

DOI: 10.7667/PSPC150873

基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的 多目标配电网重构

卢扬, 吴俊勇, 郝亮亮

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 提出一种含多类分布式电源的多目标配电网重构模型。在重构时采用 Pareto 准则的多目标二进制粒子群优化(Multi-Objective Binary Particle Swarm Optimization, MOBPSO)算法, 对算法进行了3点改进: 基于环的编码方式用以降低不可行解的产生概率; 动态变化的惯性因子和异步变化的学习因子用以提高算法的调节适应能力; 在最优粒子的更新方式上提出小生境共享机制和比例选择算子相结合的策略。最后还给出了一种根据决策者偏好信息, 从优化解集中选择相应重构方案的评价机制。算例结果表明: 改进的 MOBPSO 算法在寻优效率和稳定性上均有提升; 所提模型、改进算法以及评价机制互相配合, 能够为决策者提供一种有效的配电网重构方案。

关键词: 多目标配电网重构; Pareto; 分布式电源; 改进的 MOBPSO 算法; 评价机制

Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm

LU Yang, WU Junyong, HAO Liangliang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A distribution network with multi-type distributed generations reconfiguration model considering multiple objectives is proposed. Pareto optimal criterion and multi-objective binary particle swarm optimization (MOBPSO) algorithm are used in the reconfiguration process. The algorithm is improved in three aspects: the ring-based coding method to reduce the probability of infeasible solutions; the dynamic change of inertia factor and the asynchronous change of learning factor to improve the algorithm's adaptive ability; combination of niche sharing mechanism and proportional operator selection are proposed to update the particles. According to the decision maker's bias, this paper finally gives an evaluation mechanism, which can select the appropriate reconstruction scheme from the optimal solution. Numerical results show that the improved MOBPSO algorithm can improve the efficiency and stability of the optimization. This paper's mode as well as the improved algorithm cooperating with the evaluation mechanism can provide an effective reconfiguration scheme for decision maker.

Key words: multi-objective distribution network reconfiguration; Pareto; distributed generation; improved MOBPSO algorithm; evaluation mechanism

0 引言

我国配电网具有闭环设计、开环运行的特点, 各节点间设有分段开关, 网络中还配置了少量的联络开关。配电网重构是通过改变这些开关的开合状态来变换网络结构, 在实现电力供需平衡和满足拓扑结构、电压约束等前提下, 达到降低网络损耗^[1-2], 提高供电电压质量^[3]和均衡负荷^[4-5]等目的。

近年来国内外学者对配电网重构展开了一系列

研究。文献[6]以降低网络损耗为目标进行了优化, 但实际上配电网重构是一个复杂的多目标高维度非线性组合优化问题; 文献[7]在重构时考虑了多个运行指标, 采用了加权的方法将多目标优化转化成单目标问题后再进行求解, 这种方式存在各优化指标的单位不一致、难以统一比较的问题, 并且各指标的权值分配带有较大主观人为因素, 这种“先评价、后优化”的重构思想易出现局部收敛的现象。

另一方面, 分布式电源(Distributed Generation,

DG)在配电网中的渗透率越来越高,传统配电网正逐步发展成一个复杂的多电源网络^[8],因此有必要在重构模型中接入多种不同类型的 DG。文献[9-10]在重构时都没有考虑 DG 接入,文献[11-12]对含 P 、 Q 恒定型 DG 的配电网进行了重构,但所接 DG 类型单一,不适应含多类 DG 配电网的重构需要。

针对以上问题,本文提出了一种同时考虑网络损耗、电压质量和负荷平衡的含多类 DG 的多目标配电网重构模型。该模型能将目前常见的 P 、 Q 恒定型、 P 、 V 恒定型和 P 、 I 恒定型等三种类型的 DG 接入到传统配电网,采用工程应用面广的粒子群算法对其进行重构优化。针对重构过程中基本粒子群算法的局限性,本文对 MOBPSO 算法进行了多方面改进,提高了寻优的效率与稳定性。最后,本文给出了一种优化解集的评价机制,从而整体上为决策者提供了一种“先优化、后评价”的配电网重构解决方案。

1 含多类分布式电源配电网的多目标重构数学模型

配电网重构是一个多目标优化问题,从经济性、电压质量和负荷平衡等方面综合考虑其优化目标更具有实际意义。在优化目标确定后,通过潮流计算进行目标函数值的计算时,需要建立不同类型 DG 的数学模型。

