

DOI: 10.7667/PSPC161360

## 考虑微网综合性能的并网型微网优化配置模型

丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 潘浩

(安徽省新能源利用与节能重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 针对并网型微网, 提出了包含可靠性、自治能力、交互功率波动性、环境友好度、联络线及新能源利用率的微网综合性能评估指标体系, 并将其转化为约束形式。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, 构建了微网优化配置模型。基于某地区实际负荷和气象数据, 分析了各类指标约束对微网容量配置的影响及不同指标间的关系。分析结果表明该指标体系提高了并网型微网优化配置结果的合理性, 增强了优化模型工程应用的灵活性, 满足用户的多样化需求。

**关键词:** 交互功率波动性; 综合性能; 评估指标; 总规划成本; 多样化

### Optimal planning model of grid-connected microgrid considering comprehensive performance

DING Ming, LIU Xinyu, XIE Jiaolong, PAN Hao

(Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China)

**Abstract:** For grid-connected microgrid, this paper proposes an evaluation index system, which contains reliability, autonomy, regulation of interactive power, environment-friendly degree and utilization of tie-line and renewable energy, and then translates them into the form of constraint. In conjunction with the output characteristic of distributed generators, and taking the lowest total cost as objective function, it constructs the optimal planning model of microgrid. Based on the real data of load and meteorological, this paper analyzes the effect of index constraints to capacity allocation of microgrid, and the relationship between different indicators. The results show that the index system improves the rationality of the optimized allocation and enhances the flexibility of the optimization model, meeting the diversification demand of users.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015A050104).

**Key words:** regulation of interactive power; comprehensive performance; index system; total planned cost; diversification

## 0 引言

随着愈发严峻的环境压力和能源危机, 以可再生能源为代表的分布式发电开始备受关注<sup>[1-3]</sup>。微网作为分布式发电的有效利用形式, 在充分发挥分布式电源各项优势和提高电力系统灵活性等方面都具有巨大潜力, 是未来电网的重要组成部分<sup>[4]</sup>。而微网装置的容量配置则是微网规划阶段中需首要考虑的问题。

不同于大电网, 除了经济成本之外, 微网的容量配置还应考虑以下因素:

1) 自治能力。作为大电网的有益补充, 微网既可以通过联络线与大电网并网运行, 也可以在大电

网故障或计划孤岛状态时独立运行<sup>[5]</sup>。因此, 微网必须具备一定的自治能力以保证孤岛状态下关键负荷的供电。

2) 联络线功率波动性。微网中一般包含一定比例的风电机组和光伏列阵, 其出力受气候状况的影响而呈现很强的波动性和随机性, 若直接接入大电网, 势必会对电网的稳定性造成冲击<sup>[6]</sup>; 而且大波动功率流经配电网线路时, 会造成一定的有功损耗<sup>[7]</sup>。因此, 必须对联络线的波动性进行限制, 以保证大电网的电能质量。

3) 环境友好度。提供“绿色电力”, 实现“节能减排”是发展微网的一个重要原因。而从大电网购电或配置微型化石燃料机组都会排放污染气体, 对环境造成影响。所以需根据当地政策对微网的环境友好度提出要求。

4) 微网装置利用率。微网装置安装费用较高<sup>[8]</sup>,

为避免资源浪费, 降低冗余投资, 应保证其具有一定的利用率。

5) 可靠性。微网必须满足供电可靠性的要求。

目前, 微网优化配置的研究大多是关于独立型微网的, 文献[9]针对独立风光柴储微网系统, 建立了各个电源的数学模型; 文献[10]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[11]建立了微网的成本-收益模型, 并采用聚类将年度气象数据进行缩减, 减少了计算量。对于并网型微网, 文献[12]考虑联络线接入费用, 并在多重随机场景下修正配置方案, 提高了微网的鲁棒性; 文献[13]在优化配置中限制微网系统从主网的购电量, 以减小对环境效益的影响。但以上文献均未考虑联络线功率波动所带来的负面效果。

在上述研究的基础上, 本文以经济性最优为目标函数, 建立了并网型微网的优化配置模型, 对配置结果提出了更为系统的微网综合评估指标, 并将评估指标转换为约束条件纳入优化模型中, 使优化结果更符合实际工程需要并更具有操作性。最后以某地区实际气象和负荷数据为例, 分析了各评估指标约束设定的必要性和其对微网配置结果的影响。

## 1 微网电源建模

本文所考虑微网由风力发电机(WT)、光伏电池(PV)、柴油发电机(DE)、蓄电池(ES)及逆变器和控制器组成, 并由单一联络线(TL)与配电网相连进行电量交换。首先, 根据不同种类分布式电源的出力特性, 建立微网电源系统的数学模型。

### 1.1 风力发电机模型

风力发电机的输出功率是由风速及风机类型所决定的, 单台风机理论出力  $p_w^{t*}$  与风速  $v(t)$  的近似关系如式(1)所示<sup>[14]</sup>。

$$p_w^{t*} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) \leq v_{ci} \\ p_{wn} \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, & v_{ci} < v(t) \leq v_r \\ p_{wn}, & v_r < v(t) \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} < v(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  表示时间;  $v_{ci}$ 、 $v_r$ 、 $v_{co}$  分别为所选风机的切入风速、额定风速及切出风速;  $p_{wn}$  为风机的额定功率。

