

## 考虑随机性的微网能量优化调度模型

柳丹, 李强, 袁晓冬

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 针对微网中风能和太阳能等可再生能源具有随机性和波动性的特点, 提出了一种考虑随机性的微网能量优化调度模型, 用以降低可再生能源发电预测不确定性带来的微网和主网连接点 (Point of common coupling, PCC) 处的功率波动, 使得微网对于主网成为一个可调度的单元, 同时实现微网的经济调度。首先, 采用拉丁超立方采样法 (Latin hypercube sampling, LHS) 和同步回带削减 (Simultaneous backward reduction, SBR) 技术生成可能的出力场景来描述风电和太阳能光伏发电出力的随机性。然后将 PCC 处能量波动引入目标函数, 使得在系统期望成本最小的同时减小风电和光伏出力波动性对电网的影响, 采用遗传算法求解该问题。仿真结果表明, 该模型对含风电和太阳能光伏发电的微网优化调度的合理性和有效性。

**关键词:** 微电网; 经济调度; 随机优化; 分布式电源; PCC

### Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization

LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiao-dong

(Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** This paper proposes a stochastic optimization model considering the volatility of wind power and photovoltaic power in microgrid. The model optimizes the economic operation of a microgrid as well as minimizes the flow deviation at the point of common coupling (PCC) from scheduled values. First, the Latin hypercube sampling (LHS) and simultaneous backward reduction (SBR) technique are introduced to describe the stochastic nature of wind power and photovoltaic power. Then the random characteristic is introduced into the objective function of the stochastic model which is solved based on the genetic algorithm (GA). Simulation results demonstrate its rationality and effectiveness for day-ahead scheduling of a microgrid.

**Key words:** microgrid; economic dispatch; stochastic optimization; renewable energy; PCC

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0112-06

## 0 引言

微网将分布式电源 (Distributed Generation, DG)、储能装置和负荷整合在一起接入大电网, 与大电网高效、安全、可靠地互补运行, 可以提高供电可靠性和能源利用率, 降低环境污染<sup>[1]</sup>。然而以太阳能、风能为代表的可再生能源大多具有间歇性和随机性, 使得包含可再生能源的微网系统波动明显和频繁, 通过 PCC 接入主网, 会对主网的潮流控制<sup>[2]</sup>、电压稳定性<sup>[3]</sup>、电力市场运行<sup>[4]</sup>、系统运行规划<sup>[5]</sup>等方面带来负面影响, 甚至危及公共电网安全。因此需对分布式能源进行经济优化调度以消除可再生能源发电出力波动对主网的影响, 同时使其整体运行在经济高效的范围, 使微网相对主网成为一个

模块化的可控单元, 对内提供满足负荷用户需求的电能。

在微网经济运行方面, 国内外已有大量的研究成果, 文献[6]提出了含多种微源的微网经济调度模型, 考虑分时计价, 给出典型的微网日前调度计划。文献[7-8]对智能电网环保及经济性进行量化评估, 提出了智能电网多目标优化运行的调度策略。但是上述能量调度研究主要基于确定性的系统模型, 假定可再生能源预测出力为实际出力进行经济调度, 而实际由于分布式电源出力的随机性, 微网并未按日前调度计划曲线与主网进行能量交换, 可能影响公网的安全稳定运行。文献[9]提出了包含风能和太阳能发电系统的模糊决策调度, 将预测值表示成模糊数, 利用隶属度函数研究调度方案, 但没有对含

多种可再生能源的微网经济运行加以分析。

本文提出了考虑随机性的微网能量优化调度模型, 采用概率的方法将太阳能光伏电池和风机出力的随机性纳入优化调度模型中。采用拉丁超立方采样法将分布式电源的出力离散化为多个场景, 通过同步回带削减 SBR 技术选取其中最具有代表性的期望场景。将 PCC 处能量波动引入目标函数, 使得在系统总期望运行成本最小的同时减小风机和太阳能光伏电池出力波动性对电网的影响, 在考虑随机性的条件下, 采用遗传算法求解该多目标优化问题。

