

# 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置

张晋铭, 欧阳森, 吴 晗, 辛 曦, 黄 祎

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**针对储能提升系统可靠性和降低运行经济性的问题,提出一种综合考虑配电网可靠性和运行经济性的两阶段储能优化配置方法。在单一主电源供电可靠性模型的基础上,分别建立含储能系统单点接入、多点接入结构下的供电可靠性模型;阶段1以储能系统单点接入拓扑下的模型为规划对象,建立多目标规划运行双层模型,上层以储能容量投资成本、系统安全成本、统一时间尺度下的运行成本之和最小为优化目标,下层以综合运行成本之和最小为优化目标,同时考虑网络损耗、电能质量、负荷波动这3种运行成本,应用Gurobi工具包求解得到储能的规划运行方案;阶段2考虑新增供电线缆改造后的储能多点接入拓扑下的模型,以可靠性提升效益最大为优化目标,得到新增线缆规划方案。以修改的IEEE 33节点系统为算例,从不同的场景验证所提方法的有效性,并分析不同的停电风险价格对规划结果的影响。

**关键词:**储能系统;可靠性;运行经济性;优化配置;两阶段优化;双层规划;配电网

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202312044

## 0 引言

近年来,在环境污染日益严峻和“双碳”政策的推动下,新能源发电技术迅速发展,其出力波动性与负荷持续增长性使电网的调峰、调压面临巨大的挑战。储能系统凭借其快速灵活的功率调度能力,在削峰填谷、改善电压质量、提升电网可靠性等方面有着广泛的应用,但储能的建设运行需要较高的投资,如何均衡储能的投资和运行效益具有重要的研究意义。

目前,储能并网规划已有许多研究成果:文献[1]提出了一种考虑净负荷波动裕度和运行费用的储能运行优化方法;文献[2]建立了一种考虑配电网运行效率提升价值的模型,结合各级配电网的利益主体差异,构建了电网侧储能的双层优化配置模型;文献[3]提出了一种储能优化配置模型,考虑了储能投资收益、平抑负荷波动、减缓配电网增容等;文献[4]建立了一种以储能投资成本、运维成本最小及降损、削峰填谷收益最大为优化目标的储能优化配置模型;文献[5-6]提出了一种改善配电网电压质量的储能优化配置模型及控制方法,有效解决了源、荷波动对电压质量的影响;文献[7]提出了一种储能优化配置双层模型,上、下层分别以社会综合成本最小、负荷均衡裕度最优为目标;文献[8]建立了一种基于改进多目标粒子群优化算法的配电网储能优化配置模型,缓解了配电网电压波动和负荷波动。上述研究一般仅考虑线损、电压、削峰填谷等运行指标对储

能优化配置的影响,未考虑储能对提升系统可靠性的重要作用。

文献[9-11]在系统平均停电次数、时间、频率指标等经典指标的基础上,建立了相关可靠性评估指标,并采用蒙特卡罗方法对考虑储能配置的系统进行了可靠性评估,但该方法的计算效率低,仿真时间较长。在系统可靠性方面:文献[12]提出了一种基于储能多状态模型的可靠性评估方法,但未考虑储能的选址定容以及运行经济性;文献[13]建立了储能的可靠性收益模型,评估了不同配置下储能的可靠性收益比,但是未涉及储能的选址定容;文献[14-15]提出了一种考虑配电网可靠性的储能选址定容方法,但只考虑了储能针对单点故障的供电可靠性模型,未考虑加入储能后系统的运行优化。

综上所述,目前大多研究单独从储能提升配电系统运行经济性或提升配电系统运行可靠性方面进行研究,少有研究在配电网储能优化配置中综合考虑系统可靠性和运行经济性。在可靠性研究方面,序蒙特卡罗法是常用的评估方法,但该方法的计算效率低,仿真时间较长,且不易与系统正常运行时的运行经济性一同实现优化。为此,本文基于解析法构建含储能系统的供电可靠性模型,快速评估储能的接入方案对系统可靠性的影响,直接与系统运行指标模型一同构建优化,并分别讨论储能系统单点、多点接入结构下模型对储能优化配置结果以及系统可靠性的影响。

首先,在建立的单一主电源供电可靠性模型的基础上,考虑主电源发生供电故障时储能系统对各节点的持续供电,建立含储能系统单点、多点接入结构下的供电可靠性模型。然后,通过两阶段优化配置流程分别决策储能的选址定容、规划运行和新增

收稿日期:2023-04-01;修回日期:2023-09-01

在线出版日期:2024-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177085)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52177085)

供电线缆结构方案。阶段1以储能系统单点接入结构下的模型为规划对象,建立多目标规划运行双层模型,考虑储能对系统可靠性和运行经济性的影响,在容量约束、节点电压约束、二阶锥潮流松弛约束、储能运行约束下使用Gurobi工具包进行求解。阶段2考虑新增供电线缆改造后的储能多点接入结构下的模型,以可靠性提升效益最大为目标,得到新增线缆规划方案。最后,以修改的IEEE 33节点系统为算例,验证所提储能优化配置模型对提升系统可靠性和运行经济性的有效性。

## 1 供电系统可靠性模型

### 1.1 单一主电源供电可靠性模型

供电可靠性是评估系统供电质量的关键指标,其与年平均停电时间呈负相关。配电网中的绝大多数元件是可修复的,状态模型可分为正常工作状态、故障修复状态,其中负荷点的供电可靠性与线缆长度、断路器开关数量、变压器数量以及故障率、修复时间相关。系统主电源对节点*i*处负荷的供电故障率 $\lambda_{i, fail}$ 、修复时间 $t_{i, res}$ 、断电时长 $t_{i, stop}$ 、供电可靠率 $R_i$ 可分别表示为:

$$\begin{cases} \lambda_{i, fail} = L_i \lambda_L + n_{i, S} \lambda_S + \lambda_T \\ t_{i, res} = L_i \lambda_L t_L + n_{i, S} \lambda_S t_S + \lambda_T t_T \\ t_{i, stop} = \lambda_{i, fail} t_{i, res} \\ R_i = \left(1 - \frac{t_{i, stop}}{8760}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: $L_i$ 为节点*i*处负荷与主电源之间的线缆长度; $n_{i, S}$ 为节点*i*处负荷与主电源之间断路器和开关的数量总和; $\lambda_L$ 、 $\lambda_S$ 、 $\lambda_T$ 分别为线缆故障率、开关故障率、配电变压器失效率; $t_L$ 、 $t_S$ 、 $t_T$ 分别为线缆、开关、变压器的修复时间。

