

# 基于鲁棒优化的主动配电网分布式电源优化配置方法

凌万水<sup>1</sup>, 刘刚<sup>2</sup>

(1. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233; 2. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 为优化配置作为分布式发电的有效管理平台的主动配电网, 针对含分布式发电并网的主动配电网优化配置问题, 给出一种基于鲁棒优化理论的优化配置模型。首先, 以综合配置成本最小为目标函数, 计及功率平衡约束、可控微源运行约束、旋转备用约束等必要约束条件, 建立主动配电网优化配置模型。针对模型中的不确定性, 采用鲁棒优化框架将分布式光伏和风电区间模型中的不确定变量进行消除, 再采用线性对偶理论和拉格朗日求导法将其转化为确定性的优化配置模型。仿真算例表明, 主动配电网相比于传统配电网具有更高的运行经济性和可靠性。同时, 所建立的模型能够计及风光出力不确定性对配置结果的影响, 从而适用于主动配电网优化配置方案制定。

**关键词:** 主动配电网; 优化配置; 鲁棒优化; 分布式发电; 不确定性

## Distributed generation optimal configuration method for active distribution networks based on robust optimization

LING Wanshui<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jinzhi Shengdong Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China; 2. State Grid Suqian Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China)

**Abstract:** To fulfill the optimal allocation of an active distribution network to act as an effective management platform for distributed generation, an optimal allocation model based on robust optimization theory is established. First, by taking the comprehensive allocation cost as the objective function, and considering power balance constraints, controllable micro-source operation constraints, rotating reserve constraints and other necessary constraints, an active distribution network optimal allocation model is established. In view of the uncertainties in the model, a robust optimization framework is adopted to eliminate the uncertainties based on the distributed photovoltaic and wind power interval models. Linear duality theory and the Lagrange derivative method are used to transform the uncertainties into a deterministic optimal allocation model. The simulation example shows that the active distribution network has higher operational economy and reliability than the traditional distribution network. The model established in this paper can take into account the impact of uncertainties of wind and solar output on the configuration results, and so it can be applied to the formulation of the optimal configuration scheme of an active distribution network.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB2100100).

**Key words:** active distribution network; optimal configuration; robust optimization; distributed generation; uncertainty

## 0 引言

主动配电网是由分布式发电、储能设备、保护与监控装置、负荷等模块集成的小型发、配、用电系统, 能实现自我控制管理, 可灵活地运行在离网或并网状态下, 在降低系统运行成本, 提高供电可

靠性等方面具有较大的优势<sup>[1-4]</sup>。主动配电网中各个设备的配置容量对于系统运行的经济性和可靠性至关重要<sup>[5]</sup>。

主动配电网优化配置方法作为主动配电网领域的关键技术之一, 是一门重要课题, 目前已有不少文献针对主动配电网或者微电网的配置问题做出了研究, 取得了丰硕的成果。比如文献[6]结合各分布式电源出力特性, 以规划总成本最低为目标函数,

构建了系统优化配置模型。文献[7]将改进的细菌觅食算法应用到了微网规划问题中,考虑多种分布式电源,得到了最优的配置方案。文献[8]考虑联络线接入费用,并在多重随机场景下修正配置方案,提高了主动配电网的鲁棒性。文献[9]结合博弈分析方法,提出了一种基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置模型。文献[10]计及了电力市场环境,考虑需求响应对光伏微网储能系统配置的影响。文献[11-12]则是侧重考虑系统中储能设备容量的配置。

已有的大部分文献在考虑系统不确定性时,基本思路都是考察不确定电源出力的随机分布进行建模。这样的处理方法有一定的意义,但在实际应用中容易造成两方面的问题,一方面是光伏出力的随机分布现实中很难测定,测定成本较高;另一方面,采用这样方式建立的模型通常有随机机会约束规划,随机期望值规划,随机相关机会规划<sup>[13-15]</sup>等,这样的模型在求解中通常需要采用场景法或者随机模拟技术,这会导致计算量大大增加,增加了求解难度,而采用鲁棒优化问题则不存在这样的问题。鲁棒优化能够针对系统在不利的情况下进行优化,从而使得优化结果具备更好的鲁棒性,能够适应各种不同的场景<sup>[16-20]</sup>。然而目前还很少有文献基于鲁棒优化理论对主动配电网建立优化配置模型。

