

DOI: 10.7667/PSPC161603

## 基于序列运算理论的微电网正负旋转备用容量优化

吕智林, 孙顺吉, 汤泽琦, 魏 卿

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 考虑风电、光伏出力及负荷波动的随机因素, 引入序列运算理论对风、光出力偏差以及负荷波动偏差的概率分布模型进行卷积及卷差运算, 得到各时段净负荷概率密度函数的离散序列。在此基础上, 优化满足机组爬坡等约束条件的不同可靠性水平下的微网系统正、负旋转备用。以日运行发电成本和环境成本最小为目标函数, 优化可控机组出力、蓄电池的充放电以及可中断负荷。采用改进的人工蜂群算法(ABC)对模型进行求解。提出考虑微网期望停电损失、期望切风光损失费用和正、负旋转备用成本的综合经济效益 CEB 指标, 以该指标为依据综合评估微网系统在可靠性指标为何值时旋转备用经济效益可达到最大。最后算例验证模型和算法的可行性。

**关键词:** 孤岛微网; 序列运算; 正、负旋转备用; 人工蜂群算法

### Optimal scheduling of plus and minus spinning reserve in microgrid based on sequence operation theory

LÜ Zhilin, SUN Shunji, TANG Zeqi, WEI Qing

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Considering the random factor of wind power, photovoltaic output and load fluctuation, sequence operation theory is adopted to handle the probability density model of these fluctuate error with addition-type-convolution (ATC) and subtraction-type-convolution (STC). While the discrete sequence of pure load's probability density function in each hour is acquired, the plus and minus spinning reserve of microgrid under different reliability levels that meeting the conditions such as unit climbing is optimized. Taking the minimum of the daily electricity generating operation cost and environment cost as the object function, this paper optimizes the output of controllable unit, the charge and discharge power of storage battery and interruptible load. Modified artificial bee colony (ABC) algorithm is used for figuring out the model. Comprehensive economic benefit (CEB) indicator, which considers expected energy interruption cost, expected wind power and photovoltaics cut cost, and plus and minus spinning reserve cost, is put forward. Based on the indicator, what value of the reliability indicator could be maximizing the economic benefit of spinning reserve in microgrid is synthetically evaluated. Finally, the practicability of the model and algorithm is proved by example.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61364027) and Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2014GXNSFAA118384).

**Key words:** isolated microgrid; sequence operation; plus and minus spinning reserve; artificial bee colony algorithm

## 0 引言

可再生能源有着清洁无污染、运行成本低和可循环利用等特点, 被广泛应用在微电网中, 但同时由于其难调度、难预测和波动性强等缺点, 给微网系统的安全稳定运行带来了新的挑战<sup>[1-2]</sup>。与传统大

电网相比, 微网中 DG 发电量渗透比值要远高于大电网, 其波动性更明显, 且直接接于负荷侧, 对用户电能质量影响更大。对孤岛运行的微电网而言, 可靠性更是重中之重, 提高微电网可靠性的措施有很多, 其中就包括旋转备用的配置。在传统大电网中, 旋转备用的配置为确定性方法, 主要包括事故备用(峰值负荷的 7%~10%)、调频备用(峰值负荷的 2%~3%)和检修备用(仅检修时考虑)。文献[3]将机会约束规划应用到不同置信度时旋转备用容量的确定中。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61364027); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118384)

随着风电和光伏等 DG 并网规模的扩大, 有关含 DG 的电网旋转备用容量获取研究也有不少成果。文献[4-8]在传统的建立机组组合函数基础上, 考虑风机出力波动近似服从高斯分布, 以发电成本、备用成本或停电损失费用最小为目标函数配置备用容量, 但在风电波动误差概率函数上处理简单, 误差较大, 或通过蒙特卡洛模拟求解耗时太多。且均未考虑风电并网后正、负旋转备用对系统带来的不同影响。文献[6]分析比较了在不同概率分布模型下的风电出力偏差, 考虑发电机组随机故障停运, 基于机会约束规划建立备用获取的模型。文献[9-10]考虑了正、负旋转备用的成本和效益, 分别采用随机生产模拟和机组组合确定备用的最优分配。文献[11]在传统通过随机生产模拟解决机组规划运行问题的基础上, 提出了含风电和光伏同时并网的随机生产模拟方法。文献[12]运用序列运算对不确定因素进行处理, 方便且直观地体现了含风电和光伏系统的风险程度, 但未能考虑风电光伏并网带来的正、负旋转备用差异。

以上旋转备用容量的优化均是在大电网或配电网中进行, 目前鲜有提及关于微电网旋转备用的优化方案。文献[13]提出微网并网运行下备用获取的概率性方法, 但未考虑微网向主网提供旋转备用的情况以及正、负旋转备用的影响; 文献[14]采用基于蒙特卡洛随机模拟的算法, 提出微网发电侧与负荷侧协调的备用优化策略。微电网中能够提供备用的资源分以下几部分: ① 不可再生 DG 备用 (Non-renewable Distributed Generation Reserve, NDGR) 如燃料电池、燃气轮机等; ② 储能设备 (Energy Storing Device, ESD) 如铅酸蓄电池、超级电容等; ③ 低价可中断负荷 (Interruptible Load with Low Price, ILL) 和高价可中断负荷 (Interruptible Load with High Price, ILH) [15]。本文针对微网孤岛运行下, 可调度备用含 NDGR 和 ILL 两类资源, 对风电、光伏出力及负荷波动概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 进行序列化运算, 综合考虑微网经济性、环保性和可靠性, 并考虑正、负旋转备用对系统带来的影响, 通过综合经济效益指标优化备用容量。

## 1 微网各单元模型

### 1.1 风力发电随机模型

本文考虑目前广泛使用的变速恒频风机, 其出力  $P_{WT}$  与实际风速  $v$  之间的关系模型常用的有一阶和三阶模型, 本文选取三阶模型为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & 0 < v < v_1, v > v_0 \\ a + b \cdot v^3, & v_1 \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_r$  是风机的额定功率, 单位为 kW;  $v_1$  是风机切入风速,  $v_r$  是风机额定风速,  $v_0$  是风机切出风速, 单位为 m/s;  $a$ 、 $b$  是曲线函数的各项系数, 其中,  $a = \frac{P_r \cdot v_1^3}{v_r^3 - v_1^3}$ ,  $b = \frac{P_r}{v_r^3 - v_1^3}$ 。

在确定风机出力与风速之间对应的关系后, 再通过风速的概率分布模型, 便可求得风机出力概率模型。研究表明, 大部分地区平均风速的概率密度函数曲线均服从双参数的威布尔分布 (Weibull)。给定风速  $v$ , 其概率密度函数关系式为

