

考虑新能源波动区间的交直流配电网下垂斜率鲁棒优化方法

孙峰洲¹, 刘海涛², 陈庆³, 于森¹, 韦巍¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省南京市 210024)

摘要: 为应对交直流配电网中新能源出力的不确定性,以交直流混合配电网电压源型变流器(VSC)为研究对象,提出了考虑新能源波动区间的交直流配电网VSC下垂斜率鲁棒优化方法。该方法在保证系统鲁棒安全的前提下最小化期望场景的网损,并采用列和约束生成算法进行求解。在下垂控制中,提出 V_{ac}^2-P 和 V_{ac}^2-Q 双下垂控制,在保证线性反馈下垂特性的前提下,将模型的子问题转化为混合整数二阶锥规划问题。此外,为提高子问题二阶锥松弛的精确性,提出了支路损耗限值策略,通过求解支路损耗最优潮流模型,确定每次迭代过程中给定斜率下各支路可能的最大损耗,并在子问题中以此为约束对支路电流进行限值。数值实验结果表明,提出的优化方法可以以微小的经济代价显著提高系统的鲁棒安全性。支路损耗限值策略能有效提高二阶锥松弛的精确性,从而增强子问题对于极端场景的寻优能力。

关键词: 交直流配电网; 下垂控制; 斜率优化; 二阶锥松弛

0 引言

分布式新能源的快速发展,对传统配电网的安全经济运行提出了新的挑战^[1]。在此背景下,交直流混合配电网被视为一种行之有效的解决方案^[2]。多个交流配电系统通过电压源型变流器(VSC)与直流配电网连接,通过潮流调控,实现多个交流系统间的功率互联,能够有效缓解线路过载压力,实现电能的跨区域共享,提高配电系统的供电可靠性^[3-5]。

在交直流混合配电网中,VSC的控制方式和交互功率直接影响电能的利用效率和系统的安全性。因此,多VSC的协调控制是交直流配电网能量管理中的关键问题^[6]。其中,下垂控制是一类较为主流的VSC控制方式,通过多变流器间下垂协调为系统提供功率支撑,可以在降低通信需求的同时,提高系统运行的安全性和经济性^[7-8]。针对考虑系统潮流的VSC下垂调控问题,文献[9-10]均以最小化总网损为目标,前者优化VSC下垂参考点,后者优化VSC下垂斜率。文献[11]则进一步对参考点和下垂斜率进行多时间尺度协同优化,有效降低了新能源高渗透率对系统安全性的不利影响。但上述文献

均忽略了新能源的预测误差。

由于新能源具有不确定性,当其实际出力与预测出力存在较大误差时,系统潮流可能发生越限^[12]。针对该问题,文献[13-14]分别针对交直流混合微网和多微网群提出了二阶段min-max-min鲁棒优化模型,通过优化VSC交互功率,保证最恶劣场景下系统的安全运行。但仅追求最恶劣场景下的最优调度,可能使求得的解过于保守^[15-16]。为充分考虑调度指令对配电网潮流的影响,文献[17]建立了基于分支流潮流的两阶段鲁棒优化模型,采用基于二阶锥规划的列和约束生成(CCG)算法将原问题分解为主问题和子问题迭代求解。在此基础上,文献[18]针对主问题二阶锥松弛不精确的问题,提出了基于切平面的迭代校正方法。但子问题同样存在二阶锥松弛不精确的问题,且该迭代法不适用,因此,其求解结果的可靠性有待进一步提高。同时,上述文献均在给定的不确定集内进行鲁棒优化调度,缺乏对于系统新能源波动区间的定量分析。

针对以上问题,本文建立了交直流配电网多VSC下垂斜率协调鲁棒优化模型,通过功率-电压双下垂控制改善配电网潮流,有效提高了系统对新能源功率随机波动的消纳能力。其主问题修正模型能自适应调整新能源波动区间的大小,以求得保证系统安全运行的最大新能源预测误差,作为评价系统鲁棒安全性的指标。此外,在优化算法上,针对

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-11。

上网日期: XXXX-XX-XX。

国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700); 国家电网有限公司科技项目资助(SGDK0000PDJS1806935)。

CCG算法子问题二阶锥松弛不精确,本文提出了支路损耗限值策略,能有效减小二阶锥松弛间隙,进而增强子问题对于极端场景的寻优能力和求解结果的可靠性。

1 功率-电压双下垂控制模式

多个交流子网通过VSC与直流子网形成互联,其示意图如图1所示。

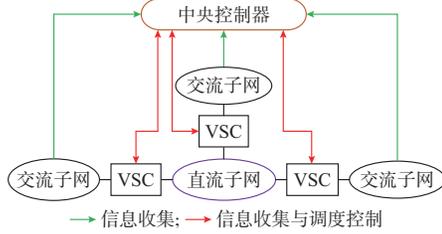


图1 交直流配电网示意图
Fig. 1 Diagram of AC-DC distribution network

其中,VSC采用分层下垂控制,中央控制器收集系统状态数据,并定期向各VSC发送下垂指令。在调度间隔内,各VSC依据下垂指令自动调节功率输出以响应本地电压变化。首先,在日前调度中,基于全天长期光伏预测数据,以小时为间隔进行日前优化调度,确定每小时VSC的最优电压和功率参考运行点。在此基础上,在日内运行过程中,日内调度每小时进行1次,基于该时段内的短期光伏预测数据和日前最优参考点,进行下垂斜率优化,确定该时段内VSC下垂斜率。传统斜率优化方法^[11]忽略了光伏的不确定性,因此在实际运行中,当光伏实际出力偏离期望场景时,系统节点电压和支路电流存在越限风险。作为文献[11]的进一步拓展研究,针对该问题,本文提出多VSC下垂斜率协调鲁棒优化方法,进一步考虑短期光伏预测数据存在误差,以不确定集的形式描述光伏实际可能的出力范围,构建以期望场景下系统总网损最小为目标函数,以光伏不确定集内系统潮流安全为约束的下垂斜率鲁棒优化模型,以保证当新能源在不确定集内任意波动时,系统稳态安全约束不越限。

此外,为使下垂方程与分支潮流方程相适应,将优化模型构建为凸问题,本文以VSC交流侧电压的平方 V_{ac}^2 为控制变量,提出功率-电压双下垂控制模式。其中一台VSC作为主变流器,采用定直流电压和 V_{ac}^2 -Q下垂控制,其余VSC作为从站,采用 V_{ac}^2 -P和 V_{ac}^2 -Q双下垂控制。

$$V_{dc,i}^2 = V_{dc,ref,m}^2 \quad i \in B_{M,dc} \quad (1)$$

$$V_{ac,ref,m}^2 - V_{ac,i}^2 = k_{q,m} (Q_{vsc,m} - Q_{ref,m}) \quad i \in B_{ac}^M \quad (2)$$

$$V_{ac,ref,m}^2 - V_{ac,i}^2 = k_{p,m} (P_{vsc,m} - P_{ref,m}) \quad i \in B_{S,ac} \quad (3)$$

$$V_{ac,ref,m}^2 - V_{ac,i}^2 = k_{q,m} (Q_{vsc,m} - Q_{ref,m}) \quad i \in B_{S,ac} \quad (4)$$

