

引用格式:张振强,王宏波,赵阳,等.考虑灵活性的交直流混联配电网分布鲁棒优化运行[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):64-73.

Citation: ZHANG Zhenqiang, WANG Hongbo, ZHAO Yang, et al. Distributionally robust optimal operation of AC/DC hybrid distribution network considering flexibility evaluation index[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 64-73.

考虑灵活性的交直流混联配电网分布鲁棒优化运行

张振强¹, 王宏波¹, 赵阳¹, 范岳¹, 李雪晴², 艾欣²

(1. 国网冀北电力有限公司智能配电网中心, 河北 秦皇岛 066100; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:为适应未来配电网交直流混联的配电方式、应对新能源不确定性带来的运行灵活性调节量不足问题,提出一种考虑灵活性的交直流混联配电网两阶段分布鲁棒优化运行模型。首先,在交直流混联配电网架构下,分析其灵活性资源供需关系,定义上调/下调灵活性裕度指标;其次,综合考虑系统中各类约束,构建描述配电网经济性、新能源消纳性与灵活性的优化运行模型,结合数据驱动生成的风光典型场景,采用基于综合范数距离的分布鲁棒优化方法处理风、光出力不确定性,并根据优化变量的出力特性构建两阶段分布鲁棒优化运行模型;最后,对模型进行凸性转化与求解,通过修改的 33 节点交直流混联配电网算例验证模型的有效性。

关键词:交直流混联配电网;新能源不确定性;灵活性裕度指标;两阶段分布鲁棒优化

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.008 **中图分类号:** TM73 **文章编号:** 1673-9140(2024)02-0064-10

Distributionally robust optimal operation of AC/DC hybrid distribution network considering flexibility evaluation index

ZHANG Zhenqiang¹, WANG Hongbo¹, ZHAO Yang¹, FAN Yue¹, LI Xueqing², AI Xin²

(1. Smart Grid Center, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066100, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To adapt to the future power distribution mode of AC/DC hybrid distribution network and address the lack of operational flexibility adjustment caused by the uncertainty of renewable energy, a two-stage distributionally robust optimization operation model for AC/DC hybrid distribution networks considering flexibility is proposed. Firstly, under the framework of AC/DC hybrid distribution network, the supply and demand relationship of flexible resources is analyzed, and the upward/downward flexibility evaluation index is defined. Secondly, considering various constraints in the system, an optimal operation model describing the economy, renewable energy consumption, and flexibility of the distribution network is constructed. Combined with data-driven typical wind and solar scenarios, a distributionally robust optimization method based on the comprehensive norm distance is adopted to deal with the uncertainty of wind and solar power output. And a two-stage distributionally robust optimization operation model is constructed according to the output characteristics of optimization variables. Finally, convex transformation and solution of the model are carried out, and the validity of the model is verified through a modified 33-node AC/DC hybrid distribution network.

Key words: AC/DC hybrid distribution network; uncertainty of new energy; flexibility evaluation index; two-stage distributionally robust optimization

2020 年以来,随着中国“3060”双碳目标的提出,新能源得到了大力发展。未来配电网将出现大量分布式发电(distributed generations, DGs)电源^[1],

其中,新能源的时空分布特性与不确定性对传统交流配电网高效运行和新能源的有效消纳都带来了不利影响。近年来,基于电力电子技术的直流配电

收稿日期:2022-06-14;修回日期:2023-07-16

基金项目:国网冀北电力有限公司科技项目(B7014421000Z)

通信作者:李雪晴(1998—),女,硕士研究生,主要从事新能源电力系统及微网的研究;E-mail: Lixueqing0412@163.com

方式在促进新能源可控并网、高效传输和有效消纳方面实现了一定突破^[2],又考虑到传统的交流配电网长期存在,交直流混联的配电网将是未来配电网适应新能源大量接入的发展趋势,其关键技术之一便是合理的优化运行策略^[3]。

在交直流混联配电网优化运行方面的研究成果中,文献[4]提出了计及交直流配电网动态重构的经济调度模型;文献[5]考虑了交直流主动配电网中多种主动管理措施,提出高比例分布式电源接入的有功-无功联合优化模型;文献[6]采用分布式优化策略,构建了考虑电压源型换流器(voltage source converter, VSC)控制模式的电压优化模型;文献[7]构建了基于轨迹灵敏度的交直流电网无功储备动态优化模型;文献[8-9]构建了考虑电价型/激励型需求响应资源的交直流配电网经济调度模型,验证了需求响应资源的引入所带来的积极作用。但上述运行模型的建立多从系统经济性出发,忽略了新能源的不确定性及系统灵活性。

部分研究采用了不确定性优化方法如随机优化(stochastic optimization, SO)^[10]和鲁棒优化(robust optimization, RO)^[11]来应对高比例新能源的不确定性。文献[12]基于多场景技术表征风电、光伏的随机波动性;文献[13]采用两阶段RO,用箱型不确定集刻画光伏和负荷的功率波动范围。但这2种刻画不确定性的方法存在各自的局限性,SO假定不确定量的分布,在各种分布的平均情况下求最优,与实际情况有较大偏差;RO没有分布假定,而是给出不确定集,在最劣情况下求最优,往往过于保守导致获得的结果偏离最优。近年来,分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)方法^[14]得以发展,DRO基于所获得的不确定性场景,建立概率分布的模糊集合,在考虑最劣的概率分布下求最优,其中,基于数据驱动的DRO^[15]可以提取大规模DG数据信息,更多地应用在电力系统优化运行问题中。文献[16-17]采用基于范数距离的DRO描述新能源不确定性,但对概率分布的1-范数或 ∞ -范数距离约束单独考虑,优化结果缺乏一般性;文献[18-19]在交流配电网中采用基于数据驱动的DRO处理新能源或需求响应的不确定性,但上述文献均未充分考虑不确定性所带来的灵活性缺失问题。关于系统灵活性,文献[20]提出灵活性评价指标,用于刻画系统灵活性潜力;文献[21]考虑配置多种灵活性资源,缓解系统调节量不足问题,但均未将灵活性量化并纳入目标函数进行优化,使

