

计及灵活性不足风险的配电网智能软开关与 多类型共享储能协调优化

王杰¹, 徐立军^{1*}, 李笑竹², 樊小朝¹, 古丽扎提·海拉提¹, 王维庆²

(1. 新疆绿氢制储用技术重点实验室(新疆工程学院), 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830023;
2. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830017)

Coordinated Optimization of Intelligent Soft Open Points and Multiple Types of Shared Energy Storage in Distribution Networks Considering Flexibility Deficiency Risk

WANG Jie¹, XU Lijun^{1*}, LI Xiaozhu², FAN Xiaochao¹, GULIZHATI·Hailati¹, WANG Weiqing²
(1. Key Laboratory of Green Hydrogen Production, Storage and Utilization Technology in Xinjiang (Xinjiang Institute of Engineering), Urumqi 830023, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; 2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

摘要:【目的】为解决高渗透率新能源的接入给新型配电网造成的运行安全问题, 联合智能软开关、多类型共享储能多种灵活性设备, 提出了计及灵活性不足风险的配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化运行方法。【方法】首先, 阐述了智能软开关与多类型共享储能灵活性资源的灵活调节机理, 构建了基于条件风险价值的灵活性不足风险指标。其次, 综合考虑灵活性、安全性及经济性指标, 建立了新型配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化模型。最后, 在改进的IEEE 33节点系统对所提出的方法进行验证。【结果】所提出的计及灵活性不足风险的新型配电网智能软开关与多类型共享储能的协调优化方法, 能够有效降低新型配电网的有功损耗, 提高新型配电网运行的灵活性、安全性与经济性。【结论】所提出的灵活性优化模型将为新型配电网系统灵活调度提供较高的实际参考价值。

关键词: 新能源; 新型配电网; 智能软开关; 多类型共享储能; 灵活性; 条件风险价值

ABSTRACT: [Objectives] To address the operational security issues in the new-type distribution network caused by the high-penetration integration of renewable energy, this paper proposes a coordinated optimization method for intelligent soft open points and multiple types of shared energy storage, by integrating these flexible devices while considering the risk of flexibility deficiency. [Methods] Firstly, the flexible regulation mechanism of flexible resources, including intelligent soft open points and multiple types of shared energy storage, is elaborated, and a flexibility deficiency risk indicator based on conditional value at risk is constructed. Secondly, considering flexibility, safety, and economy, a coordinated optimization model for intelligent soft open points and multiple types of shared energy storage in the new-type distribution network is established. Finally, the proposed method is tested on an improved IEEE 33-bus system to verify its effectiveness. [Results] The proposed coordinated optimization method for intelligent soft open points and multiple types of shared energy storage, considering flexibility deficiency risk, can fully cope with the volatility of renewable energy output and the randomness of load demand, effectively reduce active power loss of the new-type distribution network, and enhance its flexibility, safety, and economy. [Conclusions] The proposed flexibility optimization model provides significant practical reference value for flexible scheduling of new-type distribution systems.

KEY WORDS: renewable energy; new-type distribution network; intelligent soft open point; multiple types of shared energy storage; flexibility; conditional value at risk

基金项目: 国家自然科学基金项目(72361033); 新疆天山英才青年科技拔尖人才项目(2022TSYCCX0053); 新疆自治区天池英才青年博士计划(2024XGYTCYC12); 新疆工程学院博士启动基金(2024XGYBQJ01)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (72361033); The Xinjiang Tianshan Elite Young Scientist Excellence Program (2022TSYCCX0053); Xinjiang Tianchi Talent Program (2024XGYTCYC12); Xinjiang Institute of Technology PhD Start-up Fund (2024XGYBQJ01).

0 引言

为有效促进新能源的开发利用,实现2020年提出的“双碳”目标,2021年3月15日,我国提出了构建新型电力系统的计划,2023年6月2日,国家能源局发布了《新型电力系统发展蓝皮书》^[1]。为加快构建新型电力系统,国家能源局于2024年8月颁布了《配电网高质量发展行动实施方案(2024—2027年)》^[2]。截止到2023年年底,我国风光新能源装机容量占比36%,发电量占比15.5%^[2]。然而,高比例新能源接入新型配电网后,配电网的运行特性呈现不确定性,从而造成配电网节点电压越限、支路容量过载、三相不平衡等一些复杂问题,这使得配电系统的安全稳定、灵活经济运行面临新的挑战^[3-5]。传统的调节手段已无法满足含高渗透率新能源的新型配电系统精细化潮流调控的需求。

智能软开关(soft open point, SOP)是取代传统联络开关的一种新型智能电力电子装置,能够快速响应功率的传输,从而有效应对新能源波动性和负荷随机性引发的运行安全问题^[6-9]。文献[10]考虑了分布式新能源出力波动性和负荷随机性,建立了一种多目标随机信息差距决策的智能软开关规划优化模型,通过量化智能软开关提升系统运行灵活性、经济性。文献[11]考虑了分布式新能源出力波动性和负荷随机性,提出了不平衡配电网智能软开关最优参数设置方法,以改善谐波畸变、电压不平衡和有功损耗。文献[12]提出了计及智能软开关多种调节方式的两阶段鲁棒优化调度模型,以应对系统节点电压的越限问题。智能开关通常需要更高的设备成本和后续的维护升级费用。因此有必要研究智能软开关与储能灵活性设备的协调优化问题,以提升智能软开关的高效利用。

共享储能系统在新型配电网中的应用能够有效应对“源”“荷”不确定性带来的挑战^[13-15]。然而,共享储能能在配电网中固定位置的接入限制了馈线间的调节能力,难以应对配电网其他馈线出现的新能源出力过剩和负荷功率供应不足的问题。智能软开关具有较强的灵活性和可

控性,能够补偿空间调节能力不足问题。目前面向配电网中储能与智能软开关的优化已有广泛研究^[16-17]。文献[18]建立了配电网智能软开关与储能的两阶段优化模型,以应对分布式新能源出力的不确定性与负荷的随机性问题,改善系统运行的经济性。文献[19]提出了智能软开关融合储能的鲁棒优化调度模型,以缓解潮流不确定约束、经济损失严重的问题。文献[20]计及新能源不确定性,考虑需求响应建立了主动配电网中融合储能的三端智能软开关功率优化策略,以解决经济性、安全性、新能源消纳等问题。

