设备)成本,需要满足:

$$\sum_{i \in E^{\text{MESS}}} \sum_{k \in K} c_k^{\text{purc}} (z_{i,k}^e - z_{i,k}^0) + \sum_{i \in E^{\text{MESS}}} c_i^{\text{new}} (y_i^e - y_i^0) + \sum_{j \in E^{\text{user}}} \sum_{h \in H} c_{j,h}^{\text{con}} r_{j,h} \leq C_{\text{max}} \quad (12)$$

式中： c_i^{new} 为 MESS 场站点 i 的基础建设成本,其因 MESS 场站点所在的区域地段、建设条件而不同； c_k^{purc} 为单位 k 型移动储能车的购买成本； $c_{j,h}^{\text{con}}$ 为用户负荷点 j 建设单位 h 型固定储能的成本； y_i^e 和 y_i^0 分别为 MESS 场站点 i 的最终选址决策量和初始选址状态量； $z_{i,k}^e$ 和 $z_{i,k}^0$ 分别为 MESS 场站点 i 中 k 型移动储能车的最终配置决策量和初始配置状态量。

3) MESS 场站点配置数量约束。

MESS 场站点 i 可配置的移动储能车数量上限为 Z_i^{max} ,即:

$$\sum_{k \in K} z_{i,k}^e \leq Z_i^{\text{max}} \quad (13)$$

4) MESS 调度覆盖系数机会约束。

实际最短调度时间 $t_{i,j}$ 依赖交通状况,为平衡供电可靠性和经济性,采用机会约束将式 (3) 改写为:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1 & P\{t_{re} + t_{i,j} \leq t_j^{\text{crit}}\} \geq \beta_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $P\{\cdot\}$ 表示事件概率,要求移动储能车从 MESS 场站点 i 及时到达用户负荷点 j 的可能性大于等于置信水平 β_j , β_j 的大小与负荷点重要性等级相关。

5) SESS 配置容量约束。

根据《浙江省用户侧电化学储能技术导则》要求,接入 0.4 kV 电压等级下的用户侧储能配置容量上限为 1 000 kW,即:

$$\sum_{h \in H} P_h^{\text{SESS}} r_{j,h} \leq 1\,000 \text{ kW} \quad (15)$$

6) 极端重要负荷点供电约束。

假设极端重要负荷点(例如炼钢厂、医院等)的集合为 Ω_{IMP} ,要求极端重要负荷点必须恢复供电,即:

$$\mu_{s,j} = 1 \quad \forall j \in \Omega_{\text{IMP}} \quad (16)$$

7) 决策变量逻辑约束。

当且仅当 MESS 场站点 i 最终选址决策量 $y_i^e = 1$ 时,MESS 场站点 i 才能配置 MESS,即:

$$\sum_{k \in K} (z_{i,k}^e - z_{i,k}^0) \leq \Gamma y_i^e \quad (17)$$

MESS 场站点 i 调度至各个用户负荷点的移动储能车总量不能大于其配置总量,即:

$$\left(\sum_{j \in E^{\text{user}}} x_{s,i,j,k} \right) \leq z_{i,k}^e \quad (18)$$

3 机会约束确定性转化和基于 NNC 法的多目标优化求解方法

3.1 机会约束确定性转化

考虑到 MESS 在交通网络中通行时间的不确定性,提出了如式(14)所示的 MESS 调度覆盖系数机会约束。目前求解机会约束优化模型一般有 2 种方法:第 1 种是基于采样将机会约束条件转换为一系列混合整数确定性约束条件,但耗时多,计算速度慢^[24];第 2 种是针对一些特殊的随机机会约束,通过将其转换为确定性等价形式进行求解^[25]。由于本文模型仅含有单一不确定参数,且不确定参数服从正态分布,因此采用第 2 种方法。

对于机会函数 $g(\mathbf{x}, \xi) = \xi - h(\mathbf{x})$, 当且仅当 $h(\mathbf{x}) \geq K_\delta$ 时,有 $P\{h(\mathbf{x}) \geq \xi\} \geq \delta$ 成立,其中 K_δ 如式(19)所示。

$$K_\delta = \phi^{-1}(\delta) \quad (19)$$

式中: $\phi(\cdot)$ 为随机变量 ξ 的概率分布函数; $\phi^{-1}(\cdot)$ 为逆函数操作; δ 为置信水平。

则可推导出式(14)的确定性等价类为:

$$m_{i,j} = \begin{cases} 1 & t_j^{\text{ent}} - t_{re} \geq F_{i,j}^{-1}(\beta_j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $F_{i,j}^{-1}(\cdot)$ 为不确定性变量 $t_{i,j}$ 满足的概率分布函数的逆函数。

3.2 基于 NNC 法的冗余多目标优化求解方法

DES 选址定容模型的 3 个优化目标为最小化用户停电损失、停电用户数量以及用户平均停电时间,它们之间显然存在一定的冗余度。针对含冗余目标的多目标优化问题,往往将其去冗余后进行求解。目前常用的去冗余方法包括基于相关性的方法和基于支配关系的方法^[26],然而这 2 种方法均需要大量的数据基础和计算量支撑,不便于工程实践应用。如果采用传统的权重法直接求解,则难以得到数量足够多的、分布均匀的 Pareto 前沿。因此,本文选择仅依赖于解空间以及目标函数本身,且对于目标函数之间的冗余关系不敏感的 NNC 法处理多目标优化问题。NNC 法的基本思想为通过对目标函数解空间规格化后,在乌托邦线上对每个等距离分割点作法线,从而将对多目标优化问题的求解转化为参数化的单目标问题求解,能得到均匀分布的 Pareto 前沿。NNC 法多目标规划问题求解原理见附录 A,求解流程图如图 2 所示。最优折中解通过主客观结合的熵权双基点法获取^[19],由于篇幅限制,其原理不再赘述。