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

式中:  $k$  为形状参数, 取值范围一般为 2.0~3.3;  $c$  为尺度参数, 反映风场中的平均风速。参数  $k$  和  $c$  可通过对历史风速威布尔分布拟合获得。

### 1.2 光伏发电随机模型

在实际应用中, 光伏电池 (PV) 所接收到的辐照强度受日照入射角、日照强度和气候环境等随机因素影响较大, 其输出功率具有波动性和间歇性。实践表明, 大部分地区的日辐射量平均值满足 Beta 分布, 光伏电池板发电功率  $P_{PV}$  的概率密度函数如下式。

$$f(P_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\alpha-1} \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{R_{PV}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$R_{PV} = A \cdot \eta \cdot r \quad (4)$$

式中:  $R_{PV}$  为光伏电池板的最大输出功率;  $A$  为光伏电池板的总面积;  $\eta$  为光伏电池板的转换效率;  $r$  为太阳辐照度;  $\alpha$ 、 $\beta$  为 Beta 分布函数的形状参数;  $\Gamma(\cdot)$  代表 Gamma 函数。

### 1.3 负荷随机模型

在电力系统中, 负荷具有时变性, 受地区经济、气候、时间等多重随机因素影响。大多数文献认为短期负荷误差预测模型近似服从正态分布  $\Delta P_L \sim N(0, \sigma_L^2)$  [16], 可得负荷预测误差量的概率密度函数为

$$f(\Delta P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_L} e^{-\Delta P_L^2 / (2\sigma_L^2)} \quad (5)$$

式中:  $\Delta P_L$  为负荷预测误差量;  $\sigma_L$  为  $\Delta P_L$  的标准差。

### 1.4 可控发电单元模型

本文微网系统中的可控发电单元包括微型燃气轮机 (MT) 和固体氧化物燃料电池 (SOFC), 两者均

是将燃料(主要是天然气)中的化学能转化为电能的一种装置,其联合系统是一种比单体更高效、环保和清洁的能源利用设备,并被认为是分布式发电系统中的最佳形式之一。通过微网中热负荷曲线可得出微型燃气轮机和燃料电池的能耗 $V_n$ —功率 $P$ 的输出特性函数为

$$V_n = \frac{P_{n,t} \cdot \Delta t}{\eta_n \cdot L_{\text{gas}}}, \quad n=1, 2, \dots, N' \quad (6)$$

式中: $n$ 为各可控发电单元; $N'$ 为可控单元个数; $P_{n,t}$ 为 $t$ 时段可控机组 $n$ 的功率; $\Delta t$ 为一个时段,即1 h; $\eta_n$ 为 $n$ 的发电效率; $L_{\text{gas}}$ 为天然气低热值,取 $L_{\text{gas}} = 9.7 \text{ kWh/m}^3$ 。

## 2 微网旋转备用容量的优化

### 2.1 目标函数

考虑微网的经济效益和环境效益,构建关于运行成本和环境成本的多目标函数,再通过赋权值法将其转换为如下单目标函数。

$$\min f(P_{n,t}) = \sum_{t=1}^{24} [\alpha \cdot G(P_{n,t}) + (1-\alpha) \cdot E(P_{n,t})] \quad (7)$$

式中: $t$ 为单位时段; $G(P_{n,t})$ 为发电成本; $E(P_{n,t})$ 为环境成本; $\alpha$ 为权值系数,取值 $0 \leq \alpha \leq 1$ ,其中,

$$G(P_{n,t}) = \sum_{n=1}^N [C_f(P_{n,t}) + C_{\text{OM}}(P_{n,t}) + C_{\text{DP}}(P_{n,t})] + \quad (8)$$

$$C_{\text{waste}} + C_{\text{lose}} + C_{R,t}$$

$$E(P_{n,t}) = \sum_{k=1}^M \left( \sum_{n=1}^{N'} C_k \cdot \lambda_{k,n} \cdot P_{n,t} \right) \quad (9)$$

式中: $N$ 为发电单元总数; $N'$ 为可控发电单元数,即环境成本主要考虑燃气轮机 MT 和燃料电池 FC 的排放治理成本; $M$ 为污染物类型;下标 $k$ 可为1、2、3、4,分别代表污染物 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ ; $C_k$ 为处理的每 kg 污染物费用; $\lambda_{k,n}$ 是发电单元 $n$ 功率为 $P_{n,t}$ 时不同污染物的排放系数。表1为机组单位出力下不同污染物的治理费用,即 $C_k \cdot \lambda_{k,n}$ 。

表1 环境成本

Table 1 Environment cost

	元/kWh			
污染物	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	$\text{CO}_2$	$\text{CO}$
MT	0.0013	0.0042	0.1467	0.0005
FC	0	0.0007	0.1027	0

令 $C_f(P_{n,t})$ 为 $t$ 时段发电单元 $n$ 的燃料成本,只有消耗燃料的微源才计算该项燃料消耗成本(包括

MT 和 FC), 计算公式为

$$C_f(P_{n,t}) = K_{\text{gas}} \cdot V_n \quad (10)$$

式中, $K_{\text{gas}}$ 为天然气单位价格,取 $K_{\text{gas}} = 3.22 \text{ 元/m}^3$ 。

$C_{\text{OM}}(P_{n,t})$ 为 $t$ 时段发电单元 $n$ 的运行管理成本,微网系统中各微源的运行管理成本与输出功率呈一次函数关系。

$$C_{\text{OM}}(P_{n,t}) = K_{\text{OM},n} \cdot P_{n,t} \cdot \Delta t \quad (11)$$

式中, $K_{\text{OM},n}$ 为发电单元 $n$ 的运行管理系数。

$C_{\text{DP}}(P_{n,t})$ 为 $t$ 时段发电单元 $n$ 的折旧成本。

$$C_{\text{DP}}(P_{n,t}) = \frac{C_{\text{dec},n}}{8760 \cdot c_{f,n} \cdot P_{r,n}} \cdot \frac{r(1+r)^{SL_n}}{(1+r)^{SL_n-1}} \cdot P_{n,t} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{dec},n}$ 为发电单元 $n$ 的单位容量安装成本; $c_{f,n}$ 为发电单元 $n$ 的容量因素; $P_{r,n}$ 为发电单元 $n$ 的额定功率; $r$ 为年利率,取 $r = 0.03$ ; $SL_n$ 为发电单元 $n$ 的使用年限。在调度的每一个时段 $t$ ,有功功率平衡方程为

$$P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + P_{\text{MT},t} + P_{\text{FC},t} + P_{\text{ESS},t} - P_{L,t} = \Delta P_t \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ESS},t}$ 为 $t$ 时段蓄电池出力; $P_{L,t}$ 为 $t$ 时段负荷值。当 $\Delta P_t > 0$ 时,系统负荷偏小,此时应减小机组出力,若可控机组出力已最小或达到爬坡下限,为保持功率平衡条件只能采取切风光措施舍弃部分风光出力,即有

$$C_{\text{waste}} = k_{\text{waste}} \cdot \Delta P_t \quad (14)$$

式中: $C_{\text{waste}}$ 为切风光惩罚成本; $k_{\text{waste}}$ 为切风光惩罚系数,取风电上网平均补贴 $k_{\text{waste,WT}} = 0.63 \text{ 元/kWh}$ ,光伏发电上网平均补贴 $k_{\text{waste,PV}} = 1.0 \text{ 元/kWh}$ 。