以上已开展智能软开关与储能系统的运行与控制相关研究,优化模型中均考虑了新能源出力和负荷的随机性,但是未能关注其灵活性资源对配电网运行灵活性提升的影响。文献[21]研究了考虑灵活性的新型配电网混合储能和智能软开关的协同规划-运行方法,以提升配电系统运行的安全性以及灵活调节能力。通过仿真验证了模型的有效性,但是现有智能软开关协调优化模型中仅单方面考虑系统运行安全性、灵活性,另外未能综合考虑共享储能、储热型新型储能与SOP多种灵活性资源的协调优化对新型配电网运行灵活性提升的效果。

综上所述,本文构建了一种计及灵活性不足风险的配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化模型。首先,研究SOP与共享储能(shared energy storage, SES)、储热型共享储能(cogeneration shared energy storage utilizing solid-state thermal storage, CSES)多类型储能联合的调节特性;其次,从网络拓扑、电源侧和负荷侧多维灵活调整的角度,对含SOP、SES与CSES多类型灵活性资源的新型配电系统进行灵活性供需平衡机理分析,基于条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)构建了灵活性不足风险成本模型,兼顾了系统运行的灵活性、安全性和经济性多指标。最后,以改进IEEE 33系统为例,开展多类型灵活性资源接入下的系统协调优化仿真分析,验证所提出模型和方法的有效性。

1 新型配电网灵活性分析与指标构建

1.1 新型配电网灵活性资源

配电网的灵活性资源分布在源网荷侧整个拓扑结构上：源侧通过上级电网提供灵活性；网侧可以通过网络重构和以 SOP 为代表的柔性装置提升拓扑灵活性；荷侧通过多类型新型储能装置、可控负荷等灵活资源满足供需平衡。由于网络重构无法实现频繁操作，暂不考虑，以上级电网、SOP、SES 与 CSES 为代表的灵活性资源共同构建配电网灵活性指标。

1) 源侧、荷侧灵活性资源

上级电网通过配电网连接联络线上的功率提供向上/向下灵活性调节能力，储能系统通过充/放电提供向上/向下灵活性调节能力。各灵活性资源的灵活性调节能力具体表达式如下：

$$\begin{cases} F_{\text{ess},i,t}^{\text{up}} = \sum \min \{P_{\text{ess},i} - P_{\text{ess},i}^{\text{ess}}, \eta(E_{\text{ess},i}^{\text{ess}} - E_{\text{ess},i}^{\text{down}})\} \\ F_{\text{ess},i,t}^{\text{down}} = \sum \min \{P_{\text{ess},i}^{\text{ess}} + P_{\text{ess},i}, (E_{\text{ess},i}^{\text{ess}} - E_{\text{ess},i}^{\text{down}})/\eta\} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_{\text{g},t}^{\text{up}} = \sum \min \{\Delta P_{\text{g},\text{max}}, P_{\text{g},\text{max}} - P_{\text{g},t}^{\text{g}}\} \\ F_{\text{g},t}^{\text{down}} = \sum \min \{\Delta P_{\text{g},\text{max}}, P_{\text{g},t}^{\text{g}}\} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} F_{\text{cse},j,t}^{\text{up}} = \sum \min \{P_{\text{cse},j} - P_{\text{cse},j}^{\text{cse}}, E_{\text{cse},j}^{\text{cse}} - E_{\text{cse},j}^{\text{down}}\} \\ F_{\text{cse},j,t}^{\text{down}} = \sum \min \{P_{\text{cse},j}^{\text{cse}} + P_{\text{cse},j}, E_{\text{cse},j}^{\text{cse}} - E_{\text{cse},j}^{\text{down}}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $F_{\text{ess},i,t}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{ess},i,t}^{\text{down}}$ 分别表示共享储能节点 i 在时段 t 向上和向下灵活调节的能力； $E_{\text{ess},i}^{\text{ess}}$ 、 $E_{\text{ess},i}^{\text{down}}$ 分别为储能装置的储能电量及其下限； $P_{\text{ess},i}$ 、 $E_{\text{ess},i}$ 分别为储能装置的额定功率和额定容量； $P_{\text{ess},i}^{\text{ess}}$ 为储能装置的充放电功率； η 为储能效率； $F_{\text{g},t}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{g},t}^{\text{down}}$ 分别为上级主网提供的向上和向下灵活调节能力； $\Delta P_{\text{g},\text{max}}$ 为上级主网爬升功率的上限； $P_{\text{g},\text{max}}$ 为上级主网输送到配电网的功率上限； $P_{\text{g},t}^{\text{g}}$ 为上级主网注入配电网的有功功率； $F_{\text{cse},j,t}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{cse},j,t}^{\text{down}}$ 分别为共享热储能节点 j 提供向上和向下灵活调节的能力； $E_{\text{cse},j}^{\text{cse}}$ 、 $E_{\text{cse},j}^{\text{down}}$ 分别为储热装置的储能电量及其下限； $P_{\text{cse},j}$ 、 $E_{\text{cse},j}$ 分别为储热装置的额定功率和额定容量； $P_{\text{cse},j}^{\text{cse}}$ 为储热装置时段 t 的储热功率。

2) 网侧灵活性资源

网侧灵活性资源主要考虑 SOP，以背靠背电压源型变流器为例，SOP 的控制原理拓扑图参考文献[22-23]。SOP 替代传统的联络开关，通过电力电子技术实现馈线之间的功率交换，从而调节

配电网中的潮流分布和电压水平，提升网架结构的灵活性。SOP 功率控制模型如下：

$$P_{\text{SOP},i} + P_{\text{SOP},j} + P_{\text{SOP},i}^{\text{L}} + P_{\text{SOP},j}^{\text{L}} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{\text{SOP},i}^{\text{L}} = A_{\text{SOP},i} \sqrt{P_{\text{SOP},i}^2 + Q_{\text{SOP},i}^2} \\ P_{\text{SOP},j}^{\text{L}} = A_{\text{SOP},j} \sqrt{P_{\text{SOP},j}^2 + Q_{\text{SOP},j}^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \zeta S_{\text{SOP},ij} \leq Q_{\text{SOP},i} \leq \zeta S_{\text{SOP},ij} \\ \zeta S_{\text{SOP},ij} \leq Q_{\text{SOP},j} \leq \zeta S_{\text{SOP},ij} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sqrt{P_{\text{SOP},i}^2 + Q_{\text{SOP},i}^2} \leq S_{\text{SOP},ij} \\ \sqrt{P_{\text{SOP},j}^2 + Q_{\text{SOP},j}^2} \leq S_{\text{SOP},ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_{\text{SOP},i}$ 、 $P_{\text{SOP},j}$ 分别为 SOP 节点 i 和 j 处传输的有功功率； $P_{\text{SOP},i}^{\text{L}}$ 、 $P_{\text{SOP},j}^{\text{L}}$ 分别为 SOP 节点 i 和 j 的功率损耗； $Q_{\text{SOP},i}$ 、 $Q_{\text{SOP},j}$ 分别为 SOP 节点 i 和 j 传输的无功功率； $A_{\text{SOP},i}$ 、 $A_{\text{SOP},j}$ 为 SOP 节点 i 和 j 功率损耗系数； $S_{\text{SOP},ij}$ 为节点 i 和 j 之间接入 SOP 的额定容量； ζ 表示功率因数角正弦的绝对值。

