第 50 卷 第 1 期：83-95 高电压技术 Vol.50, No.1: 83-95
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230669

考虑需求响应的交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法

杨志淳[1]，杨　帆[1]，闵怀东[1]，胡　伟[1]，雷　杨[1]，刘　瑜[2]
（1. 国网湖北省电力有限公司电力科学研究院，武汉 430077;
2. 湖北方源东力电力科学研究有限公司，武汉 430077）

摘　要：鲁棒优化通常采用多面体模型来描述分布式光伏出力的不确定性，却忽略了分布式光伏出力的时空相关性，为此，该文建立了分布式光伏的时空相关性多面体模型，提出了考虑需求侧响应的交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法。首先，建立分布式光伏出力不确定性的时空相关性多面体模型和电价激励型需求侧响应模型，以最大化分布式光伏并网容量为目标，考虑交直流混合配电网中多种运行约束和调节策略，建立交直流混合配电网分布式光伏承载能力两阶段鲁棒评估模型，并采用列与约束生成算法进行迭代求解。在 70 节点系统上验证了算法的有效性，仿真结果表明：不同的管理策略有助于提升交直流混合配电网的分布式光伏承载能力。
关键词：承载能力；交直流混合配电网；需求侧响应；混合整数二阶锥规划；两阶段鲁棒优化

Distributed PV Hosting Capacity Robust Assessment of AC/DC Hybrid Distribution Network Considering Demand Response

YANG Zhichun[1], YANG Fan[1], MIN Huaidong[1], HU Wei[1], LEI Yang[1], LIU Yu[2]
(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China;
2. Hubei Fangyuan Dongli Electric Power Research Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract：Robust optimization usually uses a polyhedron model to describe the uncertainty of distributed photovoltaic (PV) output, but ignores the spatial-temporal correlation of distributed PV output. Therefore, this paper established a spatial-temporal correlation polyhedron model of distributed PV, and proposed a robust assessment method of distributed PV hosting capacity of AC/DC hybrid distribution network considering demand response. First of all, the spatial-temporal correlation polyhedron model of the uncertainty of distributed photovoltaic output and the demand response model of electricity price incentive are established. With the goal of maximizing the grid-connected capacity of distributed PV capacity, various operation constraints and regulation strategies in the AC/DC hybrid distribution network are taken into account, a two-stage robust assessment model for the distributed PV hosting capacity of the AC/DC hybrid distribution network is established, and the column and constraint generation algorithm is used for iterative solution. The effectiveness of the algorithm is verified on a 70-bus system, and the simulation results indicate that different management strategies can help improve the distributed photovoltaic carrying capacity of AC/DC hybrid distribution networks.
Key words：hosting capacity; AC/DC hybrid distribution network; demand response; mixed integer second-order cone programming; robust optimization

0　引言

新型电力系统具备安全高效、清洁低碳、柔性灵活、智慧融合四大重要特征。其中，安全高效是基本前提，清洁低碳是核心目标，柔性灵活是重要支撑，智慧融合是基础保障。新型电力系统是新型能源体系的重要组成和实现“双碳”目标的关键载体。推进分布式光伏开发利用，不仅能充分利用广阔的闲置资源，而且能实现用电的因地取能、就地分散、灵活消纳，提升电能的终端能源消费占比，对助力实现“双碳”目标具有积极作用[1-2]。在“双碳”背景下，大量分布式光伏广泛接入配电网，有源配电网形态逐渐复杂化，运行态势多样化，如何更加友好地接纳、消纳高比例分布式光伏并网，成

基金资助项目：国网湖北省电力有限公司科技项目(52153222001F).
Project supported by Science and Technology Program of State Grid Hubei Electric Power Company Limited (52153222001F).

为了有源配电网的关键技术。

目前，围绕有源配电网接纳、消纳高比例分布式光伏的研究主要按时间尺度划分，在运行规划尺度上主要是高比例分布式光伏的选址定容和最大并网容量等[3-4]方面的研究；在运行层面上主要是高比例分布式光伏的调度、调峰、调频等方面的研究[5]。在规划层面，衡量有源配电网对高比例分布式光伏的接纳能力成为首要解决的问题，即评估有源配电网的承载能力[6]，在配电网设备不过载，短路电流、电压的偏差、谐波不超标条件下，有源配电网接纳分布式光伏的最大容量。

目前国内外对有源配电网的分布式光伏承载能力评估方法主要分为两大类，一类是基于仿真−校验思想的模拟法，即通过配电网正常运行方式预估分布式光伏并网容量，然后校核短路电流和电压偏差等，若通过校验则增加分布式光伏并网容量，否则减少分布式光伏并网容量，直至满足短路电流和电压偏差等要求。虽然该方法操作起来比较简单，但逐级递增或递减的增加容量，很难精确捕捉到最大并网容量。文献[7]在考虑分布式电源的短路电流对电流保护影响的基础上，仿真分析了配电线路允许接入的最大并网容量。文献[8]分析了分布式电源和负荷分布位置对馈线电压畸变率的影响机理，基于随机场景的仿真计算了分布式电源的最大并网容量。文献[9]充分考虑配电网的热稳定性、短路电流、电压偏差和谐波的约束，分层分级开展仿真测算分布式光伏并网容量。文献[10]综合考虑配电线路输送容量约束、主变压器容量约束、节点电压约束和母线短路电流约束，采用 DigSILENT 软件进行分布式电源最大并网容量的仿真分析。从文献[7-10]中不难发现基于仿真−校验的模拟方法可以考虑更多的约束，能更加全面的评估有源配电网的承载能力。

另一类则是基于优化思想的评估方法，建立以有源配电网分布式光伏并网容量最大化为目标函数，配电网运行的各种限制为约束条件的优化模型[11]，并结合各类优化算法求解。文献[12]在考虑节点电压约束的前提下，建立了含负荷不确定性的分布式电源接入配电网最大并网容量的双层优化模型，并采用可信赖域序列二次规划算法来求解。文献[13]以最大化分布式光伏并网容量为目标函数，以电压不越限为机会约束，建立了基于电压偏差机会约束的分布式光伏并网容量优化模型，并采用改进的随机权重粒子群算法求解。文献[14]在考虑节点电压和传输容量越限机会约束的情况下，建立了分布式光伏并网容量分布鲁棒优化模型，并将其转化为混合整数线性规划问题求解。文献[15]建立了考虑短路电流约束的多分布式电源接入配电网最大承载能力的优化模型，并采用基于容量分段试探和不同容量初始值的逐段倒推或逐段顺推求解。文献[11-15]均以电压偏差和过载等为约束，建立了有源配电网的分布式光伏最大并网容量模型，但主要存在以下 2 个方面的问题：

1）缺少考虑需求响应对有源配电网分布式光伏承载能力的影响。在高比例分布式光伏并网的情况下，通过需求侧响应能灵活平移负荷需求，更好接纳分布式光伏[16]。

2）缺少考虑分布式光伏出力时空相关性[17]对有源配电网分布式光伏承载力的影响。大多数的鲁棒优化方法[18]采用多面体集合来描述分布式光伏出力集合，这种凸包络线难以准确描述分布式光伏出力的时空性。

在上述背景下，本文提出了考虑需求响应的交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法。在传统多面体集合的基础上，考虑分布式光伏出力在时空上的相关性建立时空相关性的多面体集合，同时建立基于电力价格弹性系数的需求侧响应模型，然后以最大化交直流混合配电网分布式光伏并网容量为目标函数，以分布式光伏输出功率约束、电池储能约束、有载调压变压器约束、交直流混合配电网潮流约束等为约束条件，建立交直流混合配电网分布式光伏承载能力两阶段鲁棒优化模型，并采用列与生成算法[19]进行求解。在改进的 70 节点系统上仿真结果验证了所提评估方法的有效性。

1 分布式光伏和需求侧响应建模

1.1 分布式光伏出力时空相关性模型

多面体集合通常描述连续变量的不确定性。它是用线性约束描述的集合，分布式光伏出力的多面体模型如式(1)所示：

$$\Omega_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{I}}=\left\{P_{i,t}^{\mathrm{PV}}\left|\begin{array}{l}P_{i,t}^{\mathrm{PV}}=P_{i,t}^{\mathrm{PV}0}+P_{i,t}^{\mathrm{PV}+}z_{i,t}^{+}-P_{i,t}^{\mathrm{PV}-}z_{i,t}^{-}\\ z_{i,t}^{+}+z_{i,t}^{-}\le 1,\ 0\le z_{i,t}^{+},z_{i,t}^{-}\le 1\\ \sum_{\forall t\in T}(z_{i,t}^{+}+z_{i,t}^{-})\le \Gamma_i, i\in\Omega_{\mathrm{PV}}\end{array}\right.\right\} \tag{1}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{PV}0}$ 表示节点 i 处分布式光伏出力的期望值；$P_{i,t}^{\mathrm{PV}+}$、$P_{i,t}^{\mathrm{PV}-}$ 分别表示节点 i 处分布式光伏出力预测

的最大偏差和最小偏差；$z_{i,t}^{+}$、$z_{i,t}^{-}$分别表示最大偏差和最小偏差的0–1决策变量；T表示调度周期；Γ_i表示不确定性预算；Ω_{PV}表示分布式光伏接入节点集合；$\Omega_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{I}}$为分布式光伏出力的多面体模型。分布式光伏出力的多面体模型的优点是通过改变Γ_i即可控制解的保守性。其缺点是结构比较简单，难以描述分布式光伏的时间相关性、空间相关性。

式(1)定义的多面体集合假设了每个时刻不确定参数是独立分布的，并未计及不确定参数在时间以及空间上的相关性，这并不符合实际情况。以光伏出力为例，当前时段的光伏出力与历史时刻的光伏出力存在一定的相关性，称之为时间相关性。对于配网中距离较近的多个光伏机组，其有功出力同样存在相关性，称之为空间相关性[20]。

