

基于灰熵关联择优的含不确定性预算 调节策略的微电网鲁棒调度

吕智林, 汤泽琦

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 以运行成本、环境成本和可再生能源波动最小为目标,建立了以灰熵关联度为最优解评价标准的微电网调度模型。针对风光发电的不确定性,构造以预测值为中心的不确定性集,引入鲁棒优化理论改进调度模型。针对储能系统在调度过程中可能过早到达其限值的问题,提出了一种通过储能运行状态来估计风光发电不确定性预算的策略。采用改进微分进化算法对算例进行求解,该算法结合云模型增强其局部搜索能力,依据混沌算法提升其全局搜索能力。仿真结果验证了模型和算法的可行性,从 Pareto 前沿的变化与最优解集的特征值两方面分析了鲁棒调度模型的优越性;讨论了在不同场景下不确定性预算值对微电网调度的影响,并验证了不确定性预算调节策略能更有效地防止储能系统到达储能上下限,从而进一步提高微电网调度的鲁棒性。

关键词: 混合微电网; 灰熵关联; 鲁棒调度; 微分进化算法; 云模型; 混沌算法

中图分类号: TM 734; TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.006

0 引言

利用分布式发电可以提高能量利用率,减少碳排放,提高能量质量和供电可靠性,减少线损,适应电力市场发展需求等^[1]。微电网解决了分布式电源的接入问题。然而,可再生能源受气候等因素的影响,具有明显的随机性、间歇性和波动性,增加了微电网运行的不确定性。

目前,处理微电网不确定性的方法众多,文献[2]指出常见处理不确定性的方法有随机规划、模糊规划和鲁棒优化;文献[3]将随机变量转化为概率性序列,针对微电网运行中的不确定性和波动性,构建了基于机会约束的经济运行模型进行调度;文献[4]在考虑分时电价的条件下制定阶段优化目标,针对不确定性和波动性,采用基于机会约束规划的微电网经济优化模型;文献[5]将盒式鲁棒优化理论引入微电网优化调度中,并通过鲁棒性预测控制算法来控制调度的保守性。鲁棒优化理论是研究参数在不确定集合“最坏”情况值下的不确定问题。在电力系统中,文献[6]提出了包含备用调度模型和经济调度模型的鲁棒调度方法;文献[2]提出了鲁棒优化问题的一般博弈模型,以 min-max 博弈问题的两阶段松弛算法为基础进行鲁棒优化;文献[7]采用矩不确定集鲁棒优化方法解决含风电不确定性的电力环保经济调度问题;文献[8]通过分析可再生能源的不确定集,以时段出力的限值和周期内总和出力的限值构造

不确定集,以社会效益净成本最小化为上层目标,以交互成本最大化为下层目标,进行双层调度;文献[9]以发电利润均值最大化和方差最小化构造一个二阶锥优化模型,并采用 30 节点系统对该调度模型以鲁棒代价进行分析与比较;文献[10]针对风电出力的不确定性,提出了鲁棒双层区间优化调度模型,该模型以发电机旋备裕度最小化、断面正向负载和反向负载最大化为下层目标,以系统运行成本最小化为上层目标,并针对双层调度模型计算复杂的问题,将原问题转化为二次规划问题,以 IEEE RTS 系统为例进行调度分析;文献[11]针对可再生能源的不确定性,采用鲁棒优化法建立虚拟电厂上层经济调度和下层安全调度模型进行电力调度;文献[12]通过区间模糊预测模型提供场景的边界,并基于场景的极限将鲁棒调度问题转化为二阶锥问题进行调度。

本文考虑风光发电的不确定性因素,以微电网运营成本、环境成本和可再生能源输出波动最小为目标函数建立调度模型,并采用鲁棒优化理论改进调度模型。鲁棒优化模型中,不确定性预算反映了不确定性的不确定程度。目前,相关文献常通过分析不同不确定性预算下的调度结果,来确定合适的 uncertainty budget 值。本文通过分析不同不确定性预算下的调度结果发现,当不确定性预算选取不当时,储能系统为了平衡发电与用电会过早地达到其容量的上、下限。因此,本文针对储能系统可能过早达到自身容量上、下限的问题和不确定性预算值的选择问题,通过当前储能系统的运行状态来估计下一调度时段风光发电的不确定性预算;结合灰色关联度分析与信息熵客观地计算微电网多目标调度的适应度,以选取最合适的调度策略。同时,采用混沌模型与云模型

收稿日期:2016-08-18;修回日期:2017-07-27

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)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61364027) and the Natural Science Foundation of Guangxi Province(2014GXNSFAA118384)

改进的多目标微分进化算法对模型进行求解。

1 微电网多目标动态调度模型

微电网包含了风力发电机 WT(Wind Turbine)、光伏电池 PV(PhotoVoltaic)、柴油发电机 DE(Diesel Engine generator)、微型燃气轮机 MT(Micro Turbine)、燃料电池 FC(Fuel Cell)和储能系统 ESS(Energy Storage System)。