1.2 基于 CVaR 配电网灵活性风险不足指标

配电网的灵活性需求能力源于净负荷的随机波动，即节点总负荷与新能源总输出功率之差。如果净负荷不确定功率大于系统向下灵活调节能力，系统就会受到向下灵活调节能力不足的限制，无法消纳过多新能源输出功率；当净负荷不确定功率小于系统向上灵活调节能力时，由于系统缺乏向上灵活调节能力，无法保证向负荷可靠供电。

风险价值(value at risk, VaR)是指置信水平 β 下不确定功率的单边分位点^[24-25]，CVaR 是在相同置信水平下风电、光伏等新能源出力越过该阈值的条件均值，弥补 VaR 尾部分布的非充分性。简化的数学模型如下：

$$G_{\beta}(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{m(1-\beta)} \sum_{k=1}^m \max \{[g(x, y^k) - \alpha], 0\} \quad (8)$$

式中： α 为置信水平 β 下的 VaR 值； $G_{\beta}(x, \alpha)$ 为 CVaR 的估计值； $g(x, y^k)$ 为损失函数； y^k 为场景 k 下 y 值； m 为场景数； x 为风光预测出力。

配电网灵活度不足指标可以计算如下：

$$\begin{cases} I_{\text{SD}} = c_{\text{up}} I_{\text{SD}}^{\text{up}} + c_{\text{down}} I_{\text{SD}}^{\text{down}} \\ I_{\text{SD}}^{\text{up}} = R_{\text{VaR},t}^{\text{up}} + \frac{1}{m(1-\beta)} \sum_{k=1}^m \max [(R_t^{\text{up}} - R_{\text{VaR},t}^{\text{up}}), 0] \\ I_{\text{SD}}^{\text{down}} = R_{\text{VaR},t}^{\text{down}} + \frac{1}{m(1-\beta)} \sum_{k=1}^m \max [(R_t^{\text{down}} - R_{\text{VaR},t}^{\text{down}}), 0] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} R_t^{\text{up}} = F_t^{\text{up}} - \Delta P_t^{\text{nl}} = \\ \sum_{i \in S_{\text{ess}}} F_{\text{ess},i,t}^{\text{up}} + \sum_{j \in S_{\text{cscs}}} F_{\text{cscs},j,t}^{\text{up}} + F_{g,t}^{\text{up}} - \Delta P_t^{\text{nl}} \\ R_t^{\text{down}} = \Delta P_t^{\text{nl}} - F_t^{\text{down}} = \\ \Delta P_t^{\text{nl}} - \sum_{i \in S_{\text{ess}}} F_{\text{ess},i,t}^{\text{down}} + \sum_{j \in S_{\text{cscs}}} F_{\text{cscs},j,t}^{\text{down}} + F_{g,t}^{\text{down}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： c_{up} 和 c_{down} 分别表示上调和下调灵活性不足成本系数； I_{SD} 表示各时段灵活性调节能力与灵活性需求之间的差值大小； $I_{\text{SD}}^{\text{up}}$ 和 $I_{\text{SD}}^{\text{down}}$ 分别表示上调和下调灵活性不足能力； ΔP_t^{nl} 表示净负荷功率变化量； F_t^{up} 和 F_t^{down} 分别表示上调和下调灵活性能力； S_{ess} 和 S_{cscs} 分别为共享储能系统、共享储热系统安装节点集合。

2 考虑灵活性不足风险的 SOP、SES 与 CSES 协调优化模型

优化模型目标函数兼顾经济性、灵活性和安全性，考虑系统潮流约束、分布式电源运行约束、系统运行约束、智能软开关运行约束、共享储能系统和储热型共享储能系统运行约束。具体模型如下：

1) 目标函数：

$$\begin{aligned} \min F_{\text{Total}} &= F_{\text{OM}} + F_{\text{CVaR}} \quad (11) \\ F_{\text{OM}} &= C_{\text{FRSC}} + C_{\text{NLC}} - I_{\text{SES}} - I_{\text{CSES}} \\ C_{\text{FRSC}} &= c_g \sum_{t=1}^{24} P_t^g + c_{\text{SOP}} \sum_{ij \in n_{\text{SOP}}} S_{\text{SOP},ij} + \\ & c_{\text{ess}} \sum_{i \in n_{\text{ess}}} \sum_{t=1}^{24} P_{i,t}^{\text{ess}} + c_{\text{cscs}} \sum_{i \in n_{\text{cscs}}} \sum_{t=1}^{24} P_{i,t}^{\text{cscs}} \\ C_{\text{NLC}} &= c_{\text{loss}} \left(\sum_{ij \in n_b} \sum_{t=1}^{24} P_{ij,t}^{\text{loss}} + \sum_{ij \in n_{\text{SOP}}} \sum_{t=1}^{24} P_{\text{SOP},ij,t}^{\text{L}} \right) \quad (12) \\ I_{\text{SES}} &= \sum_{t=1}^{24} (\zeta_t^b P_{i,t}^{\text{ess,d}} - \zeta_t^s P_{i,t}^{\text{ess,c}}) \\ I_{\text{CSES}} &= \sum_{t=1}^{24} (\zeta_t^b P_{i,t}^{\text{cscs,d}} - \zeta_t^s P_{i,t}^{\text{cscs,c}}) + \sum_{t=1}^{24} \kappa_t Q_t^{\text{HD}} \\ F_{\text{CVaR}} &= \sum_{t=1}^{24} I_{\text{SD}}(t) \end{aligned}$$

