

基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度

任建文, 渠卫东

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 新能源出力波动、负荷预测误差等不确定性因素给孤岛模式下微电网经济调度带来了困难, 采用安排发电及储能单元出力、新能源发电侧和负荷侧管理的方法, 提出基于机会约束的孤岛模式下微电网动态经济调度模型。该模型将风光出力和负荷预测误差用随机变量表示, 并以旋转备用满足的置信水平表征微电网的供电可靠性水平。将机会约束转化为其确定性等价类, 推导出失负荷期望的数学表达式, 并给出改进的粒子群优化算法以求解模型。算例分析结果验证了所提模型的合理性。

关键词: 微电网; 孤岛模式; 动态经济调度; 机会约束规划; 粒子群优化算法; 负荷预测; 误差

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.012

0 引言

随着全球能源、环境问题日益突出, 分布式发电受到各国专家学者的青睐, 而微电网技术以其对分布式发电灵活高效的整合能力成为智能电网的重要组成部分。微电网有并网运行和孤岛运行 2 种运行方式。并网运行时, 大电网可以作为微电网可靠供电的重要支撑; 而孤岛运行时, 微电网存在的不确定因素使运行环境更加复杂^[1-5]。

文献[6-7]考虑分布式电源经济特性, 建立了以运行成本最小化为目标的优化模型, 但是并没有考虑新能源预测误差的影响。文献[8]针对风光出力的随机性和波动性, 引入失负荷风险指标和风光浪费指标, 并制定了基于净负荷的平均值按比例充放电的蓄电池控制策略, 保证供电可靠性和新能源利用。文献[9]提出针对储能装置能量状态和净负荷的相应调度策略, 以负荷竞价策略、切负荷和卸荷作为功率调节手段, 建立负荷优化分配模型与负荷可中断优化模型。文献[10-11]采用场景集的方法描述风光的出力特性, 并将公共联络点的能量波动引入目标函数, 提出基于抽样技术的场景削减方法的调度方法, 使得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。文献[12]应用机会约束规划理论研究了微电网运行中可靠性与经济性的平衡关系, 并讨论负荷波动等不确定性因素对调度结果的影响。但是文献[10-12]仅针对并网情况, 并未考虑孤岛情况的特殊性。

目前关于孤岛模式下微电网动态经济调度的研究尚不深入, 对微电网中负荷的波动、新能源出力的随机性和波动性考虑不全面, 对新能源发电侧和负

荷侧管理很少涉及。本文增加风电和负荷切除手段, 提出了考虑新能源出力波动、负荷预测误差等不确定性因素的动态经济调度的机会约束模型。将模型中的机会约束转化为确定性等价类, 并得到失负荷期望的表达形式。然后给出改进的粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法求解, 并结合算例分析讨论了不同置信水平和预测精度对微电网调度结果的影响。

1 机会约束规划理论

孤岛模式下的微电网动态经济调度问题是一个含有多随机变量、多维的复杂优化约束问题, 传统确定性规划方法处理随机变量有很大局限, 而采用机会约束方法能很好地描述随机变量带来的不确定性。

机会约束规划是随机规划的一个分支, 主要用于解决约束条件中含有随机变量, 且必须在观测到随机变量实现之前做出决策的问题^[13]。考虑到实际情况下随机变量使得一些约束条件不能满足, 此时设定一个置信水平, 所做决策应使约束条件成立的概率不小于某一个置信水平。其中, 机会约束规划的一种常见形式如下:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} & P_r\{g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0, i=1, 2, \dots, m\} \geq \alpha_j \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 为 n 维决策变量; f 为目标函数; $\boldsymbol{\xi}$ 为随机参数向量; $g_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$ 为随机约束函数; $P_r\{\cdot\}$ 为事件成立的概率; m 为随机约束条件总数; α_j 为决策者预先给定的约束条件的置信水平。