## 1 拉丁超立方采样

由于同时考虑了风机出力和光伏出力的随机性, 为了描述该随机性, 引入多维采样理论。超拉丁立方采样属于多维分层采样方法, 是一种有效的用采样值反映随机变量整体分布的方法。由 M.D.McKay、R.J.Beckman 和 W.J.Conover 在 1979 年提出这种方法<sup>[10]</sup>, 其目的是要保证所有的采样区域都能够被采样点覆盖。拉丁超立方采样可以有效的提高采样效率, 目前在电力系统中已被用于可靠性分析<sup>[11]</sup>。本文将拉丁超立方采样用于对风机和光伏出力的场景生成。

设一超立方体如下:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$  是  $p$  个输入随机变量, 即变量的维数为  $p$ , 各变量的累计概率分布函数为:  $F_{x_i} = f_i(x_i)$  其中  $i=1, 2, \dots, p$ 。利用 LHS 在该超立方体内产生  $N$  个样本的算法如下:

(1) 定义抽样规模为  $N$ ;

(2) 对于任一随机变量  $x_i$ , 将  $x_i$  的累计概率分布曲线  $F_{x_i} = f_i(x_i)$  的纵轴等概率的分成  $N$  个区间, 每个区间宽度为  $\frac{1}{N}$ , 在每个区间内随机抽取一个值, 满足  $x_{i1} < x_{i2} < x_{i3} \dots < x_{ik} \dots < x_{iN}$  且有

$$P(x_{ik} < x < x_{i(k+1)}) = \frac{1}{N} \quad (1)$$

(3) 对于随机变量  $x_i$  的第  $k$  个采样值  $x_{ik}$ , 其对应的累计分布概率为

$$F_{x_i}(k) = (1/N)r_u + (k-1)/N \quad (2)$$

其中:  $r_u \sim N(0,1)$  服从均匀分布;  $k=1, 2, \dots, N$ 。通过计算累计分布函数  $F_{x_i}$  的反函数, 即可求得  $x_i$  的第  $k$  个采样值  $x_{ik}$ , 满足式(3)。

$$x_{ik} = F_{x_i}^{-1}((1/N)r_u + (k-1)/N) \quad (3)$$

(4) 采样结束后, 将每个随机变量的采样值排成矩阵的一列, 形成一个  $N \times P$  的采样矩阵  $S$ 。将矩阵各列的采样值进行排序, 使得各列的相关性最小。本文采用 Gram-Schmidt 序列正交化方法进行排序<sup>[12]</sup>, 通过迭代计算使各列的相关性最小。最后形成  $N$  个采样场景。

下面以一个例子更直观的说明 LHS 的操作过程。对于变量维数  $p=2$ , 抽样规模  $N=5$ , LHS 的采样结果如图 1 所示。

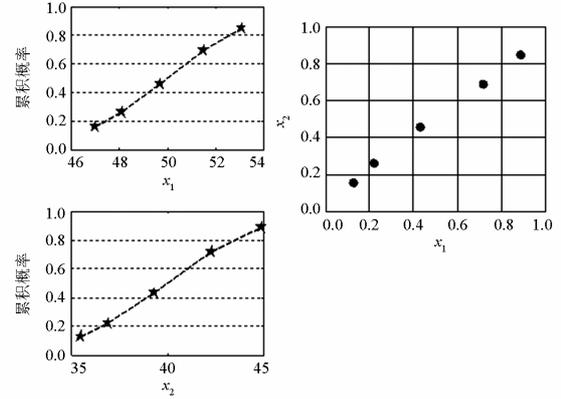


图 1 LHS 采样结果

Fig. 1 Sampling results of LHS

## 2 同步回带削减

由 LHS 原理可知, 抽样规模越大, 精度越高, 但降低了计算效率, 为减少计算量并尽可能保留原场景的特点, 通过场景削减技术合并相似场景。本文采用同步回带削减 SBR 技术<sup>[13]</sup>进行场景削减并确定相应概率。假定初始场景集合中有  $N$  个场景  $S = \{\theta_i, i=1, \dots, N\}$ , 每个场景对应的概率为  $p_i$ , 显然利用 LHS 生成的每个场景的概率都为  $1/N$ , 定义场景向量的 2 范数为场景的概率距离作为降阶尺度, 记作  $D(i, j) = D(\theta_i, \theta_j)$ 。最终场景数目为  $N_f$ ,  $DS$  为被删掉的场景集合, 初始阶段为空, 则 SBR 算法的基本步骤如下。

