面向重大社会事件的电力应急资源两阶段规划方法

韩建沛¹,席嫣娜²,刘 念¹,张思璐¹,王 舒² (1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206;2. 国网北京市电力公司,北京 100031)

摘要:重大社会事件融合了信息、物理、社会多元信息,增大了传统电力应急资源规划的难度和复杂度,为此, 提出面向重大社会事件的电力应急资源两阶段规划方法。分析电力应急资源规划的信息、物理、社会耦合因 素,引入负荷重要度来量化重大社会事件对应急资源规划的影响,给出整合应急服务点规划与应急资源配置 的两阶段规划框架;建立考虑负荷重要度的停电风险量化指标,综合考虑负荷停电风险、服务点投资成本和 应急服务时限约束,构建应急服务点多点多目标规划模型,并提出基于 ε 约束的多目标模型求解方法;考虑 应急资源需求的不确定性,提出基于区间优化的应急资源优化配置模型,并将原区间优化模型转化为乐观优 化问题和悲观优化问题进行求解。算例仿真结果验证了所提两阶段规划方法的有效性。

关键词:重大社会事件;电力应急资源;两阶段规划;多目标优化;区间优化

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208007

0 引言

电力应急管理是预防或减少突发事件发生、降低突发事件影响的重要措施。近几年,因自然灾害频繁发生而导致的大停电事件给人们的生产生活造成了巨大损失^[1],如:2015年12月,乌克兰西部地区的停电导致该国超过一半的地区处于断电状态^[2]; 2016年9月,强台风伴随暴风雨、闪电、冰雹等极端天气导致南澳大利亚州全州大停电;2019年2月,由于水电站遭到蓄意破坏,委内瑞拉全国23个州中有21个州发生停电事件;2021年2月,美国得州电网发生停电事件,影响用户数超过480万人。因此,电力应急管理相关研究受到了越来越多的关注。

目前,国内外关于电力应急管理的研究主要面向极端天气、自然灾害、恶意攻击等突发事件场景, 研究思路一般可分为如下3个维度:事件发生前的 应急资源提前规划布局,事件发生过程中的应急资 源紧急调配,事件发生后的应急资源快速响应。现 有研究大多集中在应急资源紧急调配和快速恢复供 电方面,如:文献[3-4]提出应急电源两阶段鲁棒优 化调度方法,文献[5]建立考虑人员调配的应急电源 随机混合整数线性规划模型,文献[6]提出面向电力 信息物理系统韧性提升的通信网鲁棒优化方法,文 献[7]提出含云计算数据中心的电网两阶段分布式 鲁棒优化调度方法。

收稿日期:2021-11-19;修回日期:2022-06-02

在线出版日期:2022-08-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFF0305800);国家 电网有限公司科技项目(520201210025)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2020YFF0305800) and the Science and Technology Project of SGCC(520201210025)

电力应急资源的规划是保障事件发生过程中应 急资源紧急响应、事件发生后快速恢复供电的前提, 对降低突发事件的影响具有至关重要的作用。现有 关于事件发生前应急资源规划的研究主要集中在应 急电源容量规划和应急服务点选址2个方面:文献 [8]以最大化社会效益为目标,提出计及负荷和调配 时间不确定性的应急电源优化配置方法;文献[9]采 用约束法解决多目标应急资源优化选址问题;文献 [10]以各负荷点的停电风险最小为优化目标,建立 电力应急服务点选址优化模型;文献[11]综合考虑 用户停电损失、停电时限约束及应急服务成本,提出 电力应急服务点多点选址规划方法。

现有关于应急资源规划的研究大多聚焦于极端 天气、恶意攻击等外部因素,而较少考虑电力系统内 部特殊应用场景,如2022年北京冬奥会等重大社会 事件的应用场景。随着智能电网和能源互联网的建 设和发展,未来能源电力领域将是信息、物理、社会 深度耦合的整体[12-14],面向重大社会事件的应急资 源规划研究,不仅具有理论与工程意义(如提高系统 运行经济性),而且具有显著的社会价值。现有应急 资源规划方法没有考虑重大社会事件对应急资源规 划的影响,无法适用于重大社会事件场景。面向重 大社会事件的电力应急资源规划主要面临如下难 点:一是面向重大社会事件的电力应急资源规划融 合了信息、物理、社会多元信息,增大了传统电力应 急资源规划的难度和复杂度,电力线路、交通路网等 属于物理域范畴,电力应急资源(如应急人员、应急 车辆、应急物资等)属于社会域范畴,重大社会事件 会提高对应急资源、应急服务时限等要求,同时,电 力应急资源规划依赖于信息域的数据采集、分析与 处理;二是电力应急资源规划既涉及应急服务点的 优化选址,又涉及应急资源在各应急服务点的容量 配置,选址优化与容量配置优化的耦合使得规划问 题的求解难度显著增加。

针对上述两方面难点问题,本文提出面向重大 社会事件的电力应急资源两阶段规划方法,主要创 新工作如下:一是分析电力应急资源规划的信息、物 理、社会因素耦合特性,通过引入负荷重要度量化重 大社会事件对应急资源规划的影响;二是提出电力 应急资源两阶段规划方法,整合考虑停电风险的应 急服务点多目标规划与考虑需求不确定的电力应急 资源优化配置,实现应急服务点选址与应急资源容 量配置的综合考虑。在阶段1,考虑负荷停电风险 和应急服务时限约束,建立计及停电风险和投资成 本的电力应急服务点多点多目标规划模型,并采用 基于 ε 约束的多目标规划模型优化方法进行求解: 在阶段2,基于阶段1应急服务点的选址规划结果, 考虑应急资源需求的不确定性,提出基于区间优化 的电力应急资源不确定配置模型,并采用不确定优 化模型的确定性转化与优化方法进行求解。

