

# 基于谈判博弈的含高渗透率光伏微网不确定优化运行

李 鹏<sup>1</sup>, 何 帅<sup>1</sup>, 陈安伟<sup>2</sup>, 李继红<sup>2</sup>, 殷云星<sup>1</sup>, 黄 敏<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省杭州市 310007)

**摘要:** 随着分布式光伏的发展,其在微网内的渗透率逐年提升,进而导致微网运行的不确定性和光伏消纳的难度日益增大。文中针对含高渗透率光伏的交直流混合微网内的不确定因素,建立了交直流混合微网不确定优化运行模型,其中目标函数采用期望值模型,以获得较高的长期收益,约束条件采用机会约束模型,保证约束成立的置信度。同时,针对微网运营商与用户自建光伏的博弈问题,采用谈判博弈模型以平衡双方利益诉求。根据上述方法提出基于谈判博弈的含高渗透率光伏微网不确定优化运行模型,并将其转化为单目标确定性可微非线性优化模型进行求解。最后,通过算例仿真计算验证该模型及求解方法的有效性和可行性。

**关键词:** 交直流混合微网; 高渗透率光伏; 谈判博弈; 不确定性; 优化运行

## 0 引言

分布式可再生能源具有环境友好、资源丰富、分布广泛等优点,成为近些年备受关注的发电方式<sup>[1-2]</sup>,但是大量的分布式可再生能源并网会对电网的安全稳定运行造成较大影响<sup>[3]</sup>,因此,文献[4]提出了微网技术。随着直流电源和负荷的增加,交直流混合微网可有效减少换流装置的使用,降低换流损耗,提高运行稳定性,日益成为微网领域的研究热点<sup>[5-6]</sup>。

微网的优化运行是微网领域的关键技术之一,目前对同时考虑微网优化运行中不确定性因素和博弈问题的文献还很少。

由于微网整合了大量的分布式能源,因此微网系统内存在较大的不确定因素<sup>[7]</sup>。随着可再生能源渗透率的日益增高,微网运行的不确定性也日益增大。微网中不确定性因素的主流建模方法包括期望值模型<sup>[8]</sup>、机会约束规划模型<sup>[9-11]</sup>、鲁棒优化模型<sup>[12]</sup>等,其中,期望值模型和机会约束规划模型一般采用确定性等价类转化方法<sup>[9]</sup>或随机(模糊)模拟技术<sup>[8,10]</sup>、序列运算<sup>[11]</sup>与优化算法相结合的混合算法进行求解,鲁棒优化模型一般采用不确定场景集<sup>[12]</sup>的方法进行求解。以上方法各有优缺点,期望值模型可以获得较高的长期收益,但是难以量化约束条

件成立的置信度,机会约束模型和鲁棒优化模型的优化运行结果置信度较高,但是过于保守,会导致微网运行成本上升,更适用于安全性、可靠性等目标函数。本文所建立的交直流混合微网不确定优化运行模型中,目标函数采用期望值模型,以获得较高的长期收益,约束条件采用机会约束模型,保证约束条件成立的置信度,并将该不确定性优化模型转化为确定性优化模型进行求解。

同时,随着智能电网的快速发展,现代电力系统在发电、配电、用电等多个环节的参与者呈多样化特征<sup>[13]</sup>。对于整合多种分布式能源、储能、负荷的交直流混合微网,其内部参与者众多,因此有必要考虑微网内部不同利益主体之间的合作竞争关系。博弈论作为一种先进的优化工具,主要用于研究多个利益相关主体如何进行优化决策的问题。文献[14]将微网与用户作为博弈双方,构建了微网为领导层,用户为从属层的 Stackelberg 博弈模型。文献[15]建立了微源和负荷之间的博弈模型,并通过算例证实了全联盟合作的效益最高。文献[16]构造了电动汽车集群的非合作充放电博弈模型。文献[17]提出了智能楼宇型微网中众多用户之间的少数者博弈模型。

可知,如何选择微网中的利益主体作为博弈的参与者应视具体情况而定。对于微网运营商与网内用户自建光伏的博弈问题,研究较少。根据国家现行政策,分布式光伏应予以全部消纳,但限于微网的消纳能力,这一目标可能暂时无法实现,且随着分布式光伏的普及,光伏的政策红利将逐步较少,回归竞

收稿日期: 2018-02-15; 修回日期: 2018-08-31。

上网日期: 2019-02-26。

国家自然科学基金资助项目(51577068); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA050104)。

价上网。因此,本文对于分布式光伏并不予以全部消纳的保证。由于微网运营商与自建光伏的决策变量均包括光伏功率,双方策略空间存在部分重合,则重合部分的策略空间应由双方谈判确定最终结果,一般博弈论模型中不同决策者的策略空间没有重合,无法解决该博弈问题,需采用谈判博弈模型才可进行求解。

综上所述,本文针对含高渗透率光伏的交直流混合微网不确定性与多利益主体共存的特点,提出基于谈判博弈的含高渗透率光伏交直流混合微网不确定优化运行方法,将目标函数中的不确定因素处理为期望值,以获得长期较高的经济收益,将约束条件中的不确定因素处理为机会约束,以保证约束成立的置信度,基于谈判博弈理论对微网运营商与用户自建光伏之间的博弈问题进行建模,平等考虑双方的利益,以实现调度策略的公平性和稳定性。

