

DOI: 10.7667/PSPC180387

基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法

马天祥¹, 程肖², 贾伯岩¹, 刘振¹, 段昕¹, 贾静然¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 河北省送变电有限公司, 河北 石家庄 050051)

摘要: 针对含分布式风力和光伏发电并网的主动配电网故障恢复问题, 采用不确定二层规划理论建立计及新能源出力不确定性的主动配电网故障恢复模型。所建立的模型以开关状态改变为上层控制变量, 以置信度形式的故障恢复综合满意度指标为上层决策者的目标。以故障恢复后的配电网能量调度方案为下层决策变量, 以置信度形式的主动配电网综合运行成本为下层决策者的目标。基于博弈论方法并采取混沌粒子群算法分别设计上层优化和下层优化的求解过程, 得到配电网故障恢复方案。最后通过一个算例验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 主动配电网; 不确定二层规划; 故障恢复; 博弈论; 混沌粒子群

Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model

MA Tianxiang¹, CHENG Xiao², JIA Boyan¹, LIU Zhen¹, DUAN Xin¹, JIA Jingran¹

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Hebei Electricity Transmission & Transformation Facilities Company, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Aiming at the active distribution network service restoration with distributed wind power and PV generation connected, the uncertain bi-level programming theory is applied to establish the active distribution network service restoration model considering the uncertainty of new energy power generation. The established model takes switch state change as the upper control variable, while comprehensive satisfaction degree in the form of confidence is considered as the objective function of upper-level model. The energy scheduling scheme of distribution network after service restoration is taken as the lower decision variables. The comprehensive cost in the form of confidence is used as the objective function of the lower-level model. Based on game theory and chaos particle swarm optimization algorithm, the upper-level optimization and lower-level solving procedure are designed respectively, and then the distribution network service restoration scheme can be obtained. Finally, a numerical example is given to illustrate the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. kj2018-063) and Science and Technology Program of State Grid Hebei Electric Power Company (No. kj2017-20).

Key words: active distribution network; uncertain bi-level programming; service restoration; game theory; chaotic particle swarm

0 引言

随着人类不断面对更加严峻的环境问题, 分布式发电(Distributed Generation, DG)受到人们越来越高的重视^[1-3]。作为对分布式能源并网与管理的有效

平台, 主动配电网(Active Distribution Network, ADN)技术得到了长足的发展^[4]。主动配电网技术能够将众多分布式发电进行集成管理, 对于提升分布式能源就地消纳水平有着重要意义^[5]。

配电网故障恢复指配电网故障发生后, 通过确定最优的开关组合方案, 实现恢复失电负荷最多、开关操作次数最少、网损最小等目标, 同时满足恢复后配电网连通性、辐射状、馈线不过载等条件^[6-8]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(kj2018-063); 河北省电力有限公司科技项目资助(kj2017-20)

目前已有较多文献对配电网故障恢复问题进行了研究。例如文献[9]建立了基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复模型。文献[10]则是考虑了含光伏发电并网的配电网故障恢复模型, 并且计及了光伏出力的不确定性, 所建立的模型能够较好地应对这种情况。另外还有文献如文献[11]提出了配电网故障恢复的区间数灰色关联决策方法。更多的文献则是从寻求更加高效的求解算法入手, 例如传统的配电网故障恢复求解方法^[12]主要有启发式搜索方法和遗传算法^[13-14]、禁忌搜索算法^[15]、蚁群算法^[16]、多代理理论^[17]等智能优化方法。

然而目前很少有文献研究主动配电网故障恢复问题。配电网故障恢复问题作为一个多目标、高维度的优化问题, 随着问题规模的扩大将面临维数灾难的问题。在主动配电网故障恢复问题中, 系统的网损功率计算还需要以制定系统运行计划为前提, 使得问题的复杂性进一步上升。这需要寻求一种建模理论将整体模型进行分模块处理, 以便降低模型复杂度。另外, 主动配电网中并网的分布式光伏和风力发电的出力都含有不确定性, 这使得主动配电网故障恢复问题在建模时不得不考虑模型不确定性。

以上问题正适合采用不确定二层规划理论进行建模^[18-19]。不确定二层规划是在传统的二层规划模型的基础上引入随机机会约束形式得到的建模方法。故障恢复效果的一个重要指标即是网损功率, 而该功率需要系统在制定能量优化调度方案之后才能计算得到。另外, 系统的能量优化调度计划作为计算网损功率的不可或缺步骤, 其求解要以给定故障恢复策略为基础。整个模型决策过程存在一个上层决策者和一个下层决策者。通过二层规划理论将问题进行分模块处理, 能够降低求解复杂性和模型的复杂度。

本文采用不确定二层规划理论针对主动配电网故障恢复问题进行建模和求解。依据问题的分步求解性质, 模型将所有控制变量分为上层决策者和下层决策者。上层决策者即故障恢复策略制定中心, 下层决策者即主动配电网能量优化调度中心。上层作为领导者, 其决策直接影响下层决策, 下层作为从属者, 其决定受到上层的影响, 同时需要将上层决策者需要的信息反馈给领导者。所建立的模型也计及了风电和光伏出力的不确定性。最后通过一个算例验证了本文方法的正确性和有效性。

1 主动配电网不确定性分析

一个地区的风速分布普遍采用双参数形式的

Weibull 分布, 其概率密度函数如式(1)所示。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中, k 和 c 均为常数。考虑到风速在大部分时间内处于 v_{ci} 和 v_r 之间, 则可以得出 P_{WT} 的概率密度函数如式(2)所示。

$$f(P_{WT}) = \frac{k}{bc} \left(\frac{P_{wind} - a}{bc}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{P_{wind} - a}{bc}\right)^k\right] \quad (2)$$

