

交直流并联输电通道功率分配的分布鲁棒优化

何 森¹, 刘 洁², 王 奇¹, 周震震¹, 常 安¹,
肖耀辉¹, 梁炜焜², 林舜江², 董 萍²

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510405; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 考虑新能源场站出力的不确定性, 基于分布鲁棒优化方法, 建立高比例新能源电网交直流并联输电通道功率分配的两阶段优化模型。第 1 阶段目标函数为新能源场站出力预测场景下所有交直流输电线路有功损耗费用之和最小; 第 2 阶段目标函数为新能源场站出力的最劣概率分布下直调电厂出力和直流输电线路功率的调整成本的期望值最小。在构建概率分布的模糊集时, 提出以 Hellinger 距离衡量实际概率与参考概率分布之间的距离, 并采用 Markov 链描述新能源场站出力的时间相关性。通过采用列与约束生成 (CCG) 算法求解两阶段分布鲁棒优化模型, 以获得各回交直流并联输电通道日前功率传输计划。最后, 以某个实际交直流混联电网为例, 分析计算结果可以验证所提出模型、算法的有效性和正确性。

关 键 词: 交直流混联电网; 输电通道功率分配; 分布鲁棒优化; Hellinger 距离; 马尔可夫链

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.024 中图分类号: TM734 文章编号: 1673-9140(2023)06-0225-12

Distributionally robust optimization for the power allocation of AC/DC parallel transmission channels

HE Sen¹, LIU Jie², WANG Qi¹, ZHOU Zhenzhen, CHANG An, XIAO Yaohui,
LIANG Weikun², LIN Shunjiang², DONG Ping²

(1. Maintenance and Test Center of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510405, China;

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

Abstract: Considering the uncertainty of renewable energy station output, a two-stage optimization model for AC/DC parallel transmission channel power distribution of a power system with a high proportion of renewable energy is established based on the distributionally robust optimization (DRO) method. The objective function of the first stage is to minimize the sum of active power loss costs of all transmission lines in the forecast scenario. The objective function of the second stage is to minimize the expected adjustment cost of directly dispatching generators and DC transmission lines power under the worst-case probability distribution (PD). When constructing the ambiguity set of PDs, Hellinger distance is used to measure the distance between real PD and reference PD, and the Markov chain is used to describe the time correlation of renewable energy station output. The column and constraint generation algorithm is used to solve the two-stage DRO model to obtain the day-ahead power transmission schedules of AC/DC parallel transmission channels. Finally, with the case study on an actual Hybrid AC/DC power grid and the computational results demonstrate the correctness and effectiveness of

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(51977080); 中国南方电网有限责任公司科技项目(0120002001030304AS00061)

通信作者: 林舜江(1980—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事电力系统优化与控制的研究; E-mail: linshj@scut.edu.cn

the proposed model and algorithm.

Key words: AC/DC hybrid grid; power distribution of transmission channels; distributionally robust optimization; Hellinger distance; Markov chain

由于中国能源资源与负荷需求逆向分布,远距离、大容量超/特高压输电已成为中国电网的发展趋势,西电东送输电通道工程不断深入推进^[1-2]。截至2022年,国家电网已形成了“十四交十二直”的输电大通道,南方电网已形成了“八交十一直”的输电大通道。同时,为实现“双碳”目标,新能源发电经过交直流输电大通道实现跨区域输送和消纳是必然趋势^[3]。如此巨大电量的远距离传输必然会产生大量的电能损耗,通过优化分配各回交直流输电通道的输电计划,可以有效降低输电网损并提高系统运行的经济性。然而,随着新能源发电装机占比的不断提升,其出力的不确定波动对于电网安全运行的影响不容忽视。因此,在考虑新能源发电出力不确定性条件下,如何合理安排各回输电通道的输送功率计划,具有重要的理论意义与实际工程应用价值。

在已知各区域间总送电计划与各区域内发电机有功出力计划的条件下,输电通道功率优化分配通过分配各区域间多回输电通道的送电计划,满足安全运行约束前提下减小输电线路的损耗,实现系统经济运行。目前,国内外学者已对此问题开展了一些研究工作。文献[4]以远距离交直流并联输电通道总有功损耗最小为目标,提出了省网间交直流并联输电通道功率优化分配方法;文献[5]以促进新能源跨区消纳为目标,考虑直流线路功率灵活可调节的特点,在满足安全运行要求条件下,通过调整直流线路功率提高送端电网的新能源消纳量,提高电网整体效益;文献[6]考虑电网实际运行情况,分别构建了安全裕度最大化、风电消纳最大化和输电联络线吸纳量最大化3种联络线优化调度模式,以应对电网调节困难时段、开机容量大时段和负荷平稳时段。但是,文献[4-6]在制定输电通道送电计划时,均未考虑新能源发电出力的不确定性。文献[7]建立了联络线与多区域系统联合调度模型,考虑了风电不确定性,采用两阶段自适应鲁棒优化方法,以提高多区域系统的经济效益;文献[8]考虑风电场出力的随机波动特性,建立交直流互联电网输

电通道功率优化分配模型,并采用状态空间近似动态规划算法求解模型。但是,文献[7]仅以纯交流系统作为研究对象,文献[8]虽然以交直流互联电网作为研究对象,但未考虑相控型晶闸管(line commutation converter, LCC)常规直流输电和电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)多端柔性直流输电线路的运行特性约束。

在考虑新能源发电出力不确定性的电力系统优化问题中,主要求解方法有随机优化^[9]、鲁棒优化(robust optimization, RO)^[10]和分布鲁棒优化(distributionally robust optimization, DRO)^[11-15]3种。随机优化通过对新能源出力生成一系列场景,将不确定性优化问题转化为确定性问题,优化结果依赖于场景选取,且求解规模较大、计算时间长;RO考虑新能源出力的最劣场景进行决策,求解速度较快,但其优化结果往往偏保守;DRO通过建立新能源出力的各种可能概率分布的模糊集,针对模糊集中最劣概率分布进行决策,兼顾了优化结果的可靠性与经济性。模糊集的构建是DRO的核心,目前常用方法包括基于统计矩信息的构建方法^[11-12]与基于距离^[13-15]的构建方法。文献[11]利用一阶矩信息构造风电出力的概率分布模糊集,建立了两阶段主备协同优化调度模型;文献[12]提出采用矩不确定性的DRO方法,通过拉格朗日对偶原理将模型转化为半定规划求解;文献[13]基于 Wasserstein 距离构建了风电出力模糊集,用于求解考虑风电预测误差下的机组组合问题;文献[14-15]均采用KL(kullback-leibler)散度建立概率分布模糊集,分别研究主备协同优化调度问题和机组组合问题。然而,文献[11-15]提出的DRO中均没有考虑新能源场站不同时段出力的相关性约束。

