

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241649

计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置

燕鹏飞¹, 杨知方¹, 林伟¹, 张媛¹, 周宇晴², 李筱天², 朱睿²

(1. 输变电装备技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400000)

摘要: 在配电网安装可接受调度中心控制指令的智能用电开关设备是电力系统调度部门调用需求侧资源迅速做出反应的重要举措。为了在满足负荷调控需求的同时降低成本, 提出一种计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置方法。首先, 基于紧急负荷控制体系下上层智能用电开关动作与下层智能用电开关动作的切负荷耦合作用, 解析构建了智能用电开关安装决策变量与切负荷执行变量组合关系的关联约束。其次, 构建兼顾开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡性以及切负荷经济效益的混合整数非线性规划模型。最后, 基于示意性9节点主配电网混合系统以及我国某区域341节点系统结合实际负荷数据进行了仿真分析, 结果表明所提方法可充分发挥不同设备的作用与组合作用优势, 在满足电网负荷调控需求的同时提升智能用电开关设备配置的经济性。

关键词: 负荷侧管理; 需求响应; 智能用电开关; 优化配置; 组合优化

Optimal configuration of intelligent power switches considering multi-dimensional emergency load regulation objectives

YAN Pengfei¹, YANG Zhifang¹, LIN Wei¹, ZHANG Yuan¹, ZHOU Yuqing², LI Xiaotian², ZHU Rui²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400000, China)

Abstract: The installation of intelligent power switch devices in distribution networks, capable of receiving dispatch control commands from power system operators, represents a critical initiative for enabling rapid demand-side resource response. To meet emergency load regulation requirements while reducing costs, this paper proposes an optimal configuration method for intelligent power switch devices considering multi-dimensional emergency load regulation objectives. First, based on the coupling mechanism between upper-layer and lower-layer intelligent switch operations in emergency load control systems, the correlation constraints between device installation decision variables and combinations of load shedding execution variables are analytically established. Subsequently, a mixed-integer nonlinear programming model is developed to holistically optimize switch installation/operation costs, emergency load regulation equilibrium, and economic benefits of load shedding. Finally, simulation analyses are conducted using a 9-node primary distribution hybrid system and a real 341-node regional power system in China with actual load data. The results demonstrate that the proposed method effectively leverages the functional characteristics and synergistic advantages of diverse device combinations, achieving enhanced economic efficiency in intelligent switch configuration while satisfying the grid's load regulation demands.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGCQDK00 DWJS2400058).

Key words: load-side management; demand response; intelligent power switch; optimal configuration; combinatorial optimization

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现我

国“双碳”目标的重要途径^[1-3]。然而, 新能源发电具有随机性、波动性, 加剧了源荷平衡难度, 亟需增强电力系统灵活性以确保安全运行^[4]。我国工业用电负荷占比高、单体容量大, 不仅便于集中控制, 还具备良好的可中断特性, 因此已成为缓解紧急情况下源荷平衡难题的重要手段^[5]。为实现可中断工

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(SGCQDK00DWJS2400058)

业用电负荷的灵活调控, 需在传统主网 10 kV 及以上主网可控资源基础上, 整合工业用户直控及配网可控负荷资源, 提升电网故障应急响应能力, 构建紧急负荷控制体系, 在电网下层配电自动化系统与上层调度自动化系统配置智能用电开关^[6], 如图 1 所示。特别地, 当前电网已在上层调度自动化系统中安装智能用电开关^[7]。然而, 直接调用上层智能用电开关将切断大量相连的工业用电负荷, 难以精细辨识所切除负荷的经济价值^[8]。为实现可中断工业用电负荷的精细化调控, 需在下层配电自动化系统中装设智能用电开关。为此, 国内外学者已针对配电自动化系统中智能用电开关设备的优化配置问题展开研究。

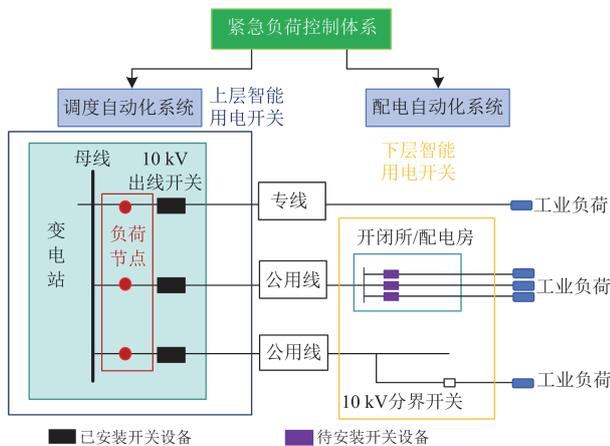


图 1 智能用电开关分布

Fig. 1 Distribution of smart switch

现有研究将配电自动化系统中智能用电开关设备的优化配置问题归纳为: 以断路器、负荷开关等智能用电开关的装设位置、装设类型和装设数量为决策变量, 并综合考虑配电网运行约束(包括系统功率平衡等)的混合整数规划问题^[9]。已有研究普遍采用免疫算法^[10]、改进遗传算法^[11-12]等启发式算法进行求解。然而, 启发式算法无法保证收敛性, 也无法保证解的全局最优性, 制约其实际应用^[13-14]。相较于启发式算法, 整数规划算法具备得到全局最优解与保证算法收敛性的特点^[15], 在智能用电开关设备优化配置问题中得到广泛关注, 如文献[16]针对配电网负荷开关和并线规划问题, 建立考虑线路容量约束的负荷开关构型 0-1 整数二次规划模型, 并通过分支定界算法进行求解; 文献[17]引入配电自动化系统经济效益, 将用户停电损失函数模型转换为混合整数线性规划模型, 实现开关设备优化配置; 文献[18]量化分析接地故障事件及其耗时性管理过程对配电自动化系统经济效益的影响, 将负荷开关

的数量和位置设为规划对象, 建立混合整数规划模型; 文献[19]提出了一个可同时优化远程自动负荷开关数量与位置的数学模型, 并将所提出的模型构造为混合整数线性规划问题; 文献[20]综合考虑设备投资成本与用户差异化可靠性需求, 建立配电网多种设备统一优化配置的混合整数线性规划模型, 基于逻辑分析和凸松弛法对模型非线性约束进行线性化处理; 文献[21]基于路径分析构建约束, 用以解析设备安装决策变量与设备组合作用情况变量之间的关系, 建立分段开关与联络线两种下层配电网开关联合优化配置的混合整数线性规划模型。

然而, 由于上述研究仅在下层配电自动化系统装设智能用电开关, 忽略其与上层调度自动化系统智能用电开关设备的协同作用, 未充分发挥已安装的上层调度自动化系统智能用电开关的效用, 不利于电网资产利用率的提升^[22]。同时, 现有研究仅考虑开关动作切负荷成本^[23]、开关设备投资成本^[24]等目标, 忽略电网需满足负荷均匀减载以避免潮流大幅度波动的目标需求^[25], 其实际应用仍有待探究。

为此, 本文提出计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置方法, 主要工作包括:

1) 本文基于上下层智能用电开关位置分布情况以及两者切负荷耦合作用, 解析构建智能用电开关设备安装决策变量与切负荷执行变量的关系, 实现了上下层智能用电开关的协同调用;