式中： F_{OM} 表示系统总运行成本，包括灵活性资源调度成本 C_{FRSC} 、网损成本 C_{NLC} 、共享储能收益 I_{SES} 、共享热储能收益 I_{CSES} ； P_t^g 表示向上级主网购电成本； $P_{ij,t}^{\text{loss}}$ 表示运行损耗； c_g 表示向上级购电电价； c_{SOP} 表示SOP单位容量运行成本系数； c_{ess} 表示SES单位功率运行成本系数； c_{cscs} 表示CSES单位功率运行成本系数； c_{loss} 表示单位功率损耗成本

系数； n_{SOP} 、 n_{ess} 、 n_{cscs} 分别表示SOP、ESS、CSES安装节点； n_b 表示系统支路； $\text{SOP}_{n_{\text{SOP}}} P_{i,t}^{\text{ess,d}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ess,c}}$ 分别表示SES与配电网交互的放电和充电功率； ζ_t^b 和 ζ_t^s 分别表示配电网买电和售电电价； $P_{i,t}^{\text{cscs,d}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{cscs,c}}$ 分别表示CSES与配电网交互功率的放电和充电功率； Q_t^{HD} 表示供热功率； κ_t 表示供热电价系数； F_{CVaR} 表示灵活性风险值。

2) 潮流约束：

$$\begin{cases} \sum_{ji \in \Omega_b} (P_{ji,t} - r_{ji} I_{ji,t}^2) + P_{i,t} = \sum_{ik \in \Omega_b} P_{ik,t} \\ \sum_{ji \in \Omega_b} (Q_{ji,t} - x_{ji} I_{ji,t}^2) + Q_{i,t} = \sum_{ik \in \Omega_b} Q_{ik,t} \end{cases} \quad (13)$$

$$U_{j,t}^2 - U_{i,t}^2 - 2(r_{ji} P_{ji,t} + x_{ji} Q_{ji,t}) + (r_{ji}^2 + x_{ji}^2) I_{ji,t}^2 = 0 \quad (14)$$

$$I_{ji,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ji,t}^2 + Q_{ji,t}^2 \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{i,t} = P_{\text{DG},i,t} + P_{\text{SOP},i,t} - P_{\text{L},i,t} + P_{i,t}^{\text{ess}} + P_{i,t}^{\text{cscs}} \\ Q_{i,t} = Q_{\text{SOP},i,t} - Q_{\text{L},i,t} \end{cases} \quad (16)$$

式中： Ω_b 表示支路集合； $P_{ji,t}$ 、 $P_{ik,t}$ 和 $Q_{ji,t}$ 、 $Q_{ik,t}$ 分别表示支路有功功率和无功功率； $P_{i,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 分别表示节点 i 注入的有功功率和无功功率； r_{ji} 、 x_{ji} 和 $I_{ji,t}$ 分别表示支路电阻、支路电抗和支路电流； $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别表示节点 i 、 j 电压； $P_{\text{L},i,t}$ 和 $Q_{\text{L},i,t}$ 分别表示节点 i 负荷的有功功率和无功功率； $P_{\text{DG},i,t}$ 表示可再生能源注入节点 i 的有功功率。

3) 系统运行约束：

$$U_{\text{max}}^2 \geq U_{i,t}^2 \geq U_{\text{min}}^2 \quad (17)$$

$$(I_{ji,t}^{\text{max}})^2 \geq I_{ji,t}^2 \quad (18)$$

式中： U_{max} 和 U_{min} 分别表示系统电压允许的最大值和最小值； $I_{ji,t}^{\text{max}}$ 表示支路允许的最大电流。

4) 电热功率平衡约束：

$$\begin{cases} P_{\text{DG},t} + P_{i,t}^{\text{cscs,d}} - P_{i,t}^{\text{cscs,c}} = Q_t^{\text{HC}} \\ v Q_t^{\text{HC}} = Q_t^{\text{HD}} \\ P_{i,t}^{\text{ess,d}} \perp P_{i,t}^{\text{ess,c}} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中： Q_t^{HC} 、 v 分别表示CSESSO电阻丝加热功率、供热效率0.3； $\perp$ 为运算符，表示参数中至少一个为0。

5) CSES的运行约束：

$$\begin{cases} \mu_{\text{min}} H_t^{\text{L}} \leq Q_t^{\text{HC}} - Q_t^{\text{HD}} - H_t^{\text{Loss}} \leq \mu_{\text{max}} H_t^{\text{L}} \\ 0 \leq Q_t^{\text{HC}} \leq Q_t^{\text{HC,max}} \\ 0 \leq Q_t^{\text{HD}} \leq Q_t^{\text{HD,max}} \end{cases} \quad (20)$$

式中： μ_{min} 、 μ_{max} 分别表示热负荷惯性调整比例的下限、上限，其取值分别设置为0.9和1.1^[26]；

H_t^{Loss} 表示负荷热损失; H_t^{L} 表示 CSES 调度的热负荷; $Q_t^{\text{HC,max}}$ 、 $Q_t^{\text{HD,max}}$ 分别表示 CSES 充电、供热最大值。

6) SES 运行约束:

$$\begin{cases} \delta_{\text{ch},t} P_{\text{chmax}} \geq P_{i,t}^{\text{ess,c}} \geq \delta_{\text{ch},t} P_{\text{chmin}} \\ \delta_{\text{dch},t} P_{\text{dchmax}} \geq P_{i,t}^{\text{ess,d}} \geq \delta_{\text{dch},t} P_{\text{dchmin}} \\ 1 \geq \delta_{\text{ch},t} + \delta_{\text{dch},t} \\ P_{i,t}^{\text{ess}} = P_{i,t}^{\text{ess,c}} \eta_{\text{ch}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ess,d}}}{\eta_{\text{dch}}} \\ E_{i,t}^{\text{ess}} = E_i + (P_{i,t}^{\text{ess,c}} \eta_{\text{ch}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ess,d}}}{\eta_{\text{dch}}}) \Delta t \\ E_{\text{ess},i} \geq E_{i,t}^{\text{ess}} \geq E_{\text{ess},i}^{\text{down}}, E_t = E_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_{chmax} 、 P_{dchmax} 分别为 SES 的最大充电和放电功率; P_{chmin} 、 P_{dchmin} 分别为 SES 的最小充电和放电功率; $\delta_{\text{ch},t}$ 和 $\delta_{\text{dch},t}$ 为状态变量, $\delta_{\text{ch},t}/\delta_{\text{dch},t}=1$ 为充电状态, $\delta_{\text{ch},t}/\delta_{\text{dch},t}=0$ 为放电状态; η_{ch} 、 η_{dch} 为 SES 的充放电效率; Δt 为优化时段; E_i 和 E_0 为 ESS 优化前后的储存容量。