运行模型普适性受限。

综合以上研究与问题,本文对考虑新能源不确定性与运行灵活性的交直流混联配电网优化运行模型展开研究。首先,根据灵活性资源供需平衡关系定义上调/下调灵活性裕度指标;其次,构建综合描述交直流混联配电网经济性、新能源消纳性与灵活性的确定性优化运行模型,模型全面考虑源、网、荷、储及系统安全等多方面约束条件,并基于数据驱动的方法获取新能源不确定性出力典型场景,对各场景概率分布构建基于综合范数距离的模糊集合约束,将风、光实际出力作为第2阶段优化变量,其他可调资源出力作为第1阶段优化变量,使模型转化为两阶段分布鲁棒优化模型。接着,采用二阶锥松弛、圆约束线性转换以及绝对值约束转换对非线性的约束条件进行处理,采用列与约束生成(columns and constraints generation, C&CG)算法求解。最后,通过修改的33节点交直流混联配电网算例,对比验证所提模型与方法的有效性。

1 交直流混联配电网灵活性供需关系

交直流混联配电网中包含分布式新能源机组(风光)、燃气轮机机组(micro turbine, MT)、储能单元(energy storage system, ESS)、交直流固定负荷、柔性负荷(flexible load, FL)等,如图1所示。运行过程中可与上级主网进行交互,交、直流母线通过VSC换流站相连,可进行电能形式的转换与功率的广域调度。

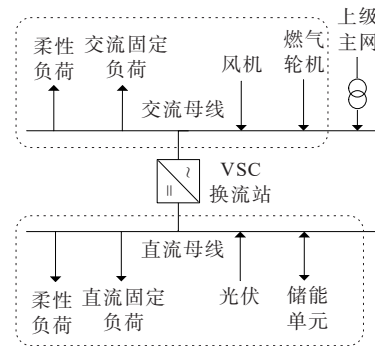


图1 交直流混联配电网结构

Figure 1 Structure of AC/DC hybrid distribution network

其中,以分布式风电(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaics, PV)为代表的新能源受环境因素的影响与预测水平的限制表现出强烈的不确定性,使得电网中灵活性需求量大幅增加^[20]。因此,需充分利用供需双侧的灵活性资源在一定时空条件下的

功率可调节能力,来平抑不确定性产生的功率波动。本文分析交直流混联配电系统整体的灵活性供应与需求关系,并定义上调/下调灵活性裕度指标,来表征灵活性资源应对风光不确定性的调节能力。

1.1 灵活性供应

将源端交流侧MT和直流侧ESS作为供应侧灵活性资源,以二者的出力表征灵活性供应能力:

$$\begin{cases} S_t^{\text{up}} = \sum_{i \in \Omega^{\text{MT}} \cup \Omega^{\text{ESS}}} \min\{P_{\max} - P_{i,t}, r_i^{\text{MT}} \Delta t\} \\ S_t^{\text{down}} = \sum_{i \in \Omega^{\text{MT}} \cup \Omega^{\text{ESS}}} \min\{P_{i,t} - P_{\min}, r_i^{\text{MT}} \Delta t\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_t^{up} (S_t^{down}) 为 t 时刻上(下)调供应量; i 为节点; Ω^{MT} 、 Ω^{ESS} 分别为MT和ESS接入节点集合; $P_{i,t}$ 、 P_{\max} (P_{\min}) 分别为供应侧灵活性资源实际出力及上(下)限; r_i^{MT} 为MT爬坡率限值。

1.2 灵活性需求

将荷端FL看作需求侧灵活性资源,以配电网整体净负荷在相邻调度时段的差值表征灵活性需求量:

$$\begin{cases} D_t^{\text{up}} = \max\{P_{t+1}^{\text{de}} - P_t^{\text{de}}, 0\} \\ D_t^{\text{down}} = \max\{P_t^{\text{de}} - P_{t+1}^{\text{de}}, 0\} \end{cases} \quad (2)$$

式中, D_t^{up} (D_t^{down}) 为 t 时刻上(下)调需求量; P_t^{de} 为 t 时刻配电网整体的负荷净出力, $P_t^{\text{de}} = P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{FL}} - P_t^{\text{WT},0} - P_t^{\text{PV},0}$, 其中 P_t^{load} 、 P_t^{FL} 、 $P_t^{\text{WT},0}$ 、 $P_t^{\text{PV},0}$ 分别为固定负荷出力、FL实际出力、WT与PV预测出力。

1.3 灵活性裕度指标定义

根据灵活性供应能力与需求量分析,可从功率平衡的角度,定义上调/下调灵活性裕度指标 ΔF_t^{up} / ΔF_t^{down} , 该指标是关于供需两侧灵活性资源实际出力的函数:

$$\begin{cases} \Delta F_t^{\text{up}} = S_t^{\text{up}} - D_t^{\text{up}} \\ \Delta F_t^{\text{down}} = S_t^{\text{down}} - D_t^{\text{down}} \end{cases} \quad (3)$$

当 $\Delta F_t^{\text{up}} > 0$ ($\Delta F_t^{\text{down}} > 0$) 时,表示系统具有上(下)调灵活性;反之,则表示上(下)调灵活性缺失。

2 交直流混联配电网优化运行模型

本文旨在通过交直流混联配电网中源、网、荷、储的协调互动,从经济性、新能源消纳性以及灵活性3个角度建立优化运行模型。

2.1 目标函数

目标函数考虑表征系统运行经济性的综合运行成本、网络损耗成本、柔性负荷调度补贴成本,表征新能源消纳性的弃风弃光惩罚成本及表征灵活

性的灵活性缺失惩罚成本之和最小:

$$\min C = C_{\text{OM}} + C_{\text{Loss}} + C_{\text{FL}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{Risk}} \quad (4)$$

1) 系统综合运行成本 C_{OM} 。

综合运行成本考虑向上级主网购电成本 C_{Sub} 、MT燃料与运维成本 C_{MT} 以及ESS调度成本 C_{ESS} 。

$$C_{\text{OM}} = C_{\text{Sub}} + C_{\text{MT}} + C_{\text{ESS}} \quad (5)$$

$$C_{\text{Sub}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{sub}} \sum_{i \in \Omega^{\text{sub}}} P_{i,t}^{\text{sub}} \Delta t \quad (6)$$

$$C_{\text{MT}} = c_{\text{MT}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{MT}}} P_{i,t}^{\text{MT}} \Delta t \quad (7)$$

$$C_{\text{ESS}} = c_{\text{ESS}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{ESS}}} (P_{i,t}^{\text{ch}} \eta_{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}}) \Delta t \quad (8)$$