本文针对主动配电网优化配置问题采用鲁棒优化理论进行建模,首先给出系统分布式发电出力区间模型,其次建立主动配电网优化配置模型,接着针对模型中的不确定性采用鲁棒框架理论,线性对偶理论以及拉格朗日函数法将不确定模型转化为确定性模型,最后针对一个主动配电网优化配置算法验证了本文方法的有效性。

## 1 主动配电网分布式发电出力区间模型

在主动配电网的实际运行中,分布式光伏出力和风电出力的随机分布概率密度曲线的测量存在较大难度和测量成本,而其区间分布的获得较为简便,更加适用于采用鲁棒优化理论进行优化配置。

分布式光伏出力的区间分布如式(1)和式(2)所示,作为主动配电网鲁棒优化配置模型的基础。

$$P_{PV}(t) = \bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) \quad (1)$$

$$\hat{P}_{PV}(t) \in [\hat{P}_{PV,\min}(t), \hat{P}_{PV,\max}(t)] \quad (2)$$

式中:  $P_{PV}(t)$  为分布式光伏发电在  $t$  时段的真实出力;  $\bar{P}_{PV}(t)$  为主动配电网优化配置模型对分布式光伏发电在  $t$  时段的出力预测;  $\hat{P}_{PV}(t)$  为分布式光伏发电在  $t$  时段的出力偏差;  $\hat{P}_{PV,\min}(t)$  和  $\hat{P}_{PV,\max}(t)$  分别为

该偏差最小值和偏差最大值。

同理可以得到分布式风电区间形式的出力分布分别如式(3)和式(4)所示。

$$P_{WT}(t) = \bar{P}_{WT}(t) + \hat{P}_{WT}(t) \quad (3)$$

$$\hat{P}_{WT}(t) \in [\hat{P}_{WT,\min}(t), \hat{P}_{WT,\max}(t)] \quad (4)$$

式中:  $P_{WT}(t)$  为分布式风电在  $t$  时段的真实出力;  $\bar{P}_{WT}(t)$  为主动配电网优化配置模型对分布式风电在  $t$  时段的出力预测;  $\hat{P}_{WT}(t)$  为分布式风电在  $t$  时段的出力偏差;  $\hat{P}_{WT,\min}(t)$  和  $\hat{P}_{WT,\max}(t)$  分别为该偏差最小值和偏差最大值。

## 2 主动配电网优化配置模型

在主动配电网优化配置模型中,可控分布式发电和分布式可再生能源发电的容量配置需要进行优化,合理的容量对于系统运行的经济性和可靠性至关重要。在主动配电网中,如果分布式可再生能源发电的容量过大,将导致配置容量得不到充分利用,系统出现的弃风弃光现象造成经济损失,而配置容量过小将无法充分发挥地区主动配电网中风光资源开发利用。

首先建立主动配电网优化配置模型,然后计及模型的不确定并采用鲁棒优化理论中的鲁棒优化框架将模型中含随机变量的约束条件转化,得到确定性的优化配置模型。

### 2.1 目标函数

主动配电网优化配置模型计及初始设备投资成本,可控微电源运行成本,设备运行维护成本,系统购电成本和可中断负荷成本,目标函数为综合配置成本如式(5)所示。

$$\min f = C_{in} + C_{fuel} + C_{en} + C_{om} + C_{grid} + C_{cut} \quad (5)$$

式中:  $C_{in}$  为初始设备投资成本如式(6)所示;  $C_{fuel}$  为可控微电源运行成本如式(7)所示;  $C_{en}$  为环境折算成本如式(8)所示;  $C_{om}$  为设备运行维护成本如式(9)所示;  $C_{grid}$  为系统购电成本如式(10)所示;  $C_{cut}$  为可中断负荷成本如式(11)所示。

$$C_{in} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \left[ c_{MT} P_{MT} + c_{FC} P_{FC} + c_{WT} P_{WT} + \right] \quad (6)$$

式中:  $n$  为配置年限;  $r$  为基准利率;  $P_{MT}$ 、 $P_{FC}$ 、 $P_{WT}$ 、 $P_{PV}$ 、 $P_{SB}$ 、 $P_{PCC}$  分别表示微燃机、燃料电池、分布式风电、分布式光伏发电、蓄电池储能和公共耦合点的配置容量;  $c_{MT}$ 、 $c_{FC}$ 、 $c_{WT}$ 、 $c_{PV}$ 、 $c_{SB}$  和  $c_{PCC}$  分别为微燃机、燃料电池、分布式风电、分布式光伏