## 1 交直流混合微网优化运行模型

### 1.1 随机变量

#### 1.1.1 负荷不确定模型

考虑负荷预测时,负荷的真实值可用预测值和误差表示<sup>[18]</sup>,如下式所示:

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{load},f}(t) - P_{\text{load},f}(t)e_{\text{load}}(t) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{load}}(t)$ 为负荷的真实值; $P_{\text{load},f}(t)$ 为负荷的预测值; $e_{\text{load}}(t)$ 为负荷相对误差,服从正态分布  $N(0, \sigma_{\text{load}}^2)$ 。

#### 1.1.2 光伏不确定模型

考虑光伏预测时,光伏最大功率的真实值可用预测值和误差表示,如下式所示:

$$P_{\text{pv,max}}(t) = P_{\text{pv},f}(t) - P_{\text{pv},f}(t)e_{\text{pv}}(t) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{pv,max}}(t)$ 为光伏最大功率的真实值; $P_{\text{pv},f}(t)$ 为光伏最大功率的预测值; $e_{\text{pv}}(t)$ 为光伏相对误差,服从正态分布  $N(0, \sigma_{\text{pv}}^2)$ 。

### 1.2 目标函数

交直流混合微网的优化运行是一个多目标、多约束的非线性不确定优化问题,目标函数应根据优化目标进行选择。未采用博弈理论的优化模型通常将微网看做一个整体,无法体现微网中不同主体对其自身利益的诉求。现实中微网类型有很多,其内部的主体构成情况也不尽相同。本节讨论的交直流混合微网为单用户型微网,其中,微网网架结构拥有者与网内的微燃机、燃料电池、储能为同一主体,下文简称为 G1,用户与其自建光伏为同一主体,下文简称为 G2。

由于优化变量包含负荷、光伏功率等不确定变量,且 G1 的目标是自身成本最低,能够实现长期收

益最高的期望值模型较为合适,G1 的目标函数如下所示:

$$\min f_{G1} = E(C_{\text{mt}} + C_{\text{fc}} + C_{\text{es}} + C_{\text{grid}} - C_{\text{mu}}) \quad (3)$$

式中: $C_{\text{mt}}$ 为微燃机的运行成本; $C_{\text{fc}}$ 为燃料电池的运行成本; $C_{\text{es}}$ 为储能的运行成本; $C_{\text{grid}}$ 为微网向配电网的购电成本; $C_{\text{mu}}$ 为光伏用户与微网间的购售电成本。

同理,G2 的目标函数如下:

$$\min f_{G2} = E(C_{\text{mu}} + C_{\text{pv}}) \quad (4)$$

式中: $C_{\text{pv}}$ 为光伏的运行成本。

光伏用户与微网间购售电成本:

$$C_{\text{mu}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{mu}}(t)q_{\text{mu}}(t) - P_{\text{pm}}(t)q_{\text{pm}}(t))\Delta t \quad (5)$$

式中: $T$ 为一天划分的时段数; $\Delta t$ 为时间尺度; $P_{\text{mu}}(t)$ 为微网向用户输送的功率; $P_{\text{pm}}(t)$ 为光伏向微网输送的功率; $q_{\text{mu}}(t)$ 为微网向用户的售电电价; $q_{\text{pm}}(t)$ 为光伏向微网的售电电价。

微网向配电网的购电成本:

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t)q_{\text{grid}}(t)\Delta t \quad (6)$$

式中: $P_{\text{grid}}(t)$ 为时段  $t$  配电网与微网间联络线上的传输功率; $q_{\text{grid}}(t)$ 为时段  $t$  的配电网电价。

光伏运行成本:

$$C_{\text{pv}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{pv}}(t)(q_{\text{pv}} - q_{\text{pv,sub}})\Delta t \quad (7)$$

式中: $P_{\text{pv}}(t)$ 为光伏消纳功率; $q_{\text{pv}}$ 为光伏的综合度电成本; $q_{\text{pv,sub}}$ 为光伏补贴。

微燃机运行成本:

$$\begin{cases} C_{\text{mt}} = \sum_{t=1}^T \left[ \left( \frac{c_{\text{ng}}}{L_{\text{ng}}\eta_{\text{mt}}(t)} + M_{\text{mt}} \right) P_{\text{mt}}(t)\Delta t \right] + C_{\text{mt,de}} \\ C_{\text{mt,de}} = \frac{1}{365} C_{\text{mt,in}} \frac{r(1+r)^{Y_{\text{mt}}}}{(1+r)^{Y_{\text{mt}}} - 1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $c_{\text{ng}}$ 为燃料单价,单位是元/ $\text{m}^3$ ; $L_{\text{ng}}$ 为燃料的低热值,单位是( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )/ $\text{m}^3$ ; $P_{\text{mt}}(t)$ 为微燃机在时段  $t$  的功率; $M_{\text{mt}}$ 为微燃机的运行维护成本系数,单位是元/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ); $C_{\text{mt,de}}$ 为微燃机一天内的折旧费用; $C_{\text{mt,in}}$ 为微燃机的初始投资费用; $r$ 为年利率; $Y_{\text{mt}}$ 为微燃机的运行寿命; $\eta_{\text{mt}}(t)$ 为时段  $t$  的微燃机效率,表达式如式(9)所示<sup>[19]</sup>。

$$\eta_{\text{mt}}(t) = 0.0753 \left( \frac{P_{\text{mt}}(t)}{65} \right)^3 - 0.3095 \left( \frac{P_{\text{mt}}(t)}{65} \right)^2 + 0.4174 \frac{P_{\text{mt}}(t)}{65} + 0.1068 \quad (9)$$