1 电力应急资源两阶段规划框架

1.1 信息、物理、社会因素耦合分析

本文电力应急资源规划考虑信息、物理、社会多 维因素,目的是保障重大社会事件下对用户的可靠 供电。电力应急资源规划的信息、物理、社会因素耦 合分析如图1所示。电力应急资源规划实现各类社 会性应急资源在物理层面交通网络中的优化配置, 重大社会事件对应急服务时限等要素具有较高的要 求,这将会直接影响应急资源在物理层面交通网络 中的配置结果;对于重大社会事件下的电力应急需 求,通过应急人员、应急车辆、应急物资等应急资源 在物理层面交通网络中的合理配置为重大社会事件 的可靠供电提供支撑;在信息层面,"云大物移智链" 等新兴技术,可实现对物理层面、社会层面多维信息





的采集、分析与处理,是实现电力应急资源规划的技术支撑。因此,本文电力应急资源规划是基于信息 层面的先进信息通信等技术,实现应急服务点的优 化选址以及应急人员、应急车辆、应急物资等社会性 资源在物理层面交通网络中的优化配置,从而满足 面向重大社会事件的电力应急需求。

1.2 面向重大社会事件的电力应急资源两阶段规 划框架

在应急资源规划的过程中应急服务点选址与应 急资源配置存在深度耦合关系,为了降低规划问题 的复杂度,本文提出面向重大社会事件的电力应急 资源两阶段规划框架,如图2所示。在阶段1:考虑 不同类型负荷社会属性的差异化特性,提出负荷重 要度及停电风险量化模型来量化重大社会事件对应 急资源规划的影响;将停电风险作为应急需求点的 权重,建立电力应急网络的赋权无向图模型;考虑应 急需求点停电风险、应急服务时限、服务点投资成本 等因素,提出应急服务点多点多目标选址规划模型, 并采用基于ε约束的多目标规划模型优化方法进行 求解。在阶段2:基于阶段1的应急服务点选址规划 结果,考虑各应急需求点应急资源需求的不确定性 特征,引入区间数来表征应急资源需求,提出基于区 间优化的应急资源在各服务点的优化配置模型;针 对所构建的区间规划模型,引入乐观优化问题和悲 观优化问题,并采用区间规划问题的确定性转化 与优化方法进行求解。通过上述两阶段规划模型实 现电力应急服务点的选址规划与应急资源的优化 配置。



图 2 应急资源两阶段规划框架 Fig.2 Two-stage planning framework of emergency resources

2 考虑停电风险的应急服务点多目标规划

2.1 考虑负荷重要度的停电风险量化

在电力系统运行过程中存在诸多不确定性因素 和复杂随机工况,如新能源发电的随机性、负荷的波 动、恶劣天气、人为破坏等,这使得系统安全运行面 临风险。一般通过事件或故障发生的概率与所造成 损失的乘积来对风险进行量化^[10,15]。实际上,相同 的破坏性事件给不同类型用户带来的损失是不同 的,如对于居民用户而言,随机性故障带来的短时 间停电只会给用户的生活带来不便;对于大型工业 用户或公共医疗卫生用户而言,随机性故障带来的 短时间停电将带来巨大的经济损失,甚至会威胁人 员的生命安全。基于此,本文考虑不同类型负荷停 电损失的社会属性差异化特征,提出计及负荷重要 度的停电风险量化模型。

负荷点停电风险等于负荷点故障发生概率和停 电损失的乘积。负荷点停电损失等于负荷点单位停 电损失和缺电功率的乘积。不同负荷点单位停电损 失与负荷点重要度有关,负荷点重要度越高,该负荷 点单位停电损失越大。一般较为重要的负荷会自备 应急电源,负荷点缺电功率等于功率需求与备用发 电量之差。

在实际应用中,根据电力负荷对供电可靠性的 要求以及中断供电造成的损失和影响程度,可以将 电力负荷分为如下3级:一级负荷,中断供电会造成 人身伤亡、政治及经济重大损失;二级负荷,中断供 电会在政治、经济上造成较大损失,影响居民正常生 活;三级负荷,不属于一、二级的负荷。根据负荷等 级定义负荷重要度,负荷重要度取值区间为[0,1), 负荷等级和负荷重要度的对应关系如附录A表A1 所示。

对于应急需求点*i*,假定其在给定时段内发生停 电故障的概率为*p*_i(该值可通过可靠性评估获取,此 处不再赘述),其单位时间停电风险*R*_i可表示为:

$$R_i = p_i h(\rho_i) \max \{L_i - P_i, 0\}$$
(1)

$$h(\rho_i) = \frac{Q_0}{1 - \rho_i} \quad \rho_i \in [0, 1) \tag{2}$$

式中: ρ_i 为应急需求点i的重要度, ρ_i 取值越接近0, 表示应急需求点i的重要程度越低,反之重要程度越 高; $h(\rho_i)$ 为应急需求点i的单位停电损失; L_i 为应急 需求点i的功率需求; P_i 为应急需求点i的备用发电 容量; Q_0 为用户的单位停电成本,其值可通过统计 调查获得。