1.1 目标函数

1.1.1 运行维护成本最小化

微电网运行维护成本包括燃料费用、设备运行维护成本和设备折旧成本。运行维护成本最小化的目标函数如式(1)所示。

$$\min f_{1,t} = c_{F,t} + c_{OM,t} + c_{DP,t} \quad (1)$$

其中, $f_{1,t}$ 为微电网在时段 t 内的经济成本; $c_{F,t}$ 为时段 t 的燃料总费用, 如式(2)所示; $c_{OM,t}$ 为时段 t 的总运行维护费用, 如式(8)所示; $c_{DP,t}$ 为时段 t 的总折旧成本, 如式(9)所示。

$$c_{F,t} = \sum_{i \in S_C} c_{F,i,t} \quad (2)$$

$$c_{F,MT,t} = \frac{c_{NG} P_{MT,t}}{L_{NG} \eta_{MT,t}} \quad (3)$$

$$\eta_{MT,t} = 0.0753 \left(\frac{P_{MT,t}}{65} \right)^3 - 0.3095 \left(\frac{P_{MT,t}}{65} \right)^2 + 0.4174 \frac{P_{MT,t}}{65} + 0.1068 \quad (4)$$

$$c_{F,FC,t} = \frac{c_{NG} P_{FC,t}}{L_{NG} \eta_{FC,t}} \quad (5)$$

$$\eta_{FC,t} = -0.0023 P_{FC,t} + 0.6735 \quad (6)$$

$$c_{F,DE,t} = a_{DE} + b_{DE} P_{DE,t} + c_{DE} P_{DE,t}^2 \quad (7)$$

$$c_{OM,t} = \sum_{i \in S} K_{OM,i} P_{i,t} \quad (8)$$

$$c_{DP,t} = \sum_{i \in S} \frac{c_{IN,i} P_{i,t}}{8760 P_{N,i} k_i} \frac{r(1+r)^{t_{pp}}}{(1+r)^{t_{pp}} - 1} \quad (9)$$

其中, $c_{F,i,t}$ 为时段 t 微电源 i 的燃料费用; $S_C = \{MT, FC, DE\}$ 为可调度微电源种类的集合; $c_{F,MT,t}$ 为时段 t 微型燃气轮机的燃料费用; c_{NG} 为天然气价格; $P_{MT,t}$ 为时段 t 微型燃气轮机的输出功率; L_{NG} 为天然气低热热值; $\eta_{MT,t}$ 为微型燃气轮机的发电效率; $c_{F,FC,t}$ 为时段 t 燃料电池的燃料费用; $P_{FC,t}$ 为时段 t 燃料电池的输出功率; $\eta_{FC,t}$ 为燃料电池的发电效率; $c_{F,DE,t}$ 为时段 t 柴油发电机的燃料费用; a_{DE}, b_{DE}, c_{DE} 为柴油发电机燃料费用系数; $P_{DE,t}$ 为时段 t 柴油发电机的输出功率; $K_{OM,i}$ 为微电源 i 的运行维护系数; $P_{i,t}$ 为时段 t 微电源 i 的输出功率; $S = \{PV, WT, MT, FC, DE, ESS\}$ 为微电网中微电源和储能系统的集合; $c_{IN,i}$ 为微电源 i 的单位容量安装成本; $P_{N,i}$ 为微电源 i 的额定功率; k_i 为微电源 i 的容量系数; r 为年利率; t_{pp} 为投资偿还期。

1.1.2 环境成本最小化

环境成本考虑了环境价值和惩罚成本。环境成

本最小化的目标函数如式(10)所示。

$$\min f_{2,t} = \sum_{k=1}^K \left[(c_{EV,k} + c_{P,k}) \sum_{i \in S_C} a_{i,k} P_{i,t} \right] \quad (10)$$

其中, $f_{2,t}$ 为时段 t 内的环境成本; $c_{EV,k}$ 为第 k 类污染物的环境价值系数; $c_{P,k}$ 为第 k 类污染物的惩罚成本系数; $a_{i,k}$ 为微电源 i 对应第 k 类污染物的排放系数; K 为污染物的总数。

1.1.3 可再生能源输出波动最小化

可再生能源输出波动最小化的目标函数如式(11)所示。

$$\min f_{3,t} = |(P_{WT,t} + P_{PV,t} - P_{ESS,t}) - (P_{WT,t-1} + P_{PV,t-1} - P_{ESS,t-1})| \quad (11)$$

其中, $f_{3,t}$ 为时段 t 内的可再生能源波动情况; $P_{WT,t}$ 为时段 t 风力发电机的输出功率; $P_{PV,t}$ 为时段 t 光伏电池的输出功率; $P_{ESS,t}$ 为时段 t 储能系统的投运功率, 其值为正时表示充电, 为负时表示放电。

1.2 约束条件

$$\sum_{i \in S_{DC}} P_{i,t} = P_{load,t} + P_{ESS,t} \quad (12)$$

$$\underline{P}_i \leq P_{i,t} \leq \bar{P}_i \quad (13)$$

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

$$\underline{SOC} \leq SOC_t \leq \overline{SOC} \quad (15)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1}(1-\eta) + \frac{P_{ESS,t} \eta_c}{S_{ESS}} \quad P_{ESS,t} > 0 \quad (16)$$

$$SOC_t = SOC_{t-1}(1-\eta) + \frac{P_{ESS,t}}{\eta_d S_{ESS}} \quad P_{ESS,t} \leq 0 \quad (17)$$

$$\underline{P}_{ESS} \leq P_{ESS,t} \leq \bar{P}_{ESS} \quad (18)$$

$$\min \{-P_{ESS}, [SOC_{t-1}(1-\eta) - \underline{SOC}] \eta_d S_{ESS}\} + \sum_{i \in S_U} P_{i,t} + \sum_{j \in S_C} \bar{P}_{j,t} \geq P_{load,t}(1+\gamma) \quad (19)$$

其中, $P_{load,t}$ 为时段 t 的负荷; $P_{ESS,t}$ 为时段 t 储能系统的充/放电功率; $S_{DC} = \{PV, WT, MT, FC, DE\}$ 为微电源集合; \underline{P}_i 为微电源 i 的最小输出功率; \bar{P}_i 为微电源 i 的最大输出功率; R_i 为微电源 i 的爬坡速率; Δt 为调度步长; SOC_t 为时段 t 储能系统的荷电状态; \underline{SOC} 为荷电状态下限; \overline{SOC} 为荷电状态上限; η 为储能系统的自放电率; η_c 为储能系统的充电效率; η_d 为储能系统的放电效率; S_{ESS} 为储能系统的电荷容量; $\underline{P}_{ESS}, \bar{P}_{ESS}$ 分别为储能系统充放电功率的下限、上限; $S_U = \{PV, WT\}$ 为不可控微电源种类的集合; γ 为系统旋转备用率。

