

计及热惯性的热电联产虚拟电厂韧性提升策略

于松源¹, 张峻松¹, 元志伟², 房方^{1*}

- (1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京市 昌平区 102206;
2. 西安热工研究院有限公司, 陕西省 西安市 710061)

Resilience Enhancement Strategy of Combined Heat and Power-Virtual Power Plant Considering Thermal Inertia

YU Songyuan¹, ZHANG Junsong¹, YUAN Zhiwei², FANG Fang^{1*}

- (1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710061, Shaanxi Province, China)

摘要: 日益频繁的极端天气给电热耦合系统造成的影响愈发严重。韧性是衡量系统抵御极端事件、减少故障影响并快速恢复的核心指标。为提升电热耦合系统抵御极端灾害的能力, 提出一种考虑热惯性的热电联产虚拟电厂(combined heat and power-virtual power plant, CHP-VPP)两阶段三层韧性提升策略。第一阶段以联络开关成本最小为目标, 基于最小生成树理论对系统进行重构; 第二阶段以运行成本最小为目标, 基于分布鲁棒优化理论制定最恶劣的故障场景下的最优决策。采用列与约束生成算法进行迭代求解。基于IEEE 33节点电力系统+6节点供热系统构建CHP-VPP测试系统, 仿真结果表明, 所提出的方法可有效提升CHP-VPP应对极端灾害的韧性。

关键词: 热电联产虚拟电厂(CHP-VPP); 热惯性; 分布鲁棒; 韧性提升; 极端灾害; 电热耦合系统

ABSTRACT: The increasingly frequent extreme weather has a more serious impact on the electro-thermal coupling system. Resilience is a core indicator that measures the system's ability to withstand extreme events, reduce the impact of failures, and recover quickly. To enhance the ability of the electro-thermal coupling system to withstand extreme disasters, a two-stage three-layer resilience enhancement strategy of combined heat and power-virtual power plant (CHP-VPP) considering thermal inertia was proposed. In the first stage, the system was reconstructed based on the minimum spanning tree theory with the goal of minimizing the cost of tie switches. In the second stage, aiming at minimizing the operating cost, the optimal

decisions under the worst failure scenario was formulated based on distributionally robust optimization theory. The column and constraint generation algorithm was used for iterative solutions. A CHP-VPP test system was built based on an IEEE 33-bus system and a 6-node thermal system. The simulation results show that the proposed method can effectively enhance the resilience of CHP-VPP to cope with extreme disasters.

KEY WORDS: combined heat and power-virtual power plant (CHP-VPP); thermal inertia; distributionally robust; resilience enhancement; extreme disaster; electro-thermal coupling system

0 引言

为了应对极端天气对电力能源系统带来的不利影响, IEEE电力和能源社会工作组针对电网、热网等关键能源基础设施提出了“韧性”的概念^[1]。韧性表征系统抵御极端事件破坏, 吸收、适应并于事后快速恢复的能力^[2]。在建设新型电力系统的大背景下, 电力系统和热力系统耦合程度不断加深^[3-5]。热电联产虚拟电厂(combined heat and power-virtual power plant, CHP-VPP)^[6]作为一种新兴的具有高度灵活性和适应性的电热耦合系统, 机组布局分散、高度可控, 在信息和通信技术支持下可实现电热能量的协同管理, 为系统应对极端灾害提供了可能^[7]。如何通过CHP-VPP的热电特性协调能源的分配利用, 从而提升系统韧性, 是当前学术界关注的焦点。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52176005)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52176005).

韧性提升策略主要侧重于基础设施的投资和灵活性资源的整合^[8-10],然而,设备线路故障、可再生能源出力等诸多不确定性因素影响最优决策的制定。目前,大部分韧性提升策略研究采用随机规划^[11-12]和鲁棒优化^[13-15]。文献[16]考虑全时段不确定性影响,基于随机响应面法构建了混合整数二阶锥规划随机优化故障恢复模型,最大程度地减少了停电损失。文献[17]应用鲁棒优化的方法提出了综合能源系统在极端天气下的韧性提升模型,实现了系统韧性的提升。随机规划引入了不确定参数的概率密度函数,但其无法精确描述概率分布,且在进行大量的场景计算时会造成求解困难;鲁棒优化是在最恶劣情况下的最优出力计划,比随机优化求解效率更高,但不确定集的选择具有主观性,决策相对保守^[18]。分布鲁棒优化^[19]结合了随机规划和鲁棒优化的优点,既解决了概率分布无法精确描述的问题,同时又避免了最优解的过度保守。文献[20]提出了一种基于分布鲁棒优化的车-站-网能量管理与交易方法,构建了以多主体各自利益最大为目标的Wasserstein分布鲁棒互动博弈模型。文献[21]建立了基于典型场景的VPP-配电网分布鲁棒优化调度模型,解决了可再生能源出力及负荷不确定性的问题。然而,在当前研究中,分布鲁棒优化大多应用于优化调度方面,在提升系统韧性方面的研究还比较少。

由于CHP-VPP中供热管道、建筑物等热力元件中热能传输速度慢、惯性大,负荷侧温度变化相较于热能供给端具有一定的迟延,这种热能传输特性赋予了供热系统被动储热的能力,如果加以有效利用,将会降低系统的运行成本^[22]。文献[23]建立了考虑热惯性的两阶段鲁棒优化调节模型,较好地兼顾了运行效率与稳定性。文献[24]构建了传输侧与负荷侧惯性影响下用户温度动态响应的多时间耦合特征双层模型,实现了可再生能源消纳并兼顾了用户用能体验。文献[25]提出一种考虑供热系统多重热惯性的电热联合协调优化策略,有效降低了电热耦合强度,提高了系统的灵活性和经济性。因此,当面临极端灾害时,可以利用热惯性特性提升电热协调互补能力^[26],

促使系统快速恢复供能,减少切负荷,提高系统韧性。然而,现有关于热惯性的研究集中在系统建模、运行优化方面,未充分挖掘热惯性在系统韧性提升方面的作用。

综上所述,本文提出了考虑热惯性的CHP-VPP两阶段分布鲁棒韧性提升策略。第一阶段基于最小生成树理论对系统进行网络重构,制定联络开关通断计划,第二阶段是在最恶劣的故障场景下最小化系统成本。针对具有min-max-min形式的非凸、非线性优化问题,采用列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法进行迭代求解,并通过算例对比分析验证所提方法的优越性。