2.2 基于图论的电力应急网络模型

假定给定的电力应急网络包含V个应急需求节 点和E条交通路径,构建电力应急网络赋权无向图 模型 $G=\{B,\xi,R\}$ 。其中: $B=\{1,2,\dots,V\}$ 为该应急网 络的需求节点集合;ξ={e₁,e₂,…,e_E}为该应急网络的路径集合,e_l(l=1,2,…,E)为应急网络中的第*l*条路径;R={R₁,R₂,…,R_V}为应急网络需求节点的权重集合,R_i(i=1,2,…,V)为应急需求点*i*的权重,此处采用式(1)定义的单位时间停电风险来表征应急网络需求节点的权重。需要说明的是,由图1物理域中交通网和电力网的关系可知,应急需求点数量与电力网络中电力线路和电力负荷节点数量一致,即应急需求源于电力网络中线路故障或负荷电力供应不足。

对于定义的图G,任意给定节点 $i,j \in B$ 且假定节 点j在图G中节点p和q之间,用l(i,j)表示无向图中 节点i与节点j之间的最短距离,则l(i,j)满足如下 关系:

 $l(i,j) = \min \{ l(i,p) + l(p,j) + l(i,q) + l(p,q) \}$

 $i, j, p, q \in B$ (3)

2.3 应急服务点的多点多目标选址规划模型

电力应急服务点选址规划的目的是通过统筹考 虑应急服务时限、投资成本等因素,得到应急服务点 在应急网络节点中的布局方案。电网应急服务点的 规划存在两方面难点:一是对于规模较大、对应急服 务时限要求较高的电力应急网络,单个应急服务点 难以满足实际的应急服务需求,一般需配置多个应 急服务点来协同完成应急任务;二是应急需求点的 停电时间越长,停电损失就越大。因此,服务时限约 束对于服务点规划而言尤为重要,但仅考虑服务时 间是不够的,需综合考虑应急响应时间、停电风险、 投资成本等多种因素。记 B^M={1,2,...,M}为图 G 中M个候选应急服务点集合,本文提出考虑停电风 险的多应急服务点多目标选址规划模型。

1)优化目标。

需要说明的是,本文中多个应急服务点由统一 的应急管理中心进行规划,因此,综合考虑多个应急 服务点的总投资成本和应急需求点停电风险,构建 多应急服务点多目标规划模型,目标函数为:

$$F_1 = \sum_{i \in B} R_i l(i, B^M) / d_{avg}$$
(4)

$$F_{2} = \sum_{i \in \mathbb{R}^{H}} s_{i} C_{ei} + C_{e0}$$
(5)

式中:目标函数 F_1 、 F_2 分别为应急需求点的停电风险 和应急服务点的投资成本; R_i 为式(1)定义的单位时 间停电风险;l(i, B'')为应急需求点i到服务点集合 B''的最短距离, $l(i, B'')=\min_{i \in B''} l(i, j); d_{avg}$ 为应急资源

在交通网络上的平均行驶速度;*s_i*为0-1变量;*C_{ei}*为 应急服务点*i*的等值投资成本,包括应急服务点的建 设费用、维护费用等,*C_{e0}*为应急服务平台的运维成 本,*C_{ei}和C_{e0}*的取值受经济发展水平、交通条件等因 素影响,本文假定其为给定常数^[12]。

191

第3期

2)约束条件。

应急服务时限约束,即:

$$l(i, B^{M})/d_{avg} \leq t_{i, \max} \quad i \in B \tag{6}$$

式中:*t_{i,max}为应急需求点i*的最大允许停电时间,其 值由负荷功率和备用电源容量决定。

投资成本约束,即:

$$\sum_{i \in B^{M}} s_{i}C_{ei} + C_{e0} \leq C_{\max}$$

$$\tag{7}$$

式中:C_{max}为应急服务点规划投资的成本上限。

取值范围约束,即:

$$s_i = \begin{cases} 1 & i \in B^M \\ 0 & i \notin B^M \end{cases}$$
(8)

因此,式(4)一(8)构成考虑停电风险的多应急 服务点多目标规划模型。

2.4 基于 ε 约束的多目标模型求解

多目标优化问题的常见求解方法包含加权求和 法、*ε*约束法等^[16]。由于加权求和法的权重选取存 在较强的主观性,因此本文采用*ε*约束法对所提多 目标优化模型进行求解。

ε约束法的一般思路是从多目标优化模型中选取重要的目标作为优化对象,将剩下的目标作为附加约束条件,从而将原多目标优化问题转化为一系列单目标优化问题。给定多目标优化问题的一般化形式为:

$$\begin{cases} \min\{f_1(x), f_2(x), \cdots, f_L(x)\}\\ \text{s.t. } x \in \Omega \end{cases}$$
(9)

式中:x为决策变量; $f_1(x) - f_L(x)$ 为L个目标函数; Ω 为x的可行域。选取 $f_1(x)$ 为主要目标,则考虑 ε 约束法后,式(9)可转化为:

$$\begin{cases} \min \{ f_1(x), f_2(x), \cdots, f_L(x) \} \\ \text{s.t.} \quad f_2(x) \leq \varepsilon_2 \\ \vdots \\ f_L(x) \leq \varepsilon_L \\ x \in \Omega \end{cases}$$
(10)

式中: $\varepsilon_2 - \varepsilon_L$ 分别为目标函数 $f_2(x) - f_L(x)$ 的上限。

对于作为附加约束的目标函数,需要计算其上限和下限,并且将目标函数取值范围进行拆分,考虑到目标函数F₂是决策变量的线性函数,易于计算其取值范围并进行拆分,因此将目标函数F₂作为约束。对于应急服务点规划,降低停电风险是保证规划方案合理的首要任务,因此将目标函数F₁作为主要目标。

