DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220833 文章编号: 0258-8013 (2023) 18-7061-18 中图分类号: TM 715 文献标识码: A

公交枢纽灵活性赋能的高可靠城市配电网 多层协同优化规划方法

曾博, 罗旸凡, 周吟雨, 吴晨, 刘一贤

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Multi-layer Collaborative Optimization Approach for Highly Reliable Urban Distribution System Planning Empowered by Public Transport Hub Flexibilities

ZENG Bo, LUO Yangfan, ZHOU Yinyu, WU Chen, LIU Yixian (State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Public transport hub (PTH) is an important urban transport infrastructure and also the coupling node of urban energy-transport system. How to realize the coordinated development of PTHs and urban distribution systems, reduce the negative impact of electric bus load, and harness operational flexibility to promote the quality and efficiency improvement of power system has become an important issue. In this paper, considering the contribution of PTH's demand under normal and contingency conditions respectively, a multi-layer collaborative planning approach for highly reliable urban distribution system empowered by PTH flexibilities is proposed. Incorporating multi-domain constraints, the model optimizes PTH location/configuration, distribution system expansion and multi-mode operation, realizing efficient utilization of PTH flexibilities and reliable/ economical operation of the distribution system. A multi-layer Benders decomposition method is proposed to transform it into a three-layer iterative model to achieve accurate and efficient solution. Finally, with the modified IEEE 33-bus distribution system and actual data of Sihui PTH, the effectiveness of proposed model and approach is verified.

KEY WORDS: public transport hub; urban distribution system; collaborative planning; flexibility; reliability; multilayer optimization

Project Supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2400700); National Natural Science Foundation of China (52177082); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022JG005).

摘要: 作为城市交通基础设施的重要组成部分,公交枢纽 (public transport hub, PTH)是城市能源和交通系统的耦合汇 聚节点。如何实现 PTH 和城市配电系统的有机协调发展, 在满足公交服务需求的前提下,尽可能地降低电动公交负荷 并网的负面影响,并利用其运行灵活性促进电力系统提质增 效,已成为未来城市规划的重要课题。为此,该文在深入分 析 PTH 与配电网交互机理的基础上,分别考虑正常和故障 情况下 PTH 参与电网侧需求响应的贡献,提出一种面向 PTH灵活性赋能的高可靠性城市配电网多层协同规划方法。 模型以系统投资运维总成本最小化为目标,综合考虑电力-交通系统运行和供电可靠性/公交服务质量等多域约束,通 过对 PTH 选址定容、配电线路/变压器扩容以及正常/故障多 模场景下系统运营策略进行协同优化,以实现 PTH 灵活性 资源的高效利用和配电系统的可靠经济运行。根据模型中多 元场景密切耦合的特点,提出多层 Benders 分解方法将其等 效转化为上层(投资主问题)、中层(正常运行子问题)、下层 (故障运行子问题)的三层迭代模型,实现精确高效求解。最 后,以修改的 IEEE-33 节点配电网和北京四惠公交枢纽的实 际数据为例,验证了所提模型和方法的有效性。

关键词:公交枢纽;城市配电网;协同规划;灵活性;可靠性;多层优化

0 引言

公共交通是城市系统的重要部分,同时也是城市能源的消费大户^[1]。作为推动"碳达峰、碳中和"目标实现的重要手段,利用电动公交(electric bus,EB)替代传统燃油公交车不仅可有效降低城市内的交通尾气排放,减少环境污染;同时,还能降低未来交通对传统化石能源的依赖,推动产业升级。

因此,为了支撑 EB 大规模入网,国内外学者

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2400700); 国家自然科学基金项目(52177082); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022JG005)。

对 EB 充电基础设施(如充电站、换电站等)规划问题进行了大量研究。文献[2]计及现有配电网的承载能力,提出一种以投资与运维成本最小化为目标的EB 快速充电站的优化规划方法。文献[3]建立了一种兼顾充电能力、投资成本和可再生能源利用效率的EB 充电站多目标优化模型。文献[4]基于交通流概念,提出一个EB 换电站的定位模型,旨在最小化待建的站点数量。然而,上述研究仅涉及EB 充电设施的规划,并未考虑与EB 充电负荷接入与配电网扩容之间的协调。

实际上,大量新能源汽车入网改变了原有的 负荷结构和运行特性, 使得原有的能量系统可能 无法满足新兴负荷的用能需求。因此, 交通能量补 给设施规划必须与能量系统扩展规划相协调[5-7]。近 年来,基于交通-能源耦合视角的交通补给设施 与能量系统的协同规划研究逐渐兴起。为降低联合 系统的投资成本,文献[5]提出一个基于随机优化的 电动汽车充电站与配电网扩容的多阶段协同规划 方法。文献[6]从碳减排的角度出发,进行电动汽车 充换储一体站和主动配电网协同规划。文献[7]则充 分发掘电-气-交通系统之间的互动潜力,建立了城 市电网、天然气网、充电站和加气站的联合规划模 型。上述研究验证了集中式协同规划方法在涉及多 个利益主体的交通-能源系统规划研究中的适用意 义及工程价值。相关研究结果可为政府或公共事业 公司制定以社会福利最大化、碳中和等为目标的城 市发展规划提供有益支撑。然而,现有研究尚未涉 及与 EB 配套的能量补给设施与配电网的协调规划 问题。

公交枢纽(public transport hub, PTH)是兼具乘客通勤换乘和 EB 车队聚合的新兴交通基础设施^[8]。近年来,随着城市公共交通系统的不断完善,世界范围内投建了大量的 PTH 项目,如图 1 所示。与传统 EB 充/换电站不同,PTH 集 EB 车队车辆调度、充电管理和停放维修于一体,在城市公交系统中居于枢纽地位^[9]。因此,PTH 规划问题已经引起了学界的广泛兴趣。文献[10]计及投资成本和公交服务质量,建立了一个 PTH 选址定容的多目标优化模型。文献[11]面向公交服务可达性提升,探讨了城市公交系统中的 PTH 最优规划问题。文献[8]提出一个基于魅力度筛选和多目标遗传算法的多枢纽布局优化模型。上述文献在 PTH 规划领域进行了初步探索,但仍存在以下不足:1)上述研究仅从单

一交通侧视角设计 PTH 规划方案,忽视了与配电系统扩容规划的协同。2)未计及 PTH 聚合 EB 车队作为灵活性资源对配电网扩容规划的赋能效益。









) 北京四惠公交枢纽(I.外景; II/III.EB 充电站; IV.停车场及站台)





(b) 大连河口公交枢纽

(c) 纽约乔治华盛顿大桥公交枢纽

图 1 国内外公交枢纽项目示意

Fig. 1 Demonstration of some selected PTH projects

实际上, EB 通常以车队的方式进行编组, 便 于进行统一的调度管理, 且配备的动力电池容量 大、规格统一,是良好的需求响应资源[12]。因此, EB 车队灵活性开发受到广泛的关注。文献[13]建立 了一个基于电力市场和 EB 车队互动的双层优化模 型,利用 EB 需求响应资源缓解电网阻塞。文献[14] 评估了利用 EB 车队作为虚拟储能在电网削峰填谷 和节能减排方面的潜在收益。文献[12]考虑 EB 通 过车网互动(vehicle to grid, V2G)参与电网辅助服 务,提出一种 EB 充电站日前-日内多时间尺度优化 调度策略,降低电网负荷的峰谷差。区别于上述以 充/换电站为载体的需求响应,基于 PTH 的需求响 应有显著不同之处: 1) 相较于单一充/换电站, PTH 既是能源的消费者,又是公交服务的提供者,具有 鲜明的能源-社会双重属性。其灵活性潜力受到系 统供电充裕度、供电可靠性约束、公交服务质量约 束和乘客出行模式等多方面因素影响,电力-交通 耦合更为独特和紧密。2)作为重要的交通基础设 施,PTH 承担 EB 车队的综合支持服务,在具备更 为多样的需求响应潜力开发手段(如用能调度、发车 调度和提供 V2G 服务等)的同时,也显现出更为复 杂的运行特性。

此外,上述研究证明了利用 EB 的灵活运行特性可以有效提高系统的经济效益。但是,这些工作均是基于正常运行工况这一前提,缺少对系统安全风险的衔接量化,未能充分考虑 EB 资源在故障运行情况下对配网供电可靠性的贡献作用及由此产生的潜在收益。而事实上,当配电网元件故障时,PTH 可以实时响应系统缺电状态,对自身能耗进行自律调度;同时部署于 EB 的动力电池组作为大容量虚拟储能聚合体,可通过 V2G 服务为电网提供容量支撑,降低系统失负荷,节约配电网扩容成本。因此,若忽略上述可靠性效益,所得规划策略将难以全面客观地反映 PTH 资源对未来配电系统的真实价值贡献。

而现有考虑供电可靠性的配电网规划研究,早 期大多采用启发式算法框架[15]。文献[16]将配电网 可靠性指标进行线性解析表示,提出基于混合整数 线性规划的配电网扩展规划模型,实现了此类问题 的精确求解。然而,上述模型并未涉及储能等时序 强相关性元件的运行模拟与规划。文献[17]基于"代 表故障元件"和"代表故障时刻"的概念,建立了 一个考虑 N-1 安全准则的配电网与储能的协同规 划框架,解决了上述问题。但是该模型无法对供电 可靠性进行精确评估并严格依据可靠性需求进行 精准投资,难以满足高可靠性配电网的建设要求。 因此, 文献[18]将储能元件的可行域进行解析表示, 进而提出基于多参数规划的配电网可靠性扩展规 划方法。但作者仅关注系统在故障场景下的可靠性 问题,并未将其与正常场景下的运行经济性协同考 虑。因此,有必要充分发掘 PTH 灵活性资源对配电 网运行经济性和供电可靠性的双重支撑作用,并开 发一种适用于计及可靠性约束的 PTH 与配电网协 同规划模型的精确高效解法。

针对上述不足,本文提出一种考虑 PTH 灵活性赋能的高可靠性配电网多层协同规划模型。首先,深入分析 PTH 与配电网交互机理,从电力-交通耦合视角进行 PTH 需求响应建模。然后,综合考虑 PTH 的选址定容、配电网扩容以及多元场景下的系统运营策略,并计及 PTH 灵活性在正常/故障多模场景下的贡献,以实现综合成本最小化,同时满足既定的供电可靠性约束。最后,根据问题特点,提出多层 Benders 分解方法将其转化为上、中、下三层迭代模型实现精确高效求解。算例仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

1 灵活性赋能的 PTH-配电网协同规划框架

作为能量-交通紧密耦合的重要基础设施, PTH 除了对 EB 车队进行统一的发车调度,还承担 着车队的日常充放电、检修维护及停放管理的任 务。一个典型的 PTH 主要由调度中心、充电站、停 车场等部分构成,如图 2 所示。

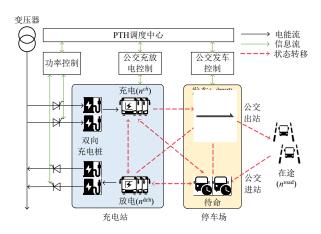


图 2 PTH 基本结构 Fig. 2 Basic structure of PTHs

PTH 充电站配置有双向充电桩,可以同时为多辆电动公交进行充放电服务,并通过配电变压器与配电网进行功率交互。当动力电池电量过低或接收到 V2G 服务指令时,电动公交将在充电站内执行充电或放电操作。任务结束后,公交车将驶往停车场待命。当接收到发车指令时,电动公交将在短暂的车况检查后执行发车任务。由图 2 可见,电动公交存在充电、放电、发车、在途和待命五种状态。PTH 调度中心综合站内各部门的运行信息进行优化调度,并下达功率控制指令、公交充放电控制指令和公交发车控制指令,实现公交车队运行日内的合理状态切换和最优功率交互。