1 CHP-VPP两阶段韧性提升策略

传统单一能量系统的重构由于受到负荷分布及分布式电源出力的限制,系统供能恢复水平有限。CHP-VPP由热电联产(combined heat and power, CHP)、光伏(photovoltaic, PV)、风机(wind turbine, WT)、热泵(heat pump, HP)等构成,不同于单一能量系统,CHP-VPP中电热负荷可由异质子系统供给,实现能量转供,且CHP机组等耦合元件可调整电热出力,为CHP-VPP提供电源支撑,优化系统运行状态,进而提升CHP-VPP负荷恢复水平。

为了提升CHP-VPP在应对极端天气时的容灾能力,本文将CHP-VPP韧性提升策略按时序划分为抵御-响应-恢复3层,如图1所示。在抵御层,CHP-VPP制定联络开关通断计划,当极端天气使传输线路中断时,作为中断线路的冗余线路,在符合配电网“闭环设计,开环运行”的原则下,提供整个系统能量可冗余流通路径。在响应层,最大化考虑极端天气对CHP-VPP的预期破坏,即选择最严重的故障概率分布情景,进而使最终的调度决策适应于所有故障情况。在恢复层,以开关通断成本、切负荷成本和机组运行成本最小为目标函数,对各机组出力值、消纳风光发电量以及切电负荷、热负荷等情况做出决策。

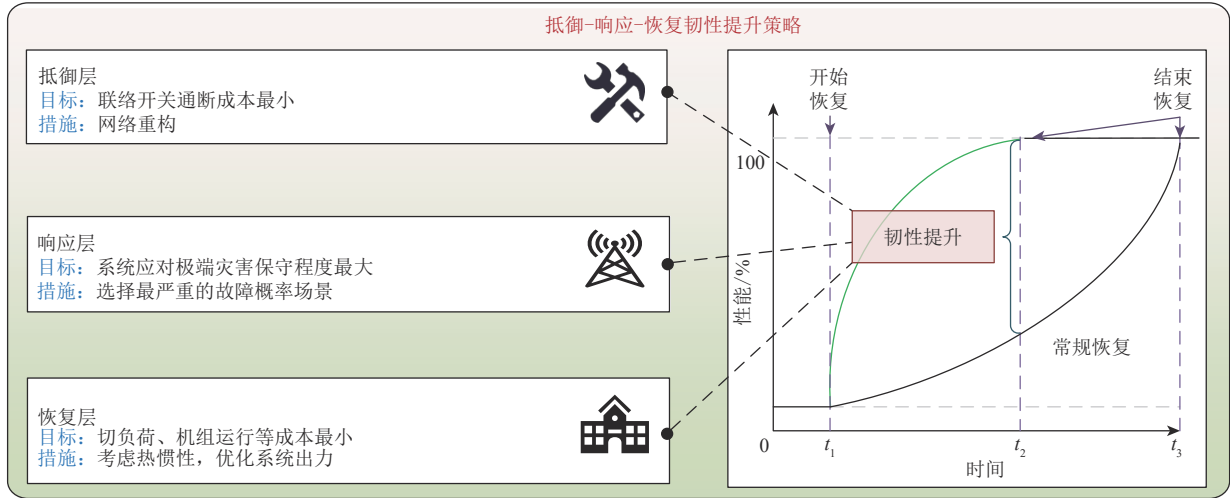


图1 CHP-VPP韧性提升策略

Fig. 1 Resilience enhancement strategy of CHP-VPP

2 CHP-VPP 分布鲁棒韧性提升模型

2.1 CHP-VPP韧性提升目标函数

本文定义CHP-VPP的韧性指标为系统应对极端天气过程所产生的总成本。CHP-VPP韧性提升策略旨在最大限度地保障最恶劣天气下系统负荷的持续供应。CHP-VPP两阶段三层韧性提升模型的目标函数表示如下：

$$F = \min_{\Theta^1} \sum_t \sum_k (r_t^{\text{op}} z_{t,k}^{\text{op}} + r_t^{\text{cl}} z_{t,k}^{\text{cl}}) + \max_{\Theta^2} \sum_r P_r \times \min_{\Theta^3} \sum_t (r_t^{\text{pcl}} P_t^{\text{cl}} + r_t^{\text{hcl}} H_t^{\text{cl}} + \frac{860 r_t^{\text{cl}} P_t^{\text{CHP}}}{H_t^{\text{cl}}}) \quad (1)$$

$$\Theta^1 = \{z_{t,k}^{\text{op}}, z_{t,k}^{\text{cl}}\} \quad (2)$$

$$\Theta^2 = \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (3)$$

$$\Theta^3 = \{P_t^{\text{cl}}, H_t^{\text{cl}}, P_t^{\text{CHP}}, H_t^{\text{CHP}}, P_t^{\text{HP}}, P_t^{\text{esc}}, P_t^{\text{esd}}\} \quad (4)$$

式中： r_t^{op} 、 r_t^{cl} 分别表示 t 时刻联络开关断开和闭合成本； $z_{t,k}^{\text{op}}$ 、 $z_{t,k}^{\text{cl}}$ 分别表示 t 时刻第 k 个联络开关的状态， $z_{t,k}^{\text{op}}=1$ 表示开关断开， $z_{t,k}^{\text{cl}}=1$ 表示开关闭合； r_t^{pcl} 、 r_t^{hcl} 分别表示 t 时刻切电负荷成本系数和切热负荷成本系数； Θ^1 、 Θ^2 、 Θ^3 分别表示 t 时刻各阶段的决策变量集合； p_r 表示线路故障场景为 r 时的概率； P_t^{cl} 、 H_t^{cl} 分别表示 t 时刻切电负荷和切热负荷； P_t^{CHP} 、 H_t^{CHP} 分别表示 t 时刻CHP的电功率和热功率； P_t^{HP} 表示 t 时刻HP机组的耗电功率； P_t^{esc} 、 P_t^{esd} 分别表示 t 时刻蓄电池充、放电功率。

2.2 抵御层约束条件

为保证供电可靠性，对模型进行网络重构时运行方式必须满足辐射状运行的条件。采用Prim

算法^[27]搜索最小生成树，其数学公式表示如下：

$$\sum_{ij \in \Phi_e} x_{ij} = n_{\text{Total}} - n_{\text{Tree}} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (ij) \in \Phi_e \quad (6)$$

式中： x_{ij} 表示节点 i 到 j 的线路连接状态，当 $x_{ij}=1$ 时，节点 i 、 j 之间的线路为连接状态； n_{Total} 、 n_{Tree} 分别为节点总数和根节点数； Φ_e 表示电网络路集合。

