

基于随机模糊机会约束的主动配电网 分布式风电双层规划模型

马 瑞¹, 罗心仪¹, 肖麟祥²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410000)

摘 要:针对风速兼具随机性和模糊性的多重不确定特征,提出一种主动配电网分布式风电容量配置的随机模糊机会约束双层规划模型。通过随机模糊模拟描述分布式风电出力不确定性,并考虑其时序特征建立风电出力时序性随机模糊模型,结合随机模糊模拟及潮流分析获取节点电压、支路功率及系统倒送功率等系统静态安全指标的随机模糊机会测度,采用兼顾随机性和模糊性的可信度作为评价分布式风电容量配置方案的指标;进而考虑系统功率平衡、静态安全指标机会测度约束及主动管理措施,以年利润随机模糊期望值最大为上层优化目标,通过主动管理使分布式风电有功削减随机模糊期望值最小为下层优化目标,通过判断上层方案静态安全指标是否满足随机模糊机会约束的置信水平进行上下层规划协同,从而构建一种分布式风电容量配置随机模糊机会约束双层规划新模型;最后提出结合随机模糊模拟、前推回代潮流计算和遗传算法对模型求解。IEEE 14 节点算例仿真过程及结果表明模型和算法的有效性和优越性。

关 键 词:主动配电网;分布式风电;容量配置;随机模糊机会约束规划;主动管理

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.006 中图分类号:TM73;TM614 文章编号:1673-9140(2021)03-0046-10

Distributed wind power bi-level programming model for active distribution network based on stochastic fuzzy chance constraint

MA Rui¹, LUO Xinyi¹, XIAO Linxiang²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Maintenance Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Aiming at the multiple uncertain features of wind speed with both randomness and ambiguity, a distributed wind power bi-level programming model for active distribution network (ADN) based on stochastic fuzzy chance constraint is proposed. Considering the multiple uncertainty characteristics which contains both randomness and fuzziness of wind speed, firstly, the article describes the uncertainty of distributed wind power output through random fuzzy simulation, established a random fuzzy model of wind power output by considering the time sequence, obtains the chance measure of static security index by random fuzzy simulation and power flow analysis, uses reliability which contains both randomness and fuzziness to evaluate the distributed wind power configuration scheme. The model describes the uncertainty of distributed wind power output through random fuzzy simulation, and considers its timing characteristics to establish a random fuzzy model of wind power output. Random fuzzy simulation and power flow analysis are combined to obtain system static security such as node voltage, branch power and system reverse power of random fuzzy chance measure. The credibility of both randomness and fuzziness is adopted as the index to evaluate the distributed wind power capacity allocation plan. Secondly, the system power balance, static safety index opportunity measurement constraints and active management (AM) measures are considered. The maximization of annual profit

收稿日期:2019-03-02;修回日期:2019-03-26

基金项目:国家自然科学基金(51677007)

通信作者:马 瑞(1971-),男,博士,教授,主要从事电力系统分析与控制、低碳电力和电力大数据等研究;E-mail:marui818@126.com

random fuzzy expected value is set to be the upper-level optimization goal. The minimization of random fuzzy expected value of the distributed wind power is set to be the lower-level optimization goal and realized by the active management of distributed wind power. Whether the static safety index of the upper-level scheme meets the confidence level of the random fuzzy chance constraint, the upper and lower levels are planned to collaborate to construct a new bi-level programming model for distributed wind power capacity configuration with random fuzzy chance constraint. Finally, a combination of random fuzzy simulation, forward and backward power flow calculation and genetic algorithm (GA) is proposed to solve the model. The simulation process and results of IEEE14 node example show the effectiveness and superiority of the model and algorithm.

Key words: active distribution network; distributed wind power; capacity configuration; random fuzzy chance constraint programming; active management

大量分布式电源(distributed generation, DG),如风电,作为有源电源接入配电网,会影响其潮流分布^[1-4]。受风速间歇波动性影响,风电出力客观上兼具随机性和模糊性^[5-8]。风电穿透水平对主动配电网(active distribution network, ADN)安全运行及输电网交换功率有重要的影响,对主动配电网中分布式风电容量进行科学合理地配置意义重大。

目前传统配电网中不确定性 DG 规划模型主要分为多场景技术规划^[9-10]、随机机会约束规划^[11-16]和模糊机会约束规划^[17-18]等。多场景技术规划方法,文献[9]将 DG 出力和负荷离散化并耦合成多场景构建规划模型;文献[10]在考虑风机出力和负荷的基础上加入电价构建多个场景,该方法难点在于场景合理分类组合及场景削减中的精度保障。随机机会约束规划用随机变量描述不确定因素,进而获取规划方案的概率分布特征,文献[11]考虑风电、光伏和负荷等因素随机性进行无功补偿装置规划;文献[12-13]考虑电动汽车的充放电行为及负荷的随机性,基于机会约束规划解决 DG 选址问题;文献[14-15]则考虑风电及负荷随机性,基于机会约束规划进行分布式风电选址定容规划模型,该方法难点在于基于有限数据难以获取不确定因素的精确意义的概率分布参数。基于模糊数学理论的规划方法用模糊变量描述不确定因素,文献[16]用三角模糊变量来描述不确定因素,以总费用最少、技术经济风险最小建立了 DG 多目标模糊规划模型;文献[17]用模糊数来表征负荷需求、电力价格和 DG 运行成本的不确定性,从经济、技术和环境方面对配电网中 DG 的选址定容进行规划,该方法计及不确定因素客观具有的概率分布特征。但上述模型均未计及主动管理(active management, AM)措施在改