1.1 优化目标函数的选择

本文建立的多目标配电网重构模型以系统网损最小、综合电压偏移指数最小和负荷均衡度最优为目标函数。

(1) 从经济性方面考虑,以配电网的网损最小为目标函数

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^L k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (1)$$

式中: f_1 为系统网损; L 为系统支路数; k_i 为开关状态变量, 0 表示打开, 1 表示闭合; r_i 为支路 i 电阻; P_i 和 Q_i 分别为支路 i 末端流过的有功和无功功率; V_i 为支路末端节点电压。

(2) 从电压质量方面考虑,以系统节点电压偏移指数最小为目标函数

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^M \frac{(V_i - V_{iN})^2}{V_{iN}^2} \quad (2)$$

式中: f_2 为系统电压偏移指数; M 为系统节点数; V_i 和 V_{iN} 分别为节点电压实际值和额定值。

(3) 从负荷平衡方面考虑,以系统负荷均衡度^[4]

最优为目标函数

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^L \left(\frac{S_i}{S_i^{\max}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: f_3 为系统负荷均衡度; L 为系统支路数; S_i 和 S_i^{\max} 分别为支路 i 送端的复功率幅值和最大允许传输容量。

1.2 约束条件

配电网重构要求满足下列约束条件。

(1) 配电网的潮流约束。

(2) 运行约束,包括节点电压和支路电流约束。

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ I_l \leq I_l^{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_i^{\min} 和 V_i^{\max} 分别为节点 i 电压幅值的下限和上限; I_l^{\max} 为支路 l 载流量上限值。

(3) 网络拓扑约束: 重构后的配电网保持辐射状结构,不存在闭环和孤岛。

1.3 Pareto 多目标优化技术

解决多目标优化问题,方法之一就是通过对目标函数加权的方式,将多目标问题转化成单目标问题^[7]。但是这种方法存在各目标函数的单位往往不一致,难以统一比较以及各指标的权值分配主观因素影响较大等缺点。

多目标优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \\ \text{s.t.} \quad g(x) = 0, h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为目标函数的个数; $g(x)$ 和 $h(x)$ 分别为等式和不等式约束条件。

为比较解的优劣,需要定义“支配”的概念。

如下两个条件都满足时,就定义“解 x_1 支配解 x_2 ”:

(1) 对于所有的目标函数, x_1 不比 x_2 差,即对于 $k=1, 2, \dots, n$, 都满足 $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$;

(2) 至少在一个目标函数上, x_1 比 x_2 好,即至少存在 $k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $f_k(x_1) < f_k(x_2)$ 。

对于解 x , 当且仅当不存在其他变量 y , 满足 y 支配 x , 则称解 x 为多目标优化问题的一个 Pareto 最优解。Pareto 最优解在多目标优化中往往不是唯一的,而是一个集合,称为 Pareto 最优解集。本文采用上述的 Pareto 最优准则来解决系统网损最小、电压偏移指数最小、负荷均衡度最优的多目标配电网重构问题。

1.4 潮流计算中不同类型 DG 的数学模型

传统配电网的节点有两类,即视为平衡节点的电源点和视为 PQ 节点的负荷点。而分布式电源并入配电网后,根据其在网络中的接入运行情况, DG

可用三类节点表示： P 、 Q 恒定型节点， P 、 V 恒定型节点和 P 、 I 恒定型节点^[13]。用前推回代法进行配电网潮流计算时，需针对不同节点类型构造相应的数学模型。

(1) P 、 Q 恒定型 DG 模型

早期并网的风电机组多使用异步发电机，当前主流的运行模式为通过无功自动投切装置维持其功率因数稳定，其输出的有功功率确定后，无功功率被确定，此类风机可视为 P 、 Q 恒定型节点。目前新建并网的风电机组多使用同步直驱和双馈感应发电机，这类风机也可视为 P 、 Q 恒定型节点。此类 DG 与功率大小相等的负荷相比，只是功率流向相反，潮流计算模型为

$$\begin{cases} P = -P_s \\ Q = -Q_s \end{cases} \quad (6)$$

式中， P_s 和 Q_s 分别为 P 、 Q 恒定型 DG 的有功功率和无功功率。

(2) P 、 V 恒定型 DG 模型

燃料电池和微型燃气轮机并网的输出电压恒定，输出有功功率可控，因此可视其为 P 、 V 恒定型节点。此类 DG 的潮流计算模型为

$$\begin{cases} P = -P_s \\ V = V_s \end{cases} \quad (7)$$

式中： P_s 和 V_s 分别为 P 、 V 恒定型 DG 的有功功率和电压。这与前推回代法要求负荷节点为 PQ 节点不相符，需对其进行无功修正。

$$\begin{cases} \Delta Q = X^{-1} \Delta U \\ Q_t = Q_{t-1} + \Delta Q \end{cases} \quad (8)$$