2.3 恢复层约束条件

2.3.1 电网约束

1) 电功率平衡约束如下：

$$P_{i,t}^{\text{CHP}} - P_{i,t}^{\text{HP}} + P_{i,t}^{\text{G}} + P_{i,t}^{\text{C}} + P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{PV}} - P_{i,t}^{\text{LOAD}} + P_{i,t}^{\text{cl}} - P_{i,t}^{\text{esc}} + P_{i,t}^{\text{esd}} = \sum_{j \in Y_{pe}^i} P_{j,t} \quad (7)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{CHP}}$ 为 t 时刻节点 i 连接的CHP的电功率； $P_{i,t}^{\text{HP}}$ 为 t 时刻节点 i 连接的HP消耗的电功率； $P_{i,t}^{\text{cl}}$ 为 t 时刻节点 i 的切电负荷； $P_{i,t}^{\text{esc}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{esd}}$ 分别为 t 时刻节点 i 连接的蓄电池的充、放电功率； $P_{i,t}^{\text{G}}$ 表示 t 时刻连接电网的节点 i 与电网交互功率； $P_{i,t}^{\text{C}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别表示 t 时刻节点 i 连接的常规发电、风电和光伏机组出力； $P_{i,t}^{\text{LOAD}}$ 表示 t 时刻节点 i 的电负荷； $P_{j,t}$ 表示 t 时刻线路 ij 传输的功率； Y_{pe}^i 为与节点 i 连接的所有节点集合。

2) 传输功率与相角约束如下：

$$P_{ij,t}^{\text{min}} z_{ij,t} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,t}^{\text{max}} z_{ij,t} \quad (8)$$

$$P_{ij,t} = B_{ij} (\gamma_{i,t} - \gamma_{j,t}) \quad (9)$$

$$\gamma_{i,t}^{\text{min}} \leq \gamma_{i,t} \leq \gamma_{i,t}^{\text{max}} \quad (10)$$

式中： $P_{ij,t}^{\max}$ 、 $P_{ij,t}^{\min}$ 分别为 t 时刻线路 ij 传输功率的上、下限； B_{ij} 为线路 ij 上的导纳； $\gamma_{i,t}$ 、 $\gamma_{j,t}$ 分别为 t 时刻与节点 i 、 j 连接线路的相角大小； $\gamma_{i,t}^{\max}$ 、 $\gamma_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时刻与节点 i 连接线路相角的上、下限。

3) 与上层电网交易约束为

$$-P_{i,t}^{G,\max} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,t}^{G,\max} \quad (11)$$

式中 $P_{i,t}^{G,\max}$ 表示 t 时刻连接电网的节点 i 与电网交互功率的上限，因故障发生后不能无限制地与电网进行交互，因此必须限制在一定范围内。

4) 节点电压与线路电流约束如下：

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (12)$$

$$I_{ij,t} \leq I_{ij,\max} \quad (13)$$

式中： U_i 表示节点 i 的电压； $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为 U_i 的上、下限； $I_{ij,t}$ 表示 t 时刻线路 ij 的电流； $I_{ij,\max}$ 为 t 时刻线路 ij 电流的上限。

2.3.2 机组运行约束

1) CHP 机组运行区间约束为

$$\begin{cases} P^{\min} - c_n H_t^{\text{CHP}} \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P^{\max} - c_v H_t^{\text{CHP}} \\ 0 \leq H_t^{\text{CHP}} \leq H^{\text{med}} \\ P^{\min} + c_m (H_t^{\text{CHP}} - H^{\text{med}}) \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P^{\max} - c_v H_t^{\text{CHP}} \\ H^{\text{med}} \leq H_t^{\text{CHP}} \leq H^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中： H^{\max} 表示CHP热出力最大值； P^{\min} 、 P^{\max} 分别表示CHP电出力最小值和最大值； H^{med} 、 c_m 、 c_n 和 c_v 均为CHP机组运行区间常数。

2) CHP 机组爬坡率约束为

$$-C_t^{\text{down}} \leq P_t^{\text{CHP}} - P_{t-1}^{\text{CHP}} \leq C_t^{\text{up}} \quad (15)$$

式中 C_t^{up} 和 C_t^{down} 分别表示CHP机组向上和向下的爬坡率^[28]。

3) HP 出力约束为

$$\begin{cases} H_t^{\text{HP}} = \eta_{\text{HP}} P_t^{\text{HP}} \\ 0 \leq P_t^{\text{HP}} \leq P_t^{\text{HP},\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中： H_t^{HP} 为 t 时刻HP的热功率； η_{HP} 表示HP电热转换效率； $P_t^{\text{HP},\max}$ 表示 t 时刻HP输入功率上限。

4) 蓄电池约束如下：

$$S_{\text{OC},t}^{\text{PESS}} = S_{\text{OC},t-1}^{\text{PESS}} + \eta_{\text{esc}} P_t^{\text{esc}} - \frac{P_t^{\text{esd}}}{\eta_{\text{esd}}} \quad (17)$$

$$S_{\text{OC},t}^{\text{PESS},\min} \leq S_{\text{OC},t}^{\text{PESS}} \leq S_{\text{OC},t}^{\text{PESS},\max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{\text{esc}} \leq P_t^{\text{esc},\max} \quad (19)$$

$$0 \leq P_t^{\text{esd}} \leq P_t^{\text{esd},\max} \quad (20)$$

式中： $S_{\text{OC},t}^{\text{PESS}}$ 表示 t 时刻蓄电池容量； η_{esc} 、 η_{esd} 分别

表示蓄电池充、放电效率^[29]； $S_{\text{OC},t}^{\text{PESS},\max}$ 、 $S_{\text{OC},t}^{\text{PESS},\min}$ 分别表示 t 时刻蓄电池容量上、下限； $P_t^{\text{esc},\max}$ 、 $P_t^{\text{esd},\max}$ 分别表示 t 时刻充、放电功率上限。

2.3.3 热网约束

1) 热功率平衡约束

为了保证供热侧热功率的供需平衡，其约束为

$$H_t^{\text{CHP}} + H_t^{\text{HP}} = H_t^s - H_t^{\text{cl}} \quad (21)$$

式中 H_t^s 表示 t 时刻热负荷。

2) 供热管网热传输延迟

基于改进的节点法对一次热网热水传输延迟进行建模，热传输延迟 t_{delay} 相当于热水从管道入口到管道出口流过的时间，用积分表示为

$$\int_t^{t+t_{\text{delay}}} \frac{m_g}{\pi \rho_w} \left(\frac{2}{D_g} \right)^2 = L_g \quad (22)$$

式中： D_g 、 L_g 分别为管道 g 的直径和长度； m_g 为管道 g 中水的质量流量； ρ_w 为热水的密度。本文热水调节方式采用质调节，求解式(22)得到传输延迟时间为

$$t_{\text{delay}} = \left(\frac{D_g}{2} \right)^2 \frac{\pi \rho_w L_g}{m_g} \quad (23)$$

