

DOI: 10.7667/PSPC171774

## 基于灵敏度分析的并网型微电网容量优化配置

李咸善<sup>1,2</sup>, 方婧<sup>1</sup>, 郭诗书<sup>2</sup>, 鲁伦<sup>1</sup>, 范雨萌<sup>1</sup>, 易茗<sup>1</sup>, 张晋维<sup>1</sup>

(1. 三峡大学湖北省新能源微电网协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 微电网优化设计是一类全生命周期的多目标优化问题。既要多种配置方案中寻找最优方案, 又要考察优化方案全生命周期的适应性。文中提出了一种基于灵敏度分析的微电网容量优化配置思想。根据待建微电网所处的地域风光等资源分布特点, 建立多种微电网候选配置方案。采用拟合法建立优化目标与关键因素之间的函数关系, 求出优化目标对这些关键因素的灵敏度。根据灵敏度大小判断关键因素变化对优化结果的影响程度, 获得微电网全生命周期适应性优化配置方案。以某微电网示范工程为例, 采用该方法进行了优化设计, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 微电网; 容量配置; 灵敏度分析; 优化; 配置方案

### Capacity sizing optimal for grid-connected micro-grid based on sensitivity analysis

LI Xianshan<sup>1,2</sup>, FANG Jing<sup>1</sup>, GUO Shishu<sup>2</sup>, LU Lun<sup>1</sup>, FAN Yumeng<sup>1</sup>, YI Ming<sup>1</sup>, ZHANG Jinwei<sup>1</sup>

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Micro-Grid Three Gorges University,

Yichang 443002, China; 2. Operation and Control of Cascade Hydropower Stations of Hubei

Provincial Key Laboratory, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The micro-grid optimization design is a kind of whole life cycle multi-objective optimization problem. It is not only to find the optimal scheme from a variety of allocation schemes, but also to study the whole life cycle adaptability of the optimization scheme. In this paper, the micro-grid capacity optimization allocation based on sensitivity analysis is proposed. According to the characteristics of natural resources in the area where the micro-grid is to be built, a variety of micro-grid candidate allocation schemes are established. The function between the optimization goal and some key factors is established by fitting method, and the sensitivity of key factors to optimization goal is calculated. By sensitivity analysis, the effect of the key factors change on the optimization result is estimated, and the best optimal allocation scheme of the whole life cycle adaptability of the micro-grid is designed. This method is validated by using the optimization design of a micro-grid demonstration project.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277110) and Key Project of Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2016CFA097).

**Key words:** micro-grid; capacity sizing; sensitivity analysis; optimal; allocation scheme

## 0 引言

微电网供电系统的可靠性、经济性、环保性等是互相制约的指标。如何充分利用待建微电网所处地域风光等自然资源分布特点, 合理配置风光资源、储能设备、化石资源等, 达到多目标优化, 是微电网设计阶段需要关注的问题。

配置方案的选择决定于微电网的设计目标, 即优化目标。微电网配置优化目标有经济性、供电可靠性、环保性、安全稳定性等, 一般同时会有几个优化目标受到关注, 因而, 微电网配置需要进行多重配置方案的多目标优化比较研究。目前, 微电网容量优化配置的研究主要集中于孤网型单一配置方案的优化, 对于并网型多种配置方案的优化比较研究较少。

孤网型微电网单一配置方案优化方面, 已取得了较多的成果。文献[1]提出孤网中风光储混合电源

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51277110); 湖北省自然科学基金计划重点项目资助(2016CFA097)

容量的优化配置, 以投资总成本最低来建立优化配置模型, 采用改进细菌觅食算法来验证模型的有效性; 文献[2]针对微电网中不同微源组合配置提出了一种新的多目标粒子群优化算法, 以系统成本为目标函数并考虑未满足的负荷与燃料排放; 文献[3]利用优先启发式协同进化算法对微电网中不同微源组合的容量进行优化配置; 文献[4]在光储微电网的优化配置中, 运用合作博弈方法将用户、电价、储能系统三方联合优化, 使微电网收益最大化; 文献[5]提出风柴储生物质孤网系统的优化配置研究, 替换现有柴油供电系统提高对偏远地区供电的可靠性, 运用 NSGA-II 算法验证优化配置方案的可行性; 文献[6]利用禁忌搜索算法来求解微电网中源-荷的最优配置方案, 并验证了方案的合理性; 文献[7]考虑风光互补配置系统中加入储能装置的影响; 文献[8-9]应用 Homer 软件对微电网中的负荷和分布式电源进行建模, 得到满足约束条件的最优配置方案, 没有考虑可再生能源利用率, 导致配置结果弃风、弃光严重; 文献[10]中应用上下限约束加权和移动平均控制法来对微电网中储能装置容量进行优化配置; 文献[11]在独立风光柴储微电网容量优化配置方案中, 建立起微电网综合投资成本最低的经济性模型。文献[12-13]研究了独立可再生能源发电系统的容量优化配置。

微电网多种配置方案优化方面, 文献[14]微电网中的分布式电源同时存在多能互补的多种配置方案, 通过比较负荷侧需求响应来确定不同配置方案, 选出投资成本最经济的配置方案; 文献[15]在相同的微电网经济性优化模型下, 分析风光储、风光柴、光储柴、风储柴、风光柴储这 5 种配置方案在相同条件下微电网投资成本, 选出最优配置方案。

微电网配置方案优化灵敏度研究方面, 文献[16]提出风柴储生物质孤网系统的优化控制方法, 通过准稳态系统经济性和暂态稳定性进行研究来验证方法的有效性; 文献[17]考虑海水淡化类可时移负荷因素在风光柴储容量优化配置方案中的影响, 并用混沌自由搜索算法求解, 验证了海水淡化类可时移负荷因素可以降低投资成本, 使资源的利用率最大化; 文献[18-19]将环境效益考虑进总成本中, 提出微电网效益最大的优化配置模型; 文献[20]从实现独立风光储微电网系统连续供电的角度对蓄电池储能装置容量进行优化配置研究。

