考虑模糊机会约束处理源荷两侧不确定性的配电网无功优化策略

钟　诚[1]，刘晓聪[1]，刘　聪[2]

（1. 东北电力大学电气工程学院，吉林 吉林 132012；2. 国网四平供电公司，吉林 四平 136000）

摘要：随着可再生能源的迅速发展，可再生能源作为分布式能源接入配电网的容量逐渐增大。由于出力的随机性给配电网带来网损增加、电压波动等问题，影响配电网系统的安全经济运行。为此，应充分考虑分布式电源出力和负荷功率的不确定性，构建以网损和电压偏移最小为目标的无功优化模型，利用模糊机会约束处理不确定性问题，最后采用改进粒子群算法对模型进行求解。通过改进的 IEEE-33 系统进行分析，验证所提策略的有效性，结果表明模糊处理随机性后采用改进粒子群算法求解有利于减小系统的网损，提高系统的稳定性。

关键词：配电网；分布式电源；无功 / 电压控制；模糊机会约束；改进粒子群算法

A reactive power optimization strategy for distribution networks considering fuzzy chance constraints to deal with uncertainties on both sides of source-load

ZHONG Cheng[1], LIU Xiaocong[1], LIU Cong[2]

(1. School of Electrical Engineering Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Siping Power Supply Company, Siping 136000, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy sources, the capacity of renewable energy sources as distributed energy sources connected to the distribution network gradually increases, which will affect the safe and economic operation of the distribution network system due to the randomness of its power output to bring problems such as network loss increase and voltage fluctuation. For this reason, the uncertainty of distributed power supply output and load power should be fully considered, a reactive power optimization model with the objective of minimizing network loss and voltage shift should be constructed, the uncertainty problem should be handled by using fuzzy chance constraints, and finally the model should be solved by improved particle swarm algorithm. The analysis is carried out by the improved IEEE-33 system to verify the effectiveness of the proposed strategy. The results show that the solution by the improved particle swarm algorithm after fuzzy treatment of randomness is beneficial to reduce the network loss of the system and improve the stability of the system.

Key words: distribution network; distributed power supply; reactive power/voltage control; fuzzy opportunity constraint; improved particle swarm algorithm

吉林省自然科学基金（20190201289JC）

0 引言

在“双碳”时代的大背景下，传统模式下的配电网已经无法满足人们日益增长的用电需求，环境友好、可持续发展已经成为电力系统发展的必然要求。伴随智能电网观念的出现，含有风电、光伏等分布式电源作为新兴的可持续型能源，已经成为配电网系统的重要组成部分[1]。

目前，国内外学者在含有可在再生能源的无功优化中取得了显著成果，提出了很多无功优化的数学模型和求解方法，为后续的深入研究奠定了基础。文献[2]提出一种基于改进元胞差分算法的含风、光的配电网无功优化方法，通过权重系数将多目标模型转换为双目标模型，有效降低了配电网的电压波动和有功损耗。文献[3]针对含分布式电源的配电网在优化时将分布式电源等效为恒功率模型，提出了计及分布式电源输出特性的配电网无功优化方法。采用了多种群遗传算法进行优化求解，证明了所提方法的有效性。文献[4]提出了含分布式电源的配电网无功补偿策略，采用灰色关联度映射方法划分时段，在同一时段内协同优化不同类型变量，然后固定多个时段内并联电容器组和有载调压变压器的状态，进行二次静态无功优化校正。文献[5]建立了投资层与多时段模拟运行层一体化的主动配电网无功补偿装置及有载调压变压器鲁棒多目标优化配置模型，将原模型进行二阶锥松弛和鲁棒对等转换快速求解。在上述文献中未充分考虑到随机性对配电网的影响。因此，在配电网的无功优化中应对源荷两侧的不确定性问题进行处理。

综上所述，本文通过建立含分布式电源的配电网无功优化模型，同时引入模糊机会约束对源荷两侧的不确定性问题进行处理，最后以IEEE-33节点系统为算例，利用改进的粒子群算法对所提模型进行验证。