为使模型简化，将延迟时间与调度时间的整数倍相匹配，将管道出口温度分成两部分^[30]，并计算这两部分之和，如式(24)所示。同时，对 $(t_{\text{delay}}/\Delta t)$ 进行取整，将延迟时间分成 $(t_{\text{delay}}/\Delta t) - [t_{\text{delay}}/\Delta t]$ 和 $[t_{\text{delay}}/\Delta t]$ 两部分。管道 g 的出口温度 $T_{t,g}^{\text{out}}$ 表示如下：

$$T_{t,g}^{\text{out}} = \lambda_1 T_{[t-t_{\text{delay}}],g}^{\text{out}} + \lambda_2 T_{[t-t_{\text{delay}}]+1,g}^{\text{out}} \quad (24)$$

$$\lambda_1 = \frac{t_{\text{delay}}}{\Delta t} - \left[\frac{t_{\text{delay}}}{\Delta t} \right] \quad (25)$$

$$\lambda_2 = \left[\frac{t_{\text{delay}}}{\Delta t} \right] + 1 - \frac{t_{\text{delay}}}{\Delta t} \quad (26)$$

式中： λ_1 、 λ_2 为权重系数； $[\cdot]$ 为取整函数； Δt 为一个调度周期。

3) 供热管网热传输损耗

供热管网埋在土壤之中，与周围环境存在温度差，因此在能量传输过程中会与周围环境发生热交换，从而损失一部分热能^[31]。本文忽略管内热水沿着管道纵向方向温度变化，建立横向方向温度变化的模型^[32]，该模型的偏微分方程可表示为

$$\frac{dT_{t,g}^d}{dt} + \frac{4m_g}{\pi\rho_w D_g^2} \times \frac{dT_{t,g}^d}{dx_g} + \frac{4\mu_g}{c_w \rho_w D_g} (T_{t,g}^d - T_{t,g}^{\text{soil}}) = 0 \quad (27)$$

式中： $T_{t,g}^d$ 为 t 时刻管道 g 距离出口 d 处的平均温度； $T_{t,g}^{\text{soil}}$ 为 t 时刻管道 g 周围环境土壤的平均温度； μ_g 为管道 g 的热损失系数； c_w 为水的比热容； x_g 为管道 g 的横向方向。

求解式(27)，得到管道出口温度与入口温度关系表达式为

$$T_{t,g}^{\text{out}} = (T_{t,g}^{\text{in}} - T_{t,g}^{\text{soil}}) e^{-\frac{4\mu_g}{c_w \rho_w D_g} \Delta t} + T_{t,g}^{\text{soil}} \quad (28)$$

式中 $T_{t,g}^{\text{in}}$ 为 t 时刻管道 g 的入口温度。结合式(24)和(28)，可得到管道出口温度为

$$T_{t,g}^{\text{out}} = \lambda_1 \left[(T_{[t-t_{\text{delay}]},g}^{\text{in}} - T_{t,g}^{\text{soil}}) e^{-\frac{4\mu_g}{c_w \rho_w D_g} \Delta t} + T_{t,g}^{\text{soil}} \right] + \lambda_2 \left[(T_{[t-t_{\text{delay}]+1},g}^{\text{in}} - T_{t,g}^{\text{soil}}) e^{-\frac{4\mu_g}{c_w \rho_w D_g} \Delta t} + T_{t,g}^{\text{soil}} \right] \quad (29)$$

4) 建筑物惯性建模

本文考虑的建筑物热惯性主要为建筑物围护结构热损失和冷风渗透热损失：建筑物围护结构热损失是指围护结构通过热辐射、热对流等与外界低温环境进行热交换造成的损失；冷风渗透热损失是指外界冷风通过门缝、窗户等进入室内，导致室内温度降低从而造成的热损失。

建筑物热动态特性^[33]可表示如下：

$$c_b \frac{dT_{t,b}^{\text{in}}}{dt} = H_t^s - H_t^{\text{loss}} \quad (30)$$

$$H_t^s = c_w m_w (T_t^s - T_t^r) \quad (31)$$

$$H_t^{\text{loss}} = H_t^{\text{wh}} + H_t^{\text{st}} \quad (32)$$

式中： c_b 为建筑物比热容； m_w 为连接散热器的热网供水质量流量； $T_{t,b}^{\text{in}}$ 为 t 时刻建筑物室内温度； H_t^{loss} 、 H_t^{wh} 和 H_t^{st} 分别为 t 时刻总的热损失、围护热损失和冷风渗透热损失； T_t^s 、 T_t^r 分别为 t 时刻连接散热器的管网供、回水温度。

围护结构热损失包含与外界进行热交换的热损失及修正热损失，其中修正热损失包括高度附加修正、风力附加修正和朝向修正热损失，围护结构热损失 H_t^{wh} 可表示为

$$H_t^{\text{wh}} = \ell_b \mu_b S_b (T_{t,b}^{\text{in}} - T_{t,b}^{\text{out}}) (1 + x_{\text{hei}}) (1 + x_{\text{ori}} + x_{\text{wd}}) \quad (33)$$

式中： ℓ_b 、 μ_b 、 S_b 分别表示围护结构的温差修正系数、热传导系数、面积； x_{hei} 、 x_{ori} 、 x_{wd} 分别表示建筑高度附加修正率、朝向修正率、风力附

加修正率； $T_{t,b}^{\text{out}}$ 表示建筑物室外温度。

冷风渗透热损失使用缝隙法计算，其原理为根据进入室内的冷空气的风压和热压来计算热损失。缝隙法计算热损失表示为

$$H_t^{\text{st}} = 0.278 \rho_{\text{air}} c_{\text{air}} V_b (T_{t,b}^{\text{in}} - T_{t,b}^{\text{out}}) \quad (34)$$

式中： ρ_{air} 、 c_{air} 分别表示空气的密度和比热容； V_b 表示建筑物室内面积。

综合式(30)–(34)，通过向后差分法，可得到如下关系表达式：

$$T_{t,b}^{\text{in}} = a_1 T_{t-1,b}^{\text{in}} + a_2 T_t^s + a_3 T_t^r + a_4 T_{t,b}^{\text{out}} \quad (35)$$

式中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别为室内温度、供水温度、回水温度、室外温度对当前室温的影响因子。

为保证室内用户舒适度，室内温度应该保持在如下范围内：

$$T_{t,b}^{\text{in},\text{min}} \leq T_{t,b}^{\text{in}} \leq T_{t,b}^{\text{in},\text{max}} \quad (36)$$

