

基于情景方法的微型智能电网经济运行的优化

靳绍珍, 毛志忠, 李鸿儒

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对微型智能电网经济运行优化问题中, 分布式可再生能源输出功率的预测误差具有不确定性的特点, 提出了一种基于混合 0-1 随机非线性规划的微型智能电网运行优化方法. 该方法将蒙特卡洛方法与轮盘赌选择机制相结合, 利用情景生成方法来表示分布式可再生能源输出功率预测误差的所有可能实现, 同时将带有不确定性的微型智能电网运行优化问题转化为确定性的混合 0-1 非线性优化问题, 并用分支定界算法求解混合 0-1 非线性优化问题. 最后, 利用情景聚合方法得到最优期望解. 通过仿真实验表明了所提出方法的有效性.

关 键 词: 微型智能电网; 经济运行; 不确定性优化; 情景生成; 分支定界算法

中图分类号: TG 335.58

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)11-1521-05

Economic Operation Optimization of Smart Microgrid Based on Scenario Methodology

JIN Shao-zhen, MAO Zhi-zhong, LI Hong-ru

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: MAO Zhi-zhong, professor, E-mail: maozhizhong@ise.neu.edu.cn)

Abstract: According to the characteristics of economic dispatch problem for smart microgrid with uncertainties related to the forecasted errors for renewable energy sources (RESs), a methodology based mixed 0-1 stochastic nonlinear programming was proposed. The roulette wheel mechanism (RWM) and Lattice Monte Carlo simulations (LMCS) were used to generate scenarios. By means of this strategy, the stochastic problem was converted to a number of deterministic problems with different probabilities. Meanwhile, branch and bound algorithm was employed to solve each of the deterministic problems. Consequently, the solutions obtained from the accepted scenarios were aggregated according to the probability to find the expected result of the investigated problem considering uncertainty. The validity of this optimization methodology was proved by the simulation results.

Key words: smart microgrid; economic operation; optimization under uncertainty; scenario generation; branch and bound algorithm

近年来,为了充分发挥分布式可再生能源等分布式能源系统的效益,微型智能电网运行与控制成为研究热点^[1],这也是智能电网建设中的重要组成部分.

国内外学者就微型智能电网的经济运行优化问题展开了一系列研究与探索.从优化算法角度,文献[2]提出了混合整数规划方法求解微型智能电网经济运行优化问题.文献[3]采用序列二次

规划方法将优化调度问题分解为一系列二次规划子问题,逐次求解原问题.另外,应用智能优化方法求解微型智能电网经济运行优化问题成为研究的一个热点,遗传算法^[4]、教与学优化算法^[5]等方法都在这一问题上得到了较好的应用.针对微型智能电网经济运行问题本身,文献[6]建立了以运行费用为最小的单目标经济优化问题.文献[5]考虑经济成本最小、污染物排放量最小等问

收稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61333006)

作者简介: 靳绍珍(1983-),男,山东临沂人,东北大学博士研究生;毛志忠(1961-),男,山东掖县人,东北大学教授,博士生导师.

题,建立了多目标经济优化模型,此外,文献[4]还从热电联供型微型智能电网经济运行问题进行了探索.但是,以上研究都将微型智能电网中的可再生能源各时段的功率输出当作确定量处理,没有考虑其随机波动性.

本文综合考虑风力发电、光伏发电预测输出功率误差的不确定性因素,建立了微型智能电网经济运行的混合 0-1 随机非线性规划模型.并且采用基于情景的优化方法进行了求解.最后,微型智能电网中央控制器(MGCC)根据得到的最优期望解制定微型智能电网的运行计划.

1 问题描述

微型智能电网经济运行优化问题定义为制定分布式电源最优的运行计划以及启停状态,使得微型智能电网运行成本最小.考虑分布式可再生能源功率输出的随机波动,微型智能电网经济运行优化问题是一个含有随机连续变量与随机离散变量的不确定非线性优化问题.具体数学描述如下.