善系统潮流等方面起积极作用。因此,考虑不确定性因素的 ADN 中 DG 单层规划和双层规划方法分别得到了研究^[12-17]。文献[18-19]建立了上层经济效益最大和下层 DG 出力削减最小的配电网网架双层规划模型;文献[20]建立了 AM 模式下风机选址定容双层规划模型;文献[21]以运营商和供电公司不同利益需求作为上下两层规划目标求解;文献[16-17]在双层规划基础上考虑了风电随机性,基于随机机会约束构建了 DG 双层规划方案。而上述模型均未考虑风电出力随机模糊特征。在主动配电网分布式风电选址定容规划中,可通过历史数据获取风速等不确定因素概率分布,而难以确定其精确参数,但可获取其隶属函数^[11],在规划中用随机模糊变量描述分布式风电出力,可兼顾其随机性和模糊性,且能获得更加丰富的不确定性信息。目前尚未见基于随机模糊机会约束双层规划的 DG 研究的报道。

该文首先在随机模糊模拟和潮流计算获取分布式风电出力及静态安全指标随机模糊机会测度基础上,考虑系统功率平衡及安全约束,构建上层以年利润随机模糊期望值最大,下层以分布式风电有功削减量随机模糊期望值最小为目标,通过判断上层随机模糊机会测度是否满足进行上下层协同,提出一种主动配电网分布式风电容量配置随机模糊机会约束双层规划新模型;然后提出结合随机模糊模拟、前推回代潮流计算和遗传算法对模型求解;最后采用 IEEE 14 节点系统验证文中模型和方法的有效性和可行性。

1 分布式风电出力及静态安全随机模糊模型

1.1 分布式风电出力时序性随机模糊模型

风速受季节、气温、大气湍流等自然规律影响具

有随机性,同时受有限风速统计数据限制,难以获取认识意义上清晰的概率分布参数具有模糊性^[5]。为综合考虑风电出力的时序性和随机模糊特性,可基于风速历史数据进行随机模糊建模实现全年 8 760 h 时序仿真,但为了缩短模型求解时间,该文选取 4 个季节中典型日,分 24 时段分别对风电出力进行随机模糊模拟。依据文献^[5],weibull 分布中的形状参数 k 用三角形模糊变量 $\xi_k = (\xi_k^1, \xi_k^2, \xi_k^3)$ 表示,尺度参数 c 用梯形模糊变量 $\xi_c = (\xi_c^1, \xi_c^2, \xi_c^3, \xi_c^4)$ 表示,隶属度函数为

$$u(k) = \begin{cases} (k - \xi_k^1)/(\xi_k^2 - \xi_k^1), & \xi_k^1 \leq k < \xi_k^2 \\ (\xi_k^3 - k)/(\xi_k^3 - \xi_k^2), & \xi_k^2 \leq k < \xi_k^3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$u(c) = \begin{cases} (c - \xi_c^1)/(\xi_c^2 - \xi_c^1), & \xi_c^1 \leq c < \xi_c^2 \\ 1, & \xi_c^2 \leq c < \xi_c^3 \\ (\xi_c^4 - c)/(\xi_c^4 - \xi_c^3), & \xi_c^3 \leq c < \xi_c^4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

风速采用随机模糊变量 ξ_v 表示,其 weibull 分布的机会测度分布函数为

$$F(\xi_v) = \text{Ch}(v < \xi_v) = 1 - \exp[-(\xi_v/\xi_c)^{\xi_k}] \quad (3)$$

基于随机模糊模拟技术^[22]和逆变换法对各季节典型日 24 时段风速进行随机模糊抽样。在各时段 k 、 c 的可能性区间内抽取 N 个满足可能性 $\text{Pos}\{\cdot\} \geq \varepsilon$ 的 k 、 c 数值,按 k 、 c 大小排序,组合成 N 组 weibull 参数。基于 N 组确定的 k 、 c 进行 M 次随机模拟,对式(3)进行逆变换,可得随机模糊的风速值,即

$$v = c[-\ln(1 - F(v))]^{1/\xi_k} \quad (4)$$

该风速出现的可能性即为该 k 、 c 出现的可能性测度,记为 $\text{Pos}\{\theta_{kc}\}$,由不确定理论^[23]可知 $\text{Pos}\{\theta_{kc}\} = \text{Pos}\{\theta_k\} \wedge \text{Pos}\{\theta_c\}$,即该 k 、 c 隶属度中的较小值。

假定风电机组采用恒功率因数控制,功率因数取 0.95。获取单台风机的有功出力,即

$$P_{\text{wt}} = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{ci}} \text{ 或 } v \geq v_{\text{co}} \\ v^3 - c_{\text{ci}}^3, & v_{\text{ci}} \leq v \leq v_r \\ P_{\text{wtr}}, & v > v_r \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_{wt} 、 P_{wtr} 分别为风电机组的有功出力和额定

