DOI: 10.7641/CTA.2017.60024

### 含高渗透率风电的微网系统鲁棒经济调度方法

陈皓勇<sup>†</sup>, 王勇超, 禤培正, 梁子鹏, 华 栋

(华南理工大学电力学院,广东广州 510640)

**摘要:**微网中可再生能源比重通常较大,其固有的间歇性和随机性给微网调度带来困难.为应对可再生能源的出 力波动,本文综合考虑风、柴、燃料电池、蓄电池等机组运行特性,建立了基于极限场景法的微网日前鲁棒经济调度 模型;通过将调度计划的弃风及切负荷电量转化为经济成本,提出了使调度计划发电成本和风险成本(弃风、切负 荷成本之和)综合最优的误差边界优化方法.从风电预测精度、蓄电池容量及切负荷价格3方面分析了鲁棒经济调 度在微网中的适应性.结果表明:微网鲁棒经济调度在发电成本上稍显劣势,但在减少弃风、切负荷的电量方面具 有明显优势,并且在风电预测精度低、蓄电池容量不足以及切负荷价格较高的微网地区更适合采用鲁棒经济调度 方法.

### Robust economic dispatch method of microgrid containing high propotion of wind power

CHEN Hao-yong<sup>†</sup>, WANG Yong-chao, XUAN Pei-zheng, LIANG Zi-peng, HUA Dong

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Renewable energy usually accounts for a large proportion in microgrid, but its inherent intermittency and randomness bring difficulties to microgrid dispatch. In order to deal with the output fluctuations of renewable energy, this paper proposes a microgrid robust economic dispatch (RED) model based on extreme scenario method, considering the complicated generation constraints of wind turbines, diesel engines, fuel cells and batteries. By calculating the economic cost of electric energy of wind curtailment and load shedding, a method for optimizing the error bounds is proposed with the aim of minimizing comprehensive cost, which equals to the sum of generation cost and risk cost. RED method's adaptability in microgrid is also analyzed in this paper from three perspectives including wind power prediction accuracy, accumulator capacity and load shedding price. The results indicate that despite RED method increases the generation cost slightly, it has obvious advantages in reducing electric energy of wind curtailment and load shedding. The analysis shows that, RED method is more suitable for cases with low wind power prediction accuracy, deficient battery storage capacity and high price of load shedding.

Key words: renewable energy; microgrid; robust economic dispatch; error bound; load shedding

#### 1 引言(Introduction)

随着全球能源危机、环境污染问题日益突出, 含风能、太阳能等可再生能源的微电网(又称"微网")以 其能源利用率高、供电可靠性高、环境污染小等优点 而逐渐受到广泛重视和应用, 是智能电网建设的重要 组成部分<sup>[1]</sup>. 然而, 微网系统的微电源类型、运行控制 特性、电能质量约束等, 与传统大电网存在较大的差 异, 而且微网中可再生能源(风电、光伏等)往往比例 很高, 可再生能源易受气候、温度等环境因素的影响, 出力呈现随机性和间歇性的特点, 给现行的调度体系

本文责任编委:杨苹.

Supported by China National Funds for Excellent Young Scientists (51322702) and National Natural Science Foundation of China (51177049).

#### 带来了新的挑战<sup>[2-5]</sup>,因此研究微网的优化调度具有 重要意义.

微网优化调度的目的是基于间歇性电源出力预 测、负荷需求预测以及市场信息等基础数据,通过建 立适当的日前经济调度模型和相应的优化算法,在保 证安全稳定可靠运行的前提下实现最小化的系统运 行成本,提高能源利用效率<sup>[6]</sup>.目前,以微网为主体的 研究主要偏向于可再生能源系统的集成控制、规划方 面<sup>[7-11]</sup>,直接对微网优化调度的研究比较少.文献[12] 考虑微网的离散时间系统,建立动态微网经济调度模

收稿日期: 2016-01-13; 录用日期: 2016-09-30.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: eehychen@scut.edu.cn.

国家优秀青年科学基金项目(51322702),国家自然科学基金项目(51177049)资助.

型. 文献[13]建立随机时间序列模型, 权衡分析柴油发 电机组燃料成本和蓄电池寿命成本. 文献[12–13]均 假定可再生能源电源的出力为确定量, 没有考虑其随 机波动性, 不利于消纳可再生能源容量比例较高时的 出力. 文献[14]按风电装机容量固定比例确定旋转备 用容量, 但足以保证系统安全的备用量不易精确获取. 相对而言, 更好的解决方法是随机优化技术, 根据风 功率概率密度函数构建大量场景模拟风电出力, 获得 统计意义上的最优期望成本<sup>[15]</sup>. 但为了保证系统的可 靠性需要考虑海量的随机场景, 降低了计算效率.