燃料电池运行成本:

$$\begin{cases} C_{fc} = \sum_{t=1}^T \left[ \left( \frac{c_{ng}}{L_{ng} \eta_{fc}(t)} + M_{fc} \right) P_{fc}(t) \Delta t \right] + C_{fc,de} \\ C_{fc,de} = \frac{1}{365} C_{fc,in} \frac{r(1+r)^{Y_{fc}}}{(1+r)^{Y_{fc}} - 1} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $M_{fc}$  为燃料电池的运行维护成本系数,单位是元/(kW·h);  $P_{fc}(t)$  为燃料电池在时段  $t$  的功率;  $C_{fc,de}$  为燃料电池一天内的折旧费用;  $C_{fc,in}$  为燃料电池的初始投资费用;  $Y_{fc}$  为燃料电池的运行寿命;  $\eta_{fc}(t)$  为时段  $t$  的燃料电池效率,如式(11)所示<sup>[19]</sup>。

$$\eta_{fc}(t) = -0.0023P_{fc}(t) + 0.6735 \quad (11)$$

储能运行成本:

$$C_{es} = \sum_{t=1}^T (K_{es,in} + M_{es}) |P_{es}(t)| \Delta t \quad (12)$$

式中:  $K_{es,in}$  为储能初始投资成本折合后的系数;  $M_{es}$  为储能的运行维护成本系数;  $P_{es}(t)$  为储能功率。

初始投资成本需折算成一天内的成本,每天的成本与完全充放电次数有关。因此,  $K_{es,in}$  可用下式描述:

$$K_{es,in} = \frac{q_{es}}{2N_{cycle}} \quad (13)$$

式中:  $q_{es}$  为储能的综合度电投资成本,单位是元/(kW·h);  $N_{cycle}$  为储能寿命周期内的完全充放电次数上限。

由于考虑了 G1 与 G2 各自的利益,因此上述模型为一个多目标优化模型,与一般多目标优化模型不同的是该模型中的多个目标分属不同的利益主体,因此,在制定优化运行结果时应平等考虑双方的利益,保持调度的公平性。G1 与 G2 的决策变量均包括光伏功率,双方策略空间存在部分重合,则对于重合部分的策略空间应由双方谈判确定最终结果,即双方共同进行调度策略的制定,双方均以自身收益最大为目标,从而得到双方均做出一定让步的调度策略,且调度策略由双方共同操作执行,G2 对分布式光伏进行操作,G1 对其余的设备进行操作,因此,本文采用谈判博弈模型进行求解<sup>[20]</sup>,其具体表述如下。

$(f_{G1}(x), f_{G2}(x))$  为 G1 与 G2 的成本,  $x$  为双方采取的博弈策略。设  $x_1$  和  $x_2$  分别为  $\min f_{G1}$  和  $\min f_{G2}$  时的解,  $d_1 = f_{G1}(x_2)$ ,  $d_2 = f_{G2}(x_1)$ , 则  $d_1$  和  $d_2$  为双方最劣解下的成本。均衡解应使双方与自身最劣解距离最远,可用最大化效用函数来求解,其函数值称为谈判函数值,表达式如下:

$$\max_{x \in X} \{ (f_{G1}(x) - d_1)(f_{G2}(x) - d_2) \} \quad (14)$$

式中:  $X$  为双方收益的帕累托前沿。

### 1.3 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

可控微源和联络线功率应和光伏、负荷预测功率保持平衡<sup>[21]</sup>,即

$$P_{grid}(t) + P_{pv}(t) + P_{mt}(t) + P_{fc}(t) + P_{es}(t) = P_{load,i}(t) \quad (15)$$

#### 2) 联络线传输功率约束

$$P_{grid,min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid,max} \quad (16)$$