基于金寨地区光伏电站出力预测数据，该地区t+1时刻PV_1的出力和t时刻PV_1在出力数据分布图如图1所示，PV_1出力在时间上存在相关性，可以采用区间拟合的方式得到其上下边界线，$P_{i,t+1}^{\mathrm{PV}} \le a_{i,t}P_{1,t}^{\mathrm{PV}} + b_{i,t}^{+}$、$P_{i,t+1}^{\mathrm{PV}} \ge a_{i,t}P_{i,t}^{\mathrm{PV}} + b_{i,t}^{-}$，$a_{i,t}$为上下边界线的斜率，$b_{i,t}^{+}$、$b_{i,t}^{-}$为上下边界线的截距。该地区$t$时刻$\mathrm{PV}_2$的出力和$t$时刻$\mathrm{PV}_1$在出力数据分布图如图2所示，$\mathrm{PV}_1$与$\mathrm{PV}_2$出力在空间上存在相关性，可以采用区间拟合的方式得到其上下边界线，$P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \le c_{j,t}P_{j,t}^{\mathrm{PV}} + d_{j,t}^{+}$、$P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \ge c_{j,t}P_{j,t}^{\mathrm{PV}} + d_{j,t}^{-}$，$c_{j,t}$为上下边界线的斜率，$d_{j,t}^{+}$、$d_{j,t}^{-}$分别为上下边界线的截距。从物理意义上来说空间相关性是指2个光伏有功出力由于地理位置而存在关联性，比如，2个地理位置临近的光照强度存在一定的关联性，因此，2个地理位置临近的光伏出力也有关联性。那么空间距离的远近最终都反映在分布式光伏的出力上相关性建模上，即通过图2中的2个上下边直线来反映。通过分布式光伏出力的相关性的直线斜率和截距来约束与衡量空间距离所造成的空间相关性。

因此，在考虑分布式光伏出力时空相关性后，分布式光伏出力时空相关性模型$\Omega_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{II}}$为

$$\Omega_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{II}} = \left\{ P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \left| \begin{array}{l} \Omega_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{I}}\text{中的约束} \\ P_{i,t+1}^{\mathrm{PV}} \le a_{i,t}P_{i,t}^{\mathrm{PV}} + b_{i,t}^{+} \\ P_{i,t+1}^{\mathrm{PV}} \ge a_{i,t}P_{i,t}^{\mathrm{PV}} + b_{i,t}^{-} \\ P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \le c_{j,t}P_{j,t}^{\mathrm{PV}} + d_{j,t}^{+}, i \ne j \\ P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \ge c_{j,t}P_{j,t}^{\mathrm{PV}} + d_{j,t}^{-} \end{array} \right. \right\} \tag{2}$$

1.2　电价激励型需求侧响应模型

需求侧响应是对交直流混合配电网中的用电负荷进行灵活调整，在降低峰谷差、缓解供需失衡的同时，还可以减少配电网运行的综合成本，进而提高配电网运行的经济性和有效性。本文采用的基于电力价格弹性系数的需求侧响应模型[20]如下所示：

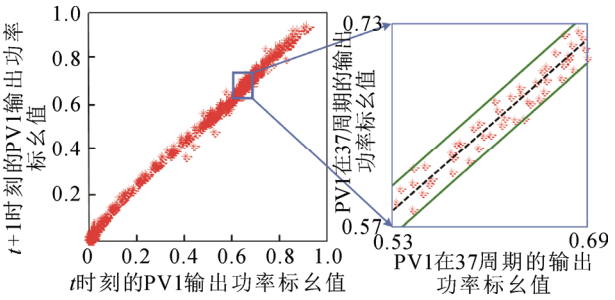


图1　考虑时间相关性的区间拟合

Fig.1　Interval-fitting considering temporal correlation

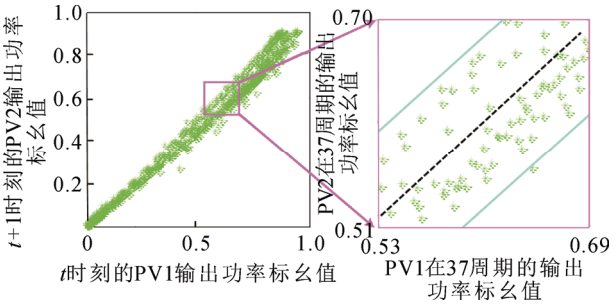


图2　考虑空间相关性的区间拟合

Fig.2　Interval-fitting considering spatial correlation

$$-\xi_{i,t} = \frac{\Delta P_{i,t}}{\Delta \rho_{i,t}} = \frac{P_{i,t}^{\mathrm{cur}} - P_{i,t}^{\mathrm{d}}}{\rho_{i,t}^{\mathrm{cur}} - \rho_{i,t}} \tag{3}$$

$$\rho_{i,t}^{\mathrm{cur}} = \begin{cases} \rho^{\mathrm{peak}} & t \in T^{\mathrm{peak}} \\ \rho^{\mathrm{valley}} & t \in T^{\mathrm{valley}} \end{cases} \tag{4}$$

$$\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T} P_{i,t}^{\mathrm{cur}} = \sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T} P_{i,t}^{\mathrm{d}} \tag{5}$$

$$\rho_{i,t}^{\mathrm{cur,min}} \le \rho_{i,t}^{\mathrm{cur}} \le \rho_{i,t}^{\mathrm{cur,max}} \tag{6}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{cur}} = P_{i,t}^{\mathrm{d}}, \forall i \in N_{\mathrm{IZ}} \tag{7}$$

式中：$\xi_{i,t}$为节点i在t时刻的电价弹性系数，它等于节点i在t时刻实施需求响应前后负荷的变化量$\Delta P_{i,t}$与价格的变化量$\Delta\rho_{i,t}$之比；$P_{i,t}^{\mathrm{d}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{cur}}$分别是实施需求响应前后的负荷大小；$\rho_{i,t}$、$\rho_{i,t}^{\mathrm{cur}}$分别是实施需求响应前后的电价；$\rho^{\mathrm{peak}}$是峰值电价，$\rho^{\mathrm{valley}}$是低谷电价；$T^{\mathrm{peak}}$、$T^{\mathrm{valley}}$表示峰谷时段；$\rho_{i,t}^{\mathrm{cur,max}}$、$\rho_{i,t}^{\mathrm{cur,min}}$分别表示实施需求响应后电价的上下限；$N_i$表示实施需求侧响应的节点集合；$N_{\mathrm{IZ}}$表示未实施需求侧响应的节点集合。

其中，式(3)—(4)是负荷弹性约束，式(4)表明为了达到削峰填谷的效果，实施需求响应后的电价和峰值时刻或低谷时刻有关；式(5)是总负荷约束，表明实施需求响应前后总负荷不变；式(6)是电价边界约束；式(7)是工业区负荷节点不采用需求负荷响应约束。在此基础上增加一个需求侧响应平均电价不变约束的式(8)：

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}P_{i,t}^{\mathrm{cur}}\rho_{i,t}^{\mathrm{cur}}}{\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}P_{i,t}^{\mathrm{cur}}}=\frac{\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}P_{i,t}^{\mathrm{d}}\rho_{i,t}}{\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}P_{i,t}^{\mathrm{d}}} \tag{8}$$

但式(8)属于非线性约束，因此，本文进一步将其转化为二阶锥形式，如式(9)所示：

$$\left\|\left[\cdots\quad \xi_{i,t}^{\frac{1}{2}}\rho_{i,t}^{\mathrm{cur}}-\frac{1}{2}\left(\rho_{i,t}\xi_{i,t}^{\frac{1}{2}}+P_{i,t}^{0}\xi_{i,t}^{-\frac{1}{2}}\right)\quad\cdots\right]^{\mathrm{T}}\right\|_2\le \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i}\sum_{t=1}^{T}\left[\frac{1}{4}\left(\rho_{i,t}\xi_{i,t}^{\frac{1}{2}}+P_{i,t}^{0}\xi_{i,t}^{-\frac{1}{2}}\right)^2-P_{i,t}^{0}\rho_{i,t}\right]} \tag{9}$$

2 AC/DC 混合配电网承载能力评估模型

2.1 目标函数

交直流混合配电网承载能力评估模型是考虑交直流混合配电网中各种运行约束而所能接纳的分布式光伏最大并网容量，因此，其目标函数是最大化交直流混合配电网中所有分布式光伏容量之和，可采用下式描述：

$$\max\sum_{i\in\Omega_{\mathrm{PV}}}S_i^{\mathrm{PV}} \tag{10}$$

式中：S_i^{PV} 为节点 i 处的分布式光伏并网容量。

2.2 约束条件

1）分布式光伏(photovoltaic，PV)输出功率约束

$$S_i^{\mathrm{PV,min}}\le S_i^{\mathrm{PV}}\le S_i^{\mathrm{PV,max}},\forall i\in\Omega_{\mathrm{PV}} \tag{11}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{PV}}\le S_i^{\mathrm{PV}}\omega_{i,t}^{\mathrm{PV}},\forall i\in\mathrm{W}_{\mathrm{PV}},t\in T \tag{12}$$

$$x^{\mathrm{PV}}\sum_{\forall i\in\Omega_{\mathrm{PV}},t\in T}S_i^{\mathrm{PV}}\omega_{i,t}^{\mathrm{PV}}\le\sum_{\forall i\in\Omega_{\mathrm{PV}},t\in T}P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \tag{13}$$

$$\tan\varphi_{i,t}^{\min}P_{i,t}^{\mathrm{PV}}\le Q_{i,t}^{\mathrm{PV}}\le\tan\varphi_{i,t}^{\max}P_{i,t}^{\mathrm{PV}},\forall i\in\Omega_{\mathrm{PV}},t\in T \tag{14}$$