近年来,鲁棒经济调度受到广泛关注.在给定不确 定参数的变化范围后,该方法能够求得一个最优解, 使得约束条件在不确定参数的所有可能取值下均得 到满足[16]. 文献[17-18]提出鲁棒可行性约束的经济 调度的整体框架和割平面算法,并讨论鲁棒备用整 定、机组组合方法的有效性; 文献[19]以发电成本最 小为目标函数,建立计及电力系统等效负荷的鲁棒超 前调度模型; 文献 [20] 提出基于两阶段零和博弈的鲁 棒经济调度方法,并应用于包括风力发电和电动汽车 的经济调度. 文献[17-20]分别从不同的切入点建立了 鲁棒调度模型,但随着风电场数目增加,模型的复杂 程度将急剧上升. 文献[21]基于极限场景法建立鲁棒 机组组合模型,并证明了极限场景集对误差边界内所 有场景具有代表性,较好地解决了调度模型复杂度随 风电机组数目增加而急剧上升的问题. 但缺少对误差 边界的寻优过程,并且输电网的调度方法与微网调度 方法有所区别.

在已有的研究基础上,本文综合考虑分布式电源 的运行特性及储能单元的充放电特性,基于极限场景 法建立了微网日前鲁棒经济调度模型,并提出一种优 化误差边界的方法.以某海岛微电网为算例进行分析, 计算结果表明,微网日前鲁棒经济调度方法相对传统 日前经济调度方法能够有效降低弃风和切负荷电量, 并从风电预测精度、蓄电池容量和切负荷价格三方面 分析了日前鲁棒经济调度方法在微网中的适应性.

#### 2 极限场景法(Extreme scenario method)

微网系统通常包括风电、光伏电池等间歇性电源, 其出力的不确定性给微网系统的有功调度带来困难. 为充分消纳间歇性电源,首先采用场景法描述间歇性 电源出力的不确定性.以风电为例,某一置信概率下 风电机组w的出力满足

$$p_w(t) \in [p_w(t), \bar{p}_w(t)], \tag{1}$$

式中 $\underline{p}_w(t)$ 和 $\bar{p}_w(t)$ 分别为风电场w在时段t的误差边界下限和上限.

在误差边界内,风电的任意一个出力描述为一个 调度场景.当全部风电机组的出力均为预测值时称为 预测场景,否则称为误差场景,当全部风电机组的出 力均处于误差边界时,称之为极限场景.以两台风电 机组为例,极限场景集的选取方法如图1所示,矩形的 四个顶点构成了极限场景集.当风电机组个数为w,极 限场景集个数为2<sup>w</sup>. 文献[20]证明了只要模型解能适 应极限场景,则必然能适应误差边界内所有的误差场 景.换言之,极限场景对误差边界内的误差场景具有 完全代表性.



Fig. 1 Selection method of extreme scenarios

#### 3 微网系统的鲁棒日前经济调度模型(Robust day-ahead dispatch model of microgrid)

#### 3.1 目标函数(Objective function)

微网中,鲁棒经济调度(robust economic dispatch, RED)的优化目标是在满足各分布式电源运行约束及 网络约束的前提下,通过合理安排各可控机组的出力 计划,使微网的发电成本最少.微网中柴油机(diesel engine, DE)和燃料电池(fuel cell, FC)机组统称燃料机 组,由于目前微网系统中风电机组容量较小且不具备 调节出力的功能,通常风电全额上网并忽略其运行维 护成本.模型目标函数如式(2)所示:

min :

$$f_{\rm GC} = \sum_{g=1}^{G} \sum_{t=1}^{T} [F_{de}(t) + F_{fc}(t) + \lambda_g \cdot \Delta T_g], \quad (2)$$

$$F_{de}(t) = \alpha_{de} p_{de}(t)^{2} + \beta_{de} p_{de}(t) + \gamma_{de}, \qquad (3)$$

$$F_{fc}(t) = C_{\rm ng} \frac{1}{\rm LHV_{ng}} \sum_{fc=1}^{FC} \sum_{t=1}^{I} \frac{p_{fc}(t)}{\eta_{fc}}$$
(4)

式(2)中: 调度周期为*T*,*G*为燃料机组集合,包含柴油机 DE 和燃料电池 FC,即*G* = DE  $\cap$  FC; *F*<sub>de</sub>(*t*)和 *F*<sub>fc</sub>(*t*)分别为柴油机*de*和燃料电池*fc*在时刻*t*的发电成本, $\lambda_g$ 为燃料机组*g*的启动费用, $\Delta T_g$ 为燃料机组*g*的启动时段.式(3)为柴油机发电成本函数,可用二次函数模拟<sup>[22]</sup>,其煤耗特性系数分别为 $\alpha_{de}$ , $\beta_{de}$ , $\gamma_{de}$ , *p*<sub>de</sub>(*t*)为柴油机*de*在时刻*t*的出力;式(4)为燃料电池发电成本函数<sup>[23]</sup>, *p*<sub>fc</sub>(*t*)为燃料电池机组 *fc*在时段*t*的出力, *C*<sub>ng</sub>为天然气价格,取2.18元/m<sup>3</sup>, LHV<sub>ng</sub>为天然气低热值,取 9.7 (kWh)/m<sup>3</sup>,  $\eta_{fc}$ 为燃料电池效率,取 58%.

## **3.2** 预测场景下的约束方程 (Constraint equations of predicted scenario)

本文的微网系统中,柴油机、燃料电池和蓄电池统

称为可控机组,用集合N表示,风电机组用集合W表示.预测场景约束条件如下:

1) 功率平衡约束.

$$\sum_{n=1}^{N} p_n(t) + \sum_{w=1}^{W} p_w(t) = p_{\rm D}(t)(t \in T), \qquad (5)$$

式中:  $p_n(t)$ 和 $p_w(t)$ 分别为可控机组n和风电机组w在时段t的输出功率,  $p_D(t)$ 为时段t的负荷.