### 1.2 光伏电池出力模型

光伏电池的理论输出功率  $p_v^{t*}$  很大程度上受到温度及光照强度的影响<sup>[15]</sup>。

$$p_v^{t*} = p_{vn} \frac{G(t)}{G_{STC}} \left[ 1 + k \left( T_h(t) + 30 \times \frac{G(t)}{1000} - T_{STC} \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $p_{vn}$  为标准测试条件(光辐射强度  $G_{STC}=1000 \text{ W/m}^2$ , 环境温度  $T_{STC}=25^\circ\text{C}$ )下的额定功率;  $G(t)$  为实际光照强度;  $T_h(t)$  为光伏电池表面温度;  $k$  为功率温度系数, 取 $-0.0047$ 。

### 1.3 柴油发电机模型

根据所选柴油发电机的燃料-功率曲线特性, 柴油机的输出功率  $p_{die}^t$  可表示为<sup>[16-17]</sup>

$$V(t) = a \cdot p_{die}^t + b \cdot p_{dien} \quad (3)$$

式中:  $V(t)$  为  $t$  时刻柴油发电机的耗油量, L;  $a$  为柴油机燃料与功率之间关系曲线的斜率, L/kWh;  $b$  为柴油机单位功率的空载耗油量, L/kWh;  $p_{dien}$  为柴油机的额定功率。

## 2 并网型微网容量优化配置模型

### 2.1 目标函数

由于技术问题, 现阶段微网装置的整体成本仍然较高, 因此在满足供电可靠性的基础上, 使系统规划的总成本最低是微网优化配置的首要目标。

$$\min C_{DG} = C_{CP} + C_{OM} + C_F + C_b - C_s \quad (4)$$

式中:  $C_{DG}$  为微网配置总成本;  $C_{CP}$ 、 $C_{OM}$ 、 $C_F$  分别为微网设备的等年值投资费用、年运行管理费用、年燃料费用;  $C_b$  为微网从配电网购电所支付的费用;  $C_s$  为微网向配电网售电的收益。

#### 2.1.1 等年值投资费用

微网装置的等年值投资费用与具体安装项目及项目的使用年限有关<sup>[18]</sup>。

$$C_{CP} = \sum_{m=1}^M N_m C_{CPm} \frac{r(1+r)^{Y_m}}{(1+r)^{Y_m} - 1} \quad (5)$$

式中:  $M$  为微网设备的种类;  $N_m$ 、 $C_{CPm}$ 、 $Y_m$  分别为第  $m$  类微网装置的安装台数、单台设备安装成本及寿命年限;  $r$  为折现率, 本文取为 8%。

#### 2.1.2 年运行管理费用

微网装置的运行管理费用主要与实际发电电量有关。

$$C_{OM} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_m} K_{m,OM} p_{m,i}^t \quad (6)$$

式中:  $T$  为总仿真时间;  $K_{m,OM}$  为第  $m$  类微网装置的运行管理系数;  $p_{m,i}^t$  为第  $m$  类第  $i$  台微网装置  $t$  时刻的实际出力。

#### 2.1.3 年燃料费用

微网中柴油机的运行需要消耗化石燃料, 根据

目前柴油的价格, 系统的年燃料费用为

$$C_F = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{DE}} K_F V_k(t) \quad (7)$$

式中:  $K_F$  为柴油的单价, 元/L;  $V_k(t)$  是第  $k$  台柴油机组  $t$  时刻的耗油量。

#### 2.1.4 微网与配电网的交互成本

微网与配电网的交互成本包括微网从主网购电的成本和向主网售电的收益。

$$C_b = \sum_{t=1}^T K_g(t) p_{\text{buy}}^t \quad (8)$$

$$C_s = \sum_{t=1}^T K_g(t) p_{\text{sell}}^t$$

式中:  $p_{\text{buy}}^t$ 、 $p_{\text{sell}}^t$  分别为  $t$  时刻微网从主网的购电功率及向主网售电的功率;  $K_g(t)$  为  $t$  时刻的实时电价。

## 2.2 运行约束条件

### 2.2.1 蓄电池约束

为保证蓄电池的安全和寿命, 在蓄电池的运行过程中需满足以下两个约束。

#### 1) 蓄电池电量约束

电池的过度充放电都会对蓄电池造成损伤, 因此需对电池的蓄电量进行约束。

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (9)$$

式中:  $E_{\min}$ 、 $E_{\max}$  分别是储能充放电过程中允许的最小电量和最大电量;  $E_t$  是储能在  $t$  时刻的电量值。