光伏发电系统的输出功率 P_{pv} 与光照强度 I 、电池阵列面积 S 和光电转换效率 η 相关, 可表示为 $P_{pv} = IS\eta$ 。 I 在一定时间段内可近似服从 β 分布, 则 P_{pv} 的概率密度函数如式(3)所示^[20]。

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{P_{pv,max} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{pv}}{P_{pv,max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{pv,max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式中: $P_{pv,max}$ 为光伏发电系统最大输出功率; α 和 β 为光照强度 I 分布的形状参数。

2 上层模型

2.1 目标函数

上层决策者的目标函数为故障恢复综合满意度指标, 该指标受到多方面因素的影响, 包括恢复后的供电负荷大小、开关操作次数和网损功率。该多目标函数的子目标一为最大化恢复后的供电负荷, 如式(4)所示。

$$\max f_1 = \sum_{j=1}^N u_j c_j P_j \quad (4)$$

式中: N 为配电网的负荷节点数; u_j 表示恢复后的配电网是否对第 j 个负荷节点进行供电, $u_j = 1$ 时表示进行供电, $u_j = 0$ 时表示不进行供电; c_j 表示第 j 个负荷节点的重要程度权重; P_j 表示第 j 个负荷节点的负荷水平。

子目标二为最小化开关操作次数, 如式(5)所示。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^M |k_i - g_i| \quad (5)$$

式中: M 为配电网中开关数量; k_i 和 g_i 分别表示第 i 个开关在故障恢复前和故障恢复后的状态, 当 $k_i = 1$ 、 $g_i = 1$ 时表示开关闭合, 当 $k_i = 0$ 、 $g_i = 0$ 时表示开关断开。在模型中, 发生故障的线路开关状态必须为 0。

子目标三为最小化恢复后的配电网网损功率, 如式(6)所示。

$$\min f_3 = P_{loss} = \sum_{i \in S} [(P_{L,i})^2 + (Q_{L,i})^2] R_{L,i} / U_N^2 \quad (6)$$

式中: S 表示配电网所有的馈线集合; $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为第 i 条馈线在故障恢复后传输的有功和无功功率; $R_{L,i}$ 为第 i 条馈线的电阻; U_N 为配电网额定电压。

由于上层决策者的目标函数为多目标形式, 需要进行处理才能进行下一步的计算。本文采用配电网故障恢复综合满意度作为衡量上层决策者决策效果的综合指标。同时采用机会约束形式建立该指标, 如式(7)所示。

$$\max \bar{f}_{\text{up}} \quad (7)$$

式中, \bar{f}_{up} 为上层决策者的目标函数。该函数为上层决策者在制定故障恢复方案后故障恢复综合满意度指标在置信度 α_{up} 下的乐观值。

假如配电网故障恢复方案将系统划分出若干个片区, 每个片区可能是一个子配电网或者是一个孤岛, 则系统在每个片区内均需要满足功率平衡约束。

2.2 约束条件

(1) 上层目标函数的概率形式约束。在不确定二层规划模型中, 上层目标采用函数概率约束, 如式(8)所示。

$$\Pr\{f_{\text{up}} \geq \bar{f}_{\text{up}}\} \geq \alpha_{\text{up}} \quad (8)$$

$$f_{\text{up}} = \lambda_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \sum_{i=2}^3 \lambda_i \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (9)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 表示某一事件成立的概率; f_{up} 表示上层决策者的配电网故障恢复综合满意度; λ_i 为上层决策者对第 i 个子目标的权重; f_i^{\max} 和 f_i^{\min} 分别表示第 i 个子目标在上层决策者以该子目标为单目标函数进行优化时所能取得的最大值和最小值; α_{up} 为上层目标的置信度。上层目标之所以是不确定的, 是因为其子目标网损功率由下层决策决定, 而下层决策受到含不确定性的风电光伏出力的影响。

(2) 配电网故障恢复后辐射状约束。上层决策者的约束条件包括恢复后配电网的网架结构必须是辐射状, 即配电网的拓扑结构不能存在环路。该约束如式(10)所示。

$$\mathbf{g} \in \mathbf{G} \quad (10)$$

式中: 向量 \mathbf{g} 表示某个配电网结构的拓扑结构, \mathbf{g} 由系统中每个开关状态变量组成; \mathbf{G} 表示所有满足辐射状拓扑结构的配电网集合。

(3) 节点电压约束如式(11)所示。

$$\Pr\{U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}\} \geq \beta_{\text{up}} \quad (11)$$

式中: U_i 为第 i 个节点的电压幅值; $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 分

别表示第 i 个节点的电压幅值下限和上限; β_{up} 为节点电压约束成立的置信度。其中, 每个节点的电压通过式(12)、式(13)所示的功率平衡约束计算得到。

$$P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (13)$$

式中: n 表示配电网节点数; P_i 和 Q_i 分别表示第 i 个节点流入的有功和无功功率, 该功率由上层决策者和下层决策者的计划共同决定; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别表示连接第 i 个节点和第 j 个节点线路的电导、电纳以及电压相角差; U_i 和 U_j 分别表示第 i 个节点和第 j 个节点的电压幅值。