基于此,本文的应急服务点规划模型以目标函数*F*₁为主要目标,将目标函数*F*₂的取值范围平均分为*K*段,则基于ε约束法可将2.3节模型转化为如下 *K*+1个子优化问题:

$$\begin{cases} \min F_{1} = \sum_{i \in B} R_{i} l(i, B^{M}) / d_{avg} \\ \text{s.t.} \quad F_{2} \leq \varepsilon_{k}^{2} \\ \varepsilon_{k}^{2} = F_{2}^{\max} - \frac{F_{2}^{\max} - F_{2}^{\min}}{K} k = 0, 1, \cdots, K \\ \rightrightarrows (6) - (8) \end{cases}$$
(11)

式中: \mathcal{E}_k^2 为第k个子优化问题中目标函数 F_2 的上限; F_2^{\max} 、 F_2^{\min} 分别为目标函数 F_2 的上、下限。

对于式(11)所示的K+1个优化问题,当假定各服务点的等值单位投资成本均相同时,应急服务点的投资成本与服务点数量呈线性关系,因此,取 F'_2 = \sum_{s_i} ,则式(11)可进一步转化为:

$$\begin{cases} \min F_{1} = \sum_{i \in B} R_{i} l(i, B^{M}) / d_{\text{avg}} \\ \text{s.t.} \quad F_{2}' \leq \varepsilon_{k}^{2'} \\ \varepsilon_{k}^{2'} = n \quad n = 0, 1, \cdots, N \\ \rightrightarrows (6) - (8) \end{cases}$$
(12)

式中: $\varepsilon_{k}^{2'}$ 为转化后第k个子优化问题中目标函数 F'_{2} 的上限;N为应急服务点数量,本文假定N=8。

本文采用模糊隶属度的方法来选取最优折中 解^[17],对于求得的Pareto解集,分别计算如(13)所示 模糊隶属度来表征对每个Pareto解的满意度。

$$\mu_{g} = \begin{cases} 1 & F_{g} < F_{g}^{\min} \\ \frac{F_{g}^{\max} - F_{g}}{F_{g}^{\max} - F_{g}^{\min}} & F_{g}^{\min} < F_{g} < F_{g} \end{cases}$$
(13)

式中: F_g^{max} 、 $F_g^{\text{min}}(g=1,2)$ 分别为目标函数 F_g 的最大值和最小值。当 $\mu_g=1$ 时,表示对目标函数 F_g 完全满意;当 $\mu_g=0$ 时,表示对目标函数 F_g 完全不满意。对于每个Pareto解,以标准化满意度 $\mu=(\mu_1+\mu_2)/2$ 来表征决策者对该解的满意程度。遍历整个Pareto解集,标准化满意度最大的解即为最优折中解。

3 考虑需求不确定的电力应急资源优化配置

3.1 基于区间优化的电力应急资源配置模型

基于阶段1得出的应急服务点选址结果,本节 进行电力应急资源在各应急服务点的优化配置,以 满足各应急需求点的应急保障需求,从而为实现不 确定事件或故障发生时应急资源的紧急调度和快速 响应提供支撑。

对于电力应急资源的优化配置,需要在深入分 析各应急需求点的应急资源需求的基础上,通过将 各类应急资源在各应急服务点进行优化分配,实现 应急资源总成本最小的目标。但天气、人为等因素 造成的电力元件设备停运存在强不确定性,这使得 应急需求点的应急需求难以被准确评估和量化。因 此,本文采用区间形式来表征各应急需求点的应急 资源需求,提出基于区间优化的电力应急资源分配 模型。

1) 目标函数,即: $F_{\text{allo}} = \sum_{i \in B^u} \sum_{j \in B} \sum_{C_k \in C} \rho_i \pi_{ijC_k} l(i,j) e_{C_k}^{\text{tra}} + \sum_{i \in B^u} \sum_{C_k \in C} e_{C_k}^{\text{inv}} M_{iC_k} \quad (14)$

式中: F_{allo} 为应急资源的总成本,等号右边第一项表示电力应急资源的总运输成本,第二项表示应急资源的投资成本; $C = \{C_1, C_2, \dots, C_H\}$ 为应急资源集合, $C_h(h=1, 2, \dots, H)$ 表示第h类应急资源,H为应急资源 源类型数; π_{ic_h} 为应急服务点i向应急需求点j运输 应急资源 C_h 的数量; $e_{C_h}^{ira}$ 为应急资源 C_h 的单位距离运 输成本; $e_{C_h}^{ira}$ 为应急资源 C_h 的单位距离运 急服务点i中应急资源 C_h 的数量。

2)约束条件,即:

$$\sum_{i\in B''} \pi_{ijC_h} \ge [\underline{D}_{jC_h}, \overline{D}_{jC_h}] \quad j \in B, C_h \in C$$
(15)

$$\sum_{i \in R} \pi_{ijC_{h}} \leq M_{iC_{h}} \quad i \in B^{M}, C_{h} \in C$$
(16)

$$M_{iC_h} \leqslant \overline{M}_{iC_h} \quad i \in B^M, C_h \in C$$
(17)

式中: $D_{jc_{k}} \in \left[\underline{D}_{jc_{k}}, \overline{D}_{jc_{k}}\right]$ 为应急需求点 j 对应急资源 C_{h} 的需求, $\overline{D}_{jc_{k}} \setminus \underline{D}_{jc_{k}}$ 分别为该不确定区间的上边界、下 边界,该区间范围可根据应急需求点应急资源需求 的预测值和预测精度得到; $\overline{M}_{ic_{k}}$ 为应急服务点i中应 急资源 C_{h} 的数量上限。

因此,式(14)一(17)构成基于区间优化的电力 应急资源优化配置模型。不难看出,应急需求点的 需求不确定性仅体现在优化配置模型不等式约束的 右端项,因此该模型是一种特殊结构的区间优化 模型。