式中: $k_{p,m}$ 和 $k_{q,m}$ 分别为第 m 台VSC有功功率和无功功率的下垂斜率,其可行域可由VSC稳定性分析确定^[20]; $V_{ac,i}$ 和 $V_{dc,i}$ 分别为交流和直流 i 节点的电压幅值; $V_{ac,ref,m}$ 和 $V_{dc,ref,m}$ 分别为第 m 台VSC交流电压和直流电压的参考点; $P_{vsc,m}$ 和 $Q_{vsc,m}$ 分别为第 m 台VSC有功输出功率和无功输出功率,设注入交流系统为正方向; $P_{ref,m}$ 和 $Q_{ref,m}$ 分别为第 m 台VSC有功功率和无功功率的参考点; $B_{M,dc}$ 和 $B_{M,ac}$ 分别为与主VSC连接的直流侧与交流侧节点集合; $B_{S,ac}$ 为与从VSC连接的交流侧节点集合。

在实际控制中,非线性下垂控制可能对VSC的控制稳定性产生影响^[8]。因此,为说明其下垂控制特性,以 V_{ac}^2 -P下垂为例对下垂方程进行线性度分析。线性度 μ 定义为输出特性曲线对其拟合直线的最大相对偏差^[19]。线性度越小,表明曲线的线性特性越好,其计算公式如下:

$$\mu = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{max}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: ΔY_{max} 为输出特性曲线与其拟合直线的最大偏差; Y_{max} 为值域量程。

设 $V_{ac,ref} = 1.023$, $P_{ref} = 0.149$, $k_p = 0.170$ (本文均采用标么值表达),在VSC有功出力范围 $[-0.6, 0.6]$ 内,采用最小二乘法对 V_{ac}^2 -P下垂曲线进行线性拟合,下垂曲线及其线性拟合曲线如图2所示。

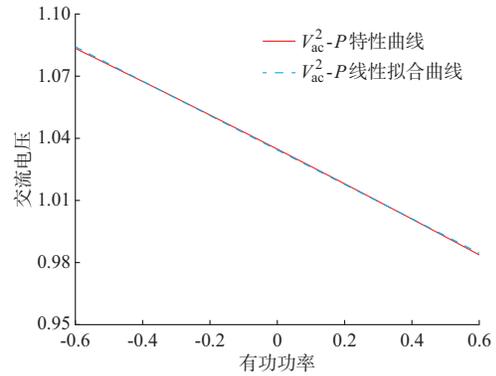


图2 V_{ac}^2 -P下垂特性
Fig. 2 Droop feature of V_{ac}^2 -P

由图2计算可得, V_{ac}^2 -P下垂曲线的线性度为0.0082%,具有良好的线性特性,VSC有功功率在实际出力范围内与交流电压呈近似线性关系,该结论对 V_{ac}^2 -Q下垂控制同样适用。因此,本文提出的 V_{ac}^2 -P和 V_{ac}^2 -Q双下垂控制,能够在不影响传统线性

反馈下垂特性和VSC控制稳定性的前提下,保证优化模型的凸性。

2 基于CCG算法的下垂斜率鲁棒优化模型

设系统中共包含 z 台VSC, N 台新能源发电设备,其新能源出力不确定集 U 可表示为:

$$U = \{P_{\text{res},v} | (1 - \theta_{0,v})P_{\text{f,res},v} \leq P_{\text{res},v} \leq (1 + \theta_{0,v})P_{\text{f,res},v}\} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{res},v}$ 为第 v 台新能源系统的实际出力; $P_{\text{f,res},v}$ 为调控时段内第 v 台新能源系统的日前预测出力; $\theta_{0,v}$ 为第 v 台新能源的初始不确定系数,可等效为预测误差。

根据CCG算法,鲁棒优化模型可以解耦为斜率优化主问题(MP)和极端场景寻优子问题(SP)迭代求解。MP在保证有限极端场景中系统安全运行的前提下,以期望场景总网损最小为目标函数,优化下垂斜率。而SP旨在识别给定下垂斜率下稳态安全约束越限最严重的场景,并将其作为极端场景加入主问题的极端场景集合中。值得说明的是,当初始不确定系数过大时,MP有可能无解,说明此时新能源波动剧烈,系统无法仅通过斜率优化保证所有极端场景下系统的安全稳定运行。针对该问题,本文提出新能源波动区间修正模型(RMP),对新能源不确定系数进行进一步松弛优化,以求得能保证系统鲁棒运行的配电网最大新能源波动区间 U ,进而对系统的鲁棒性能进行定量评估。最大新能源波动区间指在本文提出的下垂控制下,能保证斜率鲁棒优化有解的最大新能源预测误差。

2.1 斜率优化主问题模型

1) 目标函数

$$\min \sum_{t=1}^n \sum_{e=1}^w P_{t,e} \quad (7)$$

式中: $P_{t,e}$ 为 t 时刻并网节点 e 注入功率; w 为并网节点数; n 为光伏出力期望场景数。值得说明的是,最小化主网注入配电网功率之和等价于最小化配电网总网损^[20]。

在有功功率-电压和无功功率-电压双下垂控制中,斜率本质上是VSC功率对于本地电压变化响应的灵敏度。当新能源偏离预测出力时,VSC根据优化的下垂曲线响应电压变化,自适应调节功率输出,以改善系统的电压和潮流分布,能保证在给定的新能源波动区间内系统电压和潮流始终不越限,同时尽可能降低期望场景下的网损,兼顾系统的安全性和经济性。下列约束对于全部 $P_{\text{res},v} \in K_l \cup D$ 均成立,其中 K_l 为第 l 次迭代中的极端场景集合,包含 $l-1$ 个极端场景; D 为光伏期望场景集合。