2) 旋转备用约束.

在微网日前经济调度中,不确定因素来自负荷波 动和风电出力波动两方面.本文假设负荷波动由旋转 备用满足,如式(6)所示:

$$\sum_{n=1}^{N} (p_n^{\max} - p_n(t)) I_n(t) \ge p_{\mathrm{D}}(t) \times L\%(t \in T),$$
(6)

式中:  $p_n^{\text{max}}$ 为可控机组的最大技术出力,  $I_n(t)$ 为可控 机组n在时段t的启停状态, 开机状态对应 $I_n(t) = 1$ , 停机状态对应 $I_n(t) = 0$ , L%为负荷对旋转备用的需 求, 取10%.

3) 燃料机组的出力约束.

燃料机组与传统电力系统中的火电机组不同,这 些分布式机组具有较小的体积和较高的操作灵活性, 启停迅速且机组出力可控.它们的运行主要受功率输 出、爬坡速度、启停时间的约束:

$$p_g^{\min} \leqslant p_g(t) \leqslant p_g^{\max},\tag{7}$$

$$-r_g^{\mathrm{d}} \times t_{60} \leqslant p_g(t) - p_g(t-1) \leqslant -r_g^{\mathrm{u}} \times t_{60}, \quad (8)$$

$$\sum_{h=0}^{I_g-1} I_g(t+h) \ge (I_g(t) - I_g(t-1)) \times \min(T_g^{u}, \mathbf{T} - t + 1), \qquad (9)$$

$$\sum_{h=0}^{I_g-1} (1 - I_g(t+h)) \ge (I_g(t-1) - I_g(t)) \times \min(T_g^d, \mathbf{T} - t + 1).$$
(10)

式(7)为上下限约束,  $p_g(t)$ 为燃料机组g在时段t的出力,  $p_g^{\min}$ ,  $p_g^{\max}$ 分别为燃料机组g的最小、最大技术出力; 式(8)为爬坡率约束,  $r_g^d$ ,  $r_g^u$ 分别为燃料机组g的向下、向上爬坡速度,  $t_{60} = 60$  min; 式(9)–(10)分别为最小开机时间约束与最小停机时间约束,  $I_g(t)$ 为燃料机组g的最小开机时间约束与最小停机时间约束,  $I_g(t)$ 为燃料机组g的最小开机时间与最小停机时间.

4) 储能设备的出力约束[22].

储能技术是解决风电等间歇性电源并网的有效手段,本文选用目前应用较为广泛的铅酸蓄电池作为微网系统的储能设备.蓄电池剩余容量的计算方法如式(11)所示:

$$E(t) = E(t-1)(1-\delta) + \Delta t p_{\rm ch} \eta_{\rm ch} - \Delta t p_{\rm dis} / \eta_{\rm dis}, \qquad (11)$$

式中: E(t)与E(t-1)分别为时段t与时段(t-1)的 蓄电池剩余容量,  $\delta$ 为蓄电池的自放电率;  $p_{ch}$ ,  $p_{dis}$ 分 别为蓄电池的充电、放电功率;  $\eta_{ch}$ ,  $\eta_{dis}$ 分别为蓄电池 的充电、放电效率, 均取为0.8;  $\Delta t$ 为调度时间间隔.

蓄电池运行约束如下:

① 容量约束:

$$E_{\rm C}S_{\rm OC\,min} \leqslant E\left(t\right) \leqslant E_{\rm C}S_{\rm OC\,max}.\tag{12}$$

② 充放电功率限值约束:

$$0 \leqslant p_{\rm ch} \leqslant p_{\rm ch}^{\rm max},$$
 (13)

$$0 \leqslant p_{\rm dis} \leqslant p_{\rm dis}^{\rm max}.$$
 (14)

③ 充放电次数约束:

$$N_{\rm bat} \leqslant N_{\rm max}.$$
 (15)

④ 电量平衡约束:

$$E(0) = E(\mathbf{T}). \tag{16}$$

式中:  $E_{\rm C}$ 为蓄电池的最大容量,  $S_{\rm OC\,max}$ 和  $S_{\rm OC\,min}$ 为蓄电池荷电状态的上下限,取值范围为(0, 1];  $p_{\rm ch}^{\rm max}$ 和 $p_{\rm dis}^{\rm max}$ 分别为蓄电池的最大充电和放电功率;  $N_{\rm bat}$ 为蓄电池在周期T内的充放电次数,  $N_{\rm max}$ 为周期 T内允许的最大充放电次数;式(16)表示调度始末蓄 电池电量保持不变.