2) 本文基于工业经济相关因素, 衡量切除不同工业负荷的经济代价, 进一步考虑开关切负荷的均衡性要求, 提出包含负荷均匀减载实际需求在内的多维紧急负荷调控目标, 形成多维目标下的智能用电开关设备统一优化配置模型。

综上, 本文通过构建“上层(调度自动化系统)-下层(配电自动化系统)”开关协同优化框架, 实现了降低成本-均衡减载-减少经济损失的多目标互补, 从而规避现有方法中传统单层优化导致的冗余投资, 以及未能充分考虑负荷均匀减载引发的局部过切。

1 问题构建

本文智能用电开关的说明和假设如下, 结合图 1 进行阐述。

如图 1 所示, 1) 下层智能用电开关与上层智能用电开关通过公用线相连, 组成部分为开闭所/配电房内的负荷开关; 2) 配电自动化系统中部分 10 kV 分接开关通过公用线直连变压器与工业负荷, 此情况本文不予考虑; 3) 在实际情况中, 上层智能用电开关已全部安装, 因此该层级开关设备可直接调用,

计算智能用电开关配置总成本时, 该部分安装费用可忽略; 4) 电网调度在实际管理过程中仅涉及变电站 10 kV 线路^[26], 10 kV 以下变电站线路的开断操作由其余部门完成, 因此调度部门实际管理中将变电站内 10 kV 出线开关下接所有负荷视作一个负荷节点; 5) 单个负荷节点所整合的负荷资源可包含多类工业负荷资源(如电网典型的智能手机、电子元器件、智能家电等工业负荷), 因此本文预设所有场景中一个负荷节点连接若干个工业负荷。

基于上述假设, 本文研究框架如图 2 所示。智能用电开关安装是其动作的前提, 智能用电开关安装变量 z 与智能用电开关动作变量 x 之间存在直接约束关系; 其次, 上层智能用电开关调用对下层智能用电开关的安装调用效果存在制约作用, 充分利用上下层智能用电开关彼此的制约作用, 将最大化实现对已安装的上层智能用电开关的调用, 从而降低智能用电开关设备的安装与运行成本。因此, 若要构建智能用电开关设备的优化配置模型, 需要建立智能用电开关的动作变量、安装变量以及上下层设备组合作用之间的逻辑联系。

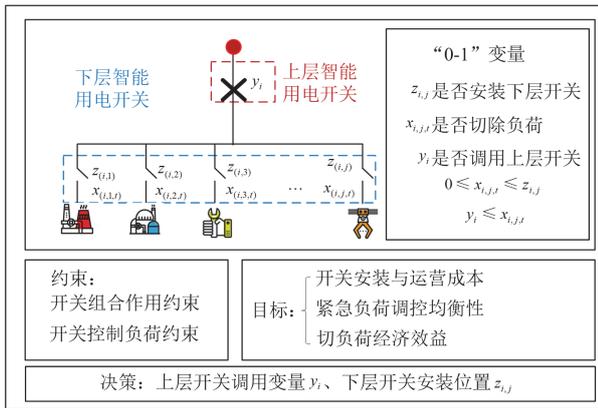


图 2 智能用电开关设备统一优化配置模型框架

Fig. 2 Unified optimized configuration model framework for intelligent electricity switchgear

同时, 为明确智能用电开关的配置目标, 需建立一个涵盖降低安装与运营成本、均衡紧急负荷调控以及提升切负荷经济效益的多维目标体系, 将其作为智能用电开关设备优化配置的依据。

上述问题的数学本质为下层智能用电开关安装决策变量、上层智能用电开关调用变量与多维紧急负荷调控目标之间的解析表征与运筹决策问题。为此, 本文提出协调多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置方法, 将智能用电开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡性以及切负荷经济效益作为调控目标的多个维度, 将优化配置智能用

电开关作为实现目标的手段, 通过建立智能用电开关优化配置模型解决源荷不平衡问题。

本文将系统剖析已安装上层智能用电开关动作与待安装下层智能用电开关动作的逻辑关系, 充分发挥上下层智能用电开关的组合协同作用, 从而最大程度节省下层智能用电开关的安装与运营成本。本文提出制定智能用电开关设备优化配置方案需要协调的多维紧急负荷调控目标, 将上下层智能用电开关组合作用关系内嵌于多维紧急负荷调控目标, 提出计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置策略。

2 智能用电开关逻辑关系建模方法

2.1 智能用电开关逻辑关系剖析

如图 2 所示, 1) 在下层安装智能用电开关可切除其所连接的工业负荷; 2) 执行切负荷动作的前提是在相应位置提前安装智能用电开关; 3) 现有智能用电开关配置方案为将负荷开关全部安装于下层智能用电开关待安装位置; 4) 若直接动作已经完成安装的上层智能用电开关, 其所连的所有负荷将被一并切除, 其效果与在下层所有馈线上均安装智能用电开关并动作、实现负荷完全切除的方案一致, 可以节省安装下层智能用电开关的成本。

本节将充分结合上述紧急负荷控制体系中智能用电开关安装与动作的关系, 以及上下层不同智能用电开关设备的作用特征, 建立智能用电开关逻辑关系约束。

2.2 智能用电开关逻辑关系约束

智能用电开关逻辑关系约束由两部分组成: 智能用电开关动作变量与安装变量逻辑约束以及上下层智能用电开关设备组合作用逻辑约束。

1) 智能用电开关动作变量与安装变量逻辑约束

安装智能用电开关是执行智能用电开关动作的前提, 基于此, 如图 2 所示, 定义 $z_{i,j}$ 表示第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷是否安装下层智能用电开关, 为 0-1 变量; 定义 $x_{i,j,t}$ 表示 t 时刻是否切除第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷, 即是否在相应位置执行智能用电开关切负荷动作, 为 0-1 变量。智能用电开关安装与动作的关系约束为

$$0 \leq x_{i,j,t} \leq z_{i,j} \quad (1)$$

2) 下层智能用电开关安装与上层智能用电开关动作的关系约束

定义 y_i 表示是否调用第 i 个节点所连接的上层智能用电开关断路器, 为 0-1 变量, 下层智能用电开关安装与上层智能用电开关动作存在以下情况。

(1) $y_i = 0$, 上层智能用电开关无需动作

在个别故障场景下, 仅需调用单个节点所连部分紧急负荷即可满足需求, 上层智能用电开关无需动作, 因此仅需于下层馈线部分安装智能用电开关, 即满足式(2)。

$$\begin{cases} y_i = 0 \\ \sum_{j=1}^m z_{i,j} < m \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 表示第 i 个节点所配置的智能用电开关数, 由线路结构所决定。当上层智能用电开关不动作时, 上层智能用电开关对下层智能用电开关无约束效用。

(2) $y_i = 1$, 上层智能用电开关需要动作

在个别故障场景下, 需要调用单个节点所连紧急负荷, 为节省智能用电开关的安装与运营成本, 可以直接动作已安装的上层智能用电开关, 无需于下层馈线部分安装智能用电开关, 即满足:

$$\begin{cases} y_i = 1 \\ \sum_{j=1}^m z_{i,j} = m \end{cases} \quad (3)$$

当上层智能用电开关动作时, 上层智能用电开关对下层智能用电开关起直接约束效用。综合来看, 上述要求本质为针对上层智能用电开关是否动作的分类问题, 属于非线性问题, 可运用大 M 法进行模型转化, 可将非线性问题转化为线性问题。大 M 法是一种将逻辑条件(如“若 A 则 B”)转化为线性不等式的方法, 通过引入一个足够大的正数 M , 以关联离散决策与连续变量^[27]。其核心思想是: 通过二元变量指示约束冗余情况(结合大 M 项进行抵消), 从而使得所需的逻辑条件得到满足^[28]。因此, 参数 M 的取值需超过所指定约束的极值边界, 从而使得在相应的二进制变量条件下, 该约束可处于冗余状态。