式中：$S_i^{\mathrm{PV,min}}$、$S_i^{\mathrm{PV,max}}$ 分别为节点 i 处的分布式光伏的最大容量和最小容量；$P_{i,t}^{\mathrm{PV}}$ 为节点 i 处的分布式光伏输出的有功功率；$Q_{i,t}^{\mathrm{PV}}$ 为节点 i 处的分布式光伏输出的无功功率；$\omega_{i,t}^{\mathrm{PV}}$ 为分布式光伏 i 在 t 时段的光伏功率转换系数；x^{PV} 为分布式光伏最小出力水平；$\varphi_{i,t}^{\min}$、$\varphi_{i,t}^{\max}$ 分别为分布式光伏 i 在 t 时段的最大功率因数角和最小功率因数角。

2）电池储能(battery energy storage system，BESS)运行约束

BESS 有充电、放电、静止(既不充电且不放电)3种状态，引入 0−1 变量 $u_{i,t}^{\mathrm{ch}}$ 表示节点 i 处 BESS 在时段 t 处于充电状态，−1 变量 $u_{i,t}^{\mathrm{dis}}$ 表示节点 i 处 BESS 在时段 t 处于放电状态，由于 BESS 在同一时刻只能处于 3 种状态中的一种状态，因此有：

$$u_{i,t}^{\mathrm{ch}}+u_{i,t}^{\mathrm{dis}}\le 1 \tag{15}$$

BESS 在运行过程中还受到充放电速率约束、能量平衡约束和充放电过程约束等，分别可表示为：

（1）充放电速率约束

$$\begin{cases}u_{i,t}^{\mathrm{ch}}\underline{P_i^{\mathrm{ch}}}\le P_{i,t}^{\mathrm{ch}}\le u_{i,t}^{\mathrm{ch}}\overline{P_i^{\mathrm{ch}}}\\ u_{i,t}^{\mathrm{dis}}\underline{P_i^{\mathrm{dis}}}\le P_{i,t}^{\mathrm{dis}}\le u_{i,t}^{\mathrm{dis}}\overline{P_i^{\mathrm{dis}}}\end{cases} \tag{16}$$

式中：$\overline{P_i^{\mathrm{ch}}}$、$\underline{P_i^{\mathrm{ch}}}$ 分别为节点 i 处 BESS 的充电功率上下限；$\overline{P_i^{\mathrm{dis}}}$、$\underline{P_i^{\mathrm{dis}}}$ 分别为节点 i 处 BESS 放电功率上下限；$P_{i,t}^{\mathrm{ch}}$、$P_{i,t}^{\mathrm{dis}}$ 分别为节点 i 处 BESS 在时段 t 的充电、放电功率。

（2）充放电能量平衡约束

$$S_{i,t}^{\mathrm{OC}}=S_{i,t\text{-}1}^{\mathrm{OC}}+(P_{i,t}^{\mathrm{ch}}\eta_{\mathrm{ch},i}-\frac{P_{i,t}^{\mathrm{dis}}}{\eta_{\mathrm{dis},i}})\Delta t\Big/E_i^{\mathrm{e}} \tag{17}$$

$$\underline{S_i^{\mathrm{OC}}}\le S_{i,t}^{\mathrm{OC}}\le\overline{S_i^{\mathrm{OC}}} \tag{18}$$

式中：$S_{i,t}^{\mathrm{OC}}$ 分别为节点 i 处 BESS 在 t 时刻的荷电状态；$\eta_{\mathrm{ch},i}$、$\eta_{\mathrm{dis},i}$ 分别为节点 i 处 BESS 的充电、放电效率；Δt 为调度时间间隔；$\overline{S_i^{\mathrm{OC}}}$、$\underline{S_i^{\mathrm{OC}}}$ 分别为节点 i 处 BESS 的荷电状态上下限；E_i^{e} 为节点 i 处 BESS 的容量。

3）有载调压变压器(on-load tap changer，OLTC)运行约束

包含有载调压变压器的支路模型如图 3 所示。

图 3 中节点 i 和节点 j 之间添加了一个有载调压变压器，增设一个辅助节点 o，OLTC 运行有如下约束：

$$V_{o,t}^{\mathrm{AC}}=V_{i,t}^{\mathrm{AC}}-2(r_{ij}^{\mathrm{AC}}P_{ij,t}^{\mathrm{AC}}+x_{ij}^{\mathrm{AC}}Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}})+((r_{ij}^{\mathrm{AC}})^2+(x_{ij}^{\mathrm{AC}})^2)l_{ij,t}^{\mathrm{AC}} \tag{19}$$

$$V_{o,t}^{\mathrm{AC}}=k_{ij,t}^2V_{j,t}^{\mathrm{AC}} \tag{20}$$

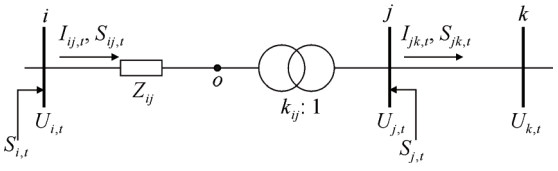


图 3 含 OLTC 的支路模型

Fig.3 Branch model with OLTC

$$k_{ij,t}=k_{ij}^{\min}+N_{ij,t}\Delta k_{ij} \tag{21}$$

$$0\le N_{ij,t}\le K_{ij} \tag{22}$$

$$\Delta k_{ij}=(k_{ij}^{\max}-k_{ij}^{\min})\big/K_{ij} \tag{23}$$

式中：$V_{o,t}^{\mathrm{AC}}$ 为辅助节点 o 在 t 时刻的电压幅值平方；$N_{ij,t}$ 为支路 (i,j) 变压器在 t 时刻的优化挡位，它是一个整数变量；Δk_{ij} 为支路 (i,j) 变压器分接头每一档的增量；$k_{ij,t}$ 为支路 (i,j) 变压器的在 t 时刻的变比；K_{ij} 为支路 (i,j) 变压器分接头的挡位数量；$k_{ij}^{\max}$、$k_{ij}^{\min}$ 分别为支路 (i,j) 变压器变比的上下限值。r_{ij}^{AC}、x_{ij}^{AC} 分别表示交流线路 (i,j) 的电阻、电抗；$U_{i,t}^{\mathrm{AC}}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值，$V_{i,t}^{\mathrm{AC}}=(U_{i,t}^{\mathrm{AC}})^2$；$U_{j,t}^{\mathrm{AC}}$ 为节点 j 在 t 时刻的电压幅值，$V_{j,t}^{\mathrm{AC}}=(U_{j,t}^{\mathrm{AC}})^2$；$P_{ij,t}^{\mathrm{AC}}$、$Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}}$ 分别为交流支路 (i,j) 在 t 时刻的有功功率和无功功率；$I_{ij,t}^{\mathrm{AC}}$ 为交流支路 (i,j) 在 t 时刻的电流幅值，$l_{ij,t}^{\mathrm{AC}}=(I_{ij,t}^{\mathrm{AC}})^2$。

4）分组投切电容器(capacitor banks，CB)运行约束

分组投切电容器是一个离散的无功补偿的机械设备，需要限制其频繁动作影响使用寿命，具体约束如下：

$$Q_{i,t}^{\mathrm{CB}}=N_{i,t}^{\mathrm{CB}}Q_{i,t}^{\mathrm{CB,step}} \tag{24}$$

$$\sum_{t=1}^{T}|N_{i,t}^{\mathrm{CB}}-N_{i,t-1}^{\mathrm{CB}}|\le B_{\lim}^{\mathrm{CB}} \tag{25}$$

$$0\le N_{i,t}^{\mathrm{CB}}\le N_{\max}^{\mathrm{CB}},N_{i,t}^{\mathrm{CB}}\in \text{整数} \tag{26}$$

式中：$Q_{i,t}^{\mathrm{CB}}$ 为第 i 节点上所连接的 CB 在 t 时刻的无功补偿功率；$N_{i,t}^{\mathrm{CB}}$ 为第 i 节点上所连接的 CB 在 t 时刻投运组数；$Q_{i,t}^{\mathrm{CB,step}}$ 为第 i 节点上所连接的 CB 在 t 时刻每一组无功补偿功率；$B_{\lim}^{\mathrm{CB}}$ 为周期 T 内 CB 的动作次数限制；$N_{\max}^{\mathrm{CB}}$ 为 CB 最多投运组数。

5）静止无功补偿器(static VAR compensator，SVC)运行约束

进一步考虑了连续调节的无功补偿装置 SVC，其运行约束如下：

$$Q_{i,\mathrm{SVC}}^{\min}\le Q_{i,t}^{\mathrm{SVC}}\le Q_{i,\mathrm{SVC}}^{\max} \tag{27}$$

式中：$Q_{i,\mathrm{SVC}}^{\min}$、$Q_{i,\mathrm{SVC}}^{\max}$ 分别为节点 i 上所连接的 SVC 可调无功功率的下限值和上限值；$Q_{i,t}^{\mathrm{SVC}}$ 为第 i 节点上所连接的 SVC 在 t 时刻的无功补偿功率。

6）配电网关口功率约束

为抑制配电网的功率波动对主网造成的影响，需要将配电网关口功率控制在某一范围内：

$$\begin{cases}P_i^{\min}\le P_{i,t}^{\mathrm{TR}}\le P_i^{\max}\\ Q_i^{\min}\le Q_{i,t}^{\mathrm{TR}}\le Q_i^{\max}\end{cases} \tag{28}$$

式中：$P_i^{\max}$、$P_i^{\min}$ 分别为配电网 i 节点处关口有功功率上下限值；$Q_i^{\max}$、$Q_i^{\min}$ 分别为配电网 i 节点处关口无功功率上下限值，$P_{i,t}^{\mathrm{TR}}$、$Q_{i,t}^{\mathrm{TR}}$ 分别为配电网 i 节点处关口在 t 时段的有功功率、无功功率。

7）AC/DC 混合配电网潮流模型

交直流换流站模型示意图如图 4 所示。

图 4 中，在节点 i 和节点 k 之间安装一个换流站 j，$P_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}$、$Q_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}$ 分别为换流站交流侧的有功功率和无功功率；$U_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}$、$I_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}$ 分别为换流站交流测的电压幅值和电流幅值；Z^{AC} 为换流站交流侧的阻抗；$P_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}}$ 为换流站直流侧的有功功率；$U_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}}$、$I_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}}$ 分别为换流站直流侧的电压幅值和电流；R^{DC} 为换流站直流侧的电阻。