功率; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 分别为风电机组的切入风速、切出风速和额定风速。

1.2 系统静态安全指标随机模糊机会测度

结合随机模糊模拟及前推回代法求解随机模糊潮流问题获取节点电压、支路功率和禁止倒送功率等系统静态安全指标机会测度。

1)通过随机模糊模拟获取各时段的风机出力,在各典型日实际负荷数据的基础上加上正态分布的随机数来模拟产生负荷。

2)通过前推回代法获取潮流结果。

3)计算每种可能性下随机模拟出来的样本中满足静态安全边界的系统静态安全指标的概率测度及其参数隶属函数,节点电压、支路功率和倒送功率处在正常区间的随机模糊机会测度如下:

$$\begin{aligned} \text{Ch}\{U_{\min} \leq \tilde{U} \leq U_{\max}\}(\alpha_u) = \\ \sup\{\beta_u | C_r\{\theta \in \Theta | P_r\{U_{\min} \leq \tilde{U} \leq U_{\max}\} \geq \beta_u\} \geq \alpha_u\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Ch}\{\tilde{P}_1 \leq P_{\text{lmax}}\}(\alpha_1) = \\ \sup\{\beta_1 | C_r\{\theta \in \Theta | P_r\{\tilde{P}_1 \leq P_{\text{lmax}}\} \geq \beta_1\} \geq \alpha_1\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Ch}\{\tilde{P}_B \geq 0\}(\alpha_B) = \\ \sup\{\beta_B | C_r\{\theta \in \Theta | P_r\{\tilde{P}_B \geq 0\} \geq \beta_B\} \geq \alpha_B\} \end{aligned} \quad (8)$$

式(6)~(8)中 \tilde{U} 为节点电压随机模糊变量; \tilde{P}_1 、 \tilde{P}_B 为支路功率随机模糊变量; $\text{Ch}\{\cdot\}(\alpha)$ 为随机模糊事件的 α 机会; P_r 为概率测度; α_u 、 α_1 、 α_B 、 β_u 、 β_1 、 β_B 为给定的置信水平; $\{U_{\min} \leq \tilde{U} \leq U_{\max}\}$ 为节点电压在正常区间的随机模糊事件; $\{\tilde{P}_1 \leq P_{\text{lmax}}\}$ 为支路功率满足边界条件的随机模糊事件; $\{\tilde{P}_B \geq 0\}$ 为配电网联络变电站低压侧向主动配电网的注入功率大于零的随机模糊事件。

2 主动配电网分布式风电容量配置随机模糊机会约束双层规划模型

针对分布式风电容量过大时节点电压和支路功率有可能越限等系统安全问题,通过考虑削减 DG 有功出力、调节有载调压变压器二次电压及调节

DG 功率因数等 AM 措施可提升配电网风电接纳能力。该文上层规划是风机的容量配置问题,其模型以年利润随机模糊期望值最大为目标;下层规划是在上层规划方案基础上的各时段风机出力优化问题,以各时段分布式风电有功出力削减量的随机模糊期望值最小为目标。通过判断上层规划是否满足系统静态安全指标等约束条件的机会测度进行上下层规划协同。

2.1 上层优化模型

1) 目标函数。

上层优化目标是在满足随机模糊机会测度置信水平下的配电公司年利润随机模糊期望值最大。为符合实际市场环境,考虑 AM 措施对利益的影响,定义年 AM 费为 DG 运营商向配电公司购买调整优化潮流的服务所支付的费用^[21]。其目标函数为

$$\max \bar{f}_u \quad (9)$$

2) 约束条件。

① 目标函数的机会约束条件。

$$\text{Ch}\{f(x, \xi_k) \geq \bar{f}_u\}(\gamma) \geq \delta \quad (10)$$

$$f(x, \xi_k) = C_{\text{net}(k)} + C_{e(k)} + C_{\text{AM}(k)} - C_{\text{Ploss}(k)} - C_{\text{inv}} \quad (11)$$

式(10)、(11)中 x 为决策变量风机接入台数; x_k 为第 k 次随机模糊模拟; g, d 为给定的置信水平; \bar{f}_u 为在满足机会测度置信水平下的年利润随机模糊期望值; $f(x, \xi_k)$ 、 $C_{\text{net}(k)}$ 、 $C_{e(k)}$ 、 $C_{\text{AM}(k)}$ 、 $C_{\text{Ploss}(k)}$ 、 $C_{\text{inv}(k)}$ 分别为第 k 次随机模糊模拟的总年利润、传统配电网年售电收益、年环境改善收益、年 AM 费、年网损费用和年投资成本,其具体表达如下:

$$C_{\text{sal}(k)} = \sum_{m=1}^4 N_m \sum_{n=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG}i(k)}^{m,n} (a_i - a'_i)$$

$$C_{\text{net}(k)} = \sum_{m=1}^4 N_m \sum_{n=1}^{24} (P_{\text{L}(k)}^{m,n} - \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG}i(k)}^{m,n}) E_{\text{tra}}$$

$$C_{e(k)} = I_e \sum_{m=1}^4 N_m \sum_{n=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} P_{\text{DG}i(k)}^{m,n}$$

$$C_{\text{AM}(k)} = \sum_{m=1}^4 N_m \sum_{n=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} c_{i,\text{DG}}^{\text{AM}} P_{\text{DG}i(k)}^{m,n}$$

$$C_{\text{Ploss}(k)} = \sum_{m=1}^4 N_m \sum_{n=1}^{24} C_{\text{Loss}} \Delta P_{\text{Loss}(k)}^{m,n}$$

$$C_{\text{inv}(k)} = (1 + \eta) \alpha_{\text{DG}} \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} c_i P_{\text{NDGi}(k)}$$

$$P_{\text{DG}i(k)}^{m,n} = X_{\text{iDG}(k)} P_{\text{iDG}(k)}^{m,n} \quad (12)$$