式中: 下标 max 和 min 分别表示上下限值,下同。

#### 3) 光伏出力约束

$$\Pr\{0 \leq P_{pv}(t) \leq \max\{P_{pv,max}(t), 0\}\} \geq \alpha \quad (17)$$

式中:  $\alpha$  为光伏出力约束成立的置信度。

光伏的最大功率为随机变量,因此光伏出力约束为含随机变量的约束,采用机会约束模型进行处理,以量化该约束条件成立的置信度。

#### 4) 可控微源出力约束

$$P_{fc,min} \leq P_{fc}(t) \leq P_{fc,max} \quad (18)$$

$$P_{mt,min} \leq P_{mt}(t) \leq P_{mt,max} \quad (19)$$

#### 5) 可控微源爬坡率约束

$$P_{mt,down} \leq P_{mt}(t) - P_{mt}(t-1) \leq P_{mt,up} \quad (20)$$

$$P_{mt,down} \leq P_{mt}(1) - P_{mt}(T) \leq P_{mt,up} \quad (21)$$

$$P_{fc,down} \leq P_{fc}(t) - P_{fc}(t-1) \leq P_{fc,up} \quad (22)$$

$$P_{fc,down} \leq P_{fc}(1) - P_{fc}(T) \leq P_{fc,up} \quad (23)$$

式中: 下标 up 和 down 分别表示向上和向下爬坡限值。

式(21)和式(23)为微燃机和燃料电池在今天末时段的功率与明天初时段的功率的爬坡率约束,以保持调度策略在相邻两天之间的连续性。

#### 6) 储能约束

$$P_{es,min}(t) \leq P_{es}(t) \leq P_{es,max}(t) \quad (24)$$

$$S(t) = S(t-1) - \frac{P_{es}(t) \Delta t}{Q_{es}} \quad (25)$$

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (26)$$

$$S(0) = S(T) \quad (27)$$

式中:  $P_{es}(t) > 0$  表示储能放电,  $P_{es}(t) < 0$  表示储能充电;  $S(t)$  为荷电状态;  $Q_{es}$  为储能容量;  $S(0)$  为第一个时段前的储能荷电状态;  $S(T)$  为一天最后一个时段末的储能荷电状态。

#### 7) 备用容量约束

考虑光伏、负荷的预测误差,会有一定的不平衡功率存在,因此,系统要保持一定的备用容量,即备用容量应大于不平衡功率,以保持系统稳定运行。

$$\Delta P = P_{load}(t) - P_{grid}(t) - P_{pv}(t) - P_{mt}(t) - P_{fc}(t) - P_{es}(t) = -P_{load,i}(t)e_{load}(t) \quad (28)$$

$$P_u = P_{\text{grid,max}} - P_{\text{grid}}(t) + \max\{P_{\text{mt,max}} - P_{\text{mt}}(t), P_{\text{mt,up}}\} + \max\{P_{\text{fc,max}} - P_{\text{fc}}(t), P_{\text{fc,up}}\} + \max\{P_{\text{es,max}} - P_{\text{es}}(t), Q_{\text{es}}(S(t) - S_{\text{min}})\} \quad (29)$$

$$P_d = P_{\text{grid,min}} - P_{\text{grid}}(t) + \min\{P_{\text{mt,min}} - P_{\text{mt}}(t), P_{\text{mt,down}}\} + \min\{P_{\text{fc,min}} - P_{\text{fc}}(t), P_{\text{fc,down}}\} + \min\{P_{\text{es,min}} - P_{\text{es}}(t), Q_{\text{es}}(S(t) - S_{\text{max}})\} \quad (30)$$

$$\Pr\{P_u \geq \Delta P\} \geq \beta \quad (31)$$

$$\Pr\{P_d \leq \Delta P\} \geq \beta \quad (32)$$

式中: $\Delta P$  为不平衡功率; $P_u$  为正备用容量; $P_d$  为负备用容量; $\beta$  为备用容量约束成立的置信度。

8) 用户与微网交互功率约束

$$P_{\text{mu}}(t) - P_{\text{pm}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) \quad (33)$$

$$P_{\text{mu}}(t) \geq 0 \quad (34)$$

$$P_{\text{pm}}(t) \geq 0 \quad (35)$$

$$P_{\text{mu}}(t)P_{\text{pm}}(t) = 0 \quad (36)$$

## 2 模型求解

由于考虑了光伏、负荷的随机性,因此,该模型为不确定优化模型,其中目标函数采取了期望值模型,以得到成本的最低期望值,实现长期经济效益最高,约束条件采取了机会约束模型,以提高约束满足的概率。

目标函数中,只有  $C_{\text{mu}}$  为随机变量,其期望值求解如下:

$$E(C_{\text{mu}}) = \sum_{t=1}^T E(P_{\text{mu}}(t)q_{\text{mu}}(t) - P_{\text{pm}}(t)q_{\text{pm}}(t))\Delta t \quad (37)$$

$$\begin{aligned} E(P_{\text{mu}}(t)q_{\text{mu}}(t) - P_{\text{pm}}(t)q_{\text{pm}}(t)) &= \\ E(P_{\text{mu}}(t)(q_{\text{mu}}(t) - q_{\text{pm}}(t))) &+ \\ E((P_{\text{mu}}(t) - P_{\text{pm}}(t))q_{\text{pm}}(t)) &= \\ E(P_{\text{mu}}(t)(q_{\text{mu}}(t) - q_{\text{pm}}(t))) &+ \\ E((P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t))q_{\text{pm}}(t)) &= \\ (q_{\text{mu}}(t) - q_{\text{pm}}(t))E(P_{\text{mu}}(t)) &+ \\ (P_{\text{load,f}}(t) - P_{\text{pv}}(t))q_{\text{pm}}(t) & \quad (38) \end{aligned}$$

因此,只需求出  $P_{\text{mu}}$  的期望值即可,由前文可知,负荷功率的真实值  $P_{\text{load}}(t)$  服从正态分布,光伏最大功率真实值  $P_{\text{pv,max}}(t)$  服从正态分布,而光伏消纳功率  $P_{\text{pv}}(t)$  为非随机变量,则

$$(P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t)) \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (39)$$

式中: $\mu = P_{\text{load,f}}(t) - P_{\text{pv}}(t)$ ;  $\sigma = P_{\text{load,f}}(t)\sigma_{\text{load}}$ 。

式(33)一式(36)与式(39)联立,可得:

$$\begin{cases} P_{\text{mu}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) \text{ 且 } P_{\text{pm}}(t) = 0 \\ P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) > 0 \\ P_{\text{mu}}(t) = 0 \text{ 且 } P_{\text{pm}}(t) = 0 \\ P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) = 0 \\ P_{\text{mu}}(t) = 0 \text{ 且 } P_{\text{pm}}(t) = P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{load}}(t) \\ P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) < 0 \end{cases} \quad (40)$$