### 1.2 含储能系统的供电可靠性模型

在系统中只存在单一主电源的情况下,当该主电源对负荷点的供电发生故障时,该负荷点会变成停电状态。而当系统中存在多个供电电源时,可视为多电源共同满足负荷点的用电需求。

储能作为一种能量储存系统,可双向存放电能等形式的能量,具有电源性质。当系统中有储能接入时,配电系统就从单一主电源供电结构转变为多电源供电结构,但储能的容量是有限的,其不能对负荷点持续供电,只有当储能系统的容量、功率足够时,才能满足负荷点的供电需求。在单一主电源的配电系统中加入储能系统,能起到减少负荷点停电时长甚至防止停电的作用。

#### 1.2.1 储能系统单点接入结构的供电可靠性模型

储能系统单点接入结构示意图如附录A图A1所示。当储能系统只负责单节点供电时,连接储能系统与负荷节点的配电系统线路结构较为直接简单,

可靠性较高,可直接用一系数表示储能系统的供电可靠性,而不细化考虑供电线缆相关结构的可靠性。

当主电源对负荷点正常供电时,认为可满足功率平衡要求,不考虑储能系统供电。而当主电源发生供电故障及储能系统可正常转换供电时,可通过储能系统供给负荷点所需功率,实现一定时长的持续供电,减少主电源发生故障造成的停电时长。储能系统单点接入后节点*i*处负荷的恢复供电时长 $t_{i, rec}^1$ 、断电时长 $t_{i, stop}^1$ 可分别表示为:

$$t_{i, rec}^1 = (1 - R_i) R_{f, ess} \frac{(S_{j, ess}^{max} - S_{j, ess}^{min}) E_{j, ess}}{P_{i, load}} \quad i=j \quad (2)$$

$$t_{i, stop}^1 = \max\{0, t_{i, stop} - t_{i, rec}^1\} \quad (3)$$

式中: $R_{f, ess}$ 为固定储能系统的转供成功率; $P_{i, load}$ 为节点*i*处的负荷有功功率; $E_{j, ess}$ 为节点*j*处接入储能系统的容量; $S_{j, ess}^{max}$ 、 $S_{j, ess}^{min}$ 分别为节点*j*处接入储能系统的荷电状态上、下限。

#### 1.2.2 储能系统多点接入结构的供电可靠性模型

储能系统多点接入结构示意图如附录A图A2所示,储能系统可通过控制各开关的断闭,有操作性地实现对多个故障节点的持续供电。该储能系统多点接入结构增大了储能系统的控制范围,提升了储能系统的操作灵活性,但需在储能系统单点接入结构的基础上新增电缆线路、开关等设备。该类储能系统供电结构与主电源供电结构相似,各电源的平均供电故障率、修复时间、断电时长与源/荷节点的相对位置有关,可在式(1)的基础上建立储能系统多点接入结构的供电可靠性模型,如式(4)和式(5)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{ij, ess, fail} = L_{ij, ess} \lambda_L + n_{ij, ess, S} \lambda_S + \lambda_T \\ t_{ij, ess, res} = L_{ij, ess} \lambda_L t_L + n_{ij, ess, S} \lambda_S t_S + \lambda_T t_T \\ t_{ij, ess, stop} = \lambda_{ij, ess, fail} t_{ij, ess, res} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{ij, ess} = \left(1 - \frac{t_{ij, ess, stop}}{8760}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\lambda_{ij, ess, fail}$ 、 $t_{ij, ess, res}$ 、 $t_{ij, ess, stop}$ 分别为节点*j*处电源对节点*i*处负荷的供电故障率、修复时间、断电时长; $L_{ij, ess}$ 为节点*j*处电源与节点*i*处负荷之间的电缆长度; $n_{ij, ess, S}$ 为节点*j*处电源与节点*i*处负荷之间断路器和开关的数量总和; $R_{ij, ess}$ 为节点*j*处储能系统对节点*i*处负荷的供电可靠率。

一个节点的供电故障原因可能会导致其余节点的供电故障,会出现多个节点同时发生故障的场景,此时储能系统需要承担多个节点的共同供电。为了描述单个固定储能系统多点接入结构下的平均等效容量,引入等效参数 $k_{j, avg}$ ,如式(6)所示。

$$\begin{cases} k_{j, avg} = 1 + \sum_{i=1}^n x_{ij} L_{ij, ctr} / L_{j, ctr} \\ L_{j, ctr} = \left( \sum_{i=1}^n x_{ij} L_{i, oc} + L_{j, oc} \right) / \left( \sum_{i=1}^n x_{ij} + 1 \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $L_{j, \text{ctr}}$  为节点  $j$  处储能系统的等效中心点与主电源之间的距离;  $L_{ij, \text{ctr}}$  为节点  $i$  相对节点  $j$  处储能系统的等效中心点与主电源供电相关线路长度;  $n$  为节点总数;  $L_{i, \text{oc}}$  为节点  $i$  与主电源的相对位置距离;  $x_{ij}$  为 0-1 变量, 其值为 1 表示节点  $j$  处储能系统与节点  $i$  处负荷之间有新增供电电缆, 值为 0 表示无新增供电电缆。

则储能系统多点接入结构下节点  $i$  处负荷的恢复供电时长  $t_{i, \text{rec}}^{\text{II}}$ 、断电时长  $t_{i, \text{stop}}^{\text{II}}$  可分别表示为:

$$t_{i, \text{rec}}^{\text{II}} = \begin{cases} t_{j, \text{rec}}^{\text{I}} / k_{j, \text{avg}} & i=j \\ \sum_{j \in S_{\text{ess}}} x_{ij} (1-R_j) R_{j, \text{ess}} \frac{(S_{j, \text{ess}}^{\text{max}} - S_{j, \text{ess}}^{\text{min}}) E_{j, \text{ess}} / k_{j, \text{avg}}}{P_{i, \text{load}}} & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

$$t_{i, \text{stop}}^{\text{II}} = \max \{ 0, t_{i, \text{stop}}^{\text{I}} - t_{i, \text{rec}}^{\text{II}} \} \quad (8)$$

式中:  $S_{\text{ess}}$  为储能系统接入节点集合。

### 1.3 系统可靠性模型

由上述分析可知, 加入以上储能系统后节点  $i$  处负荷的断电时长  $t'_{i, \text{stop}}$  为:

$$t'_{i, \text{stop}} = \max \{ 0, t_{i, \text{stop}} - t_{i, \text{rec}}^{\text{I}} - t_{i, \text{rec}}^{\text{II}} \} \quad (9)$$