1 含分布式电源的配电网功率优化模型

1.1 电力系统源荷不确定性分析

随着新能源不断发展，风能和光伏作为典型的新能源面临着大规模的并网。由于天气条件的影响，其出力具有不确定性。特别是在极端天气条件下，其有功出力波动会很大。因此，外界因素的影响不可以忽略。

为了保证电力系统的安全可靠运行，在配电网系统中的各个机组日前出力调度要以配电网系统的等式和不等式约束为前提。现阶段关于光伏出力和负荷功率的预测大多采用概率模型的方式，要充分考虑到外界因素的影响，通过概率模型预测的光伏出力和负荷功率与实际的相比会存在误差。在配电网系统中，面临着光伏的大规模并网，这种情况下预测结果的误差是不能忽略的。因此，在配电网系统的日前调度中，可以引入光伏模糊参数和负荷模糊参数来处理源荷不确定的问题。

1.2 目标函数

（1）配电网系统的有功网损

系统的有功损耗为

$$P_{\text{loss}}=\sum_{i=1}^{N}R_i\frac{P_i^2+Q_i^2}{V_i^2} \tag{1}$$

式中，P_{loss}为配电网系统总的有功损耗；N为配电网系统的支路数；R_i为第i条支路的电阻值；P_i为第i条支路的有功功率；Q_i为第i条支路的无功功率；V_i为第i条支路末端节点电压值。

为了满足无功潮流的优化，以系统的有功损耗最小为目标函数，在目标函数中加入状态变量越限惩罚函数来加快收敛速度，计算公式为

$$\begin{aligned}\min f_1=P_{\text{loss}}+\lambda_u\sum\left(\frac{V_j-V_{j\lim}}{V_{j\max}-V_{j\min}}\right)^2+\\ \lambda_Q\sum\left(\frac{Q_j-Q_{j\lim}}{Q_{j\max}-Q_{j\min}}\right)^2\end{aligned} \tag{2}$$

式中，λ_u为节点电压越界惩罚因子；V_j为节点j的电压幅值；Q_j为节点j的注入无功。

（2）配电网系统的节点电压偏移量

以配电网系统的节点电压偏移量最小为优化目标，其目标函数表达式为

$$\min f_2=\sum_{i=1}^{M}\frac{\left(V_i-V_{i\text{N}}\right)^2}{V_{i\text{N}}^2} \tag{3}$$

式中，f_2为配电网系统节点电压幅值的偏移指数；M为系统中节点数；V_i为第i个节点处的节点电压实际值；V_{iN}为第i个节点的电压额定值。

（3）综合目标函数

在配电网中，需要对多个目标进行优化时，通常把多目标的优化问题转化为单个目标进行优化，把各个目标汇总成一个综合的目标函数。

综合目标函数计算公式为

$$\min F = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \tag{4}$$

式中，F为配电网系统优化重构的多目标综合目标函数；λ_1、λ_2分别为最小有功网损和节点电压偏移最小的权重系数。

1.3 约束条件

（1）潮流方程的等式约束

$$\Delta P_i = P_{i,\mathrm{PV}} - P_{i,\mathrm{L}} - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{5}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,\mathrm{PV}} + Q_{i,\mathrm{C}} - Q_{i,\mathrm{L}} - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{6}$$

式中，ΔP_i和ΔQ_i分别为节点i的有功和无功变化量；$P_{i,\mathrm{PV}}$和$Q_{i,\mathrm{PV}}$分别为节点i的光伏电源的有功出力和无功出力；$P_{i,L}$和$Q_{i,\mathrm{L}}$分别为节点i的有功负荷和无功负荷；$Q_{i,\mathrm{C}}$为节点i的无功补偿装置出力。