同理, $\Delta P_t < 0$ 时,系统负荷偏大,此时应增加机组出力,若可控机组出力已最大或者达到爬坡上限,只能切除多余负荷,即有

$$C_{\text{lose}} = V_{\text{OLL}} \cdot \Delta P_t \quad (15)$$

式中: $C_{\text{lose}}$ 为失负荷惩罚成本; $V_{\text{OLL}}$ 为单位失负荷价值,不同地区取值不同,可通过对用户的调查统计得出。 $C_{R,t}$ 为旋转备用成本,包括可控机组以及蓄电池提供的正、负旋转备用成本。计算式为

$$C_{R,t} = \gamma^u \cdot R_t^u + \gamma^d \cdot R_t^d \quad (16)$$

式中: $\gamma^u$ 为正旋转备用单位价格,取 $0.252 \text{ 元/kWh}$ ; $\gamma^d$ 为负旋转备用单位价格,取值 $0.126 \text{ 元/kWh}$ ; $R_t^u$ 包含 $t$ 时段可控机组和蓄电池提供的正备用量; $R_t^d$ 则为 $t$ 时段可控机组和蓄电池提供的负备用量,如式(17)。

$$\begin{cases} R_t^u = R_{P,t}^u + R_{\text{ESS},t}^u \\ R_t^d = R_{P,t}^d + R_{\text{ESS},t}^d \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $R_{P,t}^u$ 、 $R_{P,t}^d$  为可控机组提供的正负旋转备用;  
 $R_{ESS,t}^u$ 、 $R_{ESS,t}^d$  为蓄电池提供的正负备用容量。

## 2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束见式(13)。

(2) 可控机组出力约束

$$P_n^{\min} \leq P_{n,t} \leq P_n^{\max} \quad (18)$$

式中,  $P_n^{\min}$ 、 $P_n^{\max}$  分别为可控机组  $n$  的最小出力和最大出力。

(3) 可控机组爬坡约束

$$r_n^d \Delta t \leq P_{n,t} - P_{n,t-1} \leq r_n^u \Delta t \quad (19)$$

式中,  $r_n^u$ 、 $r_n^d$  分别为可控机组  $n$  的上行和下行爬坡速率。

(4) 蓄电池约束

蓄电池采用铅酸蓄电池, 其功率限制

$$\begin{cases} -P_{ESS}^{\max} \leq P_{ESS,t} \leq P_{ESS}^{\max} \\ |P_{ESS,t}| \geq 0.2P_{ESS}^{\max} \text{ 或 } P_{ESS,t} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{ESS,t}$  为  $t$  时段蓄电池充放电功率, 大于 0 时放电, 小于 0 时充电;  $P_{ESS}^{\max}$  为蓄电池最大充放电功率。第 2 个不等式为蓄电池放电深度(DOD)限制, 考虑到当铅酸蓄电池在低电荷水平及小电流下使用时, 其寿命损耗会显著增大, 因此限制蓄电池充放电小于某一水平时, 令其充放电状态  $P_{ESS,t} = 0$ 。

蓄电池充放电次数限制

$$\sum_{t=1}^{24} |I_{ESS}(t) - I_{ESS}(t-1)| \leq \lambda \quad (21)$$

式中:  $I_{ESS}(t)$  为  $t$  时段蓄电池充放电状态;  $\lambda$  为最大充放电次数, 需根据实际情况设置。

蓄电池容量限制

$$\begin{cases} SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \\ SOC(t+1) = (1 - \sigma_{sd}) \cdot SOC(t) - \eta_{ch} \cdot P_{ESS,t} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $SOC(t)$  为  $t$  时段蓄电池荷电状态;  $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$  是蓄电池最小、最大荷电状态;  $\sigma_{sd}$  为蓄电池自放电系数;  $\eta_{ch}$  为蓄电池充放电效率, 一般可达 80%~90%。

此外, 为了使微网系统的日调度计划满足相同的起始条件, 应保证储能容量满足式(23)。

$$SOC(1) = SOC(24) \quad (23)$$

蓄电池作为平滑微网风光出力以及负荷波动的必需设备, 除了需要限制充放电次数和功率上限, 充放电状态的控制策略对其使用效率也影响甚大, 因此制定一个合理的充放电控制策略必不可少。本文在此引入基于净负荷的蓄电池控制策略: 首先将

风光出力看成负的负荷并入实际负荷, 得到各时段净负荷值  $P'_{L,t} = P_{L,t} - (P_{WT,t} + P_{PV,t})$ ; 其次计算全天平均净负荷值  $\bar{P}'_{L,t} = \left( \sum_{t=1}^{24} P' \right) / 24$ ; 最后按一定的比例系数

数控制蓄电池充放电<sup>[16]</sup>。

(5) 正负旋转备用约束

微网系统必须保留足够的旋转备用来削弱随机因素给系统带来的负面影响。其中旋转备用又可分为正、负旋转备用两部分。当风力光伏实际出力比预测值偏低, 或负荷增多时, 微网系统必须增大出力来平衡系统功率, 其需要增加的部分就是正旋转备用; 当风力光伏实际出力比预测值偏高, 或负荷减少时, 微网系统必须减小出力, 其需要减少的部分也就是负旋转备用。

$$\begin{cases} P \{ R_t^u \geq \bar{P}_{WT,t} - P_{WT,t} + \bar{P}_{PV,t} - P_{PV,t} + \bar{P}_{L,t} - P_{L,t} \} \geq \alpha \\ P \{ R_t^d \geq P_{WT,t} - \underline{P}_{WT,t} + P_{PV,t} - \underline{P}_{PV,t} + P_{L,t} - \underline{P}_{L,t} \} \geq \alpha \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\bar{P}_{WT,t}$ 、 $\underline{P}_{WT,t}$  为风力预测值上下限;  $\bar{P}_{PV,t}$ 、 $\underline{P}_{PV,t}$  为光伏出力预测值上下限;  $\bar{P}_{L,t}$ 、 $\underline{P}_{L,t}$  为负荷预测上下限; 引入机会约束,  $P \{ \cdot \} \geq \alpha$  是满足某一事件的概率不小于  $\alpha$ ,  $\alpha$  即为满足系统对旋转备用容量需求的置信水平。