发电、蓄电池储能和公共耦合点(PCC)的单位容量配置成本系数。

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{t=1}^T [\Delta t f_{\text{MT}}(P_{\text{MT}}(t)) + \Delta t f_{\text{FC}}(P_{\text{FC}}(t))] \quad (7)$$

式中:  $T$  为配置期限内时段数;  $\Delta t$  为时段长;  $f_{\text{MT}}()$  为微燃机的燃料成本函数;  $P_{\text{MT}}(t)$  和  $P_{\text{FC}}(t)$  分别为微燃机时段  $t$  出力和燃料电池时段  $t$  出力。

$$C_{\text{en}} = \sum_{t=1}^T \Delta t \left\{ \sum_{\theta=1}^N \lambda_{\text{MT}}^{\theta} c^{\theta} P_{\text{MT}}(t) + \sum_{\theta=1}^N \lambda_{\text{FC}}^{\theta} c^{\theta} P_{\text{FC}}(t) \right\} \quad (8)$$

式中:  $\theta$  为污染物类别;  $N$  为污染物种类;  $\lambda_{\text{MT}}^{\theta}$  和  $\lambda_{\text{FC}}^{\theta}$  分别为微燃机和燃料电池针对第  $\theta$  种污染物的排放系数;  $c^{\theta}$  为第  $\theta$  种污染物的环境折算成本系数。

$$C_{\text{om}} = \sum_{t=1}^T \left[ k_{\text{MT}} P_{\text{MT}}(t) + k_{\text{FC}} P_{\text{FC}}(t) + k_{\text{PV}} \bar{P}_{\text{PV}}(t) + k_{\text{WT}} \bar{P}_{\text{WT}}(t) + k_{\text{SB,om}} P_{\text{SB}}(t) \right] \Delta t \quad (9)$$

式中:  $k_{\text{PV}}$  和  $k_{\text{WT}}$  分别为分布式光伏和风电的单位功率运维成本系数;  $k_{\text{SB,om}}$  为蓄电池储能的运行维护成本;  $P_{\text{SB}}(t)$  为时段  $t$  蓄电池储能的充放电功率。

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{grid}}(t) q(t) \Delta t) \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{grid}}(t)$  为  $t$  时段主动配电网与外网的购售电功率, 大于零时表示系统购电, 小于零时表示系统售电, 为了充分消纳主动配电网中的分布式风电和光伏出力, 允许剩余功率上网售电;  $q(t)$  为  $t$  时段外网分时电价水平。

$$C_{\text{cut}} = \beta q(t) P_{\text{cut}}(t) \quad (11)$$

式中:  $\beta$  为中断负荷补偿系数;  $P_{\text{cut}}(t)$  为  $t$  时段因主动配电网系统功率不足导致的负荷中断功率。

## 2.2 约束条件

主动配电网优化配置模型中需要满足多项必要的约束条件。

### (1) 主动配电网功率平衡约束。

系统功率平衡约束是主动配电网优化配置模型必须首要满足的约束条件。否则将导致主动配电网失去供电可靠性, 该约束如式(12)所示。

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{FC}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{cut}}(t) + P_{\text{SB}}(t) = P_{\text{L}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{loss}}(t)$  为  $t$  时段主动配电网的网损, 具体计算式方法如式(13)所示。

$$P_{\text{loss}}(t) = \Delta t \left\{ \sum_{l \in S} [(P_l(t))^2 + (Q_l(t))^2] R_l / U_N^2 \right\} \quad (13)$$

式中:  $S$  为主动配电网馈线集合;  $P_l(t)$ 、 $Q_l(t)$  分别表示馈线  $l$  在  $t$  时段的有功和无功;  $R_l$  为馈线  $l$  电

阻;  $U_N$  为系统额定电压。

### (2) 可控微电源运行约束。

主动配电网中的微燃机和燃料电池作为系统功率支撑, 其运行需要满足如式(14)所示的条件。

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(t) \leq P_{\text{MT}}^{\text{max}} \\ P_{\text{FC}}(t) \leq P_{\text{FC}}^{\text{max}} \\ P_{\text{MT}}(t)(P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{MT}}^{\text{min}}) \geq 0 \\ P_{\text{FC}}(t)(P_{\text{FC}}(t) - P_{\text{FC}}^{\text{min}}) \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_{\text{MT}}^{\text{min}}$  为微燃机最低允许出力;  $P_{\text{FC}}^{\text{min}}$  为燃料电池最低允许出力。为了维持锅炉的运转等基本运行条件, 不允许微燃机和燃料电池运行在最低允许出力以下。