7) 上级主网注入有功功率约束:

$$\Delta P_{\text{g,max}} \geq P_t^{\text{g}} \geq -\Delta P_{\text{g,max}} \quad (22)$$

8) 新能源出力约束:

$$0 \leq P_{\text{DG},i}^{\text{re}} \leq P_{\text{DG},i}^{\text{re}} \quad (23)$$

式中 $P_{\text{DG},i}^{\text{re}}$ 表示节点 i 接入新能源的额定功率。

3 问题求解

考虑到优化模型含有大规模非线性表达式, 利用 MATLAB 嵌入的 CPLEX 商业软件通过二阶锥优化方法求解新型配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化模型。

3.1 潮流模型线性化

对于潮流约束模型式(13)~(15), 通过引入中间变量 $l_{ji,t}$ 、 $v_{i,t}$ 替换 $I_{ji,t}^2$ 、 $U_{i,t}^2$, 被替换模型如下:

$$\begin{cases} \sum_{ji \in \Omega_B} (P_{ji,t} - r_{ji} l_{ji,t}) + P_{i,t} = \sum_{ik \in \Omega_B} P_{ik,t} \\ \sum_{ji \in \Omega_B} (Q_{ji,t} - x_{ji} l_{ji,t}) + Q_{i,t} = \sum_{ik \in \Omega_B} Q_{ik,t} \\ v_{i,t} - v_{i,t} - 2(r_{ji} P_{ji,t} + x_{ji} Q_{ji,t}) + (r_{ji}^2 + x_{ji}^2) l_{ji,t} = 0 \\ l_{ji,t} v_{i,t} \geq P_{ji,t}^2 + Q_{ji,t}^2 \end{cases} \quad (24)$$

3.2 SOP 模型线性化

对于 SOP 非线性约束式(5)和式(7)分别转化为二阶锥约束和旋转锥约束:

$$\begin{cases} P_{\text{SOP},i}^{\text{L}} \geq A_{\text{SOP},i} \sqrt{P_{\text{SOP},i}^2 + Q_{\text{SOP},i}^2} \\ P_{\text{SOP},j}^{\text{L}} \geq A_{\text{SOP},j} \sqrt{P_{\text{SOP},j}^2 + Q_{\text{SOP},j}^2} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_{\text{SOP},i}^2 + Q_{\text{SOP},i}^2 \leq 2 \frac{S_{\text{SOP},ij}}{\sqrt{2}} \frac{S_{\text{SOP},ij}}{\sqrt{2}} \\ P_{\text{SOP},j}^2 + Q_{\text{SOP},j}^2 \leq 2 \frac{S_{\text{SOP},ij}}{\sqrt{2}} \frac{S_{\text{SOP},ij}}{\sqrt{2}} \end{cases} \quad (26)$$

上述线性化处理将原模型转换为一个混合整数二阶锥规划模型^[27-28], 采用 YALMIP 和 CPLEX 对该模型进行求解。

4 算例分析

4.1 算例介绍

为了验证计及灵活性不足风险的配电网智能软开关与多类型共享储能协调优化模型的有效性, 在改进的 IEEE 33 节点配电系统上进行了仿真测试。系统成本系数如表 1 所示。

图 1 给出了修改的 IEEE 33 节点配电系统^[22], 显示了 DG、SOP、SES 和 CSES 的安装位置, SOP 最大容量均为 500 kV·A, SES 的额定功率为 1.2 MW, 额定容量为 9 MW·h。电负荷曲线、风电与光伏曲线参考文献^[22], 图 2 给出了热负荷曲线和电网的现货出清价格, 设置电网购电价格为售电价格的 80%, c_{up} 和 c_{down} 参考文献^[29]。

表 1 成本系数

Tab. 1 Cost coefficient 元/(kW·h)

成本系数	c_{g}	c_{SOP}	c_{ess}	c_{cses}	c_{loss}	κ_t
数值	0.65	0.02	0.154 2	0.01	0.57	0.22

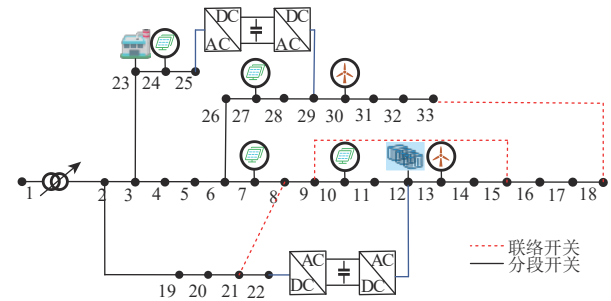


图 1 修改的 IEEE 33 节点系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of modified IEEE 33 bus system