可控机组出力和爬坡对旋转备用的影响

$$\begin{cases} R_{P,t}^u \leq \min (P_n^{\max} - P_{n,t}, r_n^u \Delta t) \\ R_{P,t}^d \leq \min (P_{n,t} - P_n^{\min}, r_n^d \Delta t) \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $r_n^u$ 、 $r_n^d$  为可控机组  $n$  的上行和下行爬坡速率, 一般取 5~15 min 的爬坡功率。

考虑到蓄电池提供的备用容量受 SOC 以及充放电功率状态的影响, 建立如下约束

$$\begin{cases} R_{ESS,t}^u \leq \min \{ (SOC(t) - SOC_{\min}) / \Delta t, P_{ESS}^{\max} / \Delta t \} \\ R_{ESS,t}^d \leq \min \{ (SOC_{\max} - SOC(t)) / \Delta t, P_{ESS}^{\max} / \Delta t \} \end{cases} \quad (26)$$

## 2.3 分析指标

(1) 旋转备用实际效益的评估主要体现在可靠性, 也就是期望停电事故所带来的经济损失上。正旋转备用的不足会带来系统供电不足概率的升高, 负旋转备用的减少会引起切风光的可能性增加, 过多的旋转备用配置又会使系统经济效益变差。引用可靠性指标  $R_E$ :

$$R_E = 1 - LOLP \quad (27)$$

来反应系统可靠性, 其中

$$LOLP = P\left\{(\Delta P_{L,t} - \Delta P_{WT,t} - \Delta P_{PV,t}) \geq R_t^u\right. \\ \left. \text{或} (\Delta P_{L,t} - \Delta P_{WT,t} - \Delta P_{PV,t}) \leq R_t^d\right\} \quad (28)$$

式中,  $P\{\cdot\}$  为满足某一事件的概率。对于正旋转备用, LOLP 指标反映了系统失负荷概率大小; 对于负旋转备用, LOLP 指标则反映了系统弃风光概率。

(2) 同时, 为了便于微网系统的全面分析, 本文设置了一个综合经济效益(Comprehensive Economic Benefit, CEB)指标来平衡旋转备用成本与期望停电损失费用和期望弃风光损失费用:

$$CEB = V_{OLL} \cdot E_{EENS}(R_t^u) - \gamma^u \cdot R_t^u \quad (29)$$

式中,  $E_{EENS}(R_t^u)$  为旋转备用量为  $R_t^u$  时的系统损失电量期望值, 它与正旋转备用成反比关系。

上式的实际意义: 当正旋转备用量从 0 开始增加时, 期望停电损失费用  $V_{OLL} \cdot E_{EENS}$  大于正备用成本  $\gamma^u \cdot R_t^u$ , 综合经济效益指标  $CEB > 0$ ; 当正备用增大到某一值时, 期望停电损失费用与正备用成本持平,  $CEB = 0$ , 此时旋转备用综合经济效益达到最大; 如果继续增加正备用, 期望停电损失费用将小于正备用成本,  $CEB < 0$ , 此时正备用带来的综合经济效益反而降低。

同理对负旋转备用有:

$$CEB = k_{waste} \cdot E_{WPA}(R_t^d) - \gamma^d \cdot R_t^d \quad (30)$$

式中,  $E_{WPA}$  为弃风光量期望值, 与负旋转备用量成反比。用来衡量负旋转备用成本与期望电量损失费用的经济效益。

### 3 模型的求解

#### 3.1 随机模型的序列运算

以上得到的风、光出力偏差以及负荷波动偏差的概率分布模型均为连续函数, 而要得到系统整体概率分布模型必须通过卷积和积分计算, 由于得到的最终累计分布函数(CDF)不属于任何分布, 其表达式十分复杂, 求解易出错。本文在此以序列运算理论为基础<sup>[17]</sup>, 首先将各概率密度函数按一定步长离散化。对于  $t$  时段风电波动预测误差  $\Delta P_{WT,t}$  的概率密度函数  $f_{WT,t}(\Delta P_{WT,t})$  ( $\underline{\Delta P}_{WT,t} \leq \Delta P_{WT,t} \leq \overline{\Delta P}_{WT,t}$ ), 其中:  $\overline{\Delta P}_{WT,t} = \overline{P}_{WT,t} - P_{WT,t}$ ;  $\underline{\Delta P}_{WT,t} = P_{WT,t} - \underline{P}_{WT,t}$ 。离散化得到  $\Delta P_{WT,t}$  的概率密度序列, 见图 1。

$$S_{WT,t}(i_{WT,t}) = f_{WT,t}\left(\frac{\underline{\Delta P}_{WT,t}}{N_{step}} + i_{WT,t} \cdot N_{step}\right), \quad (31) \\ i_{WT,t} = 0, 1, \dots, L_{WT,t}$$

式中:  $S_{WT,t}(i_{WT,t})$  为  $\Delta P_{WT,t}$  的第  $i_{WT,t}$  个离散序列;  $N_{step}$  为初始序列运算步长, 取值  $N_{step} = 0.1 \text{ kW}$ ;

$$L_{WT,t} = \frac{\overline{\Delta P}_{WT,t} - \underline{\Delta P}_{WT,t}}{N_{step}} \text{ 为序列长度。}$$

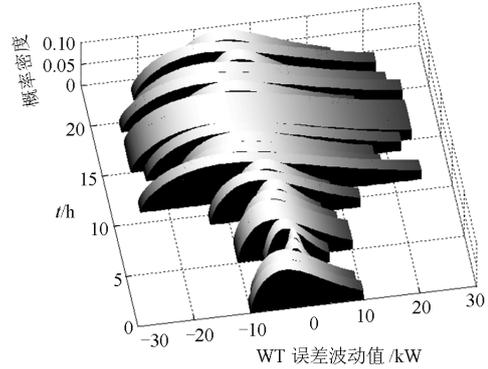


图 1 风电误差概率密度序列图

Fig. 1 Probability density sequence of WT's errors

同理, 可得到光出力及负荷波动预测误差的概率密度函数离散序列  $S_{PV,t}(i_{PV,t})$ 、 $S_{L,t}(i_{L,t})$ , 见图 2、图 3。