鉴于此,本文针对含LCC常规直流和VSC多端柔性直流的交直流混联电网,建立考虑新能源场站出力不确定性的交直流并联输电通道功率分配的DRO模型;将Hellinger距离作为实际概率分布与参考概率分布之间距离的度量,并采用Markov

链描述多个相邻时段新能源场站出力之间的相关性,建立新能源场站出力概率分布的模糊集,并且采用列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法交替迭代求解所提出的DRO模型;最后,通过某个实际交直流混联电网算例的计算验证所提出方法的有效性和正确性。

1 交直流并联输电通道功率分配的两阶段DRO模型

1.1 目标函数

针对考虑新能源场站出力不确定性的交直流并联输电通道功率分配问题,所提出的DRO模型分为2个阶段:第1阶段的优化目标为新能源场站出力预测场景下所有交直流输电线路的有功损耗费用之和最小;第2阶段考虑新能源场站出力不确定性,在新能源场站出力模糊集中各种可能概率分布下,优化目标为寻找使得直调电厂再调度成本与直流输电线路功率调整成本之和最小期望值的最恶劣概率分布。目标函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1 + \max_{p_{\bullet} \in \Psi} E(f_2(P_{REt})) \\ f_1 = \sum_{t=1}^T c_{g,t} \left(\sum_{k=1}^{N_{ac}} P_{Lak,t} + \sum_{l=1}^{N_{dc}} P_{Ldl,t} \right) \Delta t \\ f_2(P_{REt}) = \min \left[\sum_{i=1}^T \left(\sum_{j=1}^{N_{DG}} c_{Gd} \Delta P_{Gdj,t} + \sum_{l=1}^{N_{dc}} c_{Rd} \Delta P_{dl,t} \right) \Delta t \right] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中, f_1 、 f_2 分别为第1、2阶段的目标函数; $E(\bullet)$ 表示对随机变量计算其数学期望值; P_{REt} 为 t 时段新能源场站出力向量; p_{REt} 为 P_{REt} 的概率分布函数; Ψ_t 为 P_{REt} 的各种可能概率分布组成的模糊集; T 为一天内调度周期的总时段数,本文以1h作为一个时段,即 $\Delta t=1$ h, $T=24$; $c_{g,t}$ 为 t 时段的电价; $P_{Lak,t}$ 、 $P_{Ldl,t}$ 分别为 t 时段交流线路 k 和直流线路 l 的有功损耗; N_{ac} 、 N_{dc} 分别为交直流并联输电通道中交流线路和直流线路的总数; $\Delta P_{Gdj,t}$ 、 $\Delta P_{dl,t}$ 分别为 t 时段第 j 个直调电厂出力和直流线路 l 传输功率的调整量; c_{Gd} 、 c_{Rd} 分别为对应的调整费用系数; N_{DG} 为直调电厂总数。

交流输电线路 k 的有功损耗为

$$P_{Lak,t} = (V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2V_{i,t}V_{j,t}\cos\theta_{ij,t})g_k \quad (2)$$

式中, $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别为 t 时段交流线路 k 的首端和末端节点的电压幅值; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时段交流线路 k 两端节点的电压相角差; g_k 为交流线路 k 的电导。

直流输电线路 l 的有功损耗为

$$P_{Ldl,t} = n_l I_{dl,t}^2 R_{dl} \quad (3)$$

式中, n_l 、 R_{dl} 分别为直流线路 l 的运行极数和单极电阻; $I_{dl,t}$ 为 t 时段直流线路 l 的单极运行电流。

当采用离散概率分布描述新能源场站出力的概率分布特性时,第2阶段寻找最恶劣概率分布的目标函数为

$$\begin{aligned} E(f_2(P_{REt})) &= \sum_{s=1}^{N_s} p_{t,s} \cdot \\ \min & \left[\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_{Gd}} c_{Gd} \Delta P_{Gdj,t,s} + \sum_{l=1}^{N_{dc}} c_{Rd} \Delta P_{dl,t,s} \right) \Delta t \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $p_{t,s}$ 为 t 时段新能源场站出力第 s 个离散场景的概率值; N_s 为离散场景总数; $\Delta P_{Gdj,t,s}$ 、 $\Delta P_{dl,t,s}$ 分别为 $\Delta P_{Gdj,t}$ 、 $\Delta P_{dl,t}$ 在第 s 个离散场景下的值。

可以看到,第2阶段模型为max-min双层优化模型,内层优化问题以最小化直调电厂再调度成本与直流输电线路功率调整成本之和为目标,决策变量包括 $\Delta P_{Gdj,t}$ 和 $\Delta P_{dl,t}$,而对于外层优化问题,则是寻找新能源场站出力可能的最恶劣概率分布使得内层优化问题最优目标值的数学期望最大。

1.2 第1阶段的约束条件

1) 送电计划约束。

送电计划约束即为各个输电断面传输功率的计划约束,具体如下:

$$-\varepsilon\% P_{\Omega z,t} \leq \sum_{k \in \Omega} P_{ak,t} + \sum_{l \in \Omega} P_{dl,t} - P_{\Omega z,t} \leq \varepsilon\% P_{\Omega z,t} \quad (5)$$

式中, $P_{ak,t}$ 、 $P_{dl,t}$ 分别为 t 时段交流线路 k 和直流线路 l 的输电功率; $P_{\Omega z,t}$ 为省网间输电断面 z 在 t 时段的总电力交换计划值; $\varepsilon\%$ 为省网间输电断面 z 电力传输计划的允许偏差,一般取5%。

对于式(5),若直流线路 l 的整流侧在省网间输电断面 z 内,则 $P_{dl,t}=P_{dlR,t}$;若直流线路 l 的逆变侧在省网输电断面 z 内,则 $P_{dl,t}=P_{dlI,t}$ 。 $P_{dlR,t}$ 、 $P_{dlI,t}$ 分别为 t 时段直流线路 l 的整流侧和逆变侧功率。

对于交流输电线路 k ,其线路传输功率为

$$P_{ak,t} = V_{i,t}V_{j,t}(g_k \cos\theta_{ij,t} + b_k \sin\theta_{ij,t}) - V_{i,t}^2 g_k \quad (6)$$

式中, b_k 为交流线路 k 的电纳。

对于直流输电线路 l ,线路 i 侧传输功率为

$$P_{dli,t} = n_l U_{dli,t} I_{dl,t} \quad (7)$$

其中, $U_{dli,t}$ 为 t 时段直流线路 l 在 i 侧的直流电压。若 i 侧是直流线路 l 的整流侧,则 $U_{dli,t} = U_{dR,t}$;若 i 侧是直流线路 l 的逆变侧,则 $U_{dli,t} = U_{dI,t}$ 。