3.2 应急资源优化配置模型的转化与求解

对于3.1节的区间优化模型,其优化目的是要得 到应急资源配置方案的区间解,因此,为了求得该区 间解的上边界和下边界,将该区间优化模型转化为 2个确定性模型^[18],即乐观优化问题和悲观优化问 题,通过求解2个确定性优化问题,可得到应急资源 配置方案的乐观解和悲观解。

乐观优化问题为:

$$\begin{cases} \max_{w_{c_{k}}} \min_{\pi_{c_{k}}} \sum_{i \in B^{u}} \sum_{j \in B} \sum_{C_{k} \in C} \rho_{i} \pi_{ijC_{k}} l(i,j) e_{C_{k}}^{\text{tran}} + \sum_{i \in B^{u}} \sum_{C_{k} \in C} e_{C_{k}}^{\text{inv}} M_{iC_{k}} \\ \text{s.t.} \sum_{i \in B^{u}} \pi_{ijC_{k}} \ge w_{jC_{k}} \quad j \in B, C_{h} \in C \\ \sum_{j \in B} \pi_{ijC_{k}} \le M_{iC_{k}} \quad i \in B^{M}, C_{h} \in C \\ M_{iC_{k}} \leqslant \overline{M}_{iC_{k}} \quad i \in B^{M}, C_{h} \in C \\ w_{jC_{k}} \in \left[\underline{D}_{jC_{k}}, \overline{D}_{jC_{k}} \right] \quad j \in B^{M}, C_{h} \in C \end{cases}$$
(19)

对于式(18)所示的乐观优化问题,由于内外层 均为求最小化,可直接将内外层合并为单层优化问 题进行求解,为了保证求得的解为区间优化问题的 下界,将不确定区间松弛为下界以保证可行域最大。 对于式(19)所示的悲观优化问题,希望优化的可行 域尽可能小,因此将不确定区间松弛为上界。至此, 基于区间优化的电力应急资源配置模型被转化为 2个确定性的线性规划问题,可采用单纯型法、分支 定界法等方法进行求解。

综上,本文所提应急资源两阶段规划模型的优 化求解流程图如图3所示。



图 3 所提两阶段规划模型求解流程图 Fig.3 Solution flowchart of proposed two-stage planning model

4 算例分析

4.1 算例设置

为验证本文所提两阶段规划方法的有效性,基于某区域电力系统的应急网络进行仿真分析^[12],该应急网络结构如附录A图A1所示,共包含13个应急需求点。各应急需求点的重要度、电负荷、备用电源容量、应急服务时限如附录A表A2所示。应急资源在交通网络的平均运输速度 d_{avg} =0.8 km/min,应急服务点的单位等值投资成本 C_{ei} =4万元,应急服务平台的运维成本 C_{e0} =8万元。为便于对问题进行描述,假定所有应急需求点均为候选服务点,即M=13。本文假定重大社会事件在节点11处举行(负荷重要度取0.85,如附录A表A2所示)。

4.2 优化结果

1)阶段1:应急服务点的优化选址结果。

本文假定应急服务点数量 N=8。通过求解 N+1 个式(12)所示优化问题,可以得到不同服务点数量 限制的应急服务点规划结果,如表1和附录A 图 A2 所示。由表1可知:当应急服务点数量小于3时,优 化问题式(12)不可解,这主要是由于无法满足应急 服务时限约束式(6);当应急服务点数量大于等于 3时,优化问题式(12)可解,得到的 Pareto 最优解集 如图4所示,随着应急服务点数量的不断增加,应急 需求点的停电风险不断降低,但投资成本呈增加趋 势,因此,对于决策者而言,其最终的服务点选址是 服务点停电风险与投资成本折中的过程。

表1 在不同应急服务点数量下的规划结果

 Table 1
 Planning results under different numbers of emergency service depots

应急服务点 数量	最优解B ^M	停电风险 / 万元	投资成本 / 万元
0	_	—	_
1	—	—	—
2	—	—	—
3	{2, 6, 11}	15.7671	20
4	{2, 6, 11, 13}	11.6506	24
5	{2, 5, 6, 11, 13}	8.3526	28
6	{2, 4, 6, 8, 11, 13}	5.9924	32
7	{2, 4, 6, 8, 9, 11, 13}	4.3500	36
8	{2, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 13}	2.8083	40



图4 Pareto最优解集分布

Fig.4 Distribution of optimal Pareto solution set

通过式(13)计算模糊隶属度来表征对每个 Pareto解的满意度,对于图4所示的Pareto解集,其 标准化满意度计算结果如图5所示。由图5可知,当 应急服务点数量*N*=5时,满意度值最大,因此应急服 务点应建于节点2、5、6、11、13,结合应急需求点的





信息可知,对于重要度较大的需求点(如举行重大社 会事件的节点11),应急服务点2、6、11建在该处有 利于降低负荷的停电成本。

2)阶段2:应急资源的优化配置结果。

基于阶段1的应急服务点优化选址结果,各应 急需求点基于区间形式的应急资源需求数据如附录 A表A3所示。通过求解乐观优化问题和悲观优化 问题,得到各服务点应急资源优化配置的区间解,如 表2所示。在最理想情况(即求解乐观优化问题) 下,各服务点的各类应急资源配置方案为表2中区 间的下限,此时应急资源的总成本为22.3535万元; 在最不理想情况(即求解悲观优化问题)下,各服务 点的应急资源配置方案为表2中区间的上限,此时 应急资源的总成本为37.0691万元。