2 含灰熵择优指标的多目标鲁棒模型

多目标优化问题中, 各目标的权重难以选择, 本文采用灰熵关联度来评价最优解的优劣。为了描述方便, 抽象调度模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{F} = (\min f_1, \min f_2, \dots, \min f_N) \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{L} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{U} \end{cases} \quad (20)$$

其中, N 为子目标函数的个数; $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^N$ 为有 N 个目标函数的向量, 即目标空间; $f_n (n=1, 2, \dots, N)$ 为子目标函数; \mathbf{x} 为决策变量; \mathbf{A}, \mathbf{b} 为不等式约束方程中的系数; \mathbf{U}, \mathbf{L} 为变量的上、下限。

2.1 灰色关联度

假设理想目标函数值序列为 \mathbf{F}_0 (即参考序列), Pareto 解的目标函数值序列为 \mathbf{F}_m (即比较序列)。

$$\mathbf{F}_0 = [f_0(1), f_0(2), \dots, f_0(N)] \quad (21)$$

$$\mathbf{F}_m = [f_m(1), f_m(2), \dots, f_m(N)] \quad m=1, 2, \dots, M \quad (22)$$

其中, $f_0(n)$ 为以第 n 个子目标函数为单目标函数时的最优解的目标函数; $f_m(n)$ 为第 m 组比较序列中第 n 个子目标函数值; M 为比较序列个数。

为了消除不同指标性质的影响, 对函数值进行无量纲处理。由式(20)可知, 由于目标函数越小越好, 无量纲处理采用成本型指标变换, 如式(23)所示。

$$f'_m(n) = \frac{\max(\mathbf{F}_m) - f_m(n)}{\max(\mathbf{F}_m) - \min(\mathbf{F}_m)} \quad (23)$$

然后, 求灰关联系数 $r(f_0(n), f_m(n))$, 如式(24)所示。

$$r(f_0(n), f_m(n)) = \left[\min_m \min_n (|f'_0(n) - f'_m(n)|) + \rho \max_m \max_n (|f'_0(n) - f'_m(n)|) \right] \div \left[(|f'_0(n) - f'_m(n)|) + \rho \max_m \max_n (|f'_0(n) - f'_m(n)|) \right] \quad (24)$$

其中, ρ 为分辨系数, 本文取 $\rho=0.5$ 。

最后, 求 Pareto 解的灰关联度 $r(\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_m)$, 如式(25)所示。

$$r(\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_m) = \sum_{n=1}^N \omega_n r(f_0(n), f_m(n)) \quad (25)$$

其中, ω_n 为第 n 个灰关联度的权值, $\sum_{n=1}^N \omega_n = 1$ 且有 $0 < \omega_n < 1$ 。

2.2 灰熵关联度

计算灰色关联系数分布映射 $p_m(n)$ 和灰熵 H_n , 分别如式(26)、(27)所示。

$$p_m(n) = \frac{r(f_0(n), f_m(n))}{\sum_{n=1}^N r(f_0(n), f_m(n))} \quad (26)$$

$$H_n = - \sum_{m=1}^M (p_m(n) \ln p_m(n)) \quad (27)$$

构造拉格朗日函数, 根据极值的必要条件可得: 当 $p_m(n) = 1/M$ 时, H_n 取得最大值, 最大值为 $H_{\max} = \max(H_n) = \ln M$ 。计算指标的熵关联度 E_n 、指标偏差度 G_n 和熵值权重 ω_n , 如式(28)——(30)所示。

$$E_n = \frac{H_n}{H_{\max}} = - \frac{\sum_{m=1}^M (p_m(n) \ln p_m(n))}{\ln M} \quad (28)$$

$$G_n = 1 - E_n \quad (29)$$

$$\omega_n = \frac{G_n}{\sum_{n=1}^N G_n} \quad (30)$$

则以熵值权重 ω_n 为灰关联度的权值的灰关联度 $r(\mathbf{F}_0, \mathbf{F}_m)$ 即为灰熵关联度 R_m 。

2.3 鲁棒模型

Bertsimas 和 Sim 通过控制不确定性预算 Γ_i , 提出了一种鲁棒优化模型, 称为 Bertsimas-Sim 鲁棒优化模型。联立式(12)和式(19), 消除不确定量 $P_{\text{load}, t}$, 得:

$$\sum_{j \in S_c} P_{j,t}(1+\gamma) \leq \sum_{j \in S_c} \bar{P}_{j,t} + P_{\text{ESS}, t}(1+\gamma) + \min \{ -P_{\text{ESS}}, [\text{SOC}_{t-1}(1-\eta) - \text{SOC}] \eta_d S_{\text{ESS}} \} - \sum_{i \in S_u} P_{i,t} \gamma \quad (31)$$