运用大 M 法进行模型转化后, 可得到下层智能用电开关安装与上层智能用电开关动作的一系列关系约束如式(4)、式(5)所示。

$$(m - 0.5) - (1 - y_i)M < \sum_{j=1}^m z_{i,j} < \quad (4)$$

$$\begin{aligned} (m - 0.5) + y_i M \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ y_i \leq x_{i,j,i} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: y_i 为“0-1”指示变量, 用于直接表征第 i 个节点工业负荷的切负荷情况, 若 y_i 为 1, 表示该节点连接工业负荷全部执行切负荷, 若 y_i 为 0, 表示该节点连接工业负荷部分执行切负荷; M 表示一个足够大的常数; n 表示节点数量。 y_i 作为“0-1”指示变量的含义为: 某场景下第 i 个节点所连接的第

j 个工业负荷对应的下层智能用电开关安装变量 $z_{i,j}$ 均满足 $z_{i,j} = 1$, 该节点对应的断路器作用变量 $y_i = 1$, 否则 $y_i = 0$ 。式(5)表征切负荷变量与上层智能用电开关变量的关系。约束式(4)、式(5)表明, 为实现源荷平衡, 某场景下第 i 个节点下层全部馈线均需安装智能用电开关并进行切负荷动作时, 直接调用上层已完成安装的智能用电开关进行切负荷动作即可实现恢复源荷平衡的目标, 无需于下层馈线安装智能用电开关。

综上所述, 式(1)一式(5)基于智能用电开关待安装位置分布, 结合智能用电开关作用特性以及分布层级分析智能用电开关逻辑关系, 构建了智能用电开关动作变量与安装变量逻辑约束以及上下层智能用电开关设备组合作用逻辑约束, 为充分发掘不同种类智能用电开关的组合作用, 降低智能用电开关安装和运营成本奠定基础。

3 多维紧急负荷调控目标构建

3.1 多维紧急负荷调控目标分析

随着经济社会发展和新型电力系统建设, 紧急负荷调控需兼顾降低开关安装与运营成本、均衡调控负荷及提升切负荷经济效益等多维目标。本文将多维紧急负荷调控综合代价作为多维紧急负荷调控目标的量化指标, 需要计算两阶段综合代价, 第一阶段为规划阶段, 包括智能用电开关安装与运营成本, 第二阶段为动作阶段, 包括切负荷综合代价(由度电工业增加代价、产业链协同恢复代价决定)和紧急负荷调控均衡度等。

3.2 多维紧急负荷调控综合代价构建

多维紧急负荷调控综合代价由智能用电开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡度以及切负荷综合代价组成。

1) 智能用电开关安装与运营成本

根据智能用电开关切除负荷的方式, 其安装与运营成本的计算表征方式可分为两种, 本文分别记为 A 方式以及 B 方式, 两种方式具体阐述如下。

(1) 切除节点连接部分负荷的方式(A 方式): 若仅需切除节点 i 的部分工业负荷(即不调用上层智能用电开关), 则需安装下层智能用电开关, 成本为单台下层智能用电开关安装运营费用之和。如式(6)、式(7)所示。

$$C_{A,i} - y_i M \leq C_i \leq C_{A,i} + y_i M \quad (6)$$

$$C_{A,i} = \sum_{j=1}^m \gamma_A z_{i,j} \quad (7)$$

式中: C_i 表示节点 i 安装运营智能用电开关的成本;

γ_A 为下层智能用电开关安装运营成本; $C_{A,i}$ 表示 C_i 采用的两种计算方式之一, 即 A 方式。

(2) 切除节点连接全部负荷的方式(B 方式): 若需切除节点 i 的全部工业负荷, 则直接调用已安装的上层智能用电开关, 无需安装下层智能用电开关, 仅需支付断路器动作成本。如式(8)、式(9)所示。

$$C_{B,i} - (1 - y_i)M \leq C_i \leq C_{B,i} + (1 - y_i)M \quad (8)$$

$$C_{B,i} = y_i \gamma_B \quad (9)$$

式中: γ_B 为上层智能用电开关运营成本; $C_{B,i}$ 表示 C_i 采用的两种计算方式之一, 即 B 方式。综合上述两种方式, 节点安装运营智能用电开关的成本 C_i 可表示为

$$C_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \gamma_A z_{i,j} \\ y_i \gamma_B \end{cases} \quad (10)$$

不难发现, 适度动作上层智能用电开关将显著削减智能用电开关安装与运营成本。

2) 紧急负荷调控不均衡度

根据《电力系统自动低频减载规定》^[29]: 为保证在故障后能合理、均匀地减负荷, 以阻止频率下降导致出现大的潮流波动, 以免发生频率崩溃事故, 同步联网状态下的各电网应采用统一协调的低频减负荷方案, 可以根据情况适当调整, 但不应破坏统一方案的总体效果。低频减载属于典型紧急负荷调控操作, 低频减载的具体要求可扩展于紧急负荷控制体系中的智能用电开关动作以及前期的智能用电开关设备配置^[30]。

基于上述实际要求, 为简化分析, 本文采用如下均衡性原则: 事故发生后, 尽量使各集中安装工业负荷的节点承担较为均衡的责任, 使减负荷量大致相近, 即各节点执行紧急负荷需求响应所切割负荷的标准差取最小值, 将该指标定义为不均衡度, 用 u 表示为

$$u = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{i,t} - \overline{E_{i,t}})^2} \quad (11)$$

$$E_{i,t} = \sum_{j=1}^m e_{i,j,t} x_{i,j,t} \quad (12)$$

式中: $e_{i,j,t}$ 为第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷在 t 时刻的功率; $E_{i,t}$ 表示第 i 个节点在 t 时刻通过智能用电开关设备切除的负荷, 即为第 i 个节点所连接各开关在 t 时刻执行切负荷操作的负荷总和; $\overline{E_{i,t}}$ 为 $E_{i,t}$ 的平均值。应当注意: 电网拓扑或负荷分布的异质性(如城市与农村电网的差异), 可使得不同节

点负荷承担不同的削减权重, 从而影响式(11)所示的不均衡度指标。为考虑上述影响, 可在式(11)中引入节点权重因子, 以表征不同电网拓扑或负荷分布的异质性的对不均衡度指标的影响。

3) 切负荷综合代价

切负荷将在短期内对生产造成一定影响, 通过科学合理的切负荷策略可以有效降低切负荷对日常生产经济效益的影响, 提升本地工业负荷企业的整体竞争力^[31]。切负荷综合代价主要围绕两方面进行评估: 度电工业增加代价和产业链协同恢复代价。