(1) 计算场景  $i, j$  之间的距离  $D(i, j) = D(\theta_i, \theta_j)$   $i, j=1, \dots, N$ ;

(2) 对于每一个场景  $k$ , 找到与其距离最短的场景  $r$ , 即  $D(k, r) = \min D(k, s) \quad k \neq s, k, s \in S$

(3) 场景  $k$  的概率为  $p(k)$ , 计算  $PD_k(r) = p(k) \cdot D(k, r)$ , 由  $PD_d = \min PD_k$  确定待删除的场景  $d$ ;

(4) 修正样本  $S$  和  $DS$  及相关概率  $S = S - \{d\}$ ,  $DS = DS + \{d\}, p(r) = p(r) + p(d)$ ;

(5)  $N = N - 1$ , 当  $N = N_f$  时, 迭代终止, 否

则，转至步骤（2）。

假设光伏发电和风电出力满足正态分布，取误差标准差为预测值的 25%，利用 LHS 生成 1000 个出力场景，通过 SBR 将场景削减至 10 个，生成的场景见表 1、表 2，图 2 给出了 10 个场景的概率。

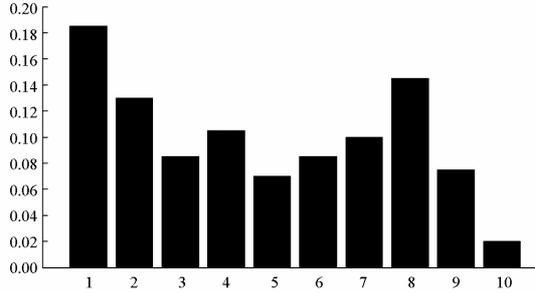


图 2 场景分布概率

Fig. 2 Probability distribution of scenes

表 1 风电出力场景

Table 1 Scenes of wind power

时间	风电出力场景/kW									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	21.23	21.20	21.76	20.86	21.42	22.34	20.93	21.39	21.16	21.27
2	33.83	34.04	32.87	34.13	33.27	32.76	33.51	32.73	33.15	32.30
3	35.75	35.41	35.00	34.52	34.95	35.68	35.26	35.40	35.64	35.52
4	37.35	38.81	38.96	38.14	39.63	38.21	39.27	37.93	38.62	37.92
5	38.91	39.89	39.70	39.52	39.57	39.86	38.97	39.19	39.90	40.21
6	38.68	39.42	38.93	39.58	39.30	39.49	38.81	39.07	39.53	40.16
7	39.72	39.24	39.35	39.81	39.56	39.62	38.57	40.07	38.59	39.12
8	42.50	41.33	41.66	42.06	42.02	40.98	40.77	42.38	41.39	42.29
9	39.65	39.51	39.67	38.37	39.36	39.65	38.97	39.07	38.82	39.30
10	39.85	39.69	40.29	39.74	39.43	39.32	39.56	40.05	39.11	39.41
11	43.59	43.94	43.65	44.03	43.48	43.70	44.39	45.58	44.31	43.24
12	43.25	43.16	42.72	43.98	44.35	43.52	43.67	42.62	43.09	44.09
13	38.94	39.13	39.69	38.81	40.11	39.19	39.42	39.46	39.25	39.88
14	38.76	37.33	37.06	36.87	37.38	36.93	36.85	37.23	38.63	38.57
15	36.08	38.34	37.25	36.93	36.64	36.80	36.90	37.41	37.54	37.71
16	25.54	24.45	25.40	24.48	23.95	25.33	25.19	23.88	25.63	25.14
17	21.76	21.98	21.91	21.24	21.57	22.20	22.02	22.46	22.11	21.89
18	23.58	23.36	23.34	23.09	24.40	23.66	23.37	23.67	23.97	24.14
19	25.01	24.23	25.69	25.50	24.97	25.93	23.29	24.73	24.78	25.52
20	22.71	22.78	23.22	22.67	23.66	21.14	22.73	22.25	21.23	22.09
21	22.64	22.71	22.92	23.29	23.75	23.30	23.26	22.89	23.99	22.79
22	26.48	26.19	26.23	25.86	26.52	26.38	27.07	25.96	27.57	26.58
23	29.23	29.61	28.63	28.28	28.70	28.34	29.10	27.98	29.15	29.14
24	25.87	24.79	25.04	24.82	24.22	24.70	24.46	26.00	25.37	24.17