实际运行中,一方面,通过协调发车调度和能量调度,PTH 可以实现自身能耗管理。调度中心在满足公交服务质量约束的前提下,对公交车队的发车计划进行策略性调整,重塑 PTH 能耗曲线;此外充分利用储能的能耗时移特性调整公交充电时段与充电功率,进一步实现 PTH 交互功率与配电网实时运行状态间的紧密协调。另一方面,EB 车队通过双向充电桩参与 V2G,可使配电网在正常状态下通过"高发低储"的方式进行价差套利,同时促进可再生能源消纳。在配电网发生故障时,动力电池可为配电网提供功率支撑,降低系统失负荷^[19-20]。可见,PTH 需求响应作为一种新兴的电力平衡资

源,将为配电网带来可观的运营灵活性,并因此对系统的经济性与可靠性产生深刻的影响。

基于上述分析,本文综合考虑投资约束、系统

运行约束和供电可靠性约束,以年化投资与运维成本最小化为目标,构建 PTH 灵活性赋能的高可靠性城市配电网协同规划模型,如图 3 所示。

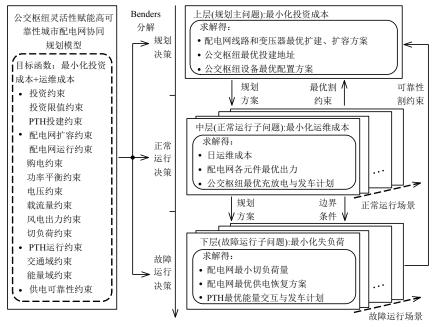


图 3 多层协同规划框架

Fig. 3 Multi-layer collaborative planning framework

该优化模型涉及的决策过程包含 3 个阶段:第一阶段为规划决策阶段,以投资成本最小化为目标,确定配电网网架扩容和 PTH 选址定容方案;第二阶段为系统正常运行状态模拟,该阶段决策以系统运行和维护成本最小化为优化目标,确定正常运行状态时配电网与 PTH 的最优调度策略;第三阶段为系统故障运行状态模拟,该阶段决策以配电网失负荷最小化为优化目标,确定配电网故障期间系统的最优供电恢复控制和 PTH 运行策略。

上述模型从数学上求解起来十分困难。为此,本文利用 Benders 分解方法将原模型分解为上、中、下三层,分别对应于三个阶段的决策过程。其中,上层为规划决策主问题,即考虑系统投资约束、最优割约束和可靠性割约束,最小化系统投资成本,并将所得规划方案传递到中、下层;中层为正常运行子问题,即考虑各类系统运行约束,最小化系统正常运行场景下的运维成本,并向上层返回最优割约束;下层为故障运行子问题,即考虑故障时段系统边界条件、元件故障约束、公交服务可达性约束等,最小化系统在故障场景下的失负荷功率,基于下层得到的优化结果,将向上层返回可靠性割约束。通过将原问题按上述方式分解并通过上、中、下三层子模型的迭代求解,有效降低了问题维度及计算复杂性,从而可在确保最终结果质量的前提

下,实现对问题的高效求解。

2 PTH 特性建模

如第1节所述,PTH的需求响应潜力主要来源于其灵活的用能调度、发车调度以及对电网的V2G支撑。因此,本文将PTH的运行特性归结为交通域约束和能量域约束两类,以保证纳入上述三类灵活性开发方式的同时,刻画PTH的能源—交通双重属性。此外,本文的主要假设有:

1) PTH 通常承担多条公交线路的运营任务。 不失一般性,本文把每条公交线路等效为一个固定的环线^[21]。每条环线包括 PTH、沿途站点和目标站点。PTH 是环线的起点和终点。公交车从 PTH 出发,按顺序驶经一系列沿途站点到达目标站点(往程),最后回到 PTH(返程),如图 4 所示。

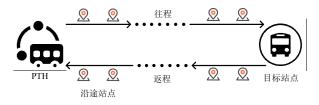


图 4 公交线路的环线表述

Fig. 4 Loop representation of bus routes

2) PTH 公交服务的覆盖范围远大于所接入的 配电网辐射范围^[6,22]。因此, PTH 在配电网内的接 入位置的变化不影响公交线路的分布。

3) 随着以公共交通为导向的城市发展模式的推进和公交快速路的普及,城市公交通行情况大为改善,因而本文不考虑 EB 在行驶过程中的道路阳塞^[22]。

2.1 交通域约束

交通域约束主要刻画各类 EB 运行状态间的协调与发车计划的制定,以实现公交车队的有序运行并满足城市公交出行需求。图 2 展示了电动公交充电、放电、发车、在途和待命五种运行状态,每辆电动公交车在每个时刻 t 只能处于其中的一种状态,如式(1)所示。式(2)表示每个时刻 t 执行充放电动作的公交车数量不能超过 PTH 内配置充放电机的数量。式(3)—(4)基于发车计划决定未来一段时间内电动公交的实时状态(站内/在途)。式中: $s(\Omega)$ 、 $i(\Omega)$ 、 $r(\Omega^{R})$ 和 $t(\Omega^{T})$ 分别为运行场景、待选 EB、公交线路和运行时刻的索引和对应集合;0-1 变量 $n_{s,i,r,t}^{den}$ 、 $n_{s,i,t}^{ch}$ 、 $n_{s,i,t}^{den}$ 分别表示 EB 是否处于发车、在途、充电和放电状态;0-1 变量 n_{i}^{conf} 表示是否配置第i 辆待选 EB; n_{i}^{CH} 表示充电机的配置数量; n_{i}^{R} 为第 n_{i}^{R} 条公交线路的行驶时间。

$$\sum_{r \in \Omega^{\mathbb{R}}} n_{s,i,r,t}^{\text{depart}} + n_{s,i,t}^{\text{road}} + n_{s,i,t}^{\text{ch}} + n_{s,i,t}^{\text{dch}} \le n_i^{\text{conf}},$$

$$\forall s \in \Omega^{\mathbb{S}}, \forall i \in \Omega^{\mathbb{I}}, \forall t \in \Omega^{\mathbb{T}}$$
(1)

$$\sum_{s \in \mathcal{O}^{\mathsf{I}}} (n_{s,i,t}^{\mathsf{ch}} + n_{s,i,t}^{\mathsf{dch}}) \le N^{\mathsf{CH}}, \forall s \in \Omega^{\mathsf{S}}, \forall t \in \Omega^{\mathsf{T}}$$
 (2)

$$n_{s,i,r,t}^{\text{depart}} T_r^{\text{R}} \leq \sum_{\tau=t+1}^{\tau=t+T_r^{\text{R}}} n_{s,i,\tau}^{\text{road}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall i \in \Omega^{\text{I}},$$

$$\forall r \in \Omega^{\mathbf{R}}, \forall t \in \Omega^{\mathbf{T}} \tag{3}$$

$$n_{s,i,t}^{\text{road}} + \sum_{r \in \Omega^{\mathbb{R}}} n_{s,i,r,t}^{\text{depart}} \ge n_{s,i,t+1}^{\text{road}}, \forall s \in \Omega^{\mathbb{S}}, \forall i \in \Omega^{\mathbb{I}}, \forall t \in \Omega^{\mathbb{T}}$$
 (4)

PTH 内的所有 EB 共同满足既定的发车计划,同时保证每个时刻发车数不超过 PTH 的最大发车能力,如式(5)—(6)所示。式(7)根据实时客流量和未服务乘客量,决定 t 时刻承担第 s 条线路发车任务的公交车队在每个车站的载客量。其中实时客流量通过起点—终点(origination-destination,O-D)矩阵 R^{OD} 来表征。式(8)表示两个公交站间的未服务乘客数量不得超过两站间的原有客流量。式(9)为公交服务舒适度约束,表示为了保证乘客的乘坐体验,每辆 EB 的实时载客量不超过某一上限值。本文中该上限值定义为EB最大载客量 N^{P} 与空驶率 ξ 的乘积。其中 ξ 为 PTH 调度中心预先设定的参数,决定了乘客在公交车厢的舒适度。 ξ 越低,公交车内搭载的

乘客数量越少,乘客的拥挤感越小,出行体验越舒适。式中: $g(\Omega_r^G)$ 为公交线路沿途各站点的索引和对应集合; $N_{s,r,t}^{depart}$ 为各公交线路的发车数量; $R_{s,r,t,g}^{bus}$ 为 t 时刻发车的 EB 在各站点搭载的乘客数量; $R_{r,t,g,g'}^{OD}$ 表示以公交站g 和g'为始发站和终点站的乘客数量; $R_{s,r,t,g,g'}^{unserved}$ 为未服务乘客数量,表示因发车数量不足而导致的未搭载乘客的数量。

$$N_{s,r,t}^{\text{depart}} = \sum_{s,r,t} n_{s,i,r,t}^{\text{depart}}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall r \in \Omega^{R}, \forall t \in \Omega^{T} \quad (5)$$

$$0 \leq N_{s,r,t}^{\text{depart}} \leq N_{r,t}^{\text{depart,max}}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall r \in \Omega^{R}, \forall t \in \Omega^{T}$$
(6)
$$R_{s,r,t,g}^{\text{bus}} = R_{s,r,t,g-1}^{\text{bus}} + \sum_{g' \in \mathcal{Q}_{r}^{G}} (R_{r,t,g,g'}^{\text{OD}} - R_{s,r,t,g,g'}^{\text{unserved}}) - \sum_{g' \in \mathcal{Q}_{r}^{G}} (R_{r,t,g',g}^{\text{OD}} - R_{s,r,t,g',g}^{\text{unserved}}), \forall s \in \Omega^{S}, \forall r \in \Omega^{R},$$

$$\forall t \in \Omega^{T}, \forall g \in \mathcal{Q}_{r}^{G}$$
(7)

$$0 \le R_{s,r,t,g,g'}^{\text{unserved}} \le R_{r,t,g,g'}^{\text{OD}}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall r \in \Omega^{R}, \\ \forall t \in \Omega^{T}, \forall g, g' \in \Omega_{r}^{G}$$
(8)

$$0 \le R_{s,r,t,g}^{\text{bus}} / N_{s,r,t}^{\text{depart}} \le \xi N^{\text{p}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall r \in \Omega^{\text{R}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}, \forall g \in \Omega_{s}^{\text{G}}$$
(9)

2.2 能量域约束

在 2.1 节交通域约束的基础上,本文进一步分析 EB 与能量设备之间的交互来构建 PTH 能量域约束,从而量化 PTH 的接入对配电网运行的影响,进而实现能量侧与交通侧之间的有效耦合。