(4) 支路容量约束如式(14)所示。

$$\Pr\{P_l \leq P_{l,\max}\} \geq \beta_{\text{up}} \quad (14)$$

式中: P_l 表示第 l 条支路的有功功率; $P_{l,\max}$ 表示第 l 条支路的传输上限。

3 下层模型

主动配电网作为一种分布式新能源发电并网与管理的重要手段, 是智能配电网的重要形态, 并网的分布式新能源发电通常包括风机(Wind Turbine, WT)和分布式光伏发电(Photovoltaic Cell, PV)。为了平抑分布式新能源发电的随机性、间歇性和波动性, 主动配电网通常也接入一定容量的可控微电源作为系统平稳运行的调节手段, 包括微型燃气轮机(Micro-Turbine, MT)、燃料电池(Fuel Cell, FC)以及储能(Storage Battery, SB)装置。

然而, 下层决策者即主动配电网能量优化调度中心制定的计划并不适用于故障恢复后的系统, 当系统发生故障并进行故障恢复之后, 系统的结构和特性都将发生变化。主动配电网能量优化调度中心需要制定新的计划, 而该计划只能在上层决策者给出故障恢复方案之后才能制定, 下层决策者的计划制定受到上层决策者的直接影响, 同时其决策也影响上层决策者的策略。

3.1 目标函数

下层决策者的目标函数是主动配电网运行的综合成本最小, 下层决策者的决策变量包括主动配电网中各个可控微源设备、储能装置、与上级配电网功率交换以及负荷需求侧管理资源的运行与调用方案。

下层决策者的目标函数如式(15)所示。

$$\min \bar{f}_{\text{down}} \quad (15)$$

式中, \bar{f}_{down} 为下层决策者的目标函数。该函数为下层决策者在制定能量优化调度方案后综合运行成本在置信度 α_{down} 下的乐观值。

3.2 约束条件

(1) 下层目标函数的概率形式约束。下层决策者的目标函数的机会形式约束如式(16)所示。

$$\Pr\{f_{\text{down}} \leq \bar{f}_{\text{down}}\} \geq \alpha_{\text{down}} \quad (16)$$

$$f_{\text{down}} = \Delta t \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^M f_{\text{OM}-i}(P_i(t)) + P_{\text{ex}}(t) q_{\text{grid}}(t) + \sum_{\theta=1}^N \lambda_{\text{MT}}^{\theta} c^{\theta} P_{\text{MT}}(t) + \sum_{\theta=1}^N \lambda_{\text{FC}}^{\theta} c^{\theta} P_{\text{FC}}(t) \right] \quad (17)$$

式中: f_{down} 为下层决策者的目标函数; T 为故障预期消除时段数; Δt 为每个时段长; $f_{\text{MT}}()$ 表示 MT 的燃料费用函数; $P_{\text{MT}}(t)$ 表示 t 时段 MT 的发电功率; $f_{\text{FC}}()$ 表示 FC 的燃料费用函数, $P_{\text{FC}}(t)$ 表示 t 时段 FC 的发电功率; $f_{\text{OM}-i}$ 为第 i 台装置的运维费用函数, 包括可控微源、不可控微源还有储能, M 为装置数量; $P_i(t)$ 表示第 i 台需要运维的装置在 t 时段的运行功率; $P_{\text{ex}}(t)$ 为 t 时段系统与外网的能量交换功率; $q_{\text{grid}}(t)$ 表示 t 时段外网的分时电价水平; θ 表示污染物种类数; $\lambda_{\text{MT}}^{\theta}$ 表示 MT 第 θ 种污染物的排放系数; c^{θ} 为第 θ 种污染物的治理费用系数; $\lambda_{\text{FC}}^{\theta}$ 为 FC 第 θ 种污染物的排放系数。

(2) 可控微电源出力上下限约束。该约束如式(18)、式(19)所示。

$$P_{\text{MT}}(t) \leq P_{\text{MT}}^{\max} \quad (18)$$

$$P_{\text{FC}}(t) \leq P_{\text{FC}}^{\max} \quad (19)$$

式中, P_{MT}^{\max} 和 P_{FC}^{\max} 分别表示微燃机和燃气轮机的出力上限功率。

(3) 系统功率平衡约束。在系统包含随机性的情况下, 绝对的功率平衡约束不可能成立, 因此采用不平衡功率偏差在允许偏差范围内的置信度满足要求来构建功率平衡约束, 该约束如式(20)所示。

$$\Pr \left\{ \begin{array}{l} -\delta \leq P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{FC}}(t) + \\ P_{\text{SB}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{CUT}}(t) - P_{\text{L}}(t) \leq \delta \end{array} \right\} \geq \beta_{\text{down}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{L}}(t)$ 为主动配电网在 t 时段的负荷水平; $P_{\text{CUT}}(t)$ 为 t 时段负荷中断功率; β_{down} 为功率偏差在允许范围内的置信度; δ 为功率偏差限制。

(4) 储能剩余电量和充放电功率关系约束。该约束如式(21)所示。

$$E_{\text{ESS}}(t) = E_{\text{ESS}}(t-1) + \mu_{\text{ch}} P_{\text{ESS}}(t) \eta_{\text{ch}} \Delta t - \mu_{\text{dis}} \frac{P_{\text{ESS}}(t)}{\eta_{\text{dis}}} \Delta t \quad (21)$$

式中: $E_{\text{ESS}}(t)$ 表示 t 时段末储能的电量剩余水平; Δt 为调度时段长; μ_{ch} 和 μ_{dis} 共同表征储能运行状态, 充电时 μ_{ch} 为 1 且 μ_{dis} 为 0, 否则 μ_{ch} 为 0 且 μ_{dis} 为 1; $P_{\text{ESS}}(t)$ 分别表示储能在 t 时段的充放电功率, 将储能看作电源, 则当 $P_{\text{ESS}}(t)$ 大于零时为放电; η_{ch} 为储能的充电效率; η_{dis} 为储能的放电效率。

