

考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度

高万胜, 蔺红

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 双碳目标下高占比可再生能源接入配电网, 其不确定性导致配电网灵活性需求剧增。为提高配电网灵活运行能力, 减少碳排放, 提出考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度方法。首先, 考虑智能储能软开关作为网络灵活性资源, 以减少线路阻塞并提高节点灵活性资源网络互济水平。引入功率传输分布因子表征灵活性供需在线路上的传输情况, 提出资源灵活性裕度指标和线路容量裕度指标, 评估配电网灵活性。其次, 基于条件风险价值理论, 推导出当资源-线路裕度不足时给配电网造成的灵活性不足风险。然后, 考虑风光出力的不确定性与相关性, 运用 Frank-Copula 函数生成风光出力场景, 采用改进的 KL 散度构造概率分布模糊集。以综合运行成本最低为目标, 建立分布鲁棒优化调度模型, 采用列与约束生成算法求解。最后, 通过算例验证表明, 智能储能软开关的加入减少了线路阻塞的情况, 所提方法能够减少配电网碳排放和灵活性不足风险。

关键词: 智能储能软开关; 灵活性资源; 条件风险价值; Frank-Copula 函数; 分布鲁棒优化

Distributionally robust low-carbon optimal scheduling considering flexibility deficiency risk in a distribution network

GAO Wansheng, LIN Hong

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: When there is a high proportion of renewable energy accessing the distribution network under a double carbon target, its uncertainty leads to a great increase of the distribution network flexibility demand. To improve the distribution network flexible operation capability and reduce carbon emissions, a distributionally robust low-carbon optimal scheduling method considering flexibility deficiency risk in a distribution network is proposed. First, this paper considers the soft open point integrated with an energy storage system as network flexibility resources to reduce line blocking and improve the node flexibility resource network mutual benefit level. A power transfer distribution factor is introduced to characterize the flexible supply and demand transmission on the line, and resource flexibility margin and line capacity margin indices are put forward to evaluate distribution network flexibility. Secondly, based on the theory of conditional value-at-risk, the flexibility deficiency risk in the network is derived when the resource-line margin is insufficient. Then, considering the uncertainty and correlation of wind-solar power, the Frank-Copula function is used to generate wind-solar output scenarios, and the improved KL divergence is used to construct the fuzzy set of a probability distribution. To gain the lowest comprehensive operational cost, the distributionally robust optimal scheduling model is established, and a column constraint generation algorithm is used for analysis. Finally, the example shows that soft open point integrated with an energy storage system can reduce line blocking, and the proposed method can reduce system carbon emissions and the risk of flexibility deficiency.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367012).

Key words: soft open point integrated with energy storage system; flexible resource; conditional value at risk; Frank-Copula function; distributionally robust optimization

0 引言

“双碳”目标下, 风光等新能源因其资源丰富、

清洁安全等优点得到广泛应用^[1-3]。配电网中以风光为主的新能源占比不断增加, 源荷波动的叠加造成配电网净负荷功率剧烈波动, 致使配电网灵活性需求剧增、电压越限、限电现象发生^[4-6]。系统中传统常规电源减少, 依靠备用容量难以响应净负荷的剧烈波动^[7], 因此有必要发挥多类型灵活性资源调节

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52367012); 新疆维吾尔自治区重点研发专项资助(2022B01020-3)

潜力, 统筹考虑灵活性与经济性的优化调度。

国内外学者在配电网灵活性评估与灵活性资源方面做了相关研究。文献[8]考虑节点灵活性资源储能、可中断负荷等的快速调节能力, 提升配电网的灵活性; 文献[9]通过建立热网和气网灵活性供给模型应对灵活性需求。但都没有考虑到网络灵活性资源的作用, 文献[10]对配电网网络灵活性的定义及评估方法进行了详细描述, 对于提升网络传输能力, 智能软开关(soft open point, SOP)通过代替配电网联络开关(tie switch, TS), 实现馈线间有功功率传输与提供无功功率支撑^[11]; 文献[12]表明 SOP 作为网络灵活性资源, 可以提升网架结构的灵活性。智能储能软开关(soft open point integrated with energy storage system, ESOP)改善了 SOP 不能存储电能的缺点; 文献[13-14]表明 ESOP 的加入对提升配电网的经济性与减少网络损耗起到了积极作用, 但少有文献研究 ESOP 作为灵活性资源对减少线路阻塞的作用。对于网络灵活性评估, 部分文献通过建立净负荷调节量指标^[15]、支路灵活性应对能力指标^[16]和线路阻塞程度指标^[17]等描述线路传输能力, 虽然反映了线路负载情况, 但无法量化因线路容量裕度不足而造成的切负荷和弃风弃光风险。

针对不确定性因素给电力系统带来的挑战, 条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)^[18]可以度量不确定性因素给系统带来的尾部风险, 文献[19-20]通过 CVaR 量化了源荷波动造成的切负荷和弃风弃光损失。对于建模方法常采用随机优化^[21]和鲁棒优化^[22]描述源荷的不确定性, 前者依赖于确定的概率分布, 难以获取; 后者针对最差的场景, 结果往往偏于保守。分布鲁棒优化方法克服了上述方法的不足, 通过寻找模糊集中最恶劣的概率分布对问题进行求解, 既不依赖特定的概率分布又具有鲁棒性, 在电力系统得到广泛应用; 文献[23-25]分别采用基于 KL 散度(KL divergence)、Wasserstein 距离、矩信息的模糊集处理随机变量的不确定性。然而, 上述文献对于确定随机变量的初始概率分布, 未考虑到一定地理范围内风光出力具有相关性。

综上所述, 本文提出考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度方法。考虑网络灵活性资源 ESOP, 以减少线路阻塞并提高节点灵活性资源的网络互济水平; 建立了线路-资源双裕度灵活性评价指标, 基于 CVaR 量化了因线路-资源裕度不足造成的弃风弃光和切负荷风险; 利用非参数估计法和 Copula 函数, 得到考虑风光出力相关性的模糊集, 建立分布鲁棒优化调度模型; 最后通过算例验证表明, 所提模型对提升配电网灵活经济运行能力

的有效性。

1 配电网灵活性分析

1.1 灵活性需求

本文通过净负荷(负荷与风光出力之差)的波动来表示含新能源的配电网灵活性需求, 分为向上灵活性需求 R_t^{up} 和向下灵活性需求 R_t^{dn} 。

$$\begin{cases} R_t^{\text{up}} = \max(P_{\text{dc}}^{t+1} - P_{\text{dc}}^t, 0) \\ R_t^{\text{dn}} = \max(P_{\text{dc}}^t - P_{\text{dc}}^{t+1}, 0) \\ P_{\text{dc}}^t = P_{\text{ld}}^t - P_{\text{wt}}^t - P_{\text{pv}}^t \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{dc}^t 、 P_{dc}^{t+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时刻净负荷有功功率; P_{ld}^t 、 P_{wt}^t 、 P_{pv}^t 分别为 t 时刻负荷、风电和光伏有功功率。

1.2 灵活性资源及灵活性供给特性

灵活性资源包括节点灵活性资源和网络灵活性资源。配电网中节点灵活性资源的功率调节能力受到自身状态的影响且具有方向性, 本文考虑燃气轮机、储能、柔性负荷作为节点灵活性资源, 其受自身状态影响的灵活性供给模型见附录 A 式(A1)一式(A3), 配电网向上灵活性供给 F_t^{up} 和向下灵活性供给 F_t^{dn} 表示为

$$\begin{cases} F_t^{\text{up}} = \sum_{n=1}^{N_n} F_{\text{mt},n,t}^{\text{up}} + \sum_{f=1}^{N_f} F_{\text{ess},f,t}^{\text{up}} + \sum_{h=1}^{N_h} F_{\text{fl},h,t}^{\text{up}} \\ F_t^{\text{dn}} = \sum_{n=1}^{N_n} F_{\text{mt},n,t}^{\text{dn}} + \sum_{f=1}^{N_f} F_{\text{ess},f,t}^{\text{dn}} + \sum_{h=1}^{N_h} F_{\text{fl},h,t}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{mt},n,t}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{ess},f,t}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{fl},h,t}^{\text{up}}$ 分别为 t 时刻燃气轮机、储能和柔性负荷为配电网提供的向上灵活性; N_n 、 N_f 、 N_h 分别为配电网中燃气轮机、储能和柔性负荷数量; $F_{\text{mt},n,t}^{\text{dn}}$ 、 $F_{\text{ess},f,t}^{\text{dn}}$ 、 $F_{\text{fl},h,t}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻燃气轮机、储能和柔性负荷为配电网提供的向下灵活性。

为提高节点灵活性资源的功率传输支撑作用, 在 SOP 直流端接入储能构成网络灵活性资源 ESOP, 基于背靠背电压源变流器的 ESOP, 能够为连接的两馈线传输有功功率和提供无功功率, 实现削峰填谷的作用, 以 ESOP 作为网络灵活性资源为节点灵活性资源提供灵活的功率传输通道, ESOP 在优化运行时需满足如下约束。