表2 应急资源的优化配置结果

Table 2 Optimal allocation results of

emergency resources

应急服务点	应急人员数量	应急电源车数量 / 辆	应急物资数量
2	[4,7]	[3,8]	[11,15]
5	[7,13]	[5,8]	[15,19]
6	[5,7]	[3,8]	[7,14]
11	[6,12]	[6,8]	20
13	[2,3]	[1,2]	[4,5]

以应急人员为例,分析乐观和悲观情形下其在 各服务点的调配策略,如附录A图A3所示。应急电 源车和应急物资装备的调配策略分别如附录A图 A4和图A5所示。不难得出,无论是乐观情形还是 悲观情形,各应急服务点的应急资源优先满足本地 应急需求,同时,应急需求点的应急资源需求优先由 最近的应急服务点来保障,可达到降低应急总成本 的目的,这与理论分析结果一致,从而验证了本文所 提方法的合理性。

3)灵敏度分析。

由规划模型可知,应急服务时限和负荷重要度 直接影响规划结果。在前述算例分析中,这2个参 数均为给定值(如附录A表A2所示)。为了进一步 研究这2个参数对本文规划结果的影响,进行如下 灵敏度分析。

以附录A表A2中的应急服务时限为基准值,分 析应急服务时限取值变化对停电风险和投资成本的 影响,如图6所示。由图可知:当应急服务时限减少 时,系统需要更高的投资成本才能保证停电风险处 于较低水平;当应急服务时限增大时,系统投资成本 的下降是以停电风险的增大为代价的。

为了分析负荷重要度对规划结果的影响,基于 附录A表A2的负荷重要度数据,将其中节点1和节 点4的负荷重要度修改为0.85(即节点1、4、11处发 生重大社会事件),得到应急服务点的选址结果如附



Fig.6 Influence of emergency service time limit on planning results

录A图A6所示。与附录A图A2对比可知,由于修改负荷重要度后节点1和节点4的负荷重要度大于 节点2和节点6,因此负荷点的选址结果由原来的节 点2和节点6转移至节点1和节点4,从而达到了降 低停电风险的目的。

4)与现有规划方法对比。

194

计及应急服务点规划、应急资源配置、多目标规 划、不确定性4个方面的因素,将本文所提两阶段规 划方法与现有常规规划方法进行对比,如表3所示。 表中,方法Ⅰ为本文所提两阶段规划方法,方法Ⅱ— Ⅳ分别为文献[11]、[12]、[9]中的规划方法。由表 可知,本文所提两阶段规划方法与现有常规规划方 法主要存在2个方面的不同:一是在研究对象上,不 同于方法Ⅱ、Ⅲ(仅考虑应急服务点的选址规划)和 方法Ⅳ(仅考虑应急资源的优化配置),所提方法兼 顾了应急服务点的选址与应急资源的容量配置,实 现了两者的综合考虑;二是在研究方法上,所提方法 不仅考虑了停电风险与投资成本的协同,还兼顾了 应急资源需求不确定性的影响,能够为实际应用提 供更好的借鉴。

表3 应急资源规划方法对比

Table 3 Comparison of emergency resource planning methods

方法	应急服务点 规划	应急资源 配置	多目标规划	不确定性
Ι	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark
П	\checkmark	×	×	×
Ш	\checkmark	×	×	×
IV	×	\checkmark	×	\checkmark

注:"√"表示方法考虑对应因素,"×"表示不考虑。

为了进一步验证本文所提两阶段规划方法的有效性,基于4.1节的算例参数,设置如下4个方案进行对比分析:方案1,本文所提两阶段规划方法;方案2,规划目标仅考虑停电风险最小;方案3,规划目标仅考虑投资成本最小;方案4,不考虑应急资源需求的不确定性。方案1—3的对比结果如表4所示。可以看出,与以停电风险最小或投资成本最小为目标的单目标规划方法相比,所提多目标规划方法可

以协同考虑停电风险与投资成本,验证了所提多目 标规划方法的有效性。

表4 不同方案对比

Table 4 Comparison among different schemes

方案	停电风险 / 万元	投资成本 / 万元
1	8.3526	28
2	2.8083	40
3	15.7671	20

给定方案4中的应急资源需求,如附录A表A4 所示,不失一般性,各类应急资源需求的取值均在附 录A表A3的不确定性区间范围内。以应急人员为 例,方案4下应急人员的优化配置结果如附录A图 A7所示。由图可知,不考虑应急需求的不确定性时 仅能给出唯一的优化配置结果,该配置结果在实际 应急资源需求小于给定值时可行,但在实际应急资 源需求大于给定值时无法满足应急需求(如附录A 图A3所示),而本文所提应急资源规划方法通过区 间的形式给出应急资源配置方案,能够充分考虑应 急资源需求的不确定性,验证了本文所提基于区间 规划的应急资源优化配置方法的有效性。

5)可拓展性分析。

为了验证本文所提规划方法对大规模系统的适 用性,选取文献[19]中的交通网络进行测试,如附录 A图A8所示,该测试系统包含51个应急需求点以 及81条交通路线。本文所提规划方法对13节点和 51节点系统的求解时间分别为18.866 s和93.592 s, 可以看出,本文所提规划方法的优化计算时间会随 着测试系统规模的增大而增加,但均保持在较低水 平。对于应急资源规划问题而言,该求解时间能够 满足系统优化决策的要求,从而验证了本文所提规 划方法对于大规模系统的有效性。

