

## 含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化

方一晨<sup>1</sup>, 张沈习<sup>1</sup>, 程浩忠<sup>1</sup>, 蔡秀雯<sup>2</sup>, 林明熙<sup>2</sup>, 许杭海<sup>2</sup>

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 200240;

2. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建省泉州市 362000)

**摘要:** 考虑分布式光伏和负荷功率的不确定性,建立了二阶段鲁棒优化模型,用于评估主动配电网(ADN)的分布式光伏的最大准入容量。若干主动管理(AM)措施被应用于ADN中,包括带储能的多端智能软开关(E-SOP)调节、有载调压变压器(OLTC)调节、无功补偿、分布式光伏无功调节和网络重构。基于凸松弛技术,原问题可以分解为主问题和子问题。主问题优化典型日AM措施模拟运行策略,以计算待选节点上分布式光伏最大准入容量;子问题寻找不确定性的最恶劣场景。针对凸松弛引入的间隙,提出了一种将渐紧线切割算法和列与约束生成算法相结合的求解策略,以获得间隙足够小的原问题最优解。在改进的IEEE 33节点ADN上验证了模型和算法的有效性,分析了不确定性和AM措施对ADN中分布式光伏最大准入容量的影响。

**关键词:** 多端智能软开关; 分布式光伏; 最大准入容量; 二阶段鲁棒优化模型; 渐紧线切割算法; 列与约束生成算法

### 0 引言

太阳能光伏储量丰富、安全可靠、环境友好,近年来在世界范围内迅速发展<sup>[1]</sup>。随着分布式光伏在配电网中渗透率日益增大,配电网运行面临着挑战。一方面,分布式光伏出力的间歇性、随机性和波动性可能对配电网造成不利影响<sup>[2]</sup>;另一方面,分布式光伏装机容量的高速增长加大了能源消纳压力<sup>[3]</sup>。为最大限度利用太阳能光伏,同时确保配电网安全运行,有必要计算配电网分布式光伏最大准入容量。

目前,国内外已有相应研究成果。文献[4]考虑电压偏差、电压波动与短路容量约束,使用遗传算法确定分布式电源最大准入容量;文献[5]计及分布式光伏出力与负荷功率相关性,使用前推回代法与退火算法求解;文献[6]逐渐增加各节点分布式光伏并网容量,直至出现变压器过载或节点电压越限,以此确定准入容量上限。文献[4-6]采用启发式算法,易陷入局部最优,且未考虑配电网主动管理(active

management, AM)<sup>[7]</sup>措施对结果的影响。

AM可提升主动配电网(active distribution network, ADN)对分布式光伏的接纳能力。文献[8]使用储能充放电与智能逆变器控制提升ADN分布式光伏最大准入容量;文献[9]应用了有载调压与静态无功补偿技术,并提出模型线性化方法;文献[10]考虑“源荷”不确定性的影响,采用无功补偿、分布式光伏无功调节和网络重构等AM措施提升最恶劣场景下分布式光伏最大准入容量。上述研究通过忽略网络损耗和分段线性化等方法,将非线性模型近似为线性模型后求解。

近年来,智能软开关(soft open point, SOP)被应用于ADN中。SOP是安装于传统联络开关处的电力电子装置,可实现ADN柔性闭环运行,提高供电可靠性和潮流控制能力<sup>[11]</sup>。文献[12]对比分析了双端SOP、多端SOP和多端带储能的SOP(SOP with energy storage, E-SOP)对ADN分布式光伏最大准入容量的影响,其中,多端E-SOP对其提升作用最明显;文献[13]研究了E-SOP的应用对含分布式光伏ADN暂态特性的影响,验证了E-SOP可提升ADN对分布式光伏的接纳能力。然而,文献[12-13]未考虑“源荷”不确定性。

为计算ADN分布式光伏最大准入容量,同时考虑“源荷”不确定性和AM措施对其的影响,本文建立并求解ADN分布式光伏最大准入容量二阶段

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2020-11-25。

上网日期: 2021-02-18。

国家自然科学基金青年基金资助项目(51907123);国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1966206);上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(18YF1411600)。

鲁棒优化模型,主要贡献点为:①除有载分接开关(on-load tap changer, OLTC)调节、无功补偿、分布式光伏无功调节和网络重构等AM措施外,基于柔性配电网技术,应用多端E-SOP进一步提升ADN对分布式光伏的接纳能力;②针对二阶段鲁棒优化模型,提出渐紧线切割(increasingly tight linear cut, ITLC)算法和列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法相结合的求解策略,得到凸松弛间隙小于阈值的最优解。

## 1 SOP原理与多端E-SOP建模

SOP的控制由全控型电力电子器件实现,背靠背电压源型变流器是常用的变流器结构<sup>[14]</sup>。SOP可控变量包括端口输出的有功功率和无功功率<sup>[15]</sup>。因此,当SOP安装于不同馈线节点之间时,既可有效控制馈线之间的有功功率传输,同时还能提供无功功率支撑<sup>[16]</sup>。

多端SOP可以实现多条馈线相连,比双端SOP更灵活、可靠,经济效益更高<sup>[14]</sup>。多端SOP直流端与储能相连时,构成多端E-SOP,如附录A图A1所示。在规划问题中需制定多端E-SOP的模拟运行策略。以E-SOP含三端口为例,多端E-SOP的数学模型可表示为:

$$0 \leq P_{ch,t} \leq (1 - \delta_t) P_{ch,max} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{dis,t} \leq \delta_t P_{dis,max} \quad (2)$$

$$E_{bat,t+\Delta t} = E_{bat,t} + \left( \zeta_{ch} P_{ch,t} - \frac{P_{dis,t}}{\zeta_{dis}} \right) \Delta t \quad (3)$$

$$E_{bat,\tau_T} = E_{bat,\tau_0} \quad (4)$$

$$E_{bat,min} \leq E_{bat,t} \leq E_{bat,max} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \Omega_p} (P_{SOP,i,t} + P_{loss,i,t}) = P_{dis,t} - P_{ch,t} \quad (6)$$

$$P_{loss,i,t} = A_i \sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2} \quad (7)$$

$$Q_{SOP,i,min} \leq Q_{SOP,i,t} \leq Q_{SOP,i,max} \quad (8)$$

$$\sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2} \leq S_{SOP,i} \quad (9)$$

式中: $P_{ch,t}$ 和 $P_{dis,t}$ 分别为时刻 $t$ 的储能充电功率和放电功率; $P_{ch,max}$ 和 $P_{dis,max}$ 分别为 $P_{ch,t}$ 的上限和 $P_{dis,t}$ 的上限; $\delta_t$ 为时刻 $t$ 的储能状态变量,值为0表示充电,值为1表示放电; $E_{bat,t}$ 为时刻 $t$ 的储能电量; $\zeta_{ch}$ 和 $\zeta_{dis}$ 分别为储能的充、放电效率; $\Delta t$ 为相邻时刻间的时长; $\tau_0$ 和 $\tau_T$ 分别为调度周期的初始时刻和第 $T$ 个时刻(末尾时刻); $E_{bat,max}$ 和 $E_{bat,min}$ 分别为 $E_{bat,t}$ 的上、下限; $\Omega_p$ 为多端E-SOP接入配电网的端口编号集合; $P_{loss,i,t}$ 为时刻 $t$ 节点 $i$ 处SOP的传输损耗; $P_{SOP,i,t}$ 和 $Q_{SOP,i,t}$ 分别为SOP在时刻 $t$ 注入节点 $i$ 的有功功率