2) 交直流分支潮流约束^[17]

$$P_{\text{ac},j} + \sum_{i=1}^{\epsilon_j} (P_{\text{ac},ij} - r_{ij}\bar{I}_{\text{ac},ij}) = \sum_{k=1}^{\kappa_j} P_{\text{ac},jk} \quad j \in B_{\text{ac}} \quad (8)$$

$$Q_{\text{ac},j} + \sum_{i=1}^{\epsilon_j} (Q_{\text{ac},ij} - x_{ij}\bar{I}_{\text{ac},ij}) + c_j\bar{V}_{\text{ac},j} = \sum_{k=1}^{\kappa_j} Q_{\text{ac},jk} \quad j \in B_{\text{ac}} \quad (9)$$

$$\bar{V}_{\text{ac},j} = \bar{V}_{\text{ac},i} - 2(r_{ij}P_{\text{ac},ij} + x_{ij}Q_{\text{ac},ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)\bar{I}_{\text{ac},ij} \quad i, j \in E_{\text{ac}} \quad (10)$$

$$P_{\text{dc},i} = \sum_{j=1}^{\epsilon_j} P_{\text{dc},ij} \quad j \in B_{\text{dc}} \quad (11)$$

$$P_{\text{dc},ij} + P_{\text{dc},ji} - z_{ij}\bar{I}_{\text{dc},ij} = 0 \quad i, j \in E_{\text{dc}} \quad (12)$$

$$\bar{V}_{\text{dc},i} - \bar{V}_{\text{dc},j} - z_{ij}(P_{\text{dc},ij} - P_{\text{dc},ji}) = 0 \quad i, j \in E_{\text{dc}} \quad (13)$$

$$P_{\text{ac},ij}^2 + Q_{\text{ac},ij}^2 = \bar{I}_{\text{ac},ij}\bar{V}_{\text{ac},i} \quad i, j \in E_{\text{ac}} \quad (14)$$

$$P_{\text{dc},ij}^2 = \bar{I}_{\text{dc},ij}\bar{V}_{\text{dc},i} \quad i, j \in E_{\text{dc}} \quad (15)$$

式中: B_{ac} 和 B_{dc} 分别为交流和直流节点集合; E_{ac} 和 E_{dc} 分别为交流和直流支路集合; ϵ_j 为 j 节点上游的节点个数; κ_j 为 j 节点下游的节点个数; $P_{\text{ac},j}$ 和 $Q_{\text{ac},j}$ 分别为交流 j 节点的注入有功功率和无功功率; $P_{\text{ac},ij}$ 和 $Q_{\text{ac},ij}$ 分别为流经交流 ij 支路的有功功率和无功功率; $P_{\text{ac},jk}$ 和 $Q_{\text{ac},jk}$ 分别为流经交流 jk 支路的有功功率和无功功率; $P_{\text{dc},i}$ 为注入直流节点 i 的有功功率; $P_{\text{dc},ij}$ 和 $P_{\text{dc},ji}$ 分别为流经直流 ij 支路和 ji 支路的有功功率; r_{ij} , x_{ij} , c_j 和 z_{ij} 分别为交流 ij 支路的电阻、电抗、节点 j 并联电纳和直流 ij 支路电阻; $\bar{I}_{\text{ac},ij}$ 和 $\bar{I}_{\text{dc},ij}$ 分别为交流和直流 ij 支路的电流幅值平方; $\bar{V}_{\text{ac},j}$ 和 $\bar{V}_{\text{dc},j}$ 分别为交流和直流节点 j 的电压幅值平方; $\bar{V}_{\text{ac},i}$ 和 $\bar{V}_{\text{dc},i}$ 分别为交流和直流节点 i 的电压幅值平方。

式(14)和式(15)可进一步松弛为下列二阶锥约束。

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{\text{ac},ij} \\ 2Q_{\text{ac},ij} \\ \bar{I}_{\text{ac},ij} - \bar{V}_{\text{ac},i} \end{array} \right\|_2 \leq \bar{I}_{\text{ac},ij} + \bar{V}_{\text{ac},i} \quad i, j \in E_{\text{ac}} \quad (16)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{\text{dc},ij} \\ \bar{I}_{\text{dc},ij} - \bar{V}_{\text{dc},i} \end{array} \right\|_2 \leq \bar{I}_{\text{dc},ij} + \bar{V}_{\text{dc},i} \quad i, j \in E_{\text{dc}} \quad (17)$$

3) 稳态安全约束

$$V_{\text{ac},\min}^2 \leq \bar{V}_{\text{ac},i} \leq V_{\text{ac},\max}^2 \quad i \in B_{\text{ac}} \quad (18)$$

$$I_{\text{ac},\min}^2 \leq \bar{I}_{\text{ac},ij} \leq I_{\text{ac},\max}^2 \quad i, j \in E_{\text{ac}} \quad (19)$$

$$V_{\text{dc},\min}^2 \leq \bar{V}_{\text{dc},i} \leq V_{\text{dc},\max}^2 \quad i \in B_{\text{dc}} \quad (20)$$

$$I_{\text{dc},\min}^2 \leq \bar{I}_{\text{dc},ij} \leq I_{\text{dc},\max}^2 \quad i, j \in E_{\text{dc}} \quad (21)$$

式中: $V_{\text{ac},\max}$ 和 $V_{\text{dc},\max}$ 分别为交直流节点电压的上限; $V_{\text{ac},\min}$ 和 $V_{\text{dc},\min}$ 分别为交直流节点电压的下限;

$I_{ac, \max}$ 和 $I_{dc, \max}$ 分别为交直流支路电流的上限； $I_{ac, \min}$ 和 $I_{dc, \min}$ 分别为交直流支路电流的下限。

4) VSC约束

$$Q_{vsc, m}^2 + P_{vsc, m}^2 \leq S_{\max, m}^2 \quad (22)$$

式中： $S_{\max, m}$ 为第 m 台VSC的视在容量。

5) 其余约束

下垂约束同式(1)一式(4)。

2.2 新能源波动区间修正模型

1) 目标函数

新能源波动区间修正模型的目标在于求解能保证系统鲁棒运行的配电网最大新能源波动区间 U 。值得说明的是,新能源不确定系数是系统参数而非可控变量,因此修正模型仅用于分析系统在下垂控制下对于新能源波动的消纳能力,评估系统的鲁棒性能,而非下达调度指令。以各子网内新能源不确定参数均相同为例,系统最大联合新能源波动区间目标函数如下:

$$\max \sum_{v=1}^N \theta_v, \theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_N \quad (23)$$

式中： θ_v 为第 v 台新能源松弛不确定系数,为优化变量。

2) 极端场景集合松弛约束

本文模型中,在凸多面体不确定集下,各新能源出力极端场景一定处于其不确定区间的边界^[13]。因此,在第 l 次迭代中,定义极端场景集合关联矩阵 $A_{(l-1) \times N}$ 的元素如下。

$$(a_{l,v})_{(l-1) \times N} = \begin{cases} 1, & P_{res, l, v} = (1 + \theta_{l-1, v}) P_{f, res, v} & t = 1, 2, \dots, l-1 \\ -1, & P_{res, l, v} = (1 - \theta_{l-1, v}) P_{f, res, v} & v = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (24)$$