式中 $T_{t,b}^{\text{in},\text{max}}$ 、 $T_{t,b}^{\text{in},\text{min}}$ 分别为 t 时刻室内温度的上、下限。

2.4 两阶段韧性提升模型求解

2.4.1 两阶段韧性提升模型

为方便表达，将所提出的两阶段韧性提升模型以矩阵形式描述如下：

$$F = \min_{\mathbf{x}} \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \max_{p_r \in U} \sum_{r=1}^R p_r \min_{\mathbf{y}_r \in \Omega(\mathbf{x}, \mathbf{u})} \mathbf{b}^T \mathbf{y}_r \quad (37)$$

式中： \mathbf{x} 为第一阶段决策变量向量； U 为描述线路故障的分布鲁棒模糊集； \mathbf{u} 为不确定性参数向量； \mathbf{b} 、 \mathbf{c} 均为系数向量； \mathbf{y}_r 为线路故障场景为 r 时的第二阶段决策变量向量，如式(4)所示； R 为场景总数，即目标函数式(1)中的 \max 项。

1) 模型抵御层约束为

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{d}, \mathbf{x} \in S_x \quad (38)$$

式中： \mathbf{A} 、 \mathbf{d} 分别为系数向量、系数矩阵； S_x 为决策变量向量 \mathbf{x} 的集合。该式包括式(5)和(6)。

2) 模型响应层约束为

$$U = \left\{ \{p_r\} \left| \begin{array}{l} p_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, R \\ \sum_{r=1}^R p_r = 1 \\ \sum_{r=1}^R |p_r - p_r^0| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq r \leq R} |p_r - p_r^0| \leq \theta_\infty \end{array} \right. \right\} \quad (39)$$

式中： p_r^0 为随机变量初始概率，如式(3)所示； θ_1 、 θ_∞ 分别为 L_1 范数和 L_∞ 范数下的概率允许偏差值。

3) 模型恢复层约束为

$$\Omega(x, u) = \{Dy_r \geq H - Ex - Mu, y_r \in S_y\} \quad (40)$$

式中: S_y 为决策变量向量 y_r 的集合; D 、 H 、 E 、 M 均为系数矩阵。该式包括式(7)–(21)、(24)–(26)、(28)、(29)、(35)、(36)。

2.4.2 模糊集线性化

由于模糊集范数约束中含有绝对值, 为方便求解, 将其转化为线性约束。引入 p_r^+ 和 p_r^- 来分别表示 p_r 相对于 p_r^0 的正偏移量和负偏移量; 引入 l^+ 和 l^- 来分别表示 L_1 范数的正偏移和负偏移标志; 引入 s^+ 和 s^- 来分别表示 L_∞ 范数的正偏移和负偏移标志。此时式(39)中 L_1 范数和 L_∞ 范数约束可重新表示为

$$\begin{cases} p_r = p_r^0 + p_r^+ - p_r^- \\ \sum_{r=1}^R (p_r^+ - p_r^-) \leq \theta_1 \\ l^+ + l^- \leq 1 \\ 0 \leq p_r^+ \leq l^+ \theta_1 \\ 0 \leq p_r^- \leq l^- \theta_1 \\ p_r^+ - p_r^- \leq \theta_\infty \\ s^+ + s^- \leq 1 \\ 0 \leq p_r^+ \leq s^+ \theta_\infty \\ 0 \leq p_r^- \leq s^- \theta_\infty \end{cases} \quad (41)$$

2.4.3 基于C&CG算法的求解策略

所构建的CHP-VPP两阶段分布鲁棒韧性提升模型具有3层结构, 本文将整个模型划分为主问题和子问题。主问题描述如下:

$$\min_{x, \zeta} c^T x + \zeta \quad (42)$$

$$\begin{cases} Ax = d \\ \zeta \leq \sum_{r=1}^R p_r (b^T y_{r,l}), \forall l \in O \\ Dy_{r,l} \geq H - Ex - Mu, \forall l \leq v \\ x \in S_x, y_{r,l} \in S_y, \forall l \leq v \end{cases} \quad (43)$$

式中: ζ 为辅助变量; $y_{r,l}$ 为第 r 个场景第 l 次迭代新添加的决策变量, $l=1, 2, \dots, v$, 其中 v 为最大迭代次数; O 为解空间, 初始值为空集, 下一次迭代后 $O = O \cup \{v+1\}$; u_* 为最恶劣场景。

由于子问题各场景之间相互独立, 子问题描述如下:

$$\max_{p_r \in U} \sum_{r=1}^R p_r \min_{y_r \in \Omega(x, u)} b^T y_r \quad (44)$$

$$Dy_r \geq H - Ex - Mu \quad (45)$$

基于并行运算策略, 令 $Q(r) = \min_{y_r \in \Omega(x, u)} b^T y_r$, 求解后得到 $Q(r)^*$, 上述子问题可以转化为:

$$\max_{p_r \in U} \sum_{r=1}^R p_r Q(r)^* \quad (46)$$

$$\begin{cases} Q(r)^* = \arg \min_{y_r \in \Omega(x, u)} b^T y_r \\ Dy_r \geq H - Ex - Mu \end{cases} \quad (47)$$

求解式(46)和式(47)后, 可得最恶劣故障概率分布, 结合主问题, 采用C&CG算法^[26]可直接进行迭代求解。

3 算例分析

3.1 系统参数

为验证所提出方法的有效性, 将两阶段分布鲁棒韧性提升策略应用在IEEE-33节点电力系统+6节点供热系统中, 如图2所示。按照《供电系统设计规范》^[34]划分电、热负荷等级, 其中E2、E3、E5、E6、E9、E15、E18、E25、E33、H1、H2为一级负荷; E8、E10、E13、E14、E16、E19、E23、E26、E28、E31、E32、H3为二级负荷; 其余为三级负荷。选择典型日的电热负荷、风光出力及室外温度数据进行模拟, 如图3所示。建筑物室温允许波动范围为18~22℃, 各机组参数详见文献[35]。