2 微电网动态经济调度决策模型

2.1 微电网中不确定因素分析模型

微电网运行于孤岛模式时, 不确定性因素是多方面的, 但最为关键的是新能源出力预测和微电网中负荷预测的精准性。本文把一个周期内各时段风光

出力以及电力负荷看作预测值和误差值之和。预测值即日前的预测数据,为确定性变量。误差值即预测的偏差,本文将其当作随机变量处理。风光出力以及电力负荷可以表示为^[14-15]:

$$P_{WT}^*(t) = P_{WT}(t) + \xi_{WT}(t) \quad (2)$$

$$P_{PV}^*(t) = P_{PV}(t) + \xi_{PV}(t) \quad (3)$$

$$P_D^*(t) = P_D(t) + \xi_D(t) \quad (4)$$

其中: $P_{WT}^*(t)$ 、 $P_{PV}^*(t)$ 、 $P_D^*(t)$ 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、电力负荷的实际值; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_D(t)$ 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、电力负荷预测值; $\xi_{WT}(t)$ 、 $\xi_{PV}(t)$ 、 $\xi_D(t)$ 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、电力负荷的预测误差,本文假设这3类误差分布服从均值为0的正态分布。这3类误差的标准差为:

$$\sigma_{WT}(t) = \rho_{WT} P_{WT}(t) + \rho_{WT,ins} P_{WT,ins} \quad (5)$$

$$\sigma_{PV}(t) = \rho_{PV} P_{PV}(t) + \rho_{PV,ins} P_{PV,ins} \quad (6)$$

$$\sigma_D(t) = \rho_D P_D(t) \quad (7)$$

其中, $\sigma_{WT}(t)$ 、 $\sigma_{PV}(t)$ 、 $\sigma_D(t)$ 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、电力负荷预测误差的标准差; $P_{WT,ins}$ 、 $P_{PV,ins}$ 分别为风电和光伏的装机容量; ρ_{WT} 、 ρ_{PV} 、 $\rho_{WT,ins}$ 、 $\rho_{PV,ins}$ 和 ρ_D 为预测误差的相关系数。

2.2 目标函数及约束条件

风光出力以及电力负荷预测误差的随机性使原本的确性的微电网经济调度模型产生了机会约束条件。孤岛模式下微电网经济调度中含有不确定性因素的约束条件一般是功率平衡和旋转备用约束,本文对预测误差直接建模,减少了不确定可行域的维度。机会约束在本文中体现为孤岛运行所需的旋转备用要满足一定的置信度,优先以微电网中的可调度单元承担,不能满足时再辅以切除风电或部分电力负荷等手段。因此,孤岛模式下微电网经济动态调度问题描述为:通过控制新能源入网、负荷侧管理和可控机组的出力安排,使得微电网满足功率约束、机组物理约束以及旋转备用约束时的总运行成本最小,得到在一定置信度的运行优化方案。目标函数为:

$$\min f = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [f_i(P_i(t))u_i(t) + S_{Tr}(1-u_i(t))u_i(t) + \zeta(t)P_{D-cut}(t)] \right\} \quad (8)$$

其中, T 为研究周期的时段数,本文取1d为一个周期,将其分成24个时段; I 为微电网内可控机组的台数; $P_i(t)$ 为第 i 台可控机组的在 t 时段内的出力; $f_i(P_i(t))$ 为机组运行成本; $u_i(t)$ 为第 i 台可控机组的在 t 时段内开停状态,1表示开启,0表示关闭; S_{Tr} 为第 i 台可控机组的开启成本; $P_{D-cut}(t)$ 为 t 时段切除的负荷; $\zeta(t)$ 为向负荷被切除用户提供的经济赔偿。

相关约束条件如下。

a. 负荷功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^I P_i(t) + P_{bat}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) -$$

$$P_{WT-cut}(t) = P_D(t) - P_{D-cut}(t) \quad (9)$$

其中, $P_{WT-cut}(t)$ 为 t 时段的风电切除量; $P_{D-cut}(t)$ 为 t 时段的负荷切除量; $P_{bat}(t) \geq 0$ 时表示 t 时段蓄电池的放电功率, $P_{bat}(t) < 0$ 时表示 t 时段蓄电池的充电功率。

b. 可控机组约束:

$$u_i(t)P_{i,min} \leq P_i(t) \leq u_i(t)P_{i,max} \quad (10)$$

$$(u_i(t-1) - u_i(t))(T_i^{on}(t-1) - T_{i,min}^{on}) \geq 0 \quad (11)$$

$$(u_i(t) - u_i(t-1))(T_i^{off}(t-1) - T_{i,min}^{off}) \geq 0 \quad (12)$$

$$P_i(t-1) - P_i(t) \leq \Delta P_{i,down} \quad (13)$$

$$P_i(t) - P_i(t-1) \leq \Delta P_{i,up} \quad (14)$$

其中, $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$ 分别为第 i 台可控机组有功出力的上、下限; $T_i^{on}(t)$ 、 $T_i^{off}(t)$ 分别为第 i 台可控机组已运行和停机的时间; $T_{i,min}^{on}$ 、 $T_{i,min}^{off}$ 分别为第 i 台可控机组的最小运行时间和最小停机时间; $\Delta P_{i,up}$ 、 $\Delta P_{i,down}$ 分别为第 i 台可控机组在一个时段内的出力上升和下降速率。

c. 蓄电池约束:

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) - P_{bat}(t)/\eta_D & P_{bat}(t) \geq 0 \\ SOC(t-1) - P_{bat}(t)\eta_C & P_{bat}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} -P_{ch,max} \leq P_{bat} \leq P_{dis,max} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (16)$$

$$SOC(T) = SOC(0) \quad (17)$$

其中, $SOC(t)$ 为 t 时段蓄电池的剩余电量; SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别为蓄电池最大和最小存储容量; $P_{dis,max}$ 、 $P_{ch,max}$ 分别为蓄电池最大放电功率和最大充电功率; η_C 为充电效率; η_D 为放电效率。

d. 新能源切除约束。

微电网中含有多种新能源电力形式,为了保证系统可靠运行进行切除一部分新能源时需要选择切除新能源的种类。本文选择风电作为切除对象,实际操作中需要依据调研确定。

$$P_{WT-cut}(t) \leq \tau_{WT}(t)P_{WT}(t) \quad (18)$$

其中, $\tau_{WT}(t)$ 为设定的弃风比例上限。

e. 负荷切除约束:

$$P_{D-cut} \leq \tau_D(t)P_D(t) \quad (19)$$

其中, $\tau_D(t)$ 为总负荷中可控负荷所占比例。

f. 旋转备用约束:

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^I (P_{i,max} - P_i(t)) + P_{D-cut}(t) - P_{WT-cut}(t) \geq \xi_{WT}(t) + \xi_{PV}(t) + \xi_D(t) \right\} \geq \alpha_1 \quad (20)$$

$$P_r \left\{ \sum_{i=1}^I (P_i(t) - P_{i,min}) - P_{D-cut}(t) + P_{WT-cut}(t) \geq \xi_{WT}(t) + \xi_{PV}(t) + \xi_D(t) \right\} \geq \alpha_2 \quad (21)$$

其中, α_1 、 α_2 分别为正、负旋转备用约束需满足的置信水平。

2.3 确定性等价类和失负荷期望

对于随机机会约束一般有 2 种处理方法:第一种是进行随机模拟试验,通过大量的抽样迭代获得问题的近似解,耗时多,计算速度慢;第二种是针对一些特殊的随机机会约束,通过将其转换为确定性等价形式进行求解。本文采用第二种处理方法。

一般地,对于机会函数 $g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = \boldsymbol{\xi} - h(\mathbf{x})$, 当且仅当 $h(\mathbf{x}) \geq K_\alpha$, 有 $P_r\{h(\mathbf{x}) \geq \boldsymbol{\xi}\} \geq \alpha$ 成立, 其中 K_α 为:

$$K_\alpha = \Phi^{-1}(\alpha) \quad (22)$$

其中, $\Phi(\cdot)$ 为随机变量 $\boldsymbol{\xi}$ 的概率分布函数, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 为逆函数操作。

由于 $P_r\{h(\mathbf{x}) \geq \boldsymbol{\xi}\} \geq \alpha$ 的解有时不唯一, 造成 $\Phi^{-1}(\cdot)$ 可能是多值的, 对这种情况, 一般选择最小的那一个, 即:

$$K_\alpha = \inf\{K \mid K = \Phi^{-1}(\alpha)\} \quad (23)$$

其中, $\inf\{\cdot\}$ 表示取最小。

定义 $\xi_{pre,t}(t)$ 为 t 时段预测偏差:

$$\xi_{pre,t}(t) = \xi_{WT}(t) + \xi_{PV}(t) + \xi_D(t) \quad (24)$$

因模型中 $\xi_{WT}(t)$ 、 $\xi_{PV}(t)$ 、 $\xi_D(t)$ 都服从均值为 0 的正态分布, 故 $\xi_{pre,t}(t)$ 服从均值为 0、方差为 $\sigma_{WT}^2(t) + \sigma_{PV}^2(t) + \sigma_D^2(t)$ 的正态分布, 设其分布函数为 $\Phi_{pre,t}$ 。