式中： ΔQ 为无功修正量； X 为 P 、 V 恒定型 DG 的节点电抗矩阵； ΔU 为节点电压增量； t 为迭代次数。

为了避免无功修正超出其给定的无功上、下限，将修正的无功方程改为如式(9)形式。

$$Q_t = \begin{cases} Q_{t-1} + \Delta Q, & -Q^{\max} \leq Q_{t-1} + \Delta Q \leq -Q^{\min} \\ -Q^{\max}, & Q_{t-1} + \Delta Q \leq -Q^{\max} \\ -Q^{\min}, & Q_{t-1} + \Delta Q \geq -Q^{\min} \end{cases} \quad (9)$$

式中： Q^{\max} 和 Q^{\min} 为 P 、 V 恒定型 DG 的无功上、下限。

(3) P 、 I 恒定型 DG 模型

此类 DG 的潮流计算模型为

$$\begin{cases} P = -P_s \\ I = I_s \end{cases} \quad (10)$$

式中： P_s 和 I_s 分别为 P 、 I 恒定型 DG 的有功功率和

电流。这类节点不符合前推回代法中负荷节点为 PQ 节点的要求，同样需对其进行无功修正。

$$Q_t = \sqrt{|I|^2 (e_{t-1}^2 + f_{t-1}^2) - P^2} \quad (11)$$

式中： Q_t 为第 t 次迭代的 DG 无功功率； e_{t-1} 和 f_{t-1} 分别为第 $t-1$ 次 P 、 I 节点电压的实部和虚部； I 为 P 、 I 节点电流幅值。

光伏并网多采用电压源型电流控制逆变器，通常用前推回代法进行潮流计算时视其为 P 、 I 恒定型节点，但光伏变流器在容量充裕时也可以进行无功控制，因此在算法具体操作过程中宜将不同类型的 DG 根据当时的运行工况等效为上述相应节点。

2 基本粒子群优化算法及其局限性

2.1 基本粒子群优化算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)最早由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出^[14]，PSO 算法源于对生物种群觅食行为的研究，是一种群体智能优化算法，具有工程应用面广的优点。基本 PSO 算法包括原始 PSO 算法和二进制 PSO(Binary PSO, BPSO)算法^[15]，分别用来解决连续空间和离散空间的优化问题。

PSO 算法在每次迭代过程中，粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置，即

$$\begin{cases} V_{id}^{t+1} = \omega V_{id}^t + c_1 r_1 (P_{id}^t - X_{id}^t) + c_2 r_2 (P_{gd}^t - X_{gd}^t) \\ X_{id}^{t+1} = X_{id}^t + V_{id}^{t+1} \end{cases} \quad (12)$$

式中： ω 为惯性因子，取正常数； c_1 和 c_2 为学习因子，取非负的常数； P_{id} 和 P_{gd} 分别为个体和全局的最优粒子位置； t 为当前迭代次数； V_{id} 和 X_{id} 为粒子速度和位置； r_1 和 r_2 是两个独立分布于[0,1]区间的随机数。

2.2 基本 PSO 算法应用于配电网重构的局限性

首先，基本 PSO 算法使用随机生成的编码方式，而配电网需满足辐射状无孤岛拓扑结构的要求，若使用随机生成粒子而不加以约束的编码方式，则无论是在群体的初始化阶段还是跟踪寻优阶段都会产生大量的不可行解，严重影响求解效率。

其次，基本 PSO 算法中惯性因子 ω 和学习因子 c_1 、 c_2 的设置若采用如式(12)所述的通用方式，易导致迭代寻优过程中出现局部收敛现象^[16-17]。

最后，在同时考虑多个优化目标的情况下，MOBPSO 算法中群体最优粒子的基本更新策略易陷入局部最优^[18]，需重新设计其更新方式。

针对以上问题，本文在应用 PSO 算法解决配电网重构问题时，进行了相应改进，提出了面向配电

网重构的改进 MOBPSO。

3 面向配电网重构的改进 MOBPSO

3.1 编码方式的改进

配电网的开关只有开、合两种状态, 所以采用 BPSO 算法的二进制编码较为合适, 每个粒子表示一种网络开关状态的组合, 0 表示该位对应开关打开, 1 表示该位对应开关闭合。