(5) 储能充放电功率限制约束和储能电量上下限约束。该约束如式(22)所示。

$$E_{\text{ESS}}^{\min} \leq E_{\text{ESS}}(t) \leq E_{\text{ESS}}^{\max} \quad (22)$$

式中, E_{SB}^{\min} 和 E_{SB}^{\max} 表示储能剩余电量下限和上限, 储能剩余电量上下限分别取为额定容量的 0.9 倍和 0.1 倍。

4 不确定二层规划综合模型

一个典型的不确定二层规划模型在数学形式上如式(23)所示, 根据不同的实际条件, 模型能够计及多种不同形式的目标函数和约束条件。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x \bar{F} \\ \text{s.t. } \Pr\{F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_N^*, \xi)\} \leq \bar{F} \geq \alpha_0 \\ \Pr\{G(x, \xi) \leq 0\} \geq \beta_0 \\ \text{其中,} \\ y_j^* (j=1, 2, \dots, N) \text{ 是以下规划的解} \\ \left\{ \begin{array}{l} \min_{y_j} \bar{f}_j \\ \text{s.t. } \Pr\{f_j(x, y_1, y_2, \dots, y_N, \xi)\} \leq \bar{f}_j \geq \alpha_j \\ \Pr\{g_j(x, y_1, y_2, \dots, y_N, \xi) \leq 0\} \geq \beta_j \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (23)$$

式中: α_0 为上层目标函数的置信水平; α_j 为下层第 j 个从属者目标函数的置信水平; β_0 为上层约束条件的置信水平; β_j 为下层第 j 个从属者约束条件的置信水平; ξ 为模型中的不确定变量; \bar{F} 为 $F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_N^*, \xi)$ 在概率水平至少为 α_0 时所取的最大值(即 α_0 乐观值); \bar{f}_j 为 $f_j(x, y_1, y_2, \dots, y_N, \xi)$ 在概率水平至少为 α_j 时所取的最大值(即 α_j 乐观值)。

本文建立的二层规划综合模型如式(24)所示。

模型中, 上层目标函数由 \mathbf{g} 、 \mathbf{P}_{MT} 、 \mathbf{P}_{FC} 、 \mathbf{P}_{SB} 以及 \mathbf{P}_{grid} 共同决定, 然而上层决策者的控制变量只有 \mathbf{g} , 其余控制变量由下层规划模型来决定。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \bar{f}_{up}(\mathbf{g}, \mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid}) \\ \text{s.t. } \Pr\{f_{up} \geq \bar{f}_{up}\} \geq \alpha_{up} \\ \quad \text{式(10)、式(11)、式(14)} \\ \text{其中,} \\ \mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid} \text{ 由以下规划的解决定} \\ \min \bar{f}_{down}(\mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid}) \\ \text{s.t. } \Pr\{f_{down} \leq \bar{f}_{down}\} \geq \alpha_{down} \\ \quad \text{式(18)一式(22)} \end{array} \right. \quad (24)$$

主动配电网故障恢复问题是一个典型的二层规划优化问题。一方面, 故障恢复综合满意度指标包括系统网损功率, 而该网损功率无法直接得到, 需要在系统制定自身在故障恢复之后的运行计划才能得到; 另一方面, 系统制定其故障恢复后的能量优化调度计划又需要以给定的故障恢复方案为基础。上层决策者的决策能够直接决定下层决策者的决策, 另一方面下层决策者的决策又影响上层决策者的决策。上层决策者在制定自身决策时, 需要考虑到下层决策者对自身决策的反应。

基于二层规划模型的主动配电网故障恢复方法综合模型如图 1 所示。整个模型的信息流和能量流如图中线段所示。

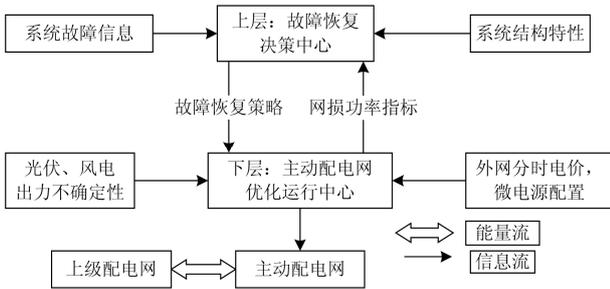


图 1 主动配电网故障恢复方法模型结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of active power distribution network fault restoration method model

图中, 上层决策者即故障恢复中心, 负责依据系统故障信息和系统结构特性制定故障恢复策略开关操作方案。上层决策者制定的故障恢复策略提供给下层决策者, 下层决策者即主动配电网能量优化调度中心据此制定能量优化调度计划, 并将该计划下的同样随机形式的系统网损功率反馈给上层决策者, 供上层决策者计算故障恢复综合满意度指标。下层决策者需要考虑的因素有风电、光伏出力、外

网分时电价水平以及系统中的微电网配置情况。

在博弈论中, 通常把能达成的某种稳定状态叫做纳什均衡, 本文对博弈论的应用主要是通过纳什均衡将二层规划模型转化为传统的优化模型, 进而更容易设计求解流程。二层规划模型中上层决策者和下层决策者的决策相互影响, 相互耦合, 这使得其求解流程的设计较一般优化模型很不一样。然而和一般的博弈模型不一样的是, 本文上层决策者和下层决策者并非同时做出决策, 而是上层决策者先做出, 然后下层决策者跟进, 这样的博弈形式也叫作主从博弈(Stackelberg 博弈), 这样的纳什均衡也叫作 Stackelberg-Nash 均衡。