1) ESOP 传输的有功功率满足: 流入两侧换流器的有功功率为流出储能的有功功率。

$$P_{\text{sop},t}^i + P_{\text{sop},t}^j + P_{\text{ess},\text{dc},f}^i - P_{\text{ess},\text{c},f}^i = 0 \quad (3)$$

2) ESOP 无功功率出力满足其上下限约束。

$$\begin{cases} Q_{\text{sop},\text{min}}^i \leq Q_{\text{sop},t}^i \leq Q_{\text{sop},\text{max}}^i \\ Q_{\text{sop},\text{min}}^j \leq Q_{\text{sop},t}^j \leq Q_{\text{sop},\text{max}}^j \end{cases} \quad (4)$$

3) ESOP 有功功率和无功功率出力受 ESOP 容量限制, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(P_{\text{sop},t}^i)^2 + (Q_{\text{sop},t}^i)^2} \leq S_{\text{sop}}^i \\ \sqrt{(P_{\text{sop},t}^j)^2 + (Q_{\text{sop},t}^j)^2} \leq S_{\text{sop}}^j \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{sop},t}^i$ 、 $P_{\text{sop},t}^j$ 、 $Q_{\text{sop},t}^i$ 、 $Q_{\text{sop},t}^j$ 分别为 t 时刻 SOP 的两个变流器传输的有功功率和提供的无功功率; $P_{\text{ess},c,f}^t$ 、 $P_{\text{ess},dc,f}^t$ 分别为 t 时刻第 f 个储能的充电、放电功率; $Q_{\text{sop},\max}^i$ 、 $Q_{\text{sop},\max}^j$ 和 $Q_{\text{sop},\min}^i$ 、 $Q_{\text{sop},\min}^j$ 分别为 SOP 的两个变流器提供的无功功率上下限; S_{sop}^i 、 S_{sop}^j 分别为 SOP 的两个变流器的容量。

4) 储能运行约束见附录 A 式(A4)。

1.3 灵活性供需平衡评价指标

配电网灵活性供需平衡指灵活性资源供给应对灵活性需求的能力, 而灵活性资源分布比较分散, 需要与配电网馈线相互配合解决配电网灵活性需求, 因此, 灵活性供需平衡不仅取决于灵活性资源的供给能力, 也取决于线路传输的能力, 本节提出资源灵活性裕度指标和线路容量裕度指标表征配电网灵活性供需平衡。

节点灵活性资源可以通过配电网馈线传输达到配电网灵活性供需平衡, 通过引入功率传输分布因子^[26-27] \mathfrak{Z}_{k-i}^t , 确定灵活性需求和灵活性资源供给在输电线路的传输情况, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} F_{\text{line},t,k}^{\text{up}} = \sum_{i=1}^E \mathfrak{Z}_{k-i}^t F_{t,i}^{\text{up}} \\ R_{\text{line},t,k}^{\text{up}} = \sum_{i=1}^E \mathfrak{Z}_{k-i}^t R_{t,i}^{\text{up}} \\ F_{\text{line},t,k}^{\text{dn}} = \sum_{i=1}^E \mathfrak{Z}_{k-i}^t F_{t,i}^{\text{dn}} \\ R_{\text{line},t,k}^{\text{dn}} = \sum_{i=1}^E \mathfrak{Z}_{k-i}^t R_{t,i}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_{\text{line},t,k}^{\text{up}}$ 、 $F_{\text{line},t,k}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻线路 k 向上与向下灵活性供给; $R_{\text{line},t,k}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{line},t,k}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻线路 k 向上和向下灵活性需求; E 为配电网节点集合; $F_{t,i}^{\text{up}}$ 、 $F_{t,i}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻 i 节点向上和向下灵活性供给; $R_{t,i}^{\text{up}}$ 、 $R_{t,i}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻 i 节点向上和向下灵活性需求。

用资源灵活性裕度指标表示同一时刻和方向上灵活性供需之差, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \Delta D_{t,k}^{\text{up}} = F_{\text{line},t,k}^{\text{up}} - R_{\text{line},t,k}^{\text{up}} \\ \Delta D_{t,k}^{\text{dn}} = F_{\text{line},t,k}^{\text{dn}} - R_{\text{line},t,k}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\Delta D_{t,k}^{\text{up}}$ 、 $\Delta D_{t,k}^{\text{dn}}$ 分别为 t 时刻线路 k 向上、向下资源灵活性裕度, $\Delta D_{t,k}^{\text{up}} \geq 0$ 、 $\Delta D_{t,k}^{\text{dn}} \geq 0$ 表示灵活性供给满足灵活性需求。

用线路容量裕度指标表示满足灵活性需求后的线路剩余传输容量, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{line},k}^{\text{up},t} = P_k^{\text{max}} - P_k^t - R_{\text{line},t,k}^{\text{up}} \\ P_{\text{line},k}^{\text{dn},t} = P_k^{\text{max}} - P_k^t - R_{\text{line},t,k}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{line},k}^{\text{up},t}$ 、 $P_{\text{line},k}^{\text{dn},t}$ 分别为 t 时刻线路 k 向上和向下容量裕度, $P_{\text{line},k}^{\text{up},t} \geq 0$ 、 $P_{\text{line},k}^{\text{dn},t} \geq 0$ 表示线路有足够的传输容量满足灵活性需求; P_k^t 、 P_k^{max} 分别为 t 时刻线路 k 传输的功率与最大传输功率。

1.4 基于 CVaR 的灵活性不足风险度量

CVaR 是在风险价值(value at risk, VaR)的基础上发展来的, 指在某一置信水平下, 风险损失大于 VaR 的损失期望值, CVaR 可以度量低概率场景带来的高风险损失。VaR 值 G_{VaR} 和 CVaR 值 G_{CVaR} 的计算表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} F(x, \varphi) = \int_{\mathcal{G}(x, \xi) \leq \varphi} f(\xi) d\xi \\ G_{\text{VaR}} = \varphi_{\beta}(x) = \min(\varphi \in R | F(x, \varphi) \geq \beta) \\ G_{\text{CVaR}} = \varphi + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s [\mathcal{G}(x, \xi_s) - \varphi]^+ \end{cases} \quad (9)$$

式中: $F(x, \varphi)$ 为决策变量 x 和随机变量 ξ 引起的风险损失 $\mathcal{G}(x, \xi)$ 不大于边界值 φ 的分布函数; $f(\xi)$ 为 ξ 的概率密度函数; β 为置信水平; $\varphi_{\beta}(x)$ 为置信水平下的边界值; R 为所有实数; ξ_s 为第 s 个场景变量的值; $[X]^+ = \max\{X, 0\}$; π_s 为第 s 个场景的概率; N_s 为典型场景数目。

本文考虑由于资源灵活性裕度或线路容量裕度不足而造成的灵活性不足风险损失, 当 $\Delta D_{t,k}^{\text{up}} \leq 0$ 或 $P_{\text{line},k}^{\text{up},t} \leq 0$ 时, 配电网面临切负荷风险; 当 $\Delta D_{t,k}^{\text{dn}} \leq 0$ 或 $P_{\text{line},k}^{\text{dn},t} \leq 0$ 时, 配电网面临弃风弃光风险。配电网由切负荷或弃风弃光造成的灵活性不足风险成本用 CVaR 值表示为

$$\begin{cases} C_{\text{CVaR}}^{\text{up}} = \varphi_1 + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \pi_s [\rho_L |\Delta D_{t,k}^{\text{up}}| - \varphi_1]^+ \\ C_{\text{CVaR}}^{\text{dn}} = \varphi_2 + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \pi_s [\rho_{W,V} |\Delta D_{t,k}^{\text{dn}}| - \varphi_2]^+ \\ C_{\text{le,CVaR}}^{\text{up}} = \varphi_3 + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \pi_s [\rho_L |P_{\text{line},k}^{\text{up},t}| - \varphi_3]^+ \\ C_{\text{le,CVaR}}^{\text{dn}} = \varphi_4 + \frac{1}{1-\beta} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T \pi_s [\rho_{W,V} |P_{\text{line},k}^{\text{dn},t}| - \varphi_4]^+ \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_{CVaR}^{up} 、 C_{CVaR}^{dn} 分别为向上、向下资源灵活性裕度不足的 CVaR 值; T 为调度周期, 取 24 h; ρ_L 、 $\rho_{W,V}$ 分别为切负荷和弃风弃光成本系数; $C_{le,CVaR}^{up}$ 、 $C_{le,CVaR}^{dn}$ 分别为向上、向下线路容量裕度不足的 CVaR 值; $\Delta D_{t,k}^{up}$ 、 $\Delta D_{t,k}^{dn}$ 、 $P_{line,k}^{up,t}$ 、 $P_{line,k}^{dn,t}$ 均小于零; ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 为不同 CVaR 值下的边界值。