（2）变量不等式约束

$$\begin{aligned} &V_{i\min} \leqslant V_i \leqslant V_{i\max} \\ &P_{\mathrm{PV}i\min} \leqslant P_{\mathrm{PV}i} \leqslant P_{\mathrm{PV}i\max} \\ &Q_{\mathrm{PV}i\min} \leqslant Q_{\mathrm{PV}i} \leqslant Q_{\mathrm{PV}i\max} \\ &Q_{Ci\min} \leqslant Q_{Ci} \leqslant Q_{Ci\max} \end{aligned} \tag{7}$$

式中，V_i为节点电压；$Q_{\mathrm{PV}i}$为光伏电源无功出力；Q_{Ci}为无功补偿装置出力。

1.4 含分布式电源的配电网源荷不确定性分析

由于光伏出力和负荷功率是不确定的，要考虑到误差，应把式（5）中的潮流约束更改为

$$\Delta P_i = P_{i,\mathrm{PV}} + \varepsilon_{\mathrm{PV}} - (P_{i,\mathrm{L}} + \varepsilon_{\mathrm{L}}) - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{8}$$

式中，$\varepsilon_{\mathrm{PV}}$、$\varepsilon_{\mathrm{L}}$分别为光伏出力和负荷功率的预测误差。

在研究配电网的优化问题中考虑源荷两侧的随机性问题，这些变量对系统无功优化的影响是不确定的。式（8）包含不确定性变量，本文采用模糊处理的方法，将其中的不确定性变量松弛为某一置信水平α下的功率平衡约束，构造出不确定集合计算公式为

$$\min P_{\mathrm{r}}\{\tilde{P}_{\mathrm{PV}} - \tilde{P}_{\mathrm{L}} - V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij})\} \geqslant \alpha \tag{9}$$

式中，$\tilde{P}_{\mathrm{PV}}$为光伏出力随机性的模糊参数；$\tilde{P}_{\mathrm{L}}$为负荷功率不确定性的模糊参数；$P_{\mathrm{r}}\{\ \}$为事件在置信水平为α的情况下发生的概率。

2 模型求解

2.1 模糊机会约束求解不确定性问题的模型

模糊机会约束用于调度问题建模思路：允许调度结果在某种程度上不满足约束条件，但要求调度结果成立可能性不小于调度决策者提前设定的置信水平。

融入模糊变量的单目标机会规划模型为

$$\begin{aligned} &\min f(x,\xi) \\ &\mathrm{s.t.} P_{\mathrm{r}}\{g(x,\xi) \leqslant 0\} \geqslant \alpha \end{aligned} \tag{10}$$

式中，x为决策向量；ξ为参数向量；$f(x,\xi)$为目标函数；$g(x,\xi)$为约束函数。

在采用模糊机会约束求解规划问题时，重点是对机会约束的处理，采用模糊参数和决策变量分离的方式，若二者之间存在着某种线性关系，可以转化成清晰等价类进行处理，进而采用所提方法进行优化计算。由于配电网系统对于运行的安全性要求很高，因此置信水平不宜选择过低，当$\alpha \geqslant 1/2$时，模糊约束$P_{\mathrm{r}}\{g(x,\xi) \leqslant 0\} \geqslant \alpha$。

$$\begin{aligned} &h_0(x) + (2-2\alpha)\sum_{k=1}^{t}(r_{k3}h_k^{+}(x) - r_{k2}h_k^{-}(x)) + \\ &(2\alpha-1)\sum_{k=1}^{t}(r_{k4}h_k^{+}(x) - r_{k1}h_k^{-}(x)) \leqslant 0 \end{aligned} \tag{11}$$

式中，$h_k^{+}(x)$、$h_k^{-}(x)$为假设的两个函数；$h_0(x)$为函数$g(x,\xi)$的一部分，具体参考文献[6-8]；$r_{k1} \sim r_{k4}(k=1,2,3,\cdots,t,\ t \in R)$为隶属度参数。