式中 N_m 为各季节天数; N_{DG} 为系统安装风机节点个数; $P_{\text{DG}i(k)}^{m,n}$ 为第 k 次随机模糊模拟的第 m 个季节中第 n 个时段的节点 i 上的风电功率; a_i 和 a'_i 分别为第 i 号节点风机的单位小时电价和运行维护费用因子; $P_{\text{L}(k)}^{m,n}$ 为第 k 次随机模糊模拟的各时段的配电网总负荷; E_{tra} 为传统能源单位小时售电利润; I_e 为环境效应改善因子; $c_{i,\text{DG}}^{\text{AM}}$ 为安装在待选节点 i 的风机单位发电量的 AM 成本; C_{Loss} 为单位小时网损成本; $\Delta P_{\text{Loss}(k)}^{m,n}$ 为第 k 次随机模糊模拟的各时段单位小时内有功功率损耗; h 为其他投资与 DG 投资的比例; α_{DG} 为 DG 年平均费用系数, 2 个系数与折现率及使用寿命有关; $P_{\text{NDGi}(k)}$ 、 c_i 分别为第 i 号节点风机额定总安装容量和单位容量安装投资费用; $X_{\text{iDG}(k)}$ 为第 i 号节点上安装的风机台数; $P_{\text{iDG}(k)}^{m,n}$ 为第 k 次随机模糊模拟的 i 节点的风电功率。

② 其他约束条件。

此外,约束条件还应包括:节点功率等式、节点电压、支路功率和禁止倒送功率随机模糊机会约束,风电渗透率和 DG 台数不等式约束。

$$P_{i,\text{DG}} - P_{i,\text{L}} = P_i^{\text{inj}}(U, \theta)$$

$$Q_{i,\text{DG}} - Q_{i,\text{L}} = Q_i^{\text{inj}}(U, \theta)$$

$$\text{Ch}\{U_{\min} \leq \tilde{U} \leq U_{\max}\}(\alpha_u) \geq \beta_u$$

$$\{\text{Ch}\{\tilde{P}_1 \leq P_{\text{lmax}}\}(\alpha_1) \geq \beta_1 \quad (13)$$

$$\text{Ch}\{\tilde{P}_B \geq 0\}(\alpha_B) \geq \beta_B$$

$$C_P \leq C_{\text{Pmax}}$$

$$0 \leq X_{\text{iDG}} \leq X_{\text{iDG},\text{max}}$$

$$C_P = P_{\text{DG}(k)} / P_{\text{L}(k)} \quad (14)$$

式中 $P_{i,\text{DG}}$ 、 $P_{i,\text{L}}$ 分别为节点 i 的 DG 有功出力和节点有功负荷; $Q_{i,\text{DG}}$ 、 $Q_{i,\text{L}}$ 分别为节点 i 的 DG 无功出力和节点无功负荷; P_i^{inj} 、 Q_i^{inj} 分别为节点 i 的有功、无功注入量; α_u 、 α_1 、 α_B 分别为节点电压、支路功率和禁止倒送功率的机会测度置信水平; β_u 、 β_1 、 β_B 分别为节点电压、支路功率和禁止倒送功率的机会测度下限; C_P 为风电渗透率; C_{Pmax} 为最大允许风电渗透率; $X_{\text{iDG},\text{max}}$ 为节点上风机允许的最大安装台数; $P_{\text{DG}(k)}$ 为第 k 次模拟的年风机出力; $P_{\text{L}(k)}$ 为第 k 次模拟的系统年最大负荷样本。

2.2 下层优化模型

在上层机会测度不满足约束条件的情景下启动下层优化,下层优化是在上层规划方案基础上的各

时段风机出力优化问题。通过对各时段的 OLTC 二次侧电压、风机有功削减率和风机功率因数这 3 个决策变量进行调整控制,构建 DG 有功削减量最小最优潮流模型。

1) 目标函数。

$$\min \bar{f}_d \quad (15)$$

$$f_d(X, \xi_k) = \omega_{DG}^{cur} \sum_{j=1}^{N_{DWG}} P_{DG_i(k)}^{m,n} \quad (16)$$

式中 ω_{DG}^{cur} 为 DG 的有功削减率,即有功削减功率占比; $P_{DG_i(k)}^{m,n}$ 为第 k 次随机模糊模拟的 i 节点的风电功率。

2) 约束条件。

① 等式约束条件

$$\begin{cases} (1 - \omega_{DG}^{cur})P_{i,DG} - P_{i,L} = P_i^{inj}(U, \theta) \\ (1 - \omega_{DG}^{cur})\tan \varphi_{DG} P_{i,DG} - Q_{i,L} = Q_i^{inj}(U, \theta) \end{cases} \quad (17)$$