则极端场景集合松弛约束可表示为:

$$P_{res, l, v} = (1 + a_{l,v} \theta_v) P_{f, res, v} \quad (25)$$

式中： $\theta_{l-1, v}$ 为第 $l-1$ 次迭代中第 v 台新能源的不确定系数,为已知参数。

3) 其余约束

下垂约束为式(1)一式(4),交直流分支流潮流约束为式(8)一式(15),稳态安全约束为式(18)一式(21),VSC约束为式(22),与MP相同。

2.3 极端场景寻优子问题模型

1) 目标函数

$$\eta_l = \max_{s_u, s_d, s_{v,m}} \min \left(\psi^T s_u + \psi^T s_d + \sum_{m=1}^z (s_{v,m} - S_{\max, m}) \right) \quad (26)$$

式中： ψ 为元素全为1的列向量； $s_u = [s_{u, vac, i}, s_{u, lac, ij}, s_{u, vdc, i}, s_{u, ldc, ij}]^T$ 和 $s_d = [s_{d, vac, i}, s_{d, lac, ij},$

$s_{d, vdc, i}, s_{d, ldc, ij}]^T$ 均为非负安全约束松弛向量,用于衡量系统稳态安全约束;其中, $s_{d, vac, i}$ 和 $s_{u, vac, i}$ 分别为交流 i 节点的电压非负安全约束松弛上下限, $s_{d, vdc, i}$ 和 $s_{u, vdc, i}$ 分别为直流 i 节点的电压非负安全约束松弛上下限, $s_{d, lac, ij}$ 和 $s_{u, lac, ij}$ 分别为交流 ij 支路电流的非负安全约束松弛上下限, $s_{d, ldc, ij}$ 和 $s_{u, ldc, ij}$ 分别为直流 ij 支路电流的非负安全约束松弛上下限; $s_{v, m}$ 为第 m 台VSC的容量约束松弛变量,用于衡量VSC容量约束的越限幅度。当SP的目标函数 $\eta_l = 0$ 时,稳态安全约束和VSC容量约束在新能源不确定集内将始终成立,表明此时主问题求得的下垂斜率是鲁棒的。

2) 稳态安全松弛约束

$$V_{ac, \min}^2 \leq \bar{V}_{ac, i} + s_{u, vac, i} - s_{d, vac, i} \leq V_{ac, \max}^2 \quad i \in B_{ac} \quad (27)$$

$$I_{ac, \min}^2 \leq \bar{I}_{ac, ij} + s_{u, lac, ij} - s_{d, lac, ij} \leq I_{ac, \max}^2 \quad i, j \in E_{ac} \quad (28)$$

$$V_{dc, \min}^2 \leq \bar{V}_{dc, i} + s_{u, vdc, i} - s_{d, vdc, i} \leq V_{dc, \max}^2 \quad i \in B_{dc} \quad (29)$$

$$I_{dc, \min}^2 \leq \bar{I}_{dc, ij} + s_{u, ldc, ij} - s_{d, ldc, ij} \leq I_{dc, \max}^2 \quad i, j \in E_{dc} \quad (30)$$

3) VSC容量松弛约束

$$Q_{vsc, m}^2 + P_{vsc, m}^2 \leq S_{v, m}^2 \quad (31)$$

$$s_{v, m} \geq S_{\max, m} \quad (32)$$

4) 支路电流限值约束

SP的目标函数是最小化系统安全约束松弛变量之和,该函数不是支路电流的增函数,因此二阶锥松弛不精确^[18]。当松弛间隙过大时,SP将无法准确识别所有的极端场景。其原因在于当式(16)和式(17)取不等号时,通过增大支路电流,有可能将实际场景中越限的节点电压错误地降回安全边界内,导致电压越限极端场景被子问题忽略。

针对该问题,本文提出了支路损耗限值策略,在每次迭代过程中,由主问题得到下垂斜率后,将该斜率作为已知参数,求解支路损耗最优潮流模型,得到给定斜率下各支路可能的最大损耗,并在子问题中以此为约束对支路电流进行限值。支路损耗最优潮流模型为:

$$\epsilon_{ac, ij} = \max r_{ij} \bar{I}_{ac, ij} \quad i, j \in E_{ac} \quad (33)$$

$$\text{s.t. 式(1)一式(4), 式(8)一式(15), 式(18)一式(22)}$$

$$\epsilon_{dc, ij} = \max z_{ij} \bar{I}_{dc, ij} \quad i, j \in E_{dc} \quad (34)$$

$$\text{s.t. 式(1)一式(4), 式(8)一式(15), 式(18)一式(22)}$$

式中： $\epsilon_{ac, ij}$ 和 $\epsilon_{dc, ij}$ 分别为给定下垂斜率时交流和直流

ij 支路的最大损耗。

在求解得到各支路最大损耗后,在子问题中增加如式(35)一式(36)所示的支路电流限值不等式约束。

$$r_{ij} \bar{I}_{ac,ij} \leq \epsilon_{ac,ij} \quad i, j \in E_{ac} \quad (35)$$

$$z_{ij} \bar{I}_{dc,ij} \leq \epsilon_{dc,ij} \quad i, j \in E_{dc} \quad (36)$$

值得说明的是,当二阶锥松弛精确时,式(35)一式(36)显然是恒成立的不等式。因此,支路损耗限值策略不会对原鲁棒优化模型的寻优范围产生影响。

5) 其余约束

下垂约束同式(1)一式(4),分支流潮流约束同式(8)一式(15)。

基于强对偶理论,上述 max-min 双层规划问题可进行对偶变换,最终等效转化为单层混合整数二阶锥规划问题进行求解,具体等效过程详见附录 A。

下垂斜率鲁棒优化模型整体求解流程如图 3 所示。

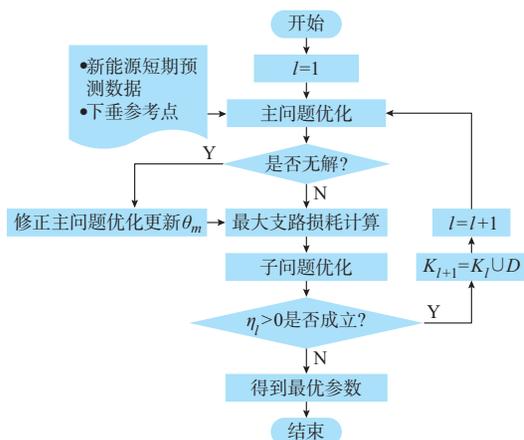


图 3 鲁棒优化模型求解流程

Fig. 3 Solving process of robust optimization model

3 算例分析

算例分析采用如图 4 所示的交直流混合配电网。3 个交流子配电网 AC_A, AC_B 和 AC_C 通过 5 台 VSC 与直流子网 DC 相连。T_A, T_B 和 T_C 均为 110/10 kV 变压器,负责维持松弛节点电压。交流支路单位长度线路阻抗和对地导纳分别为 $0.1 + j0.08 \Omega/\text{km}$ 和 $39.69 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。直流支路单位长度线路阻抗为 $0.08 \Omega/\text{km}$ 。VSC1 设置为主站,负责维持直流子网电压,其余 VSC 为从站。VSC 容量为 6 000 kVA。交直流电压等级和电压基准值均为 10 kV,功率基准值为 10 000 kVA。交流电压限值为 $1 \pm 7\%$ (标么值),交流支路电流限值为 600 A。直流电压限值为 $1 \pm 5\%$ (标么值),直流支