系统可靠性  $R_0$  可表示为:

$$\begin{cases} R_0 = \left( 1 - \frac{\bar{t}'_{\text{stop}}}{8760} \right) \times 100 \% \\ \bar{t}'_{\text{stop}} = \sum_{i \in S_1} t'_{i, \text{stop}} / N_{\text{load}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\bar{t}'_{\text{stop}}$  为接入储能系统后系统的停电时间期望值;  $N_{\text{load}}$  为负荷接入节点总数;  $S_1$  为负荷节点集合。

## 2 两阶段储能规划模型

### 2.1 阶段 1 的双层规划模型

一般而言, 储能系统的优化配置都被看作一个双层模型, 因为需要同时进行配置和运行双层优化。本文中的节点、系统可靠性模型是在平均期望理论基础上构建的, 可靠性模型与系统运行参数无关, 所建双层模型将总规划层、运行层分离, 使规划模型更清晰明确。阶段 1 的双层规划模型以储能系统单点接入拓扑下的选址定容、运行方案为规划对象, 上层模型考虑储能投资、系统停电故障、系统运行参数, 下层模型考虑网络损耗、电能质量、负荷波动 3 种运行参数。目标函数可表示为:

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x}_{\text{up}}} F_1 = C_{\text{inv}} + C_{\text{risk}} + \alpha C_{\text{opt}} \\ \text{s.t. } \mathbf{H}(\mathbf{x}_{\text{up}}) = 0, \mathbf{G}(\mathbf{x}_{\text{up}}) \leq 0 \\ \min_{\mathbf{x}_{\text{down}}} F_2 = C_{\text{opt}} = C_{\text{loss}} + C_{\text{v, dev}} + C_{\text{ess\_psh}} \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}_{\text{up}}, \mathbf{x}_{\text{down}}) = 0, \mathbf{g}(\mathbf{x}_{\text{up}}, \mathbf{x}_{\text{down}}) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$  分别为阶段 1 上、下层的目标函数值;  $C_{\text{inv}}$  为储能系统的投资成本;  $C_{\text{risk}}$  为停电风险惩罚成本;  $C_{\text{opt}}$  为综合运行成本;  $C_{\text{loss}}$  为网络损耗成本;  $C_{\text{v, dev}}$  为电压偏差惩罚成本;  $C_{\text{ess\_psh}}$  为负荷波动惩罚成本;  $\mathbf{x}_{\text{up}}$ 、 $\mathbf{x}_{\text{down}}$  分别为上、下层的决策变量;  $\alpha$  为运行层的转化

系数, 可实现上、下层时间尺度的统一;  $\mathbf{H}(\mathbf{x}_{\text{up}})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{x}_{\text{up}})$  分别为上层的等式、不等式约束;  $\mathbf{h}(\mathbf{x}_{\text{up}}, \mathbf{x}_{\text{down}})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{\text{up}}, \mathbf{x}_{\text{down}})$  分别为下层的等式、不等式约束。

#### 1) 储能系统的投资成本。

储能系统的容量投资成本可看作由初始投资成本和运维成本构成。初始投资成本是指储能系统工程初期购置设备的资金, 运维成本是指保障储能系统在寿命周期内正常运行而动态投入的资金, 以年为单位时可按初始投资的一定比例近似估算。则储能系统的投资成本  $C_{\text{inv}}$  可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{inv}} = C_{\text{in}} + C_{\text{om}} = (1 + \lambda_{\text{om}}) C_{\text{in}} \\ C_{\text{in}} = \lambda_{\text{ky}} \sum_{j \in S_{\text{ess}}} c_{E, \text{ess}} E_{j, \text{ess}}, \lambda_{\text{ky}} = \frac{k(1+k)^y}{(1+k)^y - 1} \\ C_{\text{om}} = \lambda_{\text{om}} C_{\text{in}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{om}}$  分别为储能系统的初始投资成本、运维成本;  $\lambda_{\text{ky}}$  为投资折现系数;  $k$  为折现率;  $y$  为储能系统的寿命周期;  $c_{E, \text{ess}}$  为储能系统的单位容量投资成本;  $\lambda_{\text{om}}$  为储能系统的运维成本等效系数。

#### 2) 停电风险惩罚成本。

$$C_{\text{risk}} = c_{\text{power\_risk}} \bar{t}_{\text{stop}} = c_{\text{power\_risk}} \sum_{i \in S_1} t_{i, \text{stop}}^{\text{I}} / N_{\text{load}} \quad (13)$$

式中:  $c_{\text{power\_risk}}$  为停电风险惩罚价格;  $\bar{t}_{\text{stop}}$  为储能单点接入后系统的停电时间期望值。

#### 3) 网络损耗成本。

$$C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in S_L} \bar{I}_{ij, t} r_{ij} \quad (14)$$

式中:  $c_{\text{loss}}$  为线损电价;  $\bar{I}_{ij, t}$  为  $t$  时刻支路  $ij$  电流的平方;  $r_{ij}$  为支路  $ij$  的电阻;  $S_L$  为支路集合;  $T$  为调度周期。

#### 4) 电压偏差惩罚成本。

$$C_{\text{v, dev}} = c_{\text{v, dev}} V_{\text{dev}} = c_{\text{v, dev}} \sum_{t=1}^T \sum_{j \in S_1} \left| \frac{\bar{V}_{j, t} - \bar{V}_N}{\bar{V}_N} \right| \quad (15)$$

式中:  $c_{\text{v, dev}}$  为电压偏差惩罚价格;  $V_{\text{dev}}$  为系统电压偏差;  $\bar{V}_{j, t}$  为  $t$  时刻节点  $j$  的电压平方;  $\bar{V}_N$  为系统节点电压额定值的平方。

#### 5) 负荷波动惩罚成本。

储能系统通过在负荷低谷时充电、在负荷高峰时放电达到降低负荷峰谷差的目的, 从而改善馈线的总体负荷特性, 其削峰填谷能力可由负荷波动大小进行衡量。负荷波动惩罚成本  $C_{\text{ess\_psh}}$  可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{ess\_psh}} = c_{\text{ess\_psh}} \times \\ \sum_{t=1}^T \left| \sum_{j \in S_1} P_{j, t, \text{load}} - \sum_{j \in S_{\text{pv}}} P_{j, t, \text{pv}} + \sum_{j \in S_{\text{ess}}} P_{j, t, \text{ess, cha}} - \sum_{j \in S_{\text{ess}}} P_{j, t, \text{ess, discha}} - \bar{P} \right| \\ \bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \sum_{j \in S_1} P_{j, t, \text{load}} - \sum_{j \in S_{\text{pv}}} P_{j, t, \text{pv}} + \sum_{j \in S_{\text{ess}}} P_{j, t, \text{ess, cha}} - \sum_{j \in S_{\text{ess}}} P_{j, t, \text{ess, discha}} \right) \end{cases} \quad (16)$$