引入线路容量裕度指标权重 ζ_{le} 来权衡线路容量裕度与资源灵活性裕度之间的关系, ζ_{le} 越大表示决策者越倾向于线路通畅。基于 CVaR 的灵活性不足风险度量如式(11)所示。

$$C_{CVaR} = \zeta_{le}(C_{le,CVaR}^{up} + C_{le,CVaR}^{dn}) + (1 - \zeta_{le})(C_{CVaR}^{up} + C_{CVaR}^{dn}) \quad (11)$$

式中, C_{CVaR} 为灵活性不足风险的 CVaR 值。

2 考虑灵活性不足风险的配电网分布鲁棒低碳优化调度模型

本文建立了考虑灵活性不足风险的两阶段三层分布鲁棒低碳优化调度模型。通过 CVaR 度量灵活性不足风险, 引入阶梯型碳交易模型, 降低配电网的碳排放, 以综合运行成本最小为目标建立分布鲁棒低碳优化调度模型。模型第一阶段为 min 问题, 以上级电网和储能出力为决策变量, 在风光和负荷预测值的基础上, 以运行成本最小确定调度计划; 模型第二阶段为 max-min 问题, 以柔性负荷、燃气轮机出力、ESOP 出力和接入位置为决策变量, 在模糊集中寻找使再调整成本和灵活性不足风险成本最小的、风光出力的最恶劣概率分布。

2.1 目标函数

所提模型目标函数如式(12)所示。

$$\begin{aligned} \min_{x_1} \sum_{t=1}^T (C_{mg} P_{mg,t} + \sum_{f=1}^{N_f} C_{es}^f (P_{ess,dc,f}^t + P_{ess,c,f}^t)) + \\ \max_{\pi_s \in \psi} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \min_{y_s \in U(x_1^*, \xi_s)} \sum_{t=1}^T (\sum_{n=1}^{N_n} C_{mt}^n P_{mt,n,t} + \sum_{h=1}^{N_h} C_{fl}^h P_{fl,h,t} + \\ C_{ls} P_{loss,t} + C_{co2} + \zeta C_{CVaR}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $P_{mg,t}$ 为 t 时刻上级电网传输的有功功率; C_{mg} 、 C_{es}^f 、 C_{mt}^n 、 C_{fl}^h 、 C_{ls} 分别为上级电网购电、第 f 个储能、第 n 个燃气轮机、第 h 个柔性负荷响应和网损的单位成本; $P_{loss,t}$ 为 t 时刻线路有功功率损耗; x_1 为第一阶段决策变量; y_s 为第 s 个场景的第二阶段决策变量; x_1^* 为第一阶段决策变量的解; $y_s \in U(x_1^*, \xi_s)$ 表示给定一组 (x_1^*, ξ_s) 时 y_s 的可行域; ψ 为风光出力模糊集; $P_{mt,n,t}$ 为 t 时刻第 n 个燃气轮机有功出力;

$P_{fl,h,t}$ 为 t 时刻第 h 个柔性负荷的用电量; C_{co2} 为阶梯型碳交易成本, 见附录 A 式(A5)、式(A6); ζ 为风险偏好系数。

2.2 约束条件

潮流约束、上级电网约束、线路传输约束和灵活性资源约束等详见附录 A 式(A7)一式(A14)。

2.3 考虑风光出力相关性的模糊集

2.3.1 考虑风光出力相关性的典型场景生成

用 Copula 函数处理一定地理范围内风光出力的非线性相关性; 用核密度估计^[28]的方法得到风光出力的分布函数 $F_{wt,t}(\xi_{wt,t})$ 、 $F_{pv,t}(\xi_{pv,t})$; 考虑到风光出力的互补特性, 采用式(13)所示 Frank-Copula 函数 $C(u_t, v_t)$ 建立每个时段的风光出力联合分布函数, 通过蒙特卡洛抽样生成大量场景。

$$C(u_t, v_t) = -\frac{1}{\tau_t} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\tau_t u_t} - 1)(e^{-\tau_t v_t} - 1)}{e^{-\tau_t} - 1} \right] \quad (13)$$

式中: $u_t = F_{wt,t}(\xi_{wt,t})$ 、 $v_t = F_{pv,t}(\xi_{pv,t})$; τ_t 为相关参数, $\tau_t \in (-1, 1)$ 。

为减小计算难度, 提出基于优化聚类的方法生成典型场景, 用曼哈顿距离表示风光场景间的相似性, 用式(15)表示风光出力的整体相似性指标 $\gamma_{p,w}$ 。

$$\begin{cases} d_{pv}(\xi_{pv}^p, \xi_{pv}^w) = \sum_{t=1}^T |\xi_{pv,t}^{p,t} - \xi_{pv,t}^{w,t}| \\ d_{wt}(\xi_{wt}^p, \xi_{wt}^w) = \sum_{t=1}^T |\xi_{wt,t}^{p,t} - \xi_{wt,t}^{w,t}| \end{cases} \quad (14)$$

$$\gamma_{p,w} = \theta_1 d_{pv}(\xi_{pv}^p, \xi_{pv}^w) + (1 - \theta_1) d_{wt}(\xi_{wt}^p, \xi_{wt}^w) \quad (15)$$

式中: $d_{pv}(\xi_{pv}^p, \xi_{pv}^w)$ 为第 p 个光伏场景 ξ_{pv}^p 与第 w 个光伏场景 ξ_{pv}^w 的曼哈顿距离; $d_{wt}(\xi_{wt}^p, \xi_{wt}^w)$ 为第 p 个风电场景 ξ_{wt}^p 与第 w 个风电场景 ξ_{wt}^w 的曼哈顿距离; M 为场景总数; θ_1 为权重。

以每个集合中风光出力整体相似性指标和最小为目标, 建立优化聚类模型。

$$\begin{cases} \min_{N_{p,w}} \sum_{p=1}^M \sum_{w=1}^M N_{p,w} \gamma_{p,w} \\ \sum_{w=1}^M D_w = z, \quad D_w = 0, 1 \\ \sum_{w=1}^M N_{p,w} = 1, \quad N_{p,w} = 0, 1 \\ N_{p,w} \leq D_w, \quad \forall p, w = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (16)$$

式中: M 表示场景总数; $D_w = 1$ 表示以第 w 个风光场景为聚类中心; $N_{p,w} = 1$ 表示以第 w 个场景为聚类中心时包含第 p 个场景; z 为聚类数目。

风光场景初始概率分布 P_s^0 和初始概率 π_s^0 为

$$\begin{cases} P_s^0 = \frac{1}{m_\zeta} \sum_{p=1}^M N_{p,\zeta} \xi_s^p, \zeta = 1, 2, \dots, z \\ \pi_s^0 = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M N_{p,\zeta}, \zeta = 1, 2, \dots, z \end{cases} \quad (17)$$

式中: m_ζ 为第 ζ 个集中中场景个数; $\xi_s^p \in (\xi_{pv}^p, \xi_{wt}^p)$; $N_{p,\zeta} = 0, 1$, $N_{p,\zeta} = 1$ 表示第 ζ 个集中包含第 p 个场景。

2.3.2 概率分布模糊集

对式(18)所示 KL 散度 D_{KL} 改进为式(19)所示可调 KL 散度 D_{ADKL} , 由于其有界性与对称性, 更适合作为风光出力的概率分布模糊集 ψ 。

$$D_{KL}(P_s \| P_s^0) = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \ln(\pi_s / \pi_s^0) \quad (18)$$

$$\begin{cases} D_{ADKL}(P_s \| P_s^0) = e^{[-u(D_{KL}(P_s \| P_s^0) + D_{KL}(P_s^0 \| P_s))]} \\ \psi = \{P_s | D_{ADKL}(P_s \| P_s^0) \leq d\} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_s 为真实概率分布; d 为距离容差, $d \in (0, 1]$; u 为调节因子; D_{KL} 为 P_s 和 P_s^0 的 KL 散度。

3 分布鲁棒优化模型求解

分布鲁棒优化模型分为 min-max-min 3 层, 其主要目标在于获得典型场景的最坏概率分布情况, 从而求解目标成本的最大值。但原模型不能直接求解, 运用列与约束生成(columns and constraints generation, CCG)算法可以将原模型分解为主问题与子问题进行迭代求解, CCG 算法求解流程如附录 B 图 B1 所示。将式(12)写成如下形式。

$$\begin{cases} \min_{x_1} f_1(x_1) + \max_{\pi_s \in \psi} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \min_{y_s \in U(x_1, \xi_s)} f_2(y_s) \\ \text{s.t.} \quad Ax_1 \leq a \\ \quad \quad By_s \leq b \\ \quad \quad Fy_s = o \\ \quad \quad Hx_1 + Jy_s = g \\ \quad \quad \|Ky_s\|_2 \leq r^T y_s \end{cases} \quad (20)$$