路电流限值为 400 A。8 台光伏发电(PV)系统分别与交流节点 9, 14, 18, 30, 37, 47, 59, 71 相连,3 台 PV 系统分别与直流节点 3, 7, 10 相连,设所有 PV 系统均采用最大功率点跟踪模式运行。算例分析以 1 个光伏高发典型调度时段为例,时间尺度为 1 h,该时段内系统整体源荷出力情况如表 1 所示,其余系统参数见附录 B。调控时段内光伏短期预测数据时间间隔为 15 min,因此光伏出力期望场景数 $n=4$,详见附录 C。MP 和 RMP 为非线性优化问题,采用 GAMS 23.8 的 IPOPT 解法器求解,SP 为混合整数二阶锥规划问题,采用 GUROBI 7.0 求解。以下算例分析中的数据均以标么值表示。

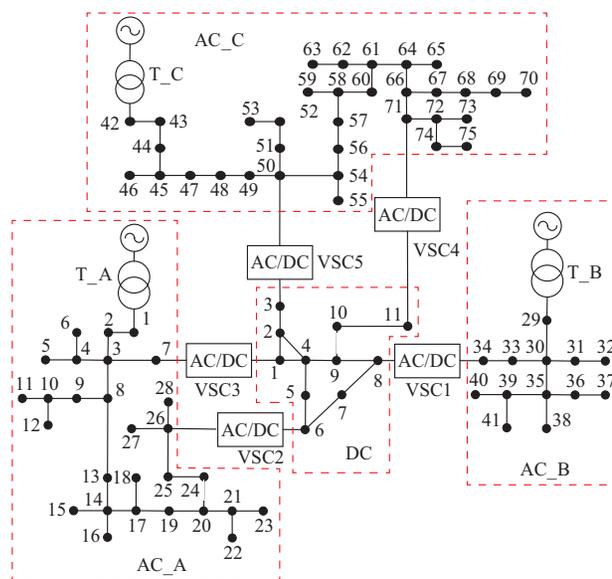


图 4 交直流配电网拓扑结构

Fig. 4 Topology structure of AC-DC distribution network

表 1 长期源荷出力预测数据

Table 1 Forecast data of long-term source load output

子网	总光伏输出功率	总有功负荷	总无功负荷
AC_A	0.372	1.040	0.389
AC_B	0.630	1.649	0.521
AC_C	0.936	1.413	0.640
DC	0.385	0.397	0.000

3.1 系统安全性分析

设各光伏预测误差均为 $\theta=20\%$,基于下垂参考点和短期预测数据,采用如下 3 种方法对下垂斜率进行优化。

方法 1: 本文提出的下垂斜率鲁棒优化方法。

方法 2: 传统确定性下垂斜率优化,只考虑期望场景下的系统稳态安全约束。

方法 3: 考虑鲁棒边界的确定性下垂斜率优化^[21],将光伏出力全部位于不确定集上界和下界的

2组极端场景加入系统稳态安全约束中。

在不确定集内,采用蒙特卡洛方法随机生成测试光伏出力场景共计1 000组,3种方法在测试场景中的安全性分析如表2所示。

表2 不同方法下系统安全性比较
Table 2 Comparison of security performance with different methods

方法	直流电压 越限概 率/%	交流电压 越限概 率/%	直流电流 越限概 率/%	交流电流 越限概 率/%	总越限 概率/%
方法1	0	0	0	0	0
方法2	47.2	5.1	47.6	1.9	59.4
方法3	0	0	13.1	1.6	13.8

由表2可知,由于光伏出力存在不确定性,方法2确定性优化结果无法应对不确定集内的所有场景,其交直流电压和电流在测试场景中均存在越限可能,总越限概率为59.4%,系统安全性较低。与方法2相比,方法3考虑了不确定集的上下限边界安全,其安全性有了较大提高,其交直流电压在测试场景中越限概率为0,而交直流电流越限概率分别为13.1%和1.6%,总越限概率下降到13.8%。其原因在于除定电压节点外,交流配电网和直流配电网各节点电压与光伏出力成正相关关系,电压越限最严重的场景一定在光伏出力的上下限边界上。但交直流电流与光伏出力不存在严格的相关关系,不同支路电流随光伏出力变化的规律也不同。因此,方法3可以保证交直流电压始终保持在安全边界内,但电流依然存在越限可能。而方法1考虑了光伏不确定集内的所有系统潮流安全约束,因此,进一步提高了系统鲁棒安全性,在所有测试场景下均可保证系统安全运行。

为进一步说明下垂斜率鲁棒优化方法对系统潮流调控的作用,以光伏出力均处于不确定集上界时的直流子网为例,该场景中方法1和方法2的直流子网电压分布如图5所示,直流子网电流分布如图6所示,VSC有功出力如表3所示,设功率正方向为直流侧到交流侧。

由图5和图6可知,当各光伏出力偏离期望场景,处于不确定集上界时,方法2调控结果中直流节点1,2和3的电压与支路6的电流超过安全边界。而方法1调控结果依然能保证该极端场景下节点电压和支路电流处于安全边界内。其原因在于方法2只考虑了期望场景的潮流约束,为使系统在期望场景下网损最小,部分系统节点电压或支路电流往往接近或处于系统安全边界。在系统实际运行过程

中,当光伏实际出力大于期望出力时,系统电压和电流便容易出现越限。而方法1增加了光伏不确定集内的潮流安全约束,通过鲁棒下垂斜率的潮流调控作用,减小了该极端场景下各VSC的传输功率,由表3可知,其VSC传输总功率由方法2的1.520减小至1.227,从而缓解了直流子网的线路过载,使节点电压和支路电流回落到安全边界内,其减小的功率最终由各交流子网并网端口进行调节消纳。