2) 节点功率平衡约束。

对于系统中不连接直流换流站的普通交流节点,其功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{Gi,t} - P_{Li,t} - \\ V_{i,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) = 0 \\ Q_{Gi,t} - Q_{Li,t} - \\ V_{i,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $P_{Gi,t}$ 、 $Q_{Gi,t}$ 分别为 t 时段节点 i 的发电机有功和无功出力; $P_{Li,t}$ 、 $Q_{Li,t}$ 为 t 时段节点 i 的有功和无功负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的互电导和互电纳; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时段节点 i 、 j 的电压相角差。

对于连接LCC/VSC换流站的交流节点,其功率平衡方程为

$$\begin{cases} -V_{i,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) = P_{dli,t} \\ -V_{i,t} \sum_{j=1}^n V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) = Q_{dli,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $Q_{dli,t}$ 为 t 时段直流线路 l 在 i 侧的无功功率。

3) LCC直流线路运行特性约束。

对于LCC直流输电线路,考虑换流变压器和换相电抗的影响,其运行特性约束如下:

$$\begin{cases} U_{dli,t} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{i,t} K_{di} \cos \theta_{di,t} - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{dl,t} = \\ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{i,t} K_{di} \cos \varphi_{i,t} \\ U_{dR,t} = U_{dI,t} + I_{dl,t} R_{dl} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $V_{i,t}$ 为 t 时段交流节点 i 的电压幅值; $\theta_{di,t}$ 为 t 时段节点 i 所连接直流换流器的控制角; K_{di} 、 X_{ci} 分别为节点 i 所连接直流线路的换流变压器变比和换相电抗; $\varphi_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 连接直流线路的功率因数角。

4) VSC直流线路运行特性约束。

对于VSC直流输电线路,忽略换流站等效电阻的影响,则运行特性约束如下:

$$\begin{cases} P_{dli,t} + \frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}} V_{i,t} U_{dli,t} Y_i \cos(\delta_{i,t} + \alpha_i) - \\ V_{i,t}^2 Y_i \cos \alpha_i = 0 \\ Q_{dli,t} + \frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}} V_{i,t} U_{dli,t} Y_i \sin(\delta_{i,t} + \alpha_i) - \\ V_{i,t}^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \\ I_{dli,t} - \sum_{j=1}^{N_{VSC}} g_{i,j} U_{dij,t} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, μ_i 为直流电压利用率; M_i 为PWM调制比; Y_i 、 α_i 分别为节点 i 所连接直流换流站的等效导纳和等效阻抗角; $\delta_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 连接直流线路的交流节点电压与换流器输入电压的相角差; $g_{i,j}$ 为消去联络节点后直流网络节点电导矩阵中的元素; N_{VSC} 为连接VSC换流站的交流节点总数。

5) 直调电厂旋转备用约束。

直调电厂需要预留一定的正、负旋转备用容量以应对新能源场站出力不确定波动,出力约束为

$$\begin{cases} P_{Gdjmin} \leq P_{Gdj,t} - r_{Gdj,t} \\ P_{Gdj,t} + r_{Guj,t} \leq P_{Gdjmax} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $P_{Gdj,t}$ 为 t 时段直调电厂第 j 个发电机的出力; $r_{Guj,t}$ 、 $r_{Gdj,t}$ 分别为直调电厂第 j 个发电机 t 时段预留的正、负备用容量; P_{Gdjmax} 、 P_{Gdjmin} 分别为 $P_{Gdj,t}$ 的上限和下限。

1.3 第2阶段的约束条件

1) 送电计划约束。

$$\begin{cases} -\varepsilon P_{\Omega,t} \leq \sum_{k \in \Omega} P_{ak,t,s} + \sum_{l \in \Omega} P_{dl,t,s} - P_{\Omega,t} \leq \varepsilon P_{\Omega,t} \\ P_{ak,t,s} = P_{ak,t} + \Delta P_{ak,t,s} \\ P_{dl,t,s} = P_{dl,t} + \Delta P_{dl,t,s} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_{ak,t,s}$ 、 $P_{dl,t,s}$ 分别为 $P_{ak,t}$ 、 $P_{dl,t}$ 第 s 个离散场景下的值; $\Delta P_{ak,t,s}$ 为第 s 个离散场景下 t 时段交流线路 k 输电功率的变化量。

2) 节点功率平衡约束。

对于系统中不连接直流换流站的普通交流节点,其功率平衡方程为

$$\begin{cases} P_{Gi,t} + \Delta P_{Gi,t,s} - P_{Li,t} - \\ V_{i,t,s} \sum_{j=1}^n V_{j,t,s} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t,s} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t,s}) = 0 \\ Q_{Gi,t} + \Delta Q_{Gi,t,s} - Q_{Li,t} - \\ V_{i,t,s} \sum_{j=1}^n V_{j,t,s} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t,s} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t,s}) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\Delta Q_{Gi,t,s}$ 为第 s 个离散场景下 t 时段节点 i 的发电机无功出力调整值; $\theta_{ij,t,s}$ 为第 s 个离散场景下 t 时

段节点 i, j 的电压相角差。

对于连接 LCC/VSC 换流站的交流节点,其功率平衡方程为

$$\begin{cases} -V_{i,t,s} \sum_{j=1}^n V_{j,t,s} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t,s} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t,s}) = P_{dli,t,s} \\ -V_{i,t,s} \sum_{j=1}^n V_{j,t,s} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t,s} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t,s}) = Q_{dli,t,s} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{dli,t,s}, Q_{dli,t,s}$ 分别为 $P_{dli,t}, Q_{dli,t}$ 第 s 个离散场景下的值。

3) LCC 直流线路运行特性约束。

$$\begin{cases} U_{dli,t,s} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{i,t,s} K_{di} \cos \theta_{di,t,s} - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_{dli,t,s} = \\ \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{i,t,s} K_{di} \cos \varphi_{i,t,s} \\ U_{dR,t,s} = U_{dli,t,s} + I_{dli,t,s} R_{dl} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $U_{dli,t,s}, I_{dli,t,s}, V_{i,t,s}, \theta_{di,t,s}, \varphi_{i,t,s}$ 分别为 $U_{dli,t}, I_{dli,t}, V_{i,t}, \theta_{di,t}, \varphi_{i,t}$ 第 s 个离散场景下的值。

4) VSC 直流线路运行特性约束。

$$\begin{cases} P_{dli,t,s} + \frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}} V_{i,t,s} U_{dli,t,s} Y_i \cdot \\ \cos(\delta_{i,t,s} + \alpha_i) - V_{i,t,s}^2 Y_i \cos \alpha_i = 0 \\ Q_{dli,t,s} + \frac{\mu_i M_i}{\sqrt{2}} V_{i,t,s} U_{dli,t,s} Y_i \cdot \\ \sin(\delta_{i,t,s} + \alpha_i) - V_{i,t,s}^2 Y_i \sin \alpha_i = 0 \\ I_{dli,t,s} - \sum_{j=1}^{N_{VSC}} g_{i,j} U_{dji,t,s} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\delta_{i,t,s}$ 为 $\delta_{i,t}$ 第 s 个离散场景下的值。