式中: $f_1(x_1)$ 为第一阶段成本, 包括向上级电网购电和储能出力成本; $f_2(y_s)$ 为第二阶段成本, 包括除第一阶段成本外其余相关成本; 式(21)对应 2.2 节构造的等式、不等式和二阶锥约束, A 、 B 、 F 、 H 、 J 、 K 、 a 、 b 、 o 、 g 、 r 为相应系数矩阵。

主问题是根据子问题寻找出的最坏概率分布集合, 求解满足所有约束条件的最优解, 为式(20)

提供下界值。

$$\begin{cases} \min_{x_1} \{f_1(x_1) + \omega\} \\ \omega \geq \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s^l f_2(y_s^l) \end{cases} \quad (22)$$

式中: y_s^l 为第 l 次迭代时第二阶段决策变量的解; π_s^l 为第 l 次迭代时第 s 个场景的概率; ω 为求解所需辅助变量。

子问题是在获得主问题提供的第一阶段变量的基础上, 寻找出最坏的概率分布, 传递给主问题进行下一次迭代, 为式(20)提供上界值。

$$\max_{\pi_s \in \psi} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \min_{y_s^l \in U(x_1, \xi_s)} f_2(y_s^l) \quad (23)$$

由于子问题中内层优化问题与外层典型场景的出力之间并无耦合关系, 为加快求解速度, 可以拆分成两个模型进行单独求解, 假设内层优化的目标成本为 $f_2(x_1^*, y_s^l)$, 则式(23)可表示为

$$\max_{\pi_s \in \psi} \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s f_2(x_1^*, y_s^l) \quad (24)$$

4 算例分析

本文采用如图 1 所示改进的 IEEE 33 节点系统作为算例分析, 网架参数见文献[29], 配电网基准电压为 12.66 kV, 配电网正常运行状态下 5 条 TS 常开, 其中 ESOP 代替一条 TS, 向节点注入功率的方向为正方向。 β 取 0.95, ζ_{lc} 取 0.5。风电和光伏出力典型场景如附录 B 图 B2、图 B3 所示, 图例中括号内容为各场景的概率, 风电机组(wt)、光伏设备(pv)、储能(ESS)、燃气轮机(mt)和柔性负荷(ld)接入位置如图 1 所示。柔性负荷中可中断、可平移和可转移负荷占比为 3:3:4, 设置线路 1-4 的最大传输功率为 2500 kW, 线路 5-7、23-25 的最大传输功率为 1500 kW, 其余线路最大传输功率为 800 kW^[30], 分时电价和源荷储参数参考文献[13, 31], 分时电价如附录 B 表 B1 所示, 算例参数如附录 B 表 B2 所示, 采用 Cplex 求解器进行求解。

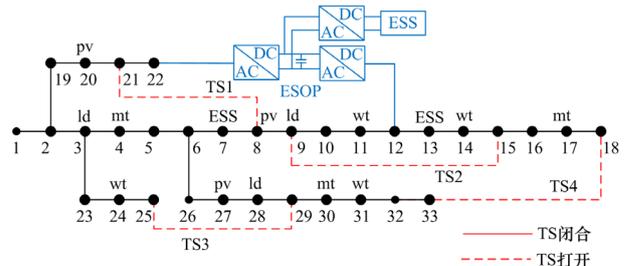


图 1 改进的 IEEE 33 节点系统

Fig. 1 Improved IEEE 33-node system

4.1 配电网灵活性分析

本文通过对比不同方案，验证通过节点侧和网络侧灵活性资源共同参与提升配电网灵活经济运行的能力。方案 1：无灵活性资源，预留 10% 旋转备用容量的优化策略。方案 2：考虑节点灵活性资源的优化策略。方案 3：考虑节点和网络灵活性资源的优化策略。表 1 第 2 列括号内的数据为由线路容量裕度不足造成的 CVaR 值。

表 1 不同方案下的运行成本

Table 1 Operating costs under different schemes

方案	CVaR 值	购电成本/元	碳交易成本/元	网损成本/元	总成本/元
1	4882(1526)	16 440	2986	1124	35 811
2	1264(1456)	16 048	2675	1239	31 981
3	0(83)	14 913	2261	923	26 858

从运行成本角度分析，由表 1 可以看出，方案 1 较方案 2 总成本增加，主要是由于灵活性资源不足导致 CVaR 值增加，由附录 B 图 B4、图 B5 可以看出，方案 1 无灵活性资源参与，造成灵活性不足时刻占全天的 67%，且部分时刻资源灵活性裕度为零，造成大量弃风弃光和切负荷风险；方案 3 较方案 2 各成本均有所减少，总成本减少了 5123 元，大部分是由于 CVaR 值的减小造成的，由附录 B 图 B4、图 B5 可以看出，方案 2 资源灵活性裕度足够，但受限于无法传输节点灵活性资源，造成部分时刻出现灵活性缺额，方案 3 由于 ESOP 的加入，一方面增强了节点灵活性资源间网络互济水平，另一方面净负荷曲线变得平缓，灵活性需求减少，并且 ESOP 通过传输两馈线间的有功功率，各节点获得有功功率的途径增多，减少了向上级电网的购电成本，同时减少了配电网的网损成本。

从灵活性角度分析，方案 2 节点灵活性资源的参与使资源灵活性裕度 CVaR 值减少了 3618，方案 3 中虽无更多的节点灵活性资源加入，但资源灵活性裕度 CVaR 值减少为 0，这是由于 ESOP 的加入，增强了节点灵活性资源间网络互济水平，特别是加入 ESOP 后由线路容量裕度造成的 CVaR 值减小。由表 2 和表 3 可以看出，接入新能源的节点附近，产生较大的灵活性需求，造成线路容量裕度不足，方案 2 有 3 条线路出现向上线路容量裕度不足，以线路 11 为例，在 08:00—10:00 时段风光出力下降产生向上灵活性需求，虽然节点 13 的储能此时容量为 500 kW，但受限于线路 11 线路容量裕度不足，无法通过储能放电提供有功功率，由附录 B 图 B6 可以看出，此时 ESOP 通过在各个时刻传输有功功率，优化配电网潮流，在 09:00 与 10:00 通过向节点注入

有功功率以及储能放电共同应对灵活性需求，减少了配电网切负荷风险；方案 2 有 2 条线路出现向下线路容量裕度不足，以线路 33 为例，在 23:00—24:00 时段，净负荷曲线下产生向下灵活性需求，受限于线路 33 出现线路阻塞，节点 30 燃气轮机减少出力也无法提供向下灵活性供给，只能通过弃风弃光应对向下灵活性需求，ESOP 加入后线路容量裕度均有所提升，由附录 B 图 B7 可以看出，方案 3 加入 ESOP 在为配电网传输有功功率的同时为配电网提供无功功率支撑。智能储能软开关的加入对配电网灵活性和经济性都产生了积极影响。

表 2 ESOP 加入前后向上线路容量裕度情况对比

Table 2 Comparison of upward line capacity margin before and after ESOP is added

序号	线路	时段	方案 2 向上线路容量裕度/kW	方案 3 向上线路容量裕度/kW
1	11	08:00—10:00	-326	336
2	31	02:00—03:00	-235	96
3	18	09:00—10:00	-198	165

表 3 ESOP 加入前后向下线路容量裕度情况对比

Table 3 Comparison of downward line capacity margin before and after ESOP is added

序号	线路	时段	方案 2 向下线路容量裕度/kW	方案 3 向下线路容量裕度/kW
1	20	02:00—04:00	-276	412
2	33	23:00—24:00	-226	-72

4.2 低碳性和风险性分析

通过两种方案对比分析碳交易机制对配电网碳排放的影响，如表 4 所示。方案 4 为不考虑碳交易机制，方案 5 为考虑阶梯型碳交易机制，两种方案均考虑 ESOP 接入。

由表 4 可以看出：方案 4 未考虑碳交易机制，配电网倾向于选择成本较低而碳排放较高的从上级电网购电的方法获取电能；方案 5 考虑碳交易机制，与碳排放源相关的购电成本和燃气轮机出力成本均有所减少，柔性负荷与储能运行成本增加，ESOP 传输的有功功率也有所增加，减少了碳排放量，虽然方案 5 的总成本增加，但配电网优化调度向低碳目标发展，承担了减排责任。由图 2 可以看出，随着新能源渗透率的不断提升，清洁能源的使用降低了配电网的碳排放量，在新能源渗透率高于 75% 左右时，可以出售多余的碳排放配额获益，但新能源渗透率增加，灵活性需求剧增，相应地也增加了配电网切负荷和弃风弃光风险成本，需要更多的灵活性资源参与减少风险，并且新能源渗透率超过 50%