如图 1 所示 13 节点配电网, 节点 1 为电源点, 节点 2~13 为负荷点, 两节点间的实线和虚线分别代表分段开关和联络开关。

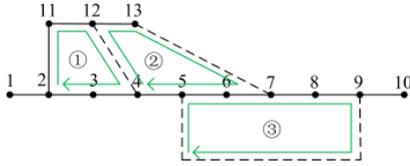


图 1 13 节点配电网

Fig. 1 Distribution network with 13 nodes

本文根据联络开关的位置和数量设定环的组成部分, 13 节点配电网包含如表 1 所示的 3 个环。

表 1 环的情况

Table 1 The state of ring

	环 1	环 2	环 3
	S2-11	S4-12	S5-6
	S11-12	S12-13	S6-7
开关	S12-4	S13-7	S7-8
	S4-3	S7-6	S8-9
	S3-2	S6-5	S9-5
		S5-4	

进而对编码方式进行了三点改进:

(1) 随机将所有环分别打开一个开关, 并要求打开开关总数等于环的总数, 避免出现环间公共开关被多次打开的情况;

(2) 不在任意环内的开关必须闭合;

(3) 对网络中所有节点进行遍历, 剔除出现孤立点的编码同时补充新的符合要求的编码。

通过以上三点改进, 大大降低了不可行解产生的概率, 在保证初始阶段和寻优阶段粒子质量的同时也保证了粒子的群体规模。

3.2 算法参数的改进

惯性因子 ω 体现了粒子继承先前速度的能力, 恒定的 ω 易使算法后期陷入局部最优^[16], 本文对 ω 进行了如下动态改进

$$\omega = \omega_0 + \rho(1 - \omega_0) \quad (13)$$

式中: ω_0 为惯性常量, 通常取 0.5; ρ 是 [0,1] 上服从均匀分布的随机数。

恒定的学习因子会抑制粒子对自身和社会信息学习程度的自适应调节能力^[19], 本文对 c_1 和 c_2 进行了如下改进

$$c_1 = c_{1a} + \frac{c_{1b} - c_{1a}}{t_{\max}} \times t \quad (14)$$

$$c_2 = c_{2a} + \frac{c_{2b} - c_{2a}}{t_{\max}} \times t \quad (15)$$

式中: c_{1a} 、 c_{2a} 分别为 c_1 和 c_2 的初始值; c_{1b} 、 c_{2b} 分别为 c_1 和 c_2 的迭代终值; t 和 t_{\max} 分别为当前和最大迭代次数。

动态的 ω 使粒子在全局寻优和局部搜索中不断平衡, 异步变化的 c_1 和 c_2 则使粒子在优化初期和后期分别具有较强的自我学习和社会学习能力。

3.3 群体最优粒子更新策略的改进

MOBPSO 中群体最优粒子的基本更新方式是从非劣解集中随机选择^[18], 这会使密集区域的非支配解获得更多被选机会, 易陷入局部最优。鉴于此, 本文对更新策略进行如下改进:

首先通过基于共享机制的小生境技术为非劣解集中的待选粒子分配选择度值, 非劣解集中第 i 个粒子的选择度值 F_i 为

$$F_i = \frac{1}{m_i} \quad (16)$$

式中, F_i 和 m_i 分别为粒子 i 的选择度值和共享度值。

$$m_i = \sum_{j=1}^n sh(d_{ij}) \quad (17)$$

式中: n 为非劣解集合规模; $sh(d_{ij})$ 为粒子 i 与粒子 j 的共享函数。

$$sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_{sh}}\right)^\lambda, & d_{ij} < \sigma_{sh} \\ 0, & d_{ij} \geq \sigma_{sh} \end{cases} \quad (18)$$