4 算例分析

4.1 基础算例数据

算例采用改进的 IEEE 30 节点电气网络及其交

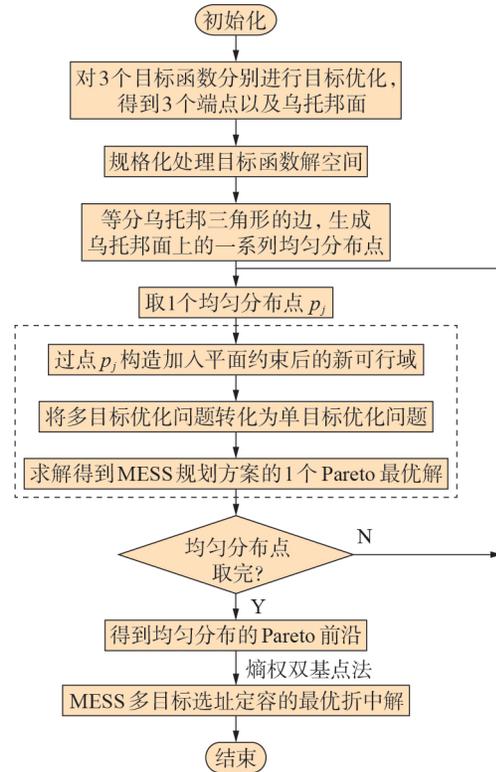


图 2 基于 NNC 法的多目标优化求解方法流程

Fig.2 Flowchart of multi-objective optimization solution method based on NNC method

通网络,如附录 B 图 B1 所示。对 DES 进行规划布局相关的交通与电气标号映射关系见附录 B 表 B1。该区域有 4 种不同的供电区域,即工业区、中心城区、生活配套区和新兴居住区,MESS 场站单位基建成本分别为 400、600、500、300 万元,移动储能车配置数量上限分别为 10、6、8、12 辆,场站 4 和场站 7 为已有 MESS 场站。各用户负荷点的负荷大小、用户数、产电比系数、允许停电时间见附录 B 表 B2,其中炼钢厂、医院和地铁等极端重要负荷点在表 B2 中以星号标出。交通网络各路径通行时间区间见附录 B 表 B3;各用户负荷点调度覆盖范围的置信水平 β 、最短调度时间区间和覆盖系数见附录 B 表 B4;灾害场景的停电频次、停电持续时间见附录 B 表 B5;不同型号移动储能车和固定储能的功率容量、配置成本等信息见附录 B 表 B6。假设项目投资成本限额为 1 亿元,系统固有应急响应时间为 3 min。

4.2 配置结果分析

采用 Cplex 求解器求解算例,得到的 Pareto 前沿解集见附录 C 图 C1。与通过权重法求解得到的结果对比可知,NNC 法求解得到的 Pareto 前沿解更均匀、数量更多,说明 NNC 法更适用于 DES 选址定容模型。

采用熵权法求得各目标函数的熵权 $\alpha = (0.2713, 0.2060, 0.5227)^T$, 假设主观权重值 $\lambda = (1/3, 1/3, 1/3)^T$ 。表 1 和附录 C 图 C2 分别为最优解处的各目标函数值 and 不同优化目标下 DES 配置方案的比较,表中用红

色字体标出了单目标最优解。由表1和图C2可见,最优折中解更能兼顾用户停电损失、停电用户数量和平均停电时间。

表1 单目标最优解与最优折中解的目标函数对比
Table 1 Comparison of objective function between single-objective optimal solutions and optimal compromise solution

优化目标	减少系统停电损失 / 万元	停电用户数 / 户	平均停电时间 / h
系统停电损失最小化	272.0	752	0.2786
停电用户数最小化	246.6	612	0.2389
平均停电时间最小化	241.5	652	0.2373
最优折中解	248.1	615	0.2397
最优折中解与单目标最优解相差的百分比	-8.79%	0.49%	1.01%

进一步分析图C2(a)可知,当仅考虑系统停电损失最小化时,DES主要被配置于中心城区、新兴居住区和生活配套区,工业区配置较少,这是因为工业区的用户产电比系数较低,停电损失较小;由图C2(b)、(c)可见,当仅考虑停电用户数或平均停电时间最小化时,负荷点间产电比系数的差异不再影响配置结果,DES在全局上的配置更为均匀;由图C2(d)所示,最优折中解的配置结果与仅考虑平均停电时间最小的配置结果相似,这是因为在进行最优折中决策时,平均停电时间的权重最大。

具体到MESS场站,除了现有场站4、7,在4种情况下均被选择新建的场站为场站2、3、6。因为场站6的覆盖用户总数最大,在此处配置移动储能车可以辐射到最多的用户,如图3所示;场站2和场站3位于中心城区,周围的重要负荷较多,在此处配置移动储能车可以最小化停电损失。工业区的唯一场站,即场站1仅在最小化停电损失时没有被选为新建,这是因为工业区的负荷产电比系数较低,停电损失相对较小。在4种情况下均没有被选为新建的场站为场站5、8,其中场站5的覆盖用户数在所有场站中排第二,这是因为这2个场站周围还分布有其他场站,场站5周围有场站1、4,场站8周围有场站2、6、7,所以它们的覆盖用户与其他场站有较大的冗余,未能被选择新建。此外,从DES容量配置上看,新兴居住区配置的移动储能车数量最多,原因是新兴居住区的用地成本低且道路宽敞、交通不易堵塞,在大多数时间内都能较快地调度移动储能车至其他区域需要用电的负荷点。而固定储能则更倾向于配置在其他城区,这是因为这些城区的重要负荷多,且道路相对更为拥堵,移动储能车的应急保供效果差,就地配置固定储能可以更好地保障负荷点的持续供电。

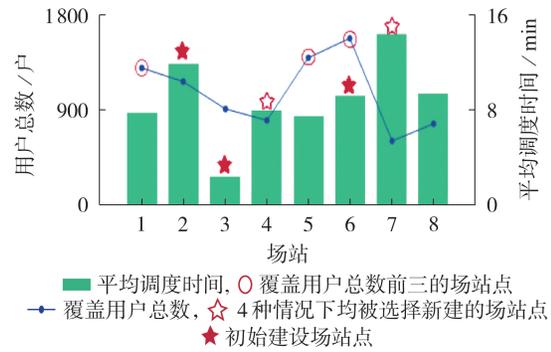


图3 各场站覆盖用户总数及到覆盖用户的平均调度时间
Fig.3 Total number of covered users by each station and their average dispatch time to covered users

4.3 SESS与MESS的空间配合效应

在防灾应急场景下,需要将特性不同的SESS与MESS在空间上互相配合。分别对仅考虑MESS和同时考虑MESS和SESS这2种情况进行求解,选取场景1下最优折中解的储能调度结果以及优化结果进行对比,分别如图4和表2所示。表中: N_{MESS} 、 N_{SESS} 分别为移动储能车、固定储能的数量。