### (3) 公共耦合点购售电功率约束。

由于 PCC 的容量限制, 主动配电网优化配置模型中需要计及 PCC 交换功率限值约束如式(15)所示。

$$-P_{\text{PCC}} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{PCC}} \quad (15)$$

### (4) 储能设备运行约束。该约束如式(16)所示。

$$\begin{cases} E_{\text{SB}}^{\text{min}} \leq E_{\text{SB}}(t) \leq E_{\text{SB}}^{\text{max}} \\ E_{\text{SB}}^{\text{min}} \leq E_{\text{SB}}(t) \leq E_{\text{SB}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $E_{\text{SB}}(t)$  和  $P_{\text{SB}}(t)$  满足如式(17)所示的关系约束。

$$E_{\text{SB}}(t+1) = \begin{cases} E_{\text{SB}}(t) - P_{\text{SB}}(t) \Delta t / \eta_{\text{dis}} - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) > 0 \\ E_{\text{SB}}(t) - P_{\text{SB}}(t) \Delta t \eta_{\text{ch}} - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $E_{\text{SB}}(t)$  和  $E_{\text{SB}}(t+1)$  分别为  $t$  和  $t+1$  时段剩余电量;  $\eta_{\text{ch}}$  和  $\eta_{\text{dis}}$  分别为充放电效率;  $E_{\text{SB}}^{\text{min}}$  为放电深度;  $E_{\text{SB}}^{\text{max}}$  为充电深度;  $Q_{\text{SB}}$  为储能容量,  $D_{\text{SB}}$  为自放电系数。

### (5) 负荷中断功率约束。

在系统中由 PCC 供电以及分布式可再生能源发电和可控能源发电都无法满足负荷供电需求时, 主动配电网需要进行中断负荷管理, 此时需要满足如式(18)所示的约束。

$$P_{\text{cut}}(t) \leq P_{\text{cut}}^{\text{max}} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{cut}}^{\text{max}}$  为主动配电网运营商与负荷签订的可中断负荷容量。

### (6) 旋转备用约束。该约束如式(19)所示。

$$\min [P_{\text{SB}}^{\text{max}}, (E_{\text{SB}}(t) - E_{\text{SB}}^{\text{min}} - D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}) \eta_{\text{dis}}] + \bar{P}_{\text{PV}}(t) + \bar{P}_{\text{WT}}(t) + P_{\text{MT}}^{\text{max}} + P_{\text{FC}}^{\text{max}} + P_{\text{grid}}^{\text{max}} \geq P_{\text{L}}(t)(1 + \lambda) \quad (19)$$

式中,  $\lambda$  为主动配电网在  $t$  时段的旋转备用率要求。

### 3 约束转化与鲁棒优化模型

所建立的主动配电网优化配置模型中, 多项约束条件涉及到了风电和光伏的预测出力, 是典型的不确定性模型。基于光伏出力和风电出力区间形式, 采用鲁棒优化框架将功率平衡约束以及旋转备用约束中的不确定变量进行消除, 从而转化为确定性的优化配置模型。将功率平衡约束以及分布式风电和光伏出力区间表达式代入到旋转备用约束中可以得到如式(20)所示的约束<sup>[21-23]</sup>。

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) + \bar{P}_{WT}(t) + \hat{P}_{WT}(t) + P_{grid}^{max} + P_{MT}^{max} + P_{FC}^{max} + \\ & \min[P_{SB}^{max}, (E_{SB}(t-1) - E_{SB}^{min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}] \geq \\ & (1 + \lambda) \left[ \bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) + \bar{P}_{WT}(t) + \hat{P}_{WT}(t) + \right. \\ & \left. P_{SB}(t) + P_{MT}(t) + P_{FC}(t) + P_{cut}(t) + P_{grid}(t) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

基于式(20)可以将  $\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)$  提取出来得到如式(21)所示的约束, 式中只需要  $\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)$  的最大值满足该约束即可, 则模型中原有的旋转备用约束就成立, 所以采用  $\max$  形式进行整理如式(21)所示。

$$\begin{aligned} & \max \hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t) \leq \\ & \frac{\min[P_{SB}^{max}, (E_{SB}(t) - E_{SB}^{min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}]}{\lambda} - \\ & \bar{P}_{PV}(t) - \bar{P}_{WT}(t) + \frac{P_{SB}^{max} + P_{MT}^{max} + P_{FC}^{max} + P_{grid}^{max}}{\lambda} - \\ & \frac{[P_{SB}(t) + P_{MT}(t) + P_{FC}(t) + P_{cut}(t) + P_{grid}(t)](1 + \lambda)}{\lambda} \end{aligned} \quad (21)$$