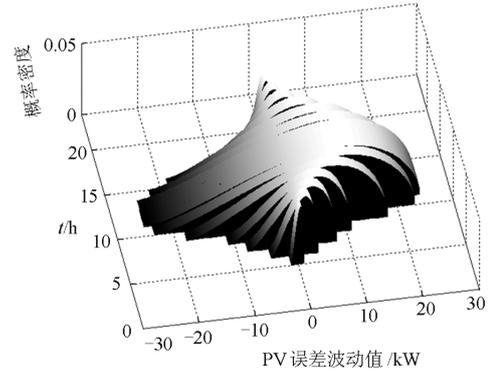


图 2 光电误差概率密度序列图

Fig. 2 Probability density sequence of PV's errors

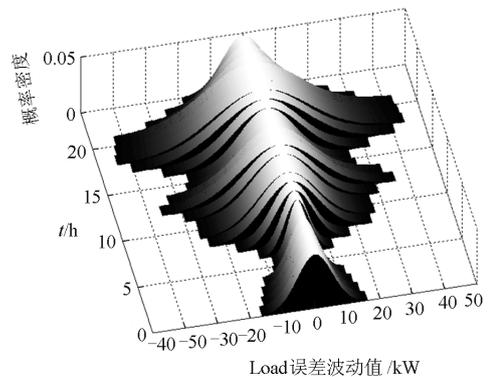


图 3 负荷误差概率密度序列图

Fig. 3 Probability density sequence of loads' errors

对风、光的概率密度序列进行卷积运算, 得到风光联合出力预测误差离散序列为

$$S_{W,P,t}(i_{W,P,t}) = S_{WT,t}(i_{WT,t}) \oplus S_{PV,t}(i_{PV,t}) \quad (32)$$

其中卷和运算为

$$S_{W,P,t}(i_{W,P,t}) = \sum_{i_{WT,t} + i_{PV,t} = i_{W,P,t}} S_{WT,t}(i_{WT,t}) \cdot S_{PV,t}(i_{PV,t}), \quad (33)$$

$$i_{W,P,t} = 0, 1, \dots, L_{W,P,t}$$

式中:  $L_{W,P,t}$  为卷和  $S_{W,P,t}(i_{W,P,t})$  的长度, 等于离散序列  $S_{WT,t}(i_{WT,t})$  和  $S_{PV,t}(i_{PV,t})$  的长度之和, 即  $L_{W,P,t} = L_{WT,t} + L_{PV,t}$ ; 条件  $i_{WT,t} + i_{PV,t} = i_{W,P,t}$  表示在取值范围  $0 \leq i_{WT,t} \leq L_{WT,t}$ 、 $0 \leq i_{PV,t} \leq L_{PV,t}$  内, 所有满足约束  $i_{WT,t} + i_{PV,t} = i_{W,P,t}$  的组合;  $S_{W,P,t}(i_{W,P,t})$  由序列  $S_{WT,t}(i_{WT,t})$  和  $S_{PV,t}(i_{PV,t})$  卷和得到, 简称卷和。

再将负荷波动预测误差概率密度序列与风光联合出力预测误差离散序列进行卷差运算, 便得到净负荷波动预测误差的概率密度离散序列:

$$S_{L',t}(i_{L',t}) = S_{L,t}(i_{L,t}) \ominus S_{W,P,t}(i_{W,P,t}) \quad (34)$$

其卷差运算为

$$S_{L',t}(i_{L',t}) = \begin{cases} \sum_{i_{L,t} - i_{W,P,t} = i_{L',t}} S_{L,t}(i_{L,t}) \cdot S_{W,P,t}(i_{W,P,t}), & 1 \leq i_{L',t} \leq L_{L',t} \\ \sum_{i_{L,t} \leq i_{W,P,t}} S_{L,t}(i_{L,t}) \cdot S_{W,P,t}(i_{W,P,t}), & i_{L',t} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中:  $L_{L',t}$  为卷差  $S_{L',t}(i_{L',t})$  的长度, 等于离散序列  $S_{L,t}(i_{L,t})$  的长度;  $S_{L',t}(i_{L',t})$  为序列  $S_{L,t}(i_{L,t})$  和  $S_{W,P,t}(i_{W,P,t})$  卷差得到的序列, 简称卷差。

此处, 由于序列卷差运算将  $i_{L,t} \leq i_{W,P,t}$  时的卷差值全部叠加在  $i_{L',t} = 0$  上, 从而导致无法判断  $i_{L,t} \leq i_{W,P,t}$  时的全部序列值, 也就是无法确定当微网负荷波动预测值小于风光出力预测误差时的情况, 即无法确定系统负备用大小。在这里对  $S_{L',t}(i_{L',t})$  的序列卷差运算式(35)稍做改动, 令

$$S_{L',t}(i_{L',t}) = \sum_{\substack{i_{L,t} - i_{W,P,t} = i_{L',t} \\ -L_{W,P,t} \leq i_{L',t} \leq L_{L,t}}} S_{L,t}(i_{L,t}) \cdot S_{W,P,t}(i_{W,P,t}), \quad (36)$$

此时, 序列  $S_{L',t}(i_{L',t})$  的长度  $L_{L',t}$  不再等于序列  $S_{L,t}(i_{L,t})$  的长度, 而是等于  $S_{L,t}(i_{L,t})$  和  $S_{W,P,t}(i_{W,P,t})$  的长度之和, 即  $L_{L',t} = L_{L,t} + L_{W,P,t}$ , 而  $i_{L',t}$  的取值范围也由  $[0, L_{L,t}]$  变为  $[-L_{W,P,t}, L_{L,t}]$ , 这样得到的卷差序列就不会影响到负旋转备用的计算。

图 4 为最终得到的净负荷预测误差概率密度离散序列。

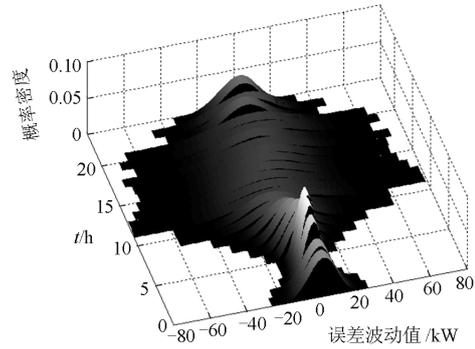


图 4 净负荷误差概率密度序列图

Fig. 4 Probability density sequence of total loads' errors

### 3.2 人工蜂群算法求解

本文在模型求解上采用改进的人工蜂群算法(ABC)。传统的 ABC 算法在许多领域得到广泛应用, 有着良好的寻优能力, 但对复杂问题的优化, 其也存在着收敛速度较慢, 易陷入局部最优等问题。为了进一步提高 ABC 算法求解性能, 本文在传统 ABC 算法中引入 Logistic 混沌搜索机制。