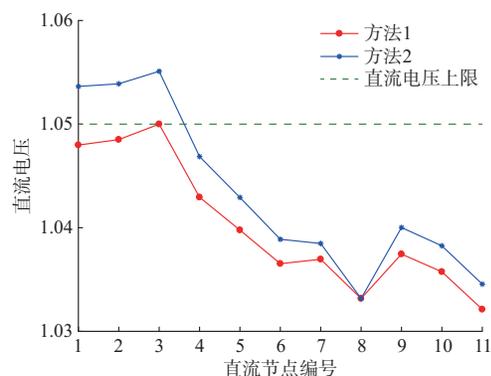


图5 直流子网电压分布
Fig. 5 Voltage distribution of DC subnet

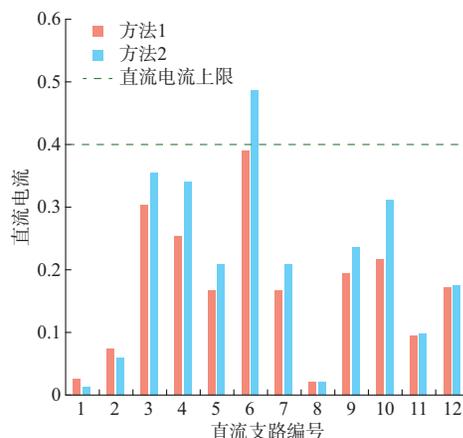


图6 直流子网电流分布
Fig. 6 Current distribution of DC subnet

表3 VSC的有功功率
Table 3 Active power of VSCs

方法	VSC1	VSC2	VSC3	VSC4	VSC5
方法1	0.426	0.095	-0.327	0.120	-0.259
方法2	0.566	0.096	-0.435	0.124	-0.299

3.2 参数敏感性分析

为进一步分析系统在不同预测误差下的安全性与经济性,对预测误差进行参数敏感性分析,结果如表4所示。

由表4可知,由于方法2没有考虑光伏的不确定性,因此期望场景总网损始终有最小值0.651,但随着预测误差增大,测试场景中的总越限概率不断

增大,系统安全性下降。方法1由于增加了光伏不确定集内的系统潮流安全约束,为应对更大的不确定性,当预测误差从10%增大到20%时,求解结果随着预测误差增大而趋于保守,因此期望场景网损随之增大,但在测试场景中始终能保证系统安全运行。当预测误差为20%时,与确定性优化相比网损仅增大0.009,以微小的经济代价实现了系统鲁棒安全性的显著提升。而方法3由于仅增加了位于不确定集上下边界的2组极端场景潮流安全约束,因此依旧存在支路电流越限可能,但总越限概率与方法1相比大幅减小。同时期望场景网损位于方法1和方法2之间,且随着预测误差的增大而增大。此外,当预测误差进一步增大到25%时,方法1鲁棒优化模型主问题无解,说明此时不确定系数已经超出系统最大新能源波动区间,无法仅通过下垂斜率优化保证系统在该光伏不确定集内的安全运行,此时,通过求解RMP问题,可以得到系统的最大联合新能源波动 $\theta_{\max}=0.210$,与敏感性分析结果相吻合。

表4 预测误差敏感性分析

Table 4 Sensibility analysis of prediction errors

$\theta/\%$	期望场景网损			总越限概率/%		
	方法1	方法2	方法3	方法1	方法2	方法3
10	0.653	0.651	0.652	0	43.2	2.3
15	0.654	0.651	0.653	0	51.6	9.5
20	0.660	0.651	0.655	0	59.4	13.8
25	无解	0.651	无解	无解	71.9	无解

3.3 新能源波动区间分析

为进一步分析不同子网内新能源不确定性对系统整体新能源波动区间的影响,设4个子网内的新能源不确定系数相互独立,分别为 θ_{ACa} , θ_{ACb} , θ_{ACc} 和 θ_{DC} 。假定交流子网AC_A中光伏与储能构成光储联合系统,通过储能调控使得不确定系数 $\theta_{ACa}=0$,此时交流子网AC_B和AC_C的不确定系数对于直流子网新能源波动区间的影响如图7所示。

由图7可知,不同子网间的新能源波动区间存在相互影响,当交流子网内所有光伏不确定系数均为0时,系统可承担的直流子网最大光伏不确定系数 $\theta_{DC\max}=0.562$ 。随着AC_B和AC_C不确定系数的增大, $\theta_{DC\max}$ 逐渐减小。其中,当 θ_{ACc} 从0增大到0.15时, $\theta_{DC\max}$ 的变化率较为平缓,当 θ_{ACc} 进一步增大时, $\theta_{DC\max}$ 的变化率显著增大。其原因在于交流子网光伏不确定系数对直流子网的影响主要体现在VSC交互功率的波动区间上,当交流子网光伏不确定系数增大时,VSC节点有功功率的波动区间随之增大,此时直流子网需要对其内部光伏波动进行限

制,以留出更大的安全裕度应对VSC节点的功率波动。

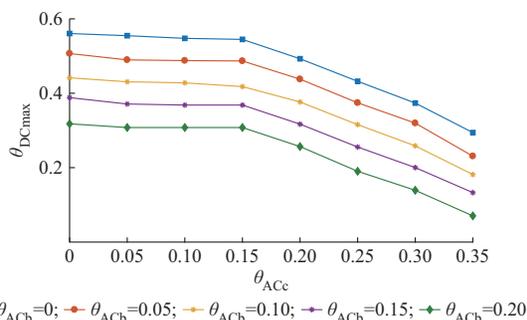


图7 新能源波动区间分析

Fig. 7 Fluctuation interval analysis of renewable energy resources

3.4 支路损耗限值策略有效性分析

为说明本文提出的支路损耗限值策略的有效性,定义最大二阶锥松弛间隙为:

$$\Delta_{\max} = \max \{ \bar{I}_{ac,ij} \bar{V}_{ac,i} - (P_{ac,ij}^2 + Q_{ac,ij}^2) \quad i, j \in E_{ac}, \\ \bar{I}_{dc,ij} \bar{V}_{dc,i} - P_{dc,ij}^2 \quad i, j \in E_{dc} \} \quad (37)$$

式中: Δ_{\max} 为式(14)和式(15)左项减去右项的最大偏差,用于定量衡量二阶锥松弛的精确程度,当 $\Delta_{\max}=0$ 时,表示二阶锥松弛完全精确。

在不同预测误差下,采用方法4进行下垂斜率优化,并与方法1进行对比,比较结果如表5所示。

表5 支路损耗限值分析

Table 5 Analysis of branch loss limit

$\theta/\%$	方法1			方法4		
	总越限概率/%	Δ_{\max}	迭代次数	总越限概率/%	Δ_{\max}	迭代次数
10	0	0.335	6	7.3	1.721	3
15	0	0.364	7	12.4	1.752	3
20	0	0.526	7	37.6	2.159	4