令 $[P_{\text{MT}, t}, P_{\text{FC}, t}, P_{\text{DE}, t}, \gamma, \gamma]^T$ 为式(20)的决策变量 \mathbf{x} ; $[1+\gamma, 1+\gamma, 1+\gamma, P_{\text{PV}, t}, P_{\text{WT}, t}]$ 为式(20)的不等式约束参数 \mathbf{A} , 其中 $P_{\text{PV}, t}, P_{\text{WT}, t}$ 为不确定性参数; 根据 Bertsimas-Sim 鲁棒优化模型, 不等式(31)的鲁棒对等模型如下:

$$\sum_{j \in S_c} P_{j,t}(1+\gamma) + \Gamma z + \sum_{q \in S_u} p_q \leq \sum_{j \in S_c} \bar{P}_{j,t} + P_{\text{ESS}, t}(1+\gamma) - \sum_{i \in S_u} P_{i,t}^0 \gamma + \min \{ -P_{\text{ESS}}, [\text{SOC}_{t-1}(1-\eta) - \text{SOC}] \eta_d S_{\text{ESS}} \} \quad (32)$$

$$z + p_{\text{PV}} \geq \rho_{\text{PV}} P_{\text{PV}, t}^0 \gamma_{\text{PV}} \quad (33)$$

$$z + p_{\text{WT}} \geq \rho_{\text{WT}} P_{\text{WT}, t}^0 \gamma_{\text{WT}} \quad (34)$$

$$-y_{\text{PV}} \leq \gamma \leq y_{\text{PV}} \quad (35)$$

$$-y_{\text{WT}} \leq \gamma \leq y_{\text{WT}} \quad (36)$$

$$p_q \geq 0, \quad z \geq 0 \quad (37)$$

其中, $p_q, z, \Gamma, y_{\text{WT}}, y_{\text{PV}}$ 均为辅助变量, 且其值非负; 不确定性的预算 $\Gamma \in [0, 2]$; $\rho_{\text{PV}}, \rho_{\text{WT}}$ 为预测误差最大值; $P_{i,t}^0 (i=\text{PV}, \text{WT})$ 为风力发电机或光伏电池在时段 t 的预测出力功率。

联立式(33)——(36)得:

$$z + p_{\text{PV}} \geq \rho P_{\text{PV}, t}^0 \gamma \quad (38)$$

$$z + p_{\text{WT}} \geq \rho P_{\text{WT}, t}^0 \gamma \quad (39)$$

2.4 不确定性预算调节策略

不确定预算 Γ 直接影响模型的保守度, 为了防止储能系统过度充放电, 引入如下策略: 储能系统存储电量越接近其限值, 表明一段时间内对风光发电预测的平均偏差越大, 微电网调度应越保守, Γ 值应越大; 储能系统存储电量距其限值越远, 表明微电网越健壮, Γ 值应越小, 其调度过程就可以越接近预测过程。因此, 制定 $\Gamma(t)$ 与 $Q(t)$ 在时段 t 的线性映射策略, 如式(40)所示。

$$\frac{\Gamma(t) - \Gamma_{\min}}{\Gamma_{\max} - \Gamma_{\min}} = \frac{\left| Q(t) - \frac{Q_{\min} + Q_{\max}}{2} \right|}{\frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{2}} \quad (40)$$

3 优化算法

3.1 微分进化算法

微分进化算法主要过程包括变异、交叉和选择。

a. 变异操作函数。

$$V_i = X_i + F(X_j - X_k) \quad (41)$$

其中, V 为变异种群, $V_i \in V$ 为第 i 个变异粒子, $V_{i,p} \in$

V_i 为第 i 个变异粒子中第 p 个个体; F 为变异系数, 本文取 $[0.5, 0.8]$ 间的实数; $i, j, k \in \{1, 2, \dots, N_p\}$, i, j, k 是随机选取的, 且 $i \neq j \neq k$; X_i 为第 i 个父代粒子; $F = F_{\max} - g(F_{\max} - F_{\min})/G_m$, g 为当前种群代数, G_m 为种群代数的最大值, F_{\max}, F_{\min} 分别为变异系数的上、下限。

b. 交叉操作函数。

$$U_{ij} = \begin{cases} V_{ij} & \text{rand} \leq C_R \text{ 且 } j=R \\ X_{ij} & \text{rand} > C_R \text{ 且 } j \neq R \end{cases} \quad (42)$$

其中, $U_{ij} \in U_i$ 为第 i 个交叉粒子中第 j 个个体; C_R 为交叉系数, 本文选取 $[0.5, 0.9]$ 间的实数, $C_R = C_{R\min} + g(C_{R\max} - C_{R\min})/G_m$, $C_{R\min}, C_{R\max}$ 分别为交叉系数的下限、上限; R 为必然交叉个体的位置, 用以确保交叉种群必然进行了交叉操作。

c. 选择操作函数。

$$X_i = \begin{cases} U_i & f(U_i) < f(X_i) \\ X_i & f(U_i) \geq f(X_i) \end{cases} \quad (43)$$

其中, $f(\cdot)$ 为粒子的适应度, 即目标函数。

3.2 混沌算法

为了减少个体重复, 利用混沌映射可以遍历可行域的特点, 对进入混沌算法的粒子不断进行可行域中最优解集的搜索, 以提高算法搜索性能。下面给出 Bernoulli 映射方式来改进算法。

$$b_{er(l+1)} = 2b_{er(l)} \pmod{1} \quad (44)$$

当 $b_{er(l)} \in \{(0, 1) - \{0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.8\}\}$ 时, 式(44)进入混沌状态, $b_{er(l)}$ 为第 l 次映射混沌粒子; 当 $b_{er(l)} \in \{0, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 0.8, 1\}$ 时, 令 $b_{er(l)} = b_{er(l)} + 0.0001$ 使其进入混沌状态的可行域。因此 $b_{er(l)}$ 不会陷入小周期和不稳定的混沌映射。 $b_{er(0)} = (X_{\text{best},l} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, $X_{\text{best},l}$ 为最优决策变量中的第 l 个元素。

3.3 云模型算法

云模型是定性概念与定量数值之间不确定性转换的模型, 包含期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 3 个特征参数, 记云模型 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。