基于线性对偶理论将式(21)中  $\max$  形式的目标函数转化为  $\min$  形式, 如式(22)所示。

$$\max \hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t) = -\min(-\hat{P}_{PV}(t) - \hat{P}_{WT}(t)) \quad (22)$$

对  $-\min(-\hat{P}_{PV}(t) - \hat{P}_{WT}(t))$  构造拉格朗日函数如式(23)所示, 然后对  $\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)$  求偏导得到式(24)。

$$\begin{aligned} L(\hat{P}_{PV}(t), \alpha(t), \beta(t), \delta(t)) = & -\hat{P}_{PV}(t) - \\ & \hat{P}_{WT}(t) + \alpha(t)[\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)] + \\ & \beta(t)(\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t) - \hat{P}_{PV,min}(t) - \hat{P}_{WT,min}(t)) + \\ & \delta(t)(\hat{P}_{PV,max}(t) + \hat{P}_{WT,max}(t) - \hat{P}_{PV}(t) - \hat{P}_{WT}(t)) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)} L(\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t), \alpha(t), \beta(t), \delta(t)) = \\ -1 + \alpha(t) + \beta(t) - \delta(t) \end{aligned} \quad (24)$$

式中,  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  和  $\delta(t)$  分别为拉格朗日系数。

拉格朗日函数中  $\hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t)$  根据线性对偶理论进行简化, 可以得到式(25)所示的目标函数和式(26)所示的约束条件。

$$\max \hat{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{WT}(t) = \min \left[ \begin{aligned} & \beta(t)(\hat{P}_{PV,min}(t) + \hat{P}_{WT,min}(t)) - \\ & \delta(t)(\hat{P}_{PV,max}(t) + \hat{P}_{WT,max}(t)) \end{aligned} \right] \quad (25)$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } -1 + \alpha(t) + \beta(t) - \delta(t) \\ \beta(t) \geq 0; \delta(t) \geq 0 \end{cases} \quad (26)$$

### 4 主动配电网优化配置算例分析

本文基于 IEEE33 节点标准系统构建主动配电网网络, 其中所需配置容量的各个设备并网节点如图 1 所示。

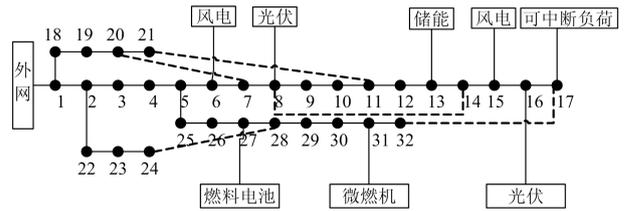


图 1 基于 IEEE33 节点系统的主动配电网网络结构图

Fig. 1 Structural chart of active distribution network based on IEEE33 node system

采用本文所建立的模型对系统中各个设备的并网容量进行配置。针对所建立的模型, 采用 Matlab2012a 平台并基于 Cplex 计算核心进行编程求解。

在鲁棒优化配置模型中, 资金贴现率  $r$  为 8%,  $\Delta t$  取为 1 h。储能自放电系数  $D_{SB}$  为 0.1, 充放电效率  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  均为 0.9, 储能电量上下限取为  $0.1 Q_{SB}$  和  $0.9 Q_{SB}$ <sup>[24-25]</sup>。可中断负荷补偿系数为 3<sup>[26]</sup>。系统分时电价机制如图 2 所示<sup>[27]</sup>, 分布式风电和分布式光伏出力的区间分布如图 3 所示。此外, 主动配电网中拟配置设备的基本参数如表 1 所示。

本文设置主动配电网两种优化配置场景, 其中场景一为主动配电网运行在孤岛模式下, 场景二为主动配电网运行在并网模式下, 在该场景下, 主动配电网不对 PCC 容量进行配置, 优化配置计划中也不计及系统对外网进行的购售电活动。在两种场景下可以得到各个设备的优化配置容量如表 2 所示。