(1) 度电工业增加代价 $S_{i,j,t}$

本文将从经济部门获取到的各工业门类度电工业增加值^[32]与相应工业负荷的切负荷量相乘, 即可得到因切割单个工业负荷造成的工业经济增长损失, 将其定义为度电工业增加代价, 记为 $S_{i,j,t}$ 。具体表达式见式(13)。

$$S_{i,j,t} = s_{i,j} e_{i,j,t} \quad (13)$$

式中: $s_{i,j}$ 表示第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷所属工业门类对应的度电工业增加值。

(2) 产业链协同恢复代价 $R_{i,j,t}$

本文将从经济部门获取到的各工业门类单位恢复成本^[33]与相应工业负荷的负荷恢复量相乘, 即可得到因切割第 j 个工业负荷产生的产业链恢复成本, 将其定义为产业链协同恢复代价, 记为 $R_{i,j,t}$ 。具体表达式见式(14)。

$$R_{i,j,t} = r_{i,j} e_{i,j,t} \quad (14)$$

式中: $r_{i,j}$ 表示第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷所属工业门类对应的度电工业增加值。

综上所述, 切负荷综合代价记为 $d_{i,j,t}$, 表示为第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷在 t 时刻执行切负荷的综合代价, 表示为

$$d_{i,j,t} = \alpha_{i,j} S_{i,j,t} + \beta_{i,j} R_{i,j,t} \quad (15)$$

式中: $\alpha_{i,j}$ 、 $\beta_{i,j}$ 分别为度电工业增加值系数和产业链协同恢复系数, 分别表征第 i 个节点所连接的第 j 个工业负荷度电工业增加代价 $S_{i,j,t}$ 以及产业链协同恢复代价 $R_{i,j,t}$ 在切负荷综合代价所占比重。上述系数可依据电力部门对“度电工业增加代价”以及“产业链协同恢复代价”两个指标的重视程度进行相应设定。

式(6)一式(14)综合考虑智能用电开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡度以及切负荷综合代价, 三者组成多维紧急负荷调控综合代价, 即多维紧急负荷调控目标。

4 计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置模型

4.1 模型构建

1) 目标函数

本文所建立的智能用电开关设备统一优化配置模型的目标为多维紧急负荷调控综合代价最小, 如式(16)所示。

$$\min(\sum_{i=1}^n C_i + u + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{i,j,t} x_{i,j,t} e_{i,j,t}) \quad (16)$$

式中: 第一项为智能用电开关安装与运营成本; 第二项为紧急负荷调控不均衡度; 第三项为切负荷综合代价。

2) 约束条件

除前文所述智能用电开关动作变量与安装变量逻辑约束以及上下层智能用电开关设备组合作用逻辑约束外, 即式(1)一式(4), 本文还考虑了潮流平衡约束、支路潮流上下限约束、节点电压上下限约束以及发电机功率上下限约束。

(1) 潮流平衡约束

$$\sum_{i=1}^n E_{i,t} \geq P_{q,t} - P_{\text{engin},t} - P_{G,t} \quad (17)$$

式中: $P_{q,t}$ 表示 t 时刻其他负荷的功率; $P_{\text{engin},t}$ 表示 t 时刻全部工业负荷的功率; $P_{G,t}$ 表示 t 时刻发电机的功率。潮流平衡约束规定减负荷的量必须与发电机功率、其他负荷功率以及未执行需求响应操作负荷相平衡, 该约束是维持负荷紧急控制系统基本可靠性的基础。

(2) 支路潮流转移上下限约束

$$P_{L,t} = E_{i,t} \times \Phi_{\text{PTDF}} \quad (18)$$

$$P_{L,\min} \leq P_{L,t} \leq P_{L,\max} \quad (19)$$

式中: $P_{L,t}$ 为由节点功率变化引发的线路潮流转移的功率; $P_{L,\max}$ 、 $P_{L,\min}$ 分别为线路潮流转移功率上、下限; Φ_{PTDF} 为潮流转移分布因子。

本文研究以基态电网拓扑结构为例阐述智能用电开关优化配置方法。整体的思路框架同样适用于故障后拓扑变化的电网, 可针对不同故障场景, 分别计算对应的 Φ_{PTDF} , 将其相应的故障场景约束加入所提配置模型中。

(3) 节点电压上下限约束

$$U_{\min} \leq U_t \leq U_{\max} \quad (20)$$

式中: U_t 为 t 时刻节点电压; U_{\max} 、 U_{\min} 分别为节点电压上、下限。

(4) 发电机功率上下限约束

$$P_{G,t}^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_{G,t}^{\max} \quad (21)$$

式中: $P_{G,t}^{\max}$ 、 $P_{G,t}^{\min}$ 分别为发电机发出功率上、下限。

综上所述, 本文建立的完整计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置模型为

目标函数: 式(16)

约束条件: 式(4)、式(5)、式(17)一式(21)

下层智能用电开关安装变量 $z_{i,j}$, 上层智能用电开关动作变量 $x_{i,j,t}$ 以及上层智能用电开关动作变量 y_i 均为整数变量, 且本文目标函数多维紧急负荷调控综合代价中的组成部分不平衡度存在非线性形式, 因此本模型为混合整数非线性规划模型, 可采用成熟的商业求解器进行求解。

4.2 模型适应性分析

当故障发生时先配置智能用电开关再动作无法在极短时间内解决功率源荷不平衡问题, 需要提前配置智能用电开关。本文基于实际紧急负荷控制体系, 对上层调度自动化系统和下层配电自动化系统的智能用电开关之间的相互作用进行分析, 建立智能用电开关动作变量与安装变量逻辑约束以及上下层智能用电开关组合作用逻辑约束; 综合考虑智能用电开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡以及切负荷综合代价, 提出多维紧急负荷调控综合代价。在此基础上, 可综合考虑引发不同功率缺额的源荷不平衡的各故障场景, 统一制定一套适用于各故障场景的智能用电开关优化配置策略, 突发故障发生时根据已配置好的智能用电开关以及切负荷预案执行切负荷保证电力系统正常运行。

相比于下层馈线全部安装智能用电开关的方案, 本文所提方法充分利用上下层智能用电开关的组合作用关系, 显著降低了智能用电开关安装与运行成本, 同时该方法可以实现紧急负荷调控均衡以及切负荷经济效益提升, 进一步降低多维紧急负荷调控综合代价。本文所提智能用电开关优化配置模型式(4)一式(21)不局限于某一点特定节点系统, 具备不同节点系统的通用扩展性。将其运用到不同系统中时, 仅需根据系统信息(如度电工业增加值、产业链协同恢复成本、节点系统等)对应更新所提模型中的系统参数, 即可实现基于所提模型的智能用电开关的优化配置。

5 算例分析

5.1 算例概况

本文搭建如图3所示的示意性9节点主配网混合系统(后文称为“9节点系统”)以及某地区实际电

网 341 节点主配网混合系统(后文称为“341 节点系统”)来验证所提方法的有效性。

9 节点系统紧急负荷控制体系包含 9 个变电站节点(如图 3 黑点所示)、27 个负荷节点(如图 3 蓝色箭头所示), 其中已安装 9 个断路器(如图 3 红框所示), 留存 27 个下层智能用电开关待安装位置, 节点 6 以及节点 8 配置的发电机出力分别为 180 MW 和 50 MW, 节点 7 和节点 9 分别接入 25 MW 发电机以及 25 MW 光伏发电, 节点 2、4、6 接入可变负荷, 其余节点接入 10 MW 固定负荷, 部分节点接入工业负荷, 假设各工业负荷均为 6.25 MW, 节点工业负荷分布情况见文献[34]。其余参数设定如下: 负荷开关安装运营费用为 1(标么值), M 取值为 10 000, 其余参数见文献[34]。