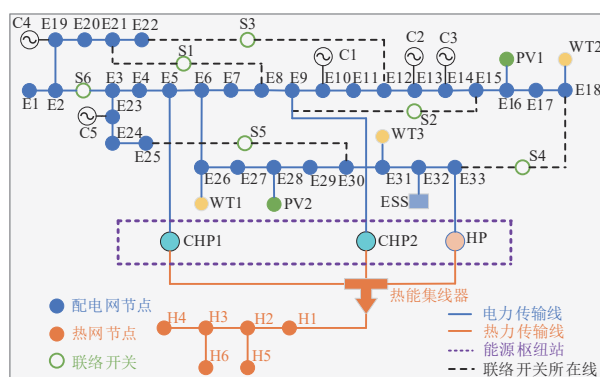


图2 CHP-VPP测试系统框架

Fig. 2 CHP-VPP test system framework

3.2 仿真结果

3.2.1 决策结果

假设CHP-VPP在06:00发生故障, 故障持续4h, $\theta_1=0.5$, $\theta_\infty=0.99$, 此时主问题和子问题均为线性模型, 使用Yalmip工具箱调用Cplex求解器进行求解即可。

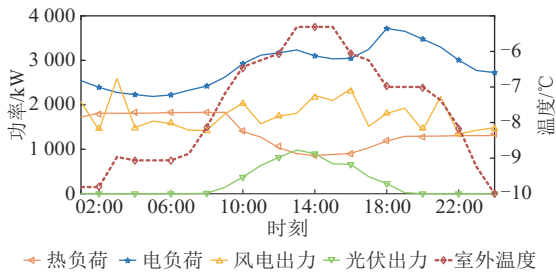


图3 电热负荷、风光出力及室外温度情况

Fig. 3 Electric load, heat load, wind output, solar output and outdoor temperature

在故障发生前，CHP-VPP充分利用联络开关进行网络重构，增加联络开关操作，不断拓展电力传输线路的传输路径，联络开关状态如图4所示。

基于分布鲁棒优化的CHP、HP、电池的出力情况如图5所示，常规机组出力如图6所示。在故障发生的06:00—10:00，CHP机组电出力和热出力增加，HP出力减少，以提高系统供电能力，保证切负荷损失达到最小。

需要说明的是，调度时间为10:00时，连接在节点19处的常规发电机组1出力上升，连接在节点23处的常规发电机组2出力下降，如图7所示。这是因为此时连接在31节点处的可利用的风电场功率上升，为促进风资源消纳，风电场增加出力，通过节点31→30→25→24→23的传输线路传递至

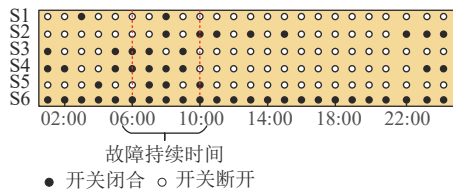


图4 基于分布鲁棒优化的联络开关状态

Fig. 4 State of interconnection switch based on the distributionally robust optimization

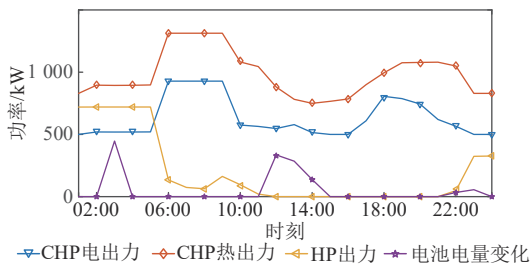


图5 基于分布鲁棒优化的CHP、HP和电池出力情况

Fig. 5 CHP, HP and battery output based on distributionally robust optimization

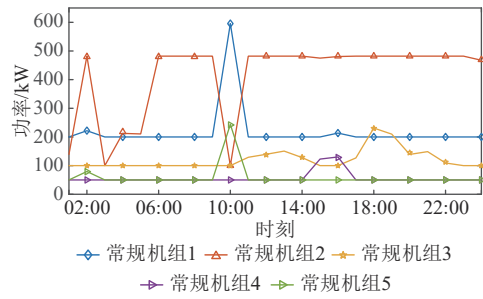


图6 基于分布鲁棒优化的常规机组出力情况

Fig. 6 Conventional units output based on the distributionally robust optimization

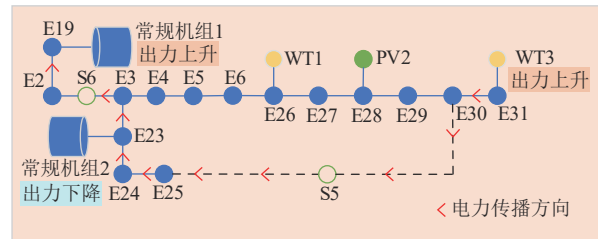


图7 电力节点局部放大图

Fig. 7 Partial enlarged view of power nodes

23节点，从而导致常规发电机组2出力下降，进而导致线路23→3→2→19传输到节点19的电功率下降，因此，常规发电机组1需要增加出力以使节点19能量平衡。

为了分析热惯性对CHP-VPP决策结果的影响，设置了不考虑热惯性的对比实验，实验的室内温度限制在20℃。热惯性对CHP-VPP各项成本的影响如表1所示。

由表1可以看出，当考虑建筑物热惯性时，CHP运行成本、HP运行成本、切负荷成本、总成本均大大减小，弃风光率下降到5.02%。这是因为热惯性具有延迟特性，且人体舒适度可以在一定范围内波动，因此不要求热负荷保持实时平衡，而是维持在动态范围内即可，由此增加了系统的调度灵活性，使得在风光出力峰值时减少机组的运行功率，提高风光的消纳水平，降低在故障期间的切负荷成本。

表1 热惯性对CHP-VPP各项成本的影响情况

Tab. 1 Impact of thermal inertia on the cost of CHP-VPP

热惯性	CHP运行成本/元	HP运行成本/元	切负荷成本/元	总成本/元	弃风光率/%
有	4 516	556	25 523	30 595	5.02
无	4 723	603	32 132	37 458	12.62

3.2.2 不同置信水平对比分析

当置信水平不同时，模型的概率允许偏差值 θ_1 、 θ_∞ 也不同。计算 θ_1 在[0.2, 0.8]波动， θ_∞ 在[0.5, 0.99]波动时的分布鲁棒优化总成本，结果如表2所示。

表2 不同置信水平下系统总成本

Tab. 2 Total cost of the system at different confidence levels 元

θ_1	θ_∞		
	0.5	0.8	0.99
0.2	28 923	29 035	29 381
0.4	28 927	29 119	29 572
0.6	29 012	29 290	29 966
0.8	29 014	29 317	30 923

从表2可以看出，随着置信度 θ_1 和 θ_∞ 的增大，系统的总成本增加。这是因为置信度的增大导致概率允许偏差值增大，使不确定范围增大，系统为满足最恶劣情况下的安全稳定运行，增加了机组出力，减少了可再生能源的消纳，因此各项成本增加，造成总成本增加。