时, 由于 ESOP 容量的限制, 无法传输更多灵活性资源, 造成风险进一步提升。

表 4 阶梯碳交易机制效益分析

Table 4 Benefit analysis of ladder carbon trading mechanism

	方案 4	方案 5
购电成本/元	15 823	14 913
碳交易成本/元	0	2261
柔性负荷出力成本/元	1041	1150
燃气轮机出力成本/元	6832	6420
储能出力成本/元	965	1108
ESOP 传输的有功功率/kW	3904	4356
总成本/元	25 584	26 858

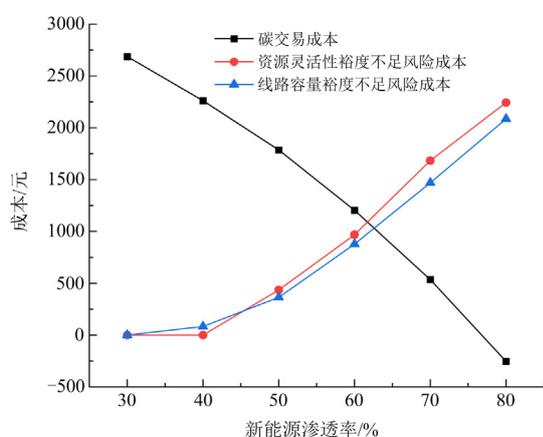


图 2 不同新能源渗透率下碳交易成本与风险成本

Fig. 2 Carbon trading costs and risk costs under different new energy penetration rates

不同风险偏好系数与各项成本的关系如附录 B 表 B3 所示, 此时不考虑 ESOP 接入。未考虑配电网灵活性不足风险时, 虽成本较低, 但切负荷和弃风弃光风险却很高, 随着风险偏好系数 ζ 增加, 表明决策者对风险的厌恶程度也在增加, 需要调用更多灵活性资源来满足配电网灵活性需求, 配电网中灵活性不足风险在减小, 而运行成本在增加。当 ζ 取 0.5 后, 资源灵活性裕度不足风险减小幅度下降, 总成本变化依旧平稳, 表明不应一味地追求减小风险, 应该在经济性与风险规避间做出权衡。并且随着 ζ 增加, 需要传输更多灵活性资源, 更依赖于网架结构, 使得因线路容量裕度不足造成的风险在增大, 但由于只有部分线路容量裕度不足, 因此总体变化较小, 必要时可改变 ζ_{lc} 值达到平衡。

4.3 不同优化方法对比分析

将基于 Copula 理论生成风光出力场景、考虑风光出力相关性的分布鲁棒优化模型(本文模型), 根据风光出力预测值采用正态分布生成风光出力场

景、未考虑风光出力相关性的传统分布鲁棒优化模型, 鲁棒优化模型与随机优化模型进行对比分析。

由表 5 可以看出, 分布鲁棒优化结果各成本都介于鲁棒优化和随机优化之间, 这是由于鲁棒优化考虑最恶劣的场景, 虽风险减小但保守性强造成高成本, 而随机优化虽然成本低, 但考虑特定的概率分布难以获取, 风光出力的波动对成本影响很大。而分布鲁棒优化结合了鲁棒优化和随机优化的优点, 通过构造模糊集考虑最坏的概率分布, 使风险性与总成本得到均衡。相较于传统分布鲁棒优化模型, 本文模型基于 Copula 理论考虑风光出力相关性后, 利用更多的概率信息, 优化结果的保守性也降低。由图 3 可以看出, 距离容差的选取从 1 到 0 不断减小, 会使模糊集内包含更多的概率分布信息, 搜索范围扩大的同时, 最恶劣的场景概率分布不断变化, 成本较高的场景 1、3 和 4 的概率不断增加, 成本较低的场景 2、5 的概率不断减小, 总成本不断增加, 分布鲁棒优化结果越接近鲁棒优化结果。

表 5 不同优化模型分析

Table 5 Analysis of different optimization models

模型	灵活性不足风险	碳交易	总成本/元
	CVaR 值	成本/元	
本文模型	2720	2675	31 981
传统分布鲁棒优化模型	2781	3043	32 466
鲁棒优化模型	2505	3359	35 228
随机优化模型	3049	2719	29 346

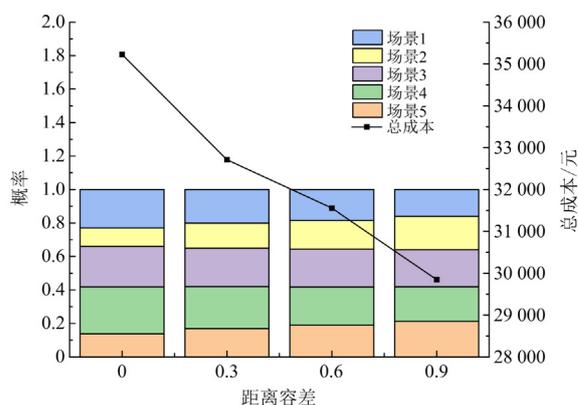


图 3 不同距离容差对成本的影响

Fig. 3 Effect of different distance tolerances on cost

5 结论

本文针对配电网中新能源占比不断增加导致配电网灵活性需求剧增的问题, 提出考虑配电网灵活性不足风险的分布鲁棒低碳优化调度方法, 通过算例分析得到如下结论。

1) 节点和网络灵活性资源共同作用, 可以应对配电网灵活性需求; ESOP 的加入对于减少配电网成本和提高配电网灵活性具有积极作用。

2) 通过 CVaR 能够量化出配电网因线路或资源裕度不足造成的切负荷或弃风弃光成本, 通过设置不同风险偏好系数, 可以平衡经济性与风险性。

3) 所构造的分布鲁棒优化模型能够在鲁棒性与经济性之间取得平衡, 在模型中考虑阶梯型碳交易成本, 可以有效减少配电网的碳排放。

本文所提的优化调度方法能够提升配电网灵活经济运行能力, 下一步将从规划的角度考虑, 提升高占比新能源配电网的灵活可靠运行。

附录 A

1) 燃气轮机的灵活性供给能力

燃气轮机通过增加(减小)出力为配电网提供向上(下)灵活性, 其调节能力受到当前运行状态和爬坡速率的影响。

$$\begin{cases} F_{mt,n,t}^{\text{up}} = \min(R_{mt,n}^{\text{up}} \Delta t, P_{mt,n}^{\text{max}} - P_{mt,n,t}) \\ F_{mt,n,t}^{\text{dn}} = \min(R_{mt,n}^{\text{dn}} \Delta t, P_{mt,n,t} - P_{mt,n}^{\text{min}}) \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中: Δt 为分段时间间隔; $R_{mt,n}^{\text{up}}$ 、 $R_{mt,n}^{\text{dn}}$ 分别为第 n 个燃气轮机向上和向下爬坡能力; $P_{mt,n}^{\text{max}}$ 、 $P_{mt,n}^{\text{min}}$ 分别为 t 时刻第 n 个燃气轮机有功出力上下限。

2) 储能的灵活性供给能力

储能通过放(充)电为配电网提供向上(下)灵活性, 其调节能力受自身容量和充放电速率的影响。

$$\begin{cases} F_{ess,f,t}^{\text{up}} = \min(P_{ess,dc,f}^{\text{max}} - P_{f,t}^{\text{ess}}, \frac{(E_{f,t}^{\text{ess}} - E_{ess,f}^{\text{min}}) \eta_{dc}}{\Delta t}) \\ F_{ess,f,t}^{\text{dn}} = \min(P_{ess,c,f}^{\text{max}} + P_{f,t}^{\text{ess}}, \frac{E_{ess,f}^{\text{max}} - E_{f,t}^{\text{ess}}}{\eta_c \Delta t}) \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中: $P_{f,t}^{\text{ess}}$ 、 $P_{ess,c,f}^{\text{max}}$ 、 $P_{ess,dc,f}^{\text{max}}$ 分别为 t 时刻第 f 个储能的出力和最大充、放电功率; $E_{f,t}^{\text{ess}}$ 、 $E_{ess,f}^{\text{max}}$ 、 $E_{ess,f}^{\text{min}}$ 分别为 t 时刻第 f 个储能的容量及上、下限; η_c 、 η_{dc} 分别为储能充、放电效率。

3) 柔性负荷的灵活性供给能力

将需求侧灵活性资源中的可中断负荷、可转移负荷和可平移负荷统称为柔性负荷, 通过经济激励补偿的方式调整用户用电行为, 为配电网提供灵活性。可中断负荷受到自身中断容量的影响, 而可转移负荷和可平移负荷受到转入和转出容量的限制。

$$\begin{cases} F_{fl,h,t}^{\text{up}} = P_{fl,h}^{\text{max}} - P_{fl,h,t} \\ F_{fl,h,t}^{\text{dn}} = P_{fl,h,t} - P_{fl,h}^{\text{min}} \end{cases} \quad (\text{A3})$$