表 2 太阳能光伏出力场景

Table 2 Scenes of PV power

时间	太阳能光伏出力场景/kW									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	0.13	0.27	0.87	0.02	0.36	0.29	0.03	0.25	0.78	0.10
2	0.17	0.46	0.11	0.22	0.64	0.21	0.19	0.08	0.18	0.01
3	0.17	0.56	0.18	0.08	0.47	0.16	0.31	0.14	0.27	0.14
4	0.16	0.48	0.84	0.35	0.08	0.15	0.83	0.69	0.42	0.23
5	0.13	0.34	0.07	0.29	0.28	0.18	1.54	0.48	0.53	0.91
6	0.11	0.98	0.31	0.23	0.02	0.52	0.06	0.49	1.25	0.83
7	0.22	0.30	0.80	0.82	0.77	0.12	0.27	0.36	0.74	0.47
8	1.58	0.44	1.30	1.14	0.91	0.75	1.53	1.93	0.42	0.06
9	1.96	0.96	0.68	1.84	1.47	0.31	1.45	1.74	1.45	1.23
10	3.60	3.15	3.97	4.14	2.72	3.58	4.09	2.67	2.93	4.11
11	4.51	5.42	4.49	4.86	4.33	5.69	4.79	5.34	4.85	4.85
12	4.59	4.56	6.01	4.12	4.87	4.17	5.91	5.41	5.11	5.10
13	7.22	7.03	6.84	6.41	6.63	6.70	6.76	5.87	6.87	7.29
14	7.44	7.69	7.27	6.82	7.79	6.97	7.31	7.48	6.79	7.82
15	5.71	6.01	5.29	5.26	5.43	6.20	5.92	7.11	6.44	6.06
16	3.85	2.98	4.16	3.60	3.76	2.89	3.76	2.14	3.47	4.34
17	1.52	1.62	1.43	1.81	0.92	1.94	2.53	2.35	1.04	1.48
18	1.52	0.69	0.47	0.70	0.29	0.49	1.20	1.24	0.75	0.20
19	0.34	0.54	0.36	0.98	0.81	0.64	0.59	0.62	0.86	0.46
20	0.90	0.20	0.54	0.22	0.35	0.78	0.37	0.36	0.46	0.58
21	0.29	0.55	0.15	0.42	0.27	1.35	0.38	0.49	0.58	0.16
22	0.43	0.30	0.82	0.22	1.02	0.44	0.65	0.01	0.24	1.10
23	0.04	0.21	0.31	1.16	0.28	0.30	0.59	0.68	0.48	0.32
24	1.49	0.09	0.84	1.10	0.08	1.01	0.06	0.75	0.45	0.39

### 3 随机优化调度模型

#### 3.1 目标函数

对于不考虑随机性条件下的确定性模型，其目标函数满足式(4)。

$$\min F = \sum_{t=1}^T (c_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t}^{s0} + \sum C_i (P_{\text{DG},t}^{s0})) \quad (4)$$

式中： $c_{\text{grid},t}$ 是 $t$ 时刻电价； $P_{\text{grid},t}^{s0}$ 分别是 $t$ 时刻 PCC 处日前计划交换功率； $\sum C_i (P_{\text{DG},t}^{s0})$ 为系统中所有 DG 的运行费用； $P_{\text{DG},t}^{s0}$ 为各 DG 单元的发电功率； $T$ 为调度周期；本文为 24 h。