正向云模型算法的步骤如下。

a. 产生一个以 E_n 为期望、以 H_e 为标准差的正态随机数 E'_n 。

b. 产生一个以 E_x 为期望、以 E'_n 为标准差的正态随机数 $x_{c,i}$ 。

c. 计算定性概念的确定度, 如式(45)所示。

$$y_{c,i} = e^{-(x_{c,i} - E_x)^2 / [2(E'_n)^2]} \quad (45)$$

其中, $x_{c,i}$ 为第 i 个最优决策变量中的每个元素; $y_{c,i}$ 为第 i 个最优决策变量中的每个元素所对应的确定度。

d. 重复步骤 **a—c**, 直到生成已定数量 R_0 个“云滴” $\{x_{c,i}, y_{c,i}\}$ 。

逆向云模型算法的核心算法如下:

$$E_x = \frac{1}{R_0} \sum_{i=1}^{R_0} x_{c,i} \quad (46)$$

$$E_n = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^{R_0} |x_{c,i} - E_x| \quad (47)$$

$$H_e = \sqrt{S_{\text{cloud}}^2 - E_n^2} \quad (48)$$

$$S_{\text{cloud}}^2 = \frac{1}{R_0 - 1} \sum_{i=1}^{R_0} (x_{c,i} - E_x)^2 \quad (49)$$

其中, R_0 为“云滴”数量; S_{cloud}^2 为云的方差。云模型中距中心越近的“云滴”, 其密度就越大, 因此形成一个距中心点越近搜索密度越高的搜索方式, 增强了中心附近的搜索能力, 从而提高了改进微分算法的局部搜索能力。

3.4 算法流程图

微电网鲁棒调度流程图如图 1 所示。

4 算例分析

考虑可再生能源出力最大预测偏差为 20%, 调度步长为 15 min。算法规模为 100, 最大迭代 100 次, 最大精英存档量为 300, 变异概率为 0.6, 交叉概率为 0.7。

4.1 仿真参数

为了验证模型的可行性, 本文收集表 1 所示微电源参数^[13-15]。负荷预测、光伏发电预测和风力发电预测曲线如图 2—4 所示。

4.2 鲁棒性分析

以时段 1 的微电网鲁棒调度为例进行微电网调度鲁棒性分析。为了可以方便观察 Pareto 前沿, 算法中粒子规模提升为 2000, 其他参数保持不变。

图 5 为不同调度方式下 Pareto 前沿比较。由图 5 可看出, 随着预测误差的变化, 鲁棒调度 ($\Gamma=1$) 的最优解集与传统调度的最优解都会产生一定变化, 但是, 鲁棒调度最优解集的变化程度远远小于传统调度最优解集的变化程度。在微电网中电负荷相同的情况下, 预测误差的数值反向越大 (即风光发电的实际值越小于其预测值), 传统调度最优解集越向运行维护成本轴的正方向、环境成本轴的正方向和可再生能源输出波动轴的正方向移动。因此, 鲁棒调度结果的鲁棒性更强。

图 6 显示了不同调度方式下最优目标函数的数学特征值随预测误差变化的变化盒式图。图 6 从平均数、中位数、上下四分位数、上下内限和异常值反映不同调度方式在不同预测情况下的变化情况。鲁棒调度受预测误差变化的影响远小于传统调度, 其使调度策略变得更加健壮, 在负荷和可再生能源出力有所扰动的前提下, 维持调度策略的稳定输出。因此, 从数学特征的角度可证明鲁棒调度结果较传统调度结果具有更强的鲁棒性。