### **3.3** 极限场景下的约束方程(Constraint equations of extreme scenario)

极限场景是风电波动最恶劣的情况,为保证RED 调度计划的鲁棒性,需要在RED模型中添加极限场景下的约束条件:

$$\sum_{n=1}^{N} p_n(s_m, t) + \sum_{w=1}^{W} p_w(s_m, t) = p_{\rm D}(t), \quad (17)$$

$$p_n^{\min} \leqslant p_n(s_m, t) \leqslant p_n^{\max},\tag{18}$$

$$-r_n^{\mathrm{d}} \times t_{\mathrm{c}} \leqslant p_n(t) - p_n(s_m, t) \leqslant r_n^{\mathrm{u}} \times t_{\mathrm{c}},$$
(19)

式中:  $s_m$ 为极限场景集,  $m = 1, 2, \dots, 2^W$ ; 式(17)为极限场景的功率平衡方程,  $p_n(s_m, t)$ ,  $p_w(s_m, t)$ 分别为极限场景下可控机组n和风电机组w在时段t的出力; 式(18)要求极限场景下可控机组的出力仍满足上下限约束; 式(19)中 $r_n^u$ 和 $r_n^d$ 分别为可控机组的向上和向下爬坡速率, 该场景过渡约束要求在调整时间 $t_c$ 内完成从预测场景到极限场景之间的过渡, 本文 $t_c$ 取10 min.

#### 4 最优误差边界的确定(Determination of optimal error bounds)

在所建微网RED模型中,极限场景是根据风电出 力的误差边界来确定的.而误差边界可以从两方面理 解:一是调度计划为应对风电波动而预留的动态备用 容量,二是调度计划能够应对风电波动的能力.对于 调度计划无法消纳的风电波动,调度员会采取弃风或 切负荷措施,弃风是一种对可再生能源的浪费,而切 负荷会产生实在的社会经济损失,本文将上述两种措施的成本之和定义为风险成本.将机组的燃料消耗和 启停成本定义为发电成本.下面分别讨论各类成本与 极限场景置信度即误差边界大小的关系.

对于发电成本来说,误差边界应理解为调度计划 为应对风电波动而预留的动态备用容量.误差边界越 大,调度计划需预留的动态备用容量越大.这会导致: 一方面,不仅蓄电池等备用类电源要保留足够的备用 空间,而且柴油机等主控电源也需要为风电波动预留 足够的出力调节空间.因此,柴油机等主控电源必然 无法在经济性最优的额定出力点上工作,而是需要压 低出力值,当误差边界足够大时,甚至需要开启更多 柴油机组,并均维持较低的出力状态,这显著降低了 发电效率,增加了发电成本.另一方面,由于负荷维持 不变,而柴油机等主控能源降出力,则发电成本较高 的燃料电池机组需承担更多出力任务,同样增加了调 度计划的发电成本.因此,误差边界大小与发电成本 正相关.

对于风险成本(弃风与切负荷成本之和)来说,误差边界应理解为调度计划能够应对风电波动的能力. 更大的误差边界能够显著增加系统消纳风电的能力,减少由于风电波动产生的弃风和切负荷电量,从而减少风险成本.因此,误差边界大小与风险成本负相关.

综上所述,误差边界大小反映了调度方案的"保 守度",直接影响调度计划的经济性和鲁棒性.而调 度计划的经济性(发电成本)和鲁棒性(风险成本)存在 相互矛盾的关系.为寻找经济性和鲁棒性的平衡点, 假设风电概率密度函数服从均值为预测出力的正态 分布<sup>[22]</sup>,通过计算弃风和切负荷成本,将调度计划的 鲁棒性转化为经济指标,进一步优化得到使发电成本 与风险成本之和,即综合成本 (comprehensive cost, CC)最小的误差边界,称为最优误差边界.

如图2所示,实线为风电的预测出力曲线,虚线为 风电出力的误差边界. RED能够应对风电在误差边界 内的任意波动,当风电出力超出误差边界时,将可能 产生弃风或者切负荷损失. 然而,为使综合成本达到 最优,适当的弃风或者切负荷是必要的.





Fig. 2 Wind power predict scenarios and extreme scenarios schematic

根据风电出力的预测值和概率密度函数建立误差 边界优化模型如下:

1) 控制变量.

以风电上下波动比例 $\sigma$ 作为误差边界大小的控制 变量,则风电在时段t的波动范围为 $p_w(t) \in [p_w^0(t)$  $(1 - \sigma), p_w^0(t)(1 + \sigma)],其中<math>p_w^0(t)$ 为时段t的风电预 测出力.

2) 目标函数.

目标函数为综合成本最小:

$$\min f_{\rm CC} = f_{\rm GC} + f_{\rm RC},\tag{20}$$

式中*f*<sub>GC</sub>为预测场景下的发电成本,如式(2)所示.由于风电概率密度曲线以预测出力为均值,所以*f*<sub>GC</sub>近似等于各场景下发电成本的期望值;*f*<sub>RC</sub>为风险成本期望值,由式(23)-(27)算得;*f*<sub>CC</sub>为调度方案的总期望成本,即综合成本.

风险成本包含弃风成本和切负荷成本两部分,计 算方法如下:

① 计算弃风和切负荷电量.