和无功功率; $A_i$ 为节点 $i$ 处SOP的变流器损耗系数; $Q_{SOP,i,max}$ 和 $Q_{SOP,i,min}$ 分别为 $Q_{SOP,i,t}$ 的上、下限; $S_{SOP,i}$ 为与节点 $i$ 相接的SOP容量。

式(1)和式(2)分别为时刻 $t$ 储能充放电功率约束;式(3)为相邻2个时刻储能电量关系式;式(4)保证储能调度周期始末时刻电量相等,有利于循环调度,该约束可等效为全调度周期内储能充放电总电量为0的线性等式约束;式(5)将储能电量限制在上限和下限间,避免过度充放电;式(6)为储能与SOP接点处的有功平衡方程;式(8)将 $Q_{SOP,i,t}$ 限制在上限和下限之间;式(9)限制SOP发出的视在功率不超过自身容量。

## 2 主动管理措施建模

除多端E-SOP外,ADN中采用的AM措施包括OLTC调节、无功补偿、分布式光伏无功调节和网络重构。

### 2.1 OLTC调节

阻抗为 $r_o + jx_o$ 的OLTC接在上级电网(节点0)和ADN首端(节点1)之间,其中, $r_o$ 为OLTC的电阻, $x_o$ 为OLTC的电抗。在节点0和1之间设置虚拟节点 $b$ ,则支路0-1可视作阻抗为 $r_o + jx_o$ 的支路0- $b$ 与接有零阻抗OLTC的支路 $b$ -1串联。OLTC在时刻 $t$ 的数学模型为<sup>[10]</sup>:

$$U_{1,t} = (1 + K_{O,t} \Delta k_o) U_{b,t} \quad (10)$$

$$-K_{O,max} \leq K_{O,t} \leq K_{O,max} \quad (11)$$

式中: $U_{1,t}$ 和 $U_{b,t}$ 分别为节点1和虚拟节点 $b$ 在时刻 $t$ 的电压; $K_{O,t}$ 为OLTC在时刻 $t$ 的分接头挡位; $\Delta k_o$ 为OLTC分接头每调节一个挡位时匝数比改变的步长; $K_{O,max}$ 为OLTC分接头最大挡位数。

### 2.2 无功补偿

连续无功补偿由静止无功补偿器(static var compensator, SVC)实现。SVC数学模型为:

$$Q_{SVC,i,min} \leq Q_{SVC,i,t} \leq Q_{SVC,i,max} \quad (12)$$

式中: $Q_{SVC,i,t}$ 为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的SVC发出的无功功率; $Q_{SVC,i,max}$ 和 $Q_{SVC,i,min}$ 分别为 $Q_{SVC,i,t}$ 的上、下限。

离散无功补偿由投切电容器组(capacitor bank, CB)实现。CB数学模型为:

$$Q_{CB,i,t} = K_{CB,i,t} q_{CB,i} \quad (13)$$

$$0 \leq K_{CB,i,t} \leq K_{CB,i,max} \quad (14)$$

式中: $Q_{CB,i,t}$ 为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的CB发出的无功功率; $K_{CB,i,t}$ 为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的电容器个数; $q_{CB,i}$ 为节点 $i$ 上单个电容器提供的无功功率; $K_{CB,i,max}$ 为 $K_{CB,i,t}$ 的上限。

### 2.3 分布式光伏无功调节

分布式光伏可在一定范围内调节其功率因数,参与ADN无功调节<sup>[17]</sup>。分布式光伏无功调节数学模型为:

$$P_{PV,i,t} \tan \theta_{PV,i,\min} \leq Q_{PV,i,t} \leq P_{PV,i,t} \tan \theta_{PV,i,\max} \quad (15)$$

式中: $P_{PV,i,t}$ 和 $Q_{PV,i,t}$ 分别为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的分布式光伏发出的有功功率和无功功率; $\theta_{PV,i,\max}$ 和 $\theta_{PV,i,\min}$ 分别为分布式光伏功率因数角的上、下限。

### 2.4 网络重构

ADN运行时可通过控制开关状态改变网络拓扑。由于不能频繁改变开关状态,设定典型日内网络重构仅发生一次。网络拓扑需满足辐射性与连通性约束。建立以ADN节点1为源节点、拓扑结构与ADN保持一致的虚拟网络,除源节点外,其他节点虚拟负荷的值为1,则网络重构模型为<sup>[18]</sup>:

$$\sum_{j \in \kappa(i)} F_{ij} - \sum_{k \in \rho(i)} F_{ki} = -1 \quad (16)$$

$$\sum_{j \in \kappa(1)} F_{1j} = \xi_v \quad (17)$$

$$-M\alpha_{ij} \leq F_{ij} \leq M\alpha_{ij} \quad ij \in \Omega_b \quad (18)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_b} \alpha_{ij} = \langle N \rangle - 1 \quad (19)$$

式中: $\kappa(i)$ 和 $\rho(i)$ 分别为节点 $i$ 的子节点集合与父节点集合; $F_{ij}$ 为由节点 $i$ 流向节点 $j$ 的虚拟功率; $\xi_v$ 为不受限的实数; $M$ 为极大数; $\alpha_{ij}$ 为支路 $ij$ 状态变量,值为1表示连通,值为0表示断开; $\Omega_b$ 为ADN支路集合; $N$ 为ADN节点集合; $\langle \cdot \rangle$ 为集合元素个数的求解运算。

式(16)可以确保ADN节点之间具有连通性;式(17)为ADN首节点1向其子节点注入虚拟功率;式(18)在支路 $ij$ 断开时限制其虚拟功率为0;式(19)为连通支路数为节点总数与源节点数之差,在网络拓扑具有连通性的前提下,确保辐射性。

## 3 ADN分布式光伏最大准入容量计算模型

为确保ADN在最恶劣场景下的安全性,并提升ADN对分布式光伏的接纳能力,建立ADN分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型。第1阶段通过优化典型日AM措施模拟运行策略计算各待选节点分布式光伏最大准入容量;第2阶段寻找“源荷”不确定性最恶劣场景。

### 3.1 目标函数

分布式光伏与负荷功率具有不确定性,“源荷”不确定性的最恶劣场景会使ADN分布式光伏最大准入容量最小化。然而,AM措施对不确定因素制约下的分布式光伏最大准入容量有提升作用。

鲁棒优化中,“源荷”不确定性可表示为:

$$\begin{cases} \eta_{i,t} = \eta_{pre,i,t} + a_{PV,up,i,t} \Delta \eta_{up,i,t} - a_{PV,low,i,t} \Delta \eta_{low,i,t} & i \in G \\ P_{L,i,t} = P_{L,pre,i,t} + a_{L,up,i,t} \Delta P_{L,up,i,t} - a_{L,low,i,t} \Delta P_{L,low,i,t} & i \in N \end{cases} \quad (20)$$