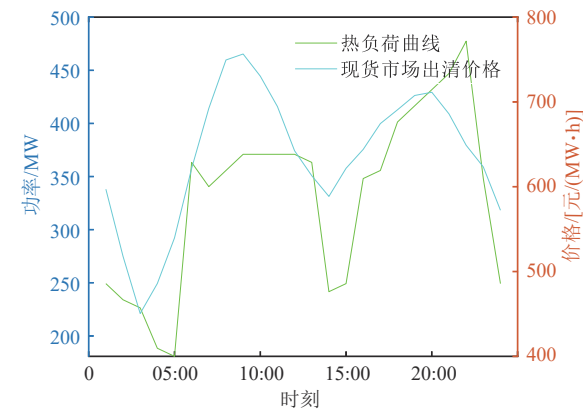


图2 热负荷与市场出清价格
Fig. 2 Heat load and market clearing price

4.2 SOP与多类型共享储能优化结果

设定5种案例对智能软开关与多类型共享储能协调优化模型进行对比分析。

案例1：含多类型共享储能的新型配电系统的模型中未接入SOP，通过网络重构进行优化。

案例2：含SOP和非储热共享储能的新型配电系统的协调优化。

案例3：含SOP和储热共享储能的新型配电系统的协调优化。

案例4：含SOP和多类型共享储能的新型配电系统的协调优化。

案例5：含SOP和多类型共享储能的新型配电系统的协调优化。

案例1—4均考虑了灵活性不足风险，案例5未考虑灵活性不足风险。

4.2.1 多种灵活性资源协调优化仿真结果分析

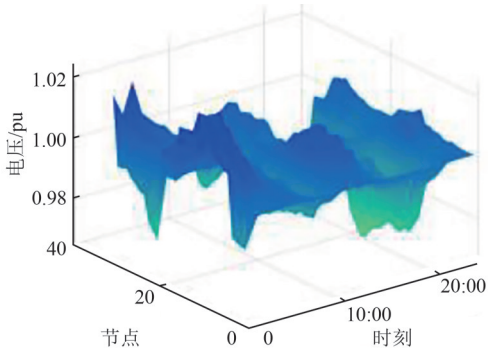
表2给出了优化结果对比，可以得出，相对于案例1，案例4的灵活性调度成本略微增加，但网损减少了0.019 5万元，SES和CSES收益分别提高了0.063 8万元和0.800 1万元，因此SOP比传统调节方式更具有优势。相对于案例2和案例3，案例4的灵活性调度成本分别增加了0.233 8万元和0.167 4万元，但是损耗分别降低了20.76%和21.39%，同时SES和CSES的收益均有显著提高，总收益分别提高了4.930 9万元和1.193 2万元，表明多类型共享储能较单类型共享储能更能提高系统运行经济性。相对案例1—3，案例4的灵活性不足风险成本分别降低了0.045 5、0.081 3、0.055 5

表2 优化结果对比

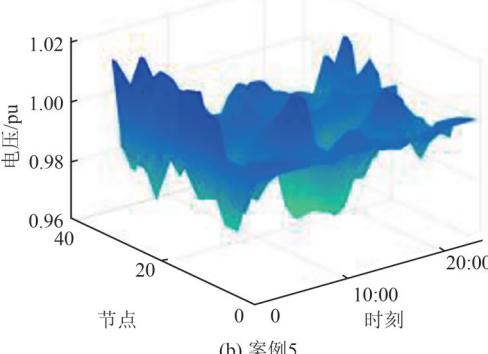
Tab. 2 Comparison of optimization results 万元

案例	C_{FRSC}	C_{NLC}	I_{SES}	I_{CSES}	F_{CVaR}
1	1.642 0	0.098 5	0.532 1	4.129 9	0.094 5
2	1.429 3	0.095 9	0.595 0	—	0.120 3
3	1.495 7	0.095 4	—	4.332 7	0.084 5
4	1.663 1	0.079 0	0.595 9	4.930 0	0.039 0
5	1.637 7	0.077 4	0.560 2	4.044 8	—

万元，表明SOP与多元灵活性资源协调运行不仅改善了系统运行的综合经济效益，而且显著提升了系统运行灵活性、安全性，能够使得灵活性资源有效互补利用。案例4比案例5的灵活性调度成本和网损成本略微升高，同时，SES和CSES的收益也有所改善。图3为案例4和案例5系统节点电压曲线，可以看出案例4改善了配电网的电压水平，因此案例4牺牲较少经济性以保证系统灵活性和安全性。



(a) 案例4



(b) 案例5

图3 案例4和案例5系统节点电压曲线

Fig. 3 System nodal voltage curves for case 4 and case 5

4.2.2 SOP、CSES与SES对配电网灵活性的影响

图4、5分别展示了SOP、CSES和SES的运行阶段优化曲线。

图4(a)—(c)分别给出了案例2—4 SOP的优化结果。由此可以看出，在09:00—10:00和19:00—

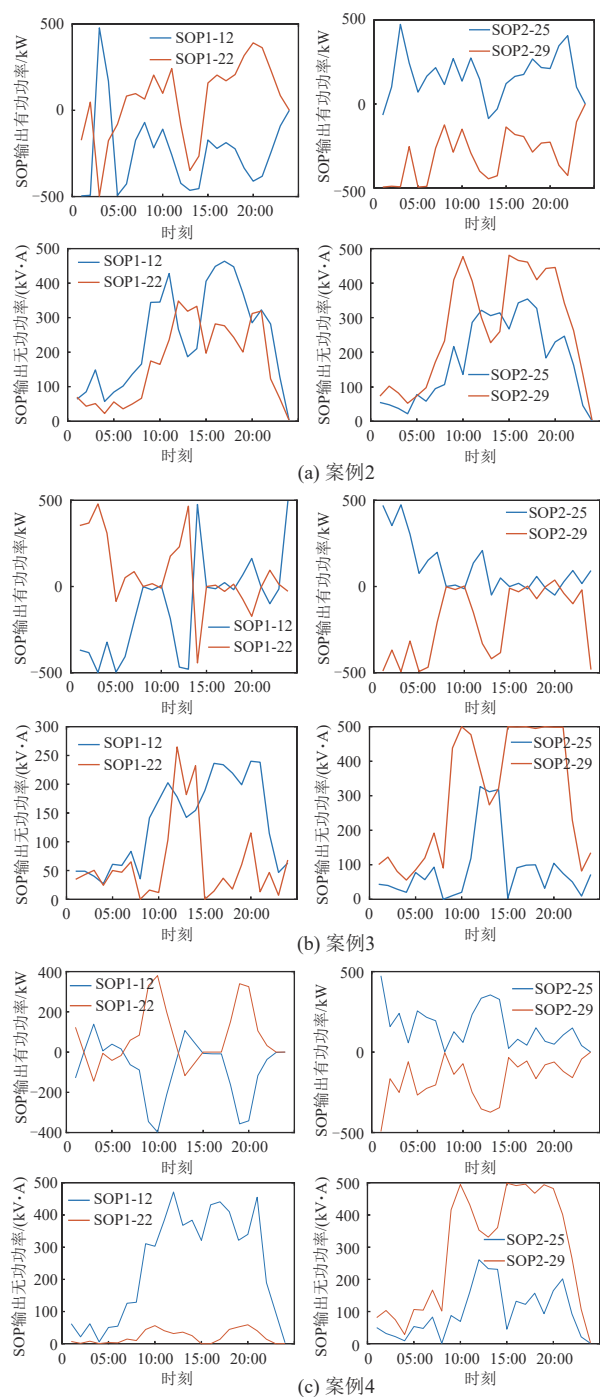
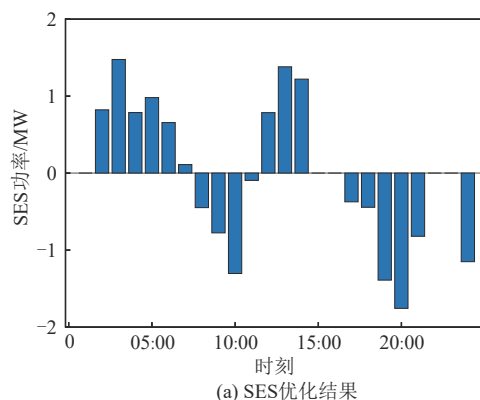