事实上可以采用 Stackelberg-Nash 均衡的概念来描述本文不确定二层规划的解。假设模型(24)的 Stackelberg-Nash 均衡为 $(\mathbf{g}^*, \mathbf{P}_{MT}^*, \mathbf{P}_{FC}^*, \mathbf{P}_{SB}^*, \mathbf{P}_{grid}^*)$, 那么当且仅当对于 $\forall \mathbf{g}$, 有:

$$\bar{f}_{up}(\mathbf{g}^*, \mathbf{P}_{MT}^*, \mathbf{P}_{FC}^*, \mathbf{P}_{SB}^*, \mathbf{P}_{grid}^*) \geq \bar{f}_{up}(\mathbf{g}, \mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid}) \quad (25)$$

其中, $(\mathbf{P}_{MT}^*, \mathbf{P}_{FC}^*, \mathbf{P}_{SB}^*, \mathbf{P}_{grid}^*)$ 和 $(\mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid})$ 分别是规划(26)和(27)的解, 模型(26)中主动配电网的拓扑结构为 \mathbf{g}^* , 模型(27)中主动配电网的拓扑结构为 \mathbf{g} 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{f}_{down}(\mathbf{P}_{MT}^*, \mathbf{P}_{FC}^*, \mathbf{P}_{SB}^*, \mathbf{P}_{grid}^*) \\ \text{s.t. } \Pr\{f_{down} \leq \bar{f}_{down}\} \geq \alpha_{down} \\ \quad \text{式(18)一式(22)} \end{array} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \bar{f}_{down}(\mathbf{P}_{MT}, \mathbf{P}_{FC}, \mathbf{P}_{SB}, \mathbf{P}_{grid}) \\ \text{s.t. } \Pr\{f_{down} \leq \bar{f}_{down}\} \geq \alpha_{down} \\ \quad \text{式(18)一式(22)} \end{array} \right. \quad (27)$$

在这个均衡中, 上层决策者通过自己的决策间接决定下层决策者的决策, 对于上层决策者来说, 下层决策模型只是自身可以考虑和调用的模型, 对于下层决策者来说, 上层决策者的策略是自身决策的给定条件。在 Stackelberg-Nash 均衡中, 上层决策者和下层决策者都无法通过改变自身决策来获得更好的目标, 所以说达到了均衡。

5 模型求解流程

5.1 上层决策者求解流程

采用博弈论的思想, 将上层决策者和下层决策者看作两个博弈主体, 设计求解流程。本文上层决策者采用混沌粒子群算法^[21]进行求解, 求解流程如下。

(1) 输入主动配电网的故障预期消除时间范围、系统网架结构、故障点位置。

(2) 初始化上层优化中混沌粒子群算法的种群(即故障恢复策略), 制定上层优化中混沌粒子群算法各参数。

(3) 检测初始种群是否满足主动配电网辐射状结构, 剔除不满足条件的个体。

(4) 调用下层决策者优化模型, 得到下层决策模型反馈回的系统运行方案、随机分布形式的网损功率指标。

(5) 通过下层决策者反馈给上层决策者的系统运行方案, 并通过随机潮流计算得到各个节点的电压分布和支路传输功率分布, 进一步通过随机模拟计算节点电压约束和支路容量约束成立的概率。

(6) 计算上层决策者的目标函数, 结合(5)计算得到的结果, 将约束条件成立的情况通过罚函数的形式计入目标函数, 形成每个个体的适应度函数值。

(7) 选取当代适应度最大的个体, 更新全局最优解, 对其余个体的位置和速度进行更新, 并对每个位置改变后的粒子引入混沌算法在局部区域进行混沌搜索。

(8) 判断全局最优解是否收敛, 如果收敛则输出最优粒子对应的故障恢复方案, 算法结束, 否则返回(3)。

5.2 下层决策者求解流程

对于上层决策者来说, 下层优化模型是其可以调用的函数。而对于下层决策者, 其优化以上层决策者给出的故障恢复方案为基础。下层优化求解流程如下。

(1) 随机初始化由 P_{MT} 、 P_{FC} 、 P_{SB} 和 P_{grid} 组成的粒子位置, 输入故障预期消除时间范围内风电和光伏的出力的随机分布。制定下层优化中混沌粒子群算法各参数。

(2) 计算所有粒子对应的概率分布形式的主动配电网综合运行成本作为目标函数, 结合约束条件满足情况将其以罚函数形式计入计算每个粒子的适应度函数值。

(3) 选取当代适应度函数值最高的粒子, 更新全局最优值。

(4) 令每一个粒子根据全局最优粒子和历史最优粒子改变位置来寻优。并对每个位置改变后的粒子引入混沌算法在局部区域进行混沌搜索。

(5) 根据混沌粒子群算法收敛条件判断优化内模块是否收敛, 如果收敛, 得出全局最优解及其对应的主动配电网能量优化调度方案, 将其和计算得到的网损功率指标返回给上层优化模型。如果没有收敛, 返回(2)。

6 仿真算例

6.1 算例设置

本文以 IEEE33 节点系统为基础构建主动配电网模型, 在部分节点上接入微燃机、燃料电池、储能设备以及风电和光伏发电, 具体的主动配电网结构如图 2 所示。

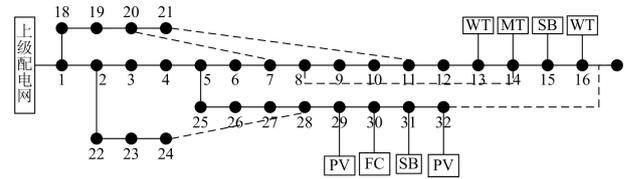


图 2 IEEE 33 节点系统为基础的主动配电网结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the active distribution network based on IEEE 33 distribution system