式中: $G$ 为分布式光伏待选接入点集合; $\eta_{i,t}$ 和 $\eta_{pre,i,t}$ 、 $\Delta \eta_{up,i,t}$ 和 $\Delta \eta_{low,i,t}$ 分别为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的分布式光伏出力系数实际值、预测值、最大正向偏差值和最大负向偏差值; $P_{L,i,t}$ 、 $P_{L,pre,i,t}$ 、 $\Delta P_{L,up,i,t}$ 和 $\Delta P_{L,low,i,t}$ 分别为时刻 $t$ 接在节点 $i$ 上的负荷有功功率实际值、预测值、最大正向偏差值和最大负向偏差值; $a_{PV,up,i,t}$ 、 $a_{PV,low,i,t}$ 、 $a_{L,up,i,t}$ 和 $a_{L,low,i,t}$ 为时刻 $t$ 的“源荷”不确定性辅助变量。

考虑不确定因素与AM措施的ADN分布式光伏最大准入容量计算模型目标函数包含2个阶段。其中,第1阶段对应外层最大化(max)问题,目标为提升第2阶段最恶劣场景下分布式光伏最大准入容量,优化变量为AM变量,包括各时刻储能充放电状态与充放电功率、多端E-SOP注入ADN节点的有功与无功功率、OLTC分接头位置、SVC输出无功功率、CB投入电容器个数、分布式光伏输出无功功率、支路通断状态;第2阶段对应内层最小化-最大化(min-max)问题,目标为寻找“源荷”不确定性最恶劣场景,以最小化分布式光伏准入容量最大值,其中,最小化问题优化变量为不确定性辅助变量,最大化问题优化变量为潮流变量和分布式光伏准入容量。

### 3.2 约束条件

计算分布式光伏最大准入容量时,需要使得DistFlow方程<sup>[19]</sup>、支路电流和电压偏差等约束得到满足,确保ADN安全运行。

#### 1) DistFlow方程约束

ADN潮流应满足DistFlow方程约束。考虑网络重构的DistFlow方程约束可表示为<sup>[19-20]</sup>:

$$\sum_{k \in \rho(i)} (P_{ki,t} - r_{ki} I_{ki,t}^2) + P_{i,t} - \sum_{j \in \kappa(i)} P_{ij,t} = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{k \in \rho(i)} (Q_{ki,t} - x_{ki} I_{ki,t}^2) + Q_{i,t} - \sum_{j \in \kappa(i)} Q_{ij,t} = 0 \quad (22)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 \geq 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 - M(1 - \alpha_{ij}) \quad (23)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 \leq 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^2 + M(1 - \alpha_{ij}) \quad (24)$$

$$I_{ij,t}^2 U_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (25)$$

式中: $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 和 $I_{ij,t}$ 分别为时刻 $t$ 从节点 $i$ 流向节点 $j$



的有功功率、无功功率和电流;  $P_{i,t}$  和  $Q_{i,t}$  分别为时刻  $t$  外界注入节点  $i$  的有功功率和无功功率;  $r_{ij}$  和  $x_{ij}$  分别为支路  $ij$  的电阻和电抗;  $U_{i,t}$  为时刻  $t$  节点  $i$  的电压。

$P_{i,t}$  和  $Q_{i,t}$  的表达式分别如式(26)和式(27)所示。若节点  $i$  上未接有分布式光伏或某种 AM 装置, 则对应项设置为 0。

$$P_{i,t} = \eta_{i,t} P_{PV,i} + P_{SOP,i,t} - P_{L,i,t} \quad (26)$$

$$Q_{i,t} = Q_{PV,i,t} + Q_{SOP,i,t} + Q_{SVC,i,t} + Q_{CB,i,t} - P_{L,i,t} \tan \theta_{L,i} \quad (27)$$

式中:  $P_{PV,i}$  为节点  $i$  上的分布式光伏准入容量, 它与  $\eta_{i,t}$  之积为时刻  $t$  分布式光伏有功功率  $P_{PV,i,t}$ ;  $\theta_{L,i}$  为节点  $i$  上的负荷的功率因数角。

## 2) 支路电流约束

为避免支路过载, 支路电流不能超出上限, 且断开的支路上的电流为 0。支路电流约束为:

$$|I_{ij,t}| \leq \alpha_{ij} I_{ij,\max} \quad (28)$$

式中:  $I_{ij,\max}$  为支路  $ij$  允许流过的电流上限。

## 3) 电压偏差约束

ADN 节点电压应当位于允许范围内, 约束为:

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (29)$$

式中:  $U_{i,\max}$  和  $U_{i,\min}$  分别为节点  $i$  电压的上、下限。

# 4 模型求解方法

由前文分析可得, ADN 分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型是非凸非线性模型, 难以直接求解, 需要将模型进行转化, 具体过程详见附录 B 式(B1)至式(B12)。针对该二阶段鲁棒优化模型, 提出一种基于 ITLC 算法和 C&CG 算法相结合的求解策略。

## 4.1 ITLC 算法

附录 B 中采用凸松弛将原模型转化为易直接求解的混合整数二阶锥形式, 会引入凸松弛间隙。DistFlow 潮流方程和多端 E-SOP 损耗表达式的凸松弛间隙分别为<sup>[16]</sup>:

$$\varphi_{1,t} = \left\| 1 - \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{l_{ij,t} v_{i,t}} \right\|_{\infty} \times 100\% \quad (30)$$

$$\varphi_{2,t} = \left\| 1 - \frac{A_i \sqrt{P_{SOP,i,t}^2 + Q_{SOP,i,t}^2}}{P_{\text{loss},i,t}} \right\|_{\infty} \times 100\% \quad (31)$$

式中:  $\varphi_{1,t}$  为式(25)松弛至附录 B 式(B5)产生的凸松弛间隙;  $l_{ij,t}$  为时刻  $t$  流过支路  $ij$  电流的平方;  $v_{i,t}$  为时刻  $t$  节点  $i$  电压的平方;  $\varphi_{2,t}$  为式(7)松弛至附录 B 式(B8)产生的凸松弛间隙。

ITLC 算法<sup>[21]</sup>可基于前次优化结果, 在模型中迭代增加逐渐收紧的线性切平面, 将凸松弛间隙减

小到设定阈值  $\xi$  内。定义第  $r$  次模型最优化结果的凸松弛间隙  $\varphi_r$  为:

$$\varphi_r = \max_{t \in \Omega_T} (\varphi_{1,r,t}, \varphi_{2,r,t}) \quad (32)$$

式中:  $\Omega_T$  为典型日时刻集合;  $\varphi_{1,r,t}$  和  $\varphi_{2,r,t}$  分别为根据第  $r$  次模型最优化结果计算得出的 DistFlow 潮流方程凸松弛间隙和多端 E-SOP 损耗表达式凸松弛间隙。

若  $\varphi_r \leq \xi$ , 说明凸松弛间隙足够小, 终止迭代; 否则, 在第  $r+1$  次迭代时增加式(33)和式(34)所示的线性切平面约束。

$$l_{ij,t} \leq \frac{P_{ij,r,t}^2 + Q_{ij,r,t}^2}{v_{i,r,t}} \quad (33)$$

$$P_{\text{loss},i,t} \leq A_i \sqrt{P_{SOP,i,r,t}^2 + Q_{SOP,i,r,t}^2} \quad (34)$$