341 节点系统有 341 节点, 其中 340 个节点通过变电站连接负荷、40 个节点通过变电站连接工业负荷, 变电站配电侧馈线全部安装上层智能用电开关断路器, 40 个工业负荷节点下连 123 个隶属不同工业门类的工业负荷主体, 因此存在 123 个下层智能用电开关待安装位置, 发电机参数、线路参数、度电工业增加代价、产业链协同恢复代价等参数见参考文献[35]。本文所有算例仿真依托 16 GB 内存, Intel(R) Core(TM) i7-13650HX 处理器计算机进行。

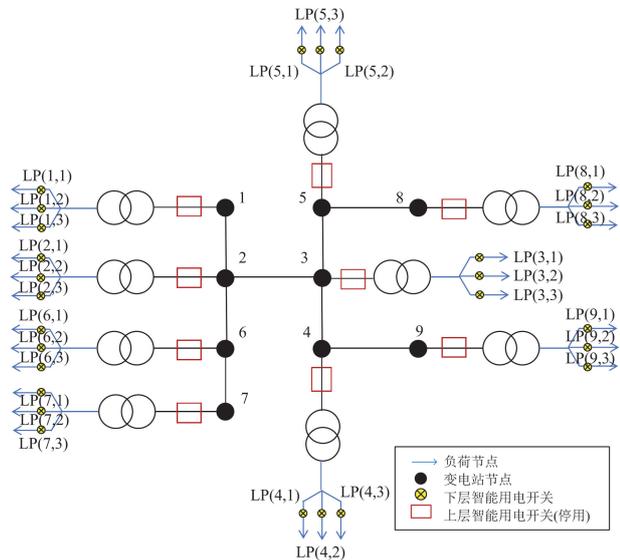


图 3 9 节点系统结构

Fig. 3 Structure of 9-bus system

本文通过构建混合整数线性规划模型, 实现计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备的优化配置。针对混合整数线性规划模型, 分支定界法可对这类问题进行高效求解^[36], 已被集成至 Gurobi 等商业求解器。为此, 本项目通过调用 Gurobi 商业

求解器中的分支定界法, 实现对所提混合整数线性规划模型的高效求解。

5.2 9 节点系统典型场景及开关配置策略

负荷的调控目标需求源自电力供给-需求失衡^[37]。为此, 考虑不同电力供给-需求失衡场景下的智能用电开关优化配置, 并计及多维紧急负荷调控目标。基于上述原则, 本文设计了不同的电力供给-需求失衡场景: (1) 电力供给减少导致的失衡场景, 即表 1 的场景 I 和场景 II 中发电机故障脱网场景; (2) 电力需求增加导致的失衡场景, 即表 1 的场景 III 负荷增加场景; (3) 电力供给减少叠加电力需求增加的失衡场景, 即表 1 的场景 IV。

表 1 典型场景

Table 1 Typical scenario

场景	故障表现
场景 I	发电机少出力 25 MW
场景 II	负荷突增 50 MW
场景 III	发电机少出力 50 MW
场景 IV	发电机少出力 75 MW; 负荷突增 50 MW

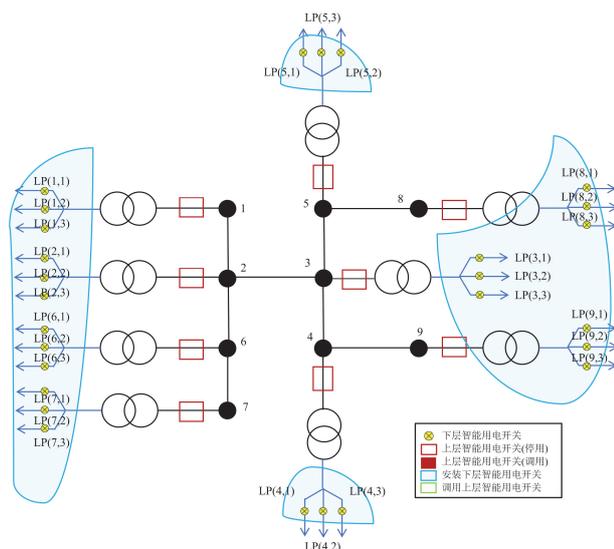
本文场景 I—场景 IV 的发电机少出力以及负荷突增的量值设定方式如下。在场景 I 中, 节点 7 火力发电机故障, 导致失去其 25 MW 出力。在场景 II 中, 负荷需求突增 20%(即 50 MW)。在场景 III 中, 节点 8 火力发电机故障, 导致其失去 50 MW 出力。在场景 IV 中, 场景 II 负荷突增的基础上, 叠加节点 7、8 发电机同时发生故障无法正常工作。

计算 4 种典型场景下紧急负荷调控综合代价最小的优化策略, 并分析相应智能用电开关安装与运营成本、不均衡代价以及紧急负荷调控综合代价。

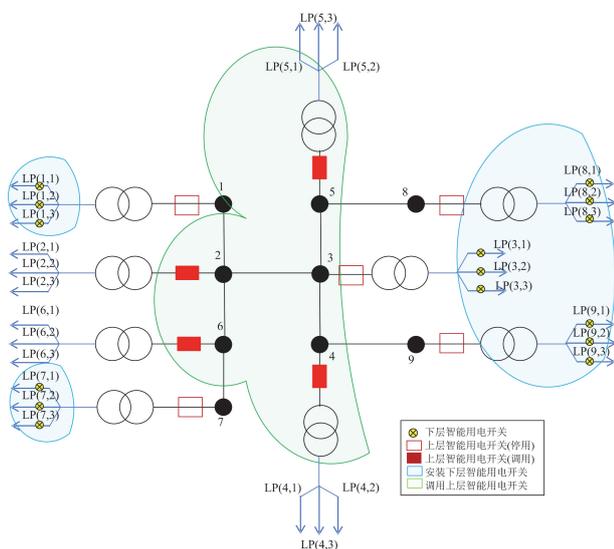
图 4 表示 4 种突发故障场景下智能用电开关配置策略。图 4 中, 蓝色覆盖节点区域不调用上层智能用电开关, 于下层待配置位置安装智能用电开关负荷开关, 绿色覆盖节点区域直接调用上层智能用电开关, 无需于下层待配置位置安装智能用电开关负荷开关, 节省智能用电开关安装与运营成本。表 2 为 4 种场景对应的智能用电开关配置情况、切负荷量、切负荷不均衡代价、智能用电开关安装与运营成本以及综合代价。

如图 4 蓝色区域所示, 场景 I、场景 II 和场景 III 中紧急负荷调控综合代价最小的智能用电开关优化配置策略相同(图 4(a)), 均于全部下层智能用电开关待安装位置安装负荷开关, 为传统开关配置方法。由此可见上述 3 种场景下调用上层智能用电开关断路器造成的负荷过切代价高于多安装运营未动作的下层智能用电开关负荷开关的成本代价。场