式中: d_{ij} 为粒子 i 和粒子 j 的海明距离; λ 为控制共享函数形状的参数; σ_{sh} 为小生境半径。

其次采用与选择度值成正比的比例选择算子, 从当前非劣解集中分别为每个粒子选择领导粒子。

上述方法使处于分散区域的非劣粒子拥有更大概率被选为领导粒子, 同时也保证了密集区域的非劣粒子仍有一定概率被选中。

3.4 算法流程图

图 2 为改进后算法的流程图, 左侧为初代粒子群生成部分, 右侧为算法的迭代寻优部分。

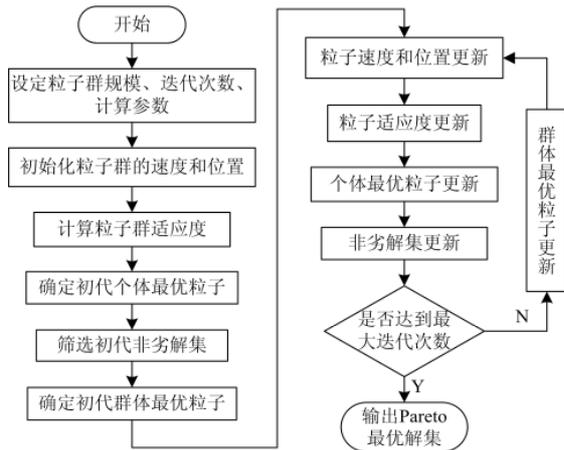


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

4 “后评价”选择机制

针对某一配电网通过上述改进算法进行多目标重构后，会得到一组 Pareto 备选解，根据决策者对各优化目标的偏好信息，本文提出如下的评价函数 $F(k)$ ，对备选解进行“后评价”处理。 $F(k)$ 中 a 、 b 、 c 是决策者提供的评价因子，各评价因子的大小反映了决策者对不同优化目标的偏好程度。

$$\left\{ \begin{aligned} F(k) &= a \times \frac{f_1(k) - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + b \times \frac{f_2(k) - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} + \\ &c \times \frac{f_3(k) - f_3^{\min}}{f_3^{\max} - f_3^{\min}}, \\ \text{s.t.} \quad &a + b + c = 1 \end{aligned} \right. \quad (19)$$

式中： $F(k)$ 为 Pareto 解集中第 k 个非劣解的评价值； a 、 b 、 c 为评价因子； $f_1(k)$ 、 $f_2(k)$ 、 $f_3(k)$ 分别为第 k 个非劣解关于 3 个目标函数的适应度值； f_1^{\max} 、 f_2^{\max} 、 f_3^{\max} 分别为重构结果中 3 个目标函数的最劣适应度值； f_1^{\min} 、 f_2^{\min} 、 f_3^{\min} 分别为重构结果中 3 个目标函数的最优适应度值。

每个备选解代入 $F(k)$ 后会得到一个评价值，通过评价值的大小对所有备选解进行排序，会得到一组带有优先级别的备选方案，为决策者确定最终的满意解提供指导。

5 算例分析

本文将 3 种类型共 4 个 DG 接入到文献[20]的 IEEE33 节点配电网作为算例，其拓扑结构如图 3 所示。该系统含 33 个节点，37 条支路，额定电压为 12.66 kV，系统总负荷为 3 715 kW+j2 300 kvar，DG 参数如表 2 所示。

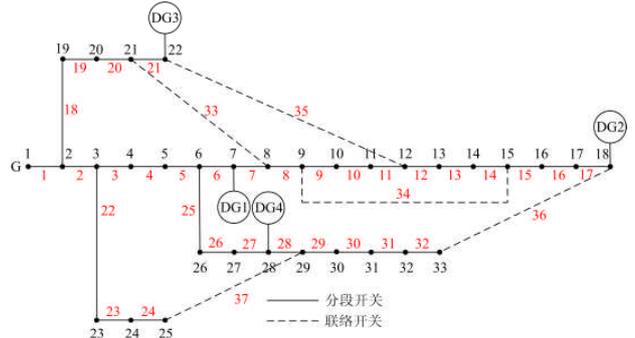


图 3 含 DG 的 33 节点配电网

Fig. 3 The 33 nodes distribution system containing DG

表 2 接入配电网的 DG 参数

Table 2 Parameters of DG connecting to the distribution network

DG 编号	DG 类型	容量/kW	功率因数	电压标么值	电流值/A
DG1	P、Q 型	100	0.85	-	-
DG2	P、I 型	85	-	-	9.0
DG3	P、V 型	100	-	1.0	-
DG4	P、V 型	200	-	1.0	-

重构前，DG 接入与否的网络状态如表 3 所示。

表 3 重构之前的网络状态

Table 3 State of network before reconfiguration

网络情况	网损 /MW	系统电压偏移指数	负荷均衡度	断开支路编号
未接 DG	0.202 7	0.117 7	0.747 9	33,34,35,36,37
接入 DG	0.133 8	0.068 9	0.502 1	33,34,35,36,37