式(6)~(8)中, Δt 为调度步长,取 $\Delta t = 1h$; T 为调度周期,取 $T = 24$; Ω^{sub} 为与上级主网互连节点集合; c_t^{sub} 、 c_{MT} 、 c_{ESS} 分别为主网购电单价、MT燃料与运维单价和考虑蓄电池损耗的ESS调度单价; $P_{i,t}^{\text{sub}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{MT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ch}}$ ($P_{i,t}^{\text{dis}}$) 分别为向主网购电功率、MT有功出力和ESS充(放)电功率; η_{ch} (η_{dis}) 为ESS充(放)电效率。

2) 网络损耗成本 C_{Loss} 。

网络损耗成本考虑交、直流线路上的功率损耗及VSC的等效损耗。

$$C_{\text{Loss}} = c_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T \left(\sum_{l \in \Omega^{\text{ACL}} \cup \Omega^{\text{DCL}} \cup \Omega^{\text{VSC}}} I_{l,t}^2 R_l \right) \Delta t \quad (9)$$

式中, l 为支路; Ω^{ACL} 、 Ω^{DCL} 、 Ω^{VSC} 分别为交流、直流和VSC等效支路集合; c_{loss} 为单位网损成本; $I_{l,t}$ 、 R_l 分别为支路 l 上的电流、电阻。

3) 柔性负荷调度补贴成本 C_{FL} 。

假设每个负荷节点是由一定比例的固定负荷、可转移FL和可削减FL组成的,考虑FL的调度补贴成本。

$$C_{\text{FL}} = c_{\text{FL}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{load}}} (|P_{i,t}^{\text{tr}} - P_{i,t}^{\text{tr}*}| + P_{i,t}^{\text{cut}}) \Delta t \quad (10)$$

式中, Ω^{load} 为负荷节点集合; c_{FL} 为FL调度单位补贴成本; $P_{i,t}^{\text{tr}}$ ($P_{i,t}^{\text{tr}*}$)、 $P_{i,t}^{\text{cut}}$ 分别为可转移FL实际调度(调度前期望用电)功率和可削减FL调度功率。

4) 弃风弃光惩罚成本 C_{DG} 。

$$C_{\text{DG}} = c_{\text{WT}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{WT}}} (P_{i,t}^{\text{WT},0} - P_{i,t}^{\text{WT}}) \Delta t + c_{\text{PV}} \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{PV}}} (P_{i,t}^{\text{PV},0} - P_{i,t}^{\text{PV}}) \Delta t \quad (11)$$

式中, Ω^{WT} 、 Ω^{PV} 分别为WT与PV接入节点集合; c_{WT} 、 c_{PV} 分别为计及运维成本的弃风、弃光惩罚单价; $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别为WT与PV的实际有功出力。

5) 灵活性缺失惩罚成本 C_{Risk} 。

当上调/下调灵活性不足时,定义灵活性缺失惩罚成本:

$$C_{\text{Risk}} = c_{\text{risk}} \sum_{t=1}^T (|\Delta F_t^{\text{up}}| + |\Delta F_t^{\text{down}}|) \Delta t, \begin{cases} \Delta F_t^{\text{up}} < 0 \\ \Delta F_t^{\text{down}} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中, c_{risk} 为灵活性缺失单位惩罚成本。

2.2 约束条件

模型的约束条件需涵盖源、网、荷、储侧的各设备单元,以及要保证线路载流量、电压、电流值在安全范围内。

1) 新能源机组运行约束。

新能源机组运行时需满足有功出力不超过预测值,且不考虑PV的无功支撑能力。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{WT}} \leq P_{i,t}^{\text{WT},0} \\ Q_{i,t}^{\text{WT}} = \tan(\cos^{-1}\varphi^{\text{WT}}) P_{i,t}^{\text{WT}} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{PV},0} \quad (14)$$

式中, $Q_{i,t}^{\text{WT}}$ 为WT的无功出力; φ^{WT} 为WT的功率因数。

2) 与主网交互约束。

$$\begin{cases} P_{\min}^{\text{sub}} \leq P_{i,t}^{\text{sub}} \leq P_{\max}^{\text{sub}} \\ Q_{\min}^{\text{sub}} \leq Q_{i,t}^{\text{sub}} \leq Q_{\max}^{\text{sub}} \end{cases}, i \in \Omega^{\text{sub}} \quad (15)$$

式中, P_{\max}^{sub} (P_{\min}^{sub}) 为向主网购电功率上(下)限; Q_{\min}^{sub} 、 Q_{\max}^{sub} (Q_{\min}^{sub}) 分别为与主网交互节点无功出力及其上(下)限。

3) MT运行约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{MT}} \leq P_{\max}^{\text{MT}} \\ -r_i^{\text{MT}} \leq P_{i,t}^{\text{MT}} - P_{i,t-1}^{\text{MT}} \leq r_i^{\text{MT}}, i \in \Omega^{\text{MT}} \\ -Q_{\max}^{\text{MT}} \leq Q_{i,t}^{\text{MT}} \leq Q_{\max}^{\text{MT}} \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_{\max}^{MT} 、 $Q_{i,t}^{\text{MT}}$ 、 Q_{\max}^{MT} 分别为MT有功出力上限、MT无功出力及其上限。

4) 交流 DistFlow 潮流约束^[22]。

$$\begin{cases} \sum_{l(j,:)\in\Omega^{\text{ACL}}} P_{l,t} - \sum_{l(i,j)\in\Omega^{\text{ACL}}} (P_{l,t} - I_{l,t}^2 R_l) = \\ P_{j,t}^{\text{sub}} + P_{j,t}^{\text{WT}} - P_{j,t}^{\text{load}} \\ \sum_{l(j,:)\in\Omega^{\text{ACL}}} Q_{l,t} - \sum_{l(i,j)\in\Omega^{\text{ACL}}} (Q_{l,t} - I_{l,t}^2 X_l) = \\ Q_{j,t}^{\text{sub}} + Q_{j,t}^{\text{WT}} + Q_{j,t}^{\text{MT}} - Q_{j,t}^{\text{load}} \\ U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(P_{l,t} R_l + Q_{l,t} X_l) + \\ I_{l,t}^2 (R_l^2 + X_l^2) \\ I_{l,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2, l(i,j) \in \Omega^{\text{ACL}} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $l(j,:)$ 、 $l(:,j)$ 分别为以 j 为首、末节点的支路; $U_{i,t}$ 、 X_l 分别为节点电压、支路电抗;且本文研究中选取节点首端功率作为支路有功功率 $P_{l,t}$ 和无功