式中, $P_{fl,h}^{\text{max}}$ 、 $P_{fl,h}^{\text{min}}$ 分别为 t 时刻第 h 个柔性负荷的

用电量上下限。

4) 储能运行约束

储能运行中在保证电量平衡以及充放电功率在合理范围内, 为在下一个调度周期内使用, 储能的初末电量应保持相等。

$$\begin{cases} E_{f,t+1}^{\text{ess}} = E_{f,t}^{\text{ess}} + P_{ess,c,f}^t \eta_c \Delta t - P_{ess,dc,f}^t \Delta t / \eta_{dc} \\ P_{f,t}^{\text{ess}} = P_{ess,dc,f}^t - P_{ess,c,f}^t \\ E_{ess,f}^{\text{min}} \leq E_{f,t}^{\text{ess}} \leq E_{ess,f}^{\text{max}} \\ E_{t=0}^{\text{ess}} = E_{t=T}^{\text{ess}} \\ 0 \leq P_{ess,c,f}^t \leq V_{ess,c,f}^t P_{ess,c,f}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{ess,dc,f}^t \leq V_{ess,dc,f}^t P_{ess,dc,f}^{\text{max}} \\ V_{ess,c,f}^t + V_{ess,dc,f}^t \leq 1 \end{cases} \quad (\text{A4})$$

式中: $E_{t=0}^{\text{ess}}$ 、 $E_{t=T}^{\text{ess}}$ 分别为储能初始和最终的电量; $V_{ess,c,f}^t$ 、 $V_{ess,dc,f}^t$ 分别为 t 时刻第 f 个储能充、放电状态的 0、1 变量。

5) 碳交易成本

本文采用阶梯型碳交易成本模型减少配电网碳排放量, 从上级电网购电来自火电机组, 碳交易价格随碳排放量的增加而增加。不同碳排放主体的碳排放配额采用无偿分配, 在碳交易市场中, 配电网中实际参与交易的碳排放量 G_{ct} 由碳排放配额 D_{ct} 和实际碳排放量 E_{ct} 决定, 可表示为

$$\begin{cases} E_{ct} = \mu_m \sum_{t=1}^T P_{mt,n,t} + \mu_e \sum_{t=1}^T P_{mg,t} \\ D_{ct} = \sigma_m \sum_{t=1}^T P_{mt,n,t} + \sigma_e \sum_{t=1}^T P_{mg,t} \\ G_{ct} = E_{ct} - D_{ct} \end{cases} \quad (\text{A5})$$

式中: μ_m 、 μ_e 分别为燃气轮机和火电机组的单位功率发电碳排放量; σ_m 、 σ_e 分别为燃气轮机和火电机组的单位功率发电碳配额; $G_{ct} \leq 0$, 可以出售碳排放额获得收益; $G_{ct} \geq 0$, 则需要购买超出的碳排放额。

阶梯型碳交易成本 C_{co_2} 表示为

$$C_{co_2} = \begin{cases} -\phi(1+2\delta)(-G_{ct} - m), & G_{ct} \leq -m \\ -\phi(1+2\delta)m - \phi(1+\delta)G_{ct}, & -m < G_{ct} \leq 0 \\ \phi G_{ct}, & 0 < G_{ct} \leq m \\ \phi m + \phi(1+\delta)(G_{ct} - m), & m < G_{ct} \leq 2m \\ \phi m(2+\delta) + \phi(1+2\delta)(G_{ct} - 2m), & 2m < G_{ct} \leq 3m \\ \phi m(3+3\delta) + \phi(1+3\delta)(G_{ct} - 3m), & G_{ct} > 3m \end{cases} \quad (\text{A6})$$

式中: ϕ 为碳交易价格, 取 0.25 元/kg; δ 为价格增长率, 取 25%; m 为碳排放量区间长度, 取 1000 kg。

6) 潮流约束

用 distflow 模型描述配电网潮流约束, 并经二阶锥松弛转换为线性约束。

$$\begin{cases}
 \sum_{i \in \Omega(j)} (P_{ij}^t - r_{ij} \hat{I}_{ij,t}^2) = \sum_{q \in \nu(j)} (P_{jq}^t - P_j^t) \\
 \sum_{i \in \Omega(j)} (Q_{ij}^t - X_{ij} \hat{I}_{ij,t}^2) = \sum_{q \in \nu(j)} (Q_{jq}^t - Q_j^t) \\
 P_j^t = P_{wt,j}^t + P_{pv,j}^t + P_{mg,j}^t + P_{mt,j}^t + P_{sop,j}^t + \\
 \quad P_{c,j}^t - P_{dc,j}^t + P_{ld,j}^t - P_{L,j}^t \\
 Q_j^t = Q_{mg,j}^t + Q_{mr,j}^t + Q_{sop,j}^t + Q_{ld,j}^t - Q_{L,j}^t \\
 \hat{V}_{j,t}^2 = \hat{V}_{i,t}^2 - 2(P_{ij}^t r_{ij} + Q_{ij}^t X_{ij}) + \hat{I}_{ij,t}^2 (r_{ij}^2 + X_{ij}^2) \\
 \hat{V}_{j,t}^2 = V_{j,t}^2 \\
 \hat{V}_{i,t}^2 = V_{i,t}^2 \\
 \hat{I}_{ij,t}^2 = I_{ij,t}^2 \\
 \left\| \begin{matrix} 2P_{ij}^t \\ 2Q_{ij}^t \end{matrix} \right\| \leq \hat{I}_{ij,t} + \hat{V}_{i,t} \\
 \left\| \hat{I}_{ij,t} - \hat{V}_{i,t} \right\|_2
 \end{cases} \quad (A7)$$

式中: $\Omega(j)$ 、 $\nu(j)$ 分别为以 j 为末端、首端节点的线路集合; r_{ij} 、 X_{ij} 分别为线路 ij 的电阻、电抗; P_{ij}^t 、 Q_{ij}^t 分别为 t 时刻线路 ij 的有功功率、无功功率; P_j^t 、 Q_j^t 分别为 t 时刻节点 j 注入的总有功功率、无功功率; P_{jq}^t 、 Q_{jq}^t 分别为 t 时刻以 j 为首端节点的线路有功功率和无功功率; $P_{wt,j}^t$ 、 $P_{pv,j}^t$ 、 $P_{mg,j}^t$ 、 $P_{mt,j}^t$ 、 $P_{sop,j}^t$ 、 $P_{c,j}^t$ 、 $P_{dc,j}^t$ 、 $P_{ld,j}^t$ 、 $P_{L,j}^t$ 分别为 t 时刻 j 节点处风电、光伏、上级电网、燃气轮机、智能软开关、储能充电、储能放电、柔性负荷、常规负荷的有功功率; $Q_{mg,j}^t$ 、 $Q_{mr,j}^t$ 、 $Q_{sop,j}^t$ 、 $Q_{ld,j}^t$ 、 $Q_{L,j}^t$ 分别为 t 时刻 j 节点处上级电网、燃气轮机、智能软开关、柔性负荷和常规负荷的无功功率; $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、 j 的电压; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 ij 的电流。

7) 上级电网约束

$$\begin{cases}
 P_{mg}^{\min} \leq P_{mg,t} \leq P_{mg}^{\max} \\
 Q_{mg}^{\min} \leq Q_{mg,t} \leq Q_{mg}^{\max} \\
 |P_{mg,t+1} - P_{mg,t}| \leq \Delta P_{mg}^{\max}
 \end{cases} \quad (A8)$$

式中: $Q_{mg,t}$ 为 t 时刻上级电网传输的无功功率; P_{mg}^{\max} 、 P_{mg}^{\min} 和 Q_{mg}^{\max} 、 Q_{mg}^{\min} 分别为上级电网传输的有功功率、无功功率上下限; ΔP_{mg}^{\max} 为上级电网爬坡上限。

8) 线路传输约束

$$|P_{ij}^t| \leq P_{ij}^{\max} \quad (A9)$$

式中, P_{ij}^{\max} 为线路 ij 的最大传输功率。

9) 燃气轮机约束

$$\begin{cases}
 P_{mt,n}^{\min} \leq P_{mt,n,t} \leq P_{mt,n}^{\max} \\
 Q_{mt,n}^{\min} \leq Q_{mt,n,t} \leq Q_{mt,n}^{\max} \\
 -R_{mt,n}^{\text{dn}} \Delta t \leq P_{mt,n,t} - P_{mt,n,t-1} \leq R_{mt,n}^{\text{up}} \Delta t
 \end{cases} \quad (A10)$$

式中, $Q_{mt,n,t}$ 、 $Q_{mt,n}^{\max}$ 、 $Q_{mt,n}^{\min}$ 分别为 t 时刻第 n 个燃气轮机的无功功率及上下限。

10) 柔性负荷约束

可转移负荷在调度周期内可以不连续用电, 但要保证用电总量不变。

$$\begin{cases}
 P_{tl,h}^{\min} \leq P_{tl,h,t} \leq P_{tl,h}^{\max} \\
 \sum_{t=1}^T P_{tl,h,t}^{\text{in}} = \sum_{t=1}^T P_{tl,h,t}^{\text{out}}
 \end{cases} \quad (A11)$$