当风电出力发生波动时, 微网系统出现有功不平衡, 可控机组需要在调整时间t<sub>c</sub>内完成出力调整, 使微网恢复功率平衡. 可控机组的出力调整受到上下限和爬坡率的双重限制, 可控机组的下调容量P<sub>d</sub>(t)和上调容量P<sub>u</sub>(t) 分别根据式(21)和式(22)计算, 其大小与机组的当前出力p<sub>n</sub>(t)相关:

$$P_{\rm d}(t) = \sum_{n=1}^{N} \min(r_n^{\rm d} \times t_{\rm c}, \ p_n(t) - p_n^{\rm min}), \ (21)$$
$$P_{\rm u}(t) = \sum_{n=1}^{N} \min(r_n^{\rm u} \times t_{\rm c}, \ p_n^{\rm max} - p_n(t)). \ (22)$$

根据风功率的概率密度函数计算功率缺额的期望 值. 时段 t 时,风电预测出力误差的概率函数如图 3 所 示,  $p_w(t)$ 为风电的预测出力序列(取值范围为0到  $p_w^{\max}, p_w^{\max}$ 为风电装机容量),阴影部分为调度计划所 能消纳的风电波动范围.



图 3 风电出力概率密度函数曲线 Fig. 3 Probability density function curve of wind power

当风电出力小于P<sub>d</sub>(t)时,为维持功率平衡需进行 切负荷,切负荷电量由式(23)计算,积分区间从0到 P<sub>d</sub>(t);当风电出力大于P<sub>u</sub>(t)时,为维持有功平衡需弃 风,弃风电量由式(24)计算,积分区间从 $P_u(t)$ 到 $p_w^{max}$ .

$$Q_{\rm c}(t) = \int_{0}^{P_{\rm d}(t)} \varphi(p_{w}(t)) (P_{\rm d}(t) - P_{w}(t)) \mathrm{d}p_{w}(t),$$
(23)

$$Q_{w}(t) = \int_{P_{u}(t)}^{P_{w}} \varphi(p_{w}(t))(P_{w}(t) - P_{u}(t)) dp_{w}(t).$$
(24)

② 计算风险成本.

周期T内的总弃风电量 $Q_{c,sum} = \sum_{t \in T} Q_c(t)$ ,总切 负荷电量 $Q_{w,sum} = \sum_{t \in T} Q_w(t)$ . 设切负荷成本为 $f_c$ ,弃

风成本为fw,则有

$$f_{\rm c} = \eta_{\rm c} \times Q_{\rm c,sum},\tag{25}$$

$$f_w = \eta_w \times Q_{w \text{ sum}},\tag{26}$$

$$f_{\rm RC} = f_{\rm c} + f_w, \tag{27}$$

式中: $\eta_c$ 为单位切负荷电量的成本,与负荷类型和负荷比例有关; $\eta_w$ 为单位弃风电量的成本,由于弃风电量由燃料机组发出,可近似 $\eta_w$ 为燃料机组的平均发电成本.

3) 优化误差边界.

通过改变σ获得不同大小的误差边界,按上述方法 统计调度计划综合成本随σ的变化曲线.曲线在最低 点范围内可近似为二次曲线,采用求根公式得到最优 误差边界对应的σ.

#### 5 算例分析(Case analysis)

#### 5.1 算例介绍(Case introduction)

现以按孤网方式运行的某南方海岛微网为例进行 分析,算例包含风电、柴油机、燃料电池和蓄电池四种 电源类型,其中,风电装机容量为微网平均负荷的1.12 倍,属于典型的风电高渗透率微网系统.根据该微网 某典型日的负荷和风速信息,其负荷和预测风电出力 曲线如图4所示,风电总出力占总负荷的42%.





Fig. 4 Forecast of load and the output of wind turbine in a typical day

该微网系统含3台柴油机和2台燃料电池机组,其 初始状态均为停机.微网系统运行参数如表1所示<sup>[20]</sup>.

表1 微网系统运行参数 Table 1 Operating limits of the microgrid

米型	$P_{\min}/$	$P_{\rm max}/$	$R_{ m down}$ /	$R_{\rm up}$ /	$T^{\rm U}/$	$T^{\rm D}/$
天空	kW	kW	$(kW\cdot min^{-1})$	$(kW\cdot min^{-1})$	h	h
DE	5	65	5	5	3	2
FC	5	40	2	2	3	2
WT	0	200	_	_		

表1中:风电(WT)最大出力为装机容量,柴油机 (DE)和燃料电池(FC)的一次启停费用分别为1.94和 2.72元<sup>[22]</sup>,蓄电池的容量为300 kWh,最大充放电功 率为60 kW,其最小荷电状态为0.3,最大荷电状态为1, 初始和最末荷电状态均取0.7,调度周期内最大充放电 次数为3次.

#### 5.2 结果分析(Result analysis)

燃料机组的成本函数分段线性化为10段,经测算,可保证计算结果足够精确.以一台主频2.6 GHz、内存4 GB的计算机为计算平台,采用数学规划软件GAMS23.1编程,调用成熟的混合整数规划求解器CPLEX12.1求解.

## **5.2.1** 微网鲁棒调度结果分析(Analysis of robust dispatch result of microgrid)

不同误差边界下, RED与传统机组组合(unit commitment, UC)的发电成本 (generation cost, GC)、风险 成本(risk cost, RC)以及综合成本(comprehensive cost, CC)如图5所示.





图5中首字母R/U代表RED/UC,从图5可以看出, 由于UC在制定调度计划时不考虑风电波动场景,改 变σ不会改变UC调度计划,因此UC的发电、风险和综 合成本保持不变.