功率 $Q_{l,t}$ 。

5) 直流 DistFlow 潮流约束。

$$\begin{cases} \sum_{l(j,:)\in\Omega^{\text{DCL}}} P_{l,t} - \sum_{l(i,j)\in\Omega^{\text{DCL}}} (P_{l,t} - I_{l,t}^2 R_l) = \\ P_{j,t}^{\text{PV}} + P_{j,t}^{\text{dis}} - P_{j,t}^{\text{ch}} - P_{j,t}^{\text{load}} \\ U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2P_{l,t} R_l + I_{l,t}^2 R_l^2 \\ I_{l,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{l,t}^2, l(i,j) \in \Omega^{\text{DCL}} \end{cases} \quad (18)$$

6) VSC 等效电路及约束。

VSC 等效电路由理想 VSC、虚拟节点和等效阻抗组成,如图2所示。可根据交流潮流约束式(17)处理 VSC 支路,由等效电阻和电抗 $R_m + jX_m$ 表示损耗。

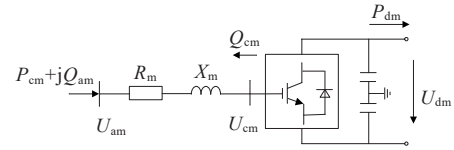


图2 VSC 等效模型

Figure 2 Equivalent model for VSC

VSC 交直流两侧的功率、电压关系为

$$\begin{cases} P_{am,t} - I_{m,t}^2 R_m = P_{dm,t} \\ Q_{am,t} - I_{m,t}^2 X_m = -Q_{cm,t} \end{cases} \quad (19)$$

$$Q_{cm,\min} \leq Q_{cm,t} \leq Q_{cm,\max} \quad (20)$$

$$U_{cm,t} = \frac{\sqrt{2}}{2} \mu M_m U_{dm,t} \quad (21)$$

式(19)~(21)中, m 为 VSC 个数; $P_{am,t}$ 、 $Q_{am,t}$ 分别为 VSC 交流侧有功和无功功率; $U_{dm,t}$ 、 $P_{dm,t}$ 分别为 VSC 直流侧电压和有功功率; $U_{cm,t}$ 、 $Q_{cm,t}$ 、 $Q_{cm,\max}$ ($Q_{cm,\min}$) 分别为 VSC 电压、无功功率及其上(下)限; μ 为直流电压利用率,本文采用 VSC 的空间矢量脉宽调制方式^[23],取 $\mu=0.866$; M_m 为 VSC 调制度, $0 \leq M_m \leq 1$ 。

7) 可转移 FL 约束。

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega^{\text{tr}}} P_{i,t}^{\text{tr}} \Delta t = D_{\text{tr}} \quad (22)$$

$$P_{\min}^{\text{tr}} \leq P_{i,t}^{\text{tr}} \leq P_{\max}^{\text{tr}} \quad (23)$$

式(22)、(23)中, D_{tr} 为可转移 FL 总量; P_{\max}^{tr} (P_{\min}^{tr}) 为可转移功率上(下)限,均与用户的舒适度要求有关。

8) 可削减 FL 约束。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{cut}} \leq \gamma_{i,t}^{\text{cut}} P_{\max}^{\text{cut}} \quad (24)$$

式中, P_{\max}^{cut} 为可削减功率上限; $\gamma_{i,t}^{\text{cut}}$ 为表示削减状态的 0-1 变量。

9) 储能约束。

$$\begin{cases} \gamma_{i,t}^{\text{ch}} + \gamma_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq \gamma_{i,t}^{\text{ch}} P_{\max}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq \gamma_{i,t}^{\text{dis}} P_{\max}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} E_{i,t+1}^{\text{ESS}} = E_{i,t}^{\text{ESS}} + \eta_{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}} \\ 0.2E_{\max}^{\text{ESS}} \leq E_{i,t}^{\text{ESS}} \leq 0.9E_{\max}^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_{\text{ch}} P_{i,t}^{\text{ch}} - P_{i,t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}}) \Delta t = 0 \quad (27)$$

式(25)~(27)中, $\gamma_{i,t}^{\text{ch}}$ ($\gamma_{i,t}^{\text{dis}}$) 为表示充放电状态的变量; P_{\max}^{ch} (P_{\max}^{dis}) 为ESS充(放)电功率上限; $E_{i,t}^{\text{ESS}}$ 、 E_{\max}^{ESS} 分别为ESS储电容量及其上限。

10) 系统安全约束。

$$\begin{cases} P_{l,t}^2 + Q_{l,t}^2 \leq S_{l,\max}^2, & l \in \Omega^{\text{ACL}} \cup \Omega^{\text{VSCL}} \\ P_{l,t} \leq S_{l,\max}, & l \in \Omega^{\text{DCL}} \cup \Omega^{\text{VSCL}} \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U_{l,t} \leq U_{\max}, & l \in \Omega^{\text{ACL}} \cup \Omega^{\text{DCL}} \cup \Omega^{\text{VSCL}} \\ 0 \leq I_{l,t} \leq I_{\max} \end{cases} \quad (29)$$

式中, $S_{l,\max}$ 为各支路载流量安全上限; U_{\max} (U_{\min}) 为各节点电压幅值上(下)限; I_{\max} 为各支路电流幅值上限。

2.3 两阶段-DRO运行模型

基于DRO的思想,无法量化的新能源出力不确定性可转化为有限个典型离散场景概率分布的不确定性。由于难以从已知的历史数据中获得准确的概率分布,所以用数据驱动的方式来进行风光不确定性典型场景的生成,并采用基于综合范数距离的方法建立概率分布模糊集合约束。