微电网多种配置方案的优化灵敏度研究方面, 文献[21]中对以下四个灵敏度分析得知, 供电可靠率越小、弃风光率越大, 微电网的总成本越低; 燃料价格越高、储能装置允许放电深度越低, 微电网

的总成本越大, 最后选出最优的配置方案; 文献[22]中通过对风速、天然气价格和排污处罚标准这 3 个敏感度对微电网配置成本的影响, 在多种配置方案中选出最优的一组。

综上所述, 目前微电网配置方案集中于孤网单一配置方案的优化设计和灵敏度研究, 对并网型微电网中多种配置方案的优化设计和多因素敏感度的研究成果较少。

多重配置方案的比较研究需要基于某个或某些共同的指标, 如相同自平衡率。此外, 还要考察多种方案对某些重要因素的敏感度问题, 如微电网多重配置方案的经济成本对风光互补度、可再生能源渗透率、变自平衡率、燃料价格、储能配置等敏感性比较研究, 并考察多种方案的经济适应性及其可扩展能力。

因此, 本文开展多种配置方案及其对多种可变因素的适应性研究, 在相同自平衡率下, 从电网和客户的经济效益角度出发建立相应的经济优化模型, 考虑储能因素的影响, 选出最优的配置方案, 发挥可再生能源的综合效益。在此基础上, 比较分析典型可变因素的灵敏度对多重配置方案的影响, 考察配置方案运行及发展适应性。

## 1 分布式电源出力模型

针对并网型微电网容量的优化配置, 建立相关分布式电源的出力模型, 包括风力发电机、光伏电源、储能装置、柴油发电机的出力模型。

### 1.1 风机出力模型

考虑风机功率的变化规律, 风电机组的输出功率与风速之间的近似关系为

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ P_{WT} \frac{v - v_{in}}{v_r - v_{in}} & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{WT} & v_r \leq v \leq v_{out} \\ 0 & v > v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{WT}$  为风机额定功率;  $v_{in}$  为切入风速;  $v_r$  为额定风速;  $v_{out}$  为切出风速。采用 WD49/50-750(A) 型风机, 其  $v_{in}$  为 3.5~4 m/s,  $v_r$  为 14m/s,  $v_{out}$  为 25 m/s,  $P_{WT}$  为 750 kW, 设计寿命为 20 年。

### 1.2 光伏出力模型

为减少误差, 光伏电池的实际出力要考虑光伏系统功率降额因数、实际光照强度、实际环境温度、实际风速。光伏电池表面实际的温度和输出功率为

$$\begin{cases} A = S \cdot \theta \\ P_{pv} = f_{pv} P_{rated} \frac{A}{A_s} [1 + \alpha_p (T - T_{STC})] \\ T = T_a + \theta_G [1 + \theta_T T_a] (1 - \theta_w v) A \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_a$  为当前环境温度;  $T$  为光伏电池表面实际温度;  $S$  为自然条件下光伏板上的辐射强度;  $\theta$  为光伏板的倾斜角;  $P_{pv}$  为光伏电池的实际输出功率;  $f_{pv}$  为光伏系统功率降额因数, 一般取 0.9;  $P_{rated}$  为光伏板额定功率;  $A$  为到达光伏系统倾斜面的实际辐照度;  $A_S$  为标准测试条件下的辐照度  $1 \text{ kW/m}^2$ ;  $\alpha_p$  为功率温度系数, 一般取  $-0.47\%/K$ ;  $T_{STC}$  在标准测试条件下光伏发电系统温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\theta_G$ 、 $\theta_T$ 、 $\theta_W$  取值一般为 0.013 8、0.031、0.042。采用 Y15C-200M 光伏电池, 额定输出功率为 200 W, 设计寿命为 15 年。

### 1.3 储能装置模型

采用蓄电池作为储能装置, 根据能量守恒定理, 利用任意时刻储能电池快速充放电来跟踪可控负荷变化, 蓄电池的充放电一般满足式(3)和式(4)<sup>[15]</sup>。

#### 1) 蓄电池充电时

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(1-\delta) + P_c(t)\eta_c \quad (3)$$

#### 2) 蓄电池放电时

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(1-\delta) - P_d(t)/\eta_d \quad (4)$$

式中:  $E_{bat}(t)$  为蓄电池在  $t$  时刻的电量;  $E_{bat}(t-1)$  为蓄电池在  $t-1$  时刻的电量;  $P_c(t)$  和  $P_d(t)$  分别为  $t$  时刻单个蓄电池的充电和放电功率;  $\eta_c$  和  $\eta_d$  分别为单个蓄电池的充电和放电效率;  $\delta$  为单个蓄电池的自放电率。

由于蓄电池累积充放电总电量有限, 为防止充放电深度过大影响其寿命, 蓄电池电量不等式约束为

$$P_d(t) < NP_d\eta_d \quad (5)$$

$$P_c(t) < NP_c/\eta_c \quad (6)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (7)$$

式中:  $SOC(t)$  为  $t$  时刻蓄电池的剩余电量;  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  为蓄电池剩余电量的上限和下限;  $N$  为蓄电池个数;  $P_c$  和  $P_d$  为单个蓄电池的充电和放电功率。蓄电池型号为 24-OPzS-3000 铅酸蓄电池, 其额定容量为 6 kWh, 额定功率为 1.2 kW, 累积充放电电量的上限  $Q$  为 10 196 kWh, 充放电效率均为 86%, 最大的放电深度为 70%, 蓄电池的自放电率为 0.01%, 设计寿命 20 年。

### 1.4 柴油发电机出力模型

柴油发电机组的发电功率约束为

$$P_{gen}(t) \leq N_{en}P_{en} \quad (8)$$

$t$  时刻柴油发电机的油耗量为

$$V_{fuel}(t) = \xi P_{gen}(t) \quad (9)$$

式中:  $P_{gen}(t)$  为  $t$  时刻柴油发电机的输出功率;  $P_{en}$  为单台柴油发电机额定功率;  $N_{en}$  为柴油发电机台数;  $V_{fuel}(t)$  为  $t$  时刻柴油发电机的油耗量;  $\xi$  为柴油发电机的油耗系数。采用 ZS-500 型柴油发电机, 油耗率