5) 直调电厂发电机再调度约束。

直调电厂发电机的有功调整量应在其正、负备用容量范围内,即

$$-r_{Gdj,t} \leq \Delta P_{Gdj,t,s} \leq r_{Guj,t} \quad (18)$$

2 考虑时间相关性的概率分布模糊集

2.1 基于 Hellinger 距离构建模糊集

DRO 是在随机变量概率分布的模糊集内寻找最恶劣概率分布进行决策,因此,需要先构建随机变量概率分布的模糊集。在概率统计中,F-散度是一种用于衡量 2 个概率分布之间相似程度的函数^[16]。对于离散概率分布描述的随机变量 x ,其定义如下:

$$D_f(p||q) = \sum q(x) f(p(x)/q(x)) \quad (19)$$

其中, $p(x), q(x)$ 是 2 个离散概率分布,而 $f(\bullet)$ 是满足 $f(1)=0$ 的凸函数。不同的凸函数 $f(\bullet)$ 对应不同的 F-散度,其对应关系如表 1 所示。

表 1 F-散度与凸函数 $f(t)$ 对应关系

Table 1 Correspondence between F-divergence and function $f(t)$

F-散度	对应的凸函数 $f(t)$	定义式
KL 散度	$t \ln t$	$D_{KL}(p q) = \sum p(x) \ln [p(x)/q(x)]$
Hellinger 距离	$(\sqrt{t}-1)^2$	$D_{HD}(p q) = \sum (\sqrt{p(x)} - \sqrt{q(x)})^2$

在现有电力系统领域 DRO 计算的相关文献中,多数研究采用 KL 散度构建模糊集。而在概率统计和机器学习领域,目前已有不少研究采用 Hellinger 距离衡量 2 个概率分布之间的距离^[17-18]。由表 1 中不同 F-散度对应凸函数的定义式可知,KL 散度仅具有非负性,而不具有对称性且不满足三角公式,而 Hellinger 距离同时具有非负性与对称性,且满足三角公式,可以更好地衡量 2 个概率分布之间的距离^[19];KL 散度的取值范围为 $[0, +\infty)$,而 Hellinger 距离的取值范围为 $[0, 1]$,更容易通过控制距离阈值来控制模糊集中随机变量概率分布的变化程度。因此,本文采用 Hellinger 距离构建新能源场站出力概率分布的模糊集。假设新能源出力概率分布为离散分布,则构建的概率分布模糊集为

$$\begin{cases} D_{HD}(p_t||p_{t0}) = \sum_{s=1}^{N_t} (\sqrt{p_{t,s}(x)} - \sqrt{p_{t0,s}(x)})^2 \\ D_{HD}(p_t||p_{t0}) \leq \lambda, t = 1, 2, \dots, T \\ \sum_{s=1}^{N_t} p_{t,s}(x) = 1, p_{t,s}(x) \in [0, 1] \end{cases} \quad (20)$$

式中, p_t, p_{t0} 分别为 t 时段新能源场站出力的真实和参考概率分布, p_t 为决策变量, p_{t0} 可由历史数据样本统计得到; λ 为 Hellinger 距离阈值。

选取新能源场站每个时段一年的出力数据作为样本,将其出力范围平均划分为 s_N 个区间,采用各区间的中心值作为新能源出力的离散取值,统计数据样本落在各出力区间的频数,计算各区间的概率,作为参考概率分布。以时段 $t=12$ 的光伏电站出力为例,其频率直方图如图 1 所示。

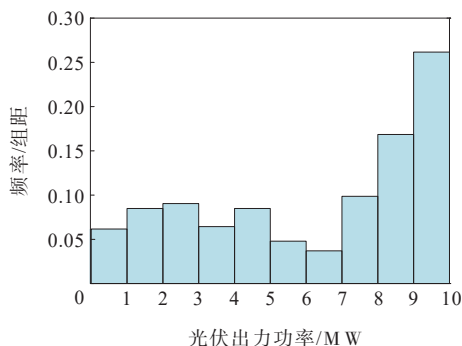


图1 时段 $t=12$ 光伏电站出力频率直方图

Figure 1 Histogram of output frequency of photovoltaic power plant at time period $t=12$

2.2 基于 Markov 链考虑新能源出力的时间相关性

在文 2.1 中构建新能源场站出力概率分布的模糊集过程中,均是假定新能源场站各个时段出力相互独立。而实际上,新能源场站出力具有显著的时间相关性,已有较多研究利用其时间相关性进行出力预测^[20]或优化调度^[21]。因此,在模糊集中增加出力的时间相关性约束,可以使 DRO 计算求得的最劣概率分布更加符合实际情况,并由于不同时段出力受到相关性的相互制约,可有效减小模糊集中随机变量概率分布的变化范围,从而降低 DRO 决策结果的保守性。

在随机过程理论中,Markov 链是一组具有 Markov 性质的离散变量的集合^[22]。Markov 性质也被称为“无记忆性”,是指 $t+1$ 步的变量仅与 t 步的变量有关,而与 t 步之前的变量无关。将新能源场站出力作为时间序列,采用 Markov 链描述新能源出力时间相关性。若某一个时段 t 新能源场站出力落在第 s 个区间,则记为出力状态 s ,下一个时段 $t+1$ 新能源场站出力的变化记为状态的转移。统计历史数据中各时刻之间状态转移的频数,当样本容量足够大时,可由频数计算概率,有序排列可得状态转移概率矩阵:

$$F_{l,t+1}(i,j) = f(i,j) / \sum_{j=1}^{N_s} f(i,j) \quad (21)$$

$$F_{l,t+1} = \begin{bmatrix} F_{l,t+1}(1,1) & \cdots & F_{l,t+1}(1,N_s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{l,t+1}(N_s,1) & \cdots & F_{l,t+1}(N_s,N_s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(21)、(22)中, i,j 分别为 $t,t+1$ 时段的出力状态序号, $i,j \in \{1,2,\dots,N_s\}$; $F_{l,t+1}(i,j)$ 为 t 时段出力状态

i 到 $t+1$ 时段出力状态 j 的转移概率; $f(i,j)$ 为历史数据样本集中相应状态转移的频数; $F_{l,t+1}$ 为由 t 到 $t+1$ 时段的状态转移概率矩阵。