采用模糊三角参数将式（9）转化为清晰等

价类进行处理，即

$$\begin{aligned}&(2-2\alpha)(\omega_{3\mathrm{L},i}P_{\mathrm{L},i}-\omega_{2\mathrm{PV},i}P_{\mathrm{PV},i})+\\&(2\alpha-1)(\omega_{4\mathrm{L},i}P_{\mathrm{L},i}-\omega_{1\mathrm{PV},i}P_{\mathrm{PV},i})\leqslant 0\end{aligned}\tag{12}$$

式中，$\omega_{1\mathrm{PV}}$、$\omega_{2\mathrm{PV}}$、$\omega_{3\mathrm{L}}$和$\omega_{4\mathrm{L}}$分别为光伏出力的预测值和负荷功率预测值的隶属度参数。

采用清晰等价类处理后，可用确定约束代替含模糊参数的约束条件，进而采用所提优化方法进行计算。

2.2 采用改进粒子群算法优化

运用粒子群算法求解优化问题，需要考虑其参数对性能的影响。在传统粒子群中，由于学习因子和惯性因子是固定的参数，很难跳出局部的最优解。对于这一问题，本文采用同时对学习因子和惯性因子进行改进的粒子群算法，改进后的策略为

$$\begin{aligned}w&=w_{\mathrm{e}}+\frac{(w_{\mathrm{s}}-w_{\mathrm{e}})(\mathrm{MI}-\mathrm{IT})}{\mathrm{MI}}\\C_1&=C_{1\mathrm{s}}+(C_{1e}-C_{1\mathrm{s}})\frac{\mathrm{IT}^2}{\mathrm{MI}^2}\\C_2&=C_{2\mathrm{s}}+(C_{2e}-C_{2\mathrm{s}})\frac{\mathrm{IT}^2}{\mathrm{MI}^2}\end{aligned}\tag{13}$$

式中，IT为当前迭代次数；MI为总迭代次数；ω_{s}和ω_{e}分别为惯性权重因子的初始值和终止值。

针对惯性因子的改进，本文采用遗传算法的变异思想，通过自适应变异策略重新初始化惯性因子。在种群的迭代过程中，这种方法缩小了搜索空间进行缩小，提高了算法寻求最优解的速度。

C是学习因子，$C_{1\mathrm{s}}$和$C_{1\mathrm{e}}$分别是C_1的初始值和停止值，$C_{1\mathrm{s}}>C_{1\mathrm{e}}$；$C_{2\mathrm{s}}$和$C_{2\mathrm{e}}$分别是$C_2$的初始值和停止值，$C_{2\mathrm{s}}<C_{2\mathrm{e}}$。迭代初期，大$C_1$和小$C_2$使粒子具有较好的自学习能力和较差的社会学习能力，有利于全局搜索。在迭代后期，小C_1和大C_2使粒子具有较强的社会学习能力和较差的自学习能力，有利于算法收敛。

3 算例分析

为了进一步改善配电网的无功运行情况，考虑光伏出力和负荷功率的随机性问题，采用模糊机会约束处理。以各时刻光伏出力的上网量和无功补偿接入容量作为优化变量，构建含有分布式光伏的配电网动态无功优化模型，具体流程如图1所示。