为 0.3 L/kWh, 额定功率为 500 kW, 设计寿命 30 年。

## 2 微电网成本模型

综合考虑微电网的等年值成本、年运行维护成本、年替换成本、年燃烧成本、环境成本、配电成本和国家补贴等作为经济优化目标。

### 2.1 等年值成本

等年值成本<sup>[15]</sup>是分布式电源总初期投资成本与资金回收系数的乘积。

$$f_1 = sff(i, y_r)(N_{WT}C_{WT1} + N_{PV}C_{PV1} + N_{bat}C_{bat1} + N_{en}C_{en1}) \quad (10)$$

$$sff(i, y_r) = \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \quad (11)$$

$$i = \frac{(i' - f)}{(1 + f)} \quad (12)$$

式中:  $N_{WT}$ 、 $N_{PV}$ 、 $N_{bat}$ 、 $N_{en}$  为风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的个数;  $C_{WT1}$ 、 $C_{PV1}$ 、 $C_{bat1}$ 、 $C_{en1}$  分别表示风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的单价;  $i$  为实际贷款利率;  $sff(i, y_r)$  为资金回收系数;  $f$  为通货膨胀率 3%;  $f_1$  为等年值成本;  $i'$  为名义贷款利率 6.55%;  $y_r$  为分布式电源工程寿命。

### 2.2 年运行维护成本

年运行维护成本是每年分布式电源需要人工进行维护的费用。

$$f_2 = N_{WT}C_{WT2} + N_{PV}C_{PV2} + N_{bat}C_{bat2} + N_{en}C_{en2} \quad (13)$$

式中:  $C_{WT2}$ 、 $C_{PV2}$ 、 $C_{bat2}$ 、 $C_{en2}$  分别表示风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的年运行维护费用。

### 2.3 年替换成本

年替换成本<sup>[15]</sup>是每种分布式电源的替换单价和与之相对应年替换率相乘进行求和得到的成本。

$$f_3 = N_{WT}C_{WT3} + N_{PV}C_{PV3} + N_{bat}C_{bat3} + N_{en}C_{en3} \quad (14)$$

式中:  $C_{WT3}$ 、 $C_{PV3}$ 、 $C_{bat3}$ 、 $C_{en3}$  分别表示风力发电机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的替换成本。

$$C_{WT3} = C_{rw}\theta(i, y) - C_w\theta(i, y_r) \quad (15)$$

$$\theta(i, y) = \frac{i}{(1+i)^y - 1} \quad (16)$$

$$i = \frac{(i' - f)}{(1 + f)} \quad (17)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{sff(i, y_r)}{sff(i, y_w)} & y_w > 0 \\ 0 & y_w = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} y_w = yINT(y_r/y) \\ C_w = C_{rw}(y_{rw}/y) \\ y_{rw} = y - (y_r - y_w) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $C_{rw}$  为每种分布式电源的替换成本;  $C_w$  为每种分布式电源的剩余设备残值;  $\beta$  为置换系数;  $y_w$  为每种分布式电源的寿命与其在微电网周期内替换次数的乘积;  $y$  为每种分布式电源的设计寿命;  $y_{rw}$  为每种分布式电源的残余寿命。

由上式知, 光伏板、蓄电池、柴油发电机的年均替换成本也可以用相同的方法进行计算, 表 1 是分布式电源的成本数据。

表 1 分布式电源的成本数据<sup>[16]</sup>Table 1 Cost data of distributed generation<sup>[16]</sup>

电源种类	购买单价/ (万元/台)	维护费用/ (元/台·年)	替换单价/ (万元/台)	燃料单价/ (元/L)
风机	400	8 000	350	0
光伏阵列	0.22	5	0.2	0
蓄电池	1.2	240	1	0
柴油发电机	40	1 600	35	8

## 2.4 年燃料成本

年燃料成本是柴油发电机一年发电消耗燃料产生的费用。

$$f_4 = \int_0^t N_{en} \mu \xi P_{gen}(t) dt \quad (20)$$

式中:  $\mu$  为燃料的单价;  $\xi$  为柴油机的油耗系数;  $f_4$  为燃料的总成本。

## 2.5 环境成本

环境成本<sup>[12]</sup>是由发电环境成本、污染惩罚成本和治污成本这三部分组成的。

$$f_5 = \int_0^t N_{en} \frac{\sum_{a=1}^n k_a P_{en}(t) \varphi_a}{1000} + \int_0^t N_{en} \frac{\sum_{a=1}^n k_a P_{en}(t) \beta_a}{1000} dt + \int_0^t N_{en} \frac{\sum_{a=1}^n k_a P_{en}(t) \theta_a}{1000} \quad (21)$$

式中:  $a$  为污染物种类;  $k_a$  为排放系数;  $\varphi_a$  为环境价值标准系数;  $\beta_a$  为排放惩罚标准系数;  $\theta_a$  为治污标准系数。表 2 给出了柴油发电机的发电成本数据。

表 2 柴油发电机的成本数据<sup>[12]</sup>Table 2 Cost data of diesel generator<sup>[12]</sup>

污染物种类	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>
$k_a$ /(g/kWh)	0.206	9.89	649
$\varphi_a$ /(元/kg)	6.00	8.00	0.023
$\beta_a$ /(元/kg)	1.00	2.00	0.01
$\theta_a$ /(元/kg)	14.842	62.964	0.21

## 2.6 配电成本

并网型微电网向大电网外送功率, 也接收大电网的功率支撑。当微电网自身不能满足负荷功率需求时, 大电网就对微电网内部负荷提供功率支撑,

保证微电网稳定运行。这产生售电收入, 也产生购电费用, 微电网配电成本为

$$f_6 = C_1 E_{in} - C_2 E_{out} \quad (22)$$

式中:  $C_1$  为购电价格;  $C_2$  为售电价格;  $E_{in}$  为总购电量;  $E_{out}$  为总售电量。

## 2.7 国家补贴

风光具有随机性和波动性大的特点, 风机和光伏板的投资成本较高, 为了鼓励新能源的发展, 缓解化石能源紧缺压力 and 保护环境, 提出了政策性的扶持和补贴。

$$f_7 = \int_0^t \lambda N_{PV} P_{PV}(t) dt + \int_0^t \lambda N_{WT} P_{WT}(t) dt \quad (23)$$