因而推导出正负旋转备用机会约束形式的确定性等价类:

$$\sum_{i=1}^I (P_{imax} - P_i(t)) + P_{D-cut}(t) - P_{WT-cut}(t) \geq K_{\alpha 1}(t) = \inf\{K = \Phi_{pre,t}^{-1}(\alpha_1)\} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^I (P_i(t) - P_{imin}) - P_{D-cut}(t) + P_{WT-cut}(t) \geq K_{\alpha 2}(t) = \inf\{K = \Phi_{pre,t}^{-1}(\alpha_2)\} \quad (26)$$

在微电网功率缺额大于剩余旋转备用时会导致微电网发生停电, 根据不同功率缺额发生的概率, 本文推导出每个时段的电量不足期望 EENS(t):

$$\begin{aligned} EENS(t) = & \int_{x_0(t)}^{+\infty} y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2(t)}} dy - \\ & \int_{x_0(t)}^{+\infty} x_0(t) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2(t)}} dy = \\ & \frac{\sigma(t)}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x_0^2(t)}{2\sigma^2(t)}} - x_0(t) \left[1 - \Phi\left(\frac{x_0(t)}{\sigma(t)}\right) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

其中, y 为积分变量; $x_0(t)$ 为微电网在 t 时段提供的正旋转备用容量; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

3 微电网动态经济调度决策模型

粒子群优化算法是由美国学者 Kennedy J 和 Eberhart R C 受鸟群觅食行为的启发而提出一种基

于群体智能的随机寻优算法。但是基本粒子群优化算法在寻优中容易陷入局部最优, 所以本文采用改进的粒子群优化算法, 结合混沌搜索方法的思想, 形成混沌粒子群优化 CPSO(Chaos Particle Swarm Optimization) 算法^[16-18]。

具体算法流程如下。

a. 设置正负旋转备用的置信水平并将其转化为确定性等价类, 读取微电网数据, 输入算法所需要的参数。

b. 混沌初始化种群。随机产生一个 n 维每个分量值在 0~1 之间的向量 $\mathbf{Z}_1 = (z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1n})$, 为优化变量的数目, 得到 N 个向量 $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_N$ 。设 n 维优化变量 $\mathbf{a}_i \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{b}_i$, 将 \mathbf{Z}_i 的各个分量载波到对应变量的取值范围得 $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{a}_i + (\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)z_{ij}$ 。计算粒子群的适应度值, 并从 N 个初始种群中选择性能较好的 M 个解初始解, 随机产生 M 个初始速度。它们的位置和目标函数即为个体最优值, 再从中选出群体最优值。

c. 更新粒子速度和位置, 计算适应值。

d. 对 $\mathbf{g}_{best} = (\mathbf{g}_{best1}, \mathbf{g}_{best2}, \dots, \mathbf{g}_{bestD})$ 进行混沌优化, 将局部最优 \mathbf{p}_{besti} ($i=1, 2, \dots, D$) 映射到 Logistic 方程的定义域 $[0, 1]$ 上, $\mathbf{b}_i, \mathbf{a}_i$ 分别为第 i 个粒子的上、下边界值, $\mathbf{Z}_i = (\mathbf{g}_{besti} - \mathbf{a}_i) / (\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)$, 然后用 Logistic 方程进行迭代产生混沌变量序列 $\mathbf{Z}_i^{(m)}$, 再把产生的混沌变量序列通过逆映射 $\mathbf{g}_{besti}^{(m)} = \mathbf{a}_i + (\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)\mathbf{Z}_i^{(m)}$ 返回到原解空间中, $\mathbf{g}_{besti}^{(m)} = (\mathbf{g}_{besti,1}^{(m)}, \mathbf{g}_{besti,2}^{(m)}, \dots, \mathbf{g}_{besti,D}^{(m)})$, 在原解空间对混沌变量经历的每一个可行解 $\mathbf{g}_{besti}^{(m)}$ 计算其适应度值, 得到性能最优的可行解 \mathbf{g}_{besti}^* 。