1.1 目标函数

微型智能电网经济运行优化问题的目标函数为微型智能电网运行成本最小.其中,运行成本包含分布式电源的发电成本、启停成本.目标函数可表示为

$$\min E\{f(X)\} = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s f_s(X_s) = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s \sum_{t=1}^m \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} [u_{i,s}^t p_{i,s}^t B_i^t + S_i^{\text{start}} \times \max(0, u_{i,s}^t - u_{i,s}^{t-1})] + S_i^{\text{shut}} \times \max(0, u_{i,s}^{t-1} - u_{i,s}^t) \right\} + \sum_{j=1}^{N'_s} [u_{j,s}^t p_{j,s}^t B_j^t + S_j^{\text{start}} \times \max(0, u_{j,s}^t - u_{j,s}^{t-1}) + S_j^{\text{shut}} \times \max(0, u_{j,s}^{t-1} - u_{j,s}^t)] + u_{\text{Grid},s}^t p_{\text{Grid},s}^t B_{\text{Grid}}^t \quad (1)$$

式中: $E\{f(X)\}$ 为总的发电成本的期望值; s 为情景的编号; N_s 为情景数量; π_s 为情景 s 下对应的概率; $f_s(X_s)$ 为情景 s 下对应的运行成本; m 为一个调度周期 T 内所包含的时段数,其中每个时段定义为时间间隔 δ ; N_g 为分布式电源的数量; i 为分布式电源的编号; u_i^t 为分布式电源的启停,其中取 1 为开,取 0 为停; p_i^t 为分布式电源的有功功率输出; B_i^t 为分布式电源的电价; S_i^{start} 为分布式电源启动成本; S_i^{shut} 为分布式电源关停成本; N'_s 为储能单元的数量; j 为储能单元的编号; u_j^t 为储能单元的启停; p_j^t 为储能单元的有功功率输出; B_j^t 为储能单元的电价; S_j^{start} 为储能单元启动成本; S_j^{shut} 为储能单元关停成本; u_{Grid}^t 为微型智能电网与

外部电网交互开关; p_{Grid}^t 为微型智能电网与外部电网的交换功率; B_{Grid}^t 为外部电网实时电价.

1.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束.

$$\sum_{i=1}^{N_g} u_{i,s}^t p_{i,s}^t + \sum_{j=1}^{N'_s} u_{j,s}^t p_{j,s}^t + u_{\text{Grid},s}^t p_{\text{Grid},s}^t = \sum_{D=1}^{N_D} p_{D,s}^t; \quad t=1, \dots, T; s=1, \dots, N_s. \quad (2)$$

式中: D 为负荷的编号; N_D 为负荷的数量; $p_{D,s}^t$ 为负荷在第 t 时段负荷预测值.此处忽略了网损.

2) 发电单元功率输出限值.

$$\left. \begin{aligned} p_{i,\min}^t &\leq p_{i,s}^t \leq p_{i,\max}^t, i=1, \dots, N_g; \\ p_{j,\min}^t &\leq p_{j,s}^t \leq p_{j,\max}^t, j=1, \dots, N'_s; \\ p_{\text{Grid},\min}^t &\leq p_{\text{Grid},s}^t \leq p_{\text{Grid},\max}^t. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $p_{i,\min}^t$ 和 $p_{i,\max}^t$ 分别为分布式发电单元输出功率的上下限; $p_{j,\min}^t$ 和 $p_{j,\max}^t$ 分别为储能单元输出功率的上下限; $p_{\text{Grid},\min}^t$ 和 $p_{\text{Grid},\max}^t$ 分别为微型智能电网与外部电网的交换功率的上下限.

3) 储能单元运行约束.

$$\begin{aligned} W_{\text{ess},s}^t &= W_{\text{ess},s}^{t-1} + \eta_{\text{charge}} p_{\text{charge},s} \Delta t - \\ &\quad \frac{1}{\eta_{\text{discharge}}} p_{\text{discharge},s} \Delta t. \\ \left\{ \begin{aligned} W_{\text{ess},\min} &\leq W_{\text{ess},s}^t \leq W_{\text{ess},\max}, \\ 0 &\leq p_{\text{charge},t,s} \leq p_{\text{charge},\max}, \\ 0 &\leq p_{\text{discharge},t,s} \leq p_{\text{discharge},\max}. \end{aligned} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

式中: W_{ess}^t 为储能单元内部存储的能量; p_{charge} 为储能单元充电功率; $p_{\text{discharge}}$ 为储能单元的放电功率; η_{charge} , $\eta_{\text{discharge}}$ 分别为储能单元对应的充放电效率; Δt 为储能单元的充放电时间间隔.

2 基于情景方法的随机模型描述

本文采用情景生成方法来表示分布式可再生能源输出功率预测误差的所有可能实现.通过情景生成和消减方法,将不确定条件下的优化问题转化为确定性的优化问题,具体如下.