由表2可知,相同成本限额下,同时考虑SESS与MESS相较于仅考虑MESS时系统停电损失、停电

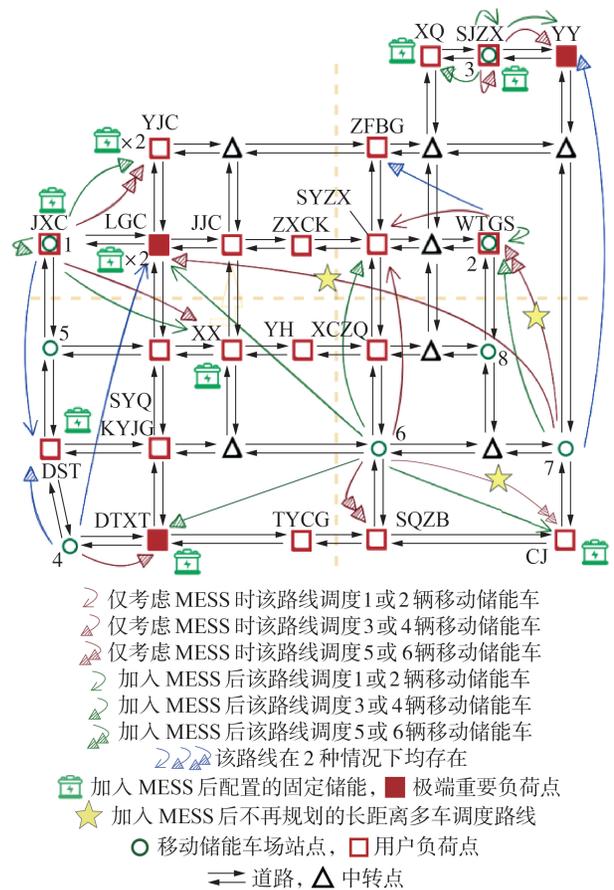


图4 是否考虑SESS的DES配置及调度结果对比
Fig.4 Comparison of DES planning and dispatching results between with and without considering SESS

表 2 是否考虑 SESS 的优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results between with and without considering SESS

情景	减少停电 损失 / 万元	停电用 户数 / 户	平均停电 时间 / h	N_{MESS} / 辆	N_{SESS} / 套	负荷 恢复 数量
仅考虑 MESS	242.8	758	0.2719	53	—	12
同时考虑 MESS 和 SESS	248.1	615	0.2397	43	11	13

用户数和平均停电时间都有所减少,并额外恢复了 1 个负荷点,能够全面提高系统供电可靠性。且由于配置了 11 套固定储能设备,移动储能车的配置数量减少了 10 辆,由此减轻了防灾应急时调度 MESS 的压力。

由图 4 可知,加入 SESS 后,能够通过在一些极端重要的负荷点(例如 LGC 和 DTXT)或者距离建设场站较远的负荷点(例如 XX)配置固定储能来满足

其应急供电需求,避免长距离的多车调度路线,提高整个系统的应急保供效率。具体而言,通过在 LGC 负荷点配置 2 套固定储能设备,避免了从距离其较远的场站 7 为其调度移动储能车的选择。可见,由于 SESS 与 MESS 的空间配合效应,对二者进行联合规划可以恢复更多负荷,提高系统供电可靠性以及在受灾场景下的应急保供效率。

4.4 交通网络不确定性对 DES 防灾应急规划结果的影响

实际上,移动储能车在交通网络中的通行时间易受环境影响,由于路况的不确定性,其调度时间与调度覆盖范围均具有波动性。假设各道路通行时间保持均值不变,改变其不确定性,即标准差的大小,验证交通网络不确定性对 DES 防灾应急规划的影响。假设原始情况道路 r 的通行时间所满足正态分布的标准差为 σ_r^0 , 改变后的标准差为 σ_r , 定义 $w = \sigma_r / \sigma_r^0$, 不同 w 下的求解结果如表 3 所示。

表 3 不同 w 下的优化结果对比Table 3 Comparison of optimization results under different values of w

w	减少停电 损失 / 万元	停电用户 数 / 户	平均停电 时间 / h	N_{MESS} / 辆	MESS 配置功率 / 容量	场站建设 数量	N_{SESS} / 套	SESS 配置功率 / 容量	负荷恢复 数量
0	274.1	532	0.2015	38	16.1 MW / 33.6 MW·h	4	20	7.80 MW / 14.0 MW·h	14
0.5	260.6	581	0.2245	47	15.5 MW / 35.8 MW·h	5	20	7.10 MW / 13.0 MW·h	13
1.0	248.1	615	0.2397	43	15.9 MW / 35.0 MW·h	6	11	5.90 MW / 10.0 MW·h	13
1.5	241.0	614	0.2405	39	14.8 MW / 32.2 MW·h	6	16	6.80 MW / 12.0 MW·h	13
2.0	239.7	783	0.2769	44	15.9 MW / 35.6 MW·h	5	18	6.95 MW / 12.5 MW·h	13
2.5	239.7	783	0.2769	45	15.9 MW / 35.4 MW·h	5	17	6.70 MW / 12.0 MW·h	13

由表 3 可见:

1) 随着交通网络不确定性的增加, DES 防灾应急规划中各目标均有所增大, 因为交通网络不确定性影响了 MESS 的调度时间和覆盖范围, 当其增大时, 对 MESS 的调度也更加困难, 因此系统的供电可靠性有所降低;

2) 当 $w=0$, 即交通网络没有不确定性时, 恢复 14 个负荷点, 数量最多, 显然确定的交通网络更有利于系统的防灾应急规划与灾后调度; 从选址定容结果来看, 负荷恢复数量相同时, 系统需要扩建新的场站 ($w=1$ 和 $w=1.5$ 时), 或者增加移动储能车 / 固定储能的配置数量、配置容量 ($w=0.5$ 、 $w=2$ 和 $w=2.5$ 时) 来平衡交通网络不确定性的影响。

5 结论

DES 对于大停电发生后关键负荷的紧急供电具有重要意义, 本文借鉴大灾害场景下配电网可靠性与投资经济性相协调的规划理念, 提出了一种以供电可靠性最优为目标, 考虑交通网络不确定性与 SESS 及 MESS 空间配合效应的 DES 防灾应急规划方法, 并使用 NNC 法求解含冗余目标的多目标优化问

题。采用改进的 IEEE 30 节点电气网络及其交通网络进行仿真验证, 得到如下结论。

1) 本文所提 DES 防灾应急规划方法考虑了各供电区域可靠性要求与用地成本的差异性, 可得到在额定投资限额下优化多个配电网可靠性指标的规划方案, 实现 DES 的多区域最优配置。