基于风光日前预测曲线与预测误差分布,采用抽样技术进行多场景生成,得到 N 个风光场景,再通过聚类算法对众多风光场景进行聚类削减,得到 n 个风光典型出力场景^[3,18-19](非本文重点,具体过程不再赘述),各典型场景表示为 M_1, M_2, \dots, M_n , 典型场景集 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ 。取第 s ($s = 1, 2, \dots, n$) 个离散典型场景的概率为 p_s , 则各典型场景的初始理论概率分布可表示为 $p^0 = (p_1^0, p_2^0, \dots, p_n^0)$, 其中 $p_s^0 = M_s$ 代表的场景数/ M 的总场景数。但由于此初始分布过于理想,需要进一步构建模糊集合对其进行约束, $\{p_s\}$ 的可行域为

$$\Omega^p = \begin{cases} p_s \geq 0, s = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{s=1}^n p_s = 1 \\ \sum_{s=1}^n |p_s - p_s^0| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq s \leq n} |p_s - p_s^0| \leq \theta_{\infty} \end{cases} \quad (30)$$

式中, θ_1 、 θ_{∞} 分别为基于1-范数、 ∞ -范数距离的概率

分布限值。

根据文献[24],其满足的置信集为

$$\begin{cases} \Pr \left\{ \sum_{s=1}^n |p_s - p_s^0| \leq \theta_1 \right\} \geq 1 - 2ne^{-2M\theta_1/n} \\ \Pr \left\{ \max_{1 \leq s \leq n} |p_s - p_s^0| \leq \theta_{\infty} \right\} \geq 1 - 2ne^{-2M\theta_{\infty}} \end{cases} \quad (31)$$

令式(31)中不等号右边部分的值为 α_1 和 α_{∞} , 则有

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{n}{2M} \ln \frac{2n}{1 - \alpha_1} \\ \theta_{\infty} = \frac{1}{2M} \ln \frac{2n}{1 - \alpha_{\infty}} \end{cases} \quad (32)$$

由式(30)~(32)可以看出,通过设定置信度 α_1 和 α_{∞} , 可以获得综合范数距离约束下概率分布允许偏差范围。且随着样本增多、 θ 变小,初始分布向真实分布逼近,更加符合实际情况。

经过多场景描述风电、光伏的不确定性并对概率分布作综合范数距离约束后,将与上级电网交互、MT、ESS、FL等单元出力作为第1阶段优化变量 x , 将WT、PV实际出力作为第2阶段优化变量 y_s , 式(4)的确定性优化运行模型可以转化为两阶段-DRO运行模型,即

$$\min_{x \in X} \left\{ f_1(x) + \max_{p_s \in \Omega^p} \sum_{s=1}^n p_s \left[\min_{y_s \in Y} f_2(y_s, M_s) \right] \right\} \quad (33)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} Ax \leq a \\ Bx = b \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} Cy_s \leq M_s \\ Dy_s = d \end{cases} \quad (35)$$

$$\begin{cases} Ex + Fy_s \leq g \\ Hx + Ky_s = l \end{cases} \quad (36)$$

式(33)~(36)中, $f_1(x)$ 为第1阶段优化目标函数,表示交直流混联配电网运行经济性优化, $f_1(x) = C_{\text{OM}} + C_{\text{Loss}} + C_{\text{FL}}$; $f_2(y_s, M_s)$ 为第2阶段优化目标函数,表示交直流混联配电网新能源消纳性与灵活性优化, $f_2(y_s, M_s) = C_{\text{DG}} + C_{\text{Risk}}$; 式(34)表示第1阶段优化变量 x 的相关约束,采用矩阵形式描述,对应主网交互约束式(15)、MT运行约束式(16)、VSC运行约束式(19)~(21)、FL约束式(22)~(24)、ESS运行约束式(25)~(27)、系统安全约束式(28)和(29); 式(35)表示第2阶段变量 y_s 与不确定性变量 M_s 的相关约束,对应DG约束式(13)、(14); 式(36)表示两阶段优化变量耦合的相关约束,对应潮流约束式(17)、(18)。

3 模型求解

3.1 模型凸性转化

由于交直流潮流、系统安全以及综合范数距离约束中存在非线性项,导致模型为非凸数学规划问题,故分别采用二阶锥松弛、圆约束线性转换以及绝对值约束转换对约束条件进行处理,使模型化为混合整数二阶锥数学模型,具体过程参见文献[25]中附录 A。

3.2 两阶段-DRO 模型求解

针对式(33)的两阶段-DRO 运行模型,采用 C&CG 算法,将第 1 阶段的 min 问题与第 2 阶段的 max-min 问题分别看作主问题(MP)和子问题(SP)进行迭代求解。

MP 在概率分布理论值的情况下求最优解,并更新模型的下界值(LB):

$$\text{MP: } \min_{x \in X, y^m \in Y, W} W \quad (37)$$

$$W \geq \sum_{s=1}^n p_s^m f_2(y_s^m, M_s), m = 1, 2, \dots \quad (38)$$

式中, m 为当前迭代次数。

SP 在 MP 求得的第 1 阶段最优变量 x^* 下,得到最劣概率分布情况,返回给 MP,并更新模型的上界值(UB):

$$\text{SP: } f(x^*) = \max_{p_s \in \mathcal{P}} \sum_{s=1}^n p_s \left[\min_{y_s \in Y} f_2(y_s, M_s) \right] \quad (39)$$

算法的具体求解流程参见文献[25]中附录 B 图 B1。

4 算例分析

4.1 算例数据

采用修改后的 IEEE 33 节点交直流混联配电网为研究算例,如图 3 所示。

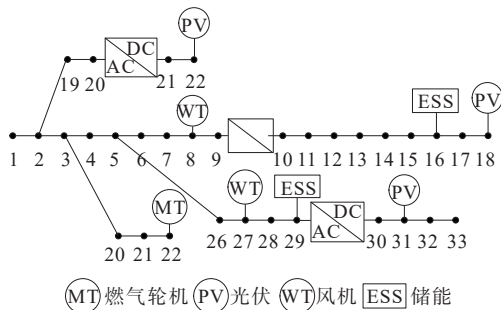


图 3 修改后的 IEEE 33 节点交直流混联配电网

Figure 3 Modified IEEE-33 bus AC/DC hybrid distribution network

设定各节点固定负荷/可削减 FL/可转移 FL 占比组成为 85%/10%/5%,负荷曲线及算例其他参数数据参考文献[26-27],由文献[25]中附录 C 给出。