混沌是具有随机性的运动状态, 它的运动行为复杂, 类似于随机运动, 是一种普遍存在的运动现象, 它由特定方程得到, 具有随机性、遍历性和敏感性等特点, 亦称作“蝴蝶效应”。常用的启发式算法中经常用到混沌理论, 在 ABC 算法中, 当蜜源达到搜索阈值 limit 时, 说明该蜜源陷入局部最优, 跟随蜂将放弃该蜜源, 转变为侦查蜂重新随机搜索新蜜源, 此时让侦查蜂采用混沌搜索, 对该解重新赋值, 利用混沌运动的遍历性产生混沌序列代替随机搜索, 从而跳出局部最优。在 ABC 算法侦查蜂的搜索上引入混沌映射方程步骤如下。

步骤 1: 设置混沌映射初始值  $X_i^0$  为

$$X_i^0 = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (37)$$

式中,  $x_i$  为蜜源第  $i$  个解, 即 MT 和 FC 的出力。

步骤 2: 产生混沌序列为

$$X_i^{n+1} = 4X_i^n (1 - X_i^n) \quad (38)$$

式中,  $0 < X_i^n < 1$ 。

步骤 3: 计算新解  $x'_i$ , 根据适应度保留优解

$$x'_i = x_i + X_i^n (x_{\max} - x_{\min}) \quad (39)$$

步骤 4: 重复步骤 2、3 直到最大混沌迭代次数。

此外, 算法在跟随阶段采用轮盘赌反向选择机制, 即将被选蜜源适应度的倒数与其总和的比值作为选择的概率, 从而避免了蜂群采蜜过程中蜜蜂过度向适应度值高的蜜源集中, 保持了种群的多样性, 避免算法陷入早熟。其原理如式(40)<sup>[18]</sup>。

$$H_i = \frac{1 / fit_i}{\sum_{j=1}^{NP} (1 / fit_j)} \quad (40)$$

式中： $H_i$ 为第*i*个蜜源被选择的概率； $fit_i$ 为第*i*个蜜源的适应度； $NP$ 为蜜源数量，即解的个数。

用改进后的ABC算法求解本文模型流程如图5所示。

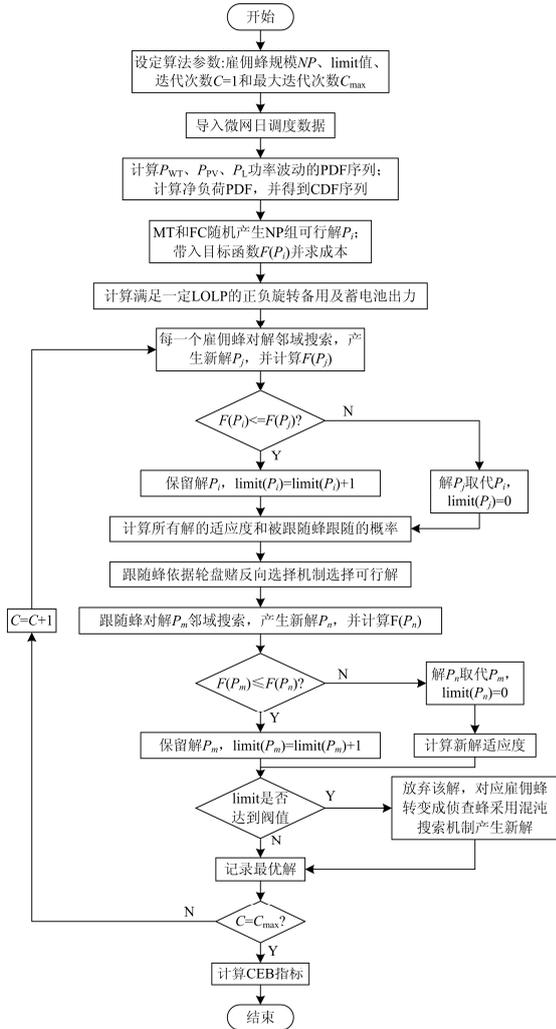


图5 模型求解流程图

Fig. 5 Flowchart of the solution of model

#### 4 算例分析

将上述提到的模型及算法应用于典型的风光储混合型微电网。该微网系统为直流母线微网，调度周期1天，最小时段1h；负荷、风速和光照强度模型均为夏季某一天的预测数据，如图6。在图6预测数据的基础上，按照3.1小节序列运算理论，求得净负荷误差概率密度序列，如图4所示。发电单元包括风机、光伏阵列、燃气轮机、燃料电池和铅酸蓄电池组。各微源主要参数见表2。

表2 主要微源参数

微源类型	容量/kW	安装成本/(万元/kW)	运维成本/元/(kWh)	使用年限/年	折旧系数	发电效率
WT	0~100	2.375	0.0297	10	0.7	—
PV	0~120	6.65	0.0096	20	2.79	—
MT	15~250	0.965	0.0640	15	0.011	0.35
FC	10~150	5.271	0.0293	10	0.25	0.4

风机额定功率  $P_r=100$  kW，切入风速  $v_i=4$  m/s，额定风速  $v_r=12$  m/s，切出风速  $v_o=25$  m/s；光伏阵列最大输出  $R_{PV}=120$  kW，光伏板总面积  $A=1300$  m<sup>2</sup>，光电转换效率  $\eta=0.093$ ；燃气轮机和燃料电池每小时爬坡能力分别为160 kW、100 kW，蓄电池额定容量160 kWh，最小容量40 kWh，最大充放电功率  $P_{ESS}^{max}=40$  kW。

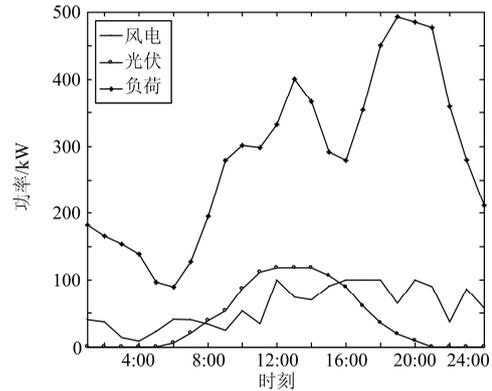


图6 夏季某日风光出力以及负荷预测曲线

Fig. 6 Forecast curve of wind, photovoltaics and load of one day in summer

在旋转备用容量的优化中，当设定微网系统可靠性指标  $R_E=1$  时，各机组出力以及旋转备用容量见图7。在负荷低谷时期主要是燃料电池FC出力，燃气轮机MT仅保持最低出力运行；当负荷达到峰值或陡增时，MT才增加功率，可见FC发电经济性要优于MT，因此本文选取MT优先提供正旋转备用、FC优先提供负旋转备用，可有效降低发电成本。本微网系统在负荷峰值期为保证额外的失负荷损失电量为0，必须预先切除一定量ILL，如图7(b)在18—22时段内切除的部分负荷。当失负荷概率LOLP越小时，需要用来补偿功率波动偏差的旋转备用越多，且LOLP越接近于0，其旋转备用增加量越显著，当LOLP=0时得到的旋转备用量很大，如图7(d)所示。由于本文预设风光出力及负荷波动预测误差在一定范围内且上下波动幅值相等，即预测值的一定比例，故图7(d)中当LOLP为0时，正负旋转备用量刚好相等；而在12—14以及18等