#### 2) 充放电功率约束

充放电功率也会影响电池的寿命, 通常, 蓄电池每小时的充放电功率不能超过其最大容量的 20%<sup>[19]</sup>。

$$-0.2E_n \leq p_c^t \leq 0 \quad (10)$$

$$0 \leq p_d^t \leq 0.2E_n$$

式中:  $E_n$  为蓄电池额定电量;  $p_c^t$ 、 $p_d^t$  分别为蓄电池  $t$  时刻的充放电功率。

蓄电池充放电功率与电量的关系为

$$E_t = E_{\text{ini}} - \int (p_d^t / \eta_d) dt - \int (\eta_c p_c^t) dt \quad (11)$$

式中:  $E_{\text{ini}}$  为蓄电池初始电量;  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别为充放电效率。

### 2.2.2 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_{WT}} p_{w,i}^t + \sum_{j=1}^{N_{PV}} p_{v,j}^t + \sum_{k=1}^{N_{DE}} p_{\text{die},k}^t + \sum_{l=1}^{N_{ES}} (p_{c,l}^t + p_{d,l}^t) + \quad (12)$$

$$p_{\text{buy}}^t - p_{\text{sell}}^t = p_{\text{load}}^t - p_{\text{cut}}^t$$

式中:  $p_{w,i}^t$ 、 $p_{v,j}^t$  分别为第  $i$  台风机和第  $j$  台光伏电池  $t$  时刻的实际并网功率;  $N_{WT}$ 、 $N_{PV}$ 、 $N_{DE}$ 、 $N_{ES}$  分别为风机、光伏、柴油机和蓄电池的装机台数;

$p_{\text{load}}^t$  为  $t$  时刻的微网负荷;  $p_{\text{cut}}^t$  为  $t$  时刻的失负荷功率。

### 2.2.3 电源出力约束

#### 1) 风电机组和光伏电池出力约束

对于风电机组和光伏电池, 其输出功率约束为

$$0 \leq p_w^t \leq p_w^{t*} \quad (13)$$

$$0 \leq p_v^t \leq p_v^{t*}$$

#### 2) 柴油机出力约束

柴油机在低功率运行时, 发电效率较低, 且柴油消耗量接近满载, 通常柴油机的最小出力设为额定功率的 30%<sup>[20]</sup>:

$$p_{\text{die},\min} \leq p_{\text{die}}^t \leq p_{\text{die},\max} \quad (14)$$

### 2.2.4 联络线传输功率约束

受限于联络线的物理传输容量, 微网与配电网的交互功率需小于所配置联络线的额定容量。

$$0 \leq p_{\text{buy}}^t \leq u_g^t p_{\text{gn}} \quad (15)$$

$$0 \leq p_{\text{sell}}^t \leq (1 - u_g^t) p_{\text{gn}}$$

式中:  $p_{\text{gn}}$  为所配置联络线额定容量;  $u_g^t$  是售购电状态系数, 0 为售电, 1 为购电。

## 2.3 评价指标约束条件

确保用户供电可靠性、提高资源利用率、充分发挥新能源的清洁特性和降低分布式电源对大电网的冲击是发展微网的目的所在。为满足这些指标要求, 通常有两种方法: 第一是将各指标乘以经济惩罚系数加入到目标函数中, 以改变配置方案, 该方法中各指标的结果取决于其惩罚系数的取值, 而其取值大小带有主观因素; 第二是将各指标以约束的形式纳入优化模型中, 规划者可根据有关规范或需求直接对各项指标加以限制, 降低了计算量, 更符合实际工程需要并更具有操作性。因此本文选取第二种方法进行微网方案配置。

### 2.3.1 自治能力约束

本文使用自平衡度反映微网独立运行的能力:

$$S_a = \frac{\sum_{t=1}^T (p_{\text{load}}^t - p_{\text{buy}}^t)}{\sum_{t=1}^T p_{\text{load}}^t} \geq S_{\min} \quad (16)$$

式中,  $S_{\min}$  为微网自平衡度最低限值。

### 2.3.2 交互功率波动约束

微网与主网间交互功率的定义为

$$p_g^t = p_{\text{buy}}^t - p_{\text{sell}}^t \quad (17)$$

本文使用波动率及波动方差两个指标来反映交互功率的波动性。

$$|p_g^t - p_g^{t-1}| \leq S\% S_n \quad (18)$$

$$D = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (p_g^t - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T p_g^t)^2 \leq D_{\max} \quad (19)$$

式中:  $S\%$  为电网能承受的最大功率变化率;  $S_n$  为微网总装机容量;  $D$  为交互功率方差;  $D_{\max}$  为系统交互功率波动方差限值。

### 2.3.3 联络线利用率约束

为提高电网资产利用率, 应该对微网与配网间联络线利用率进行约束。

$$U_g = \frac{\sum_{t=1}^T (p_{\text{buy}}^t + p_{\text{sell}}^t)}{p_{\text{gn}} \cdot T} \geq U_{\text{gmin}} \quad (20)$$

式中:  $U_g$  是联络线利用率;  $U_{\text{gmin}}$  是联络线利用率最低限值。

### 2.3.4 环境友好性约束

在考虑向主网购售电对环境效益造成影响的前提下, 以治污总费用表征微网系统的环境友好度。

$$C_{\text{env}} = \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \beta_r (\alpha_{r,g} p_g^t + \sum_{k=1}^{N_{\text{DE}}} \alpha_{r,\text{die}} p_{\text{die},k}^t) \leq C_{\text{env,max}} \quad (21)$$