② 不等式约束条件

$$\begin{cases} \omega_{DG,min}^{cur} \leq \omega_{DG}^{cur} \leq \omega_{DG,max}^{cur} \\ V_{OLTC,min} \leq V_{OLTC} \leq V_{OLTC,max} \\ \cos \varphi_{DG,min} \leq \cos \varphi_{DG} \leq \cos \varphi_{DG,max} \end{cases} \quad (18)$$

式中 $\cos \varphi_{DG,max}$ 、 $\cos \varphi_{DG,min}$ 分别为 DG 有功削减率的上下限; $V_{OLTC,min}$ 、 $V_{OLTC,max}$ 分别为有载调压变压器二次侧电压的上下限; $\cos \varphi_{DG,max}$ 、 $\cos \varphi_{DG,min}$ 分别为 DG 功率因数的上下限。

3) 随机模糊机会约束条件。

$$\begin{cases} \text{Ch}\{U_{min} \leq \tilde{U}_{AM} \leq U_{max}\}(\alpha_u) \geq \beta_u \\ \text{Ch}\{\tilde{P}_{1,AM} \leq P_{1,max}\}(\alpha_1) \geq \beta_1 \\ \text{Ch}\{\tilde{P}_{B,AM} \geq 0\}(\alpha_B) \geq \beta_B \end{cases} \quad (19)$$

式中 \tilde{U}_{AM} 、 $\tilde{P}_{1,AM}$ 、 $\tilde{P}_{B,AM}$ 分别为考虑 AM 后的随机模糊节点电压、支路功率和禁止倒送功率。

3 模型求解

该文结合随机模糊模拟、前推回代潮流计算和遗传算法求解该模型。分布式风电出力和系统静态安全指标随机模糊模型获取请见前文。采用混合整数编码算子求解初始个体,采用混合整数变异算子求解变异个体,上层染色体为风机配置台数,下层染

色体为 3 种 AM 措施。具体算法流程如下:

1) 染色体混合整数编码生成初始种群;

2) 分别从 weibull 参数 k 、 c 的可能性空间中均匀产生 N 组 k 、 c ,将 k 、 c 按大小排序之后进行组合,其可能性测度 $\text{Pos}\{\theta_{kc}\} = \text{Pos}\{\theta_k\} \wedge \text{Pos}\{\theta_c\}$,对不同季节典型日各时段的 N 组 k 、 c 按 weibull 分布分别进行 M 次随机模拟,共进行 $M \times N$ 次随机模糊模拟;

3) 基于步骤 2 获取随机模糊的时序性风机出力样本,基于 1.2 节步骤 1 产生负荷数据;

4) 对所有可能性(即步骤 2 中 $M \times N$ 次随机模糊模拟)下的风机出力和负荷数据求取随机模糊潮流结果,通过随机模糊模拟^[24]及配网前推回代潮流法获取各静态安全指标的随机模糊机会测度;

5) 判断静态安全指标等约束条件是否满足给定的置信水平;若是,转步骤 6 直接求取各经济指标;若否,启动下层最优潮流模型;

6) 下层最优潮流模型通过调整控制各时段 OLTC 二次侧电压、风机有功削减率和风机功率因数这 3 个决策变量,在计及各约束条件的基础上通过 GA 寻求最小的风机有功削减随机模糊期望值;

7) 将削减后的风机出力结果返回给上层,通过随机模糊模拟计算各经济指标随机模糊期望值;

8) 采用遗传算法计算个体适应度,以遗传算法代数 and 误差作为判断是否收敛的条件,若是,输出结果,若否,交叉变异产生下一代种群,重复步骤 4~7。

4 算例仿真及结果分析

4.1 算例系统参数

该文选择 IEEE 14 节点系统进行算例仿真,拓扑结构如图 1 所示,相关参数见表 1、2。

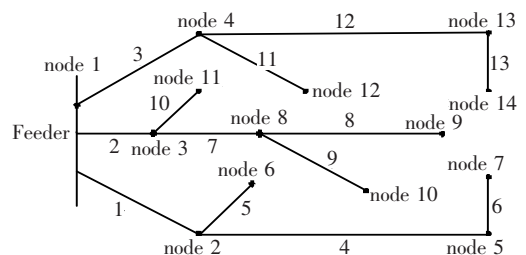


图 1 IEEE 14 节点网络拓扑结构

Figure 1 Network topology of IEEE 14

表 1 相关参数

Table 1 Related parameters

参数	单位	数值
风机选址节点	—	3,5,12
风机额定功率	W	500
风机切入风速	m/s	3
风机额定风速	m/s	13
风机切出风速	m/s	25
风机单位小时售电电价	元/(kW·h)	0.5
传统能源售电利润(售电费-购电费)	元/(kW·h)	0.215
环境效应改善因子	元/(kW·h)	0.147 0
风机单位小时运行维护费	元/(kW·h)	0.1
风机单位发电量的 AM 费	元/(kW·h)	0.09
风机单位容量安装投资费用	元/kW	8 500
单位小时网损成本	元/(kW·h)	0.5
系统额定容量	MV·A	100