交直流换流站的稳态数学模型可以用以下方程表示：

（1）换流站交流侧与直流侧电压关系为：

$$U_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}=K^{\mathrm{Conv}}M_jU_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}} \tag{29}$$

$$U_{\mathrm{base}}^{\mathrm{ref,AC}}=K^{\mathrm{Conv}}U_{\mathrm{base}}^{\mathrm{ref,DC}} \tag{30}$$

$$U_{j,t,\mathrm{p.u}}^{\mathrm{ref,AC}}=M_jU_{j,t,\mathrm{p.u}}^{\mathrm{ref,DC}} \tag{31}$$

式中：$U_{\mathrm{base}}^{\mathrm{ref,AC}}$、$U_{\mathrm{base}}^{\mathrm{ref,DC}}$ 分别为变量站交流侧电压基准值和直流侧电压基准值；$U_{j,t,\mathrm{p.u}}^{\mathrm{ref,AC}}$、$U_{j,t,\mathrm{p.u}}^{\mathrm{ref,DC}}$ 分别为变量站交流侧电压标幺值和直流侧电压标幺值；M_j 为换流站 j 的调制比；K^{Conv} 为换流站变换系数，它的值取决于换流站的类型以及脉宽调制(pulse width modulation，PWM)策略的类型，通常取值为 $\sqrt{3}/2\sqrt{2}$。

（2）换流站交流侧与直流侧有功功率关系为：

$$P_{i,t}^{\mathrm{ref,AC}}\eta^{\mathrm{Conv}}=P_{i,t}^{\mathrm{ref,DC}} \tag{32}$$

式中：η^{Conv} 为变流器效率系数。

（3）换流站交流侧功率方程为：

$$Q_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}=P_{j,t}^{\mathrm{ref,AC}}\tan\theta_{\mathrm{c}} \tag{33}$$

式中：θ_{c} 为换流站交流侧功率因数角。

（4）换流站直流侧功率方程为：

$$P_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}}=U_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}}I_{j,t}^{\mathrm{ref,DC}} \tag{34}$$

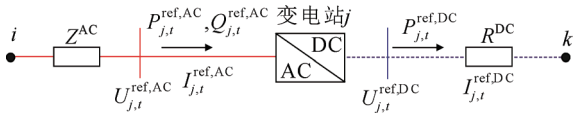


图 4　交/直流换电站模型示意图

Fig.4　Schematic diagram of AC/DC substation model

（5）交流支路二阶锥松弛潮流约束为：

$$\begin{cases}\sum\limits_{i\in u(j)}(P_{ij,t}^{\mathrm{AC}}-r_{ij}^{\mathrm{AC}}l_{ij,t}^{\mathrm{AC}})=\sum\limits_{k\in v(j)}P_{jk,t}^{\mathrm{AC}}+P_{j,t}^{\mathrm{AC}}\\ \sum\limits_{i\in u(j)}(Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}}-x_{ij}^{\mathrm{AC}}l_{ij,t}^{\mathrm{AC}})=\sum\limits_{k\in v(j)}Q_{jk,t}^{\mathrm{AC}}+Q_{j,t}^{\mathrm{AC}}\\ P_{j,t}^{\mathrm{AC}}=P_{j,t}^{\mathrm{PV}}+P_{j,t}^{\mathrm{dis}}-P_{j,t}^{\mathrm{ch}}-P_{j,t}^{\mathrm{cur}}\\ Q_{j,t}^{\mathrm{AC}}=Q_{j,t}^{\mathrm{PV}}+Q_{j,t}^{\mathrm{SVC}}+Q_{j,t}^{\mathrm{CB}}-Q_{j,t}^{\mathrm{d}}\\ V_{j,t}^{\mathrm{AC}}=V_{i,t}^{\mathrm{AC}}-2(r_{ij}^{\mathrm{AC}}P_{ij,t}^{\mathrm{AC}}+x_{ij}^{\mathrm{AC}}Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}})+((r_{ij}^{\mathrm{AC}})^2+(x_{ij}^{\mathrm{AC}})^2)l_{ij,t}^{\mathrm{AC}}\end{cases}\tag{35}$$

$$\left\|\begin{matrix}2P_{ij,t}^{\mathrm{AC}}\\ 2Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}}\\ l_{ij,t}^{\mathrm{AC}}-V_{i,t}^{\mathrm{AC}}\end{matrix}\right\|_2\le l_{ij,t}^{\mathrm{AC}}+V_{i,t}^{\mathrm{AC}}\tag{36}$$

式中：$u(j)$为配电网中交流支路以j为末端节点的支路的首端节点集合；$v(j)$为配电网中交流支路以j为首端节点的支路的末端节点集合；$P_{j,t}^{\mathrm{AC}}$、$Q_{j,t}^{\mathrm{AC}}$分别表示交流节点j在t时段的的注入有功功率、无功功率；$Q_{j,t}^{\mathrm{d}}$表示负荷节点j在t时段的无功功率需求。

（6）直流支路二阶锥松弛潮流约束为：

$$\begin{cases}\sum\limits_{i\in u(j)}(P_{ij,t}^{\mathrm{DC}}-r_{ij}^{\mathrm{DC}}l_{ij,t}^{\mathrm{DC}})=\sum\limits_{k\in v(j)}P_{jk,t}^{\mathrm{DC}}+P_{j,t}^{\mathrm{DC}}\\ P_{j,t}^{\mathrm{DC}}=P_{j,t}^{\mathrm{PV}}+P_{j,t}^{\mathrm{dis}}-P_{j,t}^{\mathrm{ch}}-P_{j,t}^{\mathrm{cur}}\\ V_{j,t}^{\mathrm{DC}}=V_{i,t}^{\mathrm{DC}}-2r_{ij}^{\mathrm{DC}}P_{ij,t}^{\mathrm{DC}}+(r_{ij}^{\mathrm{DC}})^2l_{ij,t}^{\mathrm{DC}}\end{cases}\tag{37}$$

$$\left\|\begin{matrix}2P_{ij,t}^{\mathrm{DC}}\\ l_{ij,t}^{\mathrm{DC}}-V_{i,t}^{\mathrm{DC}}\end{matrix}\right\|\le l_{ij,t}^{\mathrm{DC}}+V_{i,t}^{\mathrm{DC}}\tag{38}$$

式中：$U_{i,t}^{\mathrm{DC}}$为电压幅值，$V_{i,t}^{\mathrm{DC}}=(U_{i,t}^{\mathrm{DC}})^2$；$P_{ij,t}^{\mathrm{DC}}$、$Q_{ij,t}^{\mathrm{DC}}$分别为直流支路$(i,j)$在$t$时刻的有功功率和无功功率；$I_{ij,t}^{\mathrm{DC}}$为直流支路$(i,j)$在$t$时刻的电流，$l_{ij,t}^{\mathrm{DC}}=(I_{ij,t}^{\mathrm{DC}})^2$；$P_{j,t}^{\mathrm{DC}}$为节点$j$注入的有功功率；$P_{j,t}^{\mathrm{DC}}$分别表示直流节点$j$在$t$时段的注入有功功率；$r_{ij}^{\mathrm{DC}}$表示直流线路$(i,j)$的电阻。

8）节点电压和支路电流约束为：

$$\begin{cases}U_i^{\min}\le U_{i,t}\le U_i^{\max}\\ I_{ij,t}\le I_{ij}^{\max}\end{cases}\tag{39}$$

式中：$U_i^{\min}$、$U_i^{\max}$分别为节点j处的电压幅值上下限值；$I_{ij}^{\max}$为线路(i,j)电流幅值上限值。$U_{i,t}=\{U_{i,t}^{\mathrm{AC}},U_{i,t}^{\mathrm{DC}}\}$，$I_{ij,t}=\{I_{ij,t}^{\mathrm{AC}},I_{ij,t}^{\mathrm{DC}}\}$。

9）热稳定约束为：

$$P_{ij,t}\le 0.9P_{ij,t}^{\max}\tag{40}$$

式中：$P_{ij,t}^{\max}$为线路(i,j)的有功功率的最大值。$P_{ij,t}=\{P_{ij,t}^{\mathrm{AC}},P_{ij,t}^{\mathrm{DC}}\}$。

因此，确定性的交直流混合配电网承载能力评估模型以式(10)为优化目标，式(11)—(40)为约束条件，这是1个典型的混合整数二阶锥规划模型。由于需要分布式光伏出力的不确定性，因此，需要在确定性的交直流混合配电网承载能力评估模型的基础上，建立交直流混合配电网承载能力鲁棒评估模型。

3 AC/DC混合配电网承载能力鲁棒评估方法

3.1 两阶段鲁棒评估模型

为了保证交直流混合配电网在分布式光伏出力时空相关性下的鲁棒性，最大化接纳分布式光伏容量，本节建立交直流混合配电网分布式光伏承载力两阶段鲁棒评估模型。第一阶优化慢变化的离散变量$\boldsymbol{x}$，第二阶段优化快变化的连续变量$\boldsymbol{y}$，建立如式(41)—(45)所示的紧凑形式的两阶段鲁棒评估模型：

$$\min_{\boldsymbol{x}}\max_{\boldsymbol{u}\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{II}}}\min_{\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{Y}}\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\tag{41}$$

$$s.t.\ \ \boldsymbol{Ax}\ge\boldsymbol{b}\tag{42}$$

$$\boldsymbol{Y}=\left\{\boldsymbol{y}\middle|\begin{matrix}\boldsymbol{Cy}\le\boldsymbol{f},\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{y}+\boldsymbol{q}_i\|_2\le\boldsymbol{c}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+\boldsymbol{d}_i,i=1,\dots,n\\ \boldsymbol{Dy}=\boldsymbol{g}-\boldsymbol{Gx},\ \ \boldsymbol{Ey}=\boldsymbol{u}\end{matrix}\right\}\tag{43}$$

$$\boldsymbol{x}=[u_{i,t}^{\mathrm{ch}},u_{i,t}^{\mathrm{dis}},N_{i,t}^{\mathrm{CB}},N_{ij,t}]\tag{44}$$

$$\boldsymbol{y}=\begin{bmatrix}S_i^{\mathrm{PV}},P_{i,t}^{\mathrm{PV}},Q_{i,t}^{\mathrm{PV}},P_{i,t}^{\mathrm{ch}},P_{i,t}^{\mathrm{dis}},S_{i,t}^{OC},P_{i,t}^{\mathrm{TR}},Q_{i,t}^{\mathrm{TR}},Q_{i,t}^{\mathrm{SVC}}\\ P_{ij,t}^{\mathrm{AC}},Q_{ij,t}^{\mathrm{AC}},l_{ij,t}^{\mathrm{AC}},V_{i,t}^{\mathrm{AC}},P_{ij,t}^{\mathrm{DC}},l_{ij,t}^{\mathrm{DC}},V_{i,t}^{\mathrm{DC}},P_{i,t}^{\mathrm{cur}}\end{bmatrix}\tag{45}$$