式(10)—(11)代表 EB 的充放电功率不得超过额定值。式(12)根据充放电功率和发车任务更新 EB 动力电池的实时电量。式(13)设定了动力电池在每日始末时刻的荷电状态(State of Charge, SoC)为 SoC^{min}。为了避免过度充放电引起电池寿命的衰减,动力电池的 SoC 应处于安全范围内,如式(14)所示。为了保证在配电网故障时为系统提供足够的 V2G 支撑,同时保证发车计划的顺利完成,在正常运行状态下 PTH 应当预留足够的电量作为故障时的备用,如式(15)所示。该部分备用电量可以表示为最低电量备用比y^{min} 与 PTH 内动力电池总容量的乘积。其中y^{min}代表了 PTH 应当达到的最低电量备用水平。式(16)—(17)表示 PTH 的有功功率和无功功率。式(18)表示 PTH 负荷的视在功率不应超过变压器的额定容量。

$$0 \le P_{s,i,t}^{\mathrm{ch}} \le n_{s,i,t}^{\mathrm{ch}} P^{\mathrm{chr}}, \forall s \in \Omega^{\mathrm{S}}, \forall i \in \Omega^{\mathrm{I}}, \forall t \in \Omega^{\mathrm{T}} \quad (10)$$

$$0 \le P_{s,i,t}^{\text{dch}} \le n_{s,i,t}^{\text{dch}} P^{\text{dchr}}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall i \in \Omega^{I}, \forall t \in \Omega^{T} \quad (11)$$

$$E_{s,i,t+1} = E_{s,i,t} + \eta^{\text{ch}} P_{s,i,t}^{\text{ch}} \Delta t - P_{s,i,t}^{\text{dch}} \Delta t / \eta^{\text{dch}} - \sum_{r \in \mathcal{Q}^{R}} n_{s,i,r,t}^{\text{depart}} \pi^{\text{e}} L_{r}^{R} / \eta^{\text{dch}}, \forall s \in \mathcal{Q}^{S}, \forall i \in \mathcal{Q}^{I}, \forall t \in \mathcal{Q}^{T}$$
(12)

$$E_{s,i,t_1} = E_{s,i,t_T} = \gamma^{\min} n_{s,i}^{\text{conf}} E^{\text{r}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall i \in \Omega^{\text{I}}$$
 (13)

$$soc^{\min} n_{s,i}^{conf} E^{r} \leq E_{s,i,t} \leq soc^{\max} n_{s,i}^{conf} E^{r}, \forall s \in \Omega^{S},$$

$$\forall i \in \Omega^{\mathrm{I}}, \forall t \in \Omega^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{O}^{l}} E_{s,i,t} \ge \gamma^{\min} N^{\text{EB}} E^{r}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (15)

$$P_{s,t}^{\text{PTH}} = \sum_{i} (P_{s,i,t}^{\text{ch}} - P_{s,i,t}^{\text{dch}}), \forall s \in \Omega^{S}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (16)

$$Q_{s,t}^{\text{PTH}} = P_{s,t}^{\text{PTH}} \tan \varphi^{\text{PTH}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}$$
 (17)

$$-S^{\text{TP}} \le P_{s,t}^{\text{PTH}}/\cos\varphi^{\text{PTH}} \le S^{\text{TP}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}} \quad (18)$$

式中: $P_{s,l,t}^{ch}$ 、 $P_{s,l,t}^{dch}$ 为 EB 的充放电功率; $E_{s,l,t}$ 为 EB 动力电池的实时容量; $P_{s,t}^{PTH}$ 、 $Q_{s,t}^{PTH}$ 分别为 PTH 的有功和无功功率; S^{TP} 为 PTH 站内变压器的额定容量; P^{chr} 、 P^{dchr} 和 E^r 分别为动力电池的额定充放电功率和额定容量; π^c 为 EB 单位行驶距离对应的电量消耗; L_r^R 为第 r 条公交线路的行驶距离; φ^{PTH} 为 PTH 的功率因数角。

3 PTH-配电网协同规划模型

3.1 目标函数

模型以系统年投资和运维成本最小化为目标, 如式(19)所示。

$$\min C^{\text{inv}} + N^{y} \sum_{s \in \mathcal{O}_{s}^{s}} p_{s} \left(C_{s}^{\text{mai}} + C_{s}^{\text{opt}} \right) \tag{19}$$

式中: C^{inv} 、 C_s^{mai} 和 C_s^{opt} 分别为投资成本、维护成本和运行成本; p_s 为各场景对应的概率; N^s 为一年中运行日数量。

投资成本由线路扩容成本、变压器配置成本、 EB 配置成本和充电机配置成本构成,并通过资金 回收系数转化为等年值^[23],如式(20)所示。

$$C^{\text{inv}} = \delta^{\text{LN}} \sum_{l \in \Omega^{\text{L}}} \sum_{m \in \Omega^{\text{M}}} cc_m^{\text{LN}} L_l^{\text{LN}} n_{l,m}^{\text{LN}} +$$

$$\delta^{\text{TG}} \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} cc^{\text{TG}} S_{ss}^{\text{TG}} + \delta^{\text{TP}} cc^{\text{TP}} S^{\text{TP}} +$$

$$\delta^{\text{EB}} cc^{\text{EB}} N^{\text{EB}} + \delta^{\text{CH}} cc^{\text{CH}} N^{\text{CH}}$$
(20)

式中: $l(\Omega^I)$ 、 $m(\Omega^M)$ 、 $ss(\Omega^{SS})$ 为配电网支路、待选线路种类和配电变压器的索引和对应集合; $\delta^{(\cdot)}$ 为各设备的投资等年值系数; cc_m^{LN} 、 cc_s^{TG} 、 cc_s^{TP} 、 cc_s^{EB} 和 cc_s^{CH} 分别为线路、配电变压器、PTH 站内变压器、EB 和充电机的单位投资成本;0-1 变量 $n_{l,m}^{LN}$ 表示是否使用线路 m 对支路 l 进行扩容; S_{ss}^{TG} 为配变的扩容容量; N_{l}^{EB} 为 EB 配置数量; L_{l}^{L} 为支路 l 的全长。维护成本包含线路、变压器、充电桩和电动公交的维护费用,如式(21)所示。

$$C_{s}^{\text{mai}} = \sum_{l \in \Omega^{L}} L_{l}^{\text{LN}} \left[\sum_{m \in \Omega^{M}} cm_{m}^{\text{LN}} n_{l,m}^{\text{LN}} + cm_{l}^{\text{LN0}} (1 - \sum_{m \in \Omega^{M}} n_{l,m}^{\text{LN}}) \right] + cm^{\text{TG}} \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} \left(S_{ss}^{\text{TG}} + S_{ss}^{\text{TG0}} \right) + cm^{\text{TP}} S^{\text{TP}} + cm^{\text{CH}} N^{\text{CH}} + cm^{\text{EB}} \sum_{i \in \Omega^{I}} \sum_{r \in \Omega^{R}} \sum_{t \in \Omega^{T}} L_{r}^{R} n_{s,i,r,t}^{\text{depart}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}$$
(21)

式中 cm_m^{LN} 、 cm^{TG} 、 cm^{TP} 、 cm^{EB} 和 cm^{CH} 分别为线路、配电变压器、PTH 站内变压器、EB 和充电机的单位维护成本。

运行成本由购电成本、弃风成本、动力电池退化成本和失负荷损失与未服务乘客损失五部分构成,如式(22)所示。其中,动力电池退化成本同时计及 EB 在站内充放电和行驶过程中的电池损耗;正常运行条件下,单位失负荷损失和未服务乘客损失设定为一个充分大的数 *M*,以保证用户的正常供电和满足乘客的正常出行需求。

$$C_{s}^{\text{opt}} = \sum_{t \in \Omega^{\text{T}}} \{ c_{t}^{\text{e}} P_{s,t}^{\text{GD}} \Delta t + c_{t}^{\text{aban}} (P_{s,t}^{\text{WT,max}} - P_{s,t}^{\text{WT}}) \Delta t + \sum_{t \in \Omega^{\text{I}}} [c^{\text{deg1}} (P_{s,t,t}^{\text{ch}} + P_{s,t,t}^{\text{dch}}) \Delta t + \sum_{r \in \Omega^{\text{R}}} c^{\text{deg2}} \pi^{\text{e}} n_{s,t,r,t}^{\text{depart}} L_{r}^{\text{R}}] \cdot M \sum_{d \in \Omega^{\text{D}}} P_{s,d,t}^{\text{DE,curt}} \Delta t + M \sum_{r \in \Omega^{\text{R}}} \sum_{g \in \mathcal{Q}_{s}^{\text{G}}} \sum_{g' \in \mathcal{Q}_{s}^{\text{G}}} R_{s,r,t,g,g'}^{\text{unserved}} \},$$

$$\forall s \in \Omega^{\text{S}}$$

$$(22)$$

式中: $d(\Omega^{\mathbf{P}})$ 为负荷节点的索引和对应集合; $P_{s,t}^{\mathrm{WT}}$ 和 $P_{s,t}^{\mathrm{WT,max}}$ 为风电实时出力和最大预测出力; $P_{s,d,t}^{\mathrm{DE,curt}}$ 为失负荷量; c_t^{e} 、 c_t^{aban} 、 c^{deg1} 和 c^{deg2} 分别为主网购电电价、弃风因子和单位电池损耗成本。

3.2 约束条件

模型的约束条件主要包括:投资约束、配电网运行约束、PTH运行约束和供电可靠性约束。

3.2.1 投资约束

投资约束用于确定 PTH 和配电网的建设方案,即 PTH 的选址、EB 与充电桩的配置数量、需扩容线路的型号以及变压器的安装/扩建容量。

式(23)表示总投资额不得超过最大投资预算。 式(24)为 EB 配置数量约束。式(25)—(26)为 PTH 占 地面积约束^[6]。式(27)表示 PTH 只能建设在待选节 点中的一处。式(28)—(29)表示新建/扩容的变压器 容量不得超过最大新建/扩容容量。式(30)表示每条 支路只能选择一种型号的线路进行扩容。

$$C^{\text{inv}} \le C^{\text{inv,max}} \tag{23}$$

$$\sum_{i \in O^{\mathsf{I}}} n_i^{\mathsf{conf}} = N^{\mathsf{EB}} \tag{24}$$

$$A^{\text{LA}} = (A^{\text{TP}} S^{\text{TP}} + A^{\text{EB}} N^{\text{EB}} + A^{\text{CH}} N^{\text{CH}})(1 + \phi)$$
 (25)

$$A^{\text{LA}} \le \sum_{h = O^{\text{H}}} n_h^{\text{PTH}} A_h^{\text{LA,max}} \tag{26}$$

$$\sum_{h=0^{\mathrm{H}}} n_h^{\mathrm{PTH}} = 1 \tag{27}$$

$$0 \le S^{\mathrm{TP}} \le S^{\mathrm{TP,max}} \tag{28}$$

$$0 \le S_{ss}^{TG} \le S^{TG,max}, \forall ss \in \Omega^{SS}$$
 (29)

$$0 \le \sum_{m \in \mathcal{O}^{M}} n_{l,m}^{LN} \le 1, \forall l \in \mathcal{Q}^{L}$$
(30)

式中: $h(\Omega^{H})$ 为 PTH 投建节点的索引和对应集合; 变量 A^{LA} 为 PTH 总占地面积; A^{TP} 、 A^{EB} 、 A^{CH} 为变压器机房、EB 车位和快充车位的单位占地面积; 0-1 变量 n_h^{PTH} 表示是否在节点 h 投建 PTH。