其中, 主动配电网中各类分布式发电的并网接入情况如表 1 所示。

表 1 主动配电网分布式发电并网接入情况

Table 1 Grid connected access situation of distributed generation in active distribution network

分布式发电种类	并网节点	单个节点并网容量/kW
光伏发电	29, 32	300
风力发电	13, 16	200
微燃机	14	150
燃料电池	30	180
储能设备	15, 31	120

主动配电网中的所有节点均为负荷节点, 系统总有功负荷为 3 715 kW, 无功负荷为 2 300 kvar。根据负荷节点的重要程度将负荷分为 3 个等级, 主动配电网中的负荷分类情况具体如表 2 所示。

表 2 主动配电网节点负荷重要程度分类

Table 2 Importance classification of node load in active distribution network

负荷重要程度	负荷节点集合	权重系数
一级负荷	1, 2, 5, 7, 8, 11, 22, 28	1
二级负荷	3, 4, 6, 9, 10, 12, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27	0.5
三级负荷	13, 14, 15, 16, 17, 29, 30, 31, 32	0.1

算例中分别设置两种情况的故障: 方式一为支路 7-8 发生永久性故障; 方式二为靠近公共耦合点的支路 1-2 发生永久性故障。故障发生时间均为早上 10:00 整, 故障消除时间为 6 h, 下层模型中主动配电网调度时长选取为 15 min。系统中包含 5 条如图 2 所示虚线状态的联络支路: 20-7、21-11、8-14、

24-28、32-17, 这些联络支路在主动配电网正常运行时均为断开状态, 当发生故障时由优化模型考虑其状态改变。

6.2 仿真结果

运行本文建立的基于不确定二层规划的配电网故障恢复模型, 将模型中 α_{up} 、 α_{down} 、 β_{up} 以及 β_{down} 均选取为 0.95, 得到两种故障方式下的主动配电网故障恢复方案分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 方式一下主动配电网故障恢复方案
Table 3 Fault restoration scheme of the active distribution network in mode 1

恢复方案内容	恢复方案
断开支路	8-9; 9-10; 11-12; 16-17
合上支路	21-11; 32-17
失电负荷节点	9
孤岛情况	孤岛一: 12, 13, 14, 15, 16

表 4 方式二下主动配电网故障恢复方案
Table 4 Fault restoration scheme of the active distribution network in mode 2

恢复方案内容	恢复方案
断开支路	3-4; 10-11; 11-12; 23-24; 26-27; 5-25
合上支路	21-11; 32-17; 8-14; 24-28
失电负荷节点	2, 3, 9, 22, 23, 25, 26
孤岛情况	孤岛一: 12, 13, 14, 15, 16; 孤岛二: 17, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32

从表 3 和表 4 中可以看出, 当主动配电网中不同支路发生故障时, 其故障恢复方案大不相同。事实上, 方式二相比于方式一, 其故障的主要特征是靠近与上级配电网相连接的公共耦合点, 而这意味着方式二的故障比方式一更加严重。这导致方式二的主动配电网故障恢复方案比方式一下的更加复杂。两种方式下主动配电网故障恢复指标对比如表 5 所示。

表 5 两种方式下故障恢复指标对比
Table 5 Index comparison of fault restoration scheme in two modes

故障恢复指标	方式一	方式二
失电负荷容量	230 kW	855 kW
开关操作次数	6 次	10 次
系统网损功率	143.67 kW	105.87 kW
故障恢复综合满意度	0.755 7	0.711 7

从表 5 可以看出, 方式二相比于方式一, 故障恢复后的失电负荷容量要远远大于方式一下的, 开

关操作次数也要大于方式一下的。然而由于方式二形成了更多的孤岛, 也不得不造成更多的失电负荷, 因此方式二下的系统网损功率要小于方式一下的。事实上, 方式一中故障恢复综合满意度达到了 0.755 7, 方式二中故障恢复综合满意度只达到了 0.711 7, 要小于方式一下的。

在下层模型中, 主动配电网需要通过进行故障恢复后的系统能量优化调度方案的制定, 来为上层决策中心提供系统的综合网损指标。两种方式下的主动配电网故障恢复后能量优化调度指标对比如表 6 所示。

表 6 两种故障方式下故障恢复后配电网运行指标对比
Table 6 Comparison of operation index of distribution network after the fault restoration in two modes

故障方式	综合运行成本/元	网损功率/kW
方式一	11 052	143.67
方式二	8 802	105.87

事实上, 在不同的置信度水平组合时, 系统的故障恢复方案会存在细微的差别, 而且上层模型的置信度水平和下层模型的置信度水平的设定也会对各自的决策产生影响。例如在故障方式二下, 在算例初始设定的置信度 α_{up} 、 α_{down} 、 β_{up} 以及 β_{down} 均选取为 0.95 的情况下, 故障恢复方案中形成的孤岛二为: 17, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 联络线 17-32 合上; 当 α_{up} 、 α_{down} 为 0.97 时, 故障恢复方案中形成的孤岛二为 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 联络线 17-32 断开, 同时使得节点 17 成为失负荷节点, 否则由于分布式发电出力的不确定性, 孤岛二由于仍然具有负荷节点 17 会导致上层模型约束条件成立的概率大大下降, 同时节点 17 不失电也意味着故障恢复满意度指标要在原来概率分布的基础上满足更高的置信度而显得不可能。这意味着上层决策者的目标故障恢复综合满意度的乐观值下降, 也就是说, 上层决策者的置信度水平是通过影响其决策来影响目标函数的乐观值的。