2) 本文提出了 SESS 与 MESS 的协同应急供电策略, 验证了它们之间的空间配合效应, 同时对二者进行规划可以避免长距离多车调度路线, 恢复更多的负荷, 全面提高系统的供电可靠性。

3) 本文对交通网络进行拓扑建模, 并使用机会约束描述移动储能车在交通网络调度中的不确定性。交通网络不确定性会降低系统的供电可靠性, 当其增大时, 系统的停电损失、停电用户数与平均停电时间均有所增加。

本文目前仅聚焦于配电系统受灾场景, 没有综合考虑日常 DES 电压支撑、无功优化、促进新能源消纳等功能, 未来可综合考虑日常运行与防灾应急进行规划; 其次可进一步考虑负荷点需求弹性, 提升 DES 防灾应急效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘瀚琛,王冲,鞠平,等. 计及统一潮流控制器的电力系统双层协调弹性调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(4):159-167.
LIU Hanchen,WANG Chong,JU Ping,et al. Bi-level coordinative resilience dispatching of power system considering unified power flow controller[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(4):159-167.
- [2] 姜盛波,杨军,王建雄,等. 基于预防-紧急协调控制的大电网连锁故障防御策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):148-154.
JIANG Shengbo,YANG Jun,WANG Jianxiong,et al. Defense strategy against large power grid cascading failure based on coordinated preventive-emergency control[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):148-154.
- [3] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.
WANG Weisheng,LIN Weifang,HE Guoqing,et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4033-4043.
- [4] 屠竞哲,何剑,安学民,等. 巴基斯坦“2023.1.23”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2023,43(14):5319-5328.
TU Jingze,HE Jian,AN Xuemin,et al. Analysis and lessons of Pakistan blackout event on January 23,2023[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(14):5319-5328.
- [5] 王国春,董昱,许涛,等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2023,43(24):9461-9469.
WANG Guochun,DONG Yu,XU Tao,et al. Analysis and lessons of Brazil blackout event on August 15,2023[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(24):9461-9469.
- [6] MA S S,SU L,WANG Z Y,et al. Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(5):4842-4853.
- [7] 杜诗嘉,郭创新,俞啸玲,等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):176-186,209.
DU Shijia,GUO Chuangxin,YU Xiaoling,et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(2):176-186,209.
- [8] 孙亮,孙萌萌,赵海猛,等. 考虑移动式储能的综合能源系统冰灾后抢修与调度协同优化[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):10-16,56.
SUN Liang,SUN Mengmeng,ZHAO Haimeng,et al. Cooperative optimization of emergency repair and dispatch for integrated energy system considering mobile energy storage after ice disaster[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(1):10-16,56.
- [9] TUR M R. Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique[J]. IEEE Access,2020,8:77962-77971.
- [10] 王志奎,孙磊,林振智,等. 计及负荷和调配时间不确定性的防灾应急电源优化配置[J]. 电力系统自动化,2018,42(2):34-41.
WANG Zhikui,SUN Lei,LIN Zhenzhi,et al. Optimal allocation of emergency power sources considering uncertainties of loads and dispatching time periods[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(2):34-41.
- [11] 张璐,黄睿,王照琪,等. 考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(21):23-31.
ZHANG Lu,HUANG Rui,WANG Zhaoqi,et al. Optimal configuration strategy of mobile energy storage in distribution network considering balance between resilience and economy[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(21):23-31.
- [12] KIM J,DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(5):4996-5006.
- [13] ZHANG L,YU S J,ZHANG B,et al. Outage management of hybrid AC/DC distribution systems:co-optimize service restoration with repair crew and mobile energy storage system dispatch[J]. Applied Energy,2023,335:120422.
- [14] 陈韵含,许寅,王颖,等. 考虑潜在恢复需求的城市配电网移动应急资源灾前布点[J]. 电力系统自动化,2023,47(14):105-113.
CHEN Yunhan,XU Yin,WANG Ying,et al. Pre-disaster positioning of mobile emergency resources for urban distribution network considering potential restoration demand[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(14):105-113.
- [15] 张海波,马伸铜,程鑫,等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术,2021,45(1):259-268.
ZHANG Haibo,MA Shentong,CHENG Xin,et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. Power System Technology,2021,45(1):259-268.
- [16] 陈碧云,金洋,徐旗,等. 计及灾后恢复全过程储能应急响应能力的配电网韧性规划[J]. 电网技术,2024,48(5):1855-1862.
CHEN Biyun,JIN Yang,XU Qi,et al. Resilience planning of distribution networks considering emergency response capability of energy storage throughout entire process of post-disaster recovery[J]. Power System Technology,2024,48(5):1855-1862.
- [17] MONDAL S,GHOSH P,DE M L. Evaluating the impact of coordinated multiple mobile emergency resources on distribution system resilience improvement[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks,2024,38:101252.
- [18] LIN S J,LIU M B,LI Q F,et al. Normalised normal constraint algorithm applied to multi-objective security-constrained optimal generation dispatch of large-scale power systems with wind farms and pumped-storage hydroelectric stations[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2017,11(6):1539-1548.
- [19] LIU R H,YANG T,SUN G P,et al. Multi-objective optimal scheduling of community integrated energy system considering comprehensive customer dissatisfaction model[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2023,38(5):4328-4340.
- [20] 王月汉,刘文霞,姚齐,等. 面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(15):37-45.
WANG Yuehan,LIU Wenxia,YAO Qi,et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(15):37-45.
- [21] WANG H,LIN Z Z,WEN F S,et al. Black-start decision-making with interval representations of uncertain factors[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2016,79:34-41.
- [22] ZHAO J,LI S H,WU F J,et al. System reliability evaluation of 12-pulse series converter station based on improved Dijkstra algorithm[J]. Electric Power Systems Research,2024,226:109909.
- [23] 张晋铭,欧阳森,吴晗,等. 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J/OL]. 电力自动化设备. (2024-01-04)[2024-05-24]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312044>.
- [24] 柳玉,赵延顺,张沛. 考虑功率预测偏差和出力调节不确定性

- 的风电集群功率分配策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(2):110-116.
- LIU Yu,ZHAO Yanshun,ZHANG Pei. Power allocation strategy of wind power cluster considering power forecasting deviation and output regulation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(2):110-116.
- [25] 胡银龙,叶梓松,解振霖,等. 基于机会约束的售电公司共享储能经济运行优化[J]. 电力自动化设备,2024,44(5):44-50.
- HU Yinlong, YE Zisong, XIE Zhenlin, et al. Economic operation optimization of shared energy storage for electricity retailer based on chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(5):44-50.
- [26] LI Y F, LIU H L, GOODMAN E D. Hyperplane-approximation-based method for many-objective optimization pro-

blems with redundant objectives[J]. Evolutionary Computation, 2019,27(2):313-344.