式中:  $R$  为排放的污染气体总类;  $\beta_r$  表示不同污染气体的治理费用;  $\alpha_{r,g}$ 、 $\alpha_{r,\text{die}}$  分别表示主网和柴油机单位发电量的污染气体排放系数;  $C_{\text{env,max}}$  为系统治污费用上限。

### 2.3.5 新能源利用率约束

风机和光伏属于清洁能源, 在运行过程中应优先调度, 因此必须保证新能源发电利用率, 避免造成资源浪费。

$$U_r = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{WT}}} p_{w,i}^t + \sum_{j=1}^{N_{\text{PV}}} p_{v,j}^t}{N_{\text{WT}} p_w^{t*} + N_{\text{PV}} p_v^{t*}} \geq U_{r,\text{min}} \quad (22)$$

式中,  $U_{r,\text{min}}$  为新能源利用率最低限值。

### 2.3.6 供电可靠性约束

微网的优化配置首先要求系统尽可能满足负荷的需要, 为探讨供电可靠性水平对微网配置结果的影响, 在某些极端条件下, 本文允许切断部分非重要负荷, 并使用电力不足概率  $L_{\text{OEP}}$  反映整个系统的供电可靠性。

$$L_{\text{OEP}} = \sum_{t=1}^T p_{\text{cut}}^t / \sum_{t=1}^T p_{\text{load}}^t \leq L_{\text{max}} \quad (23)$$

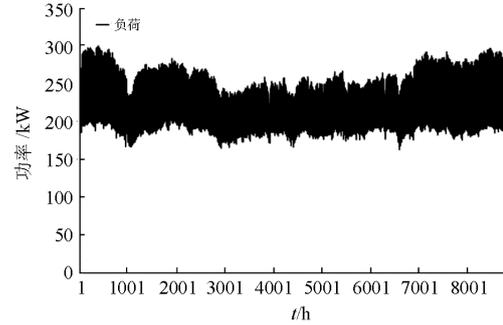
式中,  $L_{\text{max}}$  为系统允许最大缺电概率。

## 3 算例

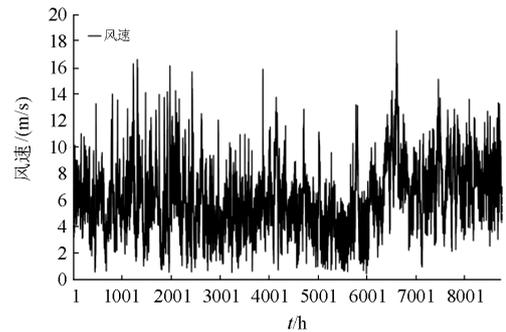
### 3.1 算例介绍

本节以某地区历史年度负荷及气象数据为例。

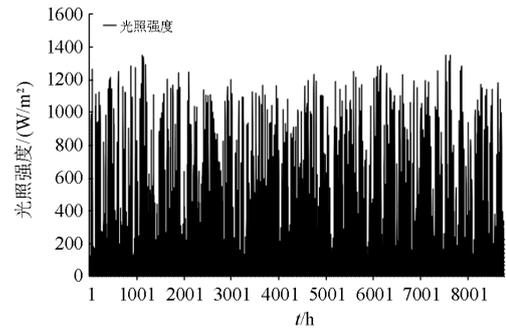
如图 1(a)所示, 该地区负荷峰值为 300 kW, 平均负荷 226 kW, 全年负荷总量为 1986.61 MWh。且气象数据显示该地区四季分明, 春季和冬季气温较低, 夏季光照强度明显增强, 但风速相对偏小。



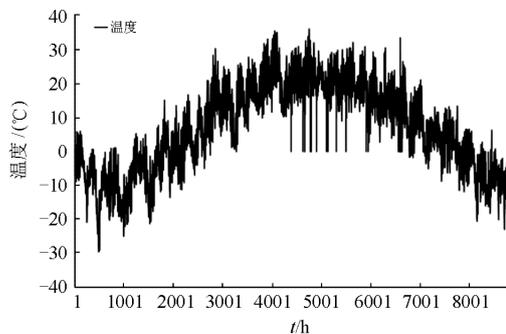
(a) 负荷曲线



(b) 风速曲线



(c) 光照曲线



(d) 温度曲线

图 1 微网所在地区负荷及气象数据

Fig. 1 Meteorological and load conditions at the location of microgrid

结合实际工程技术情况, 本文选取的微网装置及其参数如表 1 所示, 其中, 安装成本为机组及其逆变器和控制器在内的总费用。所选风机切入风速  $v_{ci} = 2.5 \text{ m/s}$ 、额定风速  $v_r = 12 \text{ m/s}$ 、切出风速  $v_{co} = 18 \text{ m/s}$ ; 蓄电池初始电量设为  $0.5E_n$ , 电量变化范围为  $0.2E_n \sim 0.9E_n$ , 充放电效率均取为 0.87; 柴油单价取 7.7 元/L, 柴油机与主网的污染气体排放系数及治理费用如表 2 所示。同时, 本文采用实时电价, 具体数据参见文献[8]。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Cost and relative expense coefficients of the power source