式中：$\boldsymbol{a}$为目标函数式(10)中的常系数向量，$\boldsymbol{b}$、$\boldsymbol{f}$、$\boldsymbol{q}_i$、$\boldsymbol{c}_i$、$\boldsymbol{d}_i$、$\boldsymbol{g}$为对应约束的常系数向量，$\boldsymbol{u}$为分布式光伏出力向量；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{Q}_i$、$\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{G}$、$\boldsymbol{E}$为对应约束的常系数矩阵；n为二阶锥约束的维数。注意，这里为了便于理解，将式(10)中的最大化问题转化为负的最小化问题处理。

3.2 CCG(column-and-constraint generation)求解方法

两阶段鲁棒评估模型可采用CCG算法[21-22]迭代求解。CCG算法将minmaxmin原问题分解为主问题MP和子问题SP迭代求解，主问题在每次迭代过程中设置一个特定场景产生连续型决策变量的约束条件，并为两阶段鲁棒优化模型提供下界。子问题则是寻求最坏场景来确定第一阶段决策变量并为两阶段鲁棒评估模型提供上界。

在CCG算法次迭代中，主问题MP的目标函数和约束条件分别如式(46)—(49)所示：

$$\min_{\boldsymbol{x},\eta,\boldsymbol{y}^j}\ \eta\tag{46}$$

$$\text{s.t.}\ \ \boldsymbol{Ax}\ge\boldsymbol{b}\tag{47}$$

$$\boldsymbol{Y}=\left\{\boldsymbol{y}\left|\begin{array}{l}\boldsymbol{C}\boldsymbol{y}^{l}\le\boldsymbol{f},\left\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{y}^{l}+\boldsymbol{q}_i\right\|_2\le\boldsymbol{c}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^{l}+\boldsymbol{d}_i,i=1,\cdots,n\\ \boldsymbol{D}\boldsymbol{y}^{l}=\boldsymbol{g}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{E}\boldsymbol{y}^{l}=\boldsymbol{u}^{*}\end{array}\right.\right\} \tag{48}$$

$$\eta\ge\boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}^{l} \tag{49}$$

式中：l 为迭代次数，η 为中间变量，$\boldsymbol{u}^{*}$ 为最恶劣场景下的不确定性变量值。求解主问题得到两阶段鲁棒评估模型的解$(\boldsymbol{x}^{*},\eta^{*},\boldsymbol{y}^{l*})$，下界 $L_{\mathrm{B}}=\eta^{*}$。

在第一阶段获取 $\boldsymbol{x}^{*}$ 后，子问题 SP 变为

$$\max_{\boldsymbol{u}\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{II}}}\ \min_{\boldsymbol{y}\in\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{y},\boldsymbol{u})}\ \boldsymbol{a}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y} \tag{50}$$

$$\text{s.t.}\ \ \boldsymbol{C}\boldsymbol{y}\le\boldsymbol{f} \tag{51}$$

$$\boldsymbol{D}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{g}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}^{*} \tag{52}$$

$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{y}=\boldsymbol{u} \tag{53}$$

$$\left\|\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{y}+\boldsymbol{q}_i\right\|_2\le\boldsymbol{c}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+d_i,i=1,\cdots,n \tag{54}$$

进一步通过强对偶变化，将式(50)中的内层的 min 变为 max，与外层的 max 合并，得到：

$$\max_{\substack{\boldsymbol{\pi}_1,\boldsymbol{\pi}_2,\boldsymbol{\pi}_3,\boldsymbol{u},\\ \lambda_1,\ldots,\lambda_n,\boldsymbol{\omega}_1,\ldots,\boldsymbol{\omega}_n}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_1+\left(\boldsymbol{g}-\boldsymbol{G}\boldsymbol{x}^{*}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_2+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_3\\ -\sum_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{q}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_i+d_i\lambda_i\right)\end{bmatrix} \tag{55}$$

$$s.t.\ \ \boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_1+\boldsymbol{D}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_2+\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\pi}_3-\sum_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{Q}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\omega}_i+\boldsymbol{c}_i\lambda_i\right)=\boldsymbol{a} \tag{56}$$

$$\left\|\boldsymbol{\omega}_i\right\|_2\le\lambda_i,i=1,\ldots,n \tag{57}$$

$$\boldsymbol{\pi}_1\le\boldsymbol{0},\ \ \boldsymbol{u}\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{II}} \tag{58}$$

式(55)—(58)中：$\boldsymbol{\pi}_1$、$\boldsymbol{\pi}_2$、$\boldsymbol{\pi}_3$、$\boldsymbol{\omega}_i$、λ_i为对偶变量。求解子问题得到最优解 U_{B}，如果 U_{B}−L_{B} 满足收敛条件，则停止迭代，否则产生 $\boldsymbol{y}^{l+1}$ 变量到约束(48)—(49)中添加到主问题 MP，继续迭代，直至满足迭代收敛条件。

具体算法流程如附图 A 所示。

4　仿真分析

4.1　算例系统设置

为了验证本文所提出的交直流混合配电网分布式光伏承载能力评估方法的有效性，本节通过将两个 IEEE-33 节点的系统经过 AC/DC 换流器、直流线路互联起来，得到改进的 70 节点系统进行算例分析。改进的 70 节点系统的接线示意图如图 5 所示，BESS 的容量为 1.0 MW，系统的基准电压为 12.66 kV，基准容量为 10 MVA。关口有功的功率范围为 0~2000 kW，无功功率范围为 0~2000 kvar，支路电流幅值上限为 500 A，节点电压允许偏差为标称电压的±7%。其余参数均与 IEEE-33 节点系统参数相同[23]。图 6 给出了负荷以及分布式光伏的期望曲线，并假设 2 个分布式光伏的出力相同，同时只对居民区和商业区的负荷进行需求侧响应。根据某市现行峰谷电价策略，设定用电峰时段 T_{peak} 为 08:00—22:00，谷时段 T_{valley} 为 22:00—次日 08:00。此时模型优化出的峰时电价和谷时电价分别为 0.5711 元/kWh 和 0.2828 元/kWh。

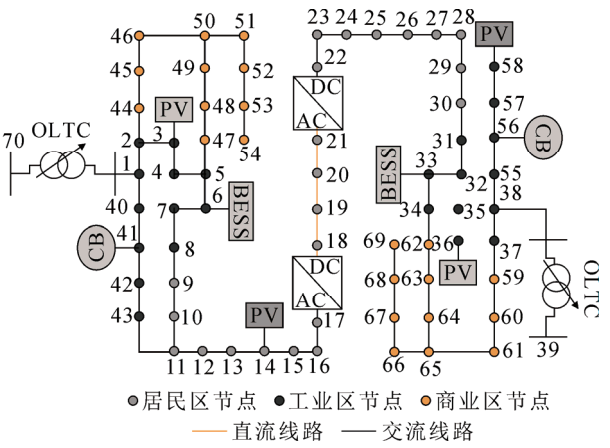


图 5　改进的 70 节点测试系统

Fig.5　Modified 70 bus test system

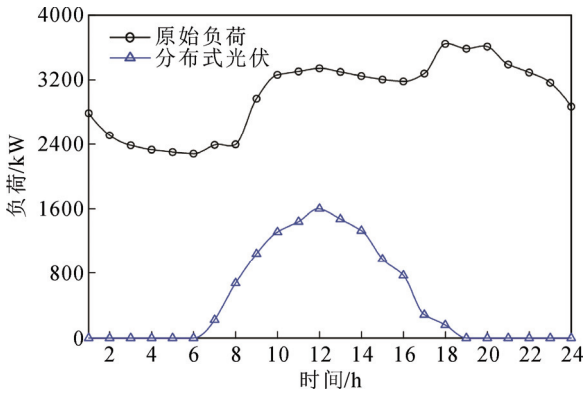


图 6　负荷和分布式光伏曲线

Fig.6　Curve of load and distributed PV

4.2　不同调节策略的承载能力比较

为了分析本文所提出交直流混合配电网分布式光伏承载能力鲁棒评估方法的有效性，通过设置 4 种不同的调节策略，即为

策略 1：考虑 OLTC 的调节作用。

策略 2：考虑 OLTC、SVC 和 CB 等无功补偿的调节作用。

策略 3：考虑 OLTC、SVC 和 CB 等无功补偿和电池储能的调节作用。

策略 4：考虑 OLTC、SVC 和 CB 等无功补偿、电池储能和电价激励型需求侧响应的调节作用。

4 种调节策略的交直流混合配电网分布式光伏承载能力结果如表 1—2 所示。从表 1—2 中不难看

出，无论是考虑分布式光伏的时空相关性还是不考虑，采用策略 4 的分布式光伏承载能力>策略 3>策略 2>策略 1，因此，采用策略 4 的交直流配电网分布式光伏承载能力最好，这反映了不同调节策略组合有助于提升交直流配电网分布式光伏承载能力，此外，不同调节策略对提升交直流配电网分布式光伏承载能力也存在差异性。另外，随着不确定性预算 Γ 的增大，4 种调节策略的交直流混合配电网分布式光伏承载能力下降，这是因为随着不确定性预算的增大，分布式光伏的出力波动区间增大，而为了减小波动区间增大对整个交直流配电网安全约束越限的影响，分布式光伏的并网容量会减小，这也体现鲁棒优化的保守性。