e. 更新粒子最优值和全体最优值, 如果满足终止条件则输出最优解, 否则返回步骤 c。

4 微电网动态经济调度决策模型

4.1 算例基础数据

为了验证上文提出的模型及算法, 对一个运行于孤岛模式下的微电网系统进行分析。微电网中日负荷曲线如图 1 所示, 风、光出力曲线如图 2 所示。

微电网中各分布式电源特性参数如表 1 所示, d_i 和 c_i 分别为发电成本的一次项系数和常数项, S_{Ci} 为启动成本系数, 所有系数根据文献[19]中数据按汇率 6.14 换算得到。蓄电池的最大和最小储能容量分别为 100 kW·h 和 30 kW·h, 最大充放电功率为 5 kW, 始末剩余电量为 50 kW·h, 充放电效率为 1, 不考虑其运行成本。 $\zeta(t)$ 取为 2 元/(kW·h)。 ρ_{WT}, ρ_{PV} 为 0.2, $\rho_{PV,ins}, P_{PV,ins}$ 和 ρ_D 为 0.02。 $\tau_{WT}(t)$ 为 0.5, $\tau_D(t)$ 为 0.2。正负旋转备用的置信水平都取 0.95。

设置混沌粒子群优化算法参数: 初始种群 $N=100$ 以及 $M=50$; 学习因子 c_1, c_2 为 2; 最大迭代数为

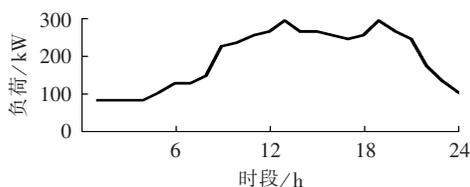


图 1 微电网负荷预测值

Fig.1 Forecasted microgrid load

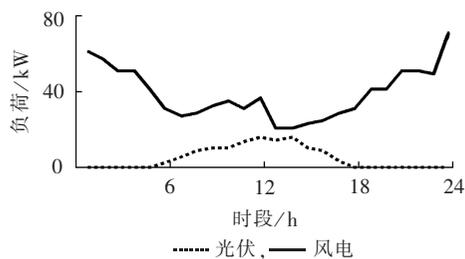


图 2 风光出力预测值

Fig.2 Forecasted wind and photovoltaic power outputs

表 1 微电网中的分布式能源

Table 1 Distributed energy sources in microgrid

参数	燃气轮机	燃料电池	风力发电	光伏发电
功率下限/kW	30	10	0	0
功率上限/kW	150	100	100	40
装机容量比重/%	38.46	25.64	25.64	10.26
最小开停机时间/h	1	1	1	1
爬坡速率/(kW·h ⁻¹)	600	600	900	900
d_i /[元·(kW·h) ⁻¹]	0.2683	0.1744	0	0
c_i /(元·h ⁻¹)	26.095	52.19	0	0
S_{ci} /元	2.763	3.2542	0	0

1000; 惯性权重初始值 0.9, 终止值 0.4; 粒子速度上下限的绝对值取变量定义域长度的 1%。由于粒子群优化算法的随机性, 每次优化结果有所不同, 因此下文给出的结果是 20 次重复计算得到的平均值。

4.2 算例结果分析

4.2.1 出力优化结果及分析

发电及储能单元的出力结果见图 3, 而风电和负荷切除情况见图 4。该微电网中风电装机容量很大, 而且从图 2 可以看出风力发电具有明显的反调峰特性, 在 1—4 和 24 时段预测风电的出力值占总负荷的比重在 50% 以上, 而在负荷的峰时即 10—14 和 18—20 时段风电出力较少。光伏发电和风力发电同时应用于微电网在一定程度上缓解了这种不利的影响, 但是在风电高发的时段其出力的波动性给微电网的可靠性带来巨大的挑战。所以在这些时段, 开启相对低廉的燃气轮机, 并安排蓄电池以最大功率充电, 同时为了提供微电网所需的负旋转备用, 应当切除部分风电。而在 5—8 时段, 新能源所占的出力比重不大而且负荷也比较少, 所以无需切除风电。在 9—21 时段, 电力负荷比较高, 开启燃料电池, 由于燃料电池低功率运行时成本较高, 所以开启时便是