作者简介:

高志海(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为分布式储能规划(**E-mail**:22310063@zju.edu.cn);

沈美燕(1996—),女,硕士,主要研究方向为配电网规划(**E-mail**:shen_meiyan@zju.edu.cn);

杨莉(1974—),女,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力市场与电力经济、综合能源系统运行与规划(**E-mail**:eeyangli@zju.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Distributed energy storage planning for disaster prevention and emergency considering transportation network uncertainty and SESS-MESS spatial coordination

GAO Zhihai¹, SHEN Meiyang¹, MA Longyi², SONG Ying², SHEN Xinhao², YANG Li¹, LIN Zhenzhi¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516000, China)

Abstract: To provide emergency power support after a large-scale power outage, a distributed energy storage (DES) planning method for disaster prevention and emergency considering the transportation network uncertainty and spatial coordination of static energy storage system (SESS) and mobile energy storage system (MESS) is proposed. Based on the normal distribution interval number, the MESS dispatching transportation network model with uncertain travel time is established, and the joint emergency power supply strategy considering the spatial coordination effect of SESS and MESS is proposed. By using chance constraint to describe the uncertainty of transportation network, a DES location and capacity decision model considering optimal power supply reliability is constructed. Then, the chance constraint is converted into a deterministic equivalence class. Aiming at the redundancy problem among multiple power supply reliability measures of DES disaster prevention and emergency system, a multi-objective optimization method based on normalized normal constraint method is proposed. The improved IEEE 30-bus system and transportation network are used for validation, and the results show that the proposed method can achieve the multi-region optimal configuration, demonstrate the spatial coordination effect of SESS and MESS, and reflect the impact of transportation network uncertainty on the planning results.

Key words: disaster prevention and emergency; distributed energy storage planning; transportation network; chance-constrained planning; normalized normal constraint method

附录 A

对于 3 个目标的多目标优化问题，NNC 法的具体求解原理及过程如下。

1) 对 3 个目标函数分别进行单目标优化，得到 3 个端点以及乌托邦面。

当仅考虑 $f_1(x)$ 系统停电损失最小化时，得到最优解 x^{1*} ，在分别由 3 个目标函数为 xyz 轴的空间坐标系下，对应的端点坐标为 $(f_1(x^{1*}), f_2(x^{1*}), f_3(x^{1*}))$ ，同理分别对另外两个目标进行单目标优化，得到端点坐标为 $(f_1(x^{2*}), f_2(x^{2*}), f_3(x^{2*}))$ 和 $(f_1(x^{3*}), f_2(x^{3*}), f_3(x^{3*}))$ ，上述 3 个端点所确定的平面被称为乌托邦面，如图 A1 所示。图 A1 中整个碗状立体范围内都为可行域。

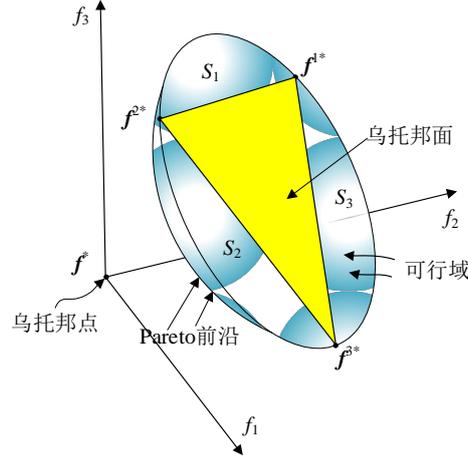


图 A1 多目标优化问题的乌托邦面和 Pareto 前沿

Fig.A1 Utopia plane and Pareto frontier of multi-objective optimization problem

2) 规格化处理目标函数解空间。

本文所构建的三个目标的量纲和数量级差异巨大，因此对 3 个目标函数进行规格化处理，用 $\bar{f}_i(x)$ 表示规格化后的目标函数，以第 i 个目标函数为例：

$$\bar{f}_i(x) = (f_i(x) - f_i(x^{i*})) / (f_i^N - f_i(x^{i*})) \quad (\text{A1})$$

式中： f_i^N 为第 i 个目标函数假想的最差点，其表达式如下：

$$f_i^N = \max \{ f_i(x^{1*}), f_i(x^{2*}), f_i(x^{3*}) \} \quad (\text{A2})$$

3) 生成乌托邦面上的一系列均匀分布点。

在图 A1 所示的乌托邦三角形内取一系列均匀分布的点，记为 p_1, p_2, \dots, p_n ，在规格化后的坐标系下，这些点可由 3 个端点的线性组合表示，如下：

$$p_j = \sum_{i=1}^3 \beta_{ij} \bar{f}^{i*} \quad (\text{A3})$$

式中： $\sum_{i=1}^3 \beta_{ij} = 1$ 。

4) 过某个均匀分布点 p_j 构造加入平面约束后的新可行域，将多目标优化问题转化为单目标优化问题，求解得到点 p_j 对应的 DES 规划方案的 Pareto 最优解。

记 N_1 为点 \bar{f}^{1*} 指向点 \bar{f}^{3*} 的向量， N_2 为点 \bar{f}^{2*} 指向点 \bar{f}^{3*} 的向量， N_3 为点 \bar{f}^{1*} 指向点 \bar{f}^{2*} 的向量。过点 p_j 作平面 a_1 垂直于向量 N_1 和平面 a_2 垂直于向量 N_2 ，如图 A2 所示。平面 a_1 和 a_2 将目标函数空间中可行域分为两部分，其中，图 A2 中的绿色部分称为加入约束后的可行域，在该区域内求 $f_3(x)$ 单目标最优问题

即可得到点 p_j 对应的 Pareto 前沿上的点 μ_j ，求解的优化模型如下：

$$\begin{cases} \min f_3(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x})=0 \\ \underline{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{N}_1^T (\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) - p_j) \leq 0 \\ \mathbf{N}_2^T (\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) - p_j) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{A4})$$