3.2.3 不同优化方法对比分析

为了比较不同优化方法的影响，选取了确定性优化方法作为对比。以分布鲁棒优化和确定性优化2种方法各自所获得的联络开关状态为基础，选取导致线路7—8、线路3—4、线路16—17故障的3个极端天气场景，计算失负荷量及机组运行成本。2种优化方法得到的联络开关状态分别如图4和图8所示。对比可知，确定性优化方法由于未考虑极端天气来临时的线路故障状态，联络开关在故障持续时间内不会提前动作，开关状态主要受到可再生能源出力及负荷需求影响。

进一步，本文选用切负荷成本来表征系统韧性。表3对比了分布鲁棒优化和确定性优化2种方法在3个场景下的切负荷成本及机组运行成本情

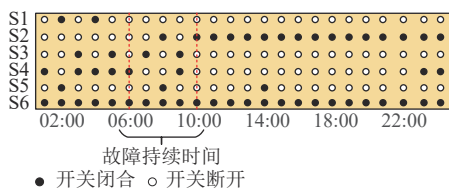


图8 基于确定性优化方法的联络开关状态

Fig. 8 State of interconnection switch based on deterministic optimization method

表3 3种极端情况下机组运行成本及切负荷成本情况

Tab. 3 Unit operating costs and load shedding costs under three extreme scenarios

方法	故障线路	成本/元			
		CHP运行	HP运行	切负荷	总计
分布鲁棒优化	7—8	3 823	582	0	4 405
	16—17	4 516	556	25 523	30 595
	3—4	4 021	609	0	4 630
确定性优化	7—8	3 547	436	12 184	12 582
	16—17	4 399	624	37 347	37 849
	3—4	3 547	436	12 184	12 582

况。可知，确定性优化方法忽略了线路故障的影响，任意一条线路的断开都导致了大量切负荷情况发生，使切负荷成本大大提高，严重影响了CHP-VPP的安全稳定运行。相比之下，分布鲁棒优化方法考虑到线路故障，提前制定了联络开关通断策略，增大了机组出力，使得系统在线路7—8及线路3—4断开的情况下，切负荷成本为0，在线路16—17断开时减少了切负荷成本，3种情况下系统总成本均较低，由此证明了所提出的基于分布鲁棒优化的韧性提升策略的有效性。

4 结论

提出了CHP-VPP两阶段分布鲁棒韧性提升策略，第一阶段以联络开关通断为决策变量，在极端天气来临前进行网络重构，第二阶段在最恶劣场景下制定出力计划，充分利用各种灵活性资源，制定最优出力计划，并采用C&CG算法进行迭代求解。通过在IEEE-33节点电力系统+6节点供热系统上进行算例分析，得到如下结论：

1) CHP-VPP韧性提升策略加入对热惯性的考虑，不仅减少了极端天气下系统切负荷损失，降低了系统运行成本，还提高了风光消纳水平，增加了系统的调度灵活性。

2) 置信度影响分布鲁棒模糊集的置信区间，置信度越高，场景的概率允许偏差值越大。CHP-VPP系统为满足最恶劣情况下的安全稳定运行，增加了机组出力，减少了可再生能源的消纳，从而使总成本增加。

3) 基于分布鲁棒优化的韧性提升方法提前制定了联络开关通断策略，降低了CHP、HP等机组

的运行成本, 减少了系统的切负荷量, 提升了系统极端天气下的韧性。

参考文献

- [1] STANKOVIC A, TOMSOVIC K. The definition and quantification of resilience[J]. IEEE PES Industry Technical Support Task Force, 2018: 1-4.
- [2] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
CHEN L, DENG X Y, CHEN H K, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [3] 黄宇箴, 陈彦奇, 吴志聪, 等. 碳中和背景下热电联产机组抽汽分配节能优化[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 85-93.
HUANG Y Z, CHEN Y Q, WU Z C, et al. Energy saving optimization of extraction steam distribution for cogeneration units under carbon neutral background[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 85-93.
- [4] 黄柯蒙, 刘继春. 计及需求响应和热电联产的多微电网联盟优化调度方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 107-115.
HUANG K M, LIU J C. Optimal dispatch method of multi-microgrid alliance considering demand response & CHP[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 107-115.
- [5] 吴磊, 彭黎菊, 李爽, 等. 百千瓦级天然气制氢质子交换膜燃料电池热电联产系统稳态特性模拟分析[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 350-360.
WU L, PENG L J, LI S, et al. Simulation and analysis of steady state characteristics of hundred kilowatt proton exchange membrane fuel cell combined heat and power system based on hydrogen production from natural gas[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 350-360.
- [6] 练依情, 郭祚刚, 马溪原, 等. 考虑热备用的气-电耦合园区综合能源系统弹性调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 115-121.
LIAN Y Q, GUO Z G, MA X Y, et al. Resilience scheduling of integrated electricity and gas community system considering hot reservation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 115-121.
- [7] JAVADI E A, JOORABIAN M, BARATI H. A sustainable framework for resilience enhancement of integrated energy systems in the presence of energy storage systems and fast-acting flexible loads[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 104099.
- [8] 范馨予, 黄媛, 吴疆, 等. 考虑源网荷储协同优化的配电网韧性提升策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4): 63-73.
FAN X Y, HUANG Y, WU J, et al. Resilience promotion strategy for distribution network considering source-network-load-storage coordination[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 63-73.
- [9] 傅守强, 陈翔宇, 张立斌, 等. 面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 95-106.
FU S Q, CHEN X Y, ZHANG L B, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.
- [10] 王凯丰, 张洪斌, 力刚, 等. 城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J/OL]. 水利水电技术(中英文): 1-15[2023-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230707.2052.008.html>.
WANG K F, ZHANG H B, LI G, et al. Advances in urban flood resilience study and its key supporting technologies review[J/OL]. Water Resources and Hydropower Engineering: 1-15[2023-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20230707.2052.008.html>.
- [11] 朱刘柱, 尹晨旭, 王宝, 等. 计及风/光/荷不确定性的综合能源站随机规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 96-105.
ZHU L Z, YIN C X, WANG B, et al. Stochastic programming of integrated energy station considering the uncertainties of wind power, photovoltaic and load[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 96-105.
- [12] 杨锡勇, 张仰飞, 林纲, 等. 考虑需求响应的源-荷-储多时间尺度协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 253-260.
YANG X Y, ZHANG Y F, LIN G, et al. Multi-time scale collaborative optimal scheduling strategy for source-load-storage considering demand response[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 253-260.
- [13] 梁涛, 尹晓东, 刘亚祥. 面向投资收益的综合能源系统鲁棒优化配置规划[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 156-166.
LIANG T, YIN X D, LIU Y X. Robust optimal configuration planning of integrated energy system for return on investment[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 156-166.
- [14] 周步祥, 黄伟, 臧天磊. 计及共享储能与柔性负荷的