4.3 仿真结果

图 7—9 为 Γ 取不同值时的优化调度结果。图

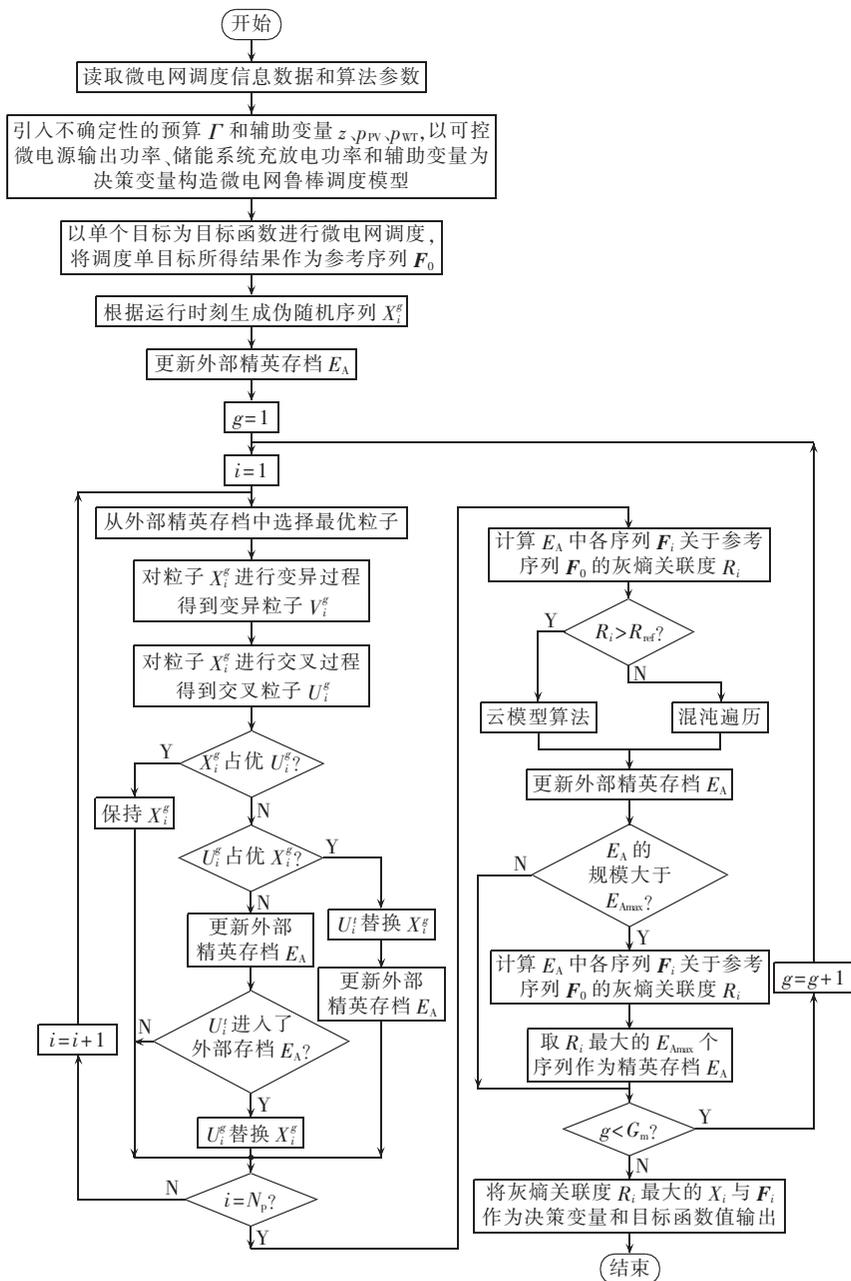


图 1 微电网鲁棒调度流程图

Fig.1 Flowchart of robust dispatch of microgrid

表 1 微电源参数

Table 1 Parameters of micropower supply

微电源 类型	功率	功率	爬坡	爬坡	安装 成本/ [万元·kW ⁻¹]	运行维护 成本/ [元·kW ⁻¹]	使用 年限/ a
	下限/ kW	上限/ kW	下限/ kW	上限/ kW			
WT	0	55	—	—	2.375	0.0296	10
PV	0	40	—	—	6.650	0.0096	20
DE	0	50	-15	15	1.600	0.0300	10
MT	0	65	-15	15	1.667	0.0880	15
FC	0	60	-12	12	4.275	0.0290	20
ESS	10	90	-5	5	2.700	0.0013	15

9 为含不确定性预算调节策略的鲁棒调度,即 Γ 在 $[0,2]$ 范围内自动调节。结果表明,这种含不确定性预算调节策略的鲁棒调度能自动调节微电网调度的保守程度,从而可以有效避免储能系统在调度过程

中达到储能的上下限。

表 2、表 3 分别为不同 Γ 和不同最大预测误差绝对值下的目标函数值比较。表 2 和表 3 结果表明,当不确定性预算 Γ 变化时,即可再生能源出力的不确定性环境发生变化时,96 个时段内微电网鲁棒调度的总成本并没有发生较大的变化。鲁棒调度较传统调度的优势是决策或决策的目标函数值更加平稳,使决策变量的可行域变得更加稳定,不会随不确定性的变化而发生大波动。在小容量微电网中,储能系统能够参与调度过程,即储能系统能够以较低的运行成本将微电源多发的电能存储起来,供微电源出力不足时使用,避免了切负荷与弃电所产生的惩罚。而实现储能参与调度的前提是储能系统在调度过程

中尽可能避免到达充电总量的上下限,并且能够完全

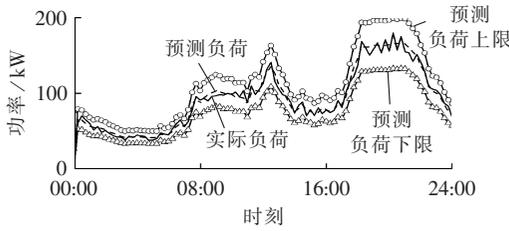


图 2 负荷预测曲线
Fig.2 Curves of load forecasting

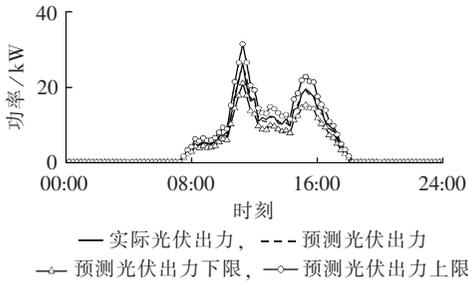


图 3 光伏发电预测曲线

Fig.3 Curves of photovoltaic power forecasting

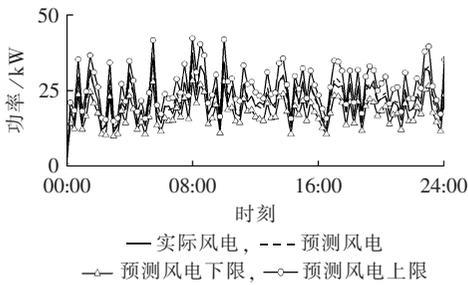
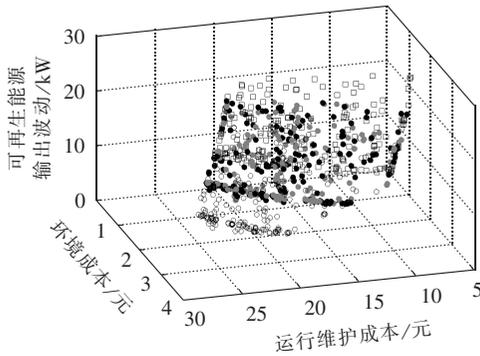


图 4 风电发电预测曲线

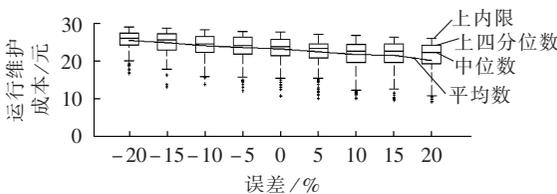
Fig.4 Curves of wind power forecasting



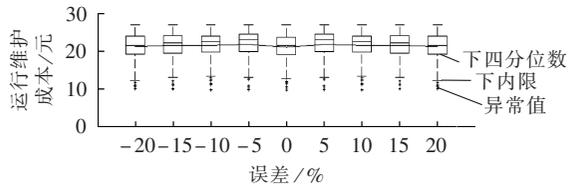
- 传统调度(误差为-20%), □传统调度(误差为20%)
- 鲁棒调度(误差为-20%), ●鲁棒调度(误差为20%)