式中： $\bar{\mathbf{F}}(\mathbf{x})$ 为规格化的解空间。

可见，解优化模型式 (A4) 得到的点 μ_j 就是点 p_j 沿着乌托邦面的法线方向投影所得到的 Pareto 最优点。

5) 在乌托邦面上重复取点，得到均匀分布的 Pareto 前沿。

同理，可用上述方法求解出乌托邦面上三角形内其他均匀分布的点对应的 Pareto 最优点，从而得到均匀分布的 Pareto 前沿。

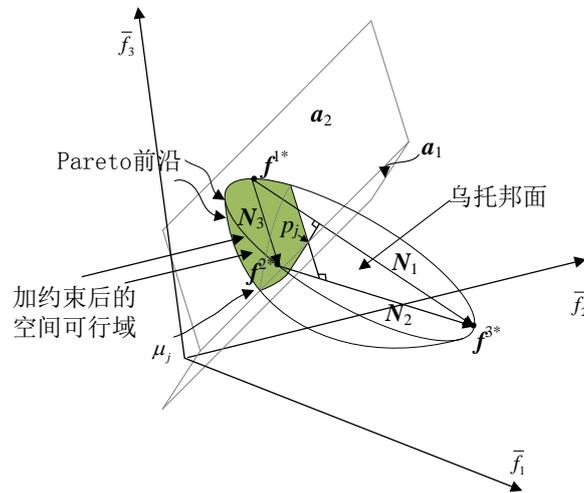


图 A2 求解 Pareto 前沿的 NCC 法原理

Fig.A2 Principle of NNC method for solving Pareto frontier

附录 B

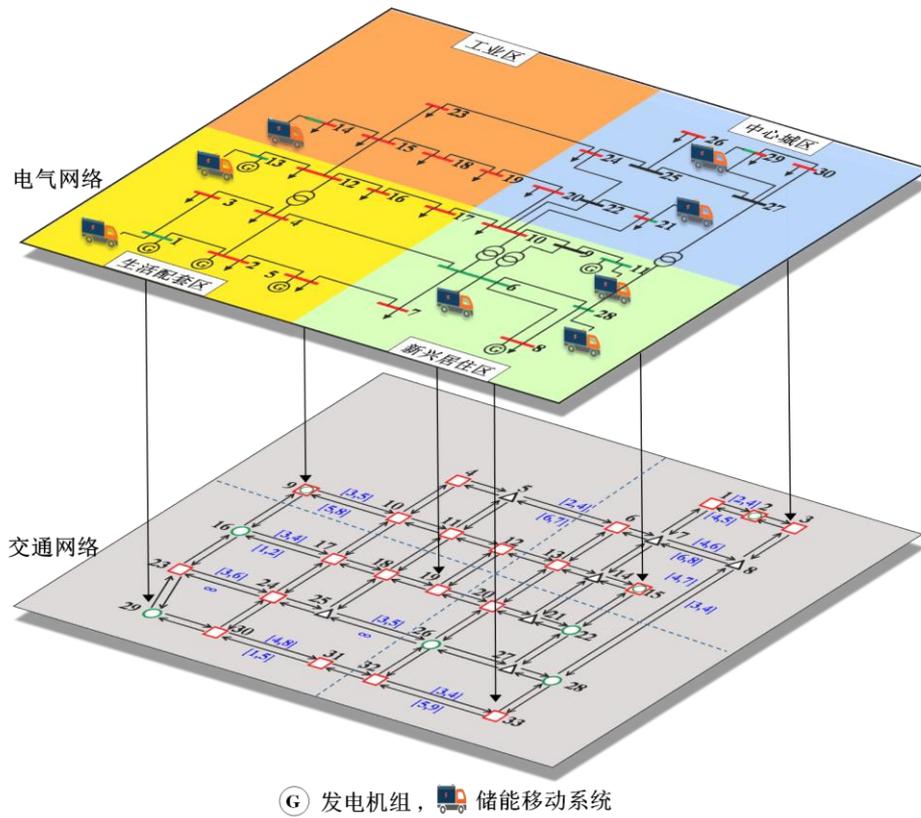


图 B1 改进的 IEEE 30 节点电气网络及其交通网络

Fig.B1 Improved IEEE 30-node electrical networks and its transportation networks

表 B1 交通标号-电气标号映射数组表

Table B1 Mapping array table of traffic label-electrical label

交通标号	电气标号	交通标号	电气标号	交通标号	电气标号
1	26	13	20	24	4
2	29 (场站 3)	15	21 (场站 2)	26	6 (场站 6)
3	30	16	13 (场站 5)	28	28 (场站 7)
4	23	17	12	29	1 (场站 4)
6	24	18	16	30	2
9	14 (场站 1)	19	17	31	5
10	15	20	10	32	7
11	18	22	11 (场站 8)	33	8
12	19	23	3		

电力自动化设备

表 B2 用户负荷点信息
Table B2 Information of user load points

所属供电区域	电气标号	地址名称	不同重要性负荷/kW				用户数/户	产电比系数 /[元·(kW·h) ⁻¹]	允许停电时间/min
			一般	过渡	重要	极端重要			
①工业区	23	冶金厂	688	468	565	280	214	21.65	18
	14	机械厂	600	601	305	176	189	24.56	20
	15	*炼钢厂	146	204	111	612	141	21.58	30
	18	家具厂	636	405	468	279	63	26.77	16
	19	中心仓库	559	205	157	149	53	24.98	19
②中心城区	26	小区	122	356	1000	379	327	35.62	10
	29	数据中心	150	223	288	407	280	28.37	18
	30	*医院	370	272	760	900	299	30.99	30
	24	政府办公	179	351	431	876	359	32.49	18
	20	商业中心	180	201	392	713	203	34.06	14
	21	网通公司	262	356	493	767	172	31.49	16
③生活配套片区	12	商业区	517	438	379	176	115	35.73	15
	16	学校	567	233	281	111	269	31.89	15
	17	银行	604	665	425	119	116	32.95	15
	3	电视台	673	543	439	225	187	31.88	15
	4	科研机构	733	524	203	156	101	28.76	14
	2	*地铁系统	651	138	228	114	72	33.48	30
	5	体育场馆	950	605	194	105	109	33.66	13
④新兴居住区	10	新城镇区	221	206	386	468	130	25.79	9
	7	商圈周边	398	602	743	890	242	23.45	9
	8	城郊	160	279	304	767	398	21.22	11