装置	单机容量	安装成本	运行管理系数/(元/kWh)	使用年限/年
风机	6 kW	4500 元/kW	0.0296	10
光伏电池	0.055 kW	9300 元/kW	0.0096	20
蓄电池	5 kW, 24 kWh	3320 元/kWh	0.009	10
柴油机	15 kW	630 元/kW	0.088	10

表 2 污染气体排放系数及治理费用

Table 2 Parameters of pollutant discharge

污染气体类型	治理费用/(元/kg)	污染物排放系数/(g/kWh)	
		柴油机	主网
NO <sub>x</sub>	62.964	9.890	1.6
CO <sub>2</sub>	0.210	649	889
SO <sub>2</sub>	14.842	0.206	1.8

### 3.2 单纯经济最优配置方案分析

经济性最优是微网优化配置的目标函数, 在系统最大缺电概率  $L_{max} = 0.1\%$  的前提下, 暂不考虑其他约束要求, 所得微网配置结果如表 3、表 4 所示。

表 3 经济最优方案微网配置结果

Table 3 Configuration under economic optimal scheme

风机台数	光伏电池个数	蓄电池个数	柴油机组台数	联络线额定功率/kW
$N_{WT}$	$N_{PV}$	$N_{ES}$	$N_{DE}$	
4	0	0	0	274.63

表 4 经济最优配置方案各项指标

Table 4 Various indexes under economic optimal scheme

总成本/元	电力不足率	自平衡度	环境费用/元	交互功率方差	联络线利用率	新能源利用率
715 353.25	0.001	0.13	611 291.52	1101.16	0.82	0.99

如表 3 所示, 由于目前分布式电源较高的安装

成本, 使得微网系统的经济效益难以与主网系统相抗衡, 因此在只考虑经济性的状况下, 系统选择大量从主网购电以满足负荷需求的方案, 自平衡度  $S_a = 0.13$ , 而从配电网大量购电也使得环境惩罚费用过高, 未能发挥分布式电源的优势, 这显然不符合微网发展的本意, 因此在并网型微网的规划配置中, 必须对微网的自平衡度加以约束。

### 3.3 自平衡度约束下配置方案分析

不同自平衡度约束下微网规划配置结果如图 2、图 3 所示。

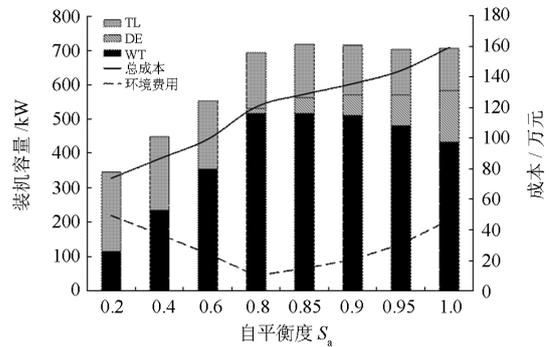


图 2 不同自平衡度下微网配置结果

Fig. 2 Configuration under different self-balancing levels

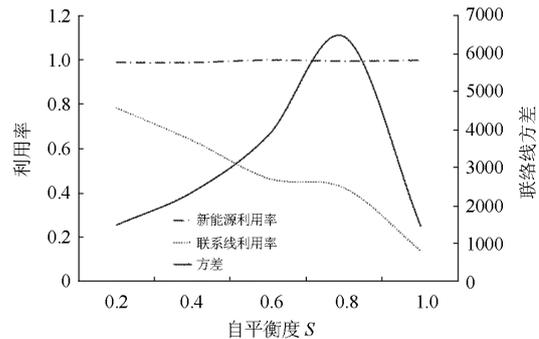


图 3 不同自平衡度下各项指标

Fig. 3 Various indexes under different self-balancing levels

如图 2 所示, 随着自平衡度  $S_a$  的提高, 微网总装机容量增加, 首先体现在风机装机台数的不断上升, 这是因为相对于光伏电池, 风机装机费用较低, 且风机运行过程中不需消耗燃料。由于新能源出力具有很强的随机性, 因此随着新能源出力的增加, 系统必须配置一定的可控装置用以平衡新能源出力。

为反映新能源出力的增加对微网配置结果的影响, 本文设定负荷与新能源出力之差为等效负荷, 在自平衡度约束为 0.8 时, 任意选取 3 天作为典型日, 分析新能源出力对负荷波动性的影响, 如图 4 所示。