2.1 概率密度函数建模

本文考虑风力发电、光伏发电预测输出功率误差的不确定性因素,并将不确定参量视为随机变量,不确定参量由连续的随机概率分布函数描述.研究表明,在相同天气状况下,对历史数据进行统计,光伏发电输出功率的误差服从高斯分布^[5,7],即有 $\delta_i^{\text{PV}} \sim N(0, \sigma_i^2)$,光伏发电在某时刻的随机概率密度函数如图 1 所示.针对风力发电预测输出功率误差的随机概率分布问题,采用贝塔分布拟合风力发电预测输出功率误差,则贝塔概

率密度函数为

$$\text{PDF}(P_{\text{error}}) = P_{\text{error}}^{\alpha-1} (1 - P_{\text{error}})^{\beta-1} \cdot n. \quad (5)$$

其中:

$$n = 1/B(\alpha, \beta) = 1/\int_0^1 P_{\text{error}}^{\alpha-1} (1 - P_{\text{error}})^{\beta-1} dP_{\text{error}};$$

P_{error} 是预测风电功率输出误差; α, β 是贝塔概率密度函数的参数。

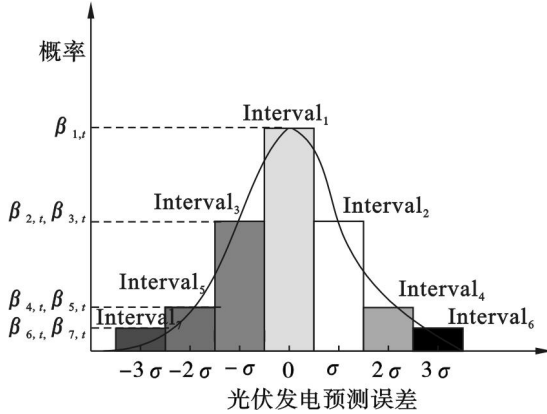


图 1 光伏发电预测误差的概率密度函数

Fig. 1 The PDF of the PV generation forecast error

2.2 情景生成

本文将蒙特卡洛方法与轮盘赌选择机制相结合,提出一种情景生成方法来表示分布式可再生能源输出功率预测误差的所有可能实现。

首先,随机采样是蒙特卡洛方法的基础,采用 LMCS 生成随机数:

$$\sum_{j=1}^r \left(\frac{k_j}{n_j} \sum_{i=1}^N v_i \right) \bmod 1, k_j = 1, \dots, N; j = 1, \dots, r. \quad (6)$$

$$\pi_s = \frac{\prod_{t=1}^T \left(\sum_{uw=1}^7 (W_{uw,t,s}^{\text{WT}} \beta_{uw,t}) \sum_{uw=1}^7 (W_{uw,t,s}^{\text{WT}} \beta_{uw,t}) \right)}{\sum_{s=1}^{N_s} \prod_{t=1}^T \left(\sum_{uw=1}^7 (W_{uw,t,s}^{\text{WT}} \beta_{uw,t}) \sum_{uw=1}^7 (W_{uw,t,s}^{\text{WT}} \beta_{uw,t}) \right)}, s = 1, \dots, N_s. \quad (8)$$

每个情景对应的风力发电、光伏发电预测输出功率误差为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{WT},t,s} &= P_{\text{WT},t}^{\text{forecast}} + \text{DP}_{\text{WT},t,s}, \\ \text{WT} &= 1, \dots, N_{\text{WT}}; t = 1, \dots, T; s = 1, \dots, N_s; \\ P_{\text{PV},t,s} &= P_{\text{PV},t}^{\text{forecast}} + \text{DP}_{\text{PV},t,s}, \\ \text{PV} &= 1, \dots, N_{\text{PV}}; t = 1, \dots, T; s = 1, \dots, N_s. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

2.3 情景缩减

基于情景的优化模型其计算效果取决于情景数量的多少,由情景生成方法得到的情景数量通常是庞大的,为了减少基于情景方法的优化问题的计算量,需要消减由情景生成方法产生的情景数量.本文采用概率距离作为尺度进行情景消减,具体如下。

$\xi_s (s = 1, 2, \dots, N_s)$ 表示由情景生成方法产生的情景,每一个情景对应的概率为 $\pi_s (s = 1, 2, \dots, N_s)$, 且 $\pi_s > 0, \sum \pi_s = 1$. $\text{DT}_{s,s'} = \text{DT}(\xi_s,$

式中: r 表示随机变量的个数; N 表示蒙特卡洛 (LMCS) 方法采样的次数; v_i 为含有 d 维随机数的列向量; $\bmod A$ 表示被 A 除的余数。