随机优化模型的目标是在考虑可再生能源出力随机性的条件下微网系统期望运行费用最低。同时，减小 PCC 点处交换功率的波动，实现微网的可

调度性, 在目标函数中引入 PCC 点处的波动项。从而有

$$\min F_S = \alpha \sum_s p_s \sum_{t=1}^T (c_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t}^s + C(P_{\text{DG},t}^s)) + \beta \sum_s p_s \sum_{t=1}^T (P_{\text{grid},t}^s - P_{\text{grid},t}^{s0})^2 \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{grid},t}^s$  分别是  $t$  时刻对应场景  $s$  的 PCC 交换功率;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为运行费用和 PCC 功率波动的惩罚因子。  $\alpha$ 、 $\beta$  取不同值时, 系统的调度方式也会发生相应的改变, 可根据不同的系统的不同进行指定 (在本仿真中, 该参数选为 (0.5,0.5))。

### 3.2 等式约束

在微网经济调度的同时, 必须满足功率平衡限制

$$P_{\text{load},t} = P_{\text{grid},t}^s + \sum P_{\text{DG},t}^s \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{load},t}$  为  $t$  时刻微网总的有功负荷;  $\sum P_{\text{DG},t}^s$  为  $t$  时刻微网中所有 DG 的出力之和。

### 3.3 不等式约束

为了保证 DG 的稳定运行, 每台 DG 必须满足容量限制, 即其出力必须满足出力上下限:

$$P_{\min} \leq P \leq P_{\max} \quad (7)$$

式中,  $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$  分别为 DG 出力的上下限。

受到联络线物理传输容量的限制, 微网与主网之间能够允许交互的容量必须受到约束:

$$P_{\min}^{\text{line}} \leq P^{\text{line}} \leq P_{\max}^{\text{line}} \quad (8)$$

随机优化调度模型就是求满足约束条件 (式 (6)~式(8)) 下目标函数的最小值。该优化问题是一个离散非线性, 多阶段, 高维数的问题。为解决这一问题, 现有混合整数规划法, 人工神经网络, 遗传算法<sup>[14]</sup>等, 本文采用遗传算法<sup>[15-16]</sup>进行问题求解。

## 4 算例与分析

### 4.1 微网结构与参数

本文所采用的算例中包括太阳能光伏电池 (Photovoltaic, PV)、风力机组 (Wind turbine, WT)、柴油发电机 (Diesel Generator, DG)、燃料电池 (Fuel Cell, FC) 四种电源。微网与主网联络线的物理传输容量上限为 30 kW, 风机和太阳能光伏电池容量分别为 45 kW 和 10 kW, 表 3~表 5 给出了其他各设备的具体数据, 能源价格 (其中电价实行分时

电价政策), 图 3~图 5 给出了负荷和预测的光伏电池和风机出力。

表 3 不同 DG 参数

Table 3 Parameters of DGs

分布式电源类型	a	b	c	出力上限/kW
柴油机	0.007 4	0.245 88	0.433 33	30
燃料电池	0	0.08919	0	20

备注: 运行成本按  $ap^2 + bp + c$  进行拟合, 且汇率取 6.8

表 4 实时购电价

Table 4 Electricity price (buy)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.24	0.177	0.1301	0.0969	0.03	0.1701	0.271	0.3864	0.5169	0.526	0.81	1
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.99	1.49	0.99	0.79	0.4	0.3647	0.3585	0.413	0.4448	0.348	0.3	0.225

表 5 实时售电价

Table 5 Electricity price (sell)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.38	0.38	0.38	0.65	0.65
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.65	0.65	0.65	0.38	0.38	0.38	0.65	0.65	0.65	0.38	0.38	0.13