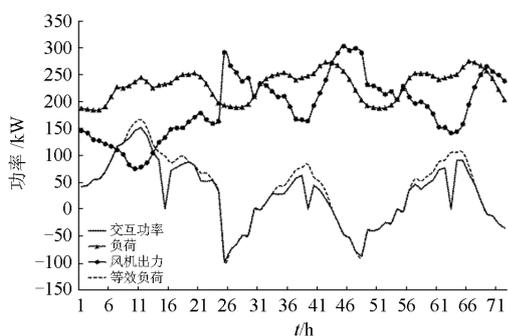


图4 自平衡度 0.8 下随机 3 d 功率曲线

Fig. 4 Power curves of random 3 d under 0.8 self-balancing level

由图 4 可以看出, 相对于原始负荷, 等效负荷的波动性大大增加。为满足功率平衡约束, 在自平衡度 0~0.8 时, 从图 2 和图 4 可以看到, 由于经济性原因, 系统选择使用联络线承担等效负荷的波动, 这也造成交互功率方差的不断增加; 而当自平衡度处于 0.8~1 时, 较高的自平衡度要求造成微网购电量不断减少(图 5), 联络线额定功率下降, 导致对微网系统的调节能力不足, 因此风机装机容量不再增加, 甚至降低, 以减少等效负荷的波动, 同时微网开始选用配置柴油机组的方案来平衡等效负荷, 也使得联络线波动率开始下降。

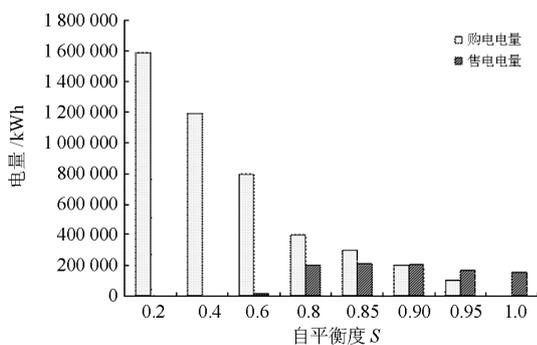


图5 不同自平衡度下购售电量变化

Fig. 5 Purchase and sale of electricity under different self-balancing levels

从经济性方面分析, 虽然在高自平衡度下微网已经开始向配电网售电以赚取费用, 但由于分布式电源高昂的装机成本, 随着自平衡度的提高, 系统总配置成本仍呈上升趋势。

从环境友好度方面分析, 由于风电装机容量的增加, 环境惩罚费用在自平衡度取 0.8 时达到最低值; 而从联络线角度分析, 在自平衡度超过 0.8 后, 联络线利用率又出现大幅下降, 因此, 本文选定 0.8 的自平衡度作为后续分析的基础。

### 3.4 交互功率波动性约束下配置方案分析

由图 3 可以看到, 由于系统依靠联络线来平衡等效负荷, 交互功率的波动性始终处在一个较高水平, 这种较高波动性的功率会对大电网造成一定的冲击, 因此必须对交互功率方差和波动率进行限制。选取自平衡度为 0.8, 在此条件下, 分析交互功率波动性约束对配置结果的影响。

首先, 根据电网承受范围, 将波动率设为 30%, 微网配置结果如表 5、表 6 所示。

表 5 波动率约束下微网配置结果

Table 5 Configuration under constraint on power fluctuations

风机台数 $N_{WT}$	光伏电池个数 $N_{PV}$	蓄电池个数 $N_{ES}$	柴油机台数 $N_{DE}$	联络线额定功率/kW
69	0	0	5	97.063

表 6 波动率约束下各项指标

Table 6 Various indexes under constraint on power fluctuations

总成本/元	电力不足率	自平衡度	环境费用/元	交互功率方差	联络线利用率	新能源利用率
1 292 461.87	0.001	0.8	304 377.80	2477.60	0.54	0.99

以此为基础, 不同交互功率方差下微网配置结果如图 6、图 7 所示。

由图 7 可见, 随着交互功率方差的减小, 微网售电电量逐渐下降, 而由于经济性原因, 购电电量基本保持不变, 因此交互功率更多地呈现正值, 从而整体波动性降低。正是因为售电电量的下降, 观察图 6 可知, 微网总装机容量略有降低, 具体表现为风机容量下降, 而柴油机装机台数上升, 这也使得联络线所需承担的波动性进一步降低。

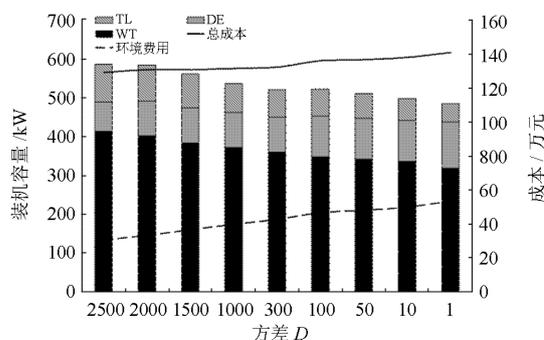


图6 不同交互功率方差下微网配置结果

Fig. 6 Configuration under different variance of interactive power

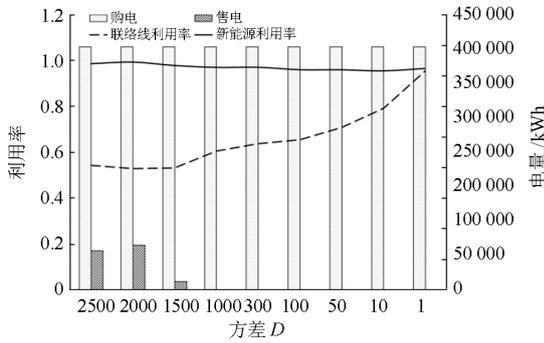


图 7 不同交互功率方差下购售电量结果

Fig. 7 Purchase and sale of electricity under different variance of interactive power