式中: $P_{tl,h,t}$ 、 $P_{tl,h}^{\max}$ 、 $P_{tl,h}^{\min}$ 分别为 t 时刻第 h 个可转移负荷的转移量及上下限; $P_{tl,h,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{tl,h,t}^{\text{out}}$ 分别表示 t 时刻第 h 个可转移负荷转入和转出量。

可中断负荷受到最大中断时间、中断容量以及中断次数的影响。

$$\begin{cases}
 P_{cl,h}^{\min} \leq P_{cl,h,t} \leq P_{cl,h}^{\max} \\
 \sum_{t=1}^T A_t \leq N_{cl,h}^{\text{sum,max}} \\
 \sum_{t=b}^{b+N_{cl,h}^{\text{on,max}}-1} A_t \leq N_{cl,h}^{\text{on,max}}
 \end{cases} \quad (A12)$$

式中: $P_{cl,h,t}$ 、 $P_{cl,h}^{\max}$ 、 $P_{cl,h}^{\min}$ 分别为 t 时刻第 h 个可中断负荷的中断量及上下限; A_t 为可中断负荷状态, $A_t = 1$ 为中断, $A_t = 0$ 为未中断; $N_{cl,h}^{\text{sum,max}}$ 、 $N_{cl,h}^{\text{on,max}}$ 分别为最大中断次数和中断时间; b 为中断的开始时刻。

可平移负荷可以选择在调度周期内任意时段用电, 但要保证用电的连续性。

$$\begin{cases}
 \sum_{t=t_1}^{t_1+T_s-1} K_t = T_s \\
 \sum_{t=t^-}^{t^+} K_t P_{ml,h}^- = \sum_{t=t_1}^{t_1+T_s-1} K_t P_{ml,h}^+
 \end{cases} \quad (A13)$$

式中: t_1 为平移的开始时刻; K_t 为可平移负荷状态, $K_t = 1$ 为被调用, $K_t = 0$ 为未被调用; T_s 为可平移负荷持续时间; $P_{ml,h}^-$ 、 $P_{ml,h}^+$ 分别为可平移负荷参与调度前后的功率; $[t^-, t^+]$ 为可平移负荷时间区间。

11) 智能软开关约束

将式(5)转换为旋转锥约束。

$$\begin{cases} (P_{sop,t}^i)^2 + (Q_{sop,t}^i)^2 \leq 2\left(\frac{S_{sop}^i}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{S_{sop}^i}{\sqrt{2}}\right) \\ (P_{sop,t}^j)^2 + (Q_{sop,t}^j)^2 \leq 2\left(\frac{S_{sop}^j}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{S_{sop}^j}{\sqrt{2}}\right) \end{cases} \quad (A14)$$

附录 B

表 B1 分时电价

Table B1 Time-sharing electricity price

时段	电价/(元/kWh)	时段	电价/(元/kWh)
01:00—05:00	0.32	13:00—16:00	0.42
06:00—09:00	0.42	17:00—20:00	0.58
10:00—12:00	0.58	21:00—24:00	0.42

表 B2 算例参数

Table B2 Example parameter

参数	数值	参数	数值
燃气轮机出力上、下限/kW	400、300	购电价格/(元/kWh)	0.56
燃气轮机向上、向下爬坡率上限/kW	200、100	切负荷成本系数/(元/kWh)	0.9
燃气轮机单位运行成本/(元/kWh)	0.9	弃风弃光成本系数/(元/kWh)	0.9
储能充/放电功率上限/kW	300	SOP 容量/kVA	600
储能容量上限/kWh	800	SOP 无功功率补偿上限/kvar	500
储能单位运行成本/(元/kWh)	0.68	可中断负荷可中断量/kW	180
储能充放电效率	0.95	可中断负荷中断持续时间/h	4
柔性负荷总量/kW	700	可中断负荷一天最大中断次数	5
柔性负荷补偿成本/(元/kWh)	0.6	最大可移出/入比例	0.7
最大可转出/转入比例	0.7	网损成本/(元/kWh)	0.56

表 B3 不同风险偏好系数与各项成本的关系

Table B3 Relationship between different risk preference coefficients and various costs

风险偏好系数	资源灵活性	线路容量裕	运行成本/元	总成本/元
	裕度不足风险 CVaR 值	度不足风险 CVaR 值		
0	2944	1248	8667	31 348
0.1	2576	1285	8856	31 504
0.3	2107	1309	9073	31 628
0.5	1675	1356	9341	31 723
0.7	1462	1397	9451	31 835
0.9	1264	1456	9604	31 981
1	1187	1485	9722	32 213