对比表 1 和表 2 可以看出，考虑分布式光伏的时空相关性后，交直流配电网的分布式光伏承载能力减小，对比考虑分布式光伏时空相关性的模型(2)与不考虑分布式光伏时空相关性的模型(1)，模型(2)比模型(1)增加了线性约束，缩小了分布式光伏出力的分布范围，因此，在寻求最恶劣场景下的鲁棒解时会更加保守，得到的交直流混合配电网的分布式光伏承载能力会更小。

进一步，附图 B1—B4 给出了考虑时空相关性的 4 种调节策略下电池储能充放电过程、节点电压分布、负荷需求侧响应结果。对比 4 种策略的电池储能充放电过程可以看出：策略 4 在考虑电池储能和需求侧响应后，策略 4 的充放电过程与策略 1、策略 2、策略 3 相比较为频繁，充放电深度较大，这是为了平抑分布式光伏出力的波动性而频繁进行充放电过程，从而有助于提升交直流混合配电网的分布式光伏承载能力。对比 4 种策略的电压幅值分布的热力学图可以看出：4 种策略的节点电压分布均在设置的 0.95~1.05 p.u.安全范围内，直流节点 18—21 的节点电压幅值偏大，较为接近 1.05 p.u.；而剩余的交流节点的节点电压幅值在 1.0 p.u.左右波动。对比 4 种策略的实施需求侧响应前后的负荷曲线可以看出，由于 2 个分布式光伏均加在工业区，而工业区并不进行需求侧响应，因此 4 种策略在分布式光伏出力时段增加的负荷需求并不明显，但是从结果而言，策略 4 的光伏消纳能力要大于策略 3，大于策略 2，明显大于策略 1。

4.3 不同接入节点数的承载能力比较

本节设置节点 3、14、36、54、58 和 69 共 6 个分布式光伏待选接入点。表 3 给出了不同接入节点数下交直流混合配电网的分布式光伏承载能力结果。从表 3 中不难看出，在固定 6 个候选节点的前提下，采用 4 种策略的分布式光伏承载能力随着接入节点数的增加而逐渐增加，但接入点达到 5 之后会趋近于饱和，分布式光伏承载能力不会继续增加。这是由于分布式光伏承载能力是受多个因素作用，接入点不同会改变整个交直流混合配电网的潮流分

表 1 不同调节策略的 AC/DC 混合配电网分布式光伏承载能力(不考虑相关性)

Table 1 Results of distributed PV hosting capacity of AC/DC hybrid distribution network of different regulation strategies (without considering correlation)

不确定性预算 Γ	光伏承载能力/MW			
	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
1	4.592	4.952	5.223	6.257
2	3.608	4.331	4.965	5.201
3	2.952	3.860	4.428	5.183
4	2.522	3.252	3.805	4.021
5	2.403	2.425	2.692	2.887

表 2 不同调节策略的 AC/DC 混合配电网分布式光伏承载能力(考虑相关性)

Table 2 Results of distributed photovoltaic hosting capacity of AC/DC hybrid distribution network of different regulation strategies (considering correlation)

不确定性预算 Γ	光伏承载能力/MW			
	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
1	4.483	4.523	4.845	5.526
2	3.418	4.015	4.403	4.852
3	2.724	3.465	3.828	4.343
4	2.125	2.854	3.316	3.928
5	2.014	2.204	2.434	2.735

表 3 不同接入节点数的 AC/DC 混合配电网分布式光伏承载能力结果

Table 3 Results of distributed PV hosting capacity of AC/DC hybrid distribution network with different number of access nodes

接入节点数	光伏承载能力/MW			
	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
1	0.941	1.116	1.235	1.443
2	1.687	1.793	1.868	2.133
3	2.132	2.481	2.832	3.250
4	2.945	3.574	3.978	4.436
5	3.878	4.140	4.607	4.860
6	3.902	4.195	4.616	4.894

布，但接入节点数达到一定数量后，各支路、各节点安全约束已达上限，无法继续承载过多的潮流流动。

4.4　不同参数设置的承载能力比较

约束条件的参数设置会影响交直流混合配电网的分布式光伏承载能力，本节进一步比较了支路电流上限、节点电压上限和电池储能容量等 3 个参数对结果的影响。图 7 展示了 3 个参数增大趋势下的交直流混合配电网分布式光伏承载能力。分布式光伏出力会使得部分支路流过的功率增大，从而导致支路电流增大，部分节点电压越限；电池储能容量决定了储能调节的能力，因此交直流混合配电网对分布式光伏的承载能力与支路电流上限、节点电压上限、电池储能容量均有关，如图 7(a)—(c)所示。在一定范围内，交直流混合配电网的分布式光伏承载能力随着支路电流上限、节点电压上限与电池储能容量 3 个参数增大而增大，但在支路电流上限、节点电压上限、电池储能容量分别为 0.8 p.u.、1.4 p.u. 和 2.4 MW 后不再进一步提升，达到饱和状态。

5　结论

针对分布式光伏出力的时空分布特征，本文建立了考虑时空相关性的多面体模型，提出了基于两阶段鲁棒优化的交直流混合配电网分布光伏承载能力评估方法，在 70 节点系统算例的测试结果表明：

1）不同调节策略组合有助于提升交直流混合配电网的分布式光伏承载能力；不确定性预算越大，鲁棒优化解越保守，交直流混合配电网的分布式光伏承载能力越小。

2）在固定候选节点的前提下，交直流混合配电网的分布式光伏承载能力随着接入节点数的增加而逐渐增加，但接入点达到一定数量之后会趋于饱和，承载能力不会继续增加。

3）在一定范围内，交直流混合配电网的分布式光伏承载能力随着支路电流上限、节点电压上限与电池储能容量 3 个参数的增大而增大，但在支路电流上限、节点电压上限、电池储能容量达到一定值后趋于饱和。

储能作为交直流混合配电网的灵活性资源，其接入方式、调度模式等都直接影响分布式光伏承载力，储能剩余容量和自身损耗如果不能进行合理的规划和控制，不能完全发挥储能对交直流混合配电网分布式光伏承载能力的支撑作用，这也是本研究下一步值得探讨的方向。

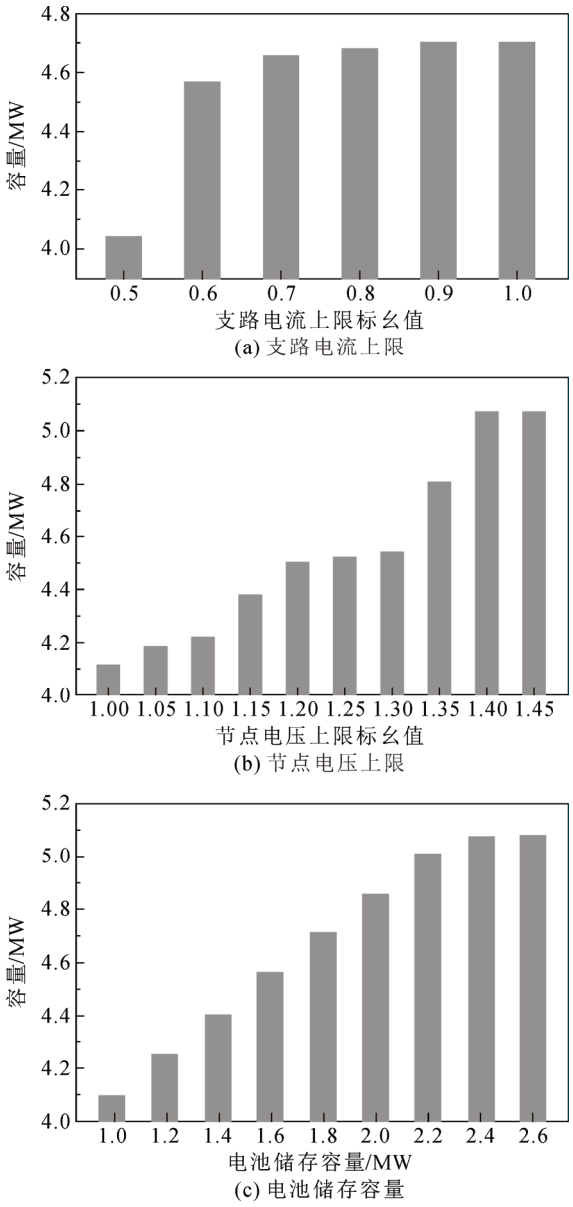


图 7　不同参数设置的交直流混合配电网分布式光伏承载能力比较

Fig. 7　Comparison of distributed PV hosting capacity of AC/DC hybrid distribution network under different parameter settings

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 张　稳，盛万兴，刘科研，等. 高渗透率分布式电源按节点关键性接入配电网的运行风险评估[J]. 高电压技术，2021，47(3)：937-945.
ZHANG Wen, SHENG Wanxing, LIU Keyan, et al. Operation risk assessment of high penetration distributed generation connected to distribution network according to node criticality[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 937-945.