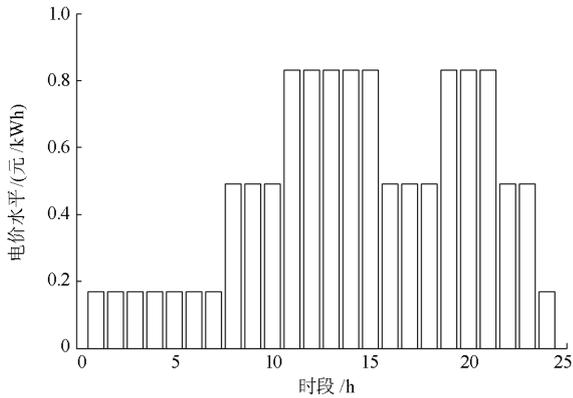


图 2 外网分时电价水平

Fig. 2 TOU power price level of the grid

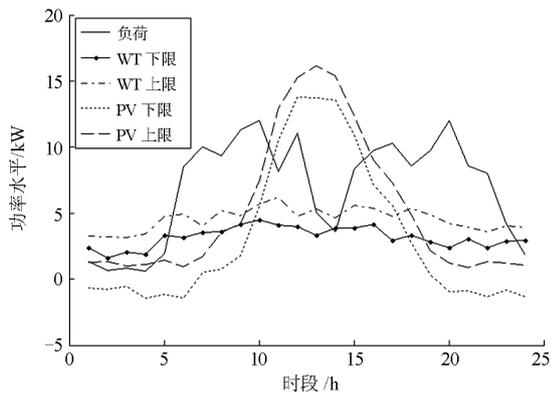


图 3 分布式风力发电和分布式光伏出力的不确定性区间分布

Fig. 3 Uncertainty interval distribution of distributed wind power generation and distributed photovoltaic output

表 1 主动配电网中微电源的性能参数

Table 1 Performance parameters of micro-power supply in active distribution network

微电源类型	微燃机	燃料电池	光伏发电	风力发电	蓄电池储能
寿命/年	25	15	10	20	10
运维成本/(万元/台·年)	0.13	0.11	0.042	0.12	0.03
额定容量/kW	150	240	0.18	30	250
购置费用/万元	6.5	17.2	0.2	60	85
安装费用/万元	0.55	1.2	0.06	3.5	2
设备残值/万元	0.26	0.68	0.08	2.4	3.5

从表 2 的配置结果中可以看出, 场景一和场景二相比, 场景二下总体上主动配电网配置的设备数量较少, 因此综合配置成本上场景二更低, 实际上, 场景一下系统综合配置成本为 1 365.48 万元, 场景二下的系统综合配置成本为 926.74 万元。然而配置

表 2 场景一和场景二下主动配电网设备容量鲁棒优化配置结果

Table 2 Robust optimal allocation of active distribution network equipment capacity under scenarios 1 and 2

	场景一	场景二
微燃机/台	6	5
燃料电池/台	5	4
光伏发电/块	46×30	55×30
风力发电/台	5	7
蓄电池储能/台	4	2
综合配置成本/万元	1 365.48	926.74
供电可靠性指标	0.992	0.999

结果在可控微电源数量和可再生能源数量上的关系存在不同, 场景一离网运行模式下的可控微电源数量配置更多, 这是因为在离网模式下系统失去了外网的支撑, 因此需要更大容量的可控微电源以尽可能提升供电可靠性。对于可再生能源, 由于主动配电网在场景二下对于分布式风电和光伏的消纳能力更强, 可以将剩余电量上网进一步获取收益, 因此主动配电网在场景二下的配置数量反而比场景一下更多。在系统供电可靠性方面, 虽然场景二下综合配置成本更小, 然而主动配电网的供电可靠性指标达到了 0.999, 显著高于场景一下的 0.992。综上所述, 主动配电网在并网运行模式下综合配置成本更低, 具备更优的经济性和可靠性。在一般情况下, 系统都会运行在并网模式下, 因此通常情况下主动配电网优化配置模型在并网模式下运行。

事实上, 可以得到在场景一和场景二的系统设备配置方案下主动配电网典型运行日中的经济调度计划分别如图 4 和图 5 所示。

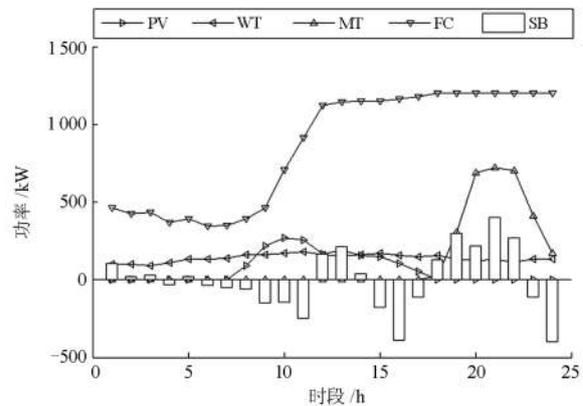


图 4 场景一下在既定配置方案下的系统运行计划

Fig. 4 System operation plan under the established configuration scheme in scenario 1