5 结论

本文从提高电网供电可靠性的角度出发,对面向重大社会事件的电力应急资源的规划方法进行研究,提出应急服务点选址规划与应急资源优化配置的两阶段规划方法。在阶段1,引入负荷重要度量化重大社会事件对应急规划的影响,建立应急需求 点停电风险量化模型,提出计及停电风险和投资成本的应急服务点选址规划方法和基于 ε 约束的多目标模型求解方法;在阶段2,提出考虑需求不确定的应急资源区间优化配置方法。基于区域电力应急网络的实际数据进行算例分析,验证了所提两阶段规划方法的有效性。需要说明的是,应急服务点选址与应急资源配置间存在双向耦合关系,即应急服务 点的规划结果直接影响应急资源的容量配置,应急资源的配置结果也会对服务点选址产生影响,本文所提两阶段规划方法对该耦合关系仅进行简化建 模,未来笔者将进一步研究考虑两者之间深度耦合 关系的两层规划模型。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘念,余星火,张建华.网络协同攻击:乌克兰停电事件的推演 与启示[J].电力系统自动化,2016,40(6):144-147.
 LIU Nian, YU Xinghuo, ZHANG Jianhua. Coordinated cyberattack: inference and thinking of incident on Ukrainian power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 144-147.
- [3] HUANG G, WANG J H, CHEN C, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4451-4463.
- [4] LEI S B, CHEN C, ZHOU H, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (5):5650-5662.
- [5] TAHERI B, SAFDARIAN A, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Distribution system resilience enhancement via mobile emergency generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36 (4):2308-2319.
- [6]许珞,郭庆来,刘新展,等.提升电力信息物理系统韧性的通信 网鲁棒优化方法[J].电力系统自动化,2021,45(3):68-75.
 XU Luo,GUO Qinglai,LIU Xinzhan, et al. Robust optimization method of communication network to improve resilience of cyber-physical power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(3):68-75.
- [7] 赵天阳,张华君,徐岩,等. 不确定环境下含云计算数据中心的 电网韧性增强调度[J]. 电力系统自动化,2021,45(3):49-57. ZHAO Tianyang,ZHANG Huajun,XU Yan, et al. Resilienceenhanced scheduling of power system with cloud computing data centers under uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(3):49-57.
- [8] 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 alloca-

tion of emergency power sources considering uncertainties of loads and dispatching time periods [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 34-41.

- [9] ABOUNACER R, REKIK M, RENAUD J. An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response [J]. Computers & Operations Research, 2014,41:83-93.
- [10] 王宏,林振智,文福拴,等. 计及负荷停电风险的电力应急服务的最优选址[J]. 电力自动化设备,2013,33(12):73-78,84.
 WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal siting of power emergency service station considering outage risk of loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12):73-78,84.
- [11]梁博森,王宏,林振智,等.电力系统应急服务多点最优选址规 划[J].电力系统自动化,2014,38(18):40-45.
 LIANG Bomiao,WANG Hong,LIN Zhenzhi, et al. Optimal si-

ting of power emergency multi-point service provisions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18):40-45.

[12] 王东芳,刘水源,张勇军,等."互联网+"形势下电力信息物理融合发展研究综述与展望[J].电力自动化设备,2020,40(6):90-99.
 WANG Dongfang, LIU Shuiyuan, ZHANG Yongjun, et al. Re-

view and prospect of cyber-physical development of power system under background of "Internet+" technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):90-99.

- [13] XUE Y S, YU X H. Beyond smart grid-cyber-physical-social system in energy future [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(12):2290-2292.
- [14] 刘念,余星火,王剑辉,等. 泛在物联的配用电优化运行:信息物理社会系统的视角[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):1-12.
 LIU Nian,YU Xinghuo,WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on ubiquitous Internet of Things: a cyber-physical-social system perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1):1-12.
- [15] WEN Y F, CHUNG C Y, LIU X. Hierarchical interactive risk hedging of multi-TSO power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2962-2974.
- [16] 郑能,丁晓群,郑程拓,等.含高比例光伏的配电网有功-无功 功率多目标协调优化[J].电力系统自动化,2018,42(6):33-39,91.
 ZHENG Neng, DING Xiaoqun, ZHENG Chengtuo, et al. Multiobjective coordinated optimization of active and reactive power for distribution network integrated with high proportion of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power
- Systems,2018,42(6):33-39,91. [17] 刘文颖,文晶,谢昶,等.考虑风电消纳的电力系统源荷协调 多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.

LIU Wenying, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5):1079-1088.

 [18] 周玮,胡姝博,孙辉,等.考虑大规模风电并网的电力系统区间 非线性经济调度研究[J].中国电机工程学报,2017,37(2): 557-564.
 ZHOU Wei,HU Shubo,SUN Hui, et al. Interval nonlinear economia dimetely in large code wind never integrated custom

nomic dispatch in large scale wind power integrated system [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(2):557-564.

[19] LEI S, WANG J, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(3):2030-2041.

作者简介:



韩建沛(1991—),男,博士研究生,主 要研究方向为配电系统优化、博弈论、需求 响应等(**E-mail**;jianpei@ncepu.edu.cn);

席嫣娜(1992—), 女, 工程师, 博士, 主 要研究方向为配电网规划与分布式电源技 术、电网数字化(**E-mail**:xiyanna@163.com); 刘 念(1981—), 男, 教授, 博士, 主

要研究方向为智能配用电、综合能源系统、 微电网与分布式能源、信息物理系统等

 $(E-mail:nianliu@ncepu.edu.cn)_{\circ}$

(编辑 王锦秀)

Protection and location method of rotor winding grounding fault for variable speed pumping storage unit

QIAO Jian^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, WANG Yikai^{1,2}, LU Qinghui^{1,2}, TAN Liming^{1,2}, ZHU Lingjin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory,