式中:  $P_{ij,r,t}$  和  $Q_{ij,r,t}$  分别为第  $r$  次迭代后, 时刻  $t$  从节点  $i$  流向  $j$  的有功功率与无功功率最优解;  $v_{i,r,t}$  为第  $r$  次迭代后, 时刻  $t$  节点  $i$  的电压平方最优解;  $P_{SOP,i,r,t}$  和  $Q_{SOP,i,r,t}$  分别为第  $r$  次迭代后, SOP 在时刻  $t$  注入节点  $i$  的有功功率和无功功率最优解。

为使用一般化形式描述 ADN 分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型, 令  $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{u}_t$ 、 $\mathbf{a}_{PV,t}$ 、 $\mathbf{a}_{L,t}$  和  $\mathbf{x}_t$  分别为待选节点分布式光伏准入容量向量、时刻  $t$  的 ADN 潮流向量、时刻  $t$  分布式光伏功率不确定性向量、时刻  $t$  负荷功率不确定性向量和时刻  $t$  的 AM 向量, 对应关系如附录 B 式(B13)至式(B17)所示。其中,  $\mathbf{y}$  的元素为非负数;  $\mathbf{a}_{PV,t}$  和  $\mathbf{a}_{L,t}$  中元素的可行域为  $[0, 1]$ 。

ITLC 算法第  $r$  次迭代时的模型一般化形式为:

$$\max_{\mathbf{x}_t} \left\{ \min_{\mathbf{a}_{PV,t}, \mathbf{a}_{L,t}} \left\{ \max_{\mathbf{y}, \mathbf{u}_t} \mathbf{f}^T \mathbf{y} \right\} \right\} \quad (35)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} H_{1,t} \mathbf{y} + H_{2,t} \mathbf{u}_t + H_{3,t} \mathbf{a}_{L,t} + H_{4,t} \mathbf{x}_t + H_{5,t} \mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y} = \mathbf{h}_{1,t} \\ \sum_{t=\tau_0}^{\tau_T-1} H_{6,t} \mathbf{x}_t = \mathbf{h}_2 \\ G_{1,t} \mathbf{y} + G_{2,t} \mathbf{u}_t + G_{3,t} \mathbf{x}_t + G_{4,t} \mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y} \leq \mathbf{g}_{1,t} \\ \sum_{t=\tau_0}^{\tau_T-1} G_{5,t} \mathbf{x}_t \leq \mathbf{g}_2 \\ \mathbf{W}_1 \mathbf{u}_t \leq \mathbf{w}_1(\mathbf{u}_{r-1,t}) \\ \mathbf{W}_2 \mathbf{x}_t \leq \mathbf{w}_2(\mathbf{x}_{r-1,t}) \\ \|\mathbf{A}_{1,i} \mathbf{u}_t\|_2 \leq \mathbf{c}_{1,i}^T \mathbf{u}_t \quad i \in \{1, 2, \dots, L_1\} \\ \|\mathbf{A}_{2,i} \mathbf{x}_t\|_2 \leq \mathbf{c}_{2,i}^T \mathbf{x}_t \quad i \in \{1, 2, \dots, L_2\} \\ \|\mathbf{A}_{2,i} \mathbf{x}_t\|_2 \leq c \quad i \in \{1, 2, \dots, L_2\} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $\mathbf{f}$  为含  $\langle G \rangle$  个 1 的列向量;  $\mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y}$  为  $\mathbf{a}_{PV,t}$  中各

元素与 $\mathbf{y}$ 中同一节点的分布式光伏容量相乘得到的矩阵; $H_{1,t}$ 至 $H_{5,t}$ 分别为时刻 $t$ 线性等式约束中 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{u}_t$ 、 $\mathbf{a}_{L,t}$ 、 $\mathbf{x}_t$ 、 $\mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y}$ 的系数矩阵; $\mathbf{h}_{1,t}$ 为常数列向量; $H_6$ 和 $\mathbf{h}_2$ 分别为全调度周期线性等式约束中 $\mathbf{x}_t$ 的系数矩阵和常数列向量; $G_{1,t}$ 至 $G_{4,t}$ 分别为时刻 $t$ 线性不等式约束中 $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{u}_t$ 、 $\mathbf{x}_t$ 、 $\mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y}$ 的系数矩阵; $\mathbf{g}_{1,t}$ 为常数列向量; $G_{5,t}$ 和 $\mathbf{g}_2$ 分别为全调度周期不等式约束中 $\mathbf{x}_t$ 的系数矩阵和常数列向量; $\mathbf{W}_1$ 和 $\mathbf{W}_2$ 分别为 $\mathbf{u}_t$ 的系数矩阵和 $\mathbf{x}_t$ 的系数矩阵; $w_1(\cdot)$ 和 $w_2(\cdot)$ 分别为式(33)和式(34)中根据ITLC算法前次优化结果生成线性切平面的函数; $\mathbf{u}_{r-1,t}$ 和 $\mathbf{x}_{r-1,t}$ 分别为ITLC算法第 $r-1$ 次迭代构建的模型在时刻 $t$ 潮流向量和AM向量最优化的结果; $\mathbf{A}_{1,i}$ 和 $\mathbf{c}_{1,i}$ 分别为附录B式(B5)不等式两侧 $\mathbf{u}_t$ 的系数矩阵; $L_1$ 为ADN支路数量; $\mathbf{A}_{2,i}$ 和 $\mathbf{c}_{2,i}$ 分别为附录B式(B8)不等式左右两侧 $\mathbf{x}_t$ 的系数矩阵; $L_2$ 为多端E-SOP端口数量; $c$ 为SOP容量。

#### 4.2 C&CG 算法

二阶段鲁棒优化模型可采用C&CG算法<sup>[22-23]</sup>求解。C&CG算法将原问题分解为主问题和子问题,两者目标函数最优值分别对应原问题目标函数解的上界 $B_{up}$ 与下界 $B_{low}$ 。主、子问题迭代交替求解,直至 $B_{up}$ 与 $B_{low}$ 的差距小于预设的阈值,即可获得原问题最优解。

在C&CG算法 $L$ 次迭代中,主问题的目标函数和约束条件分别如式(37)和式(38)所示。

$$\max_{\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t, \mathbf{u}_{L,t}} \chi \quad (37)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \chi \leq f^T \mathbf{y}_t \\ H_{1,t} \mathbf{y}_t + H_{2,t} \mathbf{u}_{L,t} + H_{3,t} \mathbf{a}_{L,t}^* + H_{4,t} \mathbf{x}_t + H_{5,t} \mathbf{a}_{PV,t}^* \otimes \mathbf{y}_t = \mathbf{h}_{1,t} \\ \sum_{t=\tau_0}^{\tau_{T-1}} H_6 \mathbf{x}_t = \mathbf{h}_2 \\ G_{1,t} \mathbf{y}_t + G_{2,t} \mathbf{u}_{L,t} + G_{3,t} \mathbf{x}_t + G_{4,t} \mathbf{a}_{PV,t}^* \otimes \mathbf{y}_t \leq \mathbf{g}_{1,t} \\ \sum_{t=\tau_0}^{\tau_{T-1}} G_{5,t} \mathbf{x}_t \leq \mathbf{g}_2 \\ \mathbf{W}_1 \mathbf{u}_{L,t} \leq w_1(\mathbf{u}_{r-1,t}) \\ \mathbf{W}_2 \mathbf{x}_t \leq w_2(\mathbf{x}_{r-1,t}) \\ \|\mathbf{A}_{1,i} \mathbf{u}_{L,t}\|_2 \leq \mathbf{c}_{1,i}^T \mathbf{u}_{L,t} \quad i \in \{1, 2, \dots, L_1\} \\ \|\mathbf{A}_{2,i} \mathbf{x}_t\|_2 \leq \mathbf{c}_{2,i}^T \mathbf{x}_t \quad i \in \{1, 2, \dots, L_2\} \\ \|\mathbf{A}_{2,i} \mathbf{x}_t\|_2 \leq c \quad i \in \{1, 2, \dots, L_2\} \\ l \in \{1, 2, \dots, L\} \end{cases} \quad (38)$$