因此,当  $P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) > 0$  时,  $P_{\text{mu}}(t) = P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t)$ , 则其概率密度函数的正半轴与  $P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t)$  概率密度函数的正半轴相同,当  $P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) \leq 0$  时,  $P_{\text{mu}}(t) = 0$ , 则  $P_{\text{pv}}(t) = 0$  的概率为  $P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t) \leq 0$  的概率,用  $k$  表示,则  $P_{\text{mu}}(t)$  概率密度函数的原点为冲激函数  $k\delta(t)$ , 负半轴为 0, 同理可得  $P_{\text{pm}}(t)$  概率密度函数的正半轴与  $P_{\text{load}}(t) - P_{\text{pv}}(t)$  概率密度函数的负半轴关于  $y$  轴对称, 负半轴为 0, 原点为冲激函数  $(1-k)\delta(t)$ , 其中:

$$k = \int_{-\infty}^0 \frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (41)$$

因此,  $P_{\text{mu}}$  的期望值为:

$$\begin{aligned} E(P_{\text{mu}}(t)) &= \int_0^{\infty} x f_{P_{\text{mu}}(t)}(x) dx = \\ \int_0^{\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx &= \\ \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-\mu^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{\mu}{2} + \frac{\mu}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2}\mu}{2\sigma}\right) & \quad (42) \end{aligned}$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\eta^2) d\eta \quad (43)$$

对于含随机变量的约束条件,可以转化为确定性的等价形式,式(17)、式(31)、式(32)可转化为如下形式:

$$P_{\text{pv}} \leq Z_{\xi,\gamma} \quad (44)$$

$$P_u \geq Z_{\Delta P,1-\gamma} \quad (45)$$

$$P_d \leq Z_{\Delta P,\gamma} \quad (46)$$

式中:  $Z_{\xi,\gamma}$  为随机变量  $\xi$  的上  $\gamma$  分位点,其中  $\xi = \max\{P_{\text{pv,max}}, 0\}$ 。  $\max\{P_{\text{pv,max}}, 0\}$  的概率密度与  $P_{\text{mu}}(t)$  相似,当上分位点落在正半轴时,  $\max\{P_{\text{pv,max}}, 0\}$  与  $P_{\text{pv,max}}(t)$  的分位点相同。

通过上述步骤,即可将不确定优化问题转化为确定性优化问题,从而降低求解难度。

前节建立模型时采用谈判博弈模型来平衡不同博弈主体的利益诉求,而谈判博弈模型首先需求解帕累托前沿,对于双目标优化问题  $\min\{f_{G1}, f_{G2}\}$  的帕累托前沿,可用如下方法进行求解<sup>[22]</sup>:

$$\min f_{\text{pl}} = \lambda f_{G1} + (1-\lambda) f_{G2} \quad (47)$$

式中,  $\lambda$  为取值在  $[0, 1]$  区间上的系数。

计以  $\lambda$  为参数的优化问题的最优解为  $x(\lambda)$ , 则  $\min\{f_{G1}, f_{G2}\}$  的帕累托前沿为:

$$X = \bigcup_{\lambda \in [0, 1]} x(\lambda) \quad (48)$$

该方法将帕累托前沿的求解转变为了普通的单目标优化问题, 降低了求解复杂度。通过上述两个步骤, 将不确定多目标优化模型转化为确定性单目标可微非线性优化模型, 之后可利用 Yalmip<sup>[23]</sup> 轻松地求解出帕累托前沿。最后, 采用遍历的方法即可从帕累托前沿中选出谈判值最高的优化运行策略。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例设置

本文算例参考了浙江省某地交直流混合微网示范工程的网架结构, 构建了交直流混合微网的简化模型, 如附录 A 图 A1 所示。

微燃机、燃料电池、储能、光伏的参数见附录 A 表 A1。表中, 光伏功率上限表示光伏装机的峰值功率。微燃机、燃料电池初始投资成本分别为 10 000, 13 000 元/(kW·h), 设备寿命为 30 年, 利率为 4%, 则一天内的折旧成本分别为 205.97 元、247.16 元, 燃料均为天然气, 单价为 2.5 元/m<sup>3</sup>, 热值为 10.45 (kW·h)/m<sup>3</sup>。光伏综合度电成本为 0.7 元/(kW·h), 补贴为 0.42 元/(kW·h), 向电网的售电价格为 0.42 元/(kW·h)。储能选择为蓄电池, 其最大容量为 800 kW·h, 综合投资成本为 1 500 元/(kW·h), 最大循环次数为 4 200 次, 则投资成本折合系数为 0.178 6 元/(kW·h), 荷电状态的上下限分别为 0.9 和 0.3, 初始荷电状态为 0.6。负荷相对预测误差的标准差为 0.03, 光伏相对预测误差的标准差为 0.17。

对于目前的配电网而言, 受限于单向功率流动的设计, 难以接纳微网倒送至配电网的电能, 而且联络线功率具有较大随机性, 这也是禁止微网向配电网倒送电能的因素之一<sup>[24]</sup>。因此, 本文算例只允许配电网向微网送电, 不允许倒送电, 即  $P_{grid, min} = 0$ 。