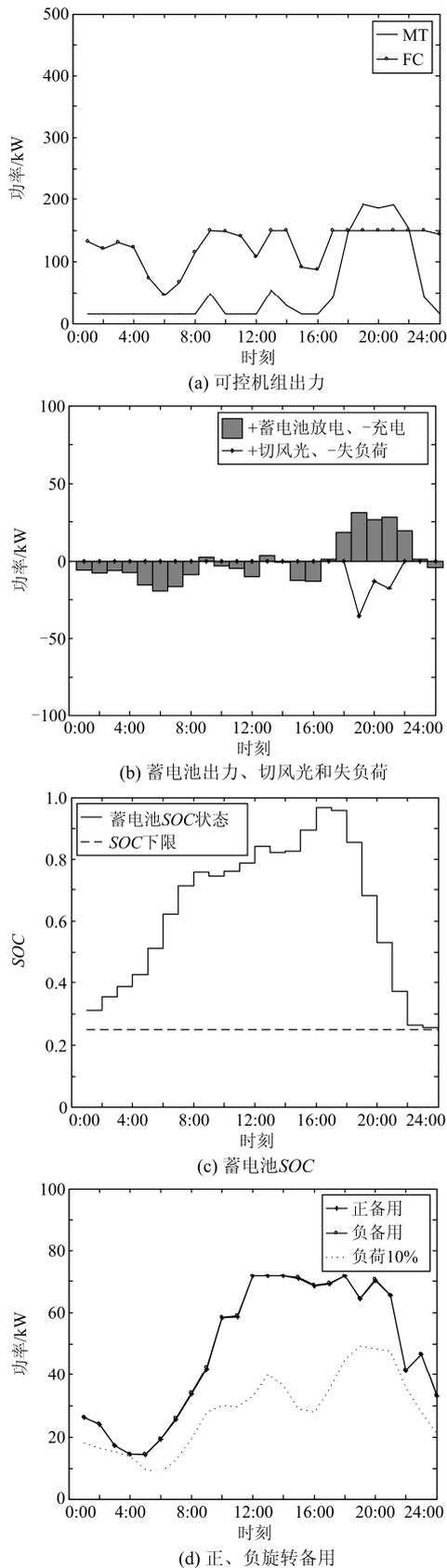
图7 可靠性指标  $R_E=1$  时微网调度计划

Fig. 7 Scheduling plan of microgrid when reliability indicator is 1

若干时段, 系统理论旋转备用应在 70~75 kW, 实际上由于旋转备用的容量配置受机组爬坡限制, 最大只能到 70 kW, 因此该时段内系统可靠性指标小于 1, 实际值约为 0.999 85。不考虑风光出力, 仅以传统大电网的旋转备用获取方法, 即负荷的 10%来配置微网旋转备用, 得到的曲线在 7(d)中用虚线表示。

表 3 给出了可靠性指标从 1 开始逐渐减小时, 微网系统日总经济成本的变化以及正、负旋转备用的综合经济效益值 CEB。当  $R_E$  由 1 刚开始减小时, 日成本明显下降, 备用 CEB 值快速上升, 说明此时稍微降低系统可靠性便能带来经济上的显著收益; 当  $R_E$  降至 0.9950 时, 日成本下降平缓, 正备用 CEB 值由负变正, 负备用 CEB 值为 -5.55, 说明此时降低系统可靠性带来的经济收益减少, 并且再减少正备用所造成的期望停电损失费用会大于正备用成本, 但负备用 CEB 值仍然为负, 其成本比期望电量损失费用高; 当  $R_E$  降至 0.9940 以下时, 无论继续减少系统正备用还是负备用容量, 期望停电损失费用和期望电量损失费用将大于备用成本。可见, CEB 值与总成本大致呈反比关系, 不仅如此, 它还将可靠性与系统经济成本关联起来, 更便于分析和取舍。

表 3 不同可靠性指标下微网运行日经济成本

Table 3 Daily economic cost of microgrid operation under different reliability indicators			
可靠性指标	总成本/元	正备用日 CEB	负备用日 CEB
1	4962.5	-278.96	-140.15
0.999 99	4923.4	-206.44	-118.54
0.999 94	4897.3	-169.75	-99.32
0.9999	4887.0	-156.61	-92.27
0.9994	4837.2	-98.84	-60.12
0.9990	4818.6	-78.33	-48.69
0.9980	4790.6	-47.34	-31.50
0.9970	4772.1	-27.25	-20.51
0.9960	4757.9	-12.05	-12.13
0.9950	4746.3	0.44	-5.55
0.9940	4737.4	10.64	0.09
0.9930	4730.1	19.92	5.18

综合以上分析, 本微网系统可靠性取在 0.9940~0.9950 时综合效益最大。图 8 给出了可靠性指标为 0.9950 时微网的调度计划。图 8(c)中, 在白天 6—18 时段, 负备用要大于正备用, 可见系统需要提供更多负备用来消纳光伏功率波动, 而在晚上无光照时段, 正备用则略高于负备用, 说明系统为补偿风机出力需提供正备用较多。图 8(d)为使用本文模型与传统 10%的备用获取方法分别得到的各时段可靠性指标对比图, 显然, 传统旋转备用的确定方法并不适合于含风力、光伏等分布式电源的微网系统中, 本文模型得到的系统各时段可靠性要更高且平稳。