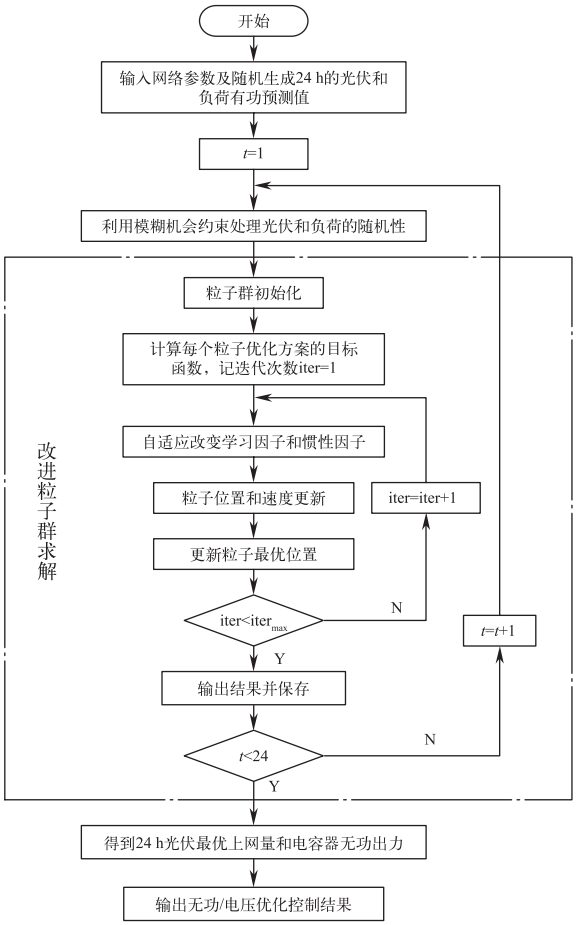


图1 日前无功 / 电压控制求解流程

Fig. 1 A few days ago reactive power/voltage control solving process

算例分析是以如图2所示的改进IEEE-33节点为模型，在第3、18、21和26节点处分别接入光伏，在节点15采用静止无功发生器（Static Var Generator，SVG）和31节点采用投切电容器进行无功补偿，保证其他支路参数不变，验证模型和所提方法的有效性。基于算例采用三种不同方法进行对比分析。

方法1：考虑源荷两侧随机性，不采用模糊机会约束对随机变量进行处理，采用传统粒子群算法对光伏接入容量和无功补偿接入容量进行寻优，目标为各时刻的网损和各节点的电压偏移。

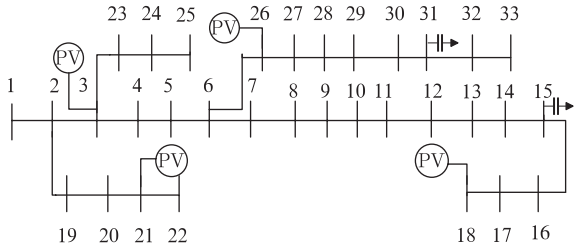


图 2　改进的 IEEE-33 节点配电系统接线图

Fig. 2 Improved IEEE-33 node power distribution system wiring diagram

方法2：考虑源荷两侧随机性，不采用模糊机会约束对随机变量进行处理，采用改进粒子群算法对光伏接入容量和无功补偿接入容量进行寻优，目标为各时刻的网损和各节点的电压偏移。

方法3：考虑源荷两侧随机性，对随机变量采用模糊机会约束进行处理，并采用改进粒子群算法对光伏接入容量和无功补偿接入容量进行寻优，目标为各时刻的网损和各节点的电压偏移。

三种方法电压幅值对比如图3、图4所示。

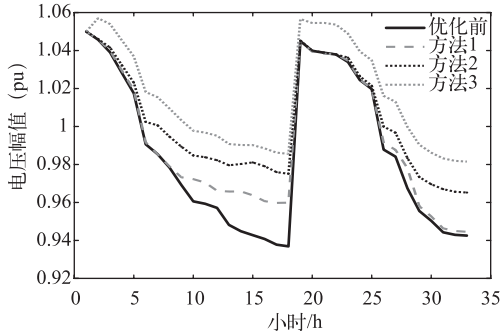


图 3　三种方法电压幅值对比

Fig. 3 Comparison of voltage amplitude of three methods

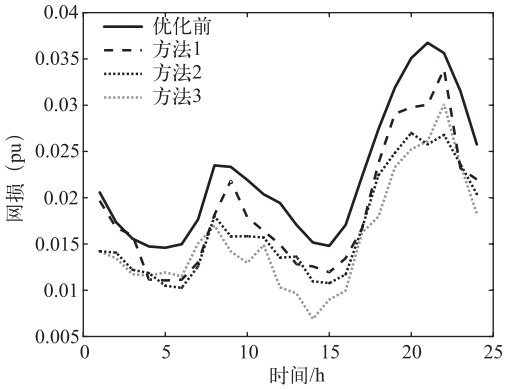


图 4　三种方法网损对比

Fig. 4 Comparison of network loss of three methods

由图3和图4可知，在未经模糊处理的情况下，改进粒子群算法对电压和网损的优化效果要比传统粒子群更好。在此基础上，采用模糊机会约束有着更好的优化结果，说明本文提出的对粒子群算法的改进更适用于配电网的无功优化。