景 IV 中(图 4(b)), 紧急负荷调控综合代价最小的智能用电开关优化配置策略选择调用节点 2、4、5、6 所连接的上层智能用电开关断路器, 从而节省安装并运营下层智能用电开关负荷开关的成本代价, 由此可见在此功率缺额对应的故障场景下, 安装并运营未执行紧急负荷调控任务的下层智能用电开关负荷开关的成本代价大于调用上层智能用电开关断路器造成的负荷过切代价。



(a) 场景 I、II、III 开关配置情况



(b) 场景 IV 开关配置情况

图 4 开关配置情况

Fig. 4 Switch configuration situation

由图 4 和表 2 可见, 应对不同功率缺额下的智能用电开关配置策略存在差异。场景 II 和场景 III 因各自故障引发的源荷不平衡功率缺额相同, 智能

用电开关配置策略以及综合代价均相同; 场景 I 和场景 IV 下源荷不平衡功率缺额与其余场景均不同, 因此进行紧急负荷调用的综合代价不同, 由此可见不同场景的差异本质上是由故障引发的源荷不平衡缺额大小不同所致的。

制定智能用电开关优化配置策略的过程本质为权衡多维紧急负荷调控综合代价的智能用电开关安装与运营成本、紧急负荷调控不均衡度以及切负荷综合代价的过程。由表 2 可见, 当功率缺额较低时, 需切除的节点负荷规模较小, 通过精准切负荷虽能降低智能用电开关的安装运营成本, 使其低于因过切而产生的综合代价, 但也会导致更高的紧急负荷调控不均衡度。随着功率缺额的提升, 为实现精准切负荷, 需要增加下层智能用电的安装数量, 智能用电开关安装与运营成本将进一步提升。当功率缺额达到 125 MW 时, 规模缺额需快速切除多节点负荷, 相比于全部节点安装下层智能用电开关, 直接调用上层智能用电开关可避免下层设备冗余投资, 因此调用部分上层智能用电开关(场景 IV 调用比例达 32%)时, 智能用电开关优化配置策略带来的多维紧急负荷调控综合代价最低。

5.3 适用于多种故障场景的智能用电开关配置策略

1) 9 节点系统适用多场景的开关配置策略

根据 5.2 节各典型场景及智能用电开关配置策略, 不同场景下综合代价最优的智能用电开关配置策略不同。因此, 需要统一制定一套适用于不同故障场景的智能用电开关设备优化配置策略, 以便于故障发生时根据已配置好的智能用电开关以及切负荷预案执行切负荷保证电力系统正常运行。

为制定适用于各个故障场景的智能用电开关优化配置策略, 需充分考虑各故障场景即不同源荷不平衡功率缺额, 基于此得出的开关配置策略更具有普遍适用性。选择源荷不平衡情况最为严重的极端故障场景下的紧急负荷调控综合代价(将其称作“极端场景综合代价”)以及各源荷不平衡故障场景下紧急负荷调控综合代价的平均值(将其称作“各故障场景平均综合代价”)作为研究对象。

经计算, 紧急负荷调控综合代价平均值以及极端故障场景紧急负荷调控综合代价最低的智能用电开关优化配置策略见图 5, 该策略下不同源荷不平衡缺额情况下安装运营智能用电开关与执行切负荷的经济损失见文献[35]。

由图 5 可见, 9 节点系统下适应多场景的智能用电开关优化配置策略为调用安装于节点 2、4 的上层智能用电开关, 无需安装下层智能用电开关; 其

表 2 典型场景智能用电开关配置策略

Table 2 Configuration policy of typical scenario switch

场景	智能用电开关配置情况	切负荷量/MW	不均衡性代价/p.u.	智能用电开关安装与运营成本/p.u.	综合代价/p.u.
I		25	0.1851	1	0.3719
II	全部工业负荷安装负荷开关	50	0.0741	1	0.4228
III		50	0.0741	1	0.4228
IV	节点 2、4、5、6调用变电站断路器； 其余节点下连工业负荷安装负荷开关	125	0.2593	0.3333	0.6632

注：(1) 不均衡性代价：将前文切负荷不平衡度进行归一化处理，采用各故障场景下各策略中最大不平衡度作为基准值。(2) 智能用电开关安装与运营成本：对智能用电开关安装与运营成本进行归一化处理，采用智能用电开关安装与运营成本最高的情况——下层智能用电开关待安装位置全部安装智能用电开关负荷开关时的智能用电开关安装与运营成本作为基准值。(3) 综合代价：将已完成数据处理的智能用电开关安装与运营成本、切负荷不均衡代价以及切负荷综合代价代入式(13)，可得本算例中的多维紧急负荷调控综合代价。

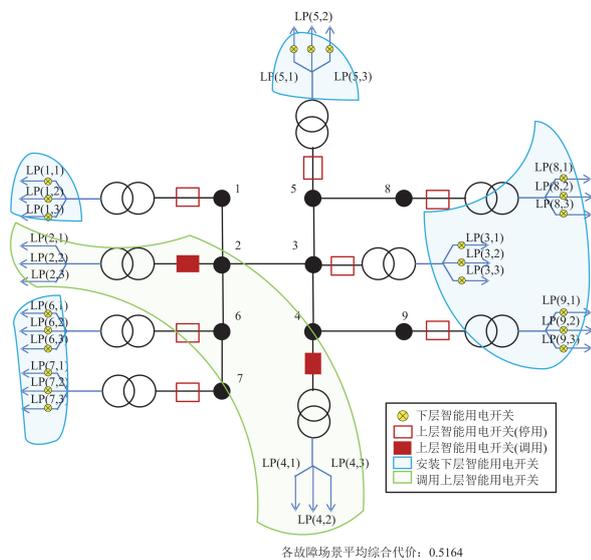


图 5 适应多场景的智能用电开关优化配置策略

Fig. 5 Adaptable switch configuration strategy for multi scenarios

余节点不调用上层智能用电开关，需要于下层智能用电开关待安装位置安装负荷开关。

2) 341 节点系统智能用电开关优化配置策略

将前文 9 节点系统下紧急负荷调用综合代价最小的智能用电开关优化配置策略的构建思路用于 341 节点系统，得到实际电网中考虑不同源荷平衡功率缺额具有普遍适用性的智能用电开关优化配置策略，所得部分策略为：调用安装于节点 1、58、112、258 的上层智能用电开关，无需于下层智能用电开关待安装位置安装负荷开关；其余节点不调用上层智能用电开关，需要于下层智能用电开关待安装位置安装负荷开关，已按策略完成智能用电开关配置的 341 节点系统将有效应对各种故障场景。

5.4 计算结果对比分析

为展示本文所提开关优化配置策略的优势，该策略充分融合了不同智能用电开关的设备特性与组

合机制，本节将分别给出 9 节点系统以及 341 节点系统情况下不调用上层智能用电开关，仅安装下层智能用电开关负荷开关的传统方案(后文称“方案一”)与智能用电开关优化配置策略(后文称“方案二”)的紧急负荷调用综合代价进行对比分析。