假设 t 时段出力的离散概率分布为 $\mathbf{p}_t = [\rho_{t,1}, \rho_{t,2}, \dots, \rho_{t,N_s}]^T$,则由其状态转移概率矩阵可得 $t+1$ 时段出力的离散概率分布:

$$\hat{\mathbf{p}}_{t+1} = F_{l,t+1}^T \mathbf{p}_t \quad (23)$$

因而对 t 和 $t+1$ 时段的出力所增加的相关性约束为

$$\|\mathbf{p}_{t+1} - \hat{\mathbf{p}}_{t+1}\|_2 \leq \eta \quad (24)$$

式中, $\hat{\mathbf{p}}_{t+1}$ 为由 Markov 链计算所得 $t+1$ 时刻的概率分布; η 为考虑时间相关性的距离阈值。

因此,所建立的考虑新能源场站出力时间相关性的模糊集为

$$\Psi_t = \left\{ \mathbf{p}_t \left\{ \begin{array}{l} D_{\text{HD}}(\mathbf{p}_t | \mathbf{p}_{t,0}) = \sum_{s=1}^N (\sqrt{p_{t,s}(x)} - \sqrt{p_{0,s}(x)})^2 \\ D_{\text{HD}}(\mathbf{p}_t | \mathbf{p}_{t,0}) \leq \lambda, t = 1, 2, \dots, T \\ \sum_{s=1}^N p_{t,s}(x) = 1, p_{t,s}(x) \in [0, 1] \\ \|\mathbf{p}_t - \hat{\mathbf{p}}_t\|_2 \leq \eta, \hat{\mathbf{p}}_t = F_{l,t}^T \mathbf{p}_{t-1} \end{array} \right. \right\} \quad (25)$$

3 模型求解

针对所提出的交直流并联输电通道功率优化分配的两阶段 DRO 模型,采用 C&CG 算法将其分解为主问题与子问题进行交替迭代求解。其中,子问题如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\mathbf{p}_{l,s}} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} p_{t,s} \min \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{Gd}}} c_{\text{Gd}} \Delta P_{\text{Gd},t,s} + \sum_{i=1}^{N_{\text{d}}} c_{\text{Rd}} \Delta P_{\text{d},t,s} \right) \Delta t \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \text{式(13)~(18)} \\ \text{式(25)} \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (26)$$

在已知新能源场站出力预测场景对应的各个交直流输电通道传输功率、直调电厂的出力和备用容量的条件下,子问题求解模糊集中新能源场站出力的最恶劣概率分布 $p_{l,s}$ 。由于子问题中内层 min 模型中各时段新能源出力的离散取值相互独立,且外层 max 模型中概率分布变量 $p_{l,s}$ 不作为内层变量,

因而可将子问题分 2 步求解。先求解子问题 1,得到各时刻各新能源场站出力离散取值下的最优目标函数值 $\tau_{t,s}$,再求解子问题 2,得到模糊集中的最恶劣概率分布 $p_{t,s}$,即

$$\tau_{t,s} = \begin{cases} \min(\sum_{i=1}^{N_{Gd}} c_{Gd} \Delta P_{Gdj,t,s} + \sum_{l=1}^{N_{Rd}} c_{Rd} \Delta P_{dl,t,s}) \Delta t \\ \text{s.t. 式(13)~(18)} \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} \max_{p_{t,s}} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} p_{t,s} \tau_{t,s} \\ \text{s.t. 式(25)} \end{cases} \quad (28)$$

每完成一次子问题的求解,都会向主问题返回新的变量与约束条件,主问题如下:

$$\begin{cases} \min f_1 + L \\ \text{s.t. } \begin{cases} L \geq \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} \hat{p}_{t,s}^q \min f_2^q \\ \text{式(5)~(12)} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

式中, q 为 C&CG 算法迭代次数; L 为引入松弛变量。

C&CG 算法的具体步骤:① 设定下界 $B_L=0$, 上界 $B_U=+\infty$, 迭代次数为 1, 收敛精度 $\epsilon=0.01$;② 求解主问题, 得到最优解, 将解传递给子问题, 并更新下界 B_L ;③ 依次求解子问题 1、2, 得到最优解, 生成新的变量与约束条件返回至主问题, 并更新上界 B_U ;④ 若 $|B_U - B_L| < \epsilon$, 则停止迭代, 并输出此时的最优解; 否则返回步骤 2)。

4 算例分析

4.1 修改的 IEEE 39 节点系统

修改的 IEEE 39 节点系统如图 2 所示, 该系统划分为 I、II 区, 考虑到 I 区发电机较少而 II 区发电机较多, 设置 I 区为受电区域, II 区为送电区域。连接 2 个区域间的交直流并联输电通道, 包括交流输电线路 31-1、14-15 和 22-21, LCC 常规直流输电线路 4-3, VSC 三端柔性直流输电线路 19-24-16。此外, 在节点 32 和 35 处分别接入光伏电站与风电场, 并设置节点 36 和 39 发电机为直调电厂, 其余发电节点均为给定出力计划的常规机组。其中, 光伏电站和风电场的预测出力以及常规机组总出力和区域间总电力交换计划如图 3 所示。

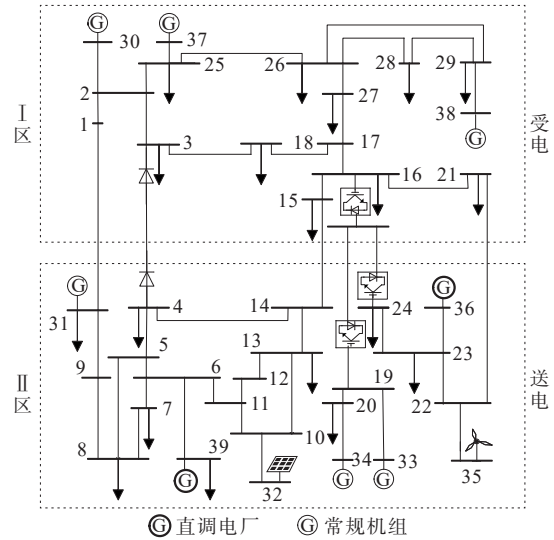


图 2 修改的 IEEE 39 节点系统

Figure 2 Modified IEEE-39 system

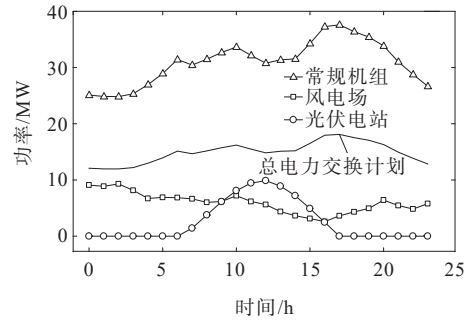


图 3 各种机组出力计划及总电力交换计划

Figure 3 Power output plan of different generators and total power exchange plan between two regions