式中:  $c_{ess\_psh}$  为负荷波动惩罚价格;  $P_{j,t,load}$  为  $t$  时刻节点  $j$  处的负荷需求量;  $P_{j,t,pv}$  为  $t$  时刻节点  $j$  处光伏的实际出力;  $P_{j,t,ess,cha}$ 、 $P_{j,t,ess,discha}$  分别为  $t$  时刻节点  $j$  处储能系统的充、放电功率;  $\bar{P}$  为调度周期内的平均负荷功率;  $S_{pv}$  为光伏接入节点集合。

## 2.2 阶段 1 的约束条件

### 2.2.1 上层约束条件

阶段 1 的上层约束条件包括储能最大接入数量约束、储能接入容量约束,具体表达式见附录 B 式(B1)。

### 2.2.2 下层约束条件

阶段 1 的下层约束条件包括节点电压约束、二阶锥松弛潮流约束<sup>[16]</sup>、储能系统运行约束,具体表达式见附录 B 式(B2)—(B5)。

## 2.3 阶段 2 的规划模型

阶段 2 的规划模型针对新增储能供电线缆对系统可靠性的提升问题,以可靠性提升效益最大为优化目标。相较于储能单点接入结构下的投资成本,改造后的多点接入结构新增了设备,需要额外的投资成本,新增投资成本主要包括线缆的投资建设成本、运维成本等。则阶段 2 规划模型的目标函数可表示为:

$$\begin{cases} \max F_3 = B_{risk} - C_{inv+} \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq \sum_{i \in S_1} x_{ij} \leq N_{j,x,max} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} B_{risk} = c_{power\_risk} (\bar{t}_{stop} - \bar{t}'_{stop}) \\ C_{inv+} = \lambda_{ky} (C_{line+} + C_{om+} + C_{other}) \\ C_{line+} = c_{line} L_+ = c_{line} \sum_{i \in S_1} \sum_{j \in S_{ess}} x_{ij} L_{ij,ess} \\ C_{om+} = \lambda_{om+} C_{line+} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $F_3$  为阶段 2 的目标函数值;  $B_{risk}$  为可靠性提升收益;  $C_{inv+}$  为新增的供电线缆投资成本;  $C_{line+}$ 、 $C_{om+}$  分别为新增供电线缆投资建设成本、运维成本;  $C_{other}$  为供电线缆投资建设的其他成本;  $c_{line}$  为新增供电线缆投资建设价格;  $L_+$  为新增供电线缆的长度;  $\lambda_{om+}$  为新增设备的运维成本系数;  $N_{j,x,max}$  为节点  $j$  处储能系统的最大新增供电线缆条数。

## 3 模型求解

两阶段储能规划流程如图 1 所示。阶段 1 以储能系统单点接入结构作为规划对象,构建计及系统可靠性和运行经济性的双层规划模型,其上、下层模型之间相互影响,上层模型将储能系统的选址定容方案传递至下层模型,下层模型基于上层选定的储能系统选址定容方案,应用 Yalmip 和 Gurobi 工具包求解得到储能系统的运行方案并返回上层,决策内容包括储能系统的时序出力、网络损耗、电压偏差、负荷波动量等。该双层模型可在反复迭代循环下得

到储能系统的最终选址定容和运行方案。在阶段 1 储能系统选址定容、运行方案的基础上,阶段 2 考虑新增线缆结构所构成的储能系统多点接入拓扑,以可靠性提升效益最大为目标,确定储能系统新增供电线缆的规划方案。

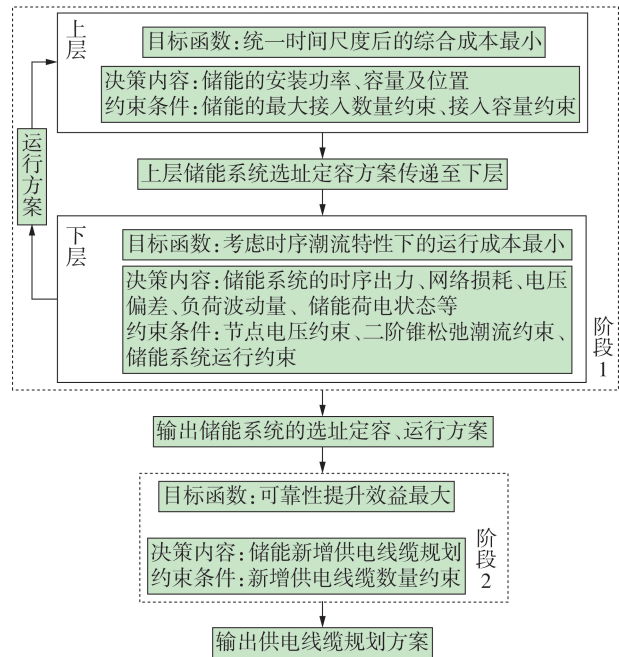


图 1 两阶段储能规划流程

Fig.1 Two-stage energy storage planning process

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文以修改的 IEEE 33 节点系统为算例,在节点 8、12 处分别接入额定功率为 0.2 MW 的光伏,认为该配电网为小范围网架结构,各节点的地理位置同处于一个小范围区域内,接入不同节点的光伏发电装置的功率曲线相同,其单个光伏的出力曲线和节点负荷功率曲线如附录 C 图 C1 所示。

取折现率为 6%,储能系统荷电状态的上、下限设定参考文献[2],设置初始荷电状态为 0.3。在可靠性参数设置方面,线缆故障率、断路器或开关故障率、配电变压器失效率及其对应修复时间如附录 C 表 C1 所示<sup>[14]</sup>,设置储能系统的转供成功率为 0.999 5。储能规划年限、运行层转化系数的计算方法以及电压上、下限参数设置参考文献[17];储能单位容量投资成本参考文献[18]设定,其中取运维成本等效系数为 0.5%;取储能的额定充放电效率为 0.9<sup>[19]</sup>。运行惩罚成本在参考文献[17,19]设置的基础上,按照优先级依次考虑减小负荷波动、降低电压偏差、减小网络损耗成本,具体参数设置如附录 C 表 C2 所示。新增供电线缆投资建设价格参考文献[20]设定。为了方便观测储能系统的优化配置结果,设置储能系