3.2.2 配电网运行约束

配电网运行约束保证不同运行场景下电网的安全运行。式(31)—(32)表示配电系统向主网购电功率不得超过配电变压器的额定容量,这里采用多边形法进行线性化^[18]。式(33)—(34)为配电网有功、无功平衡约束。式(35)—(36)为节点电压约束。式(37)—(39)为支路潮流约束。式(40)—(41)为风电出力约束。式(42)—(43)为切负荷约束。

$$0 \le P_{s,t}^{\text{GD}}, Q_{s,t}^{\text{GD}} \le \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} (S_{ss}^{\text{TG0}} + S_{ss}^{\text{TG}}),$$

$$\forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}$$
(31)

$$0 \leq P_{s,t}^{\text{GD}} + Q_{s,t}^{\text{GD}} \leq \sqrt{2} \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} (S_{ss}^{\text{TGO}} + S_{ss}^{\text{TG}}),$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (32)

$$\sum_{l \in \mathcal{Q}^{\mathrm{L}}} K_{b,l}^{\mathrm{LN}} P_{s,l,t}^{\mathrm{LN}} = K_b^{\mathrm{GD}} P_{s,t}^{\mathrm{GD}} + K_b^{\mathrm{WT}} P_{s,t}^{\mathrm{WT}} -$$

$$\sum_{d \in \mathcal{Q}^{\mathrm{D}}} K_{b,d}^{\mathrm{DE}}(P_{s,d,t}^{\mathrm{DE}} - P_{s,d,t}^{\mathrm{DE,curt}}) - \sum_{h \in \mathcal{Q}^{\mathrm{H}}} K_{b,h}^{\mathrm{PTH}} n_h^{\mathrm{PTH}} P_{s,t}^{\mathrm{PTH}},$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall b \in \Omega^{B}, \forall t \in \Omega^{T}$$
(33)

$$\sum_{l \in Q^{L}} K_{b,l}^{LN} Q_{s,l,t}^{LN} = K_{b}^{GD} Q_{s,t}^{GD} + K_{b}^{WT} Q_{s,t}^{WT} -$$

$$\sum_{d \in \mathcal{Q}^{\mathrm{D}}} K_{b,d}^{\mathrm{DE}}(Q_{s,d,t}^{\mathrm{DE}} - Q_{s,d,t}^{\mathrm{DE,curt}}) - \sum_{h \in \mathcal{Q}^{\mathrm{H}}} K_{b,h}^{\mathrm{PTH}} n_h^{\mathrm{PTH}} Q_{s,t}^{\mathrm{PTH}},$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall b \in \Omega^{B}, \forall t \in \Omega^{T}$$
(34)

$$\sum_{b \in \Omega^{\rm B}} K_{b,l}^{\rm LN} V_{s,b,t} - 2 R_l P_{s,l,t}^{\rm LN} / V_0 - 2 X_l Q_{s,l,t}^{\rm LN} / V_0 = 0,$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall l \in \Omega^{L}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (35)

$$V^{\min} \le V_{sht} \le V^{\max}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall b \in \Omega^{B}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (36)

$$-S_{l}^{L} \leq P_{s,l,t}^{LN}, Q_{s,l,t}^{LN} \leq S_{l}^{L}, \forall s \in \Omega^{S}, \forall l \in \Omega^{L}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (37)

$$-\sqrt{2}S_{l}^{L} \leq P_{s,l,t}^{LN} \pm Q_{s,l,t}^{LN} \leq \sqrt{2}S_{l}^{L},$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall l \in \Omega^{L}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (38)

$$S_{l}^{L} = (1 - \sum_{m \in \mathcal{Q}^{M}} n_{l,m}^{LN}) S_{l}^{LN0} + \sum_{m \in \mathcal{Q}^{M}} n_{l,m}^{LN} S_{m}^{LN}, \forall l \in \Omega^{L}$$
 (39)

$$0 \le P_{s,t}^{\text{WT}} \le P_{s,t}^{\text{WT,max}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}$$
 (40)

$$Q_{s,t}^{\text{WT}} = P_{s,t}^{\text{WT}} \tan \varphi^{\text{WT}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}$$
 (41)

$$0 \le P_{s,d,t}^{\text{DE,curt}} \le P_{s,d,t}^{\text{DE}}, \forall s \in \Omega^{\text{S}}, \forall d \in \Omega^{\text{D}}, \forall t \in \Omega^{\text{T}}$$
 (42)

$$P_{s,d,t}^{\text{DE}} / Q_{s,d,t}^{\text{DE}} = P_{s,d,t}^{\text{DE,curt}} / Q_{s,d,t}^{\text{DE,curt}}$$

$$\forall s \in \Omega^{S}, \forall d \in \Omega^{D}, \forall t \in \Omega^{T}$$
 (43)

式中: $b(\Omega^B)$ 为配电网节点的索引和对应集合; $P_{s,t}^{GD}$ 和 $Q_{s,t}^{GD}$ 为配电变压器的有功和无功功率; $P_{s,l,t}^{LN}$ 和 $Q_{s,l,t}^{LN}$ 为支路 l 传输的有功和无功功率; $V_{s,b,t}$ 为节点电压幅值的平方; $K_{b,l}^{LN}$ 、 $K_{b,d}^{DE}$ 为配网节点—支路关联矩阵和节点—负荷关联矩阵的对应元素; 0-1 参数 K_b^{GD} 、 K_b^{WT} 表示节点 b 是否接有配电变压器或风电场; $K_{b,h}^{PTH}$ 表示节点 h 是否为 PTH 待建节点; $P_{s,d,t}^{DE}$ 和 $Q_{s,d,t}^{DE}$ 为节点负荷功率; V_0 为基准电压; R_l 和 X_l 为扩容后支路 l 的电阻和电抗值; S_l^{L} 和 S_l^{LN0} 为扩容前后支路 l 的额定容量; ρ^{WT} 为风电场功率因数角。

3.2.3 PTH 运行约束

PTH 运行约束刻画了 PTH 的能量-交通耦合特性,具体叙述见第 2 节式(1)—(18)。

3.2.4 供电可靠性约束

本文采用预期缺供电量(expected energy not supplied, EENS)作为系统的供电可靠性指标。系统规划方案应满足可靠性约束(44),即 EENS 不超过某上限值 EENS^T。

$$EENS(S^{TP}; n_{lm}^{LN}; S^{TG}; N^{EB}; N^{CH}) \le EENS^{T}$$
 (44)

4 基于分解思想的多层求解方法

本文所提模型在精确高效求解上存在如下 挑战:

1)经济性与可靠性相互协调,事前规划与事后校验交织。PTH与配电网协同规划方案决定了系统网架强度、设备容量裕度以及灵活性资源的配置数量与空间分布。不同规划方案在影响投资与运行成本的同时,也造成了系统故障时负荷恢复能力的差异,进而对应着不同的供电可靠性表现。鉴于此,本文协调考虑系统的投资/运行经济性和供电可靠性,需要对PTH与配电网在正常场景和故障场景下的运行进行模拟,并将模拟结果作为后验信息嵌入到事前规划环节中,保证规划结果在满足供电可靠性要求的同时,实现综合成本最小化。而现有计及可靠性的配电网规划模型的精确解法,其针对的模型大多未计及可靠性与经济性之间的协调^[16,18]。

2) 涉及时序强相关性元件,多元场景密切耦合。EB 的电池电量和运行状态(如是否在途、发车)

取决于过去时段的电量、充放电功率和发车计划,为时序强相关性元件。本文计及供电可靠性约束 (44),而 PTH 用以支撑配电网供电恢复的灵活性资源的充裕程度取决于故障发生时刻对应的 EB 车队运行状态(如电池电量、车辆实时状态等)。然而 EB 在故障时刻的状态信息与故障发生前各时段在时序上强相关,这些时段属于正常运行范畴,因而需通过系统在正常运行场景下的运行结果获得。这使得本文模型正常/故障多元场景的运行密切耦合。尽管少数文献将配电网可靠性指标解析表示,实现了经济性与可靠性相协调,但无法处理含时序强相关性元件的复杂规划问题^[24]。而启发式算法被广泛应用于含处理时序强相关元件且计及可靠性的规划问题,但无法保证得到精确解,容易造成投资冗余^[25-26],且求解效率较低。

鉴于此,本文提出了基于 Benders 分解的多层 求解算法,将该模型分解为上层(规划主问题)、中层(正常运行子问题)和下层(故障运行子问题)三层 进行迭代求解。为了便于介绍三层 Benders 分解,现给出模型的紧凑形式:

$$\min \mathbf{c} \mathbf{x} + \sum_{s \in \Omega^{S}} (\mathbf{d} \mathbf{y}_{s} + \mathbf{g} \mathbf{z}_{s}) \tag{45}$$

$$\mathbf{x} \in \Omega^{\mathbf{X}} \tag{46}$$

$$\mathbf{D}\mathbf{y}_{s} + \mathbf{G}\mathbf{z}_{s} \le \mathbf{f}_{s} - \mathbf{E}\mathbf{x} \tag{47}$$

$$\mathbf{y}_{s} \in \Omega_{s}^{Y}$$
 (48)

$$z_s \in \Omega_s^Z$$
 (49)

$$EENS(x) \le EENS^{T}$$
 (50)

式中: x 为与规划方案相关的变量矩阵,包括 $n_{l,m}^{LN}$ 、 S_{ss}^{TG} 、 N^{EB} 、 N^{CH} 等; y_s 为与系统运行相关的连续变量矩阵,包括 $P_{s,i,t}^{ch}$ 、 $P_{s,i,t}^{DDE,curt}$ 等; z_s 为系统运行的 0-1 变量矩阵,包括 $n_{s,i,r,t}^{depart}$ 、 $n_{s,i,t}^{road}$ 、 $n_{s,i,t}^{ch}$ 、 $n_{s,i,t}^{deh}$ 、 $n_{s,i,t}^{ch}$ 、 $n_{s,$

4.1 上层:规划主问题

如图 3 所示,三层 Benders 分解的上层是规划 主问题,用以确定城市配电系统的最佳扩容方案以 及 PTH 的最优选址定容方案,同时考虑正常运行子 问题返回的最优性割集(56)和故障运行子问题返回的可靠性割集(72)。上述主问题记为 MP, 其不含割约束的形式如(51)所示。割约束的具体生成方法将在 4.2 节和 4.3 节中详细介绍。

$$\begin{cases}
MP : \min cx + \sum_{s \in \Omega^{S}} \alpha_{s} \\
s.t. & \begin{cases} x \in \Omega^{X} \\ \alpha_{s} \ge 0, \forall s \in \Omega^{S} \end{cases}
\end{cases} (51)$$

式中 α 。为主问题的辅助变量。

4.2 中层:正常运行子问题

在求解 MP 后,本文将会得到一组备选规划方案 x^* 。三层 Benders 分解的中层为正常运行子问题,在上述备选方案 x^* 的基础上,实现系统正常运行时各场景的运维成本最小化,并向 MP 返回最优割约束。每个子问题对应规划期内的一个运行场景,记为 SP。由于引入了失负荷功率和未服务乘客量的概念,该子问题必有可行解^[27]。上述 SP 的形式为:

SP:
$$\min dy_s + gz_s$$

$$\begin{cases}
Dy_s + Gz_s \le f_s - Ex^* \\
y_s \in \Omega_s^{Y} \\
z_s \in \Omega_s^{Z}
\end{cases}$$
(52)

由于 SP 中含有离散变量 z_s ,无法通过其对偶问题最优解生成最优割约束,因此需要对 SP 进行进一步处理。求解 SP,得到离散变量最优值 z_s^* 。固定 SP 中的离散变量 z_s 的值为 z_s^* ,可将 SP 转化为一个线性规划问题,记为 SP-1:

$$\begin{cases}
\operatorname{SP-1:} & \min dy_s \\
\operatorname{s.t.} & \begin{cases}
Dy_s \leq f_s - Ex^* - Gz_s^* : u_s^{\operatorname{SP1}} \\
y_s \in Q_s^{\operatorname{Y}}
\end{cases} (53)$$