取 Hellinger 距离阈值 $\lambda=0.5$, 考虑时间相关性的距离阈值 $\eta=0.5$, 采用 C&CG 算法求解交直流并联输电通道功率优化分配的两时段 DRO 模型。经过 3 次交迭代收敛, 总目标函数值为 37 283.5 元, 其中第 1 阶段成本 f_1 为 20 563.1 元, 第 2 阶段成本期望值 $E(f_2)$ 为 16 720.4 元。各个交直流输电通道的功率传输计划如图 4 所示。

为验证 DRO 模型计算结果在新能源场站出力不确定波动条件下的鲁棒性, 将其与确定性的交直流输电通道功率优化分配模型(两阶段 DRO 模型的第 1 阶段优化模型中去掉直调电厂旋转备用约束)的计算结果进行对比。假定新能源场站出力的不确定波动范围为预测值的 $\pm 25\%$, 在新能源出力波动下, 确定性优化解与 DRO 解对应输电通道 22-21 传输功率的上、下界如图 5 所示。

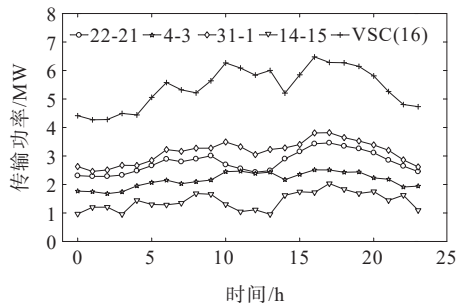


图4 输电通道传输功率计划

Figure 4 Transmission channel transmission power plans

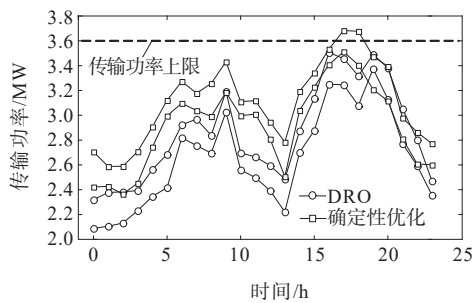


图5 新能源出力±25%波动时22-21通道传输功率

Figure 5 Transmission power of the channel 22-21 with ±25% fluctuation of renewable energy output

由图4可以看出,电阻较小的柔性直流输电通道VSC(16)的传输功率较大,而电阻较大的交流输电通道14-15的传输功率较小,以此减小整个交直流并联输电通道的有功损耗。

由图5可以看出,对于确定性优化计算结果来说,当实际出力相较于预测出力偏差较大时,会存在输电通道22-21传输功率在部分时段超过安全限值的问题。而对于DRO计算结果,则能够保证在新能源场站出力的随机波动范围内输电通道功率都不会越限,确保系统的安全运行。这是因为DRO模型考虑了新能源场站出力随机波动的模糊集中的最恶劣概率分布,并通过调整直调电厂的备用容量和直流输电通道功率来应对新能源场站出力的随机波动。这表明DRO结果能够在提升系统经济性的同时保证了系统在新能源场站出力不确定波动条件下的安全运行。

为分析考虑新能源场站出力时间相关性的影响,将其与未考虑时间相关性的结果进行对比,即模糊集构建时不考虑式(23)、(24)的相关性约束,结果如表2所示。

表2 考虑新能源出力时间相关性的结果对比

Table 2 The result comparison of considering the output time-correlation of new energy 元

模糊集	第1阶段成本	第2阶段成本	总成本
考虑相关性	20 563.1	16 720.4	37 283.5
不考虑相关性	21 082.8	17 305.6	38 388.4

由表2可以看出,在考虑时间相关性时,求解结果中2个阶段成本均低于不考虑时间相关性的成本。这是因为所提出的基于Markov链考虑时间相关性的方法,构建的模糊集能够更准确地反映新能源出力波动的实际情况,并有效减小了模糊集中随机变量概率分布的变化范围,从而降低了DRO决策结果的保守性。

当Hellinger距离阈值 λ 选取不同值时,对应的DRO计算结果的目标函数值也不同,与基于KL散度距离的DRO计算结果进行对比,如图6所示。

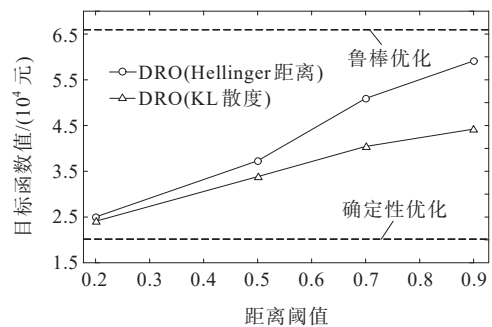


图6 不同距离阈值下的目标函数值

Figure 6 Objective function values under different λ values

由图6可以看出,随着距离阈值的增大,2种距离对应的目标函数值都有所增大,即DRO决策结果的保守度都有所提升,趋近于鲁棒优化决策结果,得到的最恶劣概率分布的恶劣程度也越高。但是,由于KL散度距离取值范围为 $[0, +\infty)$,而Hellinger距离的取值范围为 $[0, 1]$,因此,能够通过控制距离阈值 λ 取值来限制模糊集中真实概率分布与参考概率分布之间的距离,进而控制DRO计算结果的保守度。

4.2 实际南方电网

以实际南方电网数据为例,验证所提方法应用于大规模交直流混联系统的有效性。网架结构如图7所示,系统共包括1 524个节点,其中发电机节点227个(光伏电站节点21个、风电场节点40个、直调电厂发电机节点40个和常规发电机节点126个)。