[2] 董旭柱，华祝虎，尚　磊，等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological Characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High

Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
[3] 高 松，黄 河，李 妍，等. 适应随机序贯决策的分布式储能优化规划方法[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4385-4392.
GAO Song, HUANG He, LI Yan, et al. Optimization programming method for distributed energy storage suitable for stochastic sequential decision-making[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4385-4392.
[4] WANG S X, CHEN S J, GE L J, 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.
[5] 张雯雯，魏震波，郭 毅，等. 含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J]. 高电压技术，2022，48(2)：565-574.
ZHANG Wenwen, WEI Zhenbo, GUO Yi, et al. Optimal daily economic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 565-574.
[6] 国家能源局. 分布式电源接入电网承载力评估导则：DL/T 2041—2019[S]. 北京：中国电力出版社，2019.
National Energy Administration. Technical guideline for evaluating power grid hosting capacity of distributed resources connected to network: DL/T 2041—2019[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2019.
[7] 王江海，邰能灵，宋 凯，等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报，2010，30(22)：37-43.
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
[8] 高 菲，宋晓辉，李建芳，等. 谐波约束下的配电网接纳分布式电源能力分析[J]. 电力自动化设备，2018，38(10)：13-18.
GAO Fei, SONG Xiaohui, LI Jianfang, et al. DG integration capability of distribution network considering harmonic constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 13-18.
[9] 梁志峰，夏俊荣，孙檬檬，等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. 电网技术，2020，44(7)：2430-2438.
LIANG Zhifeng, XIA Junrong, SUN Mengmeng, et al. Data driven assessment of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2430-2438.
[10] 刘志文，董旭柱，黄 豫，等. 考虑多种约束的分布式电源最大渗透率计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(6)：85-92.
LIU Zhiwen, DONG Xuzhu, HUANG Yu, et al. Calculation method for maximum penetration of distributed generations considering multiple constraints[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 85-92.
[11] 吴素农，于金镒，杨为群，等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术，2018，42(11)：3691-3697.
WU Sunong, YU Jinyi, YANG Weiqun, et al. Chance constrained DG capacity assessment model and transforming method for distribution networks[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3691-3697.
[12] 刘科研，刘永梅，盛万兴，等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备，2016，36(6)：81-87.
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
[13] 孙玲玲，赵美超，王 宁，等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报，2018，33(7)：1560-1569.
SUN Lingling, ZHAO Meichao, WANG Ning, et al. Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1560-1569.
[14] 于腾凯，董靓媛，杜晓东，等. 考虑机会约束的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(10)：43-50.
YU Tengkai, DONG Liangyuan, DU Xiaodong, et al. Distributionally robust optimization method of PV grid-connected capacity in a distribution network considering chance constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 43-50.
[15] 谭 笑，王主丁，李 强，等. 计及多约束的多分布式电源接入配电网最大承载力分段算法[J]. 电力系统自动化，2020，44(4)：72-80.
TAN Xiao, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Segmentation algorithm for maximum hosting capacity of distributed generator accessing to distribution network considering multiple constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 72-80.
[16] 何晓洋，刘 淼，李 健，等. 基于需求侧响应的区域综合能源系统的低碳经济调度[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1140-1149.
HE Xiaoyang, LIU Miao, LI Jian, et al. Low-carbon economic dispatch of regional integrated energy system based on demand side response[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1140-1149.
[17] 夏泠风，黎嘉明，赵 亮，等. 考虑光伏电站时空相关性的光伏出力序列生成方法[J]. 中国电机工程学报，2017，37(7)：1982-1992.
XIA Lingfeng, LI Jiaming, ZHAO Liang, et al. A PV power time series generating method considering temporal and spatial correlation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1982-1992.
[18] 方一晨，张沈习，程浩忠，等. 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[J]. 电力系统自动化，2021，45(7)：8-17.
FANG Yichen, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Robust optimization of distributed photovoltaic hosting capacity of active distribution network with soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 8-17.
[19] 卢志刚，刘钰杰，董文恺，等. 基于电-碳耦合运行的碳中和区光储联合转型规划[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1350-1361.
LU Zhigang, LIU Yujie, DONG Wenkai, et al. Joint transformation planning of photovoltaic and storage in carbon neutralization area based on electric-carbon coupling operation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1350-1361.
[20] 赵 毅. 计及时空相关性的主动配电网优化调度研究[D]. 南京：东南大学，2020.
ZHAO YI. Optimal scheduling of active distribution networks considering temporal and spatial correlation[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2020.
[21] ZENG B, ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-461.
[22] QIU H F, GU W, XU X C, et al. A historical-correlation-driven robust optimization approach for microgrid dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1135-1148.
[23] 章 博，刘晟源，林振智，等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化，2021，45(8)：86-94.
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.



杨志淳(通信作者)
1987—，男，博士，高工
主要研究方向为智能配电网、分布式电源、微电网及微电网群柔性互联、智慧物联、协调控制、故障防御、信息物理融合等技术
E-mail: yangzhichun3600@163.com