式中 u_s^{SPI} 为对应约束的对偶变量最优值矩阵。记 SP-1 的目标函数最优值为 obj_s^{SPI} 。通过求解 SP-1,可生成子问题最优割约束 $(54)^{[23]}$,用于约束下述松 弛子问题 SP-2 的下界。

$$\theta_{s} \ge \boldsymbol{g}\boldsymbol{z}_{s}^{c} + obj_{s}^{SP1}(\boldsymbol{x}^{*}, \boldsymbol{z}_{s}^{*}) - (\boldsymbol{z}_{s}^{c} - \boldsymbol{z}_{s}^{*})^{T}\boldsymbol{G}^{T}\boldsymbol{u}_{s}^{SP1} \quad (54)$$

将 SP 中的离散变量 z_s 松弛为 z_s^c , 并纳入最优割(54), 可生成 SP 的松弛子问题 SP-2。其形式为:

$$\begin{cases}
SP-2: \min \theta_{s} \\
\theta_{s} \geq dy_{s} + gz_{s}^{c} \\
Dy_{s} + Gz_{s}^{c} \leq f_{s} - Ex^{*} : u_{s}^{SP2} \\
y_{s} \in Q_{s}^{Y} \\
z_{s}^{c} \in Q_{s}^{Z} \\
\theta_{s} \geq gz_{s}^{c} + obj_{s}^{SP1}(x^{*}, z_{s}^{*}) - (z_{s}^{c} - z_{s}^{*})^{T} G^{T} u_{s}^{SP1}
\end{cases} (55)$$

式中: u_s^{SP2} 为对应约束的对偶变量最优值矩阵; θ_s 为松弛子问题的辅助变量。记 SP-2 的目标函数最优值为 obj_s^{SP2} 。通过求解 SP-2,可生成主问题最优割约束(56)并返回主问题,用于得到 MP 的一个更紧的下界。

$$\alpha_s \ge obj_s^{SP2}(\boldsymbol{x}^*) - (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}^*)^T \boldsymbol{E}^T \boldsymbol{u}_s^{SP2}$$
 (56)

4.3 下层: 故障运行子问题

三层 Benders 分解的下层是故障运行子问题,在现有的规划方案 x^* 下,以满足 PTH 公交服务可达性约束为前提,实现配电网的失负荷最小,并向MP 返回可靠性割约束。考虑到序贯蒙特卡洛模拟(sequential Monte Carlo simulation,SMCS)被广泛应用于配电系统可靠性评估等领域,本文根据系统元件的故障率参数,采用 SMCS 生成系统故障场景。具体方法见文献^[26],此处不再赘述。所生成的故障场景将作为各故障运行子问题的输入参数。

4.3.1 故障运行子问题模型

故障运行子问题的优化目标为配电网失负荷最小。以第 k 年第 j 次故障对应的子问题为例,其目标函数如式(57)所示。

$$\min \sum_{t \in \mathcal{Q}_{k,l}^{\text{Tc}}} \sum_{d \in \mathcal{Q}^{\text{D}}} P_{k,j,d,t}^{\text{DE,curt}} \Delta t$$
 (57)

式中: $\Omega_{k,j}^{\text{Tc}}$ 为第 k 年第 j 次故障对应子问题的运行时刻集; $P_{k,j,d,t}^{\text{DE,curt}}$ 为切负荷量。

模型的约束条件包括:

$$0 \leq P_{k,j,t}^{\text{GD}}, Q_{k,j,t}^{\text{GD}} \leq \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} \beta_{k,j,ss,t}^{\text{TG}} (S_{ss}^{\text{TG0}} + S_{ss}^{\text{TG}}),$$

$$\forall t \in \Omega_{k,j}^{\text{Tc}}$$

$$(58)$$

$$0 \leq P_{k,j,t}^{\text{GD}} + Q_{k,j,t}^{\text{GD}} \leq \sqrt{2} \sum_{ss \in \Omega^{\text{SS}}} \beta_{k,j,ss,t}^{\text{TG}} (S_{ss}^{\text{TG0}} + S_{ss}^{\text{TG}}),$$

$$\forall t \in \Omega_{k,j}^{\text{Tc}}$$

$$(59)$$

$$-\beta_{k,j,l,t}^{\text{LN}} S_l^{\text{L}} \le P_{k,j,l,t}^{\text{LN}}, Q_{k,j,l,t}^{\text{LN}} \le \beta_{k,j,l,t}^{\text{LN}} S_l^{\text{L}},$$

$$\forall l \in \Omega^{\text{L}}, \forall t \in \Omega_{k,j}^{\text{Tc}}$$

$$(60)$$

$$-\sqrt{2}\beta_{k,j,l,t}^{\text{LN}}S_l^{\text{L}} \leq P_{k,j,l,t}^{\text{LN}} \pm Q_{k,j,l,t}^{\text{LN}} \leq \sqrt{2}\beta_{k,j,l,t}^{\text{LN}}S_l^{\text{L}},$$

$$\forall l \in \Omega^{\text{L}}, \forall t \in \Omega_{t}^{\text{Tc}},$$
(61)

$$M(1-\beta_{k,j,l,t}^{LN}) \ge \sum_{l,j,l,t} K_{b,l}^{LN} V_{k,j,b,t} - 2R_l P_{k,j,l,t}^{LN} / V_0 -$$

$$2X_{l}Q_{k,j,l,t}^{\text{LN}}/V_{0} \ge M(\beta_{k,j,l,t}^{\text{LN}}-1), \forall l \in \Omega^{\text{L}}, \forall t \in \Omega_{k,j}^{\text{Tc}}$$
(62)

$$\mathbf{\Phi}_{k,j,t} = \mathbf{\Lambda}_{s,t}, \forall t < t_c \tag{63}$$

$$\mathbf{\Phi}_{k,j,t} = [E_{k,j,i,t} \Big|_{i \in \Omega^{1}}, n_{k,j,i,r,t}^{\text{depart}} \Big|_{i \in \Omega^{1}, r \in \Omega^{R}},$$

$$n_{k,j,i,t}^{\text{road}} \Big|_{i \in \Omega^{1}}]^{T}, \qquad \forall t < t_{c}$$
(64)

$$\Lambda_{s_c,t} = [E_{s_c,t,t} \Big|_{i \in \Omega^1}, n_{s_c,t,r,t}^{\text{depart}} \Big|_{i \in \Omega^1, r \in \Omega^R},
n_{s_c,t,t}^{\text{road}} \Big|_{i \in \Omega^1}]^T, \forall t < t_c$$
(65)

$$\sum_{r \in \varOmega^{\mathbb{R}}} \sum_{t \in \varOmega^{\mathsf{Tc}}_{k,j}} \sum_{g \in \varOmega^{\mathsf{G}}_{r}} \sum_{g' \in \varOmega^{\mathsf{G}}_{r}} R^{\mathsf{unserved}}_{k,j,r,t,g,g'} \leq$$

$$\varpi \sum_{r \in \Omega^{R}} \sum_{t \in \Omega_{k,j}^{\text{Tc}}} \sum_{g \in \Omega_{j}^{G}} \sum_{g' \in \Omega_{j}^{G}} R_{r,t,g,g'}^{\text{OD}}$$
 (66)

式(58)—(62)为配电网元件故障约束。式(63)—(65)为边界条件一致性约束,即故障发生时刻前系统运行状态与其对应的正常运行场景下的调度结果一致 $^{[17]}$ 。考虑到严重的公共交通服务中断会造成社会运转失灵和大规模恐慌,因此考虑公交服务缺供量不能超过总公交服务需求的某一比例 σ ,即公交服务可达性约束(66)。式中: $\beta_{k,j,ss,t}^{TG}$ 和 $\beta_{k,j,l,t}^{LN}$ 为系统故障期间配变和线路的故障状态序列(若故障则取值为0,否则为1); $\phi_{k,j,t}$ 和 $\Lambda_{s_c,t}$ 分别为故障发生前各时刻系统元件的状态变量和对应正常运行场景下的元件状态信息; s_c 为故障时段对应的正常运行场景; σ 为公交服务可达性阈值。此外,模型还包括系统运行约束(1)—(18)、(33)—(34)、(39)—(43)。

还需说明的是,本模型旨在最小化特定故障事件下的失负荷。因此相较于正常运行子问题,故障运行子问题中所有运行变量和边界参数(如风电出力、负荷功率等)下标中的正常运行场景索引 s 均变更为故障运行场景序号索引(k,j)。

4.3.2 供电可靠性割约束的生成

通过求解每个故障场景下的可靠性子问题,可以对现有规划方案下的系统可靠性进行评估,并向主问题返回可靠性割约束,具体步骤如下:

步骤 1) 初始化 k=1, j=1。

步骤 2) 求解第 k 年的第 j 次故障时的运行子问题,记为 RSP。其紧凑形式如下(具体模型见 4.3.1):

$$\begin{cases}
RSP: \min \boldsymbol{d}_{k,j} \boldsymbol{y}_{k,j} \\
s.t. \begin{cases}
\boldsymbol{D}_{k,j} \boldsymbol{y}_{k,j} + \boldsymbol{G}_{k,j} \boldsymbol{z}_{k,j} \leq \boldsymbol{f}_{k,j} - \boldsymbol{E}_{k,j} \boldsymbol{x}^* \\
\boldsymbol{y}_{k,j} \in \Omega_{k,j}^{Y} \\
\boldsymbol{z}_{k,j} \in \Omega_{k,j}^{Z}
\end{cases} (67)$$

记其目标函数最优值为 $ENS_{k,j}$,并得到离散变量 $z_{k,j}$ 的最优值 $z_{k,j}^*$ 。

步骤 3)固定 RSP 中的离散变量 $z_{k,j}$ 的值为 $z_{k,j}^*$,将 RSP 转化为一个线性规划,记为 RSP-1:

$$\begin{cases}
RSP-1: \min \boldsymbol{d}_{k,j} \boldsymbol{y}_{k,j} \\
s.t. \\
\boldsymbol{y}_{k,j} \leq \boldsymbol{f}_{k,j} - \boldsymbol{E}_{k,j} \boldsymbol{x}^* - \boldsymbol{G}_{k,j} \boldsymbol{z}_{k,j}^* : \boldsymbol{u}_{k,j}^{RSP1} \\
\boldsymbol{y}_{k,j} \in \Omega_{k,j}^{Y}
\end{cases} (68)$$

式中 $\mathbf{u}_{k,j}^{\text{RSPI}}$ 为对应约束的对偶变量最优值矩阵。记RSP-1 的目标函数最优值为 $\mathbf{u}_{k,j}^{\text{RSPI}}$ 。求解 RSP-1 并生成子问题最优割约束(69),用于约束下述松弛子问题 RSP-2 的下界 $^{[23]}$ 。

$$\theta \ge obj_{k,i}^{\text{RSP1}}(\boldsymbol{x}^*, \boldsymbol{z}_{k,i}^*) - (\boldsymbol{z}_{k,i}^{\text{c}} - \boldsymbol{z}_{k,i}^*)^{\text{T}} \boldsymbol{G}_{k,i}^{\text{T}} \boldsymbol{u}_{k,i}^{\text{RSP1}}$$
 (69)