统的最大接入个数为3,单个节点储能系统的最大接入容量为1.5 MW·h,储能的额定功率最大为1 MW,单个固定储能系统的可新增供电电缆数量为3条。

## 4.2 规划结果分析

### 4.2.1 考虑可靠性对储能系统单点接入结构下规划结果的影响分析

针对储能系统单点接入结构的规划,设置以下4种场景分析接入储能前、后运行参数的变化以及优化目标考虑系统可靠性对储能规划结果的影响:①场景1,不考虑储能系统接入;②场景2,考虑储能系统接入,优化目标不考虑可靠性;③场景3,考虑储能系统接入,优化目标考虑可靠性;④场景4,考虑储能系统接入,优化目标考虑可靠性,同时设置高停电风险惩罚价格。不同场景的储能规划结果如表1所示。不同停电风险惩罚价格(基于文献[21]中的功率级别设置)下的结果对比如表2所示。

对比场景1和场景2可知,配置储能后可通过较小地牺牲网络损耗运行参数,有效降低系统的电压偏差惩罚成本、负荷波动惩罚运行成本,改善系统的电压质量,有效实现对负荷曲线的削峰填谷,降低系统整体运行成本。对比场景2和场景3可知,当优化目标中考虑系统可靠性后,储能的规划结果会朝提高系统可靠性的方向改变,在相同的初始容量投资成本下,系统停电时间期望、停电风险惩罚成本分别减少了0.0008 h、0.04万元,且综合运行惩罚成本只稍微增大。对比场景3和场景4可知,当设置高停电风险惩罚价格时,储能的规划结果发生两方面的改变,分别表现为储能配置容量增大、储能接入位置改变,系统停电时间期望减少了0.0386 h,同时增大储能的配置容量可更好地用于负荷削峰填谷,使下层负荷波动惩罚成本减少0.1550万元,下层综合运行成本减少了0.0864万元。

不同场景下的储能时序出力和荷电状态分别如图2和图3所示。由图可知,不同场景下储能的总体运行趋势相似,在运行参数上主要先满足系统削峰填谷需求,减小系统的负荷波动,然后考虑储能出力对网络损耗和电压偏差的改善。综上可知,考虑可靠性后的储能规划结果能增强系统可靠性,同时兼顾网络损耗、电压偏差、负荷波动等运行参数,实现系统可靠性和运行经济性的最优规划。

表1 不同场景的储能规划结果对比

Table 1 Comparison of energy storage planning results among different scenarios

场景	储能接入节点 (配置容量/(MW·h))	初始容量投资 成本/万元	网络损耗 成本/万元	电压偏差 惩罚成本/万元	负荷波动惩罚 成本/万元	系统停电时间 期望/h
1	—	—	0.1378	0.4564	3.8167	76.4110
2	2(1.1),3(0.7),19(0.7)	134.20	0.1432	0.2777	2.4175	76.4107
3	19(0.7),20(0.7),21(1.1)	134.20	0.1452	0.2764	2.4208	76.4099
4	15(0.8),16(1.1),17(0.9)	150.31	0.1905	0.2997	2.2658	76.3713

表2 不同停电风险惩罚价格下的结果对比

Table 2 Comparison of results under different power outage risk penalty prices

停电风险 惩罚价格/ (万元·h <sup>-1</sup> )	储能接入节点 (配置容量/ (MW·h))	系统停电时 间期望/h	C <sub>opt</sub> / 万元
—	—	76.4110	4.4109
10	2(1.1),3(0.6), 19(0.7)	76.4108	2.8915
50	19(0.7),20(0.7), 21(1.1)	76.4099	2.8424
80	16(0.7),17(1.1), 18(0.7)	76.3751	2.8806
300	15(0.8),16(1.1), 17(0.9)	76.3713	2.7560
600	16(1.0),17(1.1), 18(0.8)	76.3697	2.6831

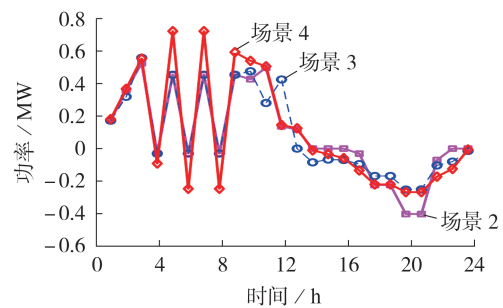


图2 不同场景下储能时序出力

Fig.2 Sequential output of energy storage under different scenarios

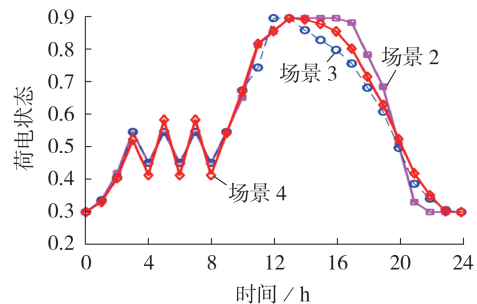


图3 不同场景下储能荷电状态

Fig.3 State of charge of energy storage under different scenarios

### 4.2.2 停电风险价格对储能系统单点接入结构下规划结果的影响分析

由表2可知,当停电风险惩罚价格为10万元/h

时,储能选址定容规划结果与不考虑可靠性的场景2的规划结果十分接近,这是因为此时的停电惩罚价格较低,对规划结果造成的影响较小。随着停电风险惩罚价格增大,系统停电时间期望逐步下降,储能规划结果开始受系统可靠性影响,以减少系统停电时间期望方向规划配置储能。储能配置可通过增大配置容量和改变接入节点来减少系统停电时间期望,增大储能配置容量能更好地满足对故障节点的持续供电,储能接入易发生故障的节点更能发挥其保供电能力。当停电风险惩罚价格由50万元/h变化至80万元/h时,在不增大储能配置容量的情况下可通过改变接入节点使停电时间期望减小0.0348 h。当停电惩罚价格由80万元/h变化至600万元/h时,分别使节点16、18处储能的配置容量增大0.3、0.1 MW·h,可使停电时间期望减小0.0054 h,同时增大配置容量可使储能更好地平抑负荷波动,从整体上降低综合运行成本。综上可知,随着停电风险惩罚价格增大,储能的选址定容趋向于增大系统可靠性为目的,且增大储能的配置容量