其次,将随机概率密度曲线 n 等分,即每个区间的间隔为一个标准差 σ . 以光伏发电预测误差为例,将随机概率密度曲线 7 等分,每个区间 $\text{Interval}_i, i = 1, \dots, 7$ 的间隔为一个标准差,并且每个区间对应一个概率值 $\beta_{i,t}, i = 1, \dots, 7$, 如图 1 所示。

再者,将每个区间的概率值 $\beta_{i,t}$ 累积归一化,即每个区间对应一个累积归一化的概率值,如图 2 所示. 然后,采用轮盘赌选择机制生成每个表示风力发电、光伏发电预测输出功率误差的情景,如式 (7) 所示。

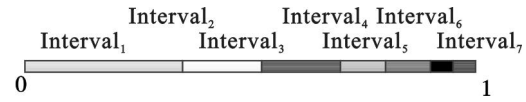


图 2 预测误差每个区间的概率累积归一化

Fig. 2 Accumulated normalized probabilities of the forecast error intervals

$$\text{Scenarios} = \{ W_{1,t,s}^{\text{WT}}, \dots, W_{7,t,s}^{\text{WT}}, W_{1,t,s}^{\text{PV}}, \dots, W_{7,t,s}^{\text{PV}} \}_{t=1, \dots, T} \quad (7)$$

式中: $W_{uw,t,s}^{\text{WT}}$ 是开关参数,表示第 $i = uw$ 风力发电预测误差的区间 Interval_{uw} 是否被选中,选中 $W_{uw,t,s}^{\text{WT}} = W_{pv,t,s}^{\text{PV}} = 1$, 否则 $W_{uw,t,s}^{\text{WT}} = W_{pv,t,s}^{\text{PV}} = 0$, 其中,由 LMCS 生成随机数,与每个区间的累积概率值进行比较,选择开关参数 $W_{uw,t,s}^{\text{WT}}$ 。

最后,每个情景对应的概率值:

$\xi_{s'} (s = 1, \dots, N_s, s' = 1, \dots, N_s)$ 表示情景 ξ_s 和 $\xi_{s'}$ 之间的距离,定义为两个情景向量的范数. 集合 S 表示消减前的情景,初始时 S 为所有情景的集合; 集合 DS 表示为消减后的情景,初始时 DS 为空集. 情景消减的步骤如下:

1) 计算所有情景间的距离:

$$\text{DT}_{s,s'} = \text{DT}(\xi_s, \xi_{s'}), s, s' = 1, \dots, N_s.$$

$$\text{DT}_{s,s'} = \sqrt{\sum_{i=1}^d (v_i^s - v_i^{s'})^2}. \quad (10)$$

2) 对于每一个情景 k ,找出与其距离最短的情景 r :

$$\text{DT}_k(r) = \min \text{DT}_{k,s'}, k \in S, s' \in S, k \neq s'. \quad (11)$$

3) 计算 $\text{PD}_k(r) = p_k \text{DT}_k(r), k \in S$, 找出情景 ds 使得:

$$\text{PD}_{ds} = \min \text{PD}_k, k \in S. \quad (12)$$

4) 令

$$S = S - \{ds\}, DS = DS + \{ds\}, p_r = p_r + p_{ds}. \quad (13)$$

5) 重复以上步骤至剩余情景数满足停止准则为止。

2.4 停止准则

本文采用停止准则来判断经过情景生成与缩减后得到的情景数量是否达到精度的要求:

$$cv_f = \frac{\sigma_f}{\mu_f \sqrt{N_s}}. \quad (14)$$

式中: σ_f 是随机参数标准差; μ_f 是随机参数的均值; cv_f 这里按照采样精度指定为一个数值。

2.5 情景聚合

通过应用情景生成和缩减方法,生成对应不同概率的情景,因此,带有不确定性的微型智能电网运行优化问题可以分解为不同情景下的确定性优化问题。每个情景下的优化问题得到一个带概率的最优解,最终,不同的情景下,得到一系列带有概率的最优解。因而,需要应用情景聚合方法,得到带有不确定性的微型智能电网运行优化问题的一个期望解:

$$\hat{f} = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s^{\text{norm}} \times f_s. \quad (15)$$