步骤 4) 将 RSP 中的离散变量 $z_{k,j}$ 松弛为 $z_{k,j}^c$,并纳入最优割(69),可生成 RSP 的松弛子问题 RSP-2。其形式为:

$$\begin{cases}
RSP-2: \min \theta \\
\theta \ge d_{k,j} \mathbf{y}_{k,j} \\
\mathbf{D}_{k,j} \mathbf{y}_{k,j} + \mathbf{G}_{k,j} \mathbf{z}_{k,j}^{c} \le \mathbf{f}_{k,j} - \mathbf{E}_{k,j} \mathbf{x}^{*} : \mathbf{u}_{k,j}^{RSP2} \\
\mathbf{y}_{k,j} \in \Omega_{k,j}^{Y} \\
\mathbf{z}_{k,j}^{c} \in \Omega_{k,j}^{Z} \\
\theta \ge obj_{k,j}^{RSP1} (\mathbf{x}^{*}, \mathbf{z}_{k,j}^{*}) - (\mathbf{z}_{k,j}^{c} - \mathbf{z}_{k,j}^{*})^{\mathsf{T}} \mathbf{G}_{k,j}^{\mathsf{T}} \mathbf{u}_{k,j}^{RSP1}
\end{cases}$$
(70)

式中 $\mathbf{u}_{k,j}^{\text{RSP2}}$ 为对应约束的对偶变量最优值矩阵。记RSP-2 的目标函数最优值为 $obj_{k,j}^{\text{RSP2}}$ 。

步骤 5)判断是否遍历完第 k 年的所有故障,如果是则继续,否则令 j=j+1 并返回步骤 2。

步骤 6) 按式(71)更新系统预期缺供电量 EENS^[28]:

$$EENS = \sum_{k'=1}^{k} \sum_{j'=1}^{N_{k'}^{J}} ENS_{k',j'}/k$$
 (71)

式中 $N_{k'}^{J}$ 为第 k'年的系统故障次数。判断 SMCS 是 否收敛或者到达最大仿真年限。如果是则继续,否则令 k=k+1 并返回步骤 2。

步骤 7)判断 EENS 是否小于设定的系统供电可靠性阈值 $EENS^T$ 。如果是,则现有规划方案 x^* 满足系统可靠性约束,发出程序终止指令并输出规划结果;否则继续。

步骤 8)与 4.2 节相似,由于故障运行子问题 RSP 是一个混合整数线性规划问题,无法直接利用 其对应的对偶问题构造可行性割。因此仍需要利用 松弛子问题 RSP2 来构造如式(72)所示的可靠性割约束^[28],并添加到上层 MP 问题中。

$$obj^{R} - (x - x^{*})^{T} \lambda \leq EENS^{T}$$
(72)

式中 obj^R 和 l 可根据式(73)和(74)得出。

$$obj^{R} = \sum_{k'=1}^{k} \sum_{j'=1}^{N_{k'}^{1}} obj_{k',j'}^{RSP2} / k$$
 (73)

$$\lambda = \sum_{k'=1}^{k} \sum_{j'=1}^{N_{k'}^{l}} E_{k',j'}^{\mathrm{T}} u_{k',j'}^{\mathrm{RSP2}} / k$$
 (74)

4.4 三层 Benders 分解的整体算法流程

三层 Benders 分解的整体算法流程如图 5 所示。 其主要步骤包括:

步骤 1) 载入模型参数,设置迭代次数 v=1,模型目标函数下界 $LB=-\infty$,上界 $UB=+\infty$ 。

步骤 2) 重置场景计数器 s=1。求解主问题 MP,得到最优规划方案 $\mathbf{x}^*(v)$,并更新 $\mathrm{LB}=\sum_s \alpha_s^*(v)$ 。其中 $\alpha_s^*(v)$ 为第 v 次迭代时 α_s 的最优值。

步骤 3)求解运行场景 s 下的正常运行子问题 SP,得到该场景下的离散变量最优值 $z_s^*(v)$ 。

步骤 4) 根据 $z_s^*(v)$ 构造并求解 SP-1,生成子问题最优割集(54)。

步骤 5) 根据最优割集(54)构造并求解 SP-2, 生成主问题最优割约束(56)并添加到 MP 中。

步骤 6) 判断是否完成所有子问题的计算。如果是则继续,否则令 *s=s+*1,返回步骤 3。

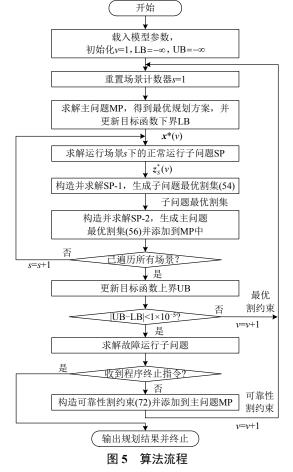


Fig. 5 Procedures of the proposed algorithm

步骤 7)根据所有子问题的最优解,更新优化问题上界 $UB = \sum_{s} obj_{s}^{SP}(v)$,其中 $\sum_{s} obj_{s}^{SP}(v)$ 为第 v次迭代中第 s 个子问题 SP 的目标函数最优值。

步骤 8)判断上界和下界是否满足|UB-LB|< 1×10^{-5} 。如果是则继续,否则令 $\nu=\nu+1$ 并返回步骤 2 继续新一轮迭代。

步骤 9) 求解故障运行子问题,具体步骤见 4.3 节。判断是否收到程序终止指令。如果是,则程序终止并输出规划结果;否则将构造可靠性割约束(72)并添加到上层主问题 MP。令 *v=v+1* 并返回步骤 2。

5 算例分析

5.1 参数设置

为了验证本文所提多层协同规划方法的有效性,采用修改的 IEEE-33 节点配电网为例进行算例分析^[29],如图 6 所示。配电网根节点处通过两台配电变压器与外电网相联,单台变压器额定容量为5MVA。4 个季度的典型风电预测出力曲线和用电负荷曲线见文献[30]。规划区计划建设一个 PTH,用于满足区域内的公交服务需求。经前期调研,筛选出 4 个 PTH 待建节点为{9,12,16,31}。此外,本文假设规划年限为 10 年。

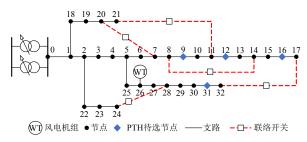


图 6 修改的 IEEE-33 节点配电网

Fig. 6 Modified IEEE 33-bus distribution network

配电网变压器单位扩容成本设为 60 万元/MVA,单位维护成本为 2.2 万元/MVA^[31]。备选扩容线路选取容量和成本依次增大的六种型号(型号 1-6)。PTH 相关设备的参数如表 1 所示。系统内各支路和配电变压器的故障率分别设为 0.1 次/(km·年)和 1.5 次/年,故障修复时间设为 6h^[16]。

算例采用北京市规模最大的公交枢纽项目(四

表 1 PTH 设备参数 Table 1 Parameters of PTH equipment

设备	投资成本	维护成本
电动公交	60 万元/辆	0.84 元/km
充电机	10 万元/台	0.1 万元/台
站内变压器	25 万元/MVA	1万元/MVA

惠公交枢纽)的实际数据。该公交枢纽承担北京市区内的 15 条公交线路的运营。如图 7 所示,本文以将四惠枢纽作为始发站的 3 条公交线路(58 路、455 路和 496 路)为例进行分析,3 条线路全长分别为 24.8km、31.4km 和 25.2km。为方便描述,下文将 3 条公交线路简写为线路 I、线路 II 和线路 III。



图 7 PTH 及其公交线路

Fig. 7 Illustration of PTH and bus routes

5.2 仿真结果

为了证明本文所提出的 PTH 灵活性赋能的多层协同规划方法的有效性,本节设计以下 4 种规划情景进行比较分析。

情景 1(1号): PTH 和配电网独立规划。该情景下 PTH 的投建位置基于交通领域经验人为给定,而设备容量根据年最大客流量确定。然后基于 PTH 的年最大电负荷确定配电网扩容方案。所得结果反映了 PTH 和配电网在非协同规划条件下的效益情况。

情景 2(2 号): PTH 和配电网协同规划,但不开发 PTH 的需求响应潜力。该方案下 PTH 基于预先设定的规则运营。PTH 运营商采用"即到即充"的方式安排 EB 充电计划,同时根据固定的时刻表安排发车计划。该方案模拟了 PTH 基于经验的运营模式,所得结果反映了不考虑 PTH 灵活性赋能条件下的规划效益。

情景 3(3 号): PTH 和配电网协同规划,但 PTH 仅执行能量—车辆调度,不提供 V2G 服务。该情景 反映部分开发 PTH 灵活性条件下的规划效益^[32]。

情景 4(4号):本文所提模型。PTH 和配电网协同规划,且 PTH 可以通过能量调度、车辆调度和参与 V2G 服务充分释放自身运营灵活性。

各情景下的规划成本和最优规划方案如表 2 和表 3 所示。从表 2 可以看出,由情景 1 号到情景 4 号,规划总成本逐渐降低。为了进一步解释上述规划结果,本文结合各规划方案下的系统调度结果进行详细对比分析。

1) 情景 1 号与情景 2 号对比结果。

表 2 各情景下的规划成本

Table 2 Planning costs under different cases

投资成本/万元					/d2a Lada	运行成本/万元				for the II.		
情景	总投资	配电网护	广容成本	P	TH 投建成z	k	- 维护 ·	总运行	购电	弃风	电池退化	年值化
	成本	线路	变压器	电动公交	充电桩	变压器	成本/万元	成本	成本	成本	成本	成本/万元
1号	1749.50	1299.74	31.50	389.60	25.03	3.66	352.29	5105.89	4868.15	81.92	155.82	7207.68
2 号	1413.81	964.54	34.17	384.88	26.60	3.64	347.75	5106.04	4868.74	81.70	155.59	6867.60
3号	940.50	605.67	21.06	300.39	10.17	3.21	284.08	4276.50	4164.43	12.71	99.36	5501.08
4 号	612.23	247.98	11.62	328.55	20.34	3.75	278.70	4185.56	4048.09	2.50	134.97	5076.49

表 3 各情景下的最优规划方案

Table 3 Optimal planning schemes under different cases

_	配电网扩容							PTH 投建			
情景	线路扩容(支路编号以该支路末节点编号表示) 变压器						电动	充电	变压器/	投建	
	型号1	型号 2	型号3	型号 4	型号 5	型号6	扩容/MVA	公交/辆	桩/个	MW	节点
1号	_	32	11—15,17	3—10,25—31	16	1	3.36	83	32	1.87	31
2号	_	24	6-9,20,22-23	3-5,18-19	_	1	3.64	82	34	1.85	9
3号	_	18—20,24	22—23	_	_	_	2.24	64	13	1.64	12
4 号	13—17,31	32	_	_	_	_	1.24	70	26	1.91	31

首先,通过对比 1 号和 2 号的规划结果,证明了 PTH 和配电网协同规划可以明显降低规划成本,其中线路投资的节约最为明显。这是由于配电网某一支路故障时,可以通过其他支路配合联络开关的投切为故障区域供电。此时部分线路可能会因承担故障区域的负荷恢复而出现潮流越限,需要进行线路扩容。而 PTH 作为配电网的新增负荷,其接入位置会显著影响配电网故障运行时的潮流分布。为了更直观地对配电网潮流进行定量分析,引入线路最大负载率 ψ_l^{\max} 的概念。 ψ_l^{\max} 的大小可以表征支路 l在运行时承载的最大潮流相对于未扩容前线路额定容量的越限程度,具体可表示为:

$$\psi_{l}^{\max} = \frac{\max_{l \in \Omega^{T}} \{ \sqrt{(P_{l,l}^{\text{LN}})^{2} + (Q_{l,l}^{\text{LN}})^{2}} \}}{S_{l}^{\text{LN0}}}, \forall l \in \Omega^{L}$$
 (75)