事实上, 以上主动配电网故障恢复指标会随着模型中 α_{up} 、 α_{down} 、 β_{up} 以及 β_{down} 的变化而变化, 为了考察不确定二层规划模型中置信度的变化对故障恢复指标的影响, 选取不同的置信度组合, 分别再次运行模型, 针对方式一和方式二, 分别得到如图 3—图 6 分别所示的上、下层故障恢复满意度指标与置信度的关系以及上、下层综合运行成本与置信度的关系。

从图 6 中可以看出, 无论是上层决策者还是下层决策者, 其目标函数的优化结果均受到各自决策层中目标函数置信度和约束条件置信度的影响。在上层模型中, 随着 α_{up} 、 α_{down} 的增大, 故障恢复综合满意度不断下降。这是因为, 随着 α_{up} 、 α_{down} 的增大, 为了获得置信度更高的故障恢复综合满意度,

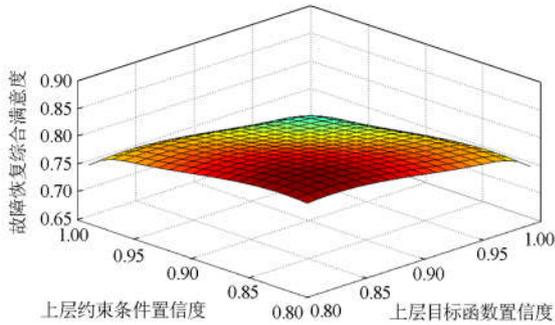


图 3 方式一上层故障恢复满意度指标与置信度的关系
Fig. 3 Relationship between satisfaction index of fault restoration and the confidence level on upper level in mode 1

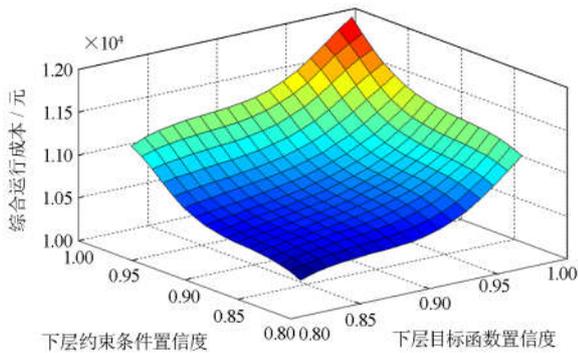


图 4 方式一下层综合运行成本与置信度的关系
Fig. 4 Relationship between integrated operating cost and the confidence level on lower level in mode 1

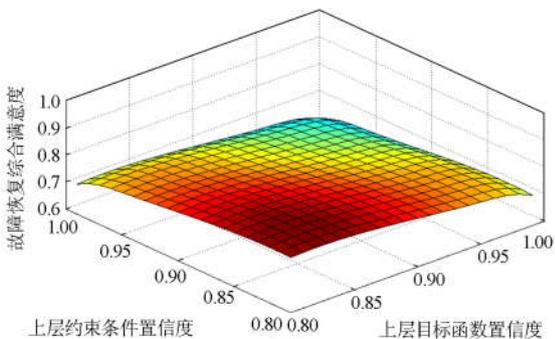


图 5 方式二上层故障恢复满意度指标与置信度的关系
Fig. 5 Relationship between satisfaction index of fault restoration and the confidence level on upper level in mode 2

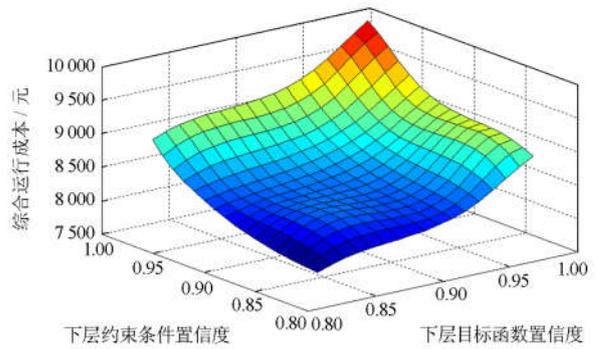


图 6 方式二下层综合运行成本与置信度的关系

Fig. 6 Relationship between integrated operating cost and the confidence level on lower level in mode 2

故障恢复决策中心就需要牺牲一定的经济性制定更加可靠的恢复方案, 以便应对系统中不确定微电源出力的随机分布。在下层模型中, 随着 β_{up} 以及 β_{down} 的增大, 主动配电网综合运行成本不断上升。这是因为随着 β_{up} 以及 β_{down} 的增大, 对概率形式的目标函数以及机会形式约束条件的成立要求就越严格, 这使得下层决策者决策的保守化从而导致主动配电网运行计划的成本上升。事实上, 这种上升并不是线性的, 随着 β_{up} 以及 β_{down} 越接近 1, 细微的上升也能导致运行成本的显著上升。随着 β_{up} 以及 β_{down} 越接近 1, 则下层模型的目标函数和机会约束条件需要满足的概率分布就越偏远。可见, 在实际运行中, 选取合适的 α_{up} 、 α_{down} 、 β_{up} 以及 β_{down} 对于协调主动配电网故障恢复模型中可靠性和满意度以及经济性至关重要。