4.2 新能源不确定性场景生成

考虑 WT 预测误差服从形状与尺度参数均为 2.5 的 Beta 分布, PV 预测误差服从均值为 0, 标准差为 0.15 倍日前预测出力的正态分布,基于拉丁超立方抽样技术生成 1 000 个误差数据,结合风光日前预测值,得到 1 000 个表征风光出力历史数据的实际场景,再通过 K-均值聚类削减,得到 10 个典型场景。基于数据驱动生成与聚类后的新能源不确定性场景参见文献[25]中附录 C。

4.3 灵活性有效性分析

为验证 FL 与考虑灵活性模型有效性,本文设计 3 种方案:①不考虑 FL 参与,且模型中不考虑灵活性缺失惩罚成本;②考虑 FL 参与,但模型中不考虑灵活性缺失惩罚成本;③考虑 FL 参与,同时在模型中考虑灵活性缺失惩罚成本,即本文所提模型。取 DRO 的置信度为 $\alpha_1 = 0.5, \alpha_\infty = 0.5$, 优化结果如表 1 所示。

表 1 3 种方案下目标函数结果

Table 1 Objective function results in three schemes

方案	经济性目标函数					
	$C_{\text{Sub}}/\text{元}$	$C_{\text{MT}}/\text{元}$	$C_{\text{ESS}}/\text{元}$	$C_{\text{Loss}}/\text{元}$	$C_{\text{FL}}/\text{元}$	$C_{\text{OM}}/\text{元}$
1	3 370.88	1 550.00	2 828.50	1 162.87	0.00	8 912.25
2	996.32	1 190.06	2 513.83	1 034.57	582.45	6 317.23
3	2 457.76	1 179.05	2 487.54	1 078.65	636.54	7 839.54
方案	灵活性目标函数		消纳性目标函数			
	$C_{\text{Risk}}/\text{元}$	$C_{\text{DG}}/\text{元}$	弃风弃光率/%			
1	—	273.85	5.08			
2	—	0.00	0.00			
3	9 787.16	821.69	19.09			

3 种方案下各可调资源出力曲线、优化后的负荷曲线参见文献[25]中附录 C 图 C4、C5, 上调/下调灵活性裕度指标结果如图 4 所示,并以灵活性缺失时段占全天比重来衡量灵活性缺失程度,如表 2 所示。

综合分析表 1、2、文献[25]中附图 C1、C4、C5 与图 4 可见,方案 1 中由于没有 FL 参与调度,配电网在负荷高峰时段为满足负荷需求,不可避免地向主网大量购买电能,配电网经济成本较高;且新能源无法充分消纳,存在弃风弃光现象。

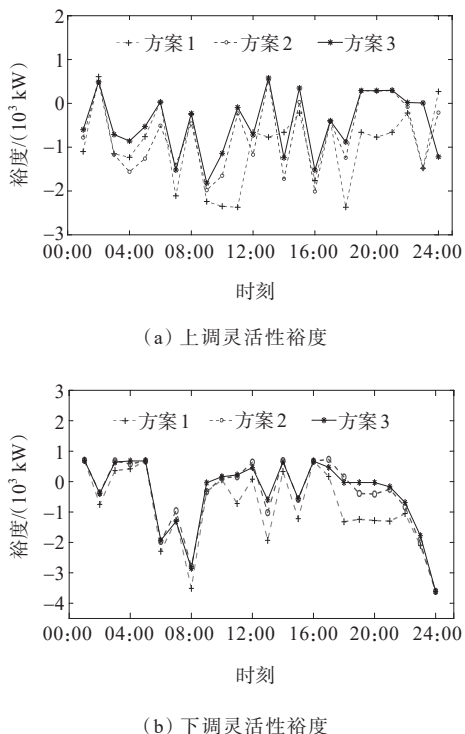


图4 不同方案下灵活性裕度指标

Figure 4 Flexibility evaluation indexes in three schemes

表2 不同方案下灵活性缺失程度

Table 2 Shortage of flexibility in three schemes

方案	灵活性缺失程度/%		
	上调	下调	总
1	87.5	62.5	75.0
2	75.0	54.2	64.6
3	62.5	45.8	60.4

方案2中FL通过基于激励的需求响应主动调整自身用电,协调配合配电网消纳新能源,优化负荷曲线,同时提高经济效益。负荷低谷期03:00—06:00时风机出力富裕,多余电能一部分被转移至此时段的可转移FL消纳,一部分流向直流侧ESS进行储能,充分避免了弃风现象;08:00以后主网购电电价上涨,负荷用电需求逐渐增加,为保证经济性,调度费用更低的ESS放电为负荷供电;在负荷高峰期17:00—22:00,可转移FL在补偿电价激励下向平谷期转移,可削减FL相应削峰,直流侧ESS进行放电,大幅度减少了系统向主网的购电功率。因此,方案2在经济性与新能源消纳性方面的效益相比方案1均有所提升。

但2种方案未计及灵活性缺失惩罚成本,方案1上调/下调灵活性缺失时段占全天比重的87.5%/

62.5%,灵活性严重不足;方案2中可转移/可削减FL的调节特性使得配电网应对新能源不确定性的能力有所增强,上调/下调灵活性缺失时段占全天比重的75%/54.2%。

方案3计及了灵活性缺失惩罚成本,虽然在经济性与新能源消纳性方面的改善不如方案2,但此方案在FL调节作用的基础上对供应侧的MT、ESS也进行了充分的协调管理,使其应对新能源不确定性的同时,为系统保留了一定的调节功率,上调/下调灵活性缺失时段占全天比重的62.5%/45.8%,灵活性大大提升。在负荷高峰期17:00—22:00,方案3明显改善了灵活性不足问题;在负荷低谷期03:00—07:00,3种方案均牺牲了ESS的部分上调灵活性来实现对风电的消纳,但方案3能够在减少MT与ESS调度成本的同时达到上调灵活性最优,保障了系统总体灵活性,验证了计及灵活性的模型即本文所提模型具有一定优势。

综上,FL的接入在一定程度上使得交直流混联配电网具有更好经济效益,新能源弃风弃光率降低,系统总体灵活性提升,灵活性裕度指标能够从灵活性角度评估配电网优化运行,考虑灵活性缺失惩罚成本的优化运行方案在系统应对新能源不确定性同时,可有效提高系统灵活性。