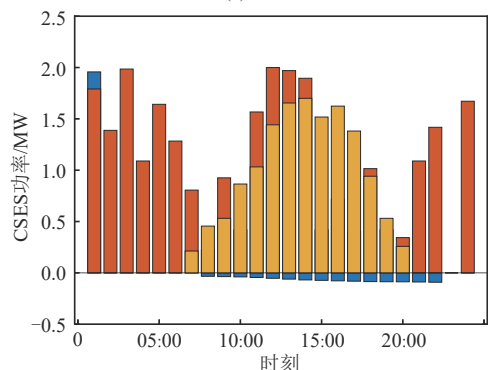
图4 案例2—4系统SOP优化曲线

Fig. 4 System SOP optimization curves of case 2-4

20:00, 案例2和案例3中SOP在节点12和节点22两端的容量独立使用, 而案例4 SOP将容量从节点12输送到节点22, 优化了潮流分布, 降低了网损。另外, 案例4引入了SOP与SES、CSES协调运行, 相比案例2和案例3降低了转供容量, 提高了SOP的运行经济性, 提高了多种灵活性资源的利用效率。



(a) SES优化结果



(b) CSES优化结果

■ 与配网交互功率 ■ 风电功率 ■ 光伏功率

图5 案例4的SES和CSES优化曲线

Fig. 5 SES and CSES optimization curves of case 4

图5给出了SES和CSES的优化结果。从图5(a)可以看出, SES在10:00和20:00向电网供电, 由于SES接在系统节点12处, 在SES放电的同时, SOP将容量从节点12传输到节点22。从图5(b)可以看出, 低谷时段24:00和01:00—06:00弃风比较严重, 时段12:00—16:00弃光比较严重, CSES能够吸收弃风和弃光电量, 将其转换成热能, 为热负荷和电网高峰负荷时段提供能量。CSES在低谷时段01:00从电网购电转换成热能, 在高峰时段将热能转换成电能向电网供电, 提高了CSES的综合效益。由此可见, CSES、SES、SOP协调优化, 明显提升了新能源的消纳和负荷支撑能力, 改善了系统运行的灵活性和经济性。

4.2.3 灵活性不足风险对配电网安全性的影响

由表2可以看出, 本文提出的多类型灵活性资源的协调优化模型更优, 考虑灵活性不足风险指标的优化方法对配电网运行产生显著影响。为进一步分析考虑灵活性不足风险的影响, 本节比较了案例2、3的灵活性不足风险分布, 具体如

表 3 所示。

表 3 灵活性不足风险分布比较
Tab. 3 Comparison of flexibility deficiency risk distribution

时刻	案例 2		案例 3	
	上调成本	下调成本	上调成本	下调成本
01:00	0	91.44	0	0.55
02:00	0	97.11	0	20.01
03:00	0	11.41	1.42	10.10
04:00—10:00	0	0	52.35	0
11:00	108.45	51.25	43.44	—
12:00	45.39	8.77	19.71	25.53
13:00	14.54	6.74	29.91	30.06
14:00	67.14	208.39	67.22	11.67
15:00	4.22	27.71	46.26	—
16:00	91.77	107.44	0	0
17:00—18:00	0	0	0	0
19:00	3.11	67.21	0	—
22:00	0	71.20	0	16.45
23:00	0	51.40	0	11.22
24:00	0	68.31	0	4.1

可以看出,相对案例 2,案例 3 在电网用电低谷时段 22:00—24:00 和时段 01:00—03:00 下调成本降低,上调成本整体有所下降,这是因为考虑基于多类型灵活性资源的灵活性不足指标后,在一定程度上提高了向上或向下的灵活性裕度,低谷时段有足够的下调灵活性裕度以降低新能源弃电量,高峰负荷时段有足够的上调灵活性裕度以保证供电可靠性。综上可知,所提出的模型改善了新型配电网灵活性不足风险整体水平,各时段灵活性不足风险分布更加均匀,有助于提高系统运行的经济性和安全性,实现新型配电网供需平衡。

5 结论

为了应对新能源不确定对新型配电网造成的运行安全问题,在计及 CVaR 灵活性不足风险指标的基础上,构建了考虑 SOP、SES 和 CSES 多种灵活性资源的新型配电网协调优化模型。结论如下:

1) 考虑 SOP、SES 和 CSES 多种灵活性资源能够优化新型配电网潮流分布,改善了系统电压水平,降低了系统综合运行成本,实现了新型配电网经济性、安全性和灵活性。

2) 由于引入了 SOP、SES 和 CSES,所提出的协调优化模型提高了 SOP 运行经济性、SES 和 CSES 运行的综合效益,提高了多类型灵活性资源的利用效率。

3) 综合考虑配电网灵活性,建立基于 CVaR 的灵活性不足指标,能够准确反映新型配电网的灵活性裕度状态,降低了向上和向下灵活性不足风险,促进了新能源的消纳,实现了配电网供需平衡,提高了运行安全性。

参考文献

[1] 赵冬梅,徐辰宇,陶然,等.多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1776-1798.
ZHAO D M, XU C Y, TAO R, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1798.

[2] 国家能源局.关于印发《配电网高质量发展行动实施方案(2024—2027 年)》的通知[EB/OL]. (2024-08-02) [2024-11-06]. <https://www.nea.gov.cn/policy/tz.htm>.
National Energy Administration. Notice on printing and issuing the “implementation plan for action for high-quality development of distribution networks (2024-2027)” [EB/OL]. (2024-08-02) [2024-11-06]. <https://www.nea.gov.cn/policy/tz.htm>.

[3] 刘建伟,李学斌,刘晓鸥.有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J].发电技术,2022,43(3):476-484.
LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Trchnology, 2022, 43(3): 476-484.

[4] 夏周武,马文祚,杨德昌.考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):124-133.
XIA Z W, MA W Z, YANG D C. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 124-133.

[5] 王金丽,李丰胜,解芳,等.“双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系[J].中国电力,2023,56(5):22-31.