式中:  $\lambda$  为补贴系数 0.015 元/kWh;  $f_7$  为补贴总数。

## 3 微电网容量配置的优化模型

### 3.1 目标函数

由风光柴、风光储、风柴储、光柴储、风光柴储这 5 种配置方案的优化模型, 在满足相关约束条件下, 建立起微电网经济性目标函数为

$$\min F(x) = \min \sum_{i=1}^n f_i(x) \quad (i=1\sim7) \quad (24)$$

式中:  $F(x)$  为微电网综合经济成本;  $f_i(x)$  ( $i=1\sim7$ ) 为如式(10)、式(13)、式(14)、式(20)~式(23)所示的各项成本因素。

### 3.2 约束条件

1) 为满足负荷的功率需求, 保证微电网输入和输出功率的平衡, 维持微电网系统正常稳定的运行, 系统功率平衡方程, 如下所示。

$$N_{PV} P_{PV}(t) + N_{WT} P_{WT}(t) + N_{bat} P_{bat}(t) + E_{in}(t) + N_{en} P_{gen}(t) = \text{load}(t) + N_{bat} P_c(t) + E_{out}(t) \quad (25)$$

式中:  $P_{PV}(t)$  为  $t$  时刻光伏板的输出功率;  $P_{WT}(t)$  为  $t$  时刻风机的输出功率;  $E_{in}(t)$  为  $t$  时刻微电网系统的总购电量;  $E_{out}(t)$  为  $t$  时刻微电网系统的总售电量。

2) 由于微电网工程的场地面积和它的总负荷容量是有限的, 微电网工程里配置分布式电源数量是有限的, 因此, 分布式电源数约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq N_{WT} \leq N_{WTmax} \\ 0 \leq N_{PV} \leq N_{PVmax} \\ 0 \leq N_{bat} \leq N_{batmax} \\ 0 \leq N_{en} \leq N_{enmax} \end{cases} \quad (26)$$

式中,  $N_{WTmax}$ 、 $N_{PVmax}$ 、 $N_{batmax}$ 、 $N_{enmax}$  分别表示微电网工程中风机、光伏板、蓄电池、柴油发电机的配置数量上限。

3) 在不同自平衡率下, 微电网自平衡能力是不

同的。为了保证微电网的稳定可靠运行，微电网自平衡率有上、下限定，微电网自平衡率的约束条件为

$$R_{\text{low}} \leq R_{\text{self}} \leq R_{\text{high}} \quad (27)$$

式中： $R_{\text{low}}$  为微电网自平衡率的下限； $R_{\text{high}}$  为微电网自平衡率的上限。

4) 通过降低蓄电池最大放电深度来增大蓄电池的使用寿命，提高蓄电池的利用效率，降低微电网的总成本，蓄电池充放电约束条件为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} P_c(t) \leq \frac{1}{\eta_c} f_c(t) P_{\text{max charge}} \\ f_c(t) + f_d(t) \leq 1 \\ P_d(t) \leq \frac{1}{\eta_d} f_d(t) P_{\text{dis charge}} \end{cases} \quad (28)$$

式中： $f_c(t)$ 和 $f_d(t)$ 分别表示蓄电池充电和放电的电位标志，且为0-1变量； $P_{\text{max charge}}$ 和 $P_{\text{dis charge}}$ 分别为蓄电池最大充电功率值和最大放电功率值。

5) 微电网系统中的可再生能源渗透率的下限值约束条件为

$$f_{\text{thr}} = \frac{N_{\text{WT}} P_{\text{WT}} + N_{\text{PV}} P_{\text{PV}}}{P_{\text{总}}} \geq f_{\text{min thr}} \quad (29)$$

式中： $P_{\text{总}}$ 为微电网的总装机容量； $f_{\text{min thr}}$ 为微电网系统中可再生能源渗透率的下限值。

### 3.3 微电网的自平衡率

自平衡率是指在一定周期内微电网满足自身负荷的供电比例，其平衡能力计算式为<sup>[21]</sup>

$$R_{\text{self}} = \frac{E_{\text{self}}}{E_{\text{total}}} \quad (30)$$

式中： $E_{\text{self}}$ 为并网型微电网自身能够给负荷提供的功率； $E_{\text{total}}$ 为微电网中负荷所需要的总功率； $R_{\text{self}}$ 为微电网的自平衡率。

微电网自平衡率的大小反映出微电网运行的可靠性；自平衡率越大，表明微电网运行对外电网的依赖越低，自我依赖越高，越要提高微电网电源的供电可靠性。

### 3.4 微电网优化的灵敏度分析

微电网优化的灵敏度是指优化目标对参数变化的敏感程度。通过灵敏度分析观察优化结果对参数变化的适应性。对某个参数的灵敏度小，说明优化结果对该参数变化的适应能力强，反之，说明该参数的变化对优化结果产生大的影响。

$$m(x_i) = \frac{dM(x)}{dx_i} \quad (31)$$

式中： $x$ 为参数变量； $M(x)$ 为目标函数； $m(x_i)$ 为关于参数 $x_i$ 的灵敏度。

## 4 优化算法

通过查询美国 NASA 网站，获得广东珠海微电网所在地(E113°03′~114°19′, N21°48′~22°27′)的风速、光照强度、温度和负荷的原始数据，利用 Homer 软件来进行模拟，采用非劣排序遗传算法求解得出最优的配置方案，其计算步骤和流程图如图 1 所示。