式中: $\chi$ 为原问题目标函数值上界; $\mathbf{y}_t$ 和 $\mathbf{u}_{L,t}$ 分别为C&CG算法第 $l$ 次迭代时生成的待选节点分布式光伏准入容量向量和在时刻 $t$ 的ADN潮流向量; $\mathbf{a}_{L,t}^*$ 和 $\mathbf{a}_{PV,t}^*$ 为用C&CG算法第 $l$ 次迭代中求解子问题后得到的时刻 $t$ “源荷”不确定性变量最优值列向量,在主问题中为常数列向量。

子问题可表示为:

$$\min_{\mathbf{a}_{PV,t}, \mathbf{a}_{L,t}} \{ \max_{\mathbf{y}, \mathbf{u}_t} f^T \mathbf{y} \} \quad (39)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} H_{1,t} \mathbf{y} + H_{2,t} \mathbf{u}_t + H_{3,t} \mathbf{a}_{L,t} + H_{4,t} \mathbf{x}_t^* + H_{5,t} \mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y} = \mathbf{h}_{1,t} \\ G_{1,t} \mathbf{y} + G_{2,t} \mathbf{u}_t + G_{3,t} \mathbf{x}_t^* + G_{4,t} \mathbf{a}_{PV,t} \otimes \mathbf{y} \leq \mathbf{g}_{1,t} \\ \mathbf{W}_1 \mathbf{u}_t \leq w_1(\mathbf{u}_{r-1,t}) \\ \|\mathbf{A}_{1,i} \mathbf{u}_t\|_2 \leq \mathbf{c}_{1,i}^T \mathbf{u}_t \quad i \in \{1, 2, \dots, L_1\} \end{cases} \quad (40)$$

式中: $\mathbf{x}_t^*$ 为求解主问题得到的时刻 $t$ 的AM变量最优值向量,在子问题中为常数列向量。

子问题为min-max问题,无法直接求解。根据强对偶理论,子问题内层最大化问题可转化为对偶形式,与外层合并为最小化问题<sup>[24]</sup>。文献[25]证明,对偶问题中不确定性变量最优解位于可行域边界,即 $\mathbf{a}_{PV}$ 和 $\mathbf{a}_L$ 的元素可行域修正为 $\{0, 1\}$ 。

子问题的对偶形式可表示为:

$$\min_{\mathbf{a}_{PV,t}, \mathbf{a}_{L,t}, \lambda_{1,t}, \lambda_{2,t}, \lambda_{3,r,t}, \sigma_{i,t}, \mu_{i,t}} \sum_{t=\tau_0}^{\tau_{T-1}} (\lambda_{1,t}^T \mathbf{h}_{1,t} - \lambda_{1,t}^T H_{3,t} \mathbf{a}_{L,t} - \lambda_{1,t}^T H_{4,t} \mathbf{x}_t^* + \lambda_{2,t}^T \mathbf{g}_{1,t} - \lambda_{2,t}^T G_{3,t} \mathbf{x}_t^* + \lambda_{3,r,t}^T w_1(\mathbf{u}_{r-1,t})) \quad (41)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{t=\tau_0}^{\tau_{T-1}} (H_{1,t}^T \lambda_{1,t} + H_{5,t}^T \lambda_{1,t} \otimes \mathbf{a}_{PV,t} + G_{1,t}^T \lambda_{2,t} + G_{4,t}^T \lambda_{2,t} \otimes \mathbf{a}_{PV,t}) \geq f \\ H_{2,t}^T \lambda_{1,t} + G_{2,t}^T \lambda_{2,t} + \mathbf{W}_1^T \lambda_{3,r,t} + \sum_{i=1}^{L_1} (\mathbf{A}_{1,i}^T \sigma_{i,t} + \mathbf{c}_{1,i} \mu_{i,t}) = 0 \\ \|\sigma_{i,t}\|_2 \leq \mu_{i,t} \quad i \in \{1, 2, \dots, L_1\} \\ \lambda_{2,t}, \lambda_{3,r,t} \geq 0 \\ \mu_{i,t} \geq 0 \end{cases} \quad (42)$$

式中: $\lambda_{1,t}$ 和 $\lambda_{2,t}$ 分别为子问题中线性等式约束与线性不等式约束在时刻 $t$ 对应的对偶向量; $\lambda_{3,r,t}$ 为子问题中ITLC算法第 $r$ 次迭代生成的时刻 $t$ 线性切平面约束对应的对偶向量; $\sigma_{i,t}$ 和 $\mu_{i,t}$ 分别为子问题中在时刻 $t$ 第 $i$ 个二阶锥约束对应的对偶向量和对偶变量。

子问题对偶形式中含有双线性项,可使用big-

M法消除<sup>[23]</sup>,详见附录B。最终,子问题对偶模型转化为混合整数二阶锥形式,可调用求解器 Gurobi 求解。

### 4.3 模型求解流程

综上所述,ADN分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型求解流程如图1所示,外层和内层迭代分别对应ITLC算法与C&CG算法。

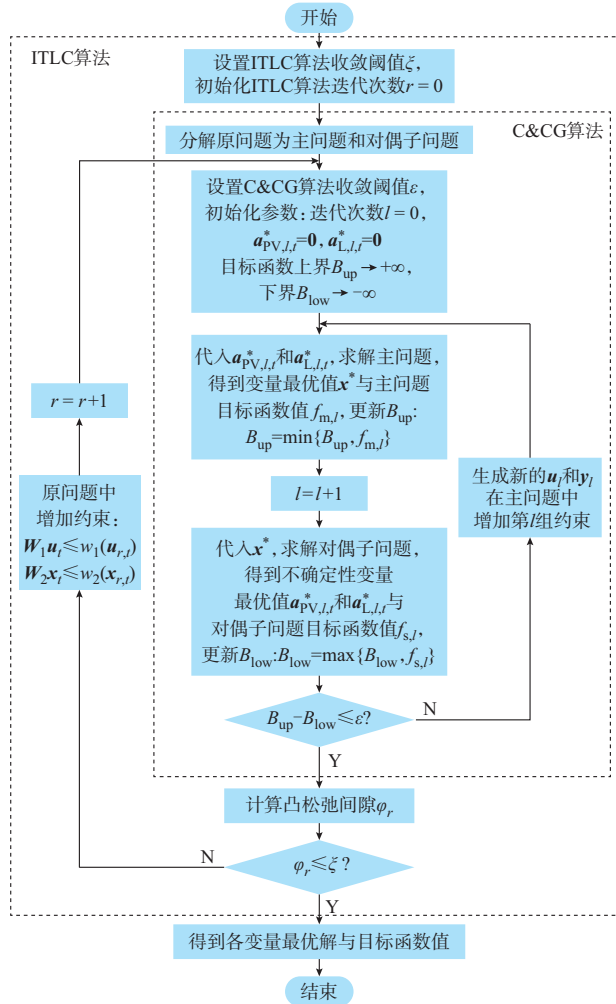


图1 ADN分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型求解流程图

Fig. 1 Flow chart of solving two-stage robust optimization model for calculating maximum hosting capacity of distributed photovoltaic in ADN