- WANG J L, LI F S, XIE F, et al. Research on technical standard system of new distribution system under "double-carbon" strategy[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 22-31.
- [6] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 77-86.
- ZHAO J J, LI Z B, LIU S, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage support[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 77-86.
- [7] 吉兴全, 连承宇, 张玉敏, 等. 基于智能软开关的三相不平衡配电网动态重构策略[J]. *智慧电力*, 2023(5): 111-118.
- JI X Q, LIAN C Y, ZHANG Y M, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks based on SOP[J]. *Smart Power*, 2023(5): 111-118.
- [8] 徐波, 熊国江, 叶方慧. 基于智能软开关优化配置的配电网柔性互联策略[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(11): 86-96.
- XU B, XIONG G J, YE F H. A flexible interconnection strategy for distribution networks based on intelligent soft-open point configuration[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(11): 86-96.
- [9] 米阳, 申杰, 卢长坤, 等. 考虑含储能的三端智能软开关与需求侧响应的主动配电网有功无功协调优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(3): 104-118.
- MI Y, SHEN J, LU C K, et al. Active and reactive power coordination optimization of an active distribution network considering a three-terminal soft open point with energy storage and demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(3): 104-118.
- [10] LI J, GE S, ZHANG S, et al. A multi-objective stochastic-information gap decision model for soft open points planning considering power fluctuation and growth uncertainty[J]. *Applied Energy*, 2022, 317: 119141.
- [11] HASAN E, SADJAD G, VAHID T. Optimal parameters setting for soft open point to improve power quality indices in unbalanced distribution systems considering loads and renewable energy sources uncertainty[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 229: 110155.
- [12] JI H, WANG C, LI P, et al. Robust operation of soft open points in active distribution networks with high penetration of photovoltaic integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(99): 280-289.
- [13] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 219-228.
- CHEN X, FU W L, ZHANG H R, et al. Optimal dispatching strategy of shared energy storage with multi-microgrid considering uncertainty of new energy generation[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 219-228.
- [14] 徐艳春, 刘海权, 孙思涵, 等. 计及需求响应和共享储能的多微网系统双层优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(6): 18-26.
- XU Y C, LIU H Q, SUN S H, et al. Bi-level optimal scheduling of multi-microgrid system considering demand response and shared energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 18-26.
- [15] GUO Y, WU Q, GAO H, et al. MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018: 1731-1739.
- [16] 宋关羽, 于川航, 冀浩然, 等. 考虑量测数据质量的集成储能智能软开关数据驱动电压控制[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(6): 90-100.
- SONG G Y, YU C H, JI H R, et al. Data-driven voltage control of energy storage integrated soft open point considering quality of measurement data[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(6): 90-100.
- [17] 高崇, 段瑶, 程蓐, 等. 考虑5G基站可调度备用储能和智能软开关的主动配电网协同优化调度方法[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-27[2024-08-20]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.020>.
- GAO C, DUAN Y, CHENG R, et al. Collaborative optimization scheduling method for active distribution networks considering dispatchable backup batteries of 5gG base station and soft open point[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*: 1-27[2024-08-20]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.020>.
- [18] 孙充勃, 李敬如, 原凯, 等. 基于区间优化的配电网智能软开关与储能系统联合优化方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(1): 45-54.
- SUN C B, LI J R, YUAN K, et al. Two-stage optimization method of soft open point and energy storage system in distribution network based on interval optimization[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 45-54.
- [19] ILIAS S. A robust mixed-integer convex model for optimal scheduling of integrated energy storage: soft

- open point devices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 4072-4087.
- [20] 李军徽, 张靖祥, 穆钢, 等. 辅助服务市场下独立储能调峰调频协同优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 650-665.
- LI J H, ZHANG J X, MU G, et al. Collaborative optimal dispatch of peak shaving and frequency modulation with independent energy storage based on auxiliary service market[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 650-665.
- [21] 刘方, 陆荣欣, 徐韵, 等. 面向混合储能软开关选址定容支撑“节点-网络”双重灵活性的新型配电系统规划-运行协同方法[J/OL]. 电网技术, 1-18[2024-08-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1275>.
- LIU F, LU R X, XU Y, et al. A collaborative planning-operation method for dual flexibility of new distribution system supported by soft open point integrated with hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 1-18[2024-08-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1275>.
- [22] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中DG、SOP与ESS的两阶段协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 71-82.
- WANG J, WANG W Q, WANG H Y, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.
- [23] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 380-391.
- [24] 黄悦华, 刘兴韬, 张磊, 等. 基于C藤Copula及条件风险价值的综合能源系统灵活爬坡优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9411-9423.
- HUANG Y H, LIU X T, ZHANG L, et al. Flexible ramping optimal scheduling of integrated energy system based on C-vine Copula and conditional value at risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9411-9423.
- [25] 王俊, 徐箭, 王晶晶, 等. 基于条件风险价值的虚拟电厂参与能量及备用市场的双层随机优化[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2502-2510.
- WANG J, XU J, WANG J J, et al. Bi-level stochastic optimization for a virtual power plant participating in energy and reserve market based on conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2502-2510.
- [26] WANG H, YANG J, CHEN Z, et al. Optimal dispatch based on prediction of distributed electric heating storages in combined electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2020, 267: 114879.
- [27] 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 J Y, LÜ L, GAO H J, 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.
- [28] 孙充勃, 原凯, 李鹏, 等. 基于SOP的多电压等级混联配电网运行二阶锥规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1599-1605.
- SUN C B, YUAN K, LI P, et al. A second-order cone programming method for hybrid multiple voltage level distribution networks based on soft open points[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1599-1605.
- [29] 温丰瑞, 李华强, 温翔宇, 等. 主动配电网中计及灵活性不足风险的储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3952-3962.
- WEN F R, LI H Q, WEN X Y, et al. Optimal allocation of energy storage systems considering flexibility deficiency risk in active distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3952-3962.

收稿日期: 2024-11-07。

修回日期: 2025-02-25。

作者简介:



王杰

王杰(1990), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电-氢耦合系统的建模与优化运行、新型配电网规划与运行优化、可再生能源并网, bjewang@163.com;



徐立军

徐立军(1978), 男, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源制氢技术、新型电力系统运行优化, 本文通信作者, 1311817899@qq.com;



李笑竹

李笑竹(1990), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统的鲁棒控制和经济调度, 272268272@qq.com。

(责任编辑 辛培裕)