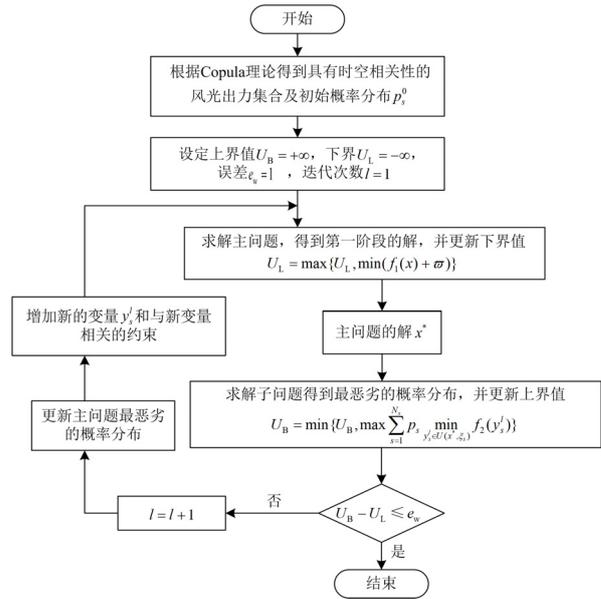


图 B1 CCG 算法求解流程

Fig. B1 CCG algorithm solution process

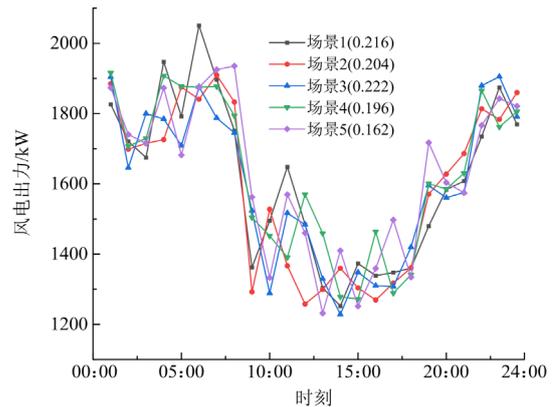


图 B2 风电出力典型场景

Fig. B2 Typical scenarios of wind power output

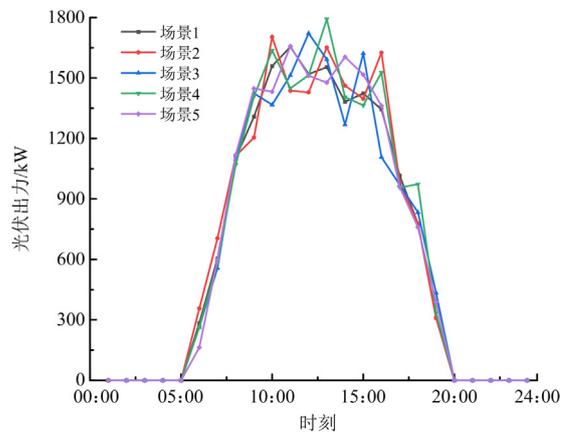


图 B3 光伏出力典型场景

Fig. B3 Typical scenarios of photovoltaic output

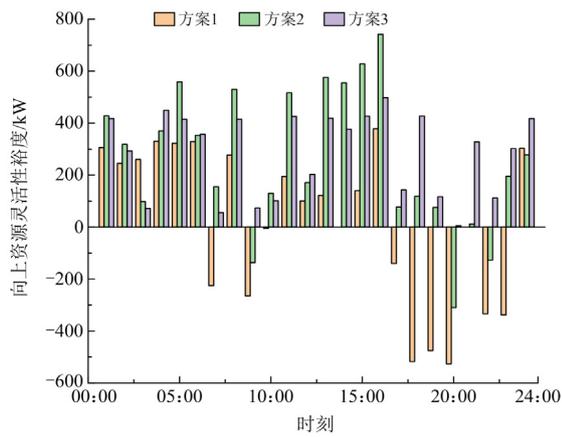


图 B4 不同方案向上资源灵活性裕度

Fig. B4 Upward resource flexibility margin for different scenarios

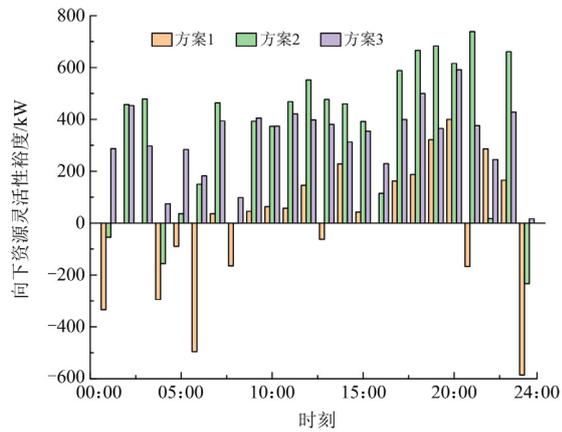


图 B5 不同方案向下资源灵活性裕度

Fig. B5 Downward resource flexibility margin for different scenarios

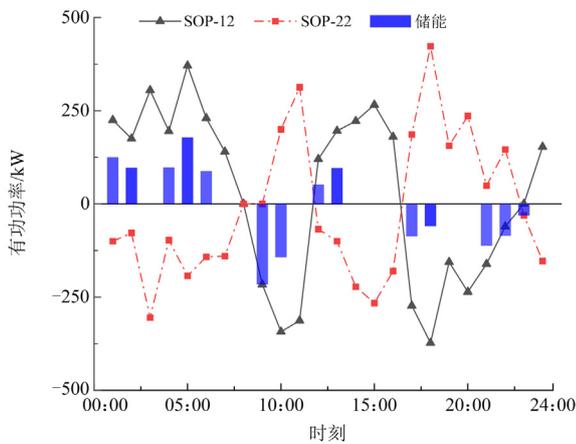


图 B6 ESOP 传输的有功功率

Fig. B6 Active power transmitted by ESOP

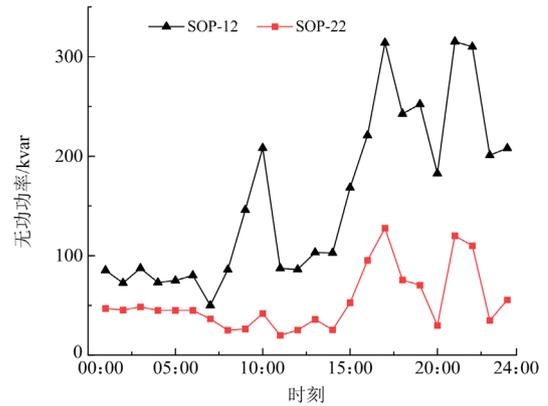


图 B7 ESOP 提供的无功功率

Fig. B7 Reactive power provided by ESOP

参考文献

- [1] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11-24.
BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 11-24.
- [2] 初壮, 孙健浩, 赵蕾, 等. 考虑风光与负荷时序特性的主动配电网分布式电源优化配置[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 53-62.
CHU Zhuang, SUN Jianhao, ZHAO Lei, et al. Optimal configuration of distributed power generation in active distribution network considering the characteristics of wind power and load time series[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 53-62.
- [3] 刘泽洪, 周原冰, 李隽, 等. 西南跨流域水风光协同开发研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 225-237.
LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, LI Jun, et al. Trans-basin complementary planning of hydro-wind-photovoltaic systems in southwest China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 225-237.
- [4] 童宇轩, 胡俊杰, 刘雪涛, 等. 新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 80-90.
TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of supply and demand flexibility and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 80-90.
- [5] SUN H, GUO Q, QI J, et al. Review of challenges and research opportunities for voltage control smart grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):

- 2790-2801.
- [6] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 1-8.
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 1-8.
- [7] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [8] 刘丽军, 张嫣, 徐启峰. 一种考虑功率不确定性影响及配电网灵活性需求的区间优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4654-4664.
LIU Lijun, ZHANG Yan, XU Qifeng. An interval optimal scheduling method considering the influence of power uncertainty and the flexibility of distribution network[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4654-4664.
- [9] 吉兴全, 刘健, 张玉敏, 等. 计及运行灵活性约束的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 84-94.
JI Xingquan, LIU Jian, ZHANG Yumin, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering operation flexibility constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 84-94.
- [10] 马英浩, 刘琛, 谢开贵, 等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5429-5441.
MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429-5441.
- [11] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 主动配电网中考虑条件风险价值的智能软开关的规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 1-11.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Planning method of soft open point for an active distribution network considering conditional value-at-risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 1-11.
- [12] 马望, 高红均, 李海波, 等. 考虑智能软开关的配电网灵活性评估及优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3935-3943.
MA Wang, GAO Hongjun, LI Haibo, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatch model of distribution network considering soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3935-3943.
- [13] 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 Chongbo, LI Jingru, YUAN Kai, 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.
- [14] 张崇博, 杨晓东, 张有兵, 等. 考虑风险管控的含智能软开关主动配电网随机运行优化方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 68-76.
XU Chongbo, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Stochastic operation optimization method for active distribution networks with soft open point considering risk management and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 68-76.
- [15] 黄子桐, 徐永海, 叶兴杰. 考虑有源配电网运行灵活性的智能储能软开关优化规划[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 143-153.
HUANG Zitong, XU Yonghai, YE Xingjie. Optimal planning of soft open point integrated with energy storage system considering operation flexibility of active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 143-153.
- [16] 朱晓荣, 鹿国微, 谢婉莹. 考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 8-16, 40.
ZHU Xiaorong, LU Guowei, XIE Wanying. Robust planning of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 8-16, 40.
- [17] 谢锋, 刘丽军, 林儒显, 等. 一种考虑风险厌恶程度与阻塞抵抗性的配电网阻塞管理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 107-118.
XIE Feng, LIU Lijun, LIN Ruxian, et al. A distribution network congestion management method considering risk aversion and congestion resistance[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 107-118.
- [18] LI P, YU D, YANG M, et al. Flexible look-ahead dispatch realized by robust optimization considering CVaR of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5330-5340.
- [19] 孙毅, 李飞, 胡亚杰, 等. 计及条件风险价值和综合需求响应的产消者能量共享激励策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2448-2463.
SUN Yi, LI Fei, HU Yajie, et al. Energy sharing incentive

- strategy of prosumers considering conditional value at risk and integrated demand response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2448-2463.
- [20] 王昀, 谢海鹏, 孙啸天, 等. 计及激励型综合需求响应的电-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1926-1934.
WANG Yun, XIE Haipeng, SUN Xiaotian, et al. Day-ahead economic dispatch for electricity-heating integrated energy system considering incentive integrated demand response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1926-1934.
- [21] KHATAMI R, PARVANIA M, NARAYAN A. Flexibility reserve in power systems: definition and stochastic multi-fidelity optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 644-654.
- [22] HUO D, GU C, MA K, et al. Chance-constrained optimization for multienergy subsystems in a smart city[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1402-1412.
- [23] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 66-73.
ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 66-73.
- [24] 赵毅, 王维庆, 闫斯哲. 考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 127-136.
ZHAO Yi, WANG Weiqing, YAN Sizhe. Distributionally robust optimization scheduling of a joint wind-solar-storage system considering step-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 127-136.
- [25] 何鑫, 刘俊勇, 高红均, 等. 计及光伏不确定性和低碳需求响应的工业园区光-储分布鲁棒规划模型[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 69-76.
HE Xin, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Photovoltaic-energy storage distributed robust planning model for industrial parks considering photovoltaic uncertainty and low carbon demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 69-76.
- [26] 林芝羽, 李华强, 苏韵掣, 等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 46-57.
- LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.
- [27] 王洪涛, 邹斌, 张亮. 基于节点传输贡献量的省间联络线潮流近似计算[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 135-140.
WANG Hongtao, ZOU Bin, ZHANG Liang. Approximate calculation of inter-provincial tie-line power flow based on node transmission contribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 135-140.
- [28] 宋宇, 李涵. 基于核密度估计和 Copula 函数的风、光出力场景生成[J]. 电气技术, 2022, 23(1): 56-63.
SONG Yu, LI Han. Typical scene generation of wind and photovoltaic power output based on kernel density estimation and Copula function[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(1): 56-63.
- [29] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Power Engineering Review, 1989, 9(4): 101-102.
- [30] 胡俊杰, 刘雪涛, 王程. 考虑网络约束的能量枢纽灵活性价值评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1799-1813.
HU Junjie, LIU Xuetao, WANG Cheng. Value evaluation of energy hub flexibility considering network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1799-1813.
- [31] 胡戎, 邱晓燕, 张志荣. 计及灵活性资源的交直流混合配电网双层优化[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2259-2268.
HU Rong, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong. Bi-level optimization of AC/DC hybrid distribution network considering flexible resources[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2259-2268.

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-01-03

作者简介:

高万胜(1997—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为高比例可再生能源接入电力系统源荷储协调优化; E-mail: 1399492931@qq.com

蔺红(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定运行控制及新能源并网发电技术等。E-mail: xjulh69@163.com

(编辑 魏小丽)