随着联络线所需承担总电量的下降及其稳定性的增加,交互功率在特殊点出现极大值的情况减少,因此如图 7 所示,联络线额定功率逐渐降低,且其利用率不断提高。

从经济型方面分析,虽然售电电量的减少使得微网总成本略有提高,但联络线额定功率的大幅下降也使得线路建设工程节省了大量费用。因此,在实际的微网配置中,应根据所节省的联络线费用、联络线利用率要求和当地配电网的稳定性要求来确定交互功率方差和波动率的限值。

本文设定联络线最低利用率  $U_{gmin}=70\%$ , 因此,以 50 的交互功率方差作为后续分析的基础。

### 3.5 环境友好性约束下配置方案分析

由以上分析可知,由于经济性等原因,微网从主网大量购电,同时配置了一定柴油机组,这就加大了污染物的排放量,而在环境要求较高的场合,必须对这一情况进行限制。

在自平衡度 0.8,交互功率方差 50 的基础上,分析不同治污费用约束时微网配置结果的变化。

#### 1) 方案 1: 不考虑新能源利用率约束

在不考虑新能源利用率时,随着环境要求的提高,微网配置结果如图 8、图 9 所示,风机和蓄电池的装机容量迅速增加,柴油机组装机台数有所下降,同时光伏台数一直维持在较低水平,这是因为现阶段光伏安装成本过高,使得系统放弃光伏电池,而选择安装更多的风机来降低污染物的排放量。

观察图 8 可得,随着治污费用的下降,新能源利用率也逐渐降低,在治污费用小于 25 万时,新能源利用率已经低于 80%,造成资源浪费,因此在考虑环境要求的同时,还必须对新能源利用率进行约束。

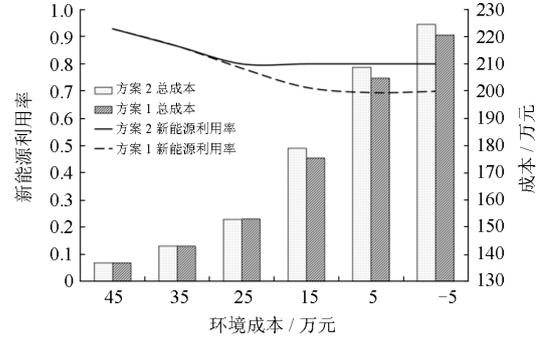


图 8 治污费用约束下配置总成本

Fig. 8 Total cost under the constraint of pollution treatment costs

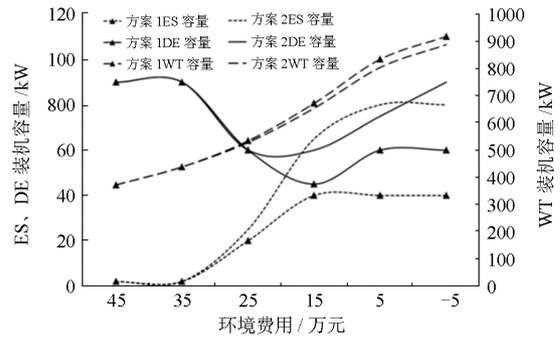


图 9 治污费用约束下微网配置结果

Fig. 9 Configuration under the constraint of pollution treatment costs

#### 2) 方案 2: 考虑新能源利用率约束

设置新能源利用率最低限值  $U_{rmin}=80\%$ 。微网配置结果如图 8、图 9 所示。从图 9 可以看出,相比于方案 1,在考虑新能源利用率约束时,微网的风机装机容量略有下降,而蓄电池台数大幅增加,同时柴油机组装机台数也有一定上升。这是因为所选的蓄电池装机成本较高,在没有新能源利用率约束时,根据经济性的目标函数,与加装更多的蓄电池以保证新能源利用率的方案相比,系统选择增加一定风机装机容量并弃掉部分风电的方案来提高风电的总并网电量。由图 8 可得,方案 1 经济性优于方案 2,但会造成风电资源的浪费,不符合新能源优先调度的原则。

观察图 8 可知,无论方案 1 还是方案 2,随着环境要求的不断提高,微网总配置成本均大幅上升。因此,必须根据当地环境政策,准确制定系统治污费用上限  $C_{env,max}$ ,避免出现微网配置经济性过低的现象。本文选取方案 2 中 150 000 元的系统治污费用作为上限。

### 3.6 不同可靠性约束下的配置方案分析

在上述分析的基础上, 进一步讨论可靠性约束变化对并网型微网配置结果的影响。

如图 10、图 11 所示, 随着电力不足概率的下降, 联络线功率有一定的增加, 而微网内部总装机容量基本维持不变, 同时购电电量有所上升, 使得微网配置的总成本也略有提高。