## 5 算例分析

### 5.1 算例设置与优化结果

本文采用如图2所示的改进IEEE 33节点ADN,在内置YALMIP工具箱与Gurobi 9.0.0求解器的MATLAB 2016a仿真平台上进行算例分析,计算机具体配置中,CPU型号为i5-4460,主频为3.20 GHz,内存为4 GB。IEEE 33节点ADN的参数详见文献[26]。图2中,TS1、TS2和TS3分别为

支路8-21、9-15和25-29上安装的联络开关,初始状态为断开;D1、D2和D3分别为支路12-13、20-21和6-26上安装的可控开关,初始状态为闭合。PV-C1、PV-C2、PV-C3和PV-C4为分布式光伏待选接入点,分别对应节点10、17、25和32。分布式光伏功率因数调节范围在超前0.9与滞后0.9之间。OLTC正、负向最大调节挡位数均为4挡,调节范围的标幺值为0.95至1.05。SVC接在节点30上,输出无功功率在-100 kvar至300 kvar之间。节点15上接有的CB含5个投切挡位,单个电容器可补偿30 kvar无功功率。多端E-SOP接在节点18、22和33上,变流器损耗系数为0.02<sup>[12,16]</sup>,SOP无功功率下限和上限分别为0 kvar和300 kvar,容量为500 kVA;储能充放电效率均为0.95,最大充放电功率均为500 kW,初始时刻电量为1 000 kW·h,电量下限与上限分别为400 kW·h和1 800 kW·h。支路电流限值为500 A,节点电压允许偏差为标称电压的±7%。凸松弛间隙阈值设为0.5%。

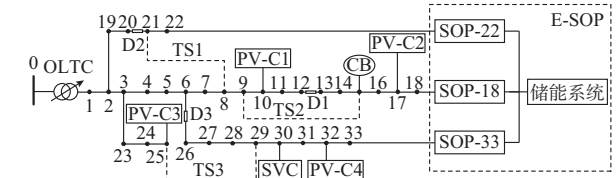


图2 改进的IEEE 33节点ADN结构  
Fig. 2 Structure of modified IEEE 33-bus ADN

将典型日划分为24 h,分布式光伏功率与负荷功率预测值如附录C图C1所示<sup>[10]</sup>。为简化分析过程,设各时刻“源荷”功率预测最大正向偏差值与最大负向偏差值相等,即 $\Delta\eta_{up,i,t} = \Delta\eta_{low,i,t}$ ,  $\Delta P_{L,up,i,t} = \Delta P_{L,low,i,t}$ ,则式(20)可等效为:

$$\begin{cases} \eta_{i,t} = \eta_{pre,i,t}(1 + a_{PV,up,i,t}\gamma_{PV} - a_{PV,low,i,t}\gamma_{PV}) & i \in G \\ P_{L,i,t} = P_{L,pre,i,t}(1 + a_{L,up,i,t}\gamma_L - a_{L,low,i,t}\gamma_L) & i \in N \end{cases} \quad (43)$$

式中: $\gamma_{PV}$ 为分布式光伏出力系数预测最大偏差值与预测值之比; $\gamma_L$ 为负荷功率预测最大偏差值与预测值之比。

取 $(\gamma_{PV}, \gamma_L) = (0.15, 0.10)$ ,经计算,ADN分布式光伏最大准入容量共计4.111 MW,其中,节点10、17、25和32可接入的分布式光伏容量分别为0.714、1.150、0.534和1.713 MW。此时ADN分布式光伏能量渗透率<sup>[27]</sup>为50.01%。

由优化结果可得,典型日各时刻,OLTC分接头均位于最低挡位处,CB均投入4个电容器,SVC补偿的无功功率与分布式光伏输出的无功功率如附录C图C2所示,网络重构后开关TS1、TS2和TS3始



终闭合,D1、D2和D3始终断开,E-SOP的运行策略如附录C图C3所示。05:00—19:00,分布式光伏功率经过SOP流向储能,储能充电,电量呈上升趋势,其余时段储能放电。

## 5.2 “源荷”不确定性影响

优化模型的第2阶段计及了“源荷”不确定性对结果的影响。内层的最大化问题通过最优化潮流最大化分布式光伏准入容量;外层的最小化问题对分布式光伏最大准入容量进行最小化,以避免在最恶劣不确定性条件下ADN电气指标因分布式光伏的接入而越限。附录C表C1列举了第2阶段确定性模型和鲁棒模型的优化结果,设定了不同数值的 $\gamma_{PV}$ 和 $\gamma_L$ 以分析鲁棒区间宽度对结果的影响。由附录C表C1可知,考虑“源荷”不确定性后,鲁棒模型的结果比确定性模型更为保守,不确定因素最恶劣场景对分布式光伏最大准入容量具有抑制作用;随着鲁棒区间宽度的增加,鲁棒模型分布式光伏最大准入容量逐渐减小。在实际中,可根据允许的风险水平选取鲁棒区间宽度。

## 5.3 AM措施影响

二阶段鲁棒优化模型的第1阶段制定典型日AM措施模拟运行策略,计算最恶劣不确定性条件下ADN分布式光伏最大准入容量。设置 $(\gamma_{PV}, \gamma_L) = (0.15, 0.10)$ ,采取不同AM措施组合,计算各场景下ADN分布式光伏最大准入容量,结果如附录C表C2所示。由附录C表C2可知,采取AM措施有助于提升算例ADN分布式光伏最大准入容量,且各AM措施的提升作用存在差异。场景7的多端E-SOP调节对ADN分布式光伏准入容量的提升作用最为明显,结果比场景1增大了6.14%。E-SOP可以向节点18、22和33注入无功功率,提供电压支撑,并平衡不同支路末端有功潮流。此外,储能能在白天分布式光伏出力较大的时段充电,存储负荷不能消纳的光伏电量,在晚上及分布式光伏出力无法满足负荷需求的时刻放电,起到灵活性资源配置的作用。场景6仅使用了多端SOP调节,可将分布式光伏最大准入容量提升3.84%。场景2采用了OLTC调节,将场景1的结果提升了4.08%,仅次于多端E-SOP。OLTC调节有利于改善节点电压分布,以00:00和12:00为例,场景2的节点电压分布如附录C图C4所示。00:00时,分布式光伏无出力,节点电压沿功率流向逐渐降低,OLTC调节使得所有节点电压标幺值均位于允许范围[0.93, 1.07]内;分布式光伏在12:00出力较大,此时OLTC调节显著降低了节点1的电压,即使分布式光伏增大了接入点及其附近节点的电压,各节点电

压依然没有越限。场景5采用了网络重构,可灵活改变ADN潮流分布,将分布式光伏最大准入容量提升了3.76%。无功补偿与分布式光伏无功调节可为ADN节点电压提供无功支撑,但是由场景3、4与场景1的结果对比可知,在该算例中,它们对ADN分布式光伏准入容量的提升无明显作用。