1) 通过 NASA 网站查询微电网所在地的风速、光照强度、温度和负荷等原始数据，将其输入到 Homer 软件进行仿真，得到模拟数据；

2) 将得到的模拟数据及仿真步长、仿真时间等参数全部输入软件，进行初始化；

3) 得到规模为  $N$  的初始种群  $P$ ，种群  $P$  中的优化变量包含风机、光伏阵列和蓄电池储能装置的容量等基本信息；

4) 仿真计算种群  $P$  中的个体目标值，按 Pareto 秩小、密度小的原则对种群  $P$  中的个体进行排序；

5) 采用锦标赛选择法，从初始种群  $P$  中选择父代种群  $S$  进行交叉、变异的遗传操作，得到子代种群  $Q$ ；

6) 仿真计算子代种群  $Q$  中的个体目标值，然后将种群  $P$  和种群  $Q$  合并形成中间种群  $M$ ；

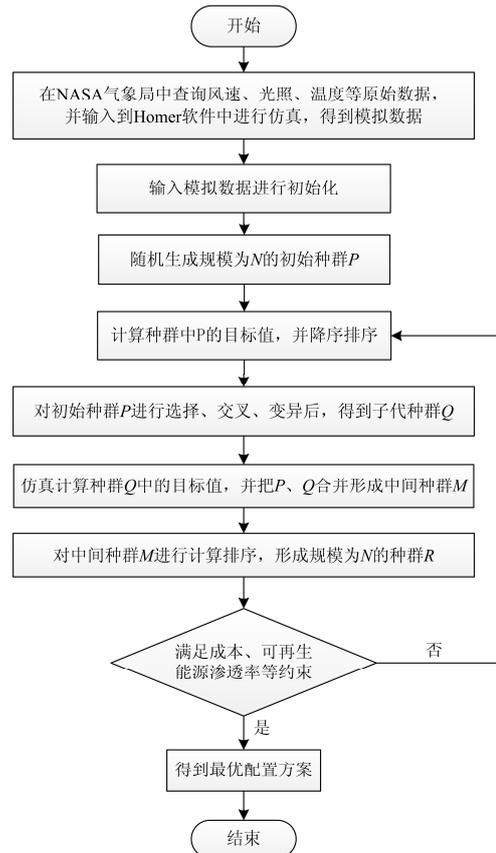


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

7) 按 Pareto 秩小、密度小的原则对中间种群  $M$  中的个体进行排序, 选择最优的  $N$  个个体形成规模为  $N$  的种群  $R$ ;

8) 判断是否满足约束条件, 如果是就进入步骤 9; 如果不是, 则重复步骤 4)–7), 直到满足所有的约束条件为止;

9) 得到最优的配置方案。

## 5 算例分析

以广东珠海某微电网工程为背景, 通过 NASA 数据库查询其 22 年间的平均气象数据。其一年中典型日的负载为 60 MWh、负荷峰值为 3 850 kW、全年负荷量约  $2.2 \times 10^4$  MWh。取 2015 年典型日的风速和光照强度, 以 24 小时作为调度周期, 用一个小时作为仿真步长来进行求解。其年风速、年光照强度、年温度、风速、光照强度如图 2—图 6 所示。

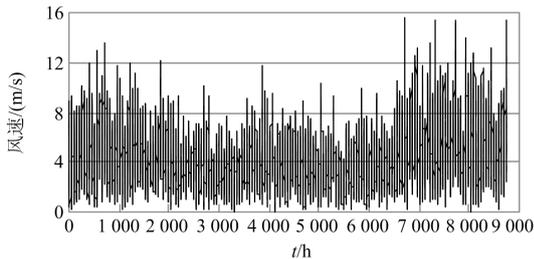


图 2 微电网年风速曲线

Fig. 2 Wind speed profile of microgrid

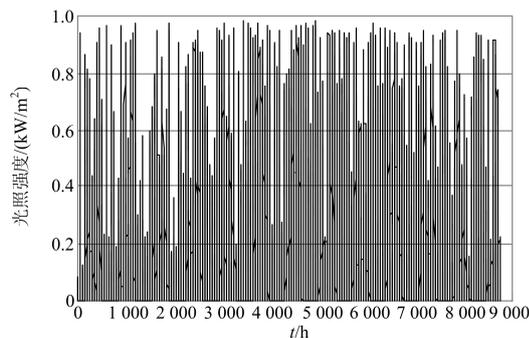


图 3 微电网年光照强度曲线

Fig. 3 Solar radiation profile of microgrid

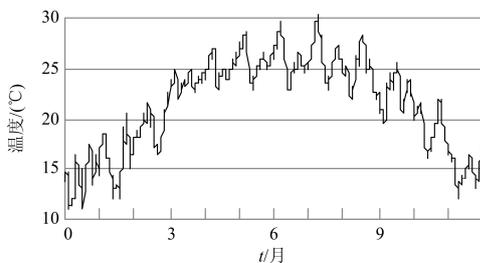


图 4 微电网年温度曲线

Fig. 4 Temperature profile of micro-grid

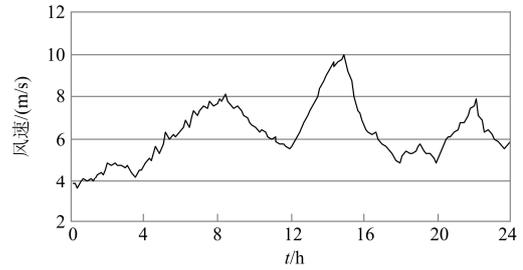


图 5 微电网典型日风速曲线

Fig. 5 Typical daily wind speed profile of micro-grid

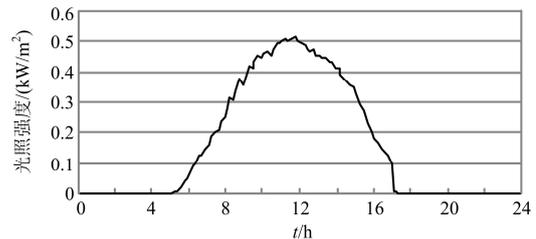


图 6 微电网典型日光照强度曲线

Fig. 6 Typical daily solar radiation profile of micro-grid

### 5.1 基于相同自平衡率的微电网配置方案比较分析

用表 1 给出的分布式电源成本数据和表 2 给出的柴油发电机成本数据, 代入建立的微电网经济优化配置模型中, 求出最优的配置方案。当自平衡率为 1 时微电网优化计算结果, 如表 3 所示。