- 微电网鲁棒优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 48-57.
- ZHOU B X, HUANG W, ZANG T L. Robust optimal scheduling of microgrid considering shared energy storage and flexible load[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 48-57.
- [15] 陈伟伟, 张增强, 张高航, 等. 计及需求响应及抽水蓄能的含风电系统鲁棒机组组合[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 75-82.
- CHEN W W, ZHANG Z Q, ZHANG G H, et al. Robust unit commitment of power systems integrated wind power considering demand response and pumped storage units[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 75-82.
- [16] 梁远升, 徐真理, 李海锋, 等. 基于随机响应面法的配电网故障恢复全时段不确定性优化方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16. (2023-08-10)[2023-11-27]. <https://doi.org/10.13334/j.02588013.pcsee.231204>.
- LIANG Y S, XU Z L, LI H F, et al. Optimization method for full time uncertainty of distribution network fault recovery based on random response surface methodology[J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering: 1-16. (2023-08-10)[2023-11-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231204>.
- [17] LIU R P, LEI S B, PENG C Y, et al. Data based resilience enhancement strategies for electric-gas systems against sequential extreme weather events[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5383-5395.
- [18] 陆臣斌. 考虑不确定性的园区综合能源系统低碳经济运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- LU C B. Research on low-carbon economic operation of park integrated energy system considering uncertainty [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [19] 谭九鼎, 李帅兵, 李明澈, 等. 计及不确定性的分布式微网参与电网优化调度方法综述[J/OL]. 综合智慧能源: 1-12. (2023-09-01)[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20230901.0957.002.html>.
- TAN J D, LI S B, LI M C, et al. A review of the methods of distributed microgrids taking uncertainty into account to participate in power grid optimization scheduling[J/OL]. Integrated smart energy: 1-12. (2023-09-01)[2023-09-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20230901.0957.002.html>.
- [20] 葛少云, 杜咏梅, 郭玥, 等. 基于分布鲁棒优化的车-站-网日前能量管理与交易[J/OL]. 电力系统自动化: 1-16(2023-09-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230719.1350.005.html>.
- GE S Y, DU Y M, GUO Y, et al. Vehicle station network day ahead energy management and trading based on distributed robust optimization[J/OL]. Power System Automation: 1-16(2023-09-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230719.1350.005.html>.
- [21] 王金浩, 刘新元, 仲颖, 等. 虚拟电厂参与下的配电网分布鲁棒优化调度[J]. 供用电, 2022, 39(11): 71-78.
- WANG J H, LIU X Y, ZHONG Y, et al. Distributed robust optimal dispatch of distribution network with virtual power plant participation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 71-78.
- [22] 吴晨雨. 电热综合能源系统的建模及优化运行[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- WU C Y. Modeling and optimal operation of power and heat integrated energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [23] 孙鹏, 滕云, 回茜, 等. 考虑热惯性不确定性的多能源系统两阶段鲁棒优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7249-7261.
- SUN P, TENG Y, HUI Q, et al. Two-stage robust optimal scheduling model for multi-energy systems considering thermal inertia uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7249-7261.
- [24] 邢晓敏, 张明洋, 杨修宇, 等. 计及网荷侧热惯性特征下用户动态响应的电热联合系统优化运行[J/OL]. 电网技术: 1-15[2023-07-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0624>.
- XING X M, ZHANG M Y, YANG X Y, et al. Optimization operation of electric heating joint system considering user dynamic response under grid load side thermal inertia characteristics[J/OL]. Grid Technology: 1-15[2023-07-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0624>.
- [25] 孙鹏, 滕云, 冷欧阳, 等. 考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6059-6071.
- SUN P, TENG Y, LENG O Y, et al. Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6059-6071.
- [26] 元志伟, 于松源, 房方, 等. 考虑高维不确定性的热电联产虚拟电厂优化调度[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 194-204.
- YUAN Z W, YU S Y, FANG F, et al. Optimal scheduling of combined heat and power-virtual power plant considering high-dimensional uncertainty[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 194-204.

- [27] 杨军亭, 马振祺, 梁鹏霄, 等. 考虑多源互补特性的孤岛供电故障恢复方法[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(3): 22-27.
YANG J T, MA Z Q, LIANG P X, et al. Isolated island power supply fault recovery method considering multi-source complementarity[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(3): 22-27.
- [28] 张辉, 顾秀芳, 陈艳宁, 等. 考虑风电消纳的热电厂蓄热罐效益成本分析[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 664-672.
ZHANG H, GU X F, CHEN Y N, et al. Benefit cost analysis of thermal storage tank in thermal power plant considering wind power consumption[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 664-672.
- [29] 孙黎霞, 鞠平, 白景涛, 等. 计及蓄电池寿命的冷热电联供型微电网多目标经济优化运行[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 64-72.
SUN L X, JU P, BAI J T, et al. Multi-objective economic optimal operation of microgrid based on combined cooling, heating and power considering battery life[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 64-72.
- [30] 林卓然, 朱晓东, 王守相, 等. 考虑热网动态特性与碳交易的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 64-70.
LIN Z R, ZHU X D, WANG S X, et al. Optimal scheduling of electric-thermal integrated energy system considering dynamic characteristics of heating network and carbon trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 64-70.
- [31] 李强, 朱丹丹, 黄地, 等. 虚拟电厂运营商与电动汽车用户的主从博弈定价策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 183-191.
LI Q, ZHU D D, HUANG D, et al. Stackelberg game pricing strategy between virtual power plant operators and electric vehicle users[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 183-191.
- [32] 邓博夫. 考虑热惯性和价格约束的电热联合系统优化调度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
DENG B F. Optimal scheduling of combined heat and power system considering thermal inertia and price constraints[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [33] 谢婉莹. 基于热惯性的电-热综合能源系统优化调度策略研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2022.
XIE W Y. Research on optimal scheduling strategy of integrated electricity and district heating system based on thermal inertia[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2022.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 供配电系统设计规范: GB 50052—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design electric power supply systems: GB 50052—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [35] CHEN H, ZHANG T, ZHANG R, et al. Interval optimal scheduling of integrated electricity and district heating systems considering dynamic characteristics of heating network[J]. IET Energy Systems Integration, 2020, 2(3): 179-186.

收稿日期: 2023-08-08。

作者简介:



于松源

于松源(1994), 男, 博士, 讲师, 研究方向为虚拟电厂优化调度, ysyuan@ncepu.edu.cn;



房方

房方(1976), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为热电联产虚拟电厂协同调控, 本文通信作者, ffang@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)