综上可知,OLTC调节、网络重构和多端E-SOP调节可以有效提升ADN分布式光伏最大准入容量,且多端E-SOP调节提升效果最佳,OLTC调节和网络重构次之。

## 5.4 分布式光伏最大准入容量影响因素分析

ADN及AM措施参数设置会影响分布式光伏最大准入容量。需要分析负荷水平、支路电流上限、SOP容量与储能充放电功率上限等因素对结果的影响。

以附录C图C1中负荷水平为基准值,90%、95%、100%、105%和110%负荷水平对应的分布式光伏最大准入容量与能量渗透率如附录C图C5(a)所示。随着负荷水平上升,分布式光伏最大准入容量逐渐增大,但分布式光伏能量渗透率逐渐降低。由此可知,分布式光伏最大准入容量和能量渗透率分别与负荷水平呈正相关和负相关的关系。

分布式光伏出力会使部分支路流过的功率增大,从而导致支路电流增大;SOP容量决定了SOP对不同馈线间潮流的平衡能力;储能充放电功率上限与储能容量成正比<sup>[28]</sup>,决定了储能调节的能力,故ADN对分布式光伏的接纳能力与支路电流上限、SOP容量、储能充放电功率上限均有关,如附录C图C5(b)至(d)所示。在一定范围内,分布式光伏最大准入容量和能量渗透率分别随上述3个参数增大而增大,但在支路电流上限、SOP容量、储能充放电功率上限分别为500 kA、900 kVA和1 500 kW后不再进一步提升。由于结果仍受其他因素的制约,且为避免ADN向上级电网倒送潮流,ADN可接纳的分布式光伏容量有限。

## 5.5 算法有效性与可行性分析

### 5.5.1 算法迭代过程与结果

本文将ITLC算法与C&CG算法相结合,求解二阶段鲁棒优化问题,并使得凸松弛间隙足够小。以附录C表C2中的场景8为例,功率基准值设为100 MVA,算法迭代过程如图3所示。优化模型主、子问题目标函数最优解的标幺值分别对应原问题最优解的上界与下界,计算凸松弛间隙后,ITLC算法根据前一次迭代结果更新二阶段鲁棒优化模型,然后由C&CG算法迭代求解该模型最优解。由图3可知,场景8下优化模型的求解需要进行2次ITLC算法迭代;在第0、1和2次ITLC算法迭代中,C&CG

算法分别经过4、3和3次迭代达到收敛。

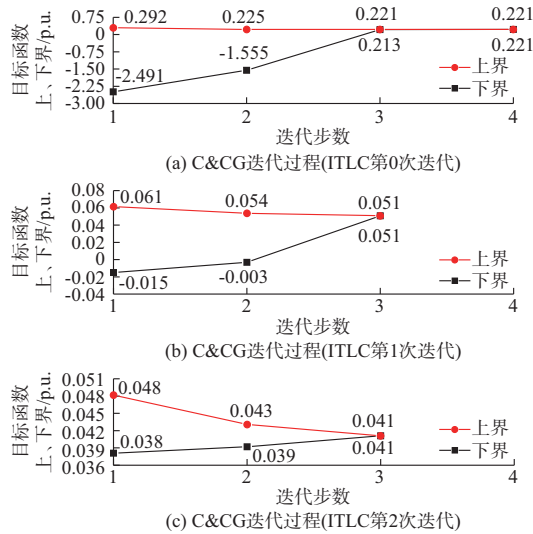


图3 ITLC-C&CG联合算法迭代过程  
Fig. 3 Iteration process of ITLC-C&CG algorithm

ITLC算法每次迭代结果与凸松弛间隙如附录C表C3所示。经2次迭代可得ADN分布式光伏最大准入容量为4.111 MW,凸松弛间隙低至0.410%。若仅采用C&CG算法求解模型,如附录C表C3第1行所示,凸松弛间隙高达10.963%,此时,混合整数二阶锥模型最优解与二阶锥边界相距较远,ADN分布式光伏最大准入容量共计22.126 MW,与算例ADN负荷需求不符。因此,有必要使用ITLC算法,在原问题中迭代增加逐渐收紧的线性切平面约束,将凸松弛间隙减小到允许范围内。

### 5.5.2 鲁棒优化与随机规划对比

前文使用鲁棒区间对“源荷”不确定性建模,本节采用蒙特卡洛模拟生成若干“源荷”功率场景,对比随机规划与鲁棒优化结果,如图4所示。

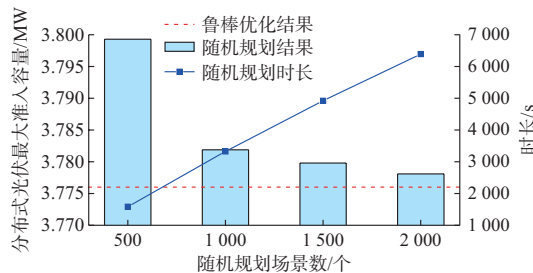


图4 鲁棒优化与随机规划结果对比  
Fig. 4 Comparison of results between robust optimization and stochastic programming

由图4可知,随着场景个数的增加,随机规划结果与鲁棒优化结果越来越相近,但始终高于后者,比鲁棒优化更为乐观。在计算效率上,鲁棒优化用时

59.12 s,而随机规划用时随着场景个数的增加而近似线性增加。当场景较多时,随机规划计算量较大,用时远超鲁棒优化。因此,鲁棒优化虽较为保守,但可保证ADN在极端场景下安全运行,且计算效率更高。

### 5.5.3 ITLC算法与凸差规划算法对比

为进一步验证所用ITLC算法可有效缩小凸松弛间隙,在确定性规划中,分别使用ITLC算法和文献[12]提出的凸差规划(difference-of-convex programming, DCP)算法,在同一ADN上进行算例分析,对比结果如表1所示。由于DCP算法在每一次迭代中引入具有二次凸函数形式的不等式约束,求解效率比ITLC算法低。达到收敛条件后,2种算法得到的结果相近,证明本文使用的ITLC算法可以有效获得凸松弛间隙足够小的模型最优解。

表1 ITLC算法与DCP算法对比结果  
Table 1 Comparison results between ITLC algorithm and DCP algorithm

算法	分布式光伏最大准入容量/MW	迭代次数/次	时长/s	凸松弛间隙/%
ITLC	4.437	4	51.59	0.438
DCP	4.438	8	207.13	0.456

## 6 结语

本文提出了考虑“源荷”不确定性的ADN分布式光伏最大准入容量二阶段鲁棒优化模型,将其转化为混合整数二阶锥形式的主问题与子问题,使用ITLC算法和C&CG算法求解。通过改进IEEE 33节点ADN算例分析,结论如下。

1)在各电气约束下,“源荷”不确定性最恶劣场景会制约ADN分布式光伏最大准入容量,且不确定性越大,鲁棒优化越保守,分布式光伏最大准入容量计算结果越小。

2)主动管理措施的应用可提升ADN对分布式光伏的接纳能力,其中,多端E-SOP的储能可起到灵活调配资源的作用,而SOP可平衡不同馈线间的潮流,对分布式光伏最大准入容量的提升效果最佳;OLTC调节和网络重构次之。

3)主动管理措施与网络的参数设置会影响ADN对分布式光伏的接纳能力。分布式光伏最大准入容量随负荷水平上升而增加;支路电流上限、SOP容量和储能充放电功率上限等参数的增大也会在一定范围内提升分布式光伏最大准入容量。

4)ITLC算法和C&CG算法相结合可有效求解混合整数二阶锥形式的二阶段鲁棒优化模型,并缩小凸松弛间隙,获得原问题的最优解。该算法可实现较高的计算效率与精度。



考虑到同一ADN中各点分布式光伏出力相关性较强,为简化分析,本文将各并网点处分布式光伏出力系数设为相同,并未对分布式光伏出力相关性进行探讨。在后续工作中,不确定性因素间的相关性对ADN分布式光伏最大准入容量的影响可作为很有意义的研究方向。

本文得到国网福建省电力有限公司科技项目(面向智慧城镇配电网的高比例分布式光伏消纳技术研究,5213302000GD)的资助,特此感谢!