方法3优化后的光伏和补偿设备发出的无功分别如图5、图6所示。不同方法配电网优化重构结果对比见下表。

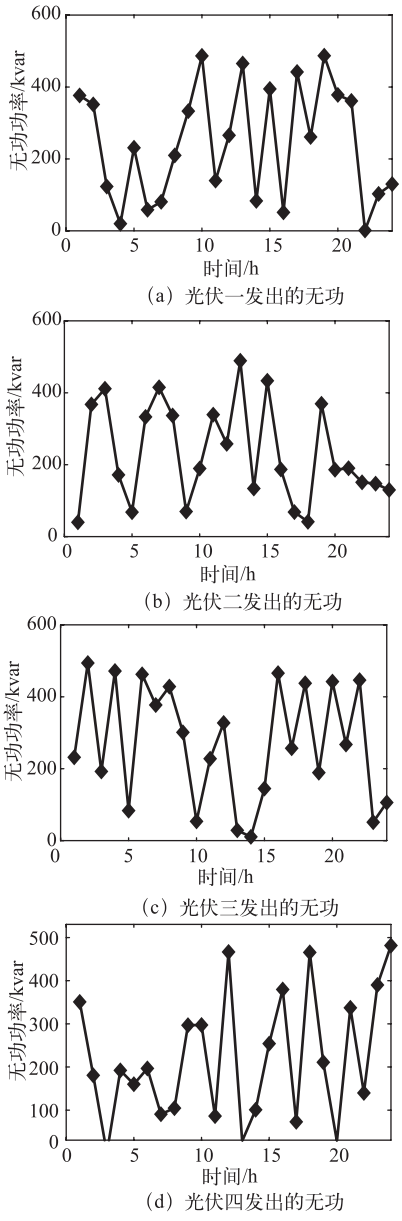
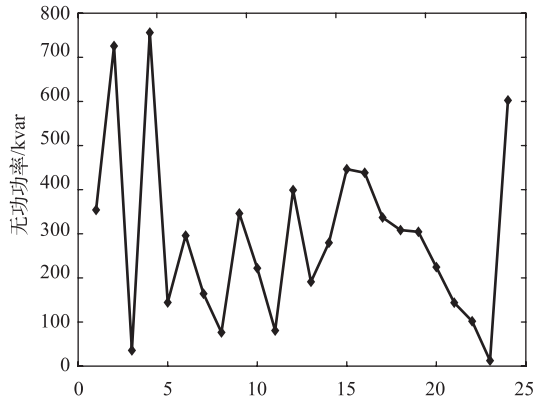
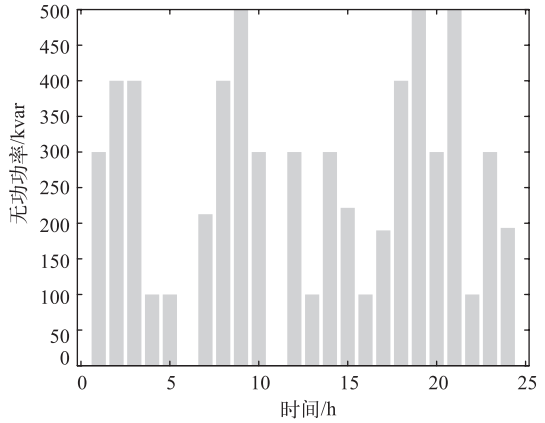