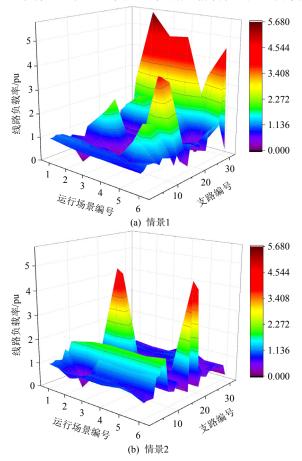
式中 $P_{l,t}^{LN}$ 和 $Q_{l,t}^{LN}$ 分别代表线路 l 在 t 时刻传输的有功和无功功率。

6 种典型运行场景下配电网各支路的最大负载率如图 8 所示。6 种典型运行场景包括:正常运行、支路 6 故障、支路 11 故障、支路 15 故障、支路 28 故障以及单台配变故障,并依次编号为 1 到 6 号。其中支路编号用该支路对应的末节点编号表示。由图 8(a)和(b)可以看出,在号 1 下 PTH 的投建位置不考虑电网侧影响,因此在配网故障时会导致大量支路潮流越限。这导致系统扩容线路多、扩容容量大,如表 3 所示。而在号 2 下,决策者可以根据故障时 PTH 负荷对潮流的影响合理选择其接入位置。

在辐射状配电网中,距离根节点越近,线路故障时处于停电区域的概率越小^[33]。因此,PTH 选择建在距根节点最近的节点 9,可最大限度降低支路越限数量和越限程度,大幅节约线路扩容成本。

2)情景2号与情景3号对比结果。

其次,对比2号和3号的规划方案可知,开发



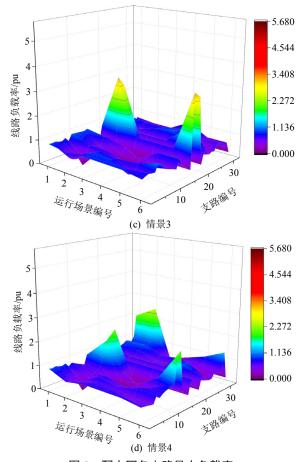


图 8 配电网各支路最大负载率 Fig. 8 Maximum load rate of each line of the distribution network

PTH 灵活性资源可以显著降低系统的投资和运行 成本。以冬季典型日为例,系统正常运行状态下 PTH 与配电网之间的交互功率和系统总负荷功率 如图 9 所示。由于 2 号采用"即到即充"的充电策 略和按照固定时刻表发车, PTH 和配电网之间缺乏 联动调节的能力。再加上乘客公交服务需求和用户 供电需求在时域上固有的高度重合特性,导致 EB 的充电负荷与配电网用电负荷出现"峰上加峰"的 现象。叠加后的系统总负荷峰值出现在电价较高的 峰时,配网将承担高额的购电成本。而在3号中, 通过能量调度,PTH将EB的充电操作转移到风电 高发的夜间(0:00-5:00)进行,降低了 PTH 在峰时 的电负荷。由图 10 可知, PTH 用电负荷的时移还 有助于缓解夜间的弃风现象,提高风电利用率。此 外,EB 发车调度进一步解锁了 PTH 的运行灵活性。 系统正常运行时不同情景下的 EB 发车计划如 图 11(a)—(c)所示。系统故障运行时不同情景下的 EB 发车计划如图 11(d)—(f)所示。对比图 11(a)和(b) 可以看出,在3号中PTH可以根据系统的实时状态 灵活安排发车计划,在满足公交服务需求约束的同

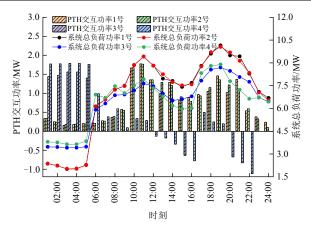


图 9 PTH 与配电网之间的交互功率和系统总负荷 Fig. 9 Interactive power between PTH and distribution system and total system load demand

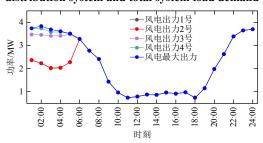


图 10 不同情景下的风电出力

Fig. 10 Wind power output under different cases 时,降低了 PTH 在日间的整体能耗。因此,3 号的运行成本显著低于 2 号。

正常运行状态下某典型目内的 PTH 车辆调度结果如图 12 所示。2 号中 PTH 遵循"即来即充"的充电规则和固定时刻表的发车规则,导致 EB 的充电需求和发车需求相叠加,造成车辆资源紧张的现象。为了满足正常的发车和充电需求,PTH 必须配置大量的 EB 和充电桩等辅助设施。而 3 号通过灵活性开发,实现了 EB 的充电和发车操作在时域上的解耦,可节约 EB 配置 18 辆、充电机 21 台。此外由图 9 可知,3 号的 PTH 电负荷峰值小于 2 号,可以配置更小容量的站内变压器。因此,3 号的 PTH 投资成本显著低于 2 号。

某次单台配电变压器故障(故障时段为 10:00—15:00)期间 PTH 与配网间交互功率和非故障配电变压器的视在功率如图 13 所示。可以看出,相较于 2号,3号对应的 PTH 用电负荷和非故障变压器承担的功率峰值更小。这是因为 3号中 PTH 在故障期间可以灵活编制发车计划,在满足公交服务可达性约束的基础上,适当降低 EB 发车频次,进而降低故障期间的整体能耗,如图 11(d)和(e)所示。这使得 3号中满足配电网供电可靠性所需的上级电网功率峰值从 2号的 8.51MVA 降到 7.05MVA,配电变压

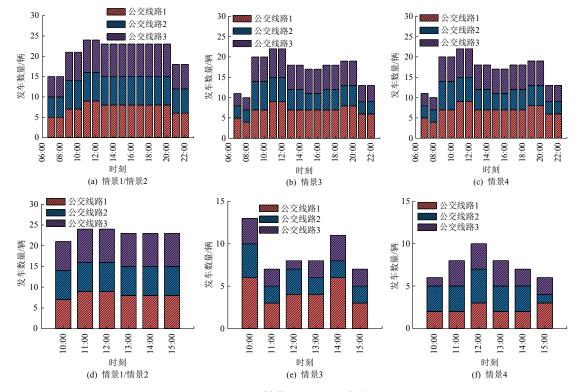


图 11 不同情景下的 EB 发车计划

Fig. 11 EB departure plans under different cases

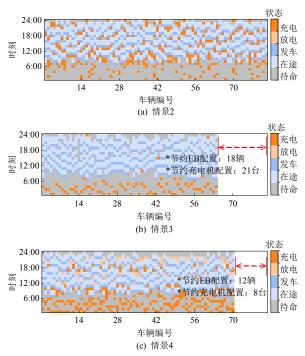


图 12 某典型日内 PTH 车辆调度结果

Fig. 12 Vehicular dispatch of the PTH in a typical day 器的扩容成本更低。同理,由图 11(b)和(c)所示,在线路故障期间,3 号中 PTH 能耗控制缓解了承担供电恢复的支路和联络开关的负担,支路越限数量和程度都明显降低,降低了线路扩容成本。因此,3 号的配电网扩容成本显著低于 2 号。

3)情景3号与情景4号对比结果。

最后,对比 3 号和 4 号的规划方案可知,PTH 提供 V2G 服务可以进一步降低系统的投资和运行成本。由图 9 和图 12(c)可知,4 号中 PTH 在风电高发时段(0:00—5:00)和低电价时段为 EB 充电,并在高电价时段参与 V2G 服务向配电网倒送电。这在降低了配电网的购电成本的同时,表现出最佳的风电消纳效果,如图 10 所示。此外,图 9 和图 12(c)还表明,为了更好地通过"高发低储"获利,4 号中 PTH 倾向于投资更多的 EB、充电桩和更大容量的站内变压器。因此,相较于3号,4号虽然 PTH 投建成本稍高,但系统运行成本进一步降低。

观察图 13 可得,单台配变故障期间,PTH 的作为备用电源向配网提供容量支撑,配变承担的视在功率峰值由 3 号的 7.05MVA 降低到 4 号的 5.86MVA。与 3 号相比,4 号中 PTH 进一步降低了 EB 发车数量(为 3 号的 82%),为电网支撑预留足够的电量。对比图 8(c)和(d)可知,由于 PTH 在故障区域内承担备用电源的角色,使得为故障区域恢复供电的支路和联络开关输送功率更低,仅有少数几条线路潮流越限。为了充分发挥 PTH 作为备用电源的效益,PTH 尽可能选择建设在配电网的末端,且附近支路容量更大的节点上(即节点 31)。因此,相较于 3 号,4 号的配电网扩容成本进一步降低。

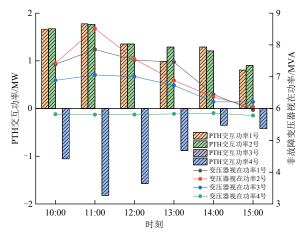


图 13 单台配电变压器故障期间 PTH 与配网间交互功率和非故障变压器的视在功率

Fig. 13 Interactive power between PTH and distribution system during single distribution transformer failure and apparent power of the non-fault transformer

5.3 影响因素分析

5.3.1 系统服务质量约束影响

服务质量需求会对系统规划结果产生深刻影响。为了揭示配电网供电可靠性约束(44)和 PTH 公交服务可达性约束(66)的影响,本节对不同的服务质量阈值(EENS^T和 Ø)下的投资成本进行对比分析,如图 14 所示。从图 14 可以看出,在相同 Ø取值的情况下,随着 EENS^T的减小,系统投资成本随之增加,且增加速度越来越快。而在相同 EENS^T的条件下,系统投资成本随 Ø的增加的变化趋势与供电可靠性约束的严格程度有强关联:在严供电可靠性约束(EENS^T<5.25MW·h/y)下,投资成本随 Ø的增加而逐渐减小;反之,投资成本对 Ø的变化并不敏感。

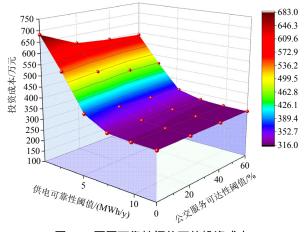


图 14 不同可靠性阈值下的投资成本 Fig. 14 Investment cost under different reliability thresholds

为了进一步阐释图 14 中的规律,固定 ϖ =20%, $EENS^{T}$ 从 12MW·h/y 减小到 0.75MW·h/y,对应的投资成本列为表 4。从表 4 可以看出,在供电可靠性

约束较松时,配电网线路和配变扩容需求小,投资成本主要为 PTH 投建成本。随着供电可靠性要求的提高,配电网扩容需求迅速增加,扩容成本也随之上升。因此在严可靠性约束下,投资增长主要由配电网扩容导致。此外,在每套规划方案下,配网供电可靠性指标 EENS 接近对应的可靠性阈值EENS^T。这说明本文所提出的规划方法可以在严格满足系统可靠性约束的前提下,获得经济性最优的精准规划方案。

表 4 不同 EENST 取值下的投资成本

Table 4 Planning results under different values of EENST

EENS ^T /	总投资	配电网	PTH 投建	EENS/
$(MW \cdot h/y)$	成本/万元	扩容/万元	成本/万元	$(MW \cdot h/y)$
12	316.33	0	316.33	9.72
9.75	316.33	0	316.33	9.72
7.5	325.28	6.60	318.67	7.46
5.25	359.94	41.27	318.67	5.24
3	498.68	161.98	336.70	2.98
0.75	612.23	259.60	352.64	0.75