图 5 不同调度方式下 Pareto 前沿比较

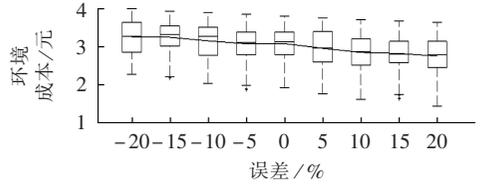
Fig.5 Comparison of Pareto frontier among different dispatch modes



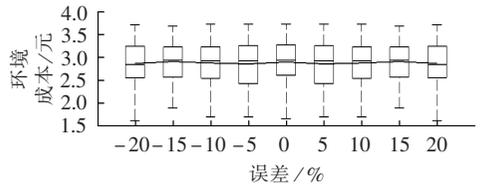
(a) 传统调度的运行维护成本



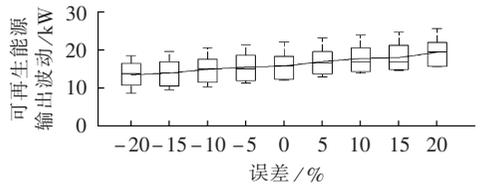
(b) 鲁棒调度的运行维护成本



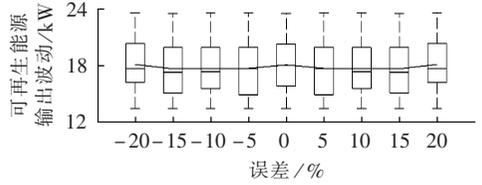
(c) 传统调度的环境成本



(d) 鲁棒调度的环境成本



(e) 传统调度的可再生能源输出波动



(f) 鲁棒调度的可再生能源输出波动

图 6 最优解集特征值比较

Fig.6 Comparison of characteristic values among optimal solution sets

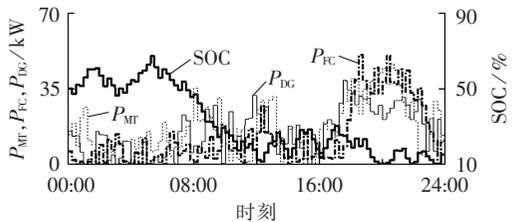


图 7 $\Gamma=0$ 时微电网鲁棒调度结果

Fig.7 Robust dispatch result of microgrid when $\Gamma=0$

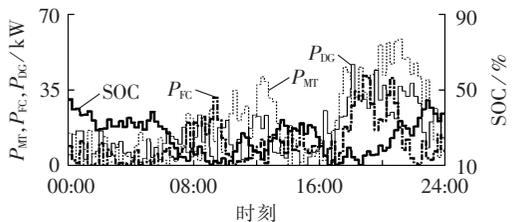


图 8 $\Gamma=1$ 时微电网鲁棒调度结果

Fig.8 Robust dispatch result of microgrid when $\Gamma=1$

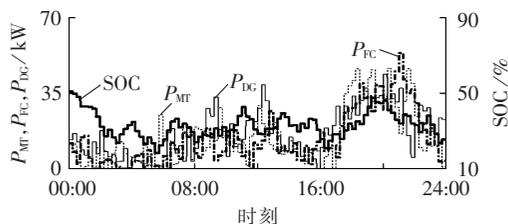


图 9 $\Gamma \in [0, 2]$ 时微电网鲁棒调度结果

Fig.9 Robust dispatch result of microgrid when $\Gamma \in [0, 2]$

表 2 不同 Γ 下鲁棒调度各目标函数比较

Table 2 Comparison of objective functions of robust dispatch among different Γ values

不确定性 预算	运行维护 成本/元	环境 成本/元	可再生能源 波动性/kW
$\Gamma=0$	3097.2	422.6	504.6
$\Gamma=0.5$	3097.5	423.6	581.3
$\Gamma=1$	3140.5	403.2	542.2
$\Gamma=1.5$	3087.3	440.2	548.6
$\Gamma=2$	3057.4	431.1	577.4
$\Gamma \in [0, 2]$	3092.2	423.9	553.2

表 3 不同最大预测误差绝对值下目标函数比较

Table 3 Comparison of objectives among different maximum prediction error absolute values

最大预测误差 绝对值/%	运行维护 成本/元	环境 成本/元	可再生能源 波动性/kW
0	3004.0	429.5	440.6
5	3042.7	453.2	498.8
10	3052.0	453.3	582.0
15	3168.7	473.1	637.2
20	3234.2	603.8	746.5

满足下一时段的微电网调度所需,含不确定性预算调节策略的鲁棒调度能较好地解决这一问题。

5 结论

本文以运行成本、环境成本和可再生能源波动最小为目标,针对风光出力的不确定因素,采用鲁棒优化理论构造微电网鲁棒调度模型,并以灰熵关联度为评价指标从最优解集中选择最优解。针对因不确定性预测设置不当而造成储能系统过早达到上下限的问题,根据储能系统的当前状态动态调整不确定性预测,以控制微电网调度过程中的保守程度,从而形成一种不确定性预测调节策略。通过仿真可知,鲁棒调度受预测变化的影响远小于传统调度。含不确定性预算调节策略的鲁棒调度可以有效防止储能系统到达储能上下限,从而使储能系统能更好地保证微电网的可靠运行,进一步提高了微电网调度的鲁棒性。

参考文献:

[1] 郑漳华,艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术,2008,32(16):27-31.
ZHENG Zhanghua, AI Qian. Present situation of research on

microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31.