RED却明显不同:首先看RED风险成本曲线,当 $\sigma$ 取20%时,RED风险成本为731元,略少于UC,而 $\sigma$ 取为30%时,RED风险成本骤降为119元,当 $\sigma$ 增大到

40%时, RED 风险成本几乎为零(4.4元). 这说明 RED 调度计划能够满足风电在误差边界内的各种波动, 有效降低因风电波动而产生的弃风或切负荷电量, 从而极大地减少潜在的风险成本, 而且, 误差边界愈大, RED应对风电波动的能力愈强.

由RED发电成本曲线可以看出, RED发电成本总 是高于UC发电成本. 燃料机组工作在额定出力状态 时效率最高,平均发电成本最少.UC无需应对风电波 动,其调度计划以经济性为单一目标,单台燃料机组 能够尽可能地以额定功率出力,平均发电成本较低. RED则不然, RED需要提前为误差边界内的风电波动 场景预留足够的备用容量,具体措施包含两方面:其 一,根据风电波动场景必须在10 min内满足的要求, 只有开机的燃料机组才能在限定时间内调节出力应 对风电波动,所以RED会开启更多台燃料机组,增加 了机组的启动费用. 其二, 为保证燃料机组增出力的 空间, RED会对燃料机组适当地压出力, 这无疑会降 低燃料机组发电效率,导致平均发电成本升高,这是 微网中RED发电成本较高的主要原因. 以 $\sigma = 35\%$ 为 例,由表2可以看出RED与UC燃料机组平均发电成本 的区别.

表 2 误差边界35%的RED与UC燃料机组发电成本 Table 2 Generation cost of fuel generator in RED and UC with 35% error bound

方法	类型	总发电量/ (kWh)	发电成本/元	平均发电成本/ $(\Lambda \cdot \mathrm{kWh}^{-1})$
RED	DE	952.2	1733.4	1.82
	FC	1588.3	2028.4	1.28
UC	DE	926.8	1625.3	1.75
UC	FC	1600.0	1984.0	1.24

RED的发电成本随误差边界的变化趋势与风险成本相反:误差边界愈大,RED发电成本愈高.因为更大的误差边界意味着RED需要预留更大的出力调节空间,燃料机组的效率更低,平均发电成本更高.

由图5可以看出, RED综合成本随 $\sigma$ 增大先降低后 升高,在35%~40%之间达到最低.将RED综合成本 曲线在 $\sigma \in [35\%, 40\%]$ 内近似为二次曲线,通过求根 公式得到最优 $\sigma$ 为36%.表3比较了RED( $\sigma = 36\%$ )和 传统UC调度计划的各种区别.

表 3 RED与UC计算结果对比 Table 3 Caculated results contrast of RED and UC

方法	发电	弃风量/	切负荷量/	风险	综合	
	成本/元	kWh	kWh	成本/元	成本/元	
RED	3762	0	0.2	10	3772	
UC	3614	0.3	15.8	785	4399	

从表3可以看出,尽管RED在发电成本上高于UC 148元,但RED能够明显降低弃风和切负荷电量,在风 险成本上优于UC775元,在目前单风电场功率预测精 度不高的情况下具有明显的实际意义.综合成本RED 比UC少627元,节省成本16.7%,经济效益明显.

应该注意到, RED不能应对过大的误差边界, 如图 5所示, σ达到50%时模型无解, 即该微网系统无法应 对算例典型日50%及以上的风电波动场景.

# **5.2.2** 计及蓄电池折旧成本的鲁棒调度结果分析 (Analysis of robust dispatch result with con-

#### sideration of battery depreciation cost)

通常情况下,随着放电深度的增加,蓄电池的充放 电可循环次数减少,但循环充放电总量基本保持不 变<sup>[13]</sup>,本文假设蓄电池在全寿命周期内的充放电总量 恒定<sup>[24]</sup>,即

$$Q_{\text{lifetime}} = Q_{\text{c}},\tag{28}$$

式中: Q<sub>lifetime</sub>表示单体蓄电池全寿命输出总电量, Q<sub>c</sub>为常数. 据此可以计算出蓄电池单位电量的折旧成本

$$P_{\rm bw} = \frac{P_{\rm rep}}{Q_{\rm c}},\tag{29}$$

式中: *P*<sub>bw</sub>为蓄电池单位电量折旧成本, *P*<sub>rep</sub>为蓄电池 更换成本.

因此,在计及蓄电池折旧成本后,鲁棒调度目标函 数在式(2)的基础上变为

 $\min$  :

$$f_{\rm GC} = \sum_{g=1}^{G} \sum_{t=1}^{T} [F_{de}(t) + F_{fc}(t) + \lambda_g \Delta T_g + F_{\rm sb}(t)], \quad (30)$$

$$F_{de}(t) = \alpha_{de} p_{de}(t)^{2} + \beta_{de} p_{de}(t) + \gamma_{de}, \qquad (31)$$

$$F_{fc}(t) = C_{\rm ng} \frac{1}{\rm LHV_{ng}} \sum_{fc=1}^{FC} \sum_{t=1}^{I} \frac{p_{fc}(t)}{\eta_{fc}},$$
 (32)

$$F_{\rm sb}(t) = P_{\rm bw} \times p_{\rm dis},\tag{33}$$

式中: *F*<sub>sb</sub>(*t*)为蓄电池折旧成本, 其余符号如式(2)-(4) 所示.