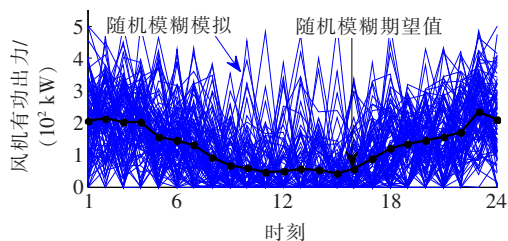
表 2 相关参数的调节范围

Table 2 Adjustment range of related parameters

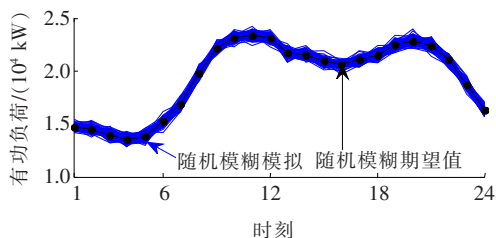
参数	数值	
	下限	上限
OLTC 二次侧电压	0.95	1.05
DWG 有功切除率	0	0.5
DWG 功率因数	0.98 (迟相)	0.98 (进相)
节点电压	0.95	1.05
支路功率/(MV·A)	—	10
风机安装台数	0	10

4.2 风速与静态安全指标随机模糊模拟

运用随机模糊模拟方法进行时序性抽样, DG 出力以及有功负荷的模拟图如图 2 所示。



(a) 夏季典型日单台风机出力随机模糊期望值



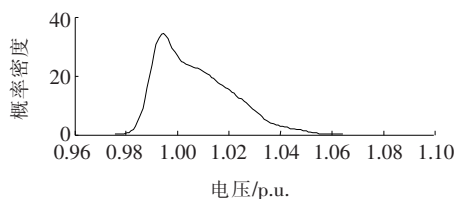
(b) 夏季典型日系统有功负荷随机模糊期望值

图 2 随机模糊模拟的时序风机出力和负荷样本

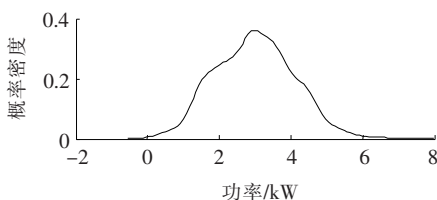
Figure 2 Wind power and load samples with scheduling under random fuzzy simulation

随机模糊模拟样本中节点电压、支路功率、风速和风机出力的随机模糊概率密度曲线如图 3 所示。

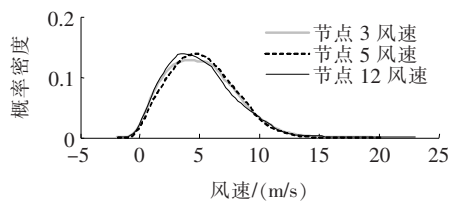
不符合静态安全指标置信水平转下层调控后, 通过 GA 寻求最小的风机有功削减随机模糊期望值所得到的 GA 迭代收敛情况如图 4 所示。由图 4 可见, 规划模型的综合期望值在迭代次数为 47 次左右时趋于收敛, 证明算法流程在适应规划具有收敛能力。



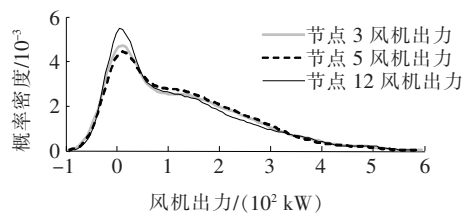
(a) 节点 7 电压



(b) 节路 1 功率



(c) 各节点风速



(d) 各节点风机出力

图 3 随机模糊模拟样本中各参数随机模糊概率密度

Figure 3 Random fuzzy probability density of some parameters in the simulation sample

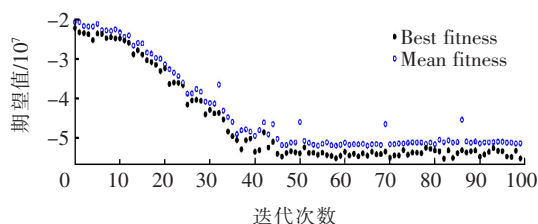


图 4 GA 迭代收敛情况

Figure 4 GA iterative convergence figure

4.3 随机机会约束规划和随机模糊机会约束规划比较

为分析考虑风速随机模糊不确定特征后对配电网规划的影响, 该文将随机模糊机会约束双层规划结果和随机机会约束双层规划结果进行对比分析, 如表 3 所示。在随机机会约束规划中, 风速的形状参数 k 和尺度参数 c 取值固定, 风速以随机变量描述, 约束条件以概率测度计及, 计算其年利润随机期望值, 其他参数与该文模型一致。

由表 3 可知, 一方面, 随机模糊机会约束规划相

表 3 风速随机模糊性和随机性双层规划结果

Table 3 Wind speed random fuzzy and random bi-level programming result

参数	随机模糊机会约束双层规划	随机机会约束双层规划
节点(3, 5, 12)风机配置台数	7, 3, 4	6, 2, 2
年利润/(万元)	6 643	6 785
满足节点电压约束(机会/概率)测度	0.970	0.985
满足支路功率约束(机会/概率)测度	0.973	0.994
满足禁倒送功率约束(机会/概率)测度	0.978	0.995
是否启动 AM	是	是
风电渗透率	0.092	0.071
年风机出力/(MW·h)	11 983	9 258
年负荷/(MW·h)	130 188	130 264

表 4 单双层规划结果

Table 4 Comparison between the results of single and bi-level programming

随机模糊规划	风机台数	年利润/万元	网损/万元	满足约束静态安全指标机会测度			
				节点电压/ p. u.	支路功率/ kW	禁止倒送功率/ kW	渗透率
单层	6, 3, 2	6 588	92	0.935	0.937	0.948	0.077
双层	7, 3, 4	6 643	95	0.970	0.973	0.978	0.092