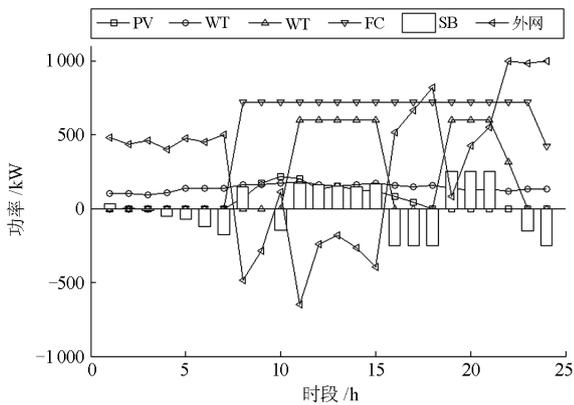


图 5 场景二下在既定配置方案下的系统运行计划  
Fig. 5 System operation plan under the established configuration scheme in scenario 2

为了对比鲁棒优化理论在主动配电网优化配置模型中相比于传统配置方法在处理系统不确定性的效果，以随机机会约束规划法<sup>[28]</sup>(记为方法一)和随机期望值规划法<sup>[29]</sup>(记为方法二)中的配置方法为例，并将本文鲁棒优化配置方法作为方法三，在场景二下对同样的主动配电网制定配置方案。在制定的配置方案下，通过对分布式风电和光伏处理进行不确定性模拟 10 次，计算得到综合配置成本指标对比如表 3 所示。

表 3 鲁棒优化配置相比于传统优化配置方法在主动配电网优化配置中的指标对比

Table 3 Index comparison of robust optimal allocation method with the traditional optimal allocation method in the optimal allocation of active distribution network

运行指标	方法一	方法二	方法三
平均综合配置成本/万元	935.26	931.84	926.74
最大综合配置成本/万元	976.15	983.47	934.06
最小综合配置成本/万元	911.86	912.63	913.76
标准离差率	0.1657	0.1926	0.0374

由表 3 中可以看出，尽管传统的主动配电网优化配置方法下系统综合运行成本的平均值更低，但是综合配置成本的波动性较大，在不利的情况下要远远高于各类方法的平均综合配置成本。然而鲁棒优化可以使得综合配置成本控制在一定的范围之内，其配置方案实际上是已经针对最不利的不确定微源出力情况下进行的，如果主动配电网规划者是一个风险厌恶者，或者在配置的过程中本身需要尽可能规避风险，那么鲁棒优化配置方案就是更好的选择。本文通过鲁棒优化配置给出了主动配电网综合配置成本的平均值和分布，可以为系统规划者揭示经济性和可靠性之间的关系，为决策者提供支持。

## 4 结论

分布式光伏发电和风电由于其出力存在波动性和随机性，其配置容量对经济性的影响也存在不确定性。在主动配电网规划者侧重可靠性而希望尽可能降低配置容量不合理导致的风险时，鲁棒优化能够更加适用于主动配电网优化配置建模。仿真算例表明，主动配电网在并网模式下能够降低系统综合配置成本并提高供电可靠性，此外鲁棒优化得到的系统综合配置成本标准离差率较小，具备较好的鲁棒性，能够适应于不同的配置情形。

## 参考文献

- [1] 马钊, 梁惠施, 苏剑. 主动配电网规划和运行中的重要问题[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1499-1503. MA Zhao, LIANG Huishi, SU Jian. Important issues in planning and operation of active distribution system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1499-1503.
- [2] 庄慧敏, 肖建. 主动配电网的两阶段优化调度模型[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 928-934. ZHUANG Huimin, XIAO Jian. Two-stage optimal schedule model for active distribution network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 928-934.
- [3] 张建华, 曾博, 张玉莹, 等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23. ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [4] DOOSTIZADEH M, GHASEMI H. Day-ahead scheduling of an active distribution network considering energy and reserve markets[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2013, 23(7): 930-945.
- [5] 沙熠, 邱晓燕, 宁雪姣, 等. 协调储能与柔性负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1394-1399. SHA Yi, QIU Xiaoyan, NING Xuejiao, et al. Multiobjective optimization of active distribution network by coordinating energy storage system and flexible load[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1394-1399.
- [6] 石庆均, 江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 76-82. SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.
- [7] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.

- MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [8] 薛美东, 赵波, 张雪松, 等. 并网型微网的优化配置与评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 6-13.  
XUE Meidong, ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, et al. Integrated plan and evaluation of grid connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 6-13.
- [9] 陈健, 刘玉田, 张文, 等. 基于博弈论的配电网中多级微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 45-52.  
CHEN Jian, LIU Yutian, ZHANG Wen, et al. Optimal sizing analysis of multilevel microgrids in distribution network based on game theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 45-52.
- [10] 周楠, 樊玮, 刘念, 等. 基于需求响应的光伏微网储能系统多目标容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1709-1716.  
ZHOU Nan, FAN Wei, LIU Nian, et al. Batter storage multi-objective optimization for capacity configuration of PV-based microgrid considering demand response[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1709-1716.
- [11] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [12] 翁国庆, 张有兵, 戚军, 等. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的 V2G 可用容量评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 36-45.  
WENG Guoqing, ZHANG Youbing, QI Jun, et al. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 36-45.
- [13] 马燕峰, 陈磊, 李鑫, 等. 基于机会约束混合整数规划的风火协调滚动调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 127-132.  
MA Yanfeng, CHEN Lei, LI Xin, et al. Rolling dispatch of wind-coal coordinated system based on chance-constrained mixed integer programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 127-132.
- [14] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.  
ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.
- [15] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 34-42.  
JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generator allocation method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 34-42.
- [16] BEYER H G, SEND HOFF B. Robust optimization comprehensive survey[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(33-34): 3190-3218.
- [17] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 47-56.  
MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 47-56.
- [18] 王荟敬, 卢志刚, 赵号, 等. 计及风电最优逆鲁棒指标的双层优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 86-92.  
WANG Huijing, LU Zhigang, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel optimization dispatch considering wind power optimal inverse robust index[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 86-92.
- [19] WU W C, CHEN J H, ZHANG B M, et al. A robust wind power optimization method for look-ahead power dispatch[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 507-515.
- [20] 刘立衡, 韩璞, 王东风, 等. 混沌遗传算法研究及其在经济负荷分配问题中的应用[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3): 93-96.  
LIU Liheng, HAN Pu, WANG Dongfeng, et al. A new chaos genetic algorithm and its application in function optimization[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2010, 37(3): 93-96.
- [21] 仇梦林, 艾小猛, 文劲宇. 含风电电力系统的主从博弈经济调度[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 80-88.  
ZHANG Menglin, AI Xiaomeng, WEN Jinyu. Economic dispatch for power system integrated with wind power using Stackelberg game[J]. Control Theory and

Applications, 2018, 35(5): 80-88.

[22] 黄庶, 林舜江, 刘明波. 含风电场和抽水蓄能电站的多目标安全约束动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 112-121.  
HUANG Shu, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi-objective security constrained dynamic optimal dispatch with wind farms and pumped storage stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 112-121.

[23] 丁浩, 高峰, 刘坤, 等. 基于鲁棒优化的含风电工业微电网经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 160-167.  
DING Hao, GAO Feng, LIU Kun, et al. An economic dispatch model in an industrial microgrid with wind power based on robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 160-167.

[24] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.  
WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.

[25] 洪博文, 胡静, 王建国, 等. 面向能源互联网的用户侧分布式储能价值评估[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 113-120, 130.  
HONG Bowen, HU Jing, WANG Jianguo, et al. Energy internet oriented evaluation of distributed energy storage utility in user-side[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 113-120, 130.

[26] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.  
HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36.

[27] 杨新民. 智能控制技术在火电厂应用研究现状与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 1-9.  
YANG Xinmin. Application status and prospect of intelligent control technology in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 1-9.

[28] 刘博, 姜秉梁, 郝宁, 等. 分时阶梯电价-微电网联合优化调度的不确定二层规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 75-83.  
LIU Bo, JIANG Bingliang, HAO Ning, et al. Coordinated optimization of TOU & tiered pricing and optimal scheduling model combining microgrid under uncertain bilevel programming[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 75-83.

[29] 马天祥, 程肖, 贾伯岩, 等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 48-57.  
MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 48-57.

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-12-23

作者简介:

凌万水(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网; E-mail: lingws2010@foxmail.com

刘刚(1988—), 男, 学士学位, 工程师, 主要研究方向为智能配电网可靠性提升与主动优化控制。E-mail: 741513796@qq.com

(编辑 张爱琴)