单体蓄电池参数<sup>[24]</sup>: 额定电压为2 V, 额定容量为 800 Ah, 最大充电速率为11 A/Ah, 最大充电电流为 162 A, 全寿命放电量为 2742 kWh, 更换成本为 267 USD.

1) 对最优误差边界的影响.

计及蓄电池折旧成本后,最优误差边界由35%缩 减为14%.分析原因如下:由式(29)可知,蓄电池单位 放电量的折旧成本高达1.56元,由图6可知,RED(σ = 14%)与UC的发电成本分别增加了130元和189元,因 此,蓄电池折旧成本会显著增加发电成本.而根据第3 节分析己知,误差边界大小与发电成本正相关,因此, 最优误差边界必然收缩以对应最小的综合成本.





2) 对鲁棒法综合效益的影响.

表4可知, 计及蓄电池折旧成本后, 蓄电池在调度 计划中的放电量减少了108.9 kWh, 同时, 鲁棒法的综 合成本效益减少405元. 这是因为蓄电池的折旧成本 (1.56 元/kWh)极大地增加了蓄电池的发电成本, 因此 RED与UC均更倾向于将蓄电池作为备用机组. 这导 致其他机组出力负担增加, 并极大地限制了RED调度 计划预留灵活备用容量的能力. 相应的, 鲁棒效益减 少至222元. 但应当指出, 即使计及高额的蓄电池折旧 费用后, 鲁棒法依旧能够节省5.3%的综合成本, 仍具 有实际应用价值.

	表 4 折旧成本对鲁棒效益影响
Table 4	Impact of depreciation cost on robust benefit

类别	RED蓄电池 放电量/kWh	鲁棒 效益/元
忽略折旧	200.8	627
记及折旧	91.9	222

### **5.2.3** 微网鲁棒调度方法适应性分析(Adaptability analysis of microgrid robust dispatch method)

本文以南方某海岛为算例分析,得到微网鲁棒调度方法的上述结论.但微网系统广泛存在于我国大江南北,各微网地区的气候条件、经济水平和电源类型都不尽相同,为验证微网鲁棒调度方法在不同情况下的适应性,定义RED综合成本效益为最优误差边界下RED综合成本相对UC综合成本的减少量,拟改变风电预测误差精度、蓄电池容量和切负荷价格,探究RED综合成本效益的变化情况.

将原算例中风功率概率密度函数曲线的标准差、 蓄电池容量和切负荷价格以0.5倍的尺度依次更改为 原算例水平的0.5~3倍, RED综合成本效益如图6所 示.

由图7可以看出,风功率概率密度函数曲线的标准 差增大,即风电功率预测精度下降,RED综合成本效 益升高.RED能够应对很多UC无法应对的风电波动 场景,称之为优势场景.根据式(23)-(24),弃风或切负 荷电量等于所有波动场景下的积分,增大风功率概率 密度函数曲线标准差意味着优势场景的发生概率升 高,因此RED相比UC能够减少更多的弃风和切负荷 电量,综合成本效益增加.



图 7 不同参数下RED综合成本效益 Fig. 7 Benefit of comprehensive cost of RED method caculated with different parameters

增加蓄电池容量会使RED综合成本效益降低. 这 是因为蓄电池充放电快速而灵活, 且忽略损耗的情况 下发电成本为零, 充足的蓄电池容量相当于增加了系 统旋转备用容量, 能够提高UC应对风电波动的能力, 减少UC弃风和切负荷电量, 风险成本减少. 相应地, RED 综合成本效益下降.

切负荷价格对 RED 综合成本效益有直接的正比 影响.由于切负荷价格远高于弃风价格,因此微网中 的风险成本主要由切负荷成本组成,进而RED的风险 成本效益主要由切负荷成本效益来体现.仅改变切负 荷价格不会改变RED和UC的调度计划,所以切负荷 价格增大,必然会使RED综合成本效益上升.

由上述分析可知,从减少调度计划弃风和切负荷 电量,提高RED综合成本效益的角度来说,如下3种微 网特征适合应用RED调度方法:1)微网地区地形及气 象情况复杂导致风功率预测精度较低;2)蓄电池容量 占总装机容量比例较小;3)微网地区经济发达或重要 负荷比例高,即切负荷成本高.同理可知,提高风电功 率预测精度或增加灵活的蓄电池容量也是提高微网 风电利用率的合理措施.

#### 6 结论(Conclusions)

本文在微网调度系统中引入鲁棒优化方法,基于 微网各类电源的运行特征建立了微网鲁棒日前经济 调度模型,并调用CPLEX求解器求解.以高风电渗透 率的某海岛微网为算例计算分析,结果表明鲁棒调度 方法虽然会对燃料机组压出力,导致燃料机组平均发 电成本稍高于传统调度,但能够显著减少弃风和切负 荷电量,减少潜在的风险成本,综合成本效益明显.而 综合成本效益随误差边界的增大先增大后减小,有必 要预先搜索最优误差边界.