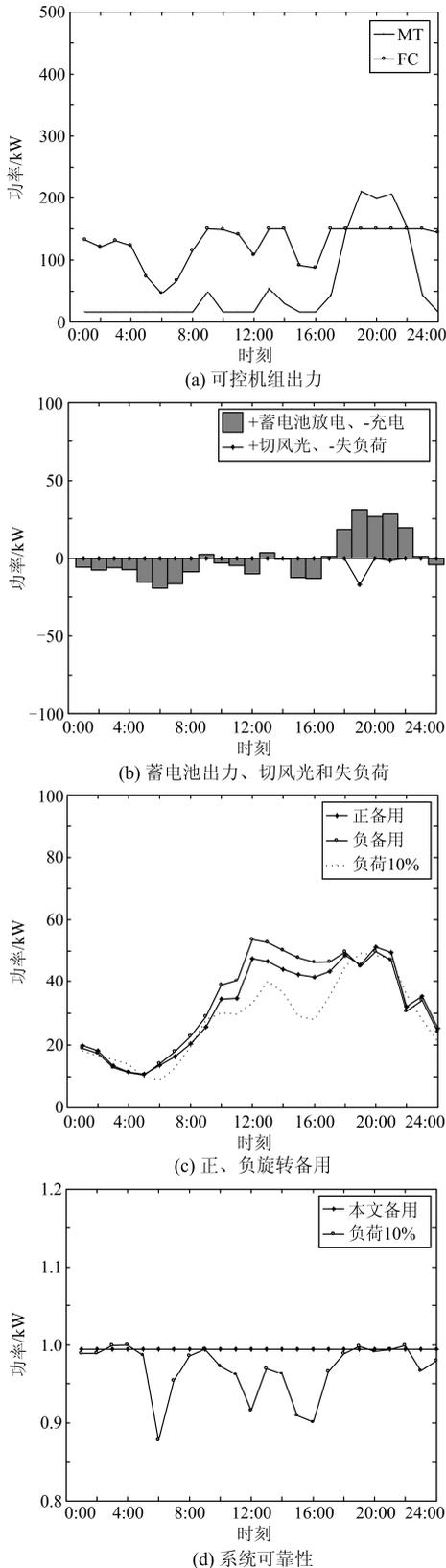


图 8 可靠性指标  $R_E=0.9950$  时微网运行调度计划  
 Fig. 8 Scheduling plan of microgrid operation  
 reliability indicator is 0.9950

## 5 结论

本文考虑风电、光伏出力及负荷波动等随机因素，在微网系统随机模型的求解中引入序列运算理论，对风、光出力偏差以及负荷波动偏差的概率分布模型进行卷积及卷积运算，得到各时段净负荷的概率密度函数离散序列，然后计算在不同可靠性下的系统正、负旋转备用，以日运行发电成本和环境成本最小化为目标，优化可控机组出力以及蓄电池的充放电。并提出考虑微网期望停电损失、期望切风光损失费用和正、负旋转备用成本的综合经济效益 CEB 指标，以该指标为依据分析微网系统在可靠性为何值时旋转备用经济效益可达到最大。研究表明，系统可靠性指标与 CEB 指标两者密切相关，合理的配置不但可以有效降低微网的运行成本，还可以保证系统的整体可靠性。

## 参考文献

- [1] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0016-y
- [2] THALE S S, WANDHARE R G, AGARWAL V. A novel reconfigurable microgrid architecture with renewable energy sources and storage[J]. IEEE Journals & Magazines, 2015, 51(2): 1805-1816.
- [3] 王乐, 余志伟, 文福拴. 基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 14-19.  
WANG Le, YU Zhiwei, WEN Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 14-19.
- [4] 苏鹏, 刘天琪, 李兴源. 含风电的系统最优旋转备用的确定[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 158-162.  
SU Peng, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Determination of optimal spinning reserve of power grid containing wind[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 158-162.
- [5] 王彩霞, 乔颖, 鲁宗相. 考虑风电效益的风火互济系统旋转备用确定方式[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 16-21.  
WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang. A method for determination of spinning reserve in wind-thermal power systems considering wind power benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 16-21.
- [6] 葛炬, 王飞, 张粒子. 含风电场电力系统旋转备用获

- 取模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 32-36.  
GE Ju, WANG Fei, ZHANG Lizi. Spinning reserve model in the wind power integrated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 32-36.
- [7] 夏澍, 顾劲岳, 葛晓琳, 等. 风光联合优化配置的多目标机会约束规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 35-40.  
XIA Shu, GU Jinyue, GE Xiaolin, et al. Multiobjective chance-constrained programming method for wind generations and photovoltaic allocating[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 35-40.
- [8] 杨家然, 王兴成, 蒋程, 等. 计及风力发电风险的电力系统多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 25-31.  
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, JIANG Cheng, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling of power system considering wind power risk[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 25-31.
- [9] 王国权, 陈筱菁, 王森, 等. 含风电系统中正负旋转备用容量的最优分配[J]. 可再生能源, 2014, 32(8): 1105-1110.  
WANG Guoquan, CHEN Xiaoru, WANG Sen, et al. Plus and minus spinning reserve in the optimal allocation of power grid containing wind[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(8): 1105-1110.
- [10] 吴臻, 刘军, 谢胤喆, 等. 含风电安全约束机组组合的旋转备用优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 86-91.  
WU Zhen, LIU Jun, XIE Yinzhe, et al. Spinning reserve optimization in security constraint unit commitment with wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(1): 86-91.
- [11] 陈亚博, 盛戈峰, 黎建, 等. 含光伏和风电的电力系统随机生产模拟[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(5): 1-6.  
CHEN Yabo, SHENG Gehao, LI Jian, et al. Probabilistic production simulation of power system with photovoltaic power and wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(5): 1-6.
- [12] 殷桂梁, 张雪, 操丹丹, 等. 考虑风电和光伏发电影响的电力系统最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3497-3504.  
YIN Guiliang, ZHANG Xue, CAO Dandan, et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3497-3504.
- [13] WANG M Q, GOOI H B. Spinning reserve estimation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1164-1174.
- [14] 江岳春, 邢方方, 庞振国, 等. 基于机会约束规划的微电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.
- [15] 罗运虎, 陈海牛, 李磊, 等. 基于风险的微网分布式发电备用配置决策[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 53-58.  
LUO Yunhu, CHEN Hainiu, LI Lei, et al. Risk decision-making for configuration of microgrid distributed generation reserve[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 53-58.
- [16] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2705-2711.  
LUO Yi, LIU Mingliang. Research on environmental and economic dispatch for isolated microgrid system taken risk reserve constraints into account[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2705-2711.
- [17] 康重庆, 夏清, 相年德, 等. 序列运算理论及其应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 6-11.  
KANG Chongqing, XIA Qing, XIANG Niande, et al. Sequence operation theory and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 6-11.
- [18] 向万里, 马寿峰. 基于轮盘赌反向选择机制的蜂群优化算法[J]. 计算机应用研究, 2013(1): 86-89.  
XIANG Wanli, MA Shoufeng. Artificial bee colony based on reverse selection of roulette[J]. Application Research of Computers, 2013(1): 86-89.

收稿日期: 2016-09-23; 修回日期: 2017-02-09

作者简介:

吕智林(1971—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕导, 研究方向为智能电网、系统优化及复杂系统集成控制等; E-mail: luzhilin2001@163.com

孙顺吉(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制; E-mail: 404986331@qq.com

汤泽琦(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统优化与控制。E-mail: tangzeqixx@163.com

(编辑 葛艳娜)