根据混合整数非线性规划模型求解结果，可以得到各故障场景下传统研究开关配置方案(方案一)以及本文方案(方案二)所得到的紧急负荷调控综合代价(标么值表示)。在方案一中，于全部开关待安装位置均安装智能用电开关；在方案二中，于部分节点调用上层智能用电开关，其余节点安装下层智能用电开关。为方便对两种方案进行比较，选择源荷不平衡情况最为严重的极端故障场景下的紧急负荷调控综合代价(将其称作“极端场景综合代价”)以及各源荷不平衡故障场景下紧急负荷调控综合代价的平均值(将其称作“各故障场景平均综合代价”)作为比较对象，在 9 节点系统与 341 节点系统下按照不同开关优化配置策略所得相应指标分别见表 3、表 4。

在 9 节点系统中，开关安装与运营成本方面，方案二相比方案一显著降低，幅度达 25%。不均衡代价方面，方案二相比方案一提升幅度有限，各故障场景平均不均衡代价仅提升 7.8%，极端场景不均衡代价仅提升 6%；切负荷代价方面，方案二相比方案一同样提升幅度有限，各故障场景平均切负荷代价仅提升 1.8%，极端场景切负荷代价仅提升 6.1%，而对于综合考虑开关安装与运营成本、紧急负荷调控不均衡度以及切负荷综合代价 3 部分的多维紧急负荷调控综合代价，方案二相比方案一有所降低，各故障场景平均综合代价降低 2.067%，极端场景综合代价降低 12%。

在 341 节点系统中，开关安装与运营成本方面，方案二相比方案一显著降低，幅度达 40%。不均衡代价方面，方案二相比方案一同样提升幅度有限，

表 3 9 节点系统中方案比较

Table 3 Schemes comparison of 9-node system

p.u.			
	对比场景	方案一	方案二
开关安装与运营成本	场景平均	1	0.75
	极端场景	1	0.75
不均衡性代价	场景平均	0.4966	0.5388
	极端场景	0.8296	0.8823
切负荷代价	场景平均	0.5845	0.5950
	极端场景	0.8358	0.8903
综合代价	场景平均	0.5273	0.5164
	极端场景	0.8232	0.7032

表 4 341 节点系统中方案比较

Table 4 Schemes comparison of 341-node system

p.u.			
	对比场景	方案一	方案二
开关安装与运营成本	场景平均	1	0.6
	极端场景	1	0.6
不均衡性代价	场景平均	0.5561	0.5998
	极端场景	0.7234	0.7703
切负荷代价	场景平均	0.5476	0.5865
	极端场景	0.8158	0.8476
综合代价	场景平均	0.5167	0.376
	极端场景	0.9521	0.7455

各故障场景平均不均衡代价仅提升 8.8%，极端场景不均衡代价仅提升 6.4%；切负荷代价方面，方案二相比方案一同样提升幅度有限，各故障场景平均切负荷代价仅提升 6.7%，极端场景切负荷代价仅提升 3.9%，而对于综合考虑开关安装与运营成本、紧急负荷调控不均衡度以及切负荷综合代价 3 部分的多维紧急负荷调控综合代价，方案二相比方案一有所降低，各故障场景平均综合代价降低 5.632%，极端场景综合代价降低 10.66%。

可以发现，执行方案一时，全部安装下层智能用电开关的方案虽然可实现精准控制单个工业负荷切断，然而需要安装更多的智能用电开关，极大地增加了开关安装运营费用，综合性价比较低，在电力公司实际运营中难以实现。方案二通过上下层开关协同动作充分调用已安装上层智能用电开关，极大程度地降低了智能用电开关安装运营成本与维护难度，不均衡代价与切负荷代价相比方案一仅有微小提升，实现了多维紧急负荷调控综合代价的整体性下降。

6 结论

本文提出了一种计及多维紧急负荷调控目标的

智能用电开关设备优化配置方法。所提方法基于紧急负荷控制体系，解析下层智能用电开关负荷开关以及上层智能用电开关断路器的组合作用机制，同时结合安装决策变量与动作变之间的关系，通过代数运算和逻辑分析构建相关约束；随后协调多维紧急负荷调控目标，建立衡量多维紧急负荷调控目标的指标——紧急负荷调控综合代价，该指标综合考虑开关安装与运营成本、紧急负荷调控均衡性以及切负荷经济效益，最终构建综合考虑设备投资成本与多维紧急负荷调控目标的智能用电开关统一优化配置模型，模型为混合整数非线性规划形式。本文所提策略充分利用智能用电开关不同设备间的组合作用关系，同时提出充分考虑经济性与均衡性的紧急负荷调控多维目标，可广泛适用于不同故障场景下的智能用电开关优化配置，具有良好的可扩展性。算例分析表明，本文所提智能用电开关统一优化配置方法可充分发挥不同智能用电开关的作用特点与组合作用优势，灵活、经济、高效地解决源-荷不平衡问题，充分提高设备利用效益，有效降低系统总成本。

参考文献

[1] 曹宏宇, 梁言贺, 刘惠颖, 等. 考虑风-光-储不确定性

- 的新型电力系统概率潮流计算[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 87-93.
CAO Hongyu, LIANG Yanhe, LIU Huiying, et al. Probabilistic power flow calculation of novel power system considering uncertainty of wind-light-storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 87-93.
- [2] 王绪利, 潘东, 施天成, 等. 新型电力系统背景下源网荷储一体化项目友好性评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 72-82.
WANG Xuli, PAN Dong, SHI Tiancheng, et al. A friendliness evaluation method for the source-network-load-storage integration project under the background of new power system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 72-82.
- [3] 郑婉婷, 赵倩宇, 王璇, 等. 绿证-碳交易机制下新型电力系统电-氢-气混合储能容量优化配置方法[J]. 供用电, 2024, 41(3): 24-31, 41.
ZHENG Wanting, ZHAO Qianyu, WANG Xuan, et al. Optimization configuration method for hybrid energy storage capacity of electricity-hydrogen-gas for new power system under the green certificate carbon trading mechanism[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 24-31, 41.
- [4] 赵汉超, 从兰美, 刘杰, 等. 基于 EMD-GM-Elman 神经网络组合模型的新型电力系统新能源发电量及负荷需求量预测[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 132-141.
ZHAO Hanchao, CONG Lanmei, LIU Jie, et al. Forecasting of the new energy generation and load demand in the novel power system based on EMD-GM-Elman neural network combined model[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 132-141.
- [5] 韩刚, 黎雄, 徐箭, 等. 计及需求响应下典型工业负荷排放特性的环境经济调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 109-119.
HAN Gang, LI Xiong, XU Jian, et al. Environmental economic dispatch considering emission characteristics of typical industrial loads under demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 109-119.
- [6] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [7] 高剑, 朱童, 罗异, 等. 考虑配网负荷曲线特性的低频减载执行方案调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 159-167.
GAO Jia, ZHU Tong, LUO Yi, et al. Adjustment method for a low frequency load shedding implementation scheme considering load curve characteristics of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 159-167.
- [8] 李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 等. 考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 156-163.
LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimization of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 156-163.
- [9] 李佩杰, 万海涛, 赵晓慧, 等. 定制化求解机组组合混合整数线性规划模型的固定一推断法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 12-22.
LI Peijie, WAN Haitao, ZHAO Xiaohui, et al. A customized fix and implicate method for mixed integer linear programming models of unit commitment problems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 12-22.
- [10] 李亚男, 顾雪平, 钟慧荣. 考虑负荷类型及停电损失的负荷恢复策略优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 6-12.
LI Yanan, GU Xueping, ZHONG Huirong. Optimization of load recovery plans considering different load types and outage cost[J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39(3): 6-12.
- [11] 张美霞, 王晓晴, 杨秀, 等. 考虑路网和用户满意度的集群电动汽车主从博弈优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 1-11.
ZHANG Meixia, WANG Xiaoqing, YANG Xiu, et al. Stackelberg game optimization scheduling strategy for aggregated electric vehicles considering customer satisfaction and the road network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 1-11.
- [12] 谢虎, 杨占杰, 张伟, 等. 基于改进遗传算法的主动配电网优化定价策略研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 116-122.
XIE Hu, YANG Zhanjie, ZHANG Wei, et al. Research on optimal pricing strategy of active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 116-122.
- [13] 谢开贵, 周家启. 基于免疫算法的配电网开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(15): 35-39.
XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi. Model for optimal switching