表 3 微电网中分布式电源容量优化配置方案

Table 3 Sizing results of distributed generation in micro-grid

配置方案	风机/台	光伏板/台	蓄电池/个	柴油机/台	总成本/(万元/年)
风光储	2	56 000	62 000	0	7 556.5
光柴储	0	36 140	8 250	5	5 550.1
风柴储	5	0	7 150	5	4 667.1
风光柴	6	33 600	0	6	4 637.6
风光柴储	5	28 440	6 300	4	4 508.9

1) 微电网中风光储的配置成本最高, 是其余 4 种配置方案的 1.5~2 倍。在优化相同容量的情况下, 风光储配置方案中需要光伏板、蓄电池的数目较多, 导致微电网初始投资成本过大, 造成微电网经济性较差。但在微电网的分布式电源组合中配入一定数量柴油发电机, 会使得微电网的成本降低, 微电网的经济性得到提高。

2) 从风光柴和风光柴储这两种配置方案来分析, 风光柴储配置方案初期投资风机、光伏板、蓄电池的成本较高, 通过配置一定数量的蓄电池可以减少柴油发电机的运行时间, 减少燃料的消耗, 从而减少燃料成本, 降低发电成本。同时, 可以对光

伏和风机发出的电能进行有效的储存和利用，提高了风、光的利用率和供电比例。

3) 从光柴储与风柴储、风光柴、风光柴储配置方案比较分析看，光柴储的配置成本比后面 3 种配置方案高。原因是光伏板出力的随机性、波动性较大，而蓄电池的出力较小，为了满足负荷需求，需要配置大量的光伏板和蓄电池，还有一定数量的柴油发电机，就会造成初期的投资成本较大；光伏板在晚上、阴雨天气不能使用，而蓄电池的出力较小，这时主要依靠柴油发电机提供电力，会造成燃料消耗增多，燃料成本增加，造成微电网的总成本增加。综合分析，微电网中配置一定数量的风机有利于提高微电网的经济性。

4) 从微电网的优化配置方案比较分析看，风光储的成本最高，后 4 种配置方案的成本依次降低，说明要先考虑柴油发电机，其次是风机和蓄电池，最后是光伏板。柴油发电机的运行成本低，效率高，风机、蓄电池、光伏板的初期投资成本较大，且风、光的随机性较大，因此，需要配置蓄电池。通过蓄电池吸收风机和光伏板产生的多余电量，提高可再生能源的利用率，在峰值时刻可以提供部分负荷需求，起到“削峰填谷”的作用，降低柴油发电机的运行时间，减少燃料消耗，降低微电网的成本。

5) 从微电网配置方案的成本分析可知，风光柴储的配置方案比风光柴的配置方案更优，说明储能因素有利于提高微电网的经济性。

### 5.2 微电网多种配置方案的适应性比较分析

由于风光资源的随机性和间歇性，基于共同指标的多目标优化比较研究外，考察微电网配置方案对某些重要因素的敏感度问题，如微电网经济成本对变自平衡率、燃料价格、可再生能源渗透率、储能配置、风光互补度等敏感度的比较研究，可有效考察配置方案全生命周期的适应性。改变一个指标，保持其余指标不变，分析不同敏感度指标和灵敏度大小对微电网容量优化设计总成本的影响。

#### 5.2.1 不同自平衡率对微电网总成本的影响

在其他约束条件不变情况下，改变微电网自平衡率大小，分析自平衡率变化对微电网配置方案总成本的影响，得到适应性较好的配置方案。

如图 7 所示，在并网情况下，随着微电网自平衡率的逐渐增大，微电网自平衡率的灵敏度也逐渐增大。从曲线曲率分析，微电网总成本对微电网自平衡率灵敏度的适应性逐渐减小。说明随着微电网自平衡率的逐渐增大，负荷对微电网自身的功率依赖逐渐增大，对外网的功率依赖逐渐降低，造成微电网初始配置的风机、光伏板、蓄电池、柴油发电

机数数目逐渐增多。为了让微电网配置既满足自平衡率的要求，达到微电网成本适应性最优，需要合理配置风机、光伏板、蓄电池和柴油发电机的数量。因此，在相同自平衡率下，灵敏度越小对应微电网配置方案的总成本适应性越好。

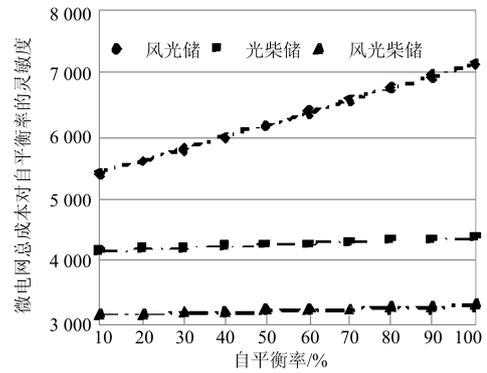


图 7 自平衡率与自平衡率灵敏度的关系

Fig. 7 Relationship between self balancing rate and self balancing rate sensitivity