 $Huazhong \ University \ of \ Science \ and \ Technology, Wuhan \ 430074, China)$

Abstract: The rotor winding of variable speed pumping storage unit adopts the special structure of threephase AC excitation, so the existing rotor grounding protection method is no longer applicable. Aiming at this problem, a protection and location method of rotor winding grounding fault for variable speed pumping storage unit is proposed. The rotor grounding protection scheme is constructed by connecting the current limiting resistance to the injection device outside the rotor slip ring. Based on the principle of injection, an online calculation method of grounding capacitance parameters and fault resistance is proposed. Whether the grounding fault occurs or not is judged according to the grounding resistance, and the protection outlet mode is determined. The phase distribution of rotor winding potential is considered according to rotor turning and rotating speed. The conductor connection of each slot in the fault phase winding is regarded as the virtual fault point and the corresponding reference potential ratio is calculated. The actual potential ratio is compared with the reference potential ratio of each virtual fault point, and the virtual fault point with the least difference is regarded as the fault location, so as to realize the grounding fault location. Results of PSCAD / EMTDC simulation verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: variable speed pumping storage unit; rotor winding grounding fault; injection principle; electric fault location

(上接第195页 continued from page 195)

Two-stage planning method of power emergency resources for major social events HAN Jianpei¹,XI Yanna²,LIU Nian¹,ZHANG Silu¹,WANG Shu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Major social events integrate cyber, physical and social information, increasing the difficulty and complexity of traditional power emergency resource planning, for which, a two-stage planning method of power emergency resources for major social events is proposed. The cyber, physical and social coupling factors of power emergency resource planning are analyzed, load importance degree is introduced to quantify the impact of major social events on emergency resource planning, and a two-stage planning framework integrating emergency service depot planning and emergency resource allocation is presented. A power outage risk quantification indicator is introduced considering load importance degree, a multi-objective planning model of multiple emergency service depots is constructed comprehensively considering the load outage risk, investment cost of service depots and emergency service time constraints, and a solving method of multi-objective model is proposed based on ε constraint. Considering the uncertainty of emergency resource demand, an optimal allocation model of emergency resources is proposed based on interval optimization, and the original interval optimization model is transformed into optimistic optimization problem and pessimistic optimization problem for solution. The effectiveness of the proposed two-stage planning method is verified by case simulative results.

Key words: major social events; power emergency resources; two-stage planning; multi-objective optimization; interval optimization

Table A1 Load grade and load importance degree		
负荷等级	负荷重要度	
1级	[0.8, 1)	
2 级	[0.4, 0.8)	
3级	[0, 0.4)	

表 A1 负荷等级与负荷重要度



图 A1 某区域电力系统应急网络图 Fig.A1 Emergency service network of a regional power system

表 A2 应急需求点参数 Table A2 Parameters of emergency demand depots					
需求点序号	重要度	电负荷/k₩	备用电源/kW	服务时限/min	
1	0.1	450	0	20	
2	0.6	390	0	20	

1	0.1	450	0	20
2	0.6	390	0	20
3	0.15	360	0	20
4	0.2	590	100	15
5	0.35	420	40	15
6	0.5	650	90	15
7	0.18	440	0	25
8	0.7	210	100	15
9	0.55	580	150	15
10	0.37	620	140	15
11	0.85	380	250	10
12	0.51	490	150	15
13	0.45	560	100	20



图 A2 电力应急服务点的优化选址 (n=5) Fig.A2 Optimal location of power emergency service depots (n=5)

Table A3 Emergency resource demand				
需求点序号	应急人员数量	应急电源车数量/辆	应急物资数量	
1	[2, 3]	[1, 2]	[2, 4]	
2	[1, 2]	[1, 3]	[3, 4]	
3	[2, 4]	[2, 3]	[5, 6]	
4	[3, 4]	[1, 2]	[4, 5]	
5	[3, 5]	[2, 3]	[5, 7]	
6	[2, 3]	[2, 3]	[3, 4]	
7	[1, 2]	[1, 2]	[6, 7]	
8	[2, 4]	[1, 3]	[5, 6]	
9	[2, 3]	[2, 3]	[4, 5]	
10	[1, 2]	[1, 2]	[4, 6]	
11	[2, 4]	[1, 3]	[7, 8]	
12	[1, 3]	[2, 3]	[5, 6]	
13	[2, 3]	[1, 2]	[4, 5]	

表 A3 应急资源需求 Table A3 Emergency resource demand





(b) 悲观情况 注:道路上标注的数字表示调配应急资源的数量,箭头表示调配方向,以应急服务点2为例,

M₂, 1=4 表示第1 类应急资源在应急服务点2 配置的数量为4,

 v_2 向 v_1 调配 2 个应急人员, v_2 向 v_7 调配 1 个应急人员。





Fig.A4 Dispatching scheme of power emergency generators



图 A6 改变负荷重要度后的服务点优化选址

Fig.A6 Optimal location of power emergency service depots after changing load importance degrees 表 A4 方案 4 应急资源需求

Table A4 Emergency resource demand of Case 4					
需求点序号 应急人员数量		应急电源车数量/辆	应急物资数量		
1	2	2	3		
2	2	3	4		
3 3 3		3	6		
4	3	2	5		
5	4	3	6		
6	2	2	3		
7	1	2	6		
8	2	1	5		
9	2	2	5		
10	1	1	6		
11	4	2	7		
12	1	2	6		
13	2	2	5		



图 A7 方案 4 应急人员的调配方案 Fig.A7 Dispatching scheme of emergency crews in Case 4



图 A8 测试系统交通网络图 Fig.A8 Traffic network topology of test system