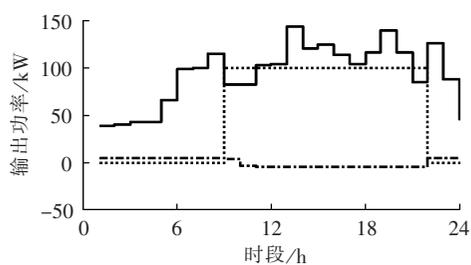


图 3 发电及储能单元出力

Fig.3 Outputs of generation units and energy storage unit

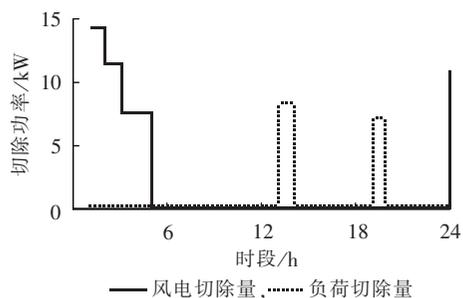


图 4 风电及负荷切除情况

Fig.4 Shedding of wind power and load

满发运行。蓄电池在 10—21 时段一直处于放电状态。在 13 和 19 时段, 系统负荷达到日顶峰, 此时采取切除部分负荷和调度机组 2 种手段提供微电网所需的正旋转备用。

4.2.2 置信水平的影响

本文对正负旋转备用置信水平去相同的置信度, 研究在其取 0.91~0.99 中微电网运行方案, 结果如表 2 所示。

表 2 不同置信水平下的结果

Table 2 Results for different confidence levels

置信水平	P_{WT-cut} /(kW·h)	P_{D-cut} /(kW·h)	总成本/元	失负荷期望/(kW·h)
0.91	42.0282	11.8865	2150.37	0.9708
0.92	44.8340	12.5597	2152.29	0.8571
0.93	45.9304	13.4118	2154.06	0.7312
0.94	49.7805	14.2716	2156.58	0.6234
0.95	51.2972	15.0048	2158.26	0.5445
0.96	56.6681	16.2056	2161.78	0.4379
0.97	60.6769	17.4979	2165.09	0.3495
0.98	66.7082	20.0306	2171.09	0.2321
0.99	74.8601	24.2832	2180.65	0.1150

从表 2 可以看出, 随着决策模型中置信水平的提高, 微电网所需的旋转备用不断增加, 这也在一定程度上导致了风电和负荷的切除量不断增加。与此同时微电网要增加可调度机组的出力以及为切除的负荷提供经济补偿, 所以其运行成本也在不断提高。置信水平从 0.91 到 0.95 等量增加时, 可以看到风电切除量、负荷切除量、总成本以及失负荷期望的变化都是比较平稳的。但是置信水平从 0.95 到 0.99 变

化时,失负荷期望的变化仍然是平稳的,而其他 3 项的变化率不断提高。所以在制定决策时,要综合考虑供电可靠性和运行的经济性,选择合适的置信水平。

4.2.3 预测精度的影响

ρ_{WT}^{new} 、 ρ_{PV}^{new} 、 $\rho_{WT,ins}^{new}$ 、 $\rho_{PV,ins}^{new}$ 和 ρ_D 反映预测的精度,同时也体现着波动的剧烈程度。其值越小,预测精度越高,波动也越小。定义 λ_1 、 λ_2 如下:

$$\begin{bmatrix} \rho_{WT}^{new} \\ \rho_{PV}^{new} \\ \rho_{WT,ins}^{new} \\ \rho_{PV,ins}^{new} \end{bmatrix} = \lambda_1 \begin{bmatrix} \rho_{WT} \\ \rho_{PV} \\ \rho_{WT,ins} \\ \rho_{PV,ins} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\rho_D^{new} = \lambda_2 \rho_D \quad (29)$$

微电网运行于 ρ^{new} 的预测精度下,得到新能源出力 and 负荷不同预测精度下的决策方案,如表 3 所示。

表 3 不同预测精度下的结果

Table 3 Results for different prediction precisions

λ_1	λ_2	$P_{WT-cut}/(kW \cdot h)$	$P_{D-cut}/(kW \cdot h)$	总成本/ 元	失负荷期 望/(kW·h)
0.4	0.4	9.3159	4.8449	2129.40	0.1686
0.6	0.6	29.6706	8.2767	2140.80	0.2528
0.8	0.8	40.5938	11.6608	2149.60	0.3603
0.8	1.0	41.6495	12.9017	2152.03	0.3873
1.0	0.8	51.1423	14.0074	2156.49	0.5057
1.0	1.0	51.2972	15.0048	2158.26	0.5445

λ_1 、 λ_2 分别反映的是新能源机组出力的预测精度和负荷的预测精度。可以发现,随着预测精度的提高,新能源出力和负荷的波动都将减少,微电网所需的旋转备用容量得到节约。同时,也相应地提高了新能源的利用率,减少了对负荷的切除量,节省了微电网运行成本,提高了供电可靠性。值得注意的是,在微电网运行成本优化中,提高新能源预测的精度带来的收益要高于提高同等程度的负荷的预测精度,从这个侧面也说明了新能源机组出力精确预测的必要性。