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] Renewable 2019 global status report [EB/OL]. [2020-09-16]. <https://www.jinyi-solar.com/news/199.html>.
- [2] 王宣定, 吴文传, 刘镭, 等. 基于多参数规划的有源配电网分布式光伏容量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 20-26. WANG Xuanding, WU Wenchuan, LIU Lei, et al. Multi-parameter programming based capacity assessment method of distributed photovoltaic for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 20-26.
- [3] 柴圆圆, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738-746. CHAI Yuanyuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738-746.
- [4] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280. ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [5] 周良学, 张迪, 黎灿兵, 等. 考虑分布式光伏电源与负荷相关性的接入容量分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 56-61. ZHOU Liangxue, ZHANG Di, LI Canbing, et al. Access capacity analysis considering correlation of distributed photovoltaic power and load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 56-61.
- [6] EBE F, IDLBI B, MORRIS J, et al. Evaluation of PV hosting capacities of distribution grids with utilization of solar roof potential analyses [J]. CIREOpen Access Proceedings Journal, 2017(1): 2265-2269.
- [7] 邢海军, 程浩忠, 杨镜非, 等. 考虑多种主动管理策略的配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 70-76. XING Haijun, CHENG Haozhong, YANG Jingfei, et al. Distribution network expansion planning considering multiple active management strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 70-76.
- [8] SOUSA J F B, BORGES C L T, MITRA J. PV hosting capacity of LV distribution networks using smart inverters and storage systems: a practical margin [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(8): 1332-1339.
- [9] WANG S, CHEN S, GE L, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1111-1123.
- [10] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [11] 郑焕坤, 石甜静. 基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 117-123. ZHENG Huankun, SHI Tianjing. Bi-level optimization of distribution network based on soft open point and reactive power compensation device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 117-123.
- [12] JI H, WANG C, LI P, et al. Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming [J]. Applied Energy, 2018, 218: 338-348.
- [13] BLOEMINK J, GREEN T. Increasing photovoltaic penetration with local energy storage and soft normally-open points [C]// 2011 IEEE PES General Meeting, July 24-28, 2011, San Diego, USA.
- [14] 杨欢, 蔡云旂, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165. YANG Huan, CAI Yunqi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [15] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关SOP规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1896. WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896.
- [16] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [17] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 112-123.
- [18] DING T, LIN Y, LI G, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [19] XING H J, CHENG H Z, ZHANG Y, et al. Active distribution network expansion planning integrating dispersed energy storage systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 638-644.
- [20] DING T, DU M, HUANG C, et al. Multi-period active distribution network planning using multi-stage stochastic programming and nested decomposition by SDDIP [J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems [2020-11-20]. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3032830>.

- [21] ABDELOUADOUD S Y, GIRARD R, NEIRAC F P, et al. Optimal power flow of a distribution system based on increasingly tight cutting planes added to a second order cone relaxation [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, 69: 9-17.
- [22] DING T, LI C, YANG Y, 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.
- [23] DING T, LIU S, YUAN W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 301-311.
- [24] 赵博石,胡泽春,宋永华.考虑 $N-1$ 安全约束的含可再生能源输电网络结构鲁棒优化[J].*电力系统自动化*,2019,43(4):16-24. ZHAO Boshi, HU Zechun, SONG Yonghua. Robust optimization of transmission topology with renewable energy sources considering  $N-1$  security constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 16-24.
- [25] BERTSIMAS D, LITVINOV E, SUN X A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28 (1): 52-63.
- [26] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4 (2) : 1401-1407.
- [27] 赵波,肖传亮,徐琛,等.基于渗透率的区域配电网分布式光伏并网消纳能力分析[J].*电力系统自动化*,2017,41(21): 105-111. ZHAO Bo, XIAO Chuanliang, XU Chen, et al. Penetration based accommodation capacity analysis on distributed photovoltaic connection in regional distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41 (21) : 105-111.
- [28] 郭久亿,刘洋,郭焱林,等.不同典型用户侧储能配置评估与运行优化模型[J/OL].*电网技术*[2020-06-03].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0181>. GUO Jiuyi, LIU Yang, GUO Yanlin, et al. Configuration evaluation and operation optimization model of energy storage in different typical user-side [J/OL]. *Power System Technology* [2020-09-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0181>.

方一晨(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统规划。E-mail:fych1995@sjtu.edu.cn

张沈习(1988—),男,通信作者,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向:电力系统规划、综合能源系统。E-mail:willzxs@sjtu.edu.cn

程浩忠(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统规划、电压稳定、综合能源系统。E-mail:hzcheng@sjtu.edu.cn

(编辑 杨松迎)

## Robust Optimization of Distributed Photovoltaic Hosting Capacity of Active Distribution Network with Soft Open Point

FANG Yichen<sup>1</sup>, ZHANG Shenxi<sup>1</sup>, CHENG Haozhong<sup>1</sup>, CAI Xiuwen<sup>2</sup>, LIN Mingxi<sup>2</sup>, XU Hanghai<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education

(Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;

2. Quanzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** A two-stage robust optimization model is established for the assessment of the maximum hosting capacity of distributed photovoltaic (PV) of an active distribution network (ADN) considering the uncertainties of distributed PV and load power. Several active management (AM) strategies are applied in the ADN, including the regulation of the multi-terminal soft open point with energy storage (E-SOP), the regulation of on-load tap changers (OLTC), the reactive power compensation, the reactive power control of distributed PV, and the network reconfiguration. Based on the technology of convex relaxation, the original problem can be decomposed into a master problem and a subproblem. The master problem optimizes the simulated operation mode of AM strategies on a typical day to calculate the maximum hosting capacity of distributed PV at the candidate nodes. The subproblem searches for the worst scenario of uncertainties. In view of the gap introduced by the convex relaxation, a solving strategy combined the algorithm of increasingly tight linear cut (ITLC) with the column-and-constraint generation (C&CG) algorithm is proposed to obtain the optimal solution of the original problem with a sufficiently small gap. The validation of the model and algorithm is investigated on a modified IEEE 33-bus ADN. And the impact of the uncertainties and the AM strategies on the maximum hosting capacity of distributed PV in the ADN is analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51907123), National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (No. U1966206), and Shanghai Sailing Program (No. 18YF1411600).

**Key words:** multi-terminal soft open point; distributed photovoltaic; maximum hosting capacity; two-stage robust optimization model; algorithm of increasingly tight linear cut (ITLC); column-and-constraint generation (C&CG) algorithm