从表 4 可知: 在同一个机会测度置信水平下, 在随机模糊机会约束规划中考虑 AM 措施后, 其风机配置台数、年利润随机模糊期望值、静态安全指标机会测度以及渗透率都不同。虽然其年利润仅提高 2.1%, 但其渗透率和静态安全指标机会测度都得到了提升。由其原理可知, 当随机模糊双层规划模型中静态安全指标不满足机会约束条件时, 可以通过采用有功削减等 AM 措施, 在优化迭代过程中会牺牲一部分经济性来满足各项机会约束, 但是双层规

对于随机机会约束规划, 其年利润下降了 5.1%。考虑风速兼具随机性和模糊性的多重不确定特征后, 由于 k 、 c 参数的模糊性, 风速与风机出力也具有随机模糊不确定特征, 从而使得节点电压、支路功率和禁止倒送功率等随机模糊不确定变量满足约束的机会降低, 对优化结果产生了限制作用, 致使其年利润降低。另一方面, 风电渗透率从 7.1% 提高到了 9.2%。通过分析风电渗透率表达式可知, 2 种模型模拟的负荷大小相差不大, 导致其渗透率增加的主要原因是随机模糊模拟的年风机出力比随机模拟的年风机出力大。在实际情况中, 通过随机模糊模拟风速, 使得风机输出功率表达更加准确科学, 不会出现由于风机出力样本表达不完整, 使得某些小概率事件的静态安全指标满足机会测度约束, 不会启动下层 AM 优化。随机模糊机会约束规划在牺牲了部分经济性的前提下, 避免了随机机会约束规划由于考虑不够客观全面而给配置方案带来不确定的负面影响。

4.4 考虑 AM 措施对模型影响分析

为对比分析 AM 对随机模糊机会约束规划影响, 该文分别对单层(即不考虑 AM)和双层(即考虑 AM)进行仿真, 风机接入节点均为(3, 5, 12), 结果如表 4 所示。

划可以通过削减有功、改变有载调压变压器二次电压、调节功率因数使因增加配置容量所致超过置信水平的静态安全指标机会测度达到要求, 从而提升 DG 的配置容量。在双层规划中通过采用 AM 措施, 风电渗透率得到提升, 整体来说其年利润并未降低。同时通过下层有功削减等措施, 节点电压和支路功率等静态安全指标都提升至 97% 以上, 充分体现了 AM 措施在改善系统潮流等方面的积极作用, 提高了系统的安全性。

4.5 置信水平对规划结果影响分析

在随机模糊机会约束规划中,置信水平表示结果的可靠程度。设置置信水平为 0.95,表示随机模糊机会约束方案是建立在满足静态安全指标的机会

测度下限大于 95%的情况。静态安全指标机会测度置信水平分别为 0.90、0.92、0.94、0.96、0.98 时的各项经济收益随机模糊期望值见表 5。

由表 5 可知,置信水平越高,其年利润相对越低。

表 5 不同置信水平下双层最优规划结果比对分析

Table 5 Comparison between the results of bi-level programming under different confidence level

置信水平	节点(3, 5, 12)风机配置台数	年利润/万元	网损/万元	环境改善收益/万元	年有功削减量/(MW·h)	节点电压机会测度	支路功率机会测度	倒送功率机会测度
0.90	8, 4, 4	6 784	100	192	160	0.945	0.921	0.913
0.92	8, 3, 4	6 718	98	179	187	0.953	0.964	0.968
0.94	7, 3, 4	6 670	95	168	220	0.972	0.974	0.981
0.96	7, 3, 4	6 613	96	168	180	0.985	0.986	0.987
0.98	7, 3, 3	6 539	94	156	242	0.991	0.993	0.990

由于提高置信水平会产生更多不符合静态安全指标的情况,导致其年利润降低;反之,降低置信水平能在一定程度上提高年利润。因此,在该文所提的基于随机模糊机会约束规划的分布式电源优化配置中,设计者可以根据规划需求,在电网允许接受的风险范围内通过设置不同的机会测度的置信水平来实现年利润的最大。

5 结语

该文提出一种主动配电网分布式风电容量配置的随机模糊机会约束双层规划模型。得到如下结论:

1)模型综合考虑风速客观存在的时序特征和随机模糊多重不确定特征,用随机模糊机会测度描述静态安全指标,解决了实际规划中分布式风电出力模拟和系统静态安全指标难以获取其精确值的问题,因此规划结果具有更加丰富的不确定信息;

2)通过判断系统静态安全指标满足情况和考虑 AM 措施,将风机容量配置规划和和规划方案运行问题结合,提出了构建一种考虑时序特性的随机模糊机会约束规划双层规划模型,从而能够在规划阶段充分计及 AM 措施改善配电网运行,分布式定容方案在提升 DG 接纳前提下有更强的适应性;

3)通过系统静态安全指标不同的置信水平考虑,在保证技术可行前提下,评估年利润等经济收

益,从而使得规划者可更灵活地从兼顾技术和经济角度进行分布式风电容量配置决策。

参考文献:

- [1] 韦永忠,张宇,朱孟周,等.考虑分布式电源贡献度的单元制主动配电网供电可靠性评估[J].智慧电力,2019,47(7):84-90.
WEI Yongzhong, ZHANG Yu, ZHU Mengzhou, et al. Power supply reliability evaluation for active distribution unit considering DG contribution index[J]. Smart Power, 2019, 47(7): 84-90.
- [2] 竺庆茸,李晗,李先允,等.含光伏的主动配电网非对称故障条件下对并网点电压影响的研究[J].电测与仪表,2019,56(4):101-106.
ZHU Qingrong, LI Han, LI Xianyun, et al. Research on active distribution network and network effects on non symmetrical voltage fault conditions with PV [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 101-106.
- [3] 黄容生.基于同步相量测量装置的主动配电网 LTE 通信安全研究[J].电网与清洁能源,2020,36(9):63-67+75.
HUANG Rongsheng. Research on LTE communication security of active distribution network based on synchronized phasor measurement device[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 63-67+75.
- [4] 杜雪,欧阳金鑫,龙晓轩,等.基于分布式电源电流变化率的主动配电网单相断线保护方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):41-48.

- DU Xue, OUYANG Jinxin, LONG Xiaoxuan, et al. A protection method of a single-phase break fault for an active distribution network based on current change rates of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(22): 41-48.
- [5] 马瑞, 张强, 吴瑕, 等. 日风速随机模糊不确定模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(24): 6351-6358.
- MA Rui, ZHANG Qiang, WU Xia, et al. Random fuzzy uncertain model for daily wind speed[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(24): 6351-6358.
- [6] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 163-174.
- REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power uhv dc transmission system[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 163-174.
- [7] 杨明, 罗隆福. 计及风电与负荷不确定性的电力系统无功随机优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 134-141.
- YANG Ming, LUO Longfu. Stochastic optimal reactive power dispatch in a power system considering wind power and load uncertainty[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 134-141.
- [8] 张兴, 孙艳霞, 李丽娜, 等. 风电机组电磁暂态建模及验证[J]. *中国电力*, 2020, 53(7): 106-112.
- ZHANG Xing, SUN Yanxia, LI Lina, et al. Modeling and verification of wind turbine electromagnetic transient [J]. *China electric power*, 2020, 53 (7): 106-112.
- [9] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(3): 58-63.
- LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(3): 58-63.
- [10] Soroudi A, Caire R, Hadjsaid N, et al. Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2011, 5(11): 1173-1182.
- [11] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 53-58.
- ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of intermittent distributed generator considering correlations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 53-58.
- [12] Liu Z P, Wen F S, Ledwich G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(4): 2541-2551.
- [13] 李振坤, 田源, 董成明, 等. 基于随机潮流的含电动汽车配电网内分布式电源规划[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(16): 60-66.
- LI Zhenkun, TIAN Yuan, DONG Chengming, et al. Distributed generators programming in distribution network involving vehicle to grid based on probabilistic power flow [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(16): 60-66.
- [14] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(16): 1-7.
- ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(16): 1-7.
- [15] 张沈习, 陈楷, 龙禹, 等. 基于混合蛙跳算法的分布式风电源规划[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(13): 76-82.
- ZHANG Shenxi, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Distributed wind generation planning based on shuffled frog leaping algorithm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(13): 76-82.
- [16] Haghifam M R, Falaghi H, Malik O P. Risk-based distributed generation placement [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2008, 2(2): 252-260.
- [17] 曾鸣, 杜楠, 张鲲, 等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. *电网技术*, 2013, 37(4): 954-959.
- ZENG Ming, DU Nan, ZHANG Kun, et al. Distributed generation planning based on multi-objective static fuzzy model [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(4): 954-959.
- [18] 杨江涛, 刘佳, 孙春顺, 等. 计及分布式电源的配电网

- 储能配置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 108-114.
- YANG Jiangtao, LIU Jia, SUN Chunshun, et al. Research on energy storage configuration of distribution network considering distributed power supply [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 108-114.
- [19] Zhang J T, Fan H, Tang W, et al. Planning for distributed wind generation under active management mode [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013 (47): 140-146.
- [20] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.
- ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of distributed wind generation under active management mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.
- [21] 温俊强, 曾博, 张建华. 市场环境下考虑各利益主体博弈的分布式电源双层规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 61-67.
- WEN Junqiang, ZENG Bo, ZHANG Jianhua. A multi-objective stochastic optimization scheduling of electricity-generating system considering wind and photovoltaic complementary [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 61-67.
- [22] 秦泽宇, 马瑞, 张强, 等. 考虑风光互补的电力系统多目标随机优化发电方案研究[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(3): 53-60.
- QIN Zeyu, MA Rui, ZHANG Qiang, et al. Bi-level optimal configuration of distributed wind and photovoltaic generations in active distribution network based on chance constrained programming [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(3): 53-60.
- [23] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 50-58.
- ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of generalized power sources in distribution network based on chance constrained programming and bi-level programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 50-58.
- [24] 邓黎芃, 郑洁云, 陈旷, 等. 考虑可靠性及电压稳定性的主动配电网多目标分层规划[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 3-12.
- DENG Yunfan, ZHENG Jieyun, CHEN Kuang, et al. Multi-objective hierarchical planning for active distribution networks considering reliability and voltage stability. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 3-12.