#### 5.2.2 燃料价格对微电网总成本的影响

在保持其他约束条件不变的情况下，不断改变柴油发电机的燃料价格，分析燃料价格对微电网总成本的影响，如图 8 所示。

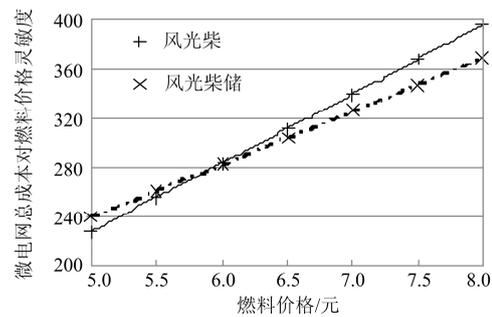


图 8 燃料价格与燃料价格灵敏度的关系

Fig. 8 Relationship between fuel price and fuel price sensitivity

如图 8 所示，随着柴油发电机燃料价格的升高，燃料价格的灵敏度也逐渐增大。由曲线曲率分析，微电网总成本对燃料价格灵敏度的适应性逐渐减小，柴油发电机发电的适应性逐渐减小。因此，要降低柴油发电机的发电比例，减少燃料的消耗，需要在微电网中配置一定数量的蓄电池储能装置来提高风光可再生能源的发电比例，提供负荷支撑，起着“削峰填谷”的作用，维持微电网的稳定运行，让微电网更具有经济适应性。因此，在燃料价格灵敏度增大时，燃料价格的适应性减小了，储能因素提高了微电网成本的适应性，增大了微电网经济性。

#### 5.2.3 可再生能源渗透率对微电网成本的影响

保持其他约束条件不变, 不断增大风光可再生能源渗透率, 分析可再生能源渗透率对微电网总成本的影响, 如图 9 所示。

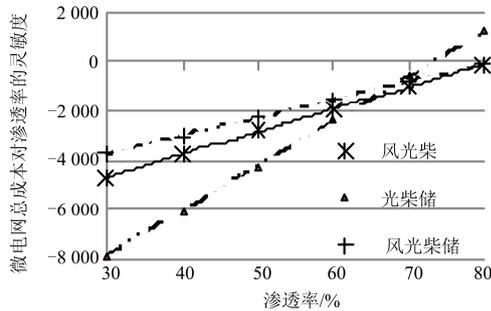


图 9 渗透率与渗透率灵敏度的关系

Fig. 9 Relationship between permeability and permeability sensitivity

随着风光可再生能源渗透率的增大, 可再生能源渗透率的灵敏度也逐渐增大。由曲线曲率分析, 微电网总成本对可再生能源灵敏度的适应性逐渐增大。如果没有配置储能装置, 当可再生能源不能全部被负荷消纳时, 会产生弃风光现象, 可再生能源渗透率的灵敏度减小, 造成微电网成本的适应性降低; 如果配置一定数量的储能装置, 储能装置会及时把多余的电能储存起来, 这样不仅增大了可再生能源渗透率的灵敏度, 还利用蓄电池“削峰填谷”特性提供负荷支撑, 降低柴油发电机的发电比例, 减少燃料的消耗。因此, 在微电网中配置一定数量储能装置可以提高可再生能源渗透率的适应性, 提高微电网总成本的适应性。

#### 5.2.4 蓄电池放电深度对微电网成本的影响

在保持其他约束条件不变的情况下, 不断改变蓄电池的放电深度, 来观察蓄电池的放电深度对微电网总成本的影响。

如图 10 所示, 随着蓄电池放电深度的增大, 蓄电池放电深度的灵敏度也逐渐增大。由曲线曲率分析, 微电网成本对蓄电池放电深度灵敏度的适应性逐渐增大, 更具有竞争性。因为蓄电池储能装置放电深度的增大, 提高了蓄电池的能量吞吐能力, 降低了蓄电池储能装置寿命的适应性, 减少了蓄电池的配置数量, 降低了柴油发电机的发电比例和燃料成本, 提高了微电网总成本的适应性。由于蓄电池储能装置放电深度的增大, 可以消纳更多的可再生能源, 提高了可再生能源利用率的适应性, 让微电网更具环保竞争力, 提高了蓄电池放电深度的灵敏度, 提高微电网总成本的适应性和经济性。

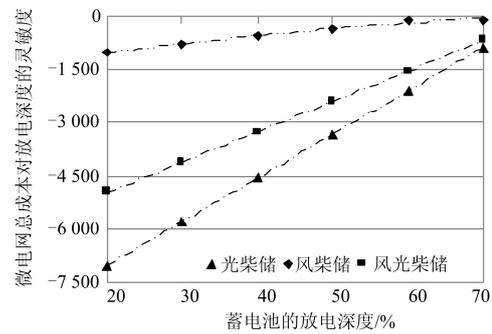


图 10 蓄电池放电深度与蓄电池放电深度灵敏度的关系

Fig. 10 Relationship between battery discharge depth and battery discharge depth sensitivity

风光柴储配置方案总成本对上述 4 种变化因素的灵敏度关系如图 11 所示。在风光柴储的配置方案中, 随着蓄电池的放电深度和可再生能源渗透率灵敏度值的增大, 微电网总成本逐渐降低。风光柴储配置方案对蓄电池放电深度和可再生能源渗透率的变化适应性较好。随着燃料价格和自平衡率灵敏度值的增大, 微电网总成本陡然增大, 表明风光柴储配置方案对燃料价格和自平衡率的变化适应性较差。因此, 在微电网的优化配置中, 要充分利用蓄电池的放电深度和可再生能源渗透率的有利影响, 降低燃料价格和自平衡率对微电网成本的不利影响, 让微电网的优化配置更加具有经济性。

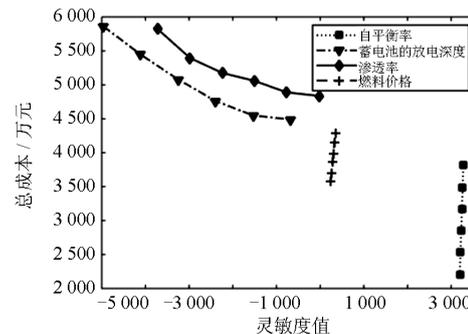


图 11 风光柴储灵敏度与微电网总成本的关系

Fig. 11 Relationship between sensitivity and total cost of microgrid

综上所述, 在保持其他指标不变的情况下, 改变其中任何一个灵敏度指标的大小, 都会极大影响微电网成本的适应性和微电网的经济性。由于风光柴储配置方案具有较好的适应性, 因此, 是微电网配置时应该优先考虑的方案。