投资。

#### 4.2.3 储能系统单点、多点接入结构下的规划结果对比

在上述场景3和场景4下储能系统单点接入拓扑规划结果的基础上,分析通过新增供电线缆改变储能接入结构对系统可靠性的影响。新增供电线缆时的规划结果如表3所示,具体规划结果拓扑结构图如附录D图D1和图D2所示。由表3可知,将储能系统单点接入结构改造为多点接入结构,可进一步降低系统停电时间期望,提升系统可靠性,更有效利用了储能容量,减少了所需投资成本。从规划结果来看,综合考虑了以下2类因素:①考虑了位于主电源输电末端的节点,比如节点3、17、18、32等,由于受较长供电距离的影响,该类节点的故障停电率较高,更有必要配置储能供电线缆;②考虑了新增供电线缆后的储能等效容量,可选择位于不同馈线的节点,避免多个节点同时发生故障需要储能持续供电的可能性,使储能的等效容量处于一个较大的值,从而更有效地利用储能容量。

表3 储能新增线缆的规划结果

Table 3 Planning results of new cables for energy storage

储能接入节点	新增供电线缆	系统停电时间期望/h	$F_3$ /万元	相同停电时间期望下储能单点接入结构的等效接入总容量/(MW·h)	相同停电时间期望下储能多点接入结构相较于单点接入结构减少的投资成本/万元
19—21	15-19, 19-33, 17-20, 18-20, 20-28, 17-21, 18-21, 21-30	76.3747	0.3290	5.8	175.67
15—17	14-15, 15-26, 15-31, 16-17, 16-18, 16-32, 17-18, 17-33	76.3360	9.7977	5.7	154.89

## 5 结论

本文主要研究了同时考虑系统可靠性和运行经济性的储能优化配置模型,在单一主电源供电可靠性模型的基础上,构建了含储能系统单点、多点接入结构下的系统可靠性模型,分析了储能对提高系统可靠性和降低运行经济性的重要作用,以改进的IEEE 33节点系统为算例进行仿真,所得结论如下:

1)考虑可靠性后的储能规划结果能增强系统可靠性,同时兼顾网络损耗、电压偏差、负荷波动等运行参数,实现系统可靠性和运行经济性的最优规划;

2)随着停电风险惩罚价格增大,储能的规划结果会发生不同程度的变化,其规划结果逐渐趋向以增大系统可靠性为目的,这会增大对储能的初始容量投资成本;

3)通过新增供电线缆将储能系统单点接入结构改造为多点接入结构,可进一步提升系统的可靠性和整体经济性;

4)对于本文的算例场景,当对系统可靠性要求较高、对储能容量投资成本增加较不敏感时,宜选场

景4作为最优规划结果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 王守相,陈建凯,王洪坤,等. 综合考虑电动汽车充电与储能及可中断负荷调度的配电网两阶段灵活性提升优化方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 1-10.  
WANG Shouxiang, CHEN Jiankai, WANG Hongkun, et al. Two-stage flexibility improvement optimization method of distribution network considering EV charging and scheduling of energy storage and interruptible loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 1-10.
- [2] 白浩,于力,梁朔,等. 计及多级配电网运行效率提升价值的电网侧储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 7-13.  
BAI Hao, YU Li, LIANG Shuo, et al. Optimized configuration of grid-side energy storage considering the value of multi-stage distribution network operation efficiency improvement[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3): 7-13.
- [3] 贾雨龙,米增强,刘力卿,等. 分布式储能系统接入配电网的容量配置和有序布点综合优化方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 1-7, 16.  
JIA Yulong, MI Zengqiang, LIU Liqing, et al. Comprehensive



- optimization method of capacity configuration and ordered installation for distributed energy storage system accessing distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019,39(4):1-7,16.
- [4] 苏向敬,陈思利,米阳,等. 分布式电池储能在含高比例可再生能源不平衡配电网中的序次优化配置[J]. *电网技术*, 2019,43(10):3698-3707.  
SU Xiangjing, CHEN Sili, MI Yang, et al. Sequential and optimal placement of distributed battery energy storage systems within unbalanced distribution networks hosting high renewable penetrations[J]. *Power System Technology*, 2019,43(10):3698-3707.
- [5] 陈厚合,刘丽娜,姜涛,等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. *电网技术*, 2018,42(7):2127-2135.  
CHEN Houhe, LIU Lina, JIANG Tao, et al. Optimal economic configuration of distributed energy storage systems for improving voltage quality in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2018,42(7):2127-2135.
- [6] 王泉,何怡刚,马恒瑞,等. 考虑规模化储能的配电网电压分布式控制[J]. *电力自动化设备*, 2022,42(2):25-30,55.  
WANG Xiao, HE Yigang, MA Hengrui, et al. Distributed voltage control of distribution network considering large-scale energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022,42(2):25-30,55.
- [7] 刘书琪,顾洁,赖柏希,等. 考虑负荷裕度的区域综合能源系统储能双层优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2022,42(7):150-158.  
LIU Shuqi, GU Jie, LAI Boxi, et al. Bi-level optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering load margin[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022,42(7):150-158.
- [8] 李建林,谭宇良,王含,等. 配网及光储微网储能系统配置优化策略[J]. *高电压技术*, 2022,48(5):1893-1902.  
LI Jianlin, TAN Yuliang, WANG Han, et al. Research on configuration optimization of energy storage system in distribution network and optical storage microgrid[J]. *High Voltage Engineering*, 2022,48(5):1893-1902.
- [9] WANG S, HUI H X, DING Y, et al. Operational reliability evaluation of urban multi-energy systems with equivalent energy storage[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023,59(2):2186-2201.
- [10] GAUTAM P, KARKI R, PIYA P. Probabilistic modeling of energy storage to quantify market constrained reliability value to active distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020,11(2):1043-1053.
- [11] TUR M R. Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique[J]. *IEEE Access*, 2020,8:77962-77971.
- [12] 闫涛,唐巍,王越,等. 基于储能多状态模型的含微网配电网系统可靠性评估[J]. *电网技术*, 2017,41(7):2222-2228.  
YAN Tao, TANG Wei, WANG Yue, et al. Reliability evaluation of distribution network with microgrid based on multi-state energy storage model[J]. *Power System Technology*, 2017,41(7):2222-2228.
- [13] 李振坤,李一骄,张代红,等. 储能设备对有源配电网供电可靠性的影响分析及优化配置[J]. *电网技术*, 2018,42(11):3676-3683.  
LI Zhenkun, LI Yijiao, ZHANG Daihong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation[J]. *Power System Technology*, 2018,42(11):3676-3683.
- [14] 王凯亮,孔慧超,李俊辉,等. 考虑配电网可靠性的储能系统选址定容优化[J]. *南方电网技术*, 2022,16(4):21-29.  
WANG Kailiang, KONG Huichao, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system location and capacity considering the reliability of distribution network[J]. *Southern Power System Technology*, 2022,16(4):21-29.
- [15] 侯美倩,牛启帆,邢洁,等. 计及可靠性的含源配电网储能系统的优化配置[J]. *储能科学与技术*, 2023,12(2):504-514.  
HOU Meiqian, NIU Qifan, XING Jie, et al. Optimal configuration of energy storage system in active distribution network with the consideration of reliability[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023,12(2):504-514.
- [16] 孙巍. 基于二阶锥规划的交流直流混合配网多时间尺度优化控制[D]. 山东:山东大学, 2020.  
SUN Wei. Multi-time scale optimal dispatch in AC/DC hybrid distribution networks based on SOCP[D]. Shandong: Shandong University, 2020.
- [17] 高红均,刘俊勇. 考虑不同类型DG和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2016,36(18):4911-4922, 5115.  
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016,36(18):4911-4922, 5115.
- [18] 李焱坤. 基于合作博弈的电网侧-用户侧储能系统容量优化配置及经济性评估[D]. 南京:东南大学, 2020.  
LI Yankun. Capacity optimization and economic evaluation of grid-side and user-side energy storage system based on cooperative game[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [19] 刘晋源,吕林,高红均,等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. *电力系统自动化*, 2020,44(12):41-48.  
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020,44(12):41-48.
- [20] 张永斌,聂明林,张俊鹏,等. 考虑分布式电源不确定性的配电网网架模糊规划[J]. *电工技术学报*, 2019,34(增刊1):258-263.  
ZHANG Yongbin, NIE Minglin, ZHANG Junpeng, et al. Grid fuzzy planning of the distribution network with distributed generation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019,34(Supplement 1):258-263.
- [21] 闫涵,王建华,范须露,等. 基于用户停电损失评估的有源配电网灾后供电恢复模型[J]. *电力系统自动化*, 2022,46(5):31-42.  
YAN Han, WANG Jianhua, FAN Xulu, et al. Post-disaster power supply restoration model for active distribution network based on customer interruption cost assessment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022,46(5):31-42.