实际上, 采用混沌粒子群算法求解时故障恢复满意度的收敛情况如图 7 所示。

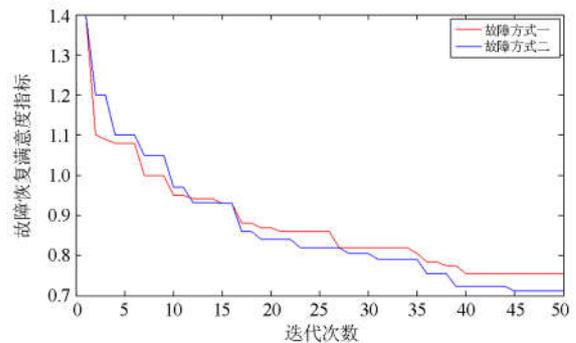


图 7 两种故障方式下算法收敛过程

Fig. 7 Algorithm convergence process under two fault modes

其中, 故障方式一下收敛的迭代次数为 40 代, 故障方式二下的收敛的迭代次数为 45 代。

7 结论

本文针对主动配电网故障恢复问题中不确定微源出力的随机性, 考虑到故障恢复方法中多层决策者的分步优化特性, 采用不确定二层规划模型进行建模。所建立的模型能够合理制定主动配电网的故障恢复方案。不同支路的故障对故障恢复方案结果的制定有着较大影响。计及模型的不确定性, 选取模型中不同的置信度分别得到故障恢复指标供决策者参考。

从理论上来说, 本文所建立的不确定二层规划模型中置信度的取值并没有最优组合, 但通过考察以上系数取值组合时上下层决策的目标函数期望状况, 能够为决策者制定系统主动配电网故障恢复策略以及能量优化调度方案提供合理的指导, 即根据自身的风险偏好和现实要求选取合适的置信度组合。

参考文献

- [1] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [2] 雒浪, 吴杰康, 杨秀菊, 等. 新能源环境下配电网无功电压协调优化[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 54-60.
LUO Lang, WU Jiekang, YANG Xiujun, et al. Coordination and optimization for reactive power voltage of power distribution network under new energy environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 54-60.
- [3] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-76.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-76.
- [4] 章雷其, 汪湘晋, 徐珂, 等. 基于柔性互联的源网荷储协同主动配电网设计研究[J]. 供用电, 2018, 35(1): 28-33.
ZHANG Leiqi, WANG Xiangjin, XU Ke, et al. Research on design of a source-grid-load-storage-collaborated active distribution network based on flexible interconnection[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 28-33.
- [5] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [6] 张海波, 张晓云, 陶文伟. 基于广度优先搜索的配电网故障恢复算法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 103-108.
ZHANG Haibo, ZHANG Xiaoyun, TAO Wenwei. A breadth-first search based service restoration algorithm for distribution network[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 103-108.
- [7] 黎恒炬, 孙海顺, 文劲宇. 含分布式电源的配电网多代理故障自恢复系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 49-56.
LI Hengxuan, SUN Haishun, WEN Jinyu. A multi-agent system for service restoration of distribution systems with distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 49-56.
- [8] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 342-348.
PANG Qingle, GAO Houlei, LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 342-348.
- [9] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.
WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [10] 陈昕玥, 唐巍, 陈禹, 等. 基于机会约束规划含光伏发电的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 99-106.
CHEN Xinyue, TANG Wei, CHEN Yu, et al. Chance constrained programming based fault recovery of distribution network containing photovoltaic generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 99-106.
- [11] 臧天磊, 钟佳辰, 何正友, 等. 基于启发式规则与熵权理论的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 251-257.
ZANG Tianlei, ZHONG Jiachen, HE Zhengyou, et al. Service restoration of distribution network based on heuristic rules and entropy weight[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 251-257.
- [12] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 61-65, 81.
WANG Shouxiang, LI Xiaojing, XIAO Chaoxia, et al. Multi-agent approach for service restoration of distribution system containing distributed generations[J]. Automation

- of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 61-65, 81.
- [13] IRVING M R, LUAN W P, DANIEL J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6): 447-457.
- [14] 巩伟峥, 房鑫炎. 基于混合编码方式的配电网故障恢复算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 105-108.
- GONG Weizheng, FANG Xinyan. Research of distribution system service restoration algorithm based on hybrid encoding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 105-108.
- [15] SHIN D J, KIM J O, KIM T K. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-Tabu algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(2): 145-152.
- [16] 张钊, 封亚琴. 一种新型的配电网供电恢复重构寻优算法[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- ZHANG Zhao, FENG Yaqin. A novel optimization reconfiguration algorithm for power supply restoration of distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 51-55, 65.
- [17] 杨丽君, 刘建超, 曹良晶, 等. 基于黑板模型的配电网故障恢复多代理协作机制设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 85-89.
- YANG Lijun, LIU Jianchao, CAO Liangjing, et al. Multi-agent coordinated mechanism design of distribution network fault restoration based on blackboard model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 85-89.
- [18] 张立地, 窦迅, 王俊, 等. 综合能源背景下的配电网规划研究[J]. 供用电, 2018, 35(4): 37-45.
- ZHANG Lidi, DOU Xun, WANG Jun, et al. Review of distribution network planning in the context of integrated energy[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(4): 37-45.
- [19] 高金伍. 不确定多层规划模型与算法[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [20] 黄伟, 陈雪, 林怀德, 等. 考虑光伏不确定性的配电网负荷特性概率评估[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 84-90.
- HUANG Wei, CHEN Xue, LIN Huaide, et al. Evaluation on load characteristic probability of power distribution network considering photovoltaic uncertainty[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 84-90.
- [21] 苏适, 周立栋, 陆海, 等. 基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 34-41.
- SU Shi, ZHOU Lidong, LU Hai, et al. Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 34-41.

收稿日期: 2018-04-05; 修回日期: 2018-07-15

作者简介:

马天祥(1986—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事配电系统运行与控制、配网设备关键技术的研究工作; E-mail: matianxiang1986@126.com

程肖(1984—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事配电网计量与仪表测试工作;

贾伯岩(1978—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事输配电系统运行分析与管理, 输配电线路关键技术研究工作。

(编辑 魏小丽)