YANG Zhichun
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author

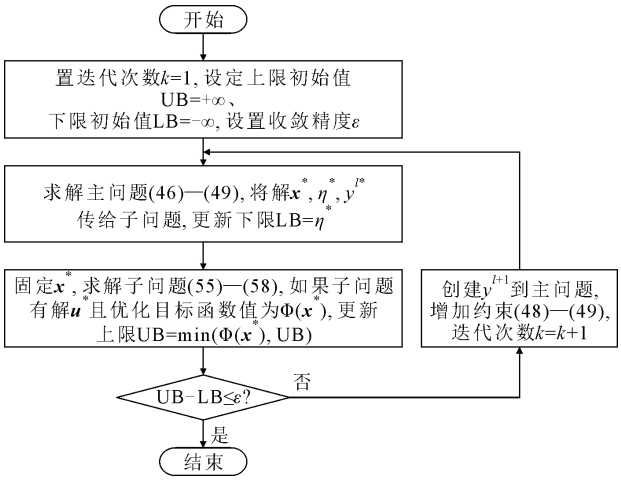


杨 帆
1982—，男，博士，教授级高工
主要研究方向为智能配电网保护控制、高电压技术、配电网状态管控等
E-mail: yangf_82@163.com

YANG Fan
Ph.D., Professor

收稿日期 2023-04-21 修回日期 2023-06-16 编辑 冉沐晨

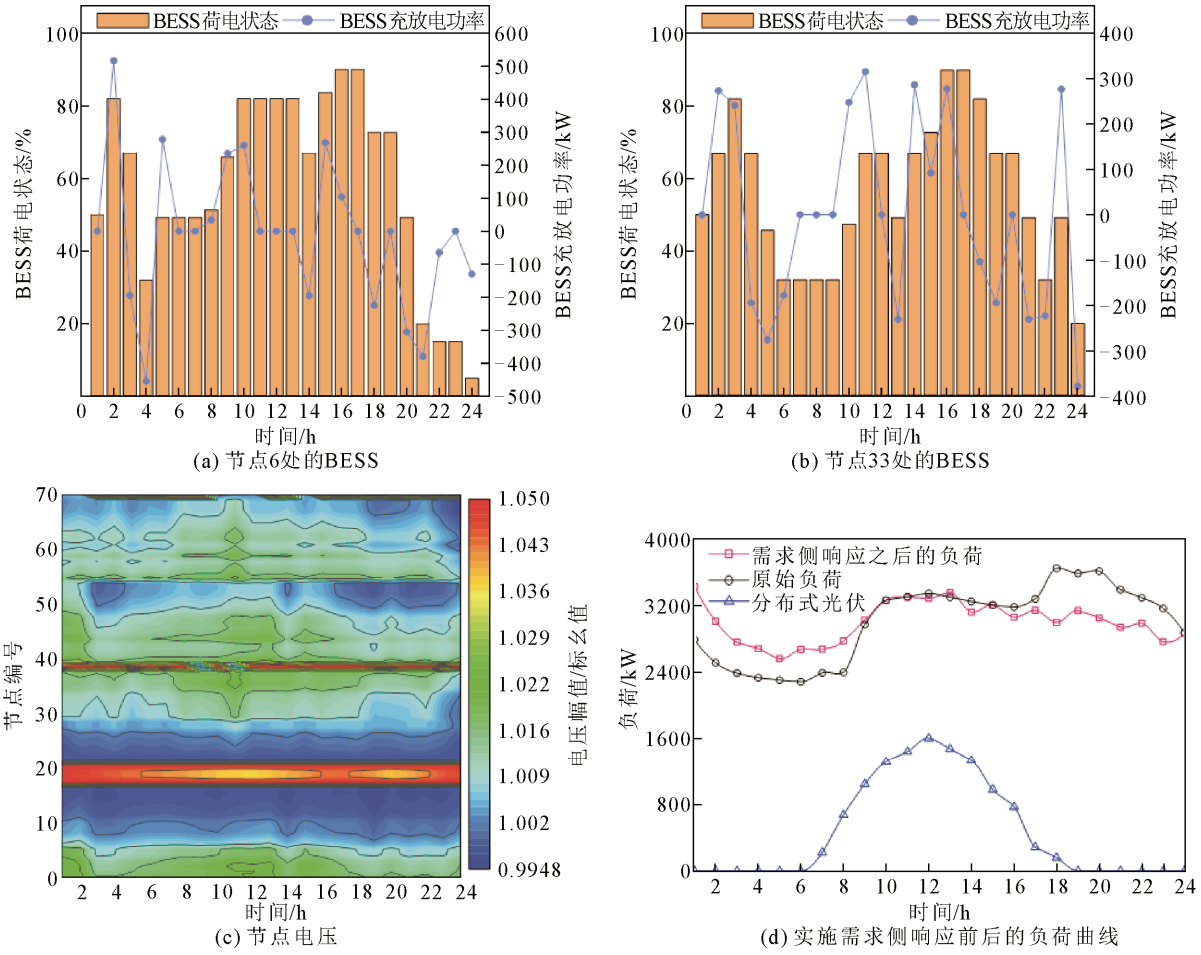
附录 A



附图 A　本文的算法流程图

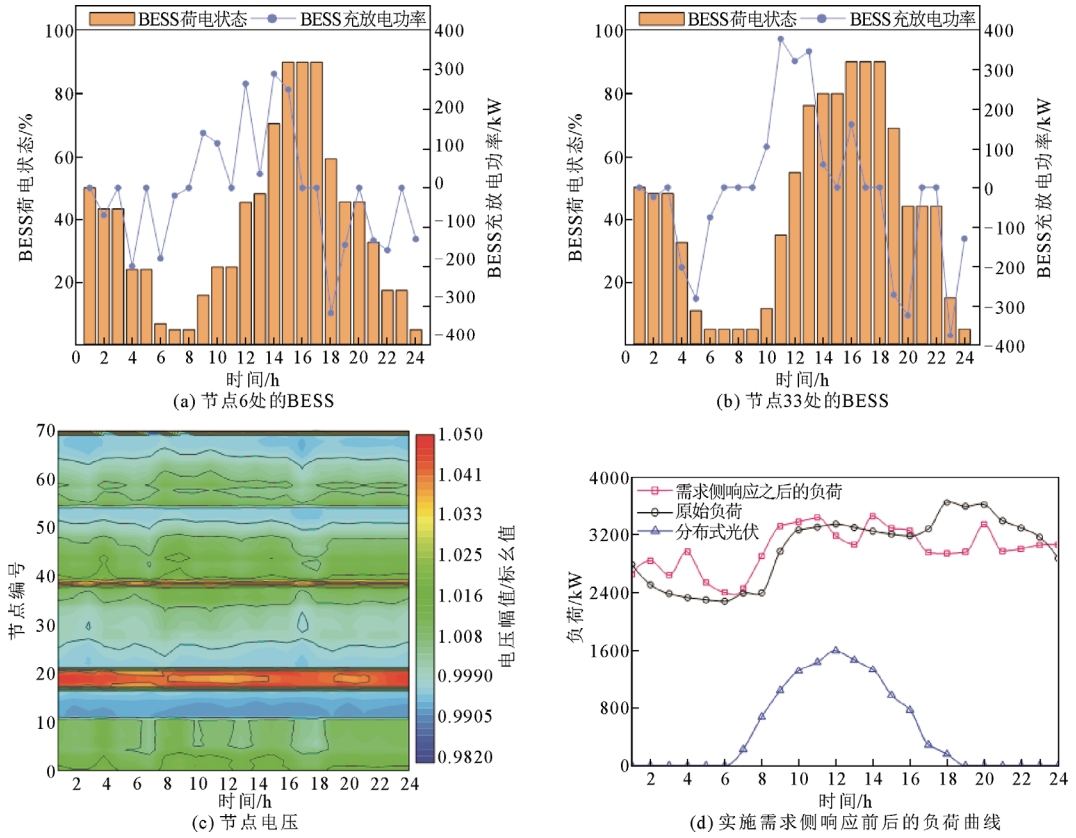
Fig.A　Flow chart of this proposed algorithm

附录 B



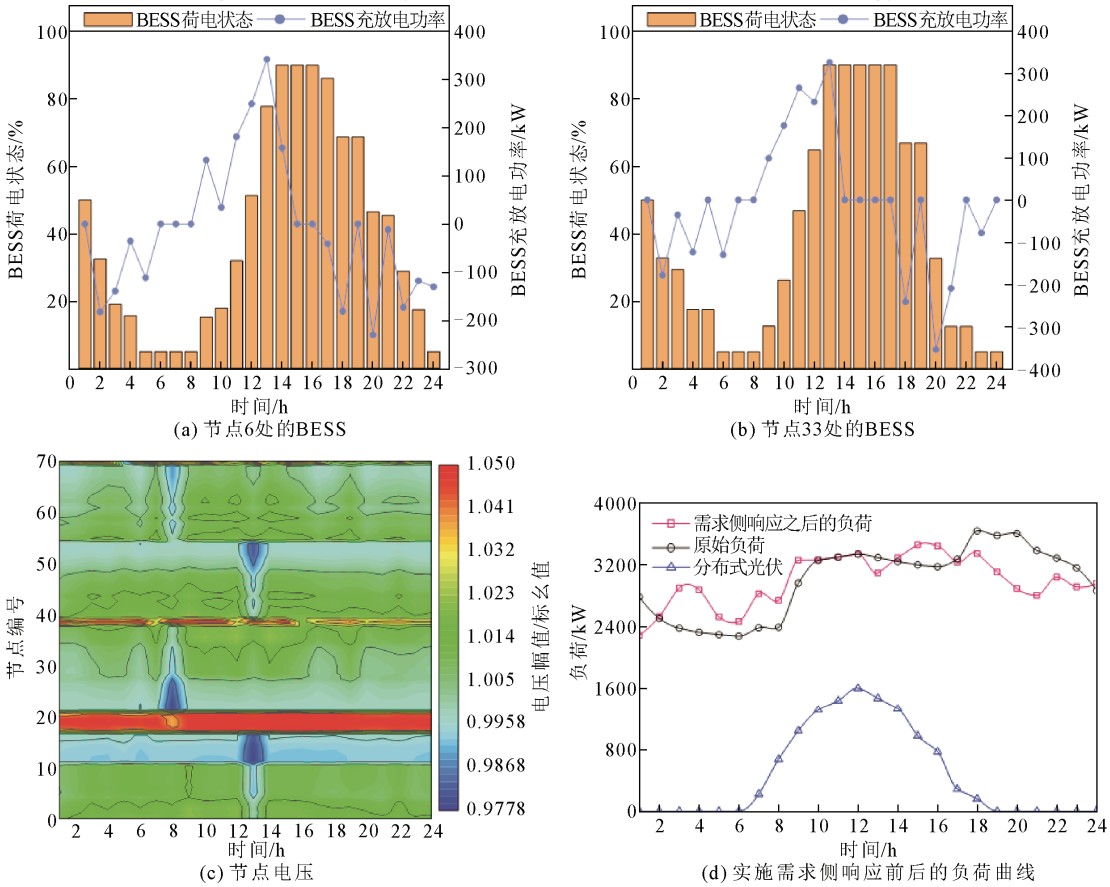
附图 B1　策略 1 的交直流混合配电网结果

Fig.B1　AC/DC hybrid distribution network results of strategy 1



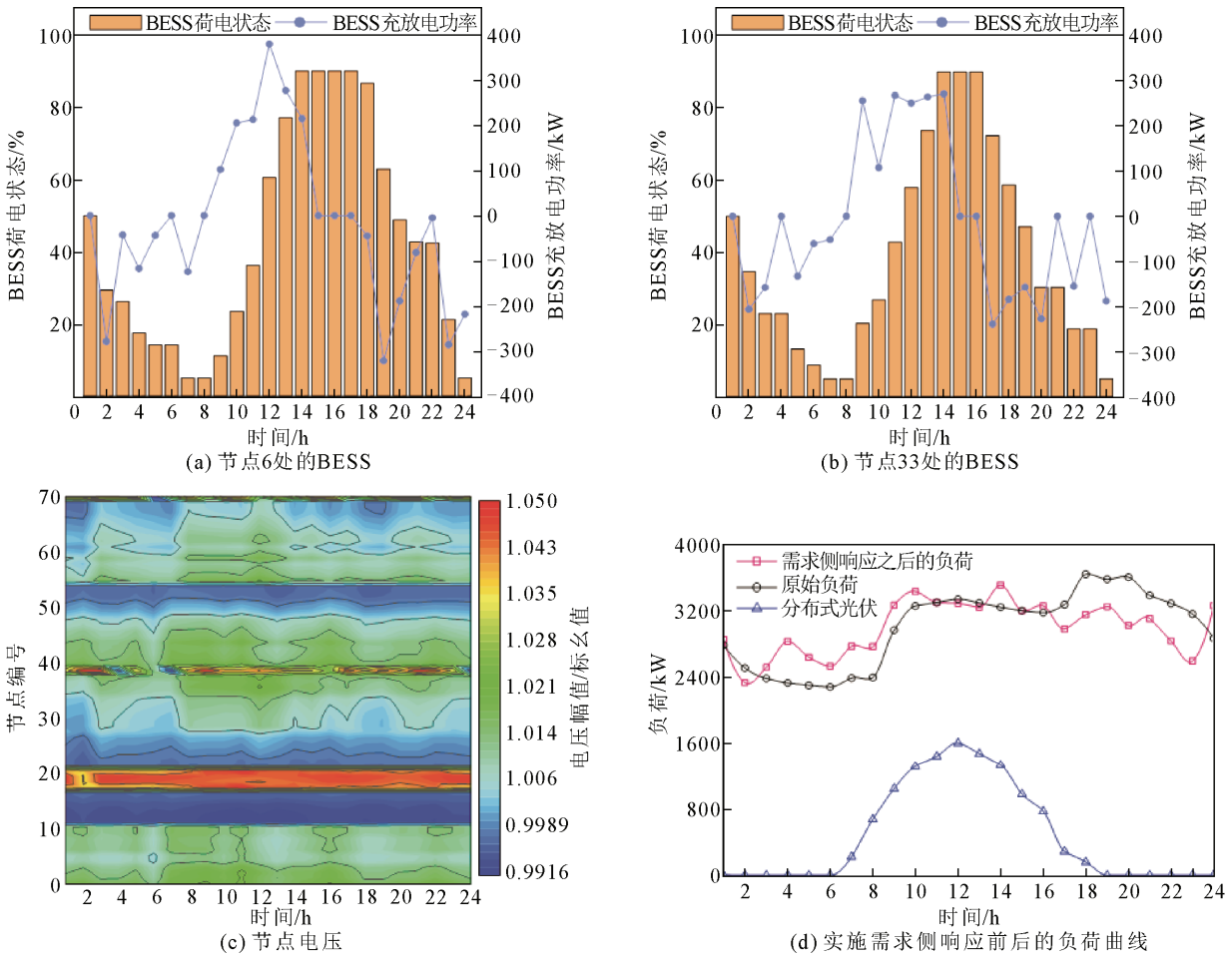
附图 B2　策略 2 的交直流混合配电网结果

Fig.B2　AC/DC hybrid distribution network results of strategy 2



附图 B3　策略 3 的交直流混合配电网结果

Fig.B3　AC/DC hybrid distribution network results of strategy 3



附图 B4　策略 4 的交直流混合配电网结果

Fig.B4　AC/DC hybrid distribution network results of strategy 4