#### 作者简介:

张晋铭(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划、能效评估(E-mail:736818573@qq.com);

欧阳森(1974—),男,副研究员,博士,主要研究方向为配电网规划与运行、电能质量分析与控制(E-mail:ouyangsen@scut.cn);

吴 晗(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与运行(E-mail:wuuuh1669@163.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第85页 continued on page 85)

## Coordinated allocation strategy of emergency resource for regional distribution network considering distributed photovoltaic efficient absorption and minimum load loss

TANG Yajie<sup>1</sup>, LI Junhao<sup>2</sup>, LIN Da<sup>1</sup>, YU Xi<sup>3</sup>, GONG Diyang<sup>1</sup>, TU Chunming<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center,

Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In order to achieve rational allocation of emergency resources, taking into account the economics under normal and faulty operation of the regional distribution network, a coordinated allocation strategy of emergency resource using line reinforcement and distributed energy storage is proposed. The maximum wind speed method and the threshold method are used to simulate the line fault situation, and the backward reduction method based on Kantorovich distance is used to obtain the classic scenario of source-load distribution in the regional distribution network when it encounters extreme weather. Considering the efficient absorption of distributed photovoltaic under normal working conditions and the minimum load loss under fault conditions, an optimization model including load loss cost in the emergency stage, emergency resource investment cost and normal operation cost is constructed. The proposed emergency allocation strategy is validated and analyzed based on the example of an improved IEEE 33-bus distribution network. The results show that the proposed emergency resource allocation strategy can balance the efficient absorption of distributed photovoltaic and the minimization of load loss, and realize the low-carbon and economic operation of the regional distribution network while reducing the economic loss under extreme disasters.

**Key words:** regional distribution network; extreme natural disasters; power restoration; emergency resource allocation; line reinforcement; distributed energy storage

(上接第 68 页 continued from page 68)

## Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network

ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, XIN Xi, HUANG Yi

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that energy storage improves system reliability and reduces operation economy, a two-stage optimization configuration method of energy storage is proposed, which comprehensively considers the reliability and operation economy of distribution network. Based on the power supply reliability model of a single main power supply, the power supply reliability models of energy storage with single point access structure and multi-point access structure are established respectively. In the first stage, taking the model of energy system with the single point access structure as the planning object, a two-layer model of multi-objective planning and operation is established. The upper layer takes the minimum sum of energy storage capacity investment cost, system safety cost and operation cost under a unified time scale as the optimization goal, and the lower layer takes the minimum sum of comprehensive operating costs as the optimization goal, taking into account the three operation costs of network loss, power quality and load fluctuation. And the planned operation scheme of energy storage is solved by using the Gurobi toolkit. In the second stage, considering the model of energy storage multi-point access topology after the transformation of new power supply cables is considered and the new cable planning scheme is obtained with the goal of maximizing the efficiency of reliability improvement. Taking the modified IEEE 33-bus system as an example, the effectiveness of the proposed method is verified under different scenarios, and the influence of different power outage risk prices on the planning results is analyzed.

**Key words:** energy storage system; reliability; operation economy; optimal configuration; two-stage optimization; bi-level planning; distribution network



## 附录 A：储能系统接单点、多点连接示意图

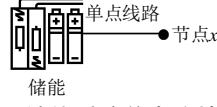


图 A1 储能系统单点连接示意图

Fig.A1 Schematic diagram of single-point connection of energy storage system

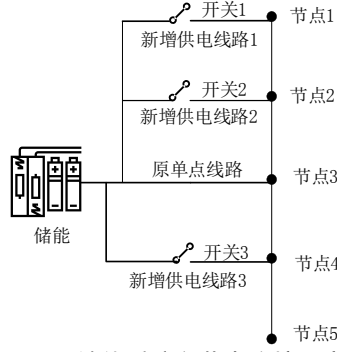


图 A2 储能系统多节点连接示意图

Fig.A2 Schematic diagram of multi-node connection of energy storage system

## 附录 B：阶段 1 规划上下层约束

1) 最大接入数量和容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq E_{j,ess} \leq E_{j,ess,max} \\ 0 \leq \sum_{j \in S_{ess}} E_{j,ess} \leq E_{ess,max} \\ 0 \leq \sum_{j \in S_{ess}} N_{j,ess} \leq N_{ess,max} \end{cases} \quad (B1)$$