方法4:不考虑支路损耗限值策略的下垂斜率鲁棒优化方法。即子问题模型中不包含约束式(35)一式(36)。

由表5可知,方法4在不同预测误差下,均有相对较大的二阶锥松弛间隙,因此,算法迭代次数较少,无法准确识别出所有的极端场景,优化结果在测试场景中依然存在安全约束越限可能,且随着 θ 的增大而增大。相比之下,方法1中的支路损耗限值策略能显著减小二阶锥松弛间隙,因此,子问题对于极端场景的搜索能力得到显著提高,能够保证系统在不确定集内安全可靠运行。值得说明的是,本文提出的支路损耗限值策略只能减少二阶锥松弛间隙,而无法完全消除,但由于子问题的优化目标仅在

于识别给定斜率下的最恶劣场景,因此,无需进行准确的潮流计算,最恶劣场景下精确的潮流计算结果可由求解主问题获得。主问题以最小化期望场景下的网损为优化目标,其二阶锥松弛精确^[18],可以保证最优下垂斜率在极端场景下的可靠性。

5 结语

本文以下垂控制模式下的交直流混合配电网为研究对象,针对新能源的不确定性,提出了考虑新能源波动区间的交直流配电网下垂斜率鲁棒优化方法。算例仿真结果表明:

1)下垂斜率鲁棒优化模型以期望场景下系统网损最小为目标函数,降低了求解结果的保守性,同时通过增加新能源不确定集内的系统潮流安全约束,其鲁棒下垂斜率能以较小的经济代价有效提升系统适应新能源功率随机波动的鲁棒性。

2)通过求解,能够定量得到系统最大联合新能源波动区间,以及不同子网间新能源波动区间的相互影响关系,作为评估系统在下垂控制下对新能源波动消纳能力的指标。

3) V_{ac}^2-P 和 V_{ac}^2-Q 下垂控制方法能够在不影响线性反馈下垂特性的前提下,保证优化模型的凸性,使优化模型转化为二阶锥规划问题求解。此外,支路损耗限值策略能够有效降低最大二阶锥松弛间隙,从而增强子问题对于极端场景的寻优能力,提高优化结果的可靠性。

由于本文提出的支路损耗限值策略无法完全消除二阶锥松弛间隙,因而该策略在二阶锥优化模型中的通用性有待进一步验证。下一步工作考虑将新能源系统作为独立的利益主体,研究在非合作博弈框架下配电网的鲁棒安全运行问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 王洪坤,王守相,潘志新,等.含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J].电力系统自动化,2018,42(15):86-93. WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93.
- [2] 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/DC distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [3] 马鑫,郭瑞鹏,王蕾,等.基于二阶锥规划的交直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.
- [4] 李鹏,连攀杰,陈安伟,等.交直流混合微网中多台双向换流器的分散协调控制方法[J].电力系统自动化,2018,42(22):151-158. LI Peng, LIAN Panjie, CHEN Anwei, et al. Decentralized coordinated control method of multiple bidirectional converters in AC/DC hybrid microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 151-158.
- [5] 吉兴全,陈德华,张维,等.多端直流架构的交直流混合配电网三相不平衡潮流计算[J].电力系统自动化,2019,43(3):169-177. JI Xingquan, CHEN Dehua, ZHANG Wei, et al. VSC-MTDC based three-phase unbalanced power flow calculation algorithm for AC/DC hybrid distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 169-177.
- [6] ELNOZAHY M S, SALAMA M M A. Uncertainty-Based design of a bilayer distribution system for improved integration of PHEVs and PV arrays [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 659-674.
- [7] DRAGICEVIC T, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [8] XIA Yanghong, PENG Yonggang, YANG Pengcheng, et al. Distributed coordination control for multiple bidirectional power converters in a hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4949-4959.
- [9] HAN Minxiao, XU Dong, WAN Lei. Hierarchical optimal power flow control for loss minimization in hybrid multi-terminal HVDC transmission system [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(1): 40-46.
- [10] CAO Jun, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids with VSC-MTDC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3047-3055.
- [11] MA Junchao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Two-time-scale coordinated energy management for medium-voltage DC systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3971-3983.
- [12] ELA E, O'MALLEY M. Studying the variability and uncertainty impacts of variable generation at multiple timescales [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1324-1333.
- [13] ZHAO Bo, QIU Haifeng, QIN Ruwen, et al. Robust optimal dispatch of AC/DC hybrid microgrids considering generation and load uncertainties and energy storage loss [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 5945-5957.

- [14] ZHAO Bo, WANG Xiangjin, LIN Da, et al. Energy management of multiple microgrids based on a system of systems architecture [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6410-6421.
- [15] JIANG Ruiwei, WANG Jianhui, ZHANG Muhong, et al. Two-stage minimax regret robust unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2271-2282.
- [16] YE Hongxing, LI Zuyi. Robust security-constrained unit commitment and dispatch with recourse cost requirement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3527-3536.
- [17] DING Tao, LI Cheng, YANG Yongheng, et al. A two-stage robust optimization for centralized-optimal dispatch of photovoltaic inverters in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 744-754.
- [18] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4436-4447.
- [19] 杜林,刘伟明,司马文霞,等.基于容性设备泄漏电流的电网电压测量方法[J].电力系统自动化,2008,32(19):67-70.
DU Lin, LIU Weiming, SIMA Wenxia, et al. Power grid voltage measurement based on the leakage current of capacitive equipments [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 67-70.
- [20] 孙峰洲,马骏超,朱洁,等.直流配电网下垂参数小干扰稳定优化调控方法[J].电力系统自动化,2018,42(3):48-55.
SUN Fengzhou, MA Junchao, ZHU Jie, et al. Optimized dispatching and control method of droop parameters with assurance of small-signal stability in DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 48-55.
- [21] ZHOU Boran, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Hierarchical unit commitment with uncertain wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 94-104.