图 5　方法 3 优化后各时刻光伏发出的无功

Fig.5 Method 3 optimized PV reactive power output at each moment



（a）SVG无功功率变化曲线



（b）投切电容器功率

图 6　无功补偿装置各时刻功率变化曲线

Fig. 6 Power change curve of reactive power compensation device at each moment

表　不同方法下配电网优化重构结果对比

Tab. Comparison of distribution network optimization reconfiguration results under different scenarios

参数	优化前	方法 1	方法 2	方法 3
系统有功网损	0.534	0.433	0.394	0.323
电压偏差	0.089	0.078	0.052	0.043
最低点节点电压	0.932	0.945	0.965	0.985

由上表可以看出，优化前系统的有功网损为0.534，电压偏差为0.089，最低点节点电压为0.932。采用改进粒子群算法优化后，有功网损为0.394，降低了26.2%，节点电压偏差减小到0.052，最低点节点电压也有所提高。经过模糊处理不确定性的系统后，有功网损为0.323，相较于优化前减小了39.5%，节点电压偏差减小到0.043，最低点节点电压提高到0.985。说明本文所提方法对配电网无功优化有着较好的效果。

4　结束语

本文针对含有分布式光伏的配电网进行无功优化，充分考虑了光伏出力和负荷功率不确定性的影响。运用模糊机会约束进行处理，加入了模糊参数对不确定变量进行表示，运用三角模糊参数将模糊约束转化为清晰等价类约束，进而通过改进的粒子群算法进行求解，通过对比得到以下结论：

1）在充分考虑光伏出力和负荷随机性的基础上，相较于传统粒子群而言，改进的粒子群算法对模型的优化效果更好，说明通过对学习因子和惯性因子的更新使得粒子群算法更容易跳出局部最优解，获得更好的全局最优解。

2）针对分布式光伏接入的配电网系统，充分考虑源荷随机性对系统的影响，加入模糊机会约束对随机性问题处理后，采用改进粒子群算法求解，可以有效降低系统的有功网损和节点电压偏差。

参考文献

[1] 金国彬，潘狄，陈庆，等．考虑源荷不确定性的直流配电网模糊随机日前优化调度[J]．电工技术学报，2021，36(21)：4517-4528．

[2] 周立，王杰，谢磊，等．含分布式电源的配电网多目标无功优化[J]．重庆邮电大学学报(自然科学版)，2022，34(5)：818-827．

[3] 刘广进，郭帅帅，张中明．计及分布式电源出力特性的配电网无功优化[J]．电工技术，2022，579(21)：112-115．

[4] 陈倩，王维庆，王海云，等．含分布式电源的配电网动态无功补偿优化策略研究[J]．太阳能学报，2023，44(1)：525-535．

[5] 田宇，黄婧，谢枭，等．主动配电网无功补偿和OLTC鲁棒多目标优化配置[J]．中国电力，2023，56(3)：94-99．

[6] ZHU C，LIU J，WENG B，et al．A multi-objective chance-constrained optimization model for

distribution networks management considering source-network- load-storage interaction[D]. Shanghai: 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 2022: 439-444.

[7] ZHONG K SUN K, LI J, et al. Source-load-storage coordinated optimization dispatch for distribution networks considering source-load uncertainties[C]. 2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2022: 819-824.

[8] YONG C, LI Y, ZENG Z, et al. Coordinated active and reactive power optimization considering load characteristics for active distribution network[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(4): 97-105.

[9] 崔杨，周慧娟，仲悟之，等．考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]．电力自动化设备，2020，40(11)：85-93．

[10] 李兴莘，张靖，何宇，等．基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]．电力科学与工程，2021，37(3)：1-7．

作者简介

钟诚（1985—），男，博士，副教授，研究方向：新能源发电柔性并网控制。

刘晓聪（1999—），男，硕士研究生，研究方向：配电网优化调度。

（收稿日期：2023-06-19）