4.4 分布鲁棒优化结果及相关对比

4.4.1 与确定性方法、随机优化及鲁棒优化方法的对比分析

选取确定性方法、SO、RO与本文所用DRO方法进行对比分析,如表3所示,确定性模型如式(4)所示;SO选用文4.2中的10个典型场景,每个场景概率设定为0.1;RO采用波动区间为0.15倍风光预测值的盒式不确定集描述不确定性。

表3 不同方法优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results with different methods

方法	优化结果	方法	优化结果
确定性	21 076.89	鲁棒优化	19 961.54
随机优化	17 372.11	分布鲁棒优化	18 448.39

可见,相比确定性模型,3种不确定性优化方法的结果更优,这是因为不确定性方法能够提前对新能源随机波动性预留一定功率额度,而确定性模型仅仅依据预测值进行优化,缺乏适应不确定性的能力。

在 3 种不确定性优化方法中,DRO 的优化结果介于 RO 与 SO 之间,原因在于 RO 根据不确定性波动区间选取最劣情况进行优化,具有较大保守性,总体经济成本高;SO 将不确定性转化为典型场景的平均概率分布,优化结果较优,但往往忽略极端场景从而缺乏鲁棒性;而 DRO 综合以上 2 种方法,通过寻找最恶劣场景概率分布,兼顾了优化结果的最优性与鲁棒性,适应不确定性的能力较强。

4.4.2 不同置信度对优化结果的影响分析

在对风光典型场景构建基于综合范数距离的模糊集合时,取不同置信度 α_1 和 α_∞ 时优化结果的变化趋势,结果对比如表 4 所示,可见随着置信度的增加,总经济成本也在增加,这是由于置信度 α_1 和 α_∞ 增加,从式(32)可知概率分布偏差范围 θ_1 和 θ_∞ 增加,即场景所包含的不确定性空间更大,会获得更为恶劣的优化结果。

表 4 不同置信水平下优化结果对比

Table 4 Comparison of optimization results with different confidence sets

α_1	优化结果/元		
	$\alpha_\infty=0.50$	$\alpha_\infty=0.80$	$\alpha_\infty=0.99$
0.20	18 439.67	18 451.96	18 480.53
0.50	18 448.39	18 469.08	18 491.02
0.99	18 448.39	18 473.87	18 500.86

进一步分析考虑综合范数距离约束与单独考虑一种范数距离约束对优化结果的影响,结果对比分别如表 5、6 所示,仅考虑 1-范数距离时,取 $\alpha_1=0.5, \alpha_\infty \in [0.50, 0.99]$,仅考虑 ∞ -范数距离时,取 $\alpha_\infty=0.99, \alpha_1 \in [0.50, 0.99]$ 。可以看出考虑综合范数距离较单独考虑一种范数距离约束时,优化总成本更低,优化结果具有更低的保守性,验证了综合范数距离约束的优势。

表 5 1-范数与综合范数距离优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results between 1-norm and comprehensive norm distance

α_∞	优化结果/元	
	综合范数	1-范数
0.50	18 448.39	18 523.77
0.80	18 469.08	18 523.77
0.99	18 491.02	18 523.77

表 6 ∞ -范数与综合范数距离优化结果对比

Table 6 Comparison of optimization results between ∞ -norm and comprehensive norm distance

α	优化结果/元	
	综合范数	∞ -范数
0.50	18 480.53	18 500.86
0.80	18 491.02	18 500.86
0.99	18 500.86	18 500.86

5 结语

本文考虑交直流混联配电网供需两侧的灵活性资源,定义灵活性裕度指标,并采用基于 $1-\infty$ 综合范数距离的分布鲁棒优化方法描述新能源出力不确定性,构建了表征配电网经济性、新能源消纳性及灵活性的两阶段一分布鲁棒优化运行模型,采用二阶锥规划、圆约束与绝对值线性技术对模型进行凸性转换,通过算例进行对比验证,得到以下结论:

1) 通过定义灵活性裕度指标引导供需双侧灵活性资源参与优化运行模型的构建有利于缓解配电网在风光不确定性的情况下灵活调节量不足的问题,进一步保障系统向上/向下灵活调节能力。

2) 分布鲁棒优化方法在处理新能源不确定性时,相较于传统的随机优化与鲁棒优化,在一定程度上使优化结果实现了最优性与鲁棒性的平衡。考虑 $1-\infty$ 综合范数距离约束,相较于仅考虑 $1/\infty$ 范数距离约束,能获得更低保守度的优化结果。

本文所提模型中未对需求侧灵活性资源做更精细化的分类分析;且仅考虑了源端新能源出力的不确定性,未考虑荷端负荷及灵活性资源的不确定性。未来的研究可以进一步考虑多类型的需求侧灵活性资源,并针对多重不确定性展开研究。

参考文献:

[1] 王家怡,高红均,刘友波,等.考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化运行[J].中国电机工程学报,2020,40(2):550-563.
WANG Jiayi, GAO Hongjun, LIU Youbo, et al. A Distributed operation optimization model for AC/DC hybrid distribution network considering wind power uncertainty[J].Proceedings of the CSEE,2020,40(2):550-563.

[2] 李婷,胥威汀,刘向龙,等.含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(12):177-187.

- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*,2019,47(12):177-187.
- [3] 孙旭,邱晓燕,张志荣,等.基于数据驱动的交流配电网分布鲁棒优化调度[J].*电网技术*,2021,45(12):4768-4778.
- SUN Xu, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Distributed robust optimal dispatching of AC/DC distribution network based on data driven[J]. *Power System Technology*,2021,45(12):4768-4778.
- [4] AHMED H M A, SALAMA M M A. Energy management of AC-DC hybrid distribution systems considering network reconfiguration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2019,34(6):4583-4594.
- [5] 马鑫,郭瑞鹏,王蕾,等.基于二阶锥规划的交流主动配电网日前调度模型[J].*电力系统自动化*,2018,42(22):144-150.
- MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, et al. Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2018,42(22):144-150.
- [6] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等.基于ADMM的交流混合配电网分布式电压优化模型[J].*电网技术*,2021,45(11):4551-4559.
- ZHANG Zhirong, QIU Xiaoyan, SUN Xu, et al. Distributed voltage optimization model for AC/DC hybrid distribution network based on ADMM[J]. *Power System Technology*,2021,45(11):4551-4559.
- [7] 齐子杰,陈天华,王彬,等.基于多阶轨迹灵敏度的交流直流混联受端电网无功储备优化方法[J].*电力科学与技术学报*,2022,37(1):74-81.
- QI Zijie, CHEN Tianhua, WANG Bin, et al. Reactive power reserve optimization method for AC/DC hybrid receiving network based on multi-order trajectory sensitivity[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*,2022,37(1):74-81.
- [8] 王文超,庞丹,成龙,等.考虑电价型需求响应的交流直流混合配电网优化调度[J].*电网技术*,2019,43(5):1675-1682.
- WANG Wenchao, PANG Dan, CHENG Long, et al. Optimal dispatch approach hybrid AC/DC distribution networks considering price-based demand response[J]. *Power System Technology*,2019,43(5):1675-1682.
- [9] 张志荣,邱晓燕,孙旭,等.协调柔性负荷与储能的交流直流配电网经济优化调度[J].*电力建设*,2020,41(5):116-123.
- ZHANG Zhirong, QIU Xiaoyan, SUN Xu, et al. Economic optimal scheduling of distribution network coordinating flexible load and energy storage systems[J]. *Electric Power Construction*,2020,41(5):116-123.
- [10] SAHIN C, SHAHIDEHPOUR M, ERKMEN I. Allocation of hourly reserve versus demand response for security-constrained scheduling of stochastic wind energy[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2013,4(1):219-228.
- [11] LOPEZ J, POZO D, CONTRERAS J, et al. A multiobjective minimax regret robust VAR planning model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2017,32(3):1761-1771.
- [12] 梁海峰,金建澎,叶亚中.考虑多重不确定性的交流直流混合微网多目标优化运行[J].*华北电力大学学报(自然科学版)*,2023,50(2):10-21.
- LIANG Haifeng, JIN Jianpeng, YE Yazhong. Multi-objective optimal operation of hybrid AC/DC microgrid considering multiple uncertainty[J]. *Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition)*,2023,50(2):10-21.
- [13] 刘一欣,郭力,王成山.微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J].*中国电机工程学报*,2018,38(14):4013-4022+4307.
- LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*,2018,38(14):4013-4022+4307.
- [14] PENG X, JURUTITIJARON P, SINGH C. A distributionally robust optimization model for unit commitment considering uncertain wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2017,32(1):39-49.
- [15] 鲁卓欣,徐潇源,严正,等.不确定性环境下数据驱动的电力系统优化调度方法综述[J].*电力系统自动化*,2020,44(21):172-183.
- LU Zhuoxin, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Overview on data-driven optimal scheduling methods of power system in uncertain environment[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2020,44(21):172-183.
- [16] DARIVIANAKIS G, EICHLER A, SMITH R S, et al. A data-driven stochastic optimization approach to the seasonal storage energy management[J]. *IEEE Control Systems Letters*,2017,1(2):394-399.
- [17] PAN K, GUAN Y P. Data-driven risk-averse stochastic self-scheduling for combined-cycle units[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,2017,13(6):3058-3069.
- [18] 阮贺彬,高红均,刘俊勇,等.考虑DG无功支撑和开关重构的主动配电网分布鲁棒无功优化模型[J].*中国电机工程学报*,2019,39(3):685-695+948.
- RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A Distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering

- reactive power support of DG and switch reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 685-695+948.
- [19] 贺帅佳, 高红均, 刘俊勇, 等. 计及需求响应柔性调节的分布鲁棒 DG 优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(08): 2253-2264+8.
- HE Shuaijia, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. Distributionally robust optimal DG allocation model considering flexible adjustment of demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(08): 2253-2264+8.
- [20] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.
- LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194.
- [21] 任智君, 郭红霞, 杨苹, 等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 33-38.
- REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 33-38.
- [22] WU T, ZHANG Y J, TANG X Y. A VSC-based BESS model for multi-objective OPF using mixed integer SOCP[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2541-2552.
- [23] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/D distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [24] ZHAO C Y, GUAN Y P. Data-driven stochastic unit commitment for integrating wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2587-2596.
- [25] 李雪晴. 论文附录[EB/OL]. https://pan.baidu.com/s/1Rm6c_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f (提取码: 5x3f), 2022-06-14.
- LI Xueqing. Appendix to the paper[EB/OL]. https://pan.baidu.com/s/1Rm6c_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f (extraction code: 5x3f), 2022-06-14.
- [26] GAO H J, LIU J Y, WANG L F. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems. [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4436-4447.
- [27] 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.

(上接第 27 页 Continued from page 27)

- [18] 周彦彤, 郝丽丽, 王昊昊, 等. 大容量风电场柔直并网系统的送/受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 100-106.
- ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 100-106.
- [19] 任健淼, 肖仕武. 基于频域振荡模式的次/超同步分量可观可控分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 30-39.
- REN Jianmiao, XIAO Shiwu. Observability and controllability analysis of sub-/ super-synchronous components based on frequency domain oscillation mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 30-39.
- [20] 江桂芬, 孙海顺, 陈霞, 等. 宁夏多直流外送系统 SSO 特性分析及次同步阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 30-38.
- JIANG Guifen, SUN Haishun, CHEN Xia, et al. SSO characteristic analysis and subsynchronous damping controller design of Ningxia multi-DC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 30-38.
- [21] 米季炯. 火电机组经柔直系统送出的次同步振荡阻尼特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- MI Jijiong. Research on the damping characteristics of the subsynchronous oscillation of thermal power units connected via MMC-HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [22] HARNEFORS L. Analysis of subsynchronous torsional interaction with power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 305-313.
- [23] KHAZAEI J, BEZA M, BONGIORNO M. Impedance analysis of modular multi-level converters connected to weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4015-4025.
- [24] 鲁晓军, 林卫星, 安婷, 等. MMC 电气系统动态相量模型统一建模方法及运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5479-5491+5724.
- LU Xiaojun, LIN Weixing, AN Ting, et al. A unified dynamic phasor modeling and operating characteristic analysis of electrical system of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5479-5491+ 5724.