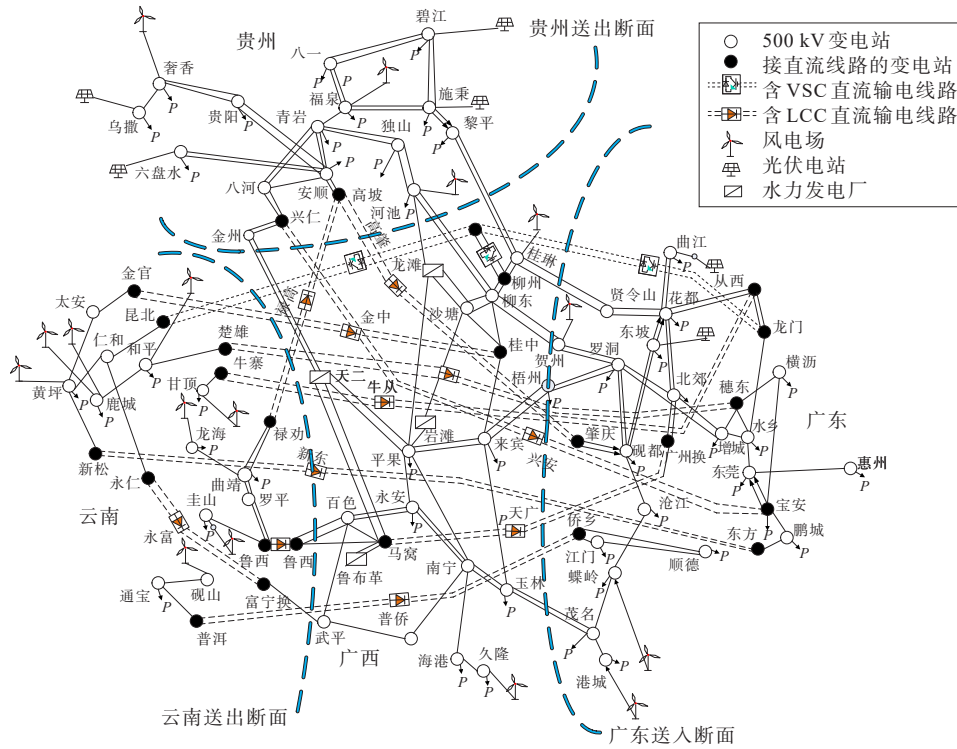


图7 南方电网 1 524 个节点简化系统结构

Figure 7 Structure of simplified 1 524 bus system in China Southern Power Grid

系统最大负荷为 115 853 MW,光伏电站和风电场的总装机容量为 35 600 MW,故新能源渗透率达到 31.8%。系统包括“八交十一直”的西电东输电主通道,各回直流输电通道的参数如表 3 所示,各省网与外网的总电力交换计划曲线如图 8 所示。

表 3 各直流输电通道参数

Table 3 Parameters of each DC transmission channel

直流线路	运行极数	额定电压/kV	线路单极电组/ Ω	最大传输功率/MW
天广直流	2	± 500	22.16	1 800
禄高直流	2	± 500	3.90	1 500
高肇直流	2	± 500	10.00	3 000
兴安直流	2	± 500	12.15	3 000
楚穗直流	2	± 800	11.17	5 000
普侨直流	2	± 800	11.17	5 000
牛从直流双回	4	± 500	9.66	6 400
金中直流	2	± 500	9.17	3 200
新东直流	2	± 800	11.50	5 000
鲁西背靠背	3	± 500	0.13	3 000
昆柳龙(昆北)	2	± 800	3.66/1.34/3.39	8 000/3 000/ 5 000

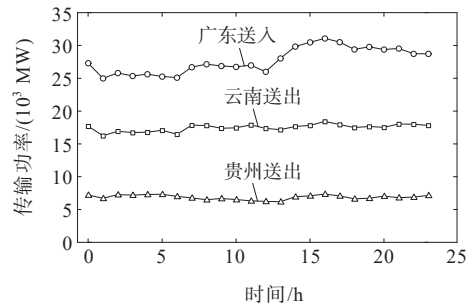


图 8 各省网与外网的总电力交换计划曲线

Figure 8 Total power exchange plan curves between provincial and external networks

取 Hellinger 距离阈值 $\lambda=0.5$,考虑时间相关性的距离阈值 $\eta=0.3$,采用 C&CG 算法求解交直流并联输电通道功率分配的两时段 DRO 模型。经过 5 次交替迭代收敛,总目标函数值为 1.441×10^7 元,其中第 1 阶段成本 f_1 为 8.24×10^6 元,第 2 阶段成本期望值 $E(f_2)$ 为 6.17×10^6 元,各回输电通道的功率传输计划如图 9、10 所示,可以看出,对于交流输电通道,距离较短电阻较小的北交流通道(桂林—贤令山双回)的传输功率较大,而距离较长电阻较大的中南交流通道(梧州—罗洞双回)的传输功率较小;对于直流输电通道,楚穗、普侨、新东和昆柳龙等

±800 kV 特高压直流输电通道的传输功率较大,而天广和兴安等电阻较大的±500 kV 超高压直流输电通道的传输功率较小,以此降低整个交直流并联输电通道的有功损耗和提高系统运行的经济性。

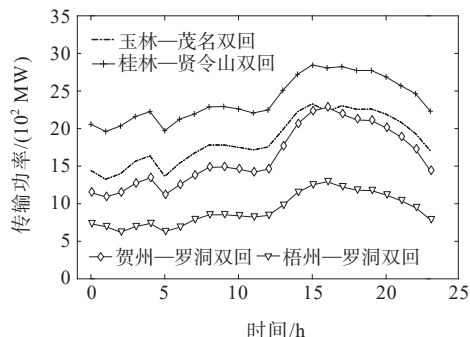


图9 交流输电通道传输功率计划

Figure 9 AC transmission channel transmission power plan

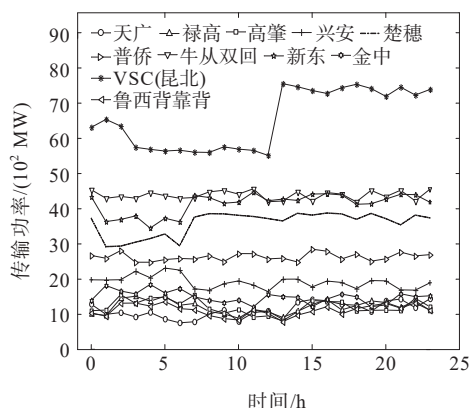


图10 直流输电通道传输功率计划

Figure 10 DC transmission channel transmission power plan

另外,不同Hellinger距离阈值λ下DRO计算结果对应的系统总成本如表4所示,在大规模交直流混联系统中,控制Hellinger距离阈值来调节DRO决策结果保守度的效果依旧比通过控制KL散度距离阈值要更方便。

表4 不同距离阈值下的目标函数值

Table 4 Objective function values under different λ values 10⁶元

阈值λ	总成本	
	Hellinger距离	KL散度
0.2	9.67	9.31
0.5	14.41	13.07
0.7	19.68	15.62
0.9	22.86	17.09

5 结语

本文建立了考虑新能源场站出力不确定性和时间相关性的交直流并联输电通道功率分配的两阶段DRO模型,并采用C&CG算法进行求解,通过算例分析得到如下结论:

1) 所建立的两阶段DRO模型计算结果对应的交直流并联输电通道功率分配计划,能够保证在新能源场站出力随机波动条件下系统的安全运行,并且与鲁棒优化计算结果比较,其能够提高系统运行的经济性;

2) 所提出的基于Hellinger距离构建新能源场站出力概率分布的模糊集,相较于KL散度距离能够更好地通过控制来控制DRO决策结果的保守度;并采用Markov链描述新能源场站出力的时间相关性,能够更准确地反映新能源出力的实际波动情况,并有效缩小了模糊集中随机变量概率分布变化的范围,从而降低了DRO决策结果的保守性。

交直流输电通道功率分配将影响电网运行的安全稳定,如何在功率优化分配模型中考虑系统运行的稳定性约束,如送端和受端电网发电机组之间的振荡稳定性约束,是后续的重要研究方向。

参考文献:

[1] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4371-4386.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386.