表 B3 交通网络路径的正向、逆向通行时间区间

Table B3 Forward and reverse travel time interval of transportation networks

路径编号	始节点标号	末节点标号	正向通行时间区间/min	逆向通行时间区间/min
1	1	2	[2,4]	[4,5]
2	2	3	[1,4]	[4,6]
3	1	7	[3,6]	[4,8]
4	3	8	[2,4]	[3,4]
5	4	5	[2,4]	[4,6]
6	5	6	[2,4]	[6,7]
7	6	7	[4,7]	[2,6]
8	7	8	[4,6]	[6,8]
9	4	10	[2,4]	[4,8]
10	5	11	[2,5]	[5,8]
11	6	13	[3,5]	[3,8]
12	7	14	[3,5]	[1,2]
13	8	28	[3,4]	[4,7]
14	9	10	[3,5]	[5,8]
15	10	11	[2,3]	[3,4]
16	11	12	[3,5]	[1,4]
17	12	13	[4,7]	[6,9]
18	13	14	[4,7]	[1,4]
19	14	15	[6,8]	[5,6]
20	9	16	[4,6]	[2,5]
21	10	17	[2,5]	[1,4]
22	11	18	[2,4]	[3,5]
23	12	19	[2,3]	[6,7]
24	13	20	[2,6]	[1,5]
25	14	21	[3,6]	[3,7]
26	15	22	[3,8]	[2,7]
27	16	17	[3,4]	[1,2]
28	17	18	[4,6]	[2,4]
29	18	19	[3,5]	[2,4]
30	19	20	[3,4]	[2,4]
31	20	21	[5,6]	[4,6]
32	21	22	[3,4]	[3,8]
33	16	23	[2,5]	[4,5]
34	17	24	[5,6]	[3,7]
35	18	25	[3,6]	[2,6]
36	20	26	[5,9]	[4,8]
37	22	27	[2,3]	[3,4]
38	23	24	[3,6]	9999
39	24	25	[4,5]	9999
40	25	26	[3,5]	9999

续表

续表				
41	26	27	[3,5]	9999
42	27	28	[5,6]	9999
43	23	29	[4,5]	[2,3]
44	24	30	[1,3]	[4,6]
45	26	32	[1,2]	[5,6]
46	28	33	[1,4]	[4,8]
47	29	30	[4,6]	[5,9]
48	30	31	[4,8]	[1,5]
49	31	32	[6,7]	[2,5]
50	32	33	[3,4]	[5,9]

表 B4 各场站到各负荷点的最短调度时间区间、覆盖系数以及调度覆盖范围的置信水平

Table B4 Shortest dispatch time interval and coverage factor
from stations to each load point and confidence of dispatch coverage

地址名称	β	最短调度时间区间/min, 覆盖系数							
		场站 1	场站 2	场站 3	场站 4	场站 5	场站 6	场站 7	场站 8
冶金厂	0.7	[7,13],1	[17,28],0	[19,30],0	[13,24],0	[8,16],1	[15,32],0	[18,35],0	[21,47],0
机械厂	0.7	[0,0],1	[17,36],0	[23,41],0	[8,13],1	[2,5],1	[13,27],0	[16,33],0	[20,44],0
*炼钢厂	1	[3,5],1	[15,27],1	[20,32],0	[9,16],1	[4,8],1	[11,24],1	[14,30],1	[18,40],0
家具厂	0.7	[4,8],1	[13,24],0	[17,29],0	[11,19],0	[5,11],1	[11,20],0	[14,26],0	[20,39],0
中心仓库	0.7	[7,13],1	[12,19],0	[17,29],0	[14,24],0	[8,16],1	[11,19],0	[13,25],0	[20,38],0
小区	0.9	[20,34],0	[10,16],0	[4,5],1	[26,46],0	[21,38],0	[14,29],0	[11,23],0	[13,22],0
数据中心	0.9	[22,39],0	[12,21],0	[0,0],1	[28,46],0	[23,42],0	[16,27],0	[13,25],0	[11,17],0
*医院	1	[23,43],0	[13,25],1	[1,4],1	[27,40],0	[24,41],0	[15,21],1	[14,19],1	[7,11],1
政府办公	0.9	[12,20],0	[8,15],1	[9,17],0	[18,31],0	[13,23],0	[8,20],0	[10,22],0	[12,34],0
商业中心	0.8	[11,21],0	[6,10],1	[11,20],0	[17,31],0	[12,23],0	[5,12],1	[8,18],0	[14,31],0
网通公司	0.8	[20,35],0	[0,0],1	[16,24],0	[21,35],0	[21,36],0	[9,16],0	[2,7],1	[19,35],0
商业区	0.8	[5,10],1	[14,29],0	[19,37],0	[8,12],1	[3,4],1	[9,20],0	[13,26],0	[17,36],0
学校	0.7	[6,12],1	[12,25],0	[17,33],0	[11,18],0	[7,10],1	[8,16],0	[11,21],0	[19,35],0
银行	0.9	[9,16],0	[10,21],0	[15,31],0	[14,22],0	[10,14],0	[5,12],1	[8,18],0	[17,31],0
电视台	0.9	[6,11],1	[17,36],0	[22,44],0	[2,3],1	[2,5],1	[11,24],0	[16,33],0	[16,35],0
科研机构	0.9	[9,16],0	[19,35],0	[20,42],0	[5,9],1	[5,10],1	[9,18],0	[17,31],0	[14,29],0
*地铁系统	1	[10,19],1	[18,38],0	[16,36],0	[4,6],1	[7,13],1	[5,12],1	[17,31],0	[10,23],1
体育场馆	0.8	[14,27],0	[17,33],0	[15,31],0	[7,14],0	[10,21],0	[4,7],1	[16,26],0	[9,18],0
新城镇区	0.7	[12,20],0	[8,17],0	[13,27],0	[16,26],0	[12,18],0	[4,8],0	[7,13],0	[15,27],0
商圈周边	0.8	[13,25],0	[15,27],0	[12,25],0	[13,20],0	[14,22],0	[1,2],1	[13,21],0	[6,13],0
城郊	0.7	[16,29],0	[12,20],0	[7,16],0	[16,24],0	[16,26],0	[4,6],1	[8,12],0	[1,4],1

表 B5 灾害场景的停电频次和停电持续时间

Table B5 Frequency and duration of outages for outage scenarios

场景	停电频次/ (次·a ⁻¹)	停电持续时间/h
1	0.3	1
2	0.2	2
3	0.1	3

表 B6 DES 配置信息

Table B6 Configuration information of DES

DES 型号	功率/kW	容量/(kW·h)	单位配置成本/万元			
			工业区	中心城区	生活配套区	新兴居住区
I型移动储能车	100	200	45	45	45	45
II型移动储能车	200	600	92	92	92	92
III型移动储能车	500	1000	193	193	193	193
I型固定储能	250	500	75	150	130	100
II型固定储能	600	1000	140	250	200	180