## 6 结论

以经济性为目标, 分析并网型微电网在不同灵

敏度指标下的微电网容量优化配置问题, 得出如下结论。

1) 在相同自平衡率下, 由于蓄电池储能装置“削峰填谷”的特性, 减少了“弃风弃光”现象, 可再生能源供电比例增大, 柴油发电机供电比例减少。把“风”、“光”、“柴”、“储”一起配置可以间接降低微电网总成本, 得到的风光柴储方案是微电网容量优化的最优配置方案。

2) 随着微电网总成本对自平衡率的灵敏度增大, 微电网自身提供负荷需求的能力增强, 微电网总成本上升, 降低了微电网的经济性; 随着微电网总成本对燃料价格的灵敏度增大, 柴油发电机的供电比例减少, 蓄电池储能装置提高了可再生能源的供电比例, 间接降低了微电网总成本; 随着微电网成本对可再生能源渗透率的灵敏度增大, 配置一定数量的储能装置可以提高风光资源的利用率, 降低微电网的总成本; 随着微电网成本对蓄电池放电深度的灵敏度的增大, 蓄电池能量的吞吐能量增大, 蓄电池储能装置的使用寿命降低。

3) 在优化相同的微电网容量下, 需要配置更多的蓄电池储能装置, 可能导致微电网总成本增加和经济适应性降低。

### 参考文献

- [1] 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. Optimal sizing 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.
- [2] SHARAFI M, ELMEKKAWY T Y. A dynamic MOPSO algorithm for multiobjective optimal design of hybrid renewable energy systems[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(15): 1949-1963.
- [3] SHI Z, WANG R, ZHANG T. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using preference-inspired coevolutionary approach[J]. Solar Energy, 2015, 118: 96-106.
- [4] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137.  
WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side respond based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [5] 周志超, 郭力, 王成山, 等. 风柴储生物质独立微电网系统的优化规划设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 16-22.  
ZHOU Zhichao, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Optimal planning and design of a wind biomass diesel battery stand-alone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 16-22.
- [6] 王艳松, 宋阳阳, 吴昊, 等. 基于禁忌搜索算法的微电网源/荷安全经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 21-27.  
WANG Yansong, SONG Yangyang, WU Hao, et al. Security and economic dispatch of source/load for micro-grid based on Tabu search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 21-27.
- [7] 罗鹏, 杨天蒙, 姜素华, 等. 基于频谱分析的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 119-124.  
LUO Peng, YANG Tianmeng, LOU Suhua, et al. Spectrum analysis based capacity configuration of hybrid energy storage in microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 119-124.
- [8] BELFKIRA R, ZHANG LU, BARAKAT G. Optimal sizing study of hybrid wind-PV-diesel power generation unit[J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 100-110.
- [9] BILAL O B, SAMBOU V, KÉBÉ C M F. Methodology to size an optimal stand-alone pv-wind-diesel-battery system minimizing the levelized cost of energy and the CO2 emissions[J]. Energy Procedia, 2012, 14(2): 1636-1647.
- [10] 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.
- [11] 丁明, 王波, 赵波. 独立风光柴储微电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. Configuration optimization of capacity of standalone pv wind diesel battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [12] GUPTA R A, KUMAR R, BANSAL A K. Economic analysis and design of stand-alone wind photovoltaic hybrid energy system using genetic algorithm[C] // 2012 International Conference on Computing, Communication and Applications, February 22-24, 2012, Dindigul, India: 1-6.
- [13] KAABECHE A, BELHAMEL M, IBTIOUEN R. Sizing

- optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system[J]. *Energy*, 2011, 36(3): 1214-1222.
- [14] 丁伯剑, 郑秀玉, 周逢权, 等. 微电网多能互补电源容量配置方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(16): 144-148.  
DING Bojian, ZHENG Xiuyu, ZHOU Fengquan, et al. Research on method of capacity configuration for hybrid power in microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(16): 144-148.
- [15] 郑雪阳. 海岛微网分布式电源容量优化配置及运行控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
ZHENG Xueyang. Study on optimal configuration of distributed power capacity and operation control strategy of island micro grid[D]. Wuhuan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [16] 周志超, 王成山, 焦冰琦, 等. 风柴储生物质独立微电网系统的优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3605-3615.  
ZHOU Zhichao, WANG Chengshan, JIAO Bingqi, et al. Optimal control of wind biomass diesel battery stand-alone microgrid system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3605-3615.
- [17] 刘柏良, 黄学良, 李军. 计及可时移负荷的海岛微网电源优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(25): 4250-4258.  
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun. Optimal sizing of distributed generation in a typical island microgrid with time-shifting load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(25): 4250-4258.
- [18] 栗然, 申雪, 钟超, 等. 考虑环境效益的分布式电源多目标规划[J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1471-1478.  
LI Ran, SHEN Xue, ZHONG Chao, et al. Multi-objective planning of distributed generation considering environmental benefit[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1471-1478.
- [19] ASANO H, BANDO S. Optimization of a microgrid investment and operation energy saving effects and feasibility of ancillary service provision[C] // *Proceedings of IEEE T & D Conference & Exposition*, October 26-30, 2009, Seoul, South Korea: 1-4.
- [20] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 风光储微电网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. *电网技术*, 2012, 36(12): 26-31.  
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(12): 26-31.
- [21] 黎嘉明, 郑雪阳, 艾小猛, 等. 独立海岛微网分布式电源容量优化设计[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(10): 176-184.  
LI Jiaming, ZHENG Xueyang, AI Xiaomeng, et al. Optimal design of capacity of distributed generation in island standalone microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(10): 176-184.
- [22] 付丽伟, 王守相, 张永武, 等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. *电网技术*, 2012, 36(1): 79-84.  
FU Liwei, WANG Shouxiang, ZHANG Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(1): 79-84.

收稿日期: 2017-12-06; 修回日期: 2018-05-02

作者简介:

李咸善(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、微电网技术研究; E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn

方婧(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、微电网优化设计和分布式电源的优化调度; E-mail: fj1hmz@qq.com

郭诗书(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、微电网的优化设计和分布式电源的优化调度。E-mail: 1193068390@qq.com

(编辑 葛艳娜)