同样,固定 EENS^T=0.75MW·h/y, ø由 0 增加 到 60%,对应的投资成本如表 5 所示。从表 5 可以 看出,随着 ø的增加,系统投资成本逐渐降低。这 是由于随着公交服务可达性约束的逐渐放宽,PTH 可以减少故障期间 EB 的发车数量,预留更多的电量为配电网提供容量支撑。因此,一方面,配电网的供电恢复压力进一步降低,扩容成本随之下降;另一方面,只需要更少的 EB 就可以达到预设的容量支撑效果,PTH 投资成本也相应减少。

表 5 不同 如取值下的投资成本

Table 5 Planning results under different values of ϖ

<i>च</i> ⁄%	总投资成本/万元	配电网扩容/万元	PTH 投建成本/万元
0	682.25	363.31	326.54
20	612.23	259.60	352.64
40	597.54	259.83	337.71
60	588.50	260.17	328.33

5.3.2 乘客出行特性影响

5.2 节已经证明了 PTH 灵活性开发在节约系统 投资和运行成本方面的重要作用。然而, PTH 的灵 活性潜力本质上取决于公众的公交服务需求。在实 际情况下,不同地域的人口具有不同的生活方式, 因此会形成不同的出行需求特性,进而影响 PTH 灵活性的开发效率。为了探究不同公交出行需求对 规划结果的影响,本文考虑 3 种不同的公交出行日 客流量模式,如图 15 所示。3 种模式均进行标准化 处理转化为相同的客流总量,其对应的规划成本列为表 6。

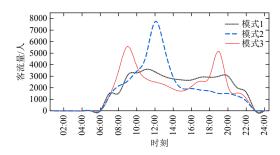


图 15 不同的日客流量模式

Fig. 15 Different patterns of daily passenger flow

表 6 不同日客流模式下的规划结果
Table 6 Planning results under different
daily passenger flow patterns

模式	投资成本/万元	维护成本/万元	运行成本/万元	总成本/万元
模式1	623.27	276.72	4179.52	5079.51
模式2	893.37	274.49	4262.16	5430.02
模式3	734.66	277.79	4199.42	5211.86

模式 1: 平缓模式。公交客流量在一天内均匀分布。这种模式模拟了大多数休闲旅游城市的常规出行需求,如三亚等。

模式 2: 单峰模式。公交客流量高峰出现在一 天的午间时段。这种模式对应高纬地区城市,如齐 齐哈尔等。

模式 3: 双峰模式。公交客流量高峰出现在一 天的清晨和傍晚。这种模式对应大多数通勤主导型 城市,如杭州。

从表 6 可以看出,模式 1 对应的总成本最低,而模式 2 的总成本最高。3 种模式下总成本的差异主要体现在投资成本和运行成本方面。其中模式 1 的运行成本最低,而模式 2 的运行成本最高。这是由于单峰模式下,公交服务需求在时域上更为集中,压缩了 PTH 灵活性的释放空间;而在平缓模式下,PTH 的灵活性得以充分释放。上述结果表明,开发 PTH 灵活性的预期收益可能会因乘客的出行模式不同而呈现很大差异。此外,在单峰模式下,PTH 承担更大的尖峰客流负荷,因此需要配置更多的 EB 和相应辅助设备,投资成本最高。

6 结论

本文基于电力-交通耦合视角,建立 PTH 灵活性赋能的高可靠性配电网协同规划模型,并设计了一种多层 Benders 分解方法进行高效求解。通过算例分析得出的结论如下:

- 1) 本文提出的 PTH 与配电网协同规划模型可以有效促进能源—交通系统协调发展,充分发掘 PTH 的灵活性潜力,显著降低系统投资成本和运行成本,并满足供电可靠性和公交服务可达性的需求。
- 2) 系统服务质量阈值的设定对系统投资成本 有深刻的影响。更高的服务质量会导致更昂贵的投 资成本,因此投资者需要实现服务质量提升与额外 投资代价之间的均衡。
- 3) 开发 PTH 灵活性的预期收益可能会因乘客的出行模式不同而呈现很大差异,其中波动平缓的日客流量最利于 PTH 灵活性开发。

后续研究将进一步考虑交通路网拓扑、路况和客流量时空动态演化的影响;以及提出分散式决策框架以更好地刻画 PTH 和配电网运营商等多元利益主体之间存在的博弈关系等。

参考文献

- [1] GONZÁLEZ L G, CORDERO-MORENO D, ESPINOZA J L. Public transportation with electric traction: experiences and challenges in an Andean city [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110768.
- [2] WU Xiaomei, FENG Qijin, BAI Chenchen, et al. A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system[J]. Energy, 2021, 224: 120106.
- [3] 肖白,朱珈汛,姜卓,等.考虑车辆充电调度机制的电动公交车充电站规划[J].电力自动化设备,2022,42(1):148-155.
 - XIAO Bai, ZHU Jiaxun, JIANG Zhuo, et al. Planning of electric bus charging station considering vehicle charging scheduling mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 148-155(in Chinese).
- [4] MOON J, KIM Y J, CHEONG T, et al. Locating battery swapping stations for a smart e-bus system [J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1142.
- [5] EHSAN A, YANG Qiang. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—Part I: uncertainty modeling and problem formulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 970-978.
- [6] 何晨可,朱继忠,刘云,等. 计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 92-111.

HE Chenke, ZHU Jizhong, LIU Yun, et al. Coordinated planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station and active distribution network considering carbon reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 92-111(in

Chinese).

市综合能源系统规划[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022[2022-03-26]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107. TM.20220118.1425.014.html.
LI Ke, SHAO Chengcheng, WANG Ya'nan, et al. Optimal planning of urban integrated energy systems considering electricity-gas-transportation interactions [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022[2022-03-26]. http://kns.

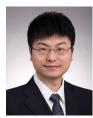
[7] 李珂, 邵成成, 王雅楠, 等. 考虑电-气-交通耦合的城

- cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM. 20220118.1425.014.html(in Chinese).
- [8] 杨阳,于滨,孔璐,等.基于枢纽魅力度的城市公交枢 纽布局优化方法[J].系统工程理论与实践,2013,33(9): 2422-2429.
 - YANG Yang, YU Bin, KONG Lu, et al. Urban transit hub location optimization based on attractiveness[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(9): 2422-2429 (in Chinese).
- [9] RAFIQUE S, NIZAMI M S H, IRSHAD U B, et al. A two-stage multi-objective stochastic optimization strategy to minimize cost for electric bus depot operators [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 332: 129856.
- [10] HAMID M, BASTAN M, HAMID M, et al. Solving a stochastic multi-objective and multi-period hub location problem considering economic aspects by metaheuristics: application in public transportation [J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2019, 60(3): 183-202.
- [11] ROSSOLOV A, NAUMOV V, POPOVA N, et al. Estimation of transport accessibility in case of rational transport hub location[J]. Transport, 2021, 36(1): 1-12.
- [12] 陈丽娟,秦萌,顾少平,等. 计及电池损耗的电动公交 车参与 V2G 的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60. CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal
 - dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60(in Chinese).
- [13] WU Zongxiang, GUO Fangce, POLAK J, et al. Evaluating grid-interactive electric bus operation and demand response with load management tariff[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113798.
- [14] ELLIOTT M, KITTNER N. Operational grid and environmental impacts for a V2G-enabled electric school bus fleet using DC fast chargers[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 30: 316-330.
- [15] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. A review of power distribution planning in the modern power systems era: models, methods and future research [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 89-100.

- [16] LI Zihao, WU Wenchuan, TAI Xue, et al. A reliability-constrained expansion planning model for mesh distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 948-960.
- [17] 林哲,胡泽春,宋永华. 考虑 N-1 准则的配电网与分布 式储能联合规划[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4390-4402.
 - LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Joint planning of distribution network expansion and distributed energy storage systems under N-1 criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4390-4402(in Chinese).
- [18] 王梓旭,林伟,杨知方,等. 考虑负荷弹性空间的配电 网可靠性扩展规划方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022[2022-03-26]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013. pcsee.211525.
 - WANG Zixu, LIN Wei, YANG Zhifang, et al. A reliability-constrained distribution network expansion planning method considering flexibility space of power demand[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022 [2022-03-26]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee. 211525(in Chinese).
- [19] 苏粟,韦存昊,陈奇芳,等.城市道路抢修辅助重要负荷恢复的电动汽车能量时空分层调度[J/OL].电力系统自动化,2022[2022-06-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220511.1733.006.html.
 SU Su, WEI Cunhao, CHEN Qifang, et al. Spatiotemporal hierarchical scheduling for electric vehicle energy considering the assistance of urban road repair to critical loads restoration[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022[2022-06-13].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180. TP.20220511.1733.006.html(in Chinese).
- [20] ZENG Bo, SUN Bo, WEI Xuan, et al. Capacity value estimation of plug-in electric vehicle parking-lots in urban power systems: a physical-social coupling perspective [J]. Applied Energy, 2020, 265: 114809.
- [21] HE Yi, SONG Ziqi, LIU Zhaocai. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 48: 101530.
- [22] ZHANG Le, WANG Shuaian, QU Xiaobo. Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2021, 154: 102445.
- [23] 吴志, 刘亚斐, 顾伟, 等. 基于改进 Benders 分解的储能、分布式电源与配电网多阶段规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4705-4715.
 - WU Zhi, LIU Yafei, GU Wei, et al. A modified decomposition method for multistage planning of energy storage, distributed generation and distribution network

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4705-4715(in Chinese).
- [24] MUÑOZ-DELGADO G, CONTRERAS J, ARROYO J M. Distribution network expansion planning with an explicit formulation for reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2583-2596.
- [25] 罗艳红,梁佳丽,杨东升,等. 计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):47-54.
 - LUO Yanhong, LIANG Jiali, YANG Dongsheng, et al. Configuration and operation optimization of electricity-gas-heat energy hub considering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 47-54(in Chinese).
- [26] 边晓燕, 史越奇, 裴传逊, 等. 计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4529-4543.
 - BIAN Xiaoyan, SHI Yueqi, PEI Chuanxun, et al. Bi-level collaborative configuration optimization of integrated community energy system considering economy and reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4529-4543(in Chinese).
- [27] ZHENG Qipeng, WANG Jianhui, PARDALOS P M, et al. A decomposition approach to the two-stage stochastic unit commitment problem[J]. Annals of Operations Research, 2013, 210(1): 387-410.
- [28] DEHGHAN S, AMJADY N, CONEJO A J. Reliability-constrained robust power system expansion planning [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2383-2392.
- [29] 黄淳驿,王承民,谢宁,等.基于运行-市场强耦合特性的配电网扩展规划[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4716-4731.
 - HUANG Chunyi, WANG Chengmin, XIE Ning, et al. Distribution expansion planning based on strong coupling

- of operation and spot market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4716-4731(in Chinese).
- [30] ZENG Bo, LIU Yu, XU Fuqiang, et al. Optimal demand response resource exploitation for efficient accommodation of renewable energy sources in multi-energy systems considering correlated uncertainties [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125666.
- [31] 贾龙,胡泽春,宋永华,等.储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):73-83.
 - JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-83(in Chinese).
- [32] ALWESABI Y, LIU Zhaocai, KWON S, et al. A novel integration of scheduling and dynamic wireless charging planning models of battery electric buses[J]. Energy, 2021, 230: 120806.
- [33] BIE Zhaohong, ZHANG Peng, LI Gengfeng, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2342-2350.



曾博

在线出版日期: 2022-08-18。 收稿日期: 2022-04-06。 作者简介:

曾博(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能配用电系统规划、需求侧响应建模与分析等, alosecity@126.com: 罗旸凡(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划,能源-交通系统建

模, lyf1358330927@163.com。

(责任编辑 李泽荣)