交直流混合微网内的总负荷功率和光伏预测功率参考某示范工程的实际测量值, 见附录 A 图 A2。本算例中配电网售电价和微网中的用户电价均采用分时电价, 数据参考浙江省一般工商业 1~10 kV 用电电价, 如附录 A 表 A2 所示。不同置信水平下, 光伏约束中光伏最大可调度功率如附录 A 图 A3 所示。

#### 3.2 结果分析

针对不同置信度  $\alpha$ , 采用本文所提模型及求解方法得出交直流混合微网的日前调度策略, 联络线功率和光伏出力分布曲线如图 1 所示。

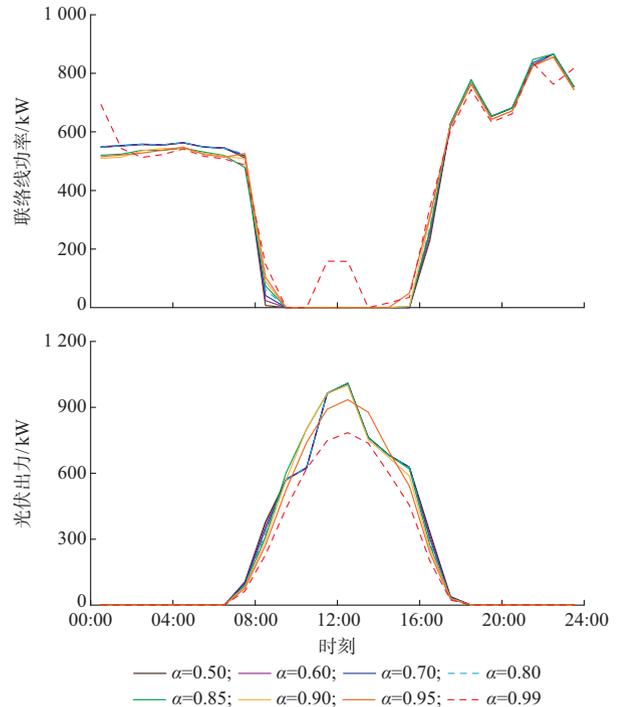


图 1 联络线功率和光伏出力分布曲线  
Fig. 1 Distribution curves of tie-line power and photovoltaic output

由图 1 可知, 光伏和配电网是微网主要的供电来源, 一是因为微网内其他电源容量不足以满足负荷的需求, 二是因为光伏的发电成本低, 考虑补贴后的实际成本只有 0.28 元/(kW·h), 与配电网电价和微燃机、燃料电池的发电成本相比, 光伏发电具有明显的经济优势。

在置信度  $\alpha < 0.9$  时, 光伏出力相近, 且存在弃光现象。其中, 弃光的主要原因为消纳能力的不足, 次要原因为消纳成本较高。G1 过多地消纳光伏会减少其售电收益, 降低微燃机、燃料电池运行效率, 增加储能运行成本, 而 G2 则希望系统消纳更多的光伏以增加其售电收益, 减少购电成本。因此, 在平等考虑双方利益的谈判博弈模型下, 光伏消纳功率会处于一个折中值, 存在一定的弃光现象。由于微网内光伏渗透率较高, 在置信度  $\alpha < 0.9$  时, 光伏的调度功率仍无法达到光伏在该置信度下的出力上限, 因此其在不同置信度下的出力曲线相似。

微燃机和燃料电池功率分布曲线如图 2 所示, 微燃机、燃料电池由于具有最小输出功率和爬坡率的限制, 因此为了在光伏出力较低时段具有较多的

出力,在光伏高峰时段也会保持一定的输出功率。光伏消纳功率越高,微燃机、燃料电池的功率最低值也越小,在爬坡能力的限制下其日内功率也越小,运行效率也就越低,从而导致运行成本的增加。

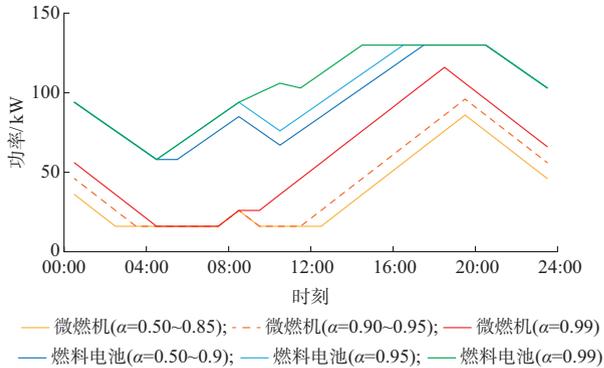


图2 微燃机和燃料电池功率分布曲线  
Fig.2 Power distribution curves of micro-gas turbine and fuel cell

随着置信度的提高,光伏消纳功率逐渐减少,因此微燃机、燃料电池的功率也就逐渐增高。

储能功率分布曲线如图3所示,储能的作用是实现能量在时间上的移动,在本文中的作用包括两方面,一方面是对光伏功率的平移,在光伏消纳功率大于负荷功率时储存能量,在光伏消纳功率小于负荷功率时释放能量,另一方面是针对负荷特性和分时电价的削峰填谷,从而实现提高光伏消纳率,降低运行成本的作用。由于储能最大功率的限制,用于光伏功率平移和削峰填谷的总体储能功率存在上限。由图1可知,随着置信度的增加,光伏消纳功率越来越低,需要储能进行平移的光伏功率也随之降低,即储能进行光伏功率平移的作用减弱,从而储能可以用于削峰填谷的功率随之提高,同时由于分时电价的差值大于储能的运行成本,所以储能进行削峰填谷的作用增强。