式中： $E_{j,ess,max}$  为第  $j$  个节点储能安装容量上限； $E_{ess,max}$  为整个系统可接受的储能总安装容量上限； $N_{j,ess}$  表示第  $j$  个节点是否安装储能，有储能接入为 1、无储能接入为 0； $N_{ess,max}$  为整个系统可接受的储能安装个数上限。

2) 节点电压约束

$$V_{i,min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,max} \quad (B2)$$

式中： $V_{i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  电压； $V_{i,min}$ 、 $V_{i,max}$  为节点  $i$  电压上下限。

3) 二阶锥松弛潮流约束

$$\begin{cases} \bar{U}_{j,t} = \bar{U}_{i,t} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\bar{I}_{ij,t} \\ p_{j,t} = P_{ij,t} - r_{ij}\bar{I}_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t}\bar{I}_{ij,t} \\ q_{j,t} = Q_{ij,t} - x_{ij}\bar{I}_{ij,t} - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \\ \bar{I}_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{j,t}} \end{cases} \quad (B3)$$

根据文献[14], 松弛变换后可写成式(B4)的标准二阶锥形式。

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \bar{I}_{ij,t} - \bar{V}_{j,t} \end{array} \right\| \leq \bar{I}_{ij,t} + \bar{V}_{j,t} \quad (\text{B4})$$

式中： $x_{ij}$ 为支路 $ij$ 的电抗； $p_{j,t}$ 、 $q_{j,t}$ 分别为 $t$ 时刻节点 $j$ 有功、无功注入功率； $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 $t$ 时刻支路 $ij$ 的首端有功、无功功率； $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ 分别为 $t$ 时刻支路 $jk$ 的首端有功、无功功率； $k:j \rightarrow k$ 为以节点 $j$ 为节点的子节点集合。

4) 储能运行约束

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{j,t+1,ess} = S_{j,t,ess} + \frac{\eta_{j,ess} P_{j,t,ess,cha}}{E_{j,ess}} \square t - \frac{P_{j,t,ess,discha}}{\eta_{j,ess} E_{j,ess}} \square t \\ S_{j,ess}^{\min} \leq S_{j,t,ess} \leq S_{j,ess}^{\max} \\ 0 \leq P_{j,t,ess,cha}, P_{j,t,ess,discha} \leq P_{j,ess}^{\max} \\ \beta_{j,t,ess,discha} P_{j,t,ess,cha} + \beta_{j,t,ess,cha} P_{j,t,ess,discha} = 0 \\ \beta_{j,t,ess,cha} + \beta_{j,t,ess,discha} = 1 \\ S_{j,0,ess} = S_{j,T,ess} \end{array} \right. \quad (\text{B5})$$

式中： $S_{j,t,ess}$ 为第 $j$ 个节点储能 $t$ 时刻的荷电状态； $\square t$ 表示单位时间； $\eta_{j,ess}$ 为第 $j$ 个节点储能充放电效率； $P_{j,ess}^{\max}$ 为第 $j$ 个节点储能的额定功率，即储能最大输出功率； $\beta_{j,t,ess,cha}$ 、 $\beta_{j,t,ess,discha}$ 分别为储能充放电标志。

## 附录 C：基础参数设置

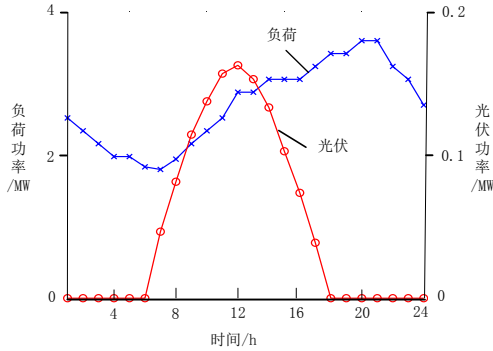


图 C1 配电网光荷功率曲线

Fig.C1 Optical load power curve of distribution network

表 C1 运行惩罚成本参数设置

Table C1 Run the penalty cost parameter setting

参数/变量	数值
线损电价/(元/kWh)	0.60
电压偏差惩罚价格/元	100.00
负荷波动惩罚价格/(元/kWh)	3.00

# 附录 D: 规划结果图

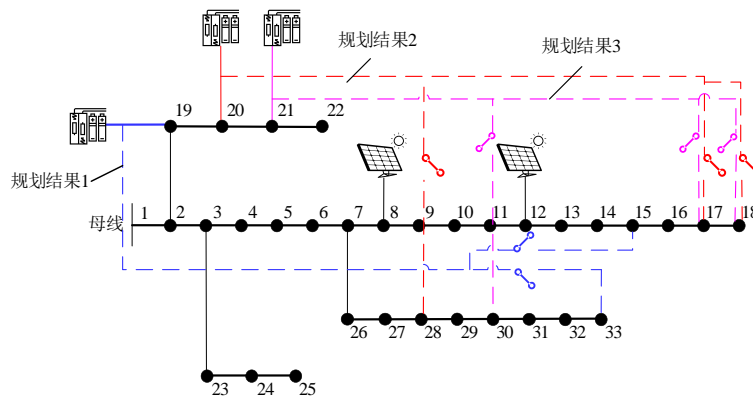


图 D1 场景三规划结果图

Fig.D1 Planning result diagram of scenario 3

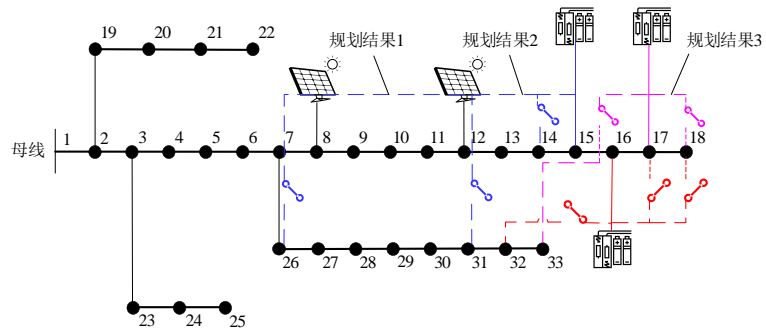


图 D2 场景四规划结果图

Fig.D2 Planning result diagram of scenario 4