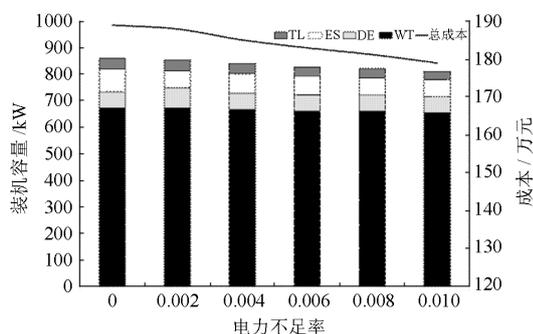


图 10 不同电力不足率下微网配置结果

Fig. 10 Configuration under different  $L_{max}$

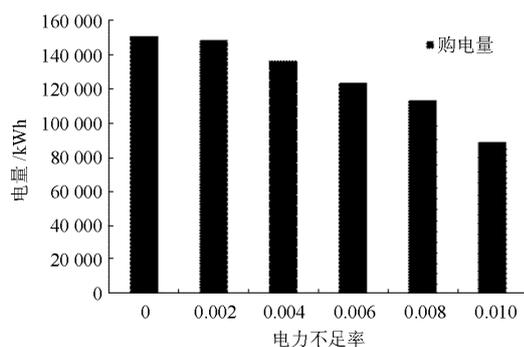


图 11 不同电力不足率下购售电量结果

Fig. 11 Purchase and sale of electricity under different  $L_{max}$

这说明随着可靠性要求的提高, 系统倾向于从主网购买更多电量, 而不是增加内部装机容量来满足可靠性的要求。因此, 相比独立型微网高可靠性下大幅增加的配置成本<sup>[9-10]</sup>, 并网型微网的投资冗余度大大降低。同时, 并网型微网可与主网互为备用, 供电可靠性高于独立型微网。

## 4 结论

本文将微网性能评估指标以约束形式纳入并网型微网优化配置模型, 通过算例验证, 得到了以下结论:

- 1) 高昂的装机成本使得现阶段微网的经济效益难以与大电网相抗衡。
- 2) 交互功率波动率的下降可大幅降低联络线的额定容量, 并提高其利用率, 节省电网资产。

3) 微网的环境效益是以其经济性为代价的, 而且当储能装置成本较高时, 环境要求的提高会造成新能源利用率的下降。

本文所建立的优化配置模型和性能评估指标体系为并网型微网的规划提供了一定的参考。

## 参考文献

- [1] 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 Shun, 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.
- [2] 张彼德, 何頔, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.  
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.
- [3] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.  
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [4] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.  
ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 43(21): 93-98.
- [5] 江岳春, 邢方方, 庞振国, 等. 基于机会约束规划的微网运行备用优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 100-106.  
JIANG Yuechun, XING Fangfang, PANG Zhenguo, et al. Optimization configuration of operating reserve in microgrid based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 100-106.
- [6] 钟嘉庆, 叶治格, 卢志刚. 分布式发电注入容量与接入位置的优化配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 50-55.  
ZHONG Jiaqing, YE Zhige, LU Zhigang. Analysis of optimal allocation of penetration level and interconnected location of DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 50-55.

- [7] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-96.  
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-96.
- [8] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [9] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.  
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [10] 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.
- [11] 韩璐, 李凤婷, 周二雄, 等. 基于成本-收益的微网分布式能源优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 388-396.  
HAN Lu, LI Fengting, ZHOU Erxiong, et al. The distributed energy optimization configuration of microgrid based on cost-benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 388-396.
- [12] 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, ZHAN Xuesong, et al. Integrated plan and evaluation of grid connected microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 6-13.
- [13] ARDAKANI F J, RIAHY G, ABEDI M. Optimal sizing of a grid-connected hybrid system for north-west of Iran-case study[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering: IEEE, 2010: 29-32.
- [14] 余民, 杨旻宸, 蒋传文, 等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 100-104, 135.  
YU Min, YANG Minchen, JIANG Chuanwen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104, 135.
- [15] BOROWY B S, SALAMEH Z M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(2): 367-375.
- [16] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 78-82.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Steady model and operation optimization for microgrids under centralized control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 78-82.
- [17] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modeling and online optimal management of microgrid using multi-objective optimization[C] // Proceedings of International Conference on Clean Electrical Power, 2007: 148-153.
- [18] 胡骅, 徐冲, 吴汕, 等. 影响用户侧分布式发电经济性因素分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 29-33.  
HU Hua, XU Chong, WU Shan, et al. Analysis of factors influencing economy of customer-side distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 29-33.
- [19] YANG Hongxing, ZHOU Wei, LU Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. Solar Energy, 2008: 354-367.
- [20] 郭力, 富晓鹏, 李霞林, 等. 独立交流微网中电池储能与柴油发电机的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 70-78.  
GUO Li, FU Xiaopeng, LI Xialin, et al. Coordinated control of battery storage and diesel generators in isolated AC microgrid systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 70-78.

收稿日期: 2016-08-23

作者简介:

丁明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及其可靠性、新能源技术及其应用;

E-mail: mingding56@126.com

刘新宇(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电并网与机组组合。E-mail: liuxinyu609@163.com

(编辑 葛艳娜)