式中: \hat{f} 是原问题对应的期望目标函数; f_s 是情景 s 下对应的目标函数; π_s^{norm} 为情景 s 下对应的概率。

$$\pi_s^{\text{norm}} = \frac{\prod_{i=1}^r \text{Prob}_{i,s}}{\sum_{s=1}^{N_s} \prod_{i=1}^r \text{Prob}_{i,s}}. \quad (16)$$

式中: r 是原优化问题中随机变量的个数; N_s 是情景缩减后对应的情景个数; $\text{Prob}_{i,s}$ 是每个情景对应的概率值。

3 实例研究

本文算例仿真采用的微型智能电网系统结构如图3所示。微型智能电网中发电单元由微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池、风力发电机组组成,储能单元由蓄电池组成。光伏发电、风力发电单元的预测输出按小时分为24个时段,时间间隔 δ 取为1h,得到预测数据后,将作为微型智能电网运行优化问题中光伏发电、风力发电单元的参考输入^[5]。

通过对微型智能电网与外部公共电网并网运行模式下的经济运行优化模型进行仿真,验证本文提出的微型智能电网不确定性经济运行优化方法。

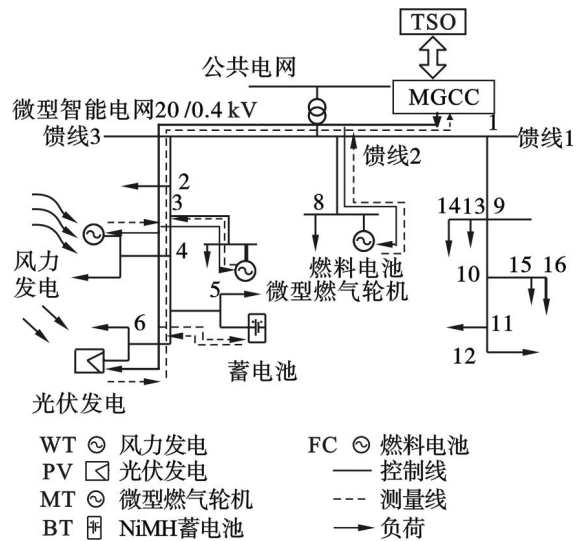


图3 微型智能电网结构图

Fig. 3 Smart microgrid structure diagram

3.1 情景方法

假设已知风力发电、光伏发电预测输出功率误差的概率分布,取误差的标准差为预测值的20%。利用情景生成方法生成1000个情景,通过情景消减将情景数减少至10个。缩减后情景对应的概率见图4。图5、图6给出了10个情景的风力

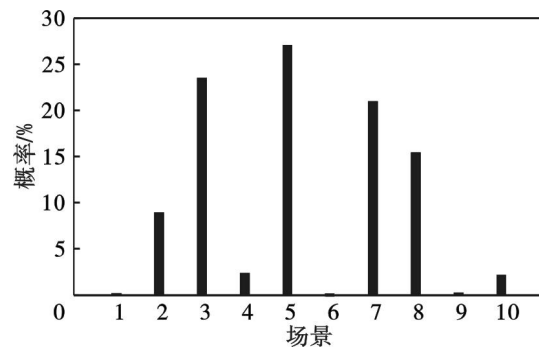


图4 情景缩减后情景对应的概率值

Fig. 4 The probabilities of reduced scenarios

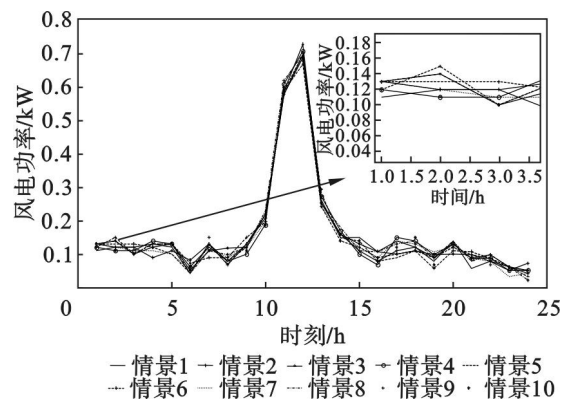


图5 风力发电功率情景

Fig. 5 The scenarios of wind power

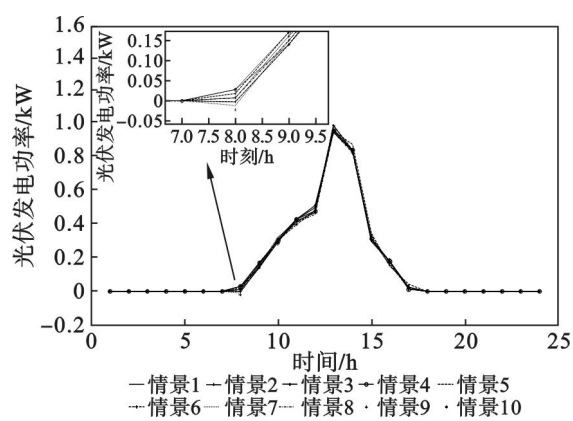


图 6 光伏发电功率情景
Fig. 6 The scenarios of PV power

表 1 微型智能电网经济运行的期望总成本值
Table 1 The expected results of operational cost for smart microgrid