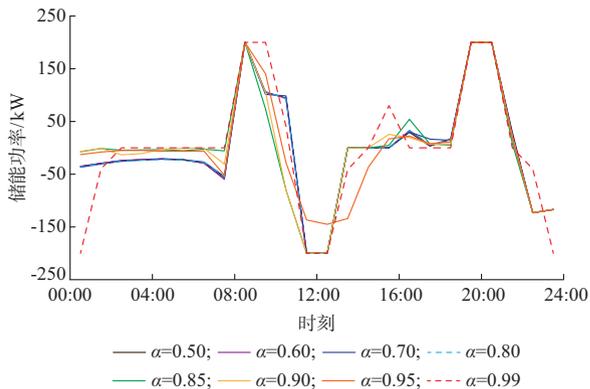


图3 储能功率分布曲线  
Fig.3 Power distribution curves of energy storage

G1和G2不同置信度下的运行成本如图4所示,其具体数值见附录A表A3。

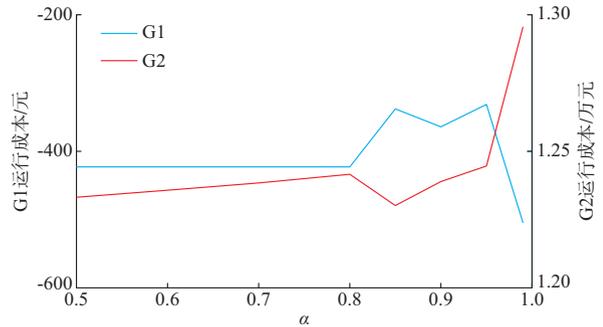


图4 不同置信度下G1和G2的运行成本  
Fig.4 Operation costs of G1 and G2 with different confidence levels

由图4可以看出,G1和G2的成本并不是随着置信度的增加而增加的单调函数,与不考虑微网内博弈关系以总体成本为目标函数的传统优化模型的结果不同。置信度 $\alpha < 0.9$ 时,由前文分析可知光伏消纳功率相近,因此,成本变化较小,主要由于G1和G2各自的最低收益发生了变化,造成谈判博弈均衡点偏移,从而导致G1和G2的成本有一定的波动。因为G1和G2的目标存在着一定的矛盾性,因此G1和G2的成本变化一般是相反的。在该置信度区间内,提高置信度并不会显著增加G1和G2的运行成本,这是含高渗透率光伏微网相对于含低渗透率光伏微网的一个优势。置信度 $\alpha > 0.9$ 时,光伏消纳功率开始显著减少,G2的成本开始上升,这是因为G2的成本与光伏消纳功率呈负相关,G1则先上升后下降,这是因为光伏消纳功率降低后,缺少了储能消纳光伏再释放的过程,提高了G1的供电成本,而当光伏消纳功率大幅降低后,向用户售电收益的增加部分大于供电成本的增加部分,从而形成G1成本先上升后下降的趋势。一般微网调度策略的置信度要求在0.8以上,因此,在采用谈判博弈模型保证调度策略公平性的前提下,建议选取置信度位于 $[0.85, 0.95]$ 区间内,在不显著提高G1和G2运行成本的情况下,实现调度策略较高的置信度。

## 4 结语

本文对含高渗透率光伏的交直流混合微网优化运行问题进行了研究,提出了基于谈判博弈的含高渗透率光伏微网不确定优化运行方法,主要结论如下。

1) 含高渗透率光伏的交直流混合微网内的不确定性较强,需构造考虑不确定性的优化运行模型。目标函数采用期望值模型有利于获得较高的长期收

益,约束条件采用机会约束模型有利于量化约束成立的置信度。

2)对于G1,消纳过多的光伏会减少其售电收益,降低微燃机、燃料电池运行效率,增加储能运行成本,而G2则希望系统消纳更多的光伏以增加其售电收益,减少购电成本,双方利益存在冲突。

3)微网中博弈双方的决策变量部分重合,即光伏消纳功率应由双方谈判协商决定,不应将其决定权划归一方,而一般的博弈模型中双方策略空间没有重合,并不适用该问题,需采用谈判博弈模型才可进行求解。

4)G1和G2的成本不是随着置信度的增加而增加的单调函数,置信度 $\alpha < 0.9$ 时,提高置信度并不会显著增加G1和G2的运行成本,置信度 $\alpha > 0.9$ 时,提高置信度时,G1的运行成本先增加后减小,G2的运行成本单调增加。