5 结论

本文在分析了微电网中存在的新能源出力波动、负荷预测误差等不确定因素的基础上,提出了基于机会约束规划的孤岛模式下微电网动态经济调度模型,将机会约束条件转化为确定性等价类后,采用改进的粒子群优化算法实现仿真分析。算例结果表明,本文所提模型合理、有效,适用于具有多种类型分布式发电的微电网,为其运行于孤岛模式下的经济调度决策提供有价值的参考方案。

参考文献:

[1] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZILARGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.

[2] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distributed system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.

[3] 童小娇,尹坤,刘亚娟,等. 包含可控负荷的微电网经济调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 21-28.
TONG Xiaojiao, YIN Kun, LIU Yajuan, et al. Economic dispatch for microgrid with controllable loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 21-28.

[4] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 29-36.
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36.

[5] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.

[6] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Le. Study of economic operation in microgrid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[7] 张双乐,李鹏,陈超,等. 基于改变尺度混沌优化算法的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 70-74.
ZHANG Shuangle, LI Peng, CHEN Chao, et al. Economic operation of microgrid based on mutative scale chaotic optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 70-74.

[8] 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.

[9] 石庆均,耿广超,江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.

[10] 徐立中,杨光亚,许昭,等. 考虑风电随机性的微电网热电联合调度[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 53-60.
XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60.

[11] 柳丹,李强,袁晓东. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.

[12] 刘小平. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-83.
LIU Xiaoping. Dynamic economic dispatch for microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-83.

[13] 刘宝碇,赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 35-42.

[14] RONAN D, MARK O. A new approach to quantify reserve

- demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 22(2): 587-594.
- [15] 赵书强, 刘晨亮. 基于机会约束的储能日前优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3055-3059.
- ZHAO Shuqiang, LIU Chenliang. Chance-constrained programming based day-ahead optimal scheduling of energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3055-3059.
- [16] 雷秀娟. 群智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 127-129.
- [17] 于佳. 基于机会约束规划的风-蓄联合动态调度[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2116-2122.
- YU Jia. A chance-constrained programming based dynamic economic dispatch of wind farm and pumped-storage power station[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2116-2122.
- [18] 陈达威. 微电网中负荷优化分配技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

- CHEN Dawei. Study of optimal load distribution of microgrids [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [19] WANG M Q, GOOI H B. Spinning reserve estimation in microgrids [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1164-1174.

作者简介:



任建文

任建文(1961—),男,山西吕梁人,教授,博士,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等(E-mail: rjw219@126.com);

渠卫东(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail: qwdgeg@163.com)。

Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid

REN Jianwen, QU Weidong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The uncertainty factors, such as renewable power generation fluctuation and incorrect forecasted load, bring difficulty to the economic dispatch of islanded microgrid. A dynamic economic dispatch model based on chance-constrained programming is proposed for islanded microgrid, which adopts the scheduled power outputs of generation units and energy storage unit and the generation-side and load-side managements of renewable power. It represents the wind/photovoltaic power outputs and load forecasting error as random variables and the confidence level of satisfying the spinning reserve as the power-supply reliability of microgrid. The chance constraints are converted into their certain equivalent classes to derive the mathematical expression of expected load loss. A modified particle swarm optimization algorithm is applied to solve the model. Results of case analysis verify the rationality of the proposed model.

Key words: microgrid; islanding mode; dynamic economic dispatch; chance-constrained programming; particle swarm optimization algorithm; electric load forecasting; errors

(上接第 66 页 continued from page 66)

Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid

LIU Zifa¹, WEI Tao², LI Mengyu¹, CAO Zhiyong¹, LI Weishu¹, HUI Hui²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: According to the features of AC/DC microgrid, a comprehensive evaluation index system is established based on three criteria: power-supply reliability, technical economy and adaptability, while a calculation model and a quantification method are proposed for each index. The 5/5-9/1 scale analytic hierarchy analysis is applied to determine the weight of each index and the determined weights are more reasonable and coherent. The evaluation results of an AC/DC microgrid demonstrate the rationality of the proposed index system and the effectiveness of the proposed method.

Key words: microgrid; evaluation; improved analytic hierarchy process; adaptability; reliability