- [2] 梅生伟,郭文涛,王莹莹,等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. 中国电机工程学报,2013,33(9):47-56.
MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 47-56.
- [3] 刘方,杨秀,时珊珊,等. 基于序列运算的微网经济优化调度[J]. 电工技术学报,2015,30(20):227-237.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of micro-grid based on sequence operation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 227-237.
- [4] 刘方,杨秀,时珊珊,等. 考虑不确定因素下含充换储一体化电站的微网能量优化[J]. 电网技术,2015,39(3):669-676.
LIU Fang, YANG Xiu, SHI Shanshan, et al. Economic operation of microgrid containing charging-swapping-storage integrated station under uncertain factors of wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 669-676.
- [5] 彭春华,谢鹏,陈臣. 大规模光伏电站接入电网可调节鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4324-4332.
PENG Chunhua, XIE Peng, CHEN Chen. Adjustable robust optimal dispatch of power system with large-scale photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4324-4332.
- [6] 徐秋实,邓长虹,赵维兴,等. 含风电电力系统的多场景鲁棒调度方法[J]. 电网技术,2014,38(3):654-661.
XU Qiushi, DENG Changhong, ZHAO Weixing, et al. A multi-scenario robust dispatch method for power grid integrated with wind farms[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 654-661.
- [7] 周任军,闵雄帮,童小娇,等. 电力环保经济调度矩不确定分布鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3248-3256.
ZHOU Renjun, MIN Xiongbang, TONG Xiaojiao, et al. Distributional robust optimization under moment uncertainty of environmental and economic dispatch for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3248-3256.
- [8] 向月,刘俊勇,魏震波,等. 考虑可再生能源出力不确定性的微电网能量优化鲁棒模型[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3063-3072.
XIANG Yue, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Robust model of microgrid energy optimization with uncertain renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3063-3072.
- [9] 丁涛,柏瑞,孙宏斌,等. 基于鲁棒均值-方差优化的发电自调度算法及鲁棒代价分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(2):319-326.
DING Tao, BO Rui, SUN Hongbin, et al. Robust mean-variance optimization for self-scheduling of thermal producer and its price of robustness[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 319-326.
- [10] 陈建华,李润鑫,郭子明,等. 考虑风电场集电线故障的鲁棒区间风电调度方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):2936-2942.
CHEN Jianhua, LI Runxin, GUO Ziming, et al. A robust interval wind power dispatch method considering wind collecting power lines outage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 2936-2942.
- [11] 臧海祥,余爽,卫志农,等. 计及安全约束的虚拟电厂两层优化调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):96-102.
ZANG Haixiang, YU Shuang, WEI Zhinong, et al. Safety-constrained two-layer optimal dispatch of virtual power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 96-102.

- [12] VALENCIA F,SÁEZ D, COLLADO J, et al. Robust energy management system based on interval fuzzy models[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 140-157.
- [13] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微电网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [14] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.
HUANG Wei, HUANG Ting, ZHOU Huan, et al. Dynamic economical dispatch for microgrid based on improved differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 211-217.

- [15] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.

作者简介:



吕智林

吕智林(1971—),女,广西南宁人,教授,博士,研究方向为微电网的优化与控制、复杂系统控制与优化(E-mail:luzhilin2001@163.com);

汤泽琦(1990—),男,河南新乡人,硕士研究生,研究方向为复杂系统控制与优化(E-mail:tangzqxx@163.com)。

Microgrid robust dispatch with uncertainty budget adjustment strategy based on grey entropy relation optimization

LÜ Zhilin, TANG Zeqi

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

Abstract: With the minimal operation cost, environmental cost and renewable energy fluctuations as objective, a dispatch model of microgrid is established, which takes the grey entropy relation degree as its evaluation criterion of optimal solutions. Aiming at the uncertainties of wind and photovoltaic power, uncertainty sets with predicted values as the center are constructed and the dispatch model is improved by robust optimum theory. Aiming at the problem that energy storage system easily reaches its limits in dispatch process, a strategy is proposed to estimate the uncertainty budget based on the operation state of energy storage. Examples are solved by the improved differential evolution algorithm, which adopts cloud model to increase its local search capability and chaos algorithm to improve its global search ability. The simulative results verify the feasibility of the proposed model and algorithm. The superiority of robust dispatch model is analyzed from aspects of the change of Pareto frontier and the characteristic values of optimal solution sets. The influences of uncertainty budget values in different scenarios on the dispatch of microgrid are discussed to verify that the uncertainty budget regulation strategy can effectively prevent the energy storage system from reaching its upper and lower limits, which further improves the robustness of the microgrid dispatch.

Key words: hybrid microgrid; grey entropy relation; robust dispatch; differential evolution algorithm; cloud model; chaos algorithm

(上接第37页 continued from page 37)

Three-phase decoupled power-flow algorithm based on sequence components of islanded hybrid AC/DC microgrid

CHEN Hesheng¹, WEI Zhinong¹, SHEN Haiping², SUN Guoqiang¹, ZANG Haixiang¹, SUN Yonghui¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214061, China)

Abstract: For analyzing the power flow of hybrid AC/DC microgrid, the steady-state power-flow models of Droop-type DG (Distributed Generation) and grid-connected AC/DC inverter are established and the phase-sequence component conversions based on the voltage symmetry of grid-connecting point are carried out for the three-phase and single-phase grid-connection models. The sequence current compensation method is applied to decouple the AC network into three sequence networks to greatly reduce the solving scale, and the relations of coupling between AC frequency and DC voltage are constructed for both sides of AC/DC inverter to effectively maintain the power balance between two sub-networks. A three-phase decoupled power-flow algorithm suitable for different integration modes of DC network is proposed based on the sequence components of islanded hybrid AC/DC microgrid. The proposed algorithm is applied to different modified IEEE standard distribution systems, verifying its effectiveness, applicability and efficiency.

Key words: sequence component; islanded microgrid; distributed power generation; three-phase decoupling; hybrid AC/DC interlinking; power flow