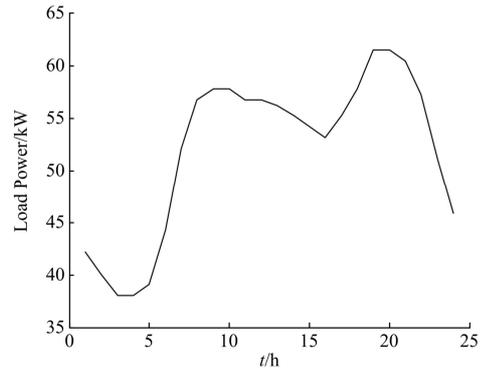


图 3 负荷功率  
Fig. 3 Power of load

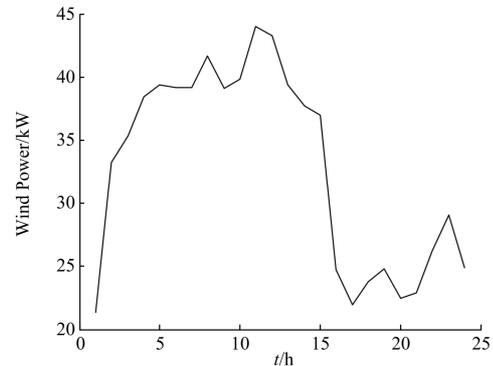


图 4 风电预测功率  
Fig. 4 Power of wind

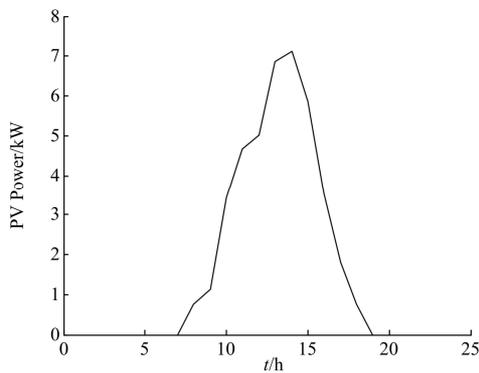


图5 光伏预测功率  
Fig. 5 Power of PV

#### 4.2 结果及讨论

算例仿真包括两个部分:首先采用公式(4)作为目标函数,利用遗传算法对确定性模型进行求解,说明预测出力偏差对系统的影响。然后验证采用基于公式(5)的随机优化模型,研究了考虑风电和光伏随机性后系统的调度策略。

##### 4.2.1 发电预测误差的影响

当目标函数取表达式(4),即不考虑抑制PCC处的波动时,分别选取场景 $S_1 \sim S_5$ (篇幅有限,仅选取5个场景)下的PCC交换功率计算结果如图6所示,可以发现,可再生能源发电预测精度会对PCC处的交换功率造成一定的波动。此时,可再生能源出力的波动主要靠主网进行调节。

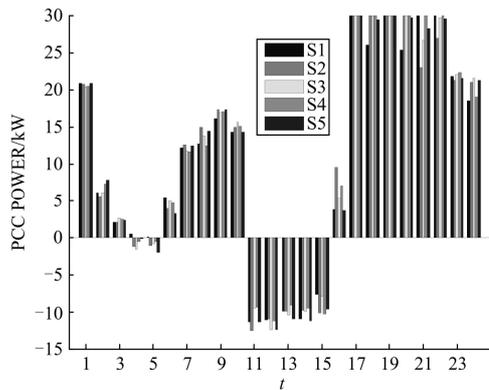


图6 PCC 交换功率

Fig. 6 Power of PCC in 5 scenes

比较 $S_1 \sim S_5$ 时系统的实际运行成本和计划运行成本,如表6所示。

表6 不同场景下运行成本  
Table 6 Costs of different scenes

场景	计划	S1	S2	S3	S4	S5
运行成本/元	249.1	254.9	267.1	265.1	232.1	273.1

由表6可以看出,可再生能源发电的随机性对

系统的实际运行成本也有较大的影响。

##### 4.2.2 随机优化模型的仿真结果

图7给出了随机模型下的PCC的交换功率和日前调度值的对比,由此图可以看出,通过此随机优化模型进行调度,微网可以在风电和光伏出力波动的情况下,调整运行策略,使得PCC处的功率交换波动最小,PCC处的功率交换按照日前调度计划进行,有效降低了由于风能和太阳能发电随机性对系统的影响。

在此条件下的系统运行成本为251.7元,计划运行成本为249.1元,运行成本有小幅提高,可见利用该模型进行调度时,通过微网内部进行机组的优化组合,保证经济性的同时降低对主网的影响,由于采用遗传算法进行优化求解时,求解结果具有一定的分散性,上述结果均是在重复计算20次后的结果。