- devices based on immune algorithm in electric distribution networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(15): 35-39.
- [14] 端木浚程, 袁越. 配电网孤岛划分的启发式方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 26-32.
DUANMU Juncheng, YUAN Yue. A heuristic method for island partition of distribution network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 26-32.
- [15] 刘博, 陈佳璇, 李江. 基于 SEM-MIP 状态估计的配电网拓扑辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(13): 69-77.
LIU Bo, CHEN Jiaxuan, LI Jiang. SEM-MIP based state estimation for topology identification in a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 69-77.
- [16] 陈庆, 周海强, 朱斌, 等. 协调经济性及事故评级的紧急减负荷控制优化方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(4): 1044-1050.
CHEN Qing, ZHOU Haiqiang, ZHU Bin, et al. Coordinated emergency load shedding control optimization algorithm for economic cost and accident assessment[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(4): 1044-1050.
- [17] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24.
LU Rui, XIONG Xiaofu, CHEN Hongzhou. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 13-24.
- [18] 宋伊宁, 李天友, 薛永端, 等. 基于配电自动化系统的分布式小电流接地故障定位方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(4): 102-109.
SONG Yining, LI Tianyou, XUE Yongduan, et al. Distributed small-current grounding fault locating method based on power distribution network automation system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(4): 102-109.
- [19] CELLI G, PILO F. Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(3): 1167-1172.
- [20] 史燕琨, 王东, 孙辉, 等. 基于综合费用最低的配电网开关优化配置研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(9): 136-141.
SHI Yankun, WANG Dong, SUN Hui, et al. Feeder-switches optimal location scheme for comprehensive cost minimization in distribution system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 136-141.
- [21] 陈锐智, 李析鸿, 陈艳波. 适应不同网络架构的配电终端与开关选型选址模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(11): 151-160.
CHEN Ruizhi, LI Xihong, CHEN Yanbo. Type and site selection model of distribution terminals and switches adaptive to different network architectures[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(11): 151-160.
- [22] 陈鹏伟, 陶顺, 肖湘宁, 等. 有源配电网供电域与开关优化选址区间模型[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 97-108.
CHEN Pengwei, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Supply domain and interval model for switching devices optimal location in active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 97-108.
- [23] ZHANG Tianyu, WANG Chenshan, LUO Fengzhang, et al. Optimal design of the sectional switch and tie line for the distribution network based on the fault incidence matrix[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4869-4879.
- [24] 王怡, 杨知方, 余娟, 等. 考虑可靠性需求的配电网多种设备统一优化配置[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(24): 6727-6743.
WANG Yi, YANG Zhifang, YU Juan, et al. A unified optimal placement method for multiple types of devices in distribution networks considering reliability demand[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(24): 6727-6743.
- [25] JOOSHAKI M, KARIMI-ARPANAHI S, LEHTONEN M, et al. An MILP model for optimal placement of sectionalizing switches and tie lines in distribution networks with complex topologies[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 4740-4751.
- [26] 国电南瑞科技股份有限公司, 国网电力科学研究院有限公司, 国网江苏省电力有限公司, 等. 一种适应于电网调控的负荷资源动态聚合方法及系统, 中国: 202110210479. 1[P]. 2021-07-09.
- [27] 丁涛, 孙宏斌, 柏瑞, 等. 考虑最大风电容量接入的带禁止区间实时经济调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 759-765.
DING Tao, SUN Hongbin, BO Rui, et al. Real-time economic dispatch model with prohibited zones considering maximum wind power injection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 759-765.
- [28] 张玺, 廖胜利, 方舟, 等. 耦合复杂生态约束的梯级水电短期优化调度标准混合整数线性规划模型[J]. *电网技术*, 2025, 49(5): 2004-2013.
ZHANG Xi, LIAO Shengli, FANG Zhou, et al. A short-term optimal dispatch MILP model of cascade hydropower

stations coupled with complex ecological constraints[J]. Power System Technology, 2025, 49(5): 2004-2013.

[29] 国家标准化管理委员会. 电力系统自动低频减载负荷技术规定: GB/T 40596—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[30] ABIRI-JAHROMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, PARVANIA M. Optimized sectionalizing switch placement strategy in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 362 -370.

[31] 何永秀, 赵四化, 李莹, 等. 中国电力工业与国民经济增长的关系研究[J]. 产业经济研究, 2006(1): 47-53.
HE Yongxiu, ZHAO Sihua, LI Ying, et al. The study of the relationship between power industry and national economy growth in China[J]. Industrial Economics Research, 2006(1): 47-53.

[32] 甘海庆, 朱竞, 马璘劫, 等. 考虑产业链的有序用电轮休方案制定策略[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(4): 93-98.
GAN Haiqing, ZHU Jing, MA Jingjie, et al. The Formulating strategy for orderly electricity rotation scheme considering Industrial chain[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(4): 93-98.

[33] 李正明, 张纪华, 陈敏洁. 基于层次分析法的企业有序用电模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 136-141.
LI Zhengming, ZHANG Jihua, CHEN Minjie. Fuzzy comprehensive evaluation of enterprise's orderly power utility based on analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 136-141.

[34] ZHU R, CHEN Y, LI X, et al. Characterization of the regulation capacity of flexible loads represented by air-conditioning temperature-controlled loads[C]// 2023 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 28-30, 2023, Chongqing, China: 1-7.

[35] 燕鹏飞. 计及多维紧急负荷调控目标的智能用电开关设备优化配置附录[EB/OL].[2024-07-03]. https://blog.csdn.net/weixin_53487536/article/details/140152892?spm=1001.2014.3001.5502

[36] 高倩, 杨知方, 李文沅. 电力系统混合整数线性规划问题的运筹决策关键技术综述与展望[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3291-3307.
GAO Qian, YANG Zhifang, LI Wenyuan. Prospect on operations research for mixed-integer linear programming problems in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3291-3307.

[37] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 3975-3994.
GUO Hongxia, CHEN Lingxuan, ZHANG Qi, et al. Research and response to extreme scenarios in new power system: a review from perspective of electricity and power balance[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 3975-3994.

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-07-04

作者简介:

燕鹏飞(2001—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化、电力市场; E-mail: yqypf2001@163.com

杨知方(1992—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化、电力市场; E-mail: zfyang@cqu.edu.cn

林伟(1994—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为虚拟电厂运行控制优化、可信人工智能及其应用、电力能源政策分析. E-mail: weilin@cqu.edu.cn

(编辑 许威)