变量	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5	情景 6	情景 7	情景 8	情景 9	情景 10	期望
概率	6.36×10^{-4}	0.088 2	0.233 6	0.022 8	0.269 7	4.933×10^{-4}	0.029 1	0.153 36	0.001 186	0.020 6	—
优化成本	227.420 8	247.001 5	239.251 6	248.135 7	227.410 7	252.101 7	229.168 8	230.892 6	229.896 7	228.712 0	232.977 7

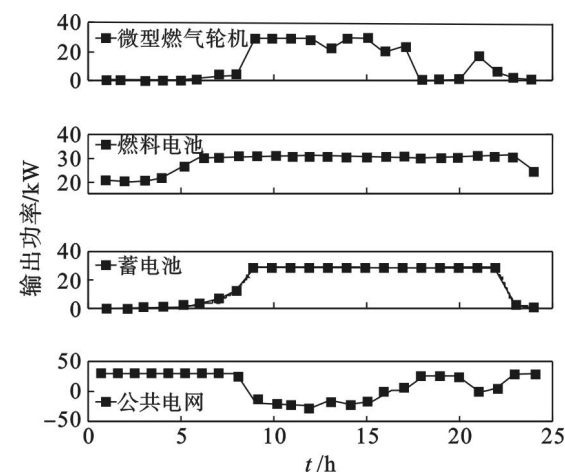


图 7 微型智能电网各个发电单元最优的期望输出功率
Fig. 7 The best expected power generation of DGs for smart microgrid

4 结 论

1) 考虑分布式可再生能源输出功率的预测误差具有不确定性的特点,提出了采用情景方法来表示分布式可再生能源输出功率预测误差的所有可能实现,可以将带有不确定性的优化问题分解为确定性优化问题。

2) 通过考虑分布式可再生能源输出功率预测误差,由式(1)~式(4)所建立的微型智能电网经济运行优化模型更符合实际运行情况,可以有效地降低因风力发电、光伏预测发电功率的波动性和随机性给微型智能电网经济运行带来的影响。

发电功率情景和光伏发电功率情景。

3.2 微型智能电网不确定性的经济运行

考虑风电、光伏预测发电功率的随机性,表 1 给出了对应的微型智能电网经济运行的期望成本值,图 7 给出了微型智能电网各个发电单元最优的期望输出功率曲线。

仿真表明,通过随机优化模型获得的运行策略可以在不同风力发电、光伏发电输出功率情景下灵活调整;同时也可以有效降低因风力发电、光伏发电波动性给微型智能电网运行带来的影响。

3) 采用情景方法,可以获得不同情景下的分布式发电单元运行策略。微型智能电网中央控制器(MGCC)可以灵活地调整分布式发电单元的运行。

参考文献:

[1] Tsikalakis A G, Hatziaargyriou N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23 (1): 241 – 248.

[2] Naraharisetty K P, Karimi A I, Anand A. A linear diversity constraint-application to scheduling in microgrid [J]. *Energy*, 2011, 36: 4235 – 4243.

[3] Mohammad H, Eskandari M. A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids considering uncertainty in electricity price forecasting [J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 697 – 714.

[4] Wang J J, Jing Y Y, Zhang C F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm [J]. *Applied Energy*, 2010, 87 (4): 1325 – 1335.

[5] Niknam T, Abarghoee R A, Narimani M R. An efficient scenario based stochastic programming framework for multiobjective optimal microgrid operation [J]. *Applied Energy*, 2012, 99 (4): 455 – 470.

[6] Bludszuweit H, Navarro J A D, Llombart A. Statistical analysis of wind power forecast error [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23 (3): 983 – 991.

[7] Mohammadi S, Soleymani S, Mozafari B. Scenario based stochastic operation management of microgrid including wind, photovoltaic, microturbine, fuel cell and energy storage devices [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 54: 525 – 535.