[2] 周远翔,陈健宁,张灵,等.“双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J].高电压技术,2021,47(7):2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and

- new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7):2396-2408.
- [3] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
- LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18):6245-6259.
- [4] LIN S, YANG Z, FAN G, et al. A mixed-integer second-order cone programming algorithm for the optimal power distribution of AC-DC parallel transmission channels[J]. Energies, 2019, 12(19):3605.
- [5] 徐帆,丁怡,韩红卫,等. 促进跨区新能源消纳的直流联络线功率优化模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18):152-159.
- XU Fan, DING Qia, HA Weihong, et al. Power optimization model and analysis of HVDC tie-line for promoting integration of inter-regional renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18):152-159.
- [6] 陈跃辉,向萌,张斌,等. 跨省联络线的优化调度模式及预警策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 100-107.
- CHEN Yuehui, XIANG Meng, ZHANG Bin, et al. Optimal dispatch modes of cross-provincial tie-line and early-warning strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18):100-107.
- [7] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Adaptive robust tie-line scheduling considering wind power uncertainty for interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2701-2713.
- [8] 王奇,刘翠平,王雅平,等. 考虑风电接入的交直流互联电网输电通道功率优化分配[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6):174-181.
- WANG Qi, LIU Cuiping, WANG Yaping, et al. Optimal power allocation of transmission channels in AC-DC interconnected power grid considering wind power access [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6):174-181.
- [9] 尉耀稳,李跃龙,陈思超,等. 多类型源储协调互动的配电网分布鲁棒优化调度[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5): 192-199.
- YU Yaowen, LI Yuelong, CHEN Sichao, et al. Distributionally robust optimal dispatch of distribution network considering multiple source-storage coordinated interaction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):192-199.
- [10] 许丹莉,顾慧杰,周华锋,等. 考虑动态频率约束的风-光-抽蓄互补发电系统短期优化调度模型[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(12):115-123.
- XU Danli, GU Huijie, ZHOU Huafeng, et al. A short-term optimal scheduling model for the wind-solar-pumped storage complementary power generation system considering dynamic frequency constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(12):115-123.
- [11] 赵晶晶,朱炯达,李振坤,等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16):61-71.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16):61-71.
- [12] 周任军,闵雄帮,童小娇,等. 电力环保经济调度矩不确定分布鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13):3248-3256.
- ZHOU Renjun, MIN Xiongbang, TONG Xiaojiao, et al. Distributional robust optimization under moment uncertainty of environmental and economic dispatch for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3248-3256.
- [13] ZHU R, WEI H, BAI X. Wasserstein metric based distributionally robust approximate framework for unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):2991-3001.
- [14] 杜锡力,李笑竹,陈来军,等. 面向多场景调节需求的集中式共享储能鲁棒优化配置[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23):5911-5921.
- DU Xili, LI Xiaozhu, CHEN Laijun, et al. Robust optimization of centralized shared energy storage for multi-scenario regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23):591-5921.
- [15] CHEN Y, GUO Q, SUN H, et al. Distributionally robust optimization model for unit commitment based on kullback-leibler divergence[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5):5147-5160.

- [16] CSISZAR I. Information-type measures of difference of probability distributions and indirect observations[J]. *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica*, 1967, 2: 299-3180.
- [17] 王志祥. 基于 Hellinger 距离的两个正态总体的同质性检验[J]. *统计与决策*, 2016(16):13-16.
WANG Zhixiang. Homogeneity test of two normal populations based on Hellinger distance[J]. *Statistics & Decision*, 2016(16):13-16.
- [18] ZHU C S, XIAO F Y. A belief Hellinger distance for D-S evidence theory and its application in pattern recognition [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2021, 106:104452.
- [19] 赵亮, 刘建辉, 王星. 基于 Hellinger 距离的混合数据集中分类变量相似度分析[J]. *计算机科学*, 2016, 43(6): 280-282.
ZHAO Liang, LIU Jianhui, WANG Xing. Hellinger distance based similarity analysis for categorical variables in mixture dataset[J]. *Computer Science*, 2016, 43(6):280-282.
- [20] 陈金富, 朱乔木, 石东源, 等. 利用时空相关性的多位置多步风速预测模型[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 2093-2106.
CHEN Jinfu, ZHU Qiaomu, SHI Dongyuan, et al. A multi-step wind speed prediction model for multiple sites leveraging spatio-temporal correlation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7):2093-2106.
- [21] 叶林, 李智, 孙铂皓, 等. 基于随机预测控制理论和功率波动相关性的风电集群优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(11):3172-3183.
YE Lin, LI Zhi, SUN Bohao, et al. Optimal dispatch of system integrated wind farm clusters based on stochastic model predictive control considering temporal correlation of wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(11): 3172-3183.
- [22] 周荫清. 随机过程理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013:214-216.
ZHOU Yinqing. *Stochastic process theory*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2013:214-216.

(上接第 166 页 = Continued from page 166)

- [21] ZHANG J, YU S, WU D, et al. Nonsingular fixed-time terminal sliding mode trajectory tracking control for marine surface vessels with anti-disturbances[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 217(8):108158.
- [22] 刘宜成, 熊宇航, 杨海鑫. 基于 RBF 神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 2790-2798.
LIU Yicheng, XIONG Yuhang, YANG Haixin. Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(11): 2790-2798.
- [23] 张骁骏, 袁夏明, 王向阳, 等. 一种固定时间收敛模型参考终端滑模控制方法[J]. *自动化学报*, 2022, 48(3): 712-723.
ZHANG Xiaojun, YUAN Xiaming, WANG Xiangyang, et al. A model reference terminal sliding mode control method with fixed-time convergence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(3):712-723.
- [24] 苏博, 王洪斌, 王跃灵, 等. 基于固定时间滑模干扰观测器的 AUVs 事件触发编队控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5):1116-1126.
SU Bo, WANG Hongbin, WANG Yueling, et al. Event-triggered formation control for AUVs with fixed-time sliding mode disturbance observer[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5):1116-1126.
- [25] 王本斐, 张荣辉, 冯国栋, 等. 基于事件触发的直流微电网无差拍预测控制[J/OL]. *自动化学报*: 1-12[2021-12-23]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210585>.
WANG Benfei, ZHANG Ronghui, FENG Guodong, et al. Event-triggered deadbeat predictive control for DC microgrid[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*: 1-12 [2021-12-23]. <https://doi.org/10.16383/j.aas.c210585>.
- [26] HU S, YUAN P, YUE D, et al. Attack-resilient event-triggered controller design of DC microgrids under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(2):699-710.