本文采用正态分布模型来描述光伏和负荷的不确定性,与实际情况存在一定的误差,仍需寻找更加准确的数学模型。由于不确定性的存在,实际运行与日前决策可能会出现偏差,对于偏差量的修正仍需进一步研究。仅对单个自建光伏用户与微网运营商之间的博弈问题进行了研究,对于多个用户的博弈问题仍有待于进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [2] LI Peng, YU Xiaomeng, ZHANG Jing, et al. The  $H_{\infty}$  control method of grid-tied photovoltaic generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1670-1677.
- [3] LI P, WANG X, LEE W J, et al. Dynamic power conditioning method of microgrid via adaptive inverse control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 906-913.
- [4] LASSETER R H. Microgrids[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 27-31, 2002, New York, USA: 305-308.
- [5] 丁明, 楚明娟, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行优化建模与不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20160531012.  
DING Ming, CHU Mingjuan, PAN Hao, et al. Operation optimization modeling and uncertainty analysis for hybrid AC/DC microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20160531012.
- [6] 邱海峰, 赵波, 林达, 等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 29-37. DOI: 10.7500/AEPS20161213012.  
QIU Haifeng, ZHAO Bo, LIN Da, et al. Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 29-37. DOI: 10.7500/AEPS20161213012.
- [7] 王守相, 王栋, 韩亮. 考虑不确定性的微网日前经济优化调度区间线性规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 5-11.  
WANG Shouxiang, WANG Dong, HAN Liang. Interval linear programming method for day-ahead optimal economic dispatching of microgrid considering uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 5-11.
- [8] LI Peng, HAN Pengfei, HE Shuai, et al. Double-uncertainty optimal operation of hybrid AC/DC microgrids with high proportion of intermittent energy sources[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 838-849.
- [9] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.  
XIONG Hu, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 36-44.
- [10] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.  
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [11] 刘方, 杨秀, 时珊珊, 等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 227-237.  
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.
- [12] 陈皓勇, 王勇超, 裯培正, 等. 含高渗透率风电的微网系统鲁棒经济调度方法[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1104-1111.  
CHEN Haoyong, WANG Yongchao, XUAN Peizheng, et al. Robust economic dispatch method of microgrid containing high proportion of wind power[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(8): 1104-1111.
- [13] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.  
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [14] 李晨迪, 陈渊睿, 曾君, 等. 基于非合作博弈的微电网能量管理系统优化算法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 387-395.  
LI Chendi, CHEN Yuanrui, ZENG Jun, et al. Research on optimization algorithm of microgrid energy management system based on non-cooperative game theory [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 387-395.
- [15] 王晶, 王宗礼, 陈骏宇, 等. 基于萤火虫优化算法的微网源-荷博

- 弈模型及分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 7-12.
- WANG Jing, WANG Zongli, CHEN Junyu, et al. A game model for DGs-Loads in microgrid based on firefly algorithm and its analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 7-12.
- [16] 杨晓东, 张有兵, 任帅杰, 等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 15-23.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, REN Shuaijie, et al. Optimal scheduling scheme of electric vehicles in grid-connected microgrid with high penetration photovoltaic power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 15-23.
- [17] ZHANG Chun, WU Wei, HUANG Hantao, et al. Fair energy resource allocation by minority game algorithm for smart buildings [C]// Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), March 12-16, 2012, Dresden, Germany: 63-68.
- [18] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- KANG Chongqing, XIA Qing, XU Wei. Uncertainty analysis of power system[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [19] LI Peng, XU Duo, ZHOU Zeyuan, et al. Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 66-73.
- [20] NASH JR J F. The bargaining problem[J]. Econometrica, 1950, 18(2): 155-162.
- [21] 罗超, 杨军, 孙元章, 等. 考虑备用容量优化分配的含风电电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6109-6118.
- LUO Chao, YANG Jun, SUN Yuanzhang, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6109-6118.
- [22] WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Nash bargain and complementarity approach based environmental/economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1548-1549.
- [23] LOFBERG J Y. A toolbox for modeling and optimization in MATLAB[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, September 2-4, 2004, New Orleans, USA: 284-289.
- [24] 许佳佳, 张敏, 是晨光, 等. 电网友好型微网经济运行分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 56-59.
- XU Jiajia, ZHANG Min, SHI Chenguang, et al. Analysis on grid-friendly based microgrid economic operation[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 56-59.

李 鹏(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新能源并网发电与微网技术、电能质量分析与控制、主动配电网优化运行与协调控制等。E-mail: ncepulp@ncepu.edu.cn

何 帅(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源并网发电与微网技术。E-mail: ncepuair@163.com

陈安伟(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统稳定及微网。E-mail: chen\_anwei@zj.sgcc.com.cn

(编辑 蔡静雯)

## Bargain Game Based Optimal Operation of Microgrid with High Penetration of Photovoltaic Considering Uncertainty

LI Peng<sup>1</sup>, HE Shuai<sup>1</sup>, CHEN Anwei<sup>2</sup>, LI Jihong<sup>2</sup>, YIN Yunxing<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** With the development of distributed photovoltaic (PV), its penetration rate in the microgrid has increased year by year, which leads to the uncertainty of microgrid operation and the increasing difficulty of PV consumption. Aiming at the uncertain factors in the hybrid AC/DC microgrid with high penetration of PV, this paper develops an optimal operation model for hybrid AC/DC microgrid considering uncertainty. The objective function is built based on the expected value model to obtain higher long-term profits. The chance constrained model is adopted to guarantee the confidence level of constraint condition. At the same time, to solve the game problem between the microgrid operators and the self-consumed PV, the bargain game model is used to balance the interests of the two stakeholders. And then this paper proposes a bargain game based optimal operation model of microgrid with high penetration of PV considering uncertainty. The proposed model is transformed into a deterministic differentiable nonlinear optimization model with a single objective function. Finally, the validity and feasibility of the model and the solving method are verified by the results of a case study.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577068) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104).

**Key words:** hybrid AC/DC microgrid; high penetration of photovoltaic; bargain game; uncertainty; optimal operation