附录 C

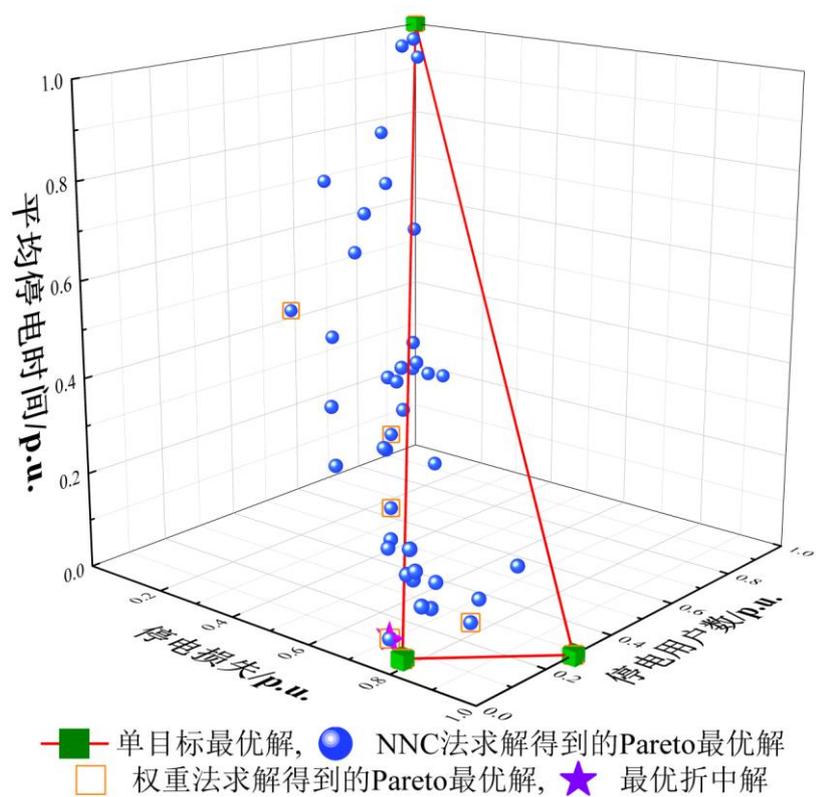


图 C1 多目标规划下的 Pareto 前沿和最优折中解

Fig.C1 Pareto frontier and optimal compromise solution of multi-objective programming

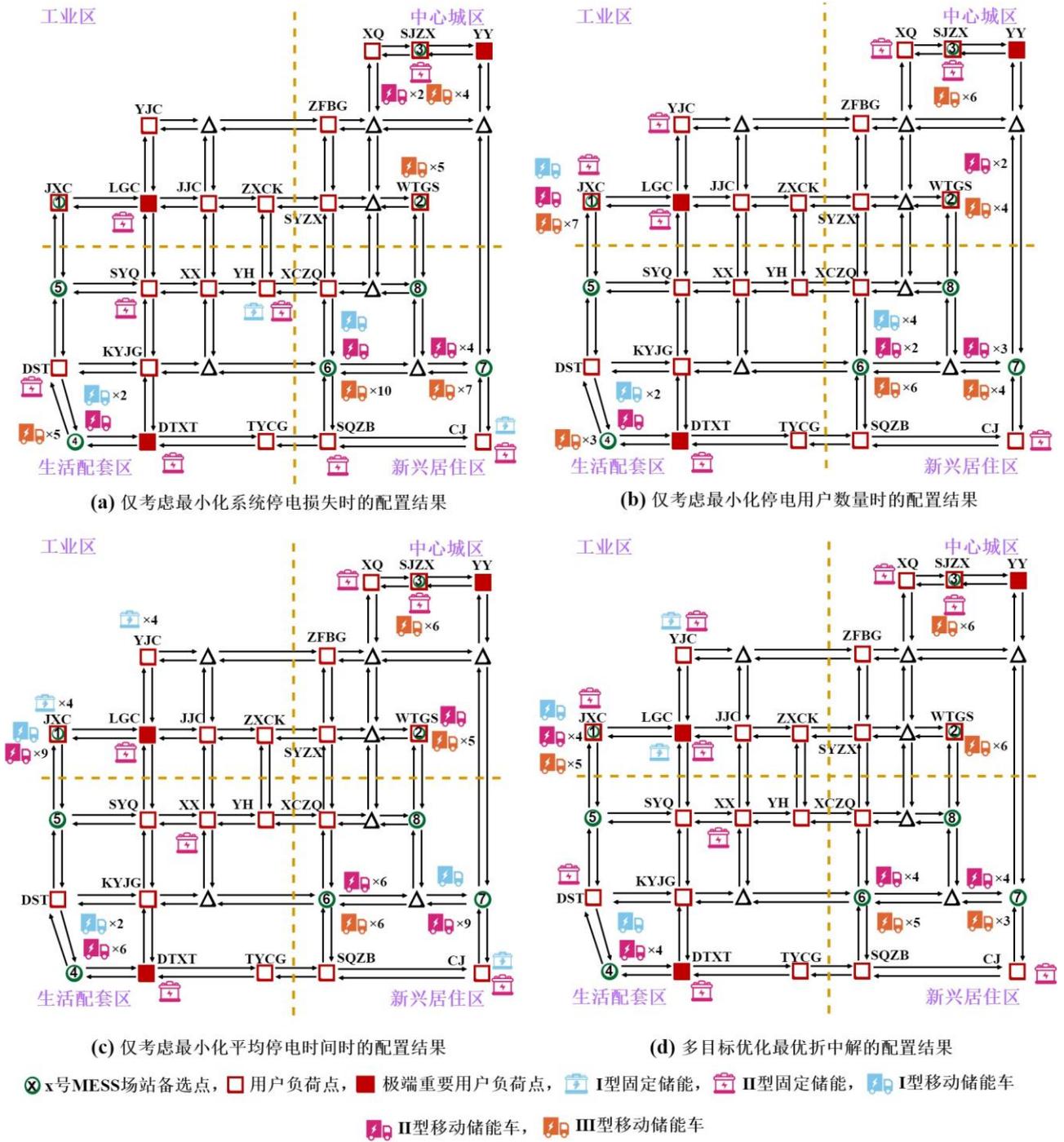


图 C2 不同目标优化下的 DES 配置对比

Fig.C2 Comparison of DES configurations under different objectives