从微网鲁棒调度方法的适应性来看,在地形及气

候条件复杂、缺乏备用电源或经济发达、重要负荷比 例高的地区应用微网鲁棒调度方法可以更有效的提 高风电消纳水平,减少弃风和切负荷电量,获得更高 的综合成本效益.

#### 参考文献(References):

- HUANG Wei, SUN Changhui, WU Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system [J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14 – 18.
   (黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述 [J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14 – 18.)
- [2] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78 – 94.
- [3] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2008, 6(3): 54 – 65.
- [4] ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China [J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27 32.
  (郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27 32.)
- [5] WANG Xin, QIN Bin, YANG Chunhua, et al. Multi-objective hybrid optimization algorithm for short term environmen-tal/economic generation scheduling [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(5): 730 – 734.

(王欣,秦斌,阳春华,等.机组短期负荷环境/经济调度多目标混合优化 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 730 – 734.)

- [6] MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Typical char-acteristics and key technologies of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 168 – 175. (马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 微电网典型特征及关键技术 [J]. 电力系
- 统自动化, 2015, 39(8): 168 175.) [7] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 23(1): 1 – 8.
- [8] SHU Jie, ZHANG Xianyong, SHEN Yuliang, et al. The algorithm and application in power sources planning and designing for micro-grid based on distributed renewable energy [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 675 680.
  (舒杰, 张先勇, 沈玉梁, 等. 可再生能源分布式微网电源规划方法及应用 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(5): 675 680.)
- [9] XU Cheng, LIU Nian, ZHAO Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary fre-quency regulation of power system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 14-20. (徐诚, 刘念, 赵泓, 等. 基于电力系统二次调频原理的微电源频率控

制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 14 – 20.)

- [10] MA Yiwei, YANG Ping, WU Jie. Hybrid control strategy of islanded microgrid with numerous distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 103 109.
  (马艺玮,杨苹,吴捷. 含多分布式电源独立微电网的混合控制策略
  [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 103 109.)
- [11] MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13 19.
  (梅生伟,王莹莹,刘锋.风,一光,—储混合电力系统的博弈论规划模型 与分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13 19.)
- [12] LIU Xiaoping, DING Ming, HAN Jianghong, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids including battery energy storage [J]. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2011, 24(5): 461 – 465.
- [13] DENNIS B C, BYRON WINN C. Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems [J]. Solar Energy, 1996, 58(4/6): 165 – 179.
- [14] LEE T Y. Optimal spinning reserve for a wind-thermal power system using EIPSO [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4):

1612 - 1621.

[15] LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77 – 84.

(刘小平,丁明,张颖媛,等. 微网系统的动态经济调度 [J]. 中国电机 工程学报, 2011, 31(31): 77 – 84.)

[16] LI Zhigang, WU Wenchuang, ZHANG Boming. A robust in-terval economic dispatch method accommodating large- scale wind power generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 32 – 38.

(李志刚,吴文传,张伯明. 消纳大规模风电的鲁棒区间经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 32 – 38.)

- [17] WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economical scheduling methodogy for power systems (part one) [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37 43.
  (魏韓, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(一) [J]. 电力系统自动 化, 2013, 37(17): 37 43.)
- [18] WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economical scheduling methodogy for power systems (part two) [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 60 67.
  (魏韓, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(二) [J]. 电力系统自动 化, 2013, 37(18): 60 67.)
- [19] YANG Ming, HAN Xueshan, WANG Shibai, et al. Fundamental research for power system robust dispatch under uncertain operating condition [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(Suppl.): 100 107. (杨明, 韩学山, 王士柏, 等. 不确定运行条件下电力系统鲁棒调度的基础研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 100 107.)
- [20] MEI S W, WANG Y Y, SUN Z Q. Robust economic dispatch considering renewable generation [C] //Innovative Smart Grid Technologies Asia (ISGT). Perth: IEEE, 2011: 1 – 5.
- [21] YE Rong, CHEN Haoyong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming method for security-constrained unit commitment with multiple wind farms [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(5): 1-5.
  (叶荣,陈皓勇, 王钢, 等. 多风电场并网时安全约束机组组合的混合 整数规划解法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 1-5.)
- [22] WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue. Economic gen-eration scheduling of a microgrid using mixed integer programming [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(28): 1 8.
  (吴雄, 王秀丽, 王建学. 微网经济调度问题的混合整数规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1 8.)
- [23] FAN Gaofeng, WANG Weisheng, LIU Chun, et.al. Wind power prediction based on artificial neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(34): 118 123.
  (范高锋, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于人工神经网络的风电功率预测 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118 123.)
- [24] WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et.al. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1775 1782.
  (王成山, 洪博文, 郭力, 等. 不同场景下的光蓄微电网调度策略 [J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775 1782.)
- 作者简介:

**陈皓勇** (1975--), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力系 统优化运行与控制、智能电网、能源互联网, E-mail: eehychen@scut. edu.cn;

**王勇超** (1989–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电力系统经济 调度, E-mail: ycw2015@126.com;

**禤培正** (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统经济 调度, E-mail: xuanpz@csg.cn;

**梁子鹏** (1992-), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统鲁棒 调度, E-mail: liangzipeng.ye@163.com;

**华 栋** (1976--), 女, 博士研究生, 讲师, 目前研究方向为电力经 济与电力市场, E-mail: 21100173@qq.com.