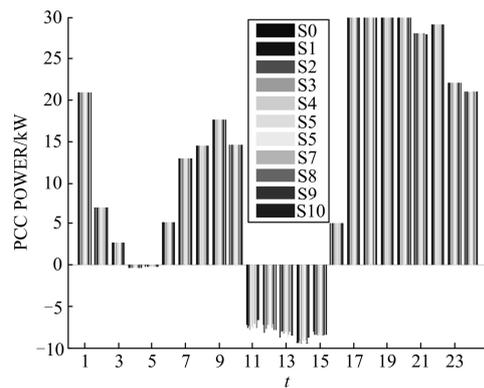


图7 PCC 交换功率

Fig. 7 Power of PCC in 10 scenes

## 5 结论

本文提出了一种考虑随机性的微网能量优化调度模型,重点研究了微网中风能和太阳能的随机性和波动性对PCC处功率波动的影响,通过拉丁超立方采样法(Latin hypercube sampling, LHS)和同步回带削减(Simultaneous backward reduction, SBR)技术来描述随机性,在考虑该随机性的条件下,实现了微网的经济调度。基于该方法可进一步研究更加复杂的微网系统。

### 参考文献

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.  
LIU Wen, YANG Hui-xia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.

- [2] 陈井锐, 吕林, 邓启, 等. 基于PCC的大系统与微电网静态建模仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 17-23.  
CHEN Jing-rui, Lü Lin, DNEG Qi, et al. Large scale system and microgrid static modeling and simulation based on PCC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 17-23.
- [3] 杨浩, 牛强, 吴迎霞, 等. 负荷中心含微电网的小干扰电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 38-43.  
YANG Hao, NIU Qiang, WU Ying-xia, et al. Analysis of small disturbance voltage stability of the load center with microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 38-43.
- [4] 涂有庆, 吴政球, 黄庆云, 等. 基于贡献因子的含分布式发电配电网网损分摊[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 88-91.  
TU You-qing, WU Zheng-qiu, HUANG Qing-yun, et al. Contribution factor based network loss allocation for distribution network containing distributed power generation[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 88-91.
- [5] 凡鹏飞, 张粒子, 熊浩清, 等. 基于改进 BCC 算法的含微电网的配电网网架规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 12-18.  
FAN Peng-fei, ZHANG Li-zi, XIONG Hao-qing, et al. Distribution network planning containing micro-grid based on improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 12-18.
- [6] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.  
WANG Xin-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.
- [7] 邱威, 张建华, 刘念. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.  
QIU Wei, ZHANG Jian-hua, LIU Nian. Multi-objective optimal power flow considering environmental factor and voltage stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 190-197.
- [8] 喻洁, 黄学良, 夏安邦. 基于分区协调优化的环境经济调度策略[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 129-136.  
YU Jie, HUANG Xue-liang, XIA An-bang. Environmental economic dispatch based on sub-area coordinated optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 129-136.
- [9] RUEY-HSUN L, LIAO Jian-hao. A fuzzy optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1665-1674.
- [10] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239-245.
- [11] JIRUTITIJAROEN P, SINGH C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(2): 486-493.
- [12] OWEN A B. Controlling correlations in Latin hypercube samples[J]. Journal of the American Statistical Association, 1994, 89: 1517-1522.
- [13] GROWE-KUSKA N, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems[C] // Proceedings IEEE Power Technology Conference, Bologna, 2003.
- [14] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于改进遗传算法的微网能量管理模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 196-201.  
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Microgrid energy management model based on improved genetic arithmetic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 196-201.
- [15] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 83-92.
- [16] 丁明, 吴义纯. 基于改进遗传算法的风力-柴油联合发电系统扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 23-27.  
DING Ming, WU Yi-chun. Expansion planning of wind-diesel energy system based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 23-27.

收稿日期: 2013-08-30; 修回日期: 2013-11-06

作者简介:

柳丹(1988-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为微网运行与分析; E-mail: liudan0000@gmail.com

李强(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源, 微网。