孙峰洲(1994—),男,博士研究生,主要研究方向:配电网与微电网能量管理、运行控制。E-mail:sunfz@zju.edu.cn

刘海涛(1979—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:直流配电技术、微电网技术。E-mail:lhtch@epri.sgcc.com.cn

陈庆(1962—),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统生产管理。E-mail:chen_qing@js.sgcc.com.cn

于森(1984—),男,通信作者,副教授,博士生导师,主要研究方向:配电网与微电网运行控制。E-mail:zjuyu-miao@zju.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Robust Optimization Method for Droop Slopes in AC-DC Distribution Network Considering Fluctuation Interval of Renewable Energy Sources

SUN Fengzhou¹, LIU Haitao², CHEN Qing³, YU Miao¹, WEI Wei¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 200192, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to deal with the uncertainty of the output power of renewable energy sources (RESs), this paper proposes a robust optimization method for voltage source converter (VSC) droop slopes in AC-DC distribution networks considering fluctuation interval of RESs. The proposed method aims to minimize the network loss under expect scenarios while ensuring the system robust security. The optimization model is solved by the column-and-constraint generation (CCG) algorithm. Besides, V_{ac}^2-P and V_{ac}^2-Q control are proposed in the droop control schemes to guarantee the linear feedback characteristic, therefore the sub-problem could be transformed into a mixed integer second-order cone programming (MI-SOCP) problem. Furthermore, to increase the accuracy of second-order cone relaxation in the sub-problem, a branch loss limit strategy is designed. By solving the maximum branch loss optimal power flow problem, the maximum possible branch loss is pre-identified, and a series of branch current limit constraints are added to the sub-problem to restrain the feasible range of the branch current. Numerical simulations suggest that the proposed optimization method can improve the system security with little extra economic cost, and the proposed branch loss limit strategy can improve the searching ability of the sub-problem for the extreme scenarios. Therefore, the reliability of the optimization results can be enhanced.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0904700) and State Grid Corporation of China (No. SGDK0000PDJS1806935).

Key words: AC-DC hybrid distribution network; droop control; slope optimization; second-order cone relaxation



附录 A

极端场景寻优子问题模型可表示为如下矩阵形式：

$$\max_u \min_x \boldsymbol{\gamma}^T \boldsymbol{x} \quad (\text{A1})$$

$$s.t. \quad \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{u} \quad (\text{A2})$$

$$\boldsymbol{C}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{g} \quad (\text{A3})$$

$$\boldsymbol{L}\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{f} \quad (\text{A4})$$

$$\|\boldsymbol{R}_i \boldsymbol{x} + \boldsymbol{q}_i\|_2 \leq \boldsymbol{c}_i^T \boldsymbol{x} + d_i \quad (\text{A5})$$

式中： \boldsymbol{u} 为新能源不确定出力向量； \boldsymbol{x} 为优化向量。(A2)为新能源不确定集约束；(A3)为线性等式约束；(A4)为线性不等式约束；(A5)为二阶锥不等式约束。

基于强对偶理论，引入辅助0-1变量 δ_m 和辅助连续变量 r_m ，并基于Big-M法对模型进行线性化。最终，子问题可以等效转化为如下混合整数二阶锥问题求解：

$$\begin{aligned} \max \quad & \boldsymbol{\pi}^T \boldsymbol{g} + \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{f} - \sum_i (\lambda_i d_i + \boldsymbol{w}_i^T \boldsymbol{q}_i) \\ & + \sum_m (u_{m,\min} \beta_m + (u_{m,\max} - u_{m,\min}) r_m) \\ s.t. \quad & \boldsymbol{C}^T \boldsymbol{\pi} + \boldsymbol{L}^T \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{H}^T \boldsymbol{\beta} + \sum_i (\boldsymbol{R}_i^T \boldsymbol{w}_i + \lambda_i \boldsymbol{c}_i) = \boldsymbol{\gamma} \\ & \boldsymbol{\alpha} \leq 0 \\ & \|\boldsymbol{w}_i\|_2 \leq \lambda_i \\ & -M\delta_m \leq r_m \leq M\delta_m \\ & -M(1 - \delta_m) + \beta_m \leq r_m \leq M(1 - \delta_m) + \beta_m \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

式中： $\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\pi}, \boldsymbol{\alpha}$ 分别为约束(A2)-(A4)的对偶变量； $(\lambda_i, \boldsymbol{w}_i)$ 为二阶锥约束(A5)的对偶变量； $u_{m,\max}$ 和 $u_{m,\min}$ 分别为第 m 台新能源不确定出力的上下限； M 为足够大的正数。

附录 B

基于日前预测数据的下垂参考点优化结果如表B1所示。

表 B2 日前光伏预测数据
Table B2 The day-ahead forecast data of PV

直流节点	光伏出力/kW	直流节点	光伏出力/kW
3	1 200	10	600
7	1 700		
交流节点	光伏出力/kW	交流节点	光伏出力/kW
9	1 080	37	3 300
14	1 440	47	3 510
18	1 200	59	3 510
30	3 000	71	2 340

调度时段内配电网日前光伏预测数据如表B2所示。

表 B1 下垂参考点优化结果
Table B1 Optimized reference points

	VSC1	VSC2	VSC3	VSC4	VSC5
$P_{ref}/p.u.$	0.359	0.096	-0.372	0.151	-0.255
$Q_{ref}/p.u.$	0.407	0.177	0.182	0.340	0.294
$V_{ac,ref}/p.u.$	1.030	1.027	1.038	1.022	1.041

调度时段内配电网负荷参数如表 B3 所示。

表 B3 配电网负荷参数
Table B3 The parameters of loads of the distribution network

直流节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar	直流节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar
1	900	/	6	1 000	/
2	500	/	9	800	/
3	200	/	11	570	/
交流节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar	交流节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar
2	1 080	300	40	1 400	567
5	663	270	41	1 575	637
6	690	240	44	360	144
7	690	240	46	540	208
9	570	150	47	648	252
10	405	171	48	360	144
11	420	156	49	475	216
12	339	129	51	486	205
13	525	240	52	504	187
15	396	180	53	406	154
16	420	159	55	630	288
18	480	240	56	475	216
19	570	120	57	504	190
20	360	375	59	795	972
22	480	135	60	648	216
23	240	135	62	486	198
24	540	141	63	504	234
25	360	114	65	475	216
27	480	120	67	540	241
28	690	270	68	576	244
31	1 400	553	69	795	324
32	1 120	528	70	828	324
33	1 750	700	71	648	216
34	2 800	630	72	486	198
36	2 100	367	73	504	234
37	1 190	420	74	630	288
38	1 400	525	75	829	288
39	1 750	280			

附录 C

短期光伏预测出力期望场景如表 C1 所示。

表 C1 基于短期预测数据的光伏出力期望场景
Table C1 Short-term forecast data for PV stations

期望场景	AC_A			AC_B		
	PV1/p.u.	PV2/p.u.	PV3/p.u.	PV4/p.u.	PV5/p.u.	
1	0.113	0.151	0.126	0.315	0.347	
2	0.112	0.138	0.132	0.341	0.345	
3	0.111	0.163	0.119	0.322	0.323	
4	0.121	0.148	0.134	0.337	0.339	
期望场景	AC_C			DC		
	PV6/p.u.	PV7/p.u.	PV8/p.u.	PV9/p.u.	PV10/p.u.	PV11/p.u.
1	0.369	0.369	0.246	0.139	0.196	0.069
2	0.376	0.342	0.265	0.149	0.193	0.064
3	0.368	0.333	0.240	0.137	0.183	0.074
4	0.359	0.334	0.223	0.142	0.200	0.066