由表 3 可以看出：本算例中 DG 的接入对网损、电压偏移指数和负荷均衡均有一定程度的改善。

以下从单目标与多目标重构的比较，算法改进前后的性能对比及重构方案的选择三个方面进行算例分析。

5.1 单目标与多目标重构的比较

为了与本文的多目标重构比较，首先对接入 DG 的配电网使用文献[15]的 BPSO 算法，分别对网损、系统电压偏移指数和负荷均衡度这三个指标进行单目标重构，重构方案如表 4 所示。

然后使用本文的改进 MOBPSO 算法对接入 DG

表 4 单目标重构方案

Table 4 Single objective reconfiguration scheme

方案	平均用时/s	网损/MW	系统电压偏移指数	负荷均衡度	断开支路编号
I	21	0.088 4	0.028 1	0.340 1	6,9,14,32,37
II	21	0.097 4	0.025 9	0.365 6	10,14,27,32,33
III	20	0.090 0	0.039 7	0.3235	6,9,14,31,37

的配电网进行多目标重构, 算法参数设置为: 搜索空间为 37 维, 最大迭代次数为 50 次, 粒子群规模为 50, 重构方案如表 5 所示。

表 5 多目标重构方案

Table 5 Multi-objective reconfiguration scheme

方案	平均 用时/s	网损/ MW	系统电压 偏移指数	负荷均 衡度	断开支 路编号
1		0.088 4	0.028 1	0.340 1	6,9,14,32,37
2		0.097 4	0.025 9	0.365 6	10,14,27,32, 33
3	27	0.094 5	0.028 4	0.336 5	6,9,14,27,32
4		0.090 0	0.039 7	0.323 5	6,9,14,31,37
5		0.089 5	0.029 8	0.338 2	7,9,14,32,37

对比表 4 和表 5 可以看出: 表 4 的单目标重构分别对每个目标优化, 通常需要 3 次计算得到 3 种单目标最佳方案, 共计用时约为 62 s, 方案 I 使网损最小, 方案 II 使系统电压偏移指数最小, 方案 III 使负荷均衡度最佳。而表 5 的多目标重构通常只需 1 次计算即可得到多种方案, 用时约为 27 s, 表 5 不仅包含了表 4 的所有单目标最优解, 还能得到方案 3 和 5 这两种整体性能较好的 Pareto 解, 可见本文的多目标重构在提供备选方案数量及寻优用时上均优于单目标重构。

5.2 MOBPSO 算法改进前后的性能对比

本文将改进后的 MOBPSO 算法与其改进之前进行了性能比较 (改进前后均对算例连续计算 50 次), 其中改进前算法参数设置如式(12)所示, 群体最优粒子的更新方式为随机式。改进后参数设置以及群体最优粒子的更新方式如本文第 3 节所述, 改进前后的性能对比情况如表 6 所示。

表 6 性能对比

Table 6 Performance comparison

	平均迭代次数	收敛到 Pareto 解集比率
改进前	33.5	78%
改进后	27.7	92%

由表 6 可知, 改进后的算法在寻优效率和收敛稳定性方面均好于改进之前, 对比结果验证了在应用 MOBPSO 算法解决多目标配电网重构问题时, 本文的改进较大程度上提升了算法的寻优性能。

5.3 重构方案的“后评价”选择

根据决策者提供的偏好信息, 通过本文第 4 节的评价函数对表 5 中所有方案进行排序。例如, 决策者着重偏好低网损并以相同程度兼顾系统电压偏移和均衡负荷时, 其提供的评价因子为 $a=0.5$, $b=c=0.25$, 代入式(19)并排序后可得表 7 所示结果。

表 7 排序结果

Table 7 The sorted results

重构方案	评价值
1	0.138 4
5	0.219 1
4	0.338 9
3	0.461 4
2	0.750 0

由表 7 可以看出: 在上述偏好情况下方案 1 最符合决策者的要求。

对比表 3 中重构之前含 DG 的配电网和从表 5 中选出的方案 1 的各目标函数值, 计算后可以发现: 重构之后的系统网损降低了 33.93%, 电压偏移指数改善了 59.22%, 负荷均衡度改善了 32.36%。此外, 方案 1 和重构前配电网的各节点电压信息如图 4 所示, 可知重构方案 1 提升了系统的最低节点电压, 改善了全网电压分布。上述算例结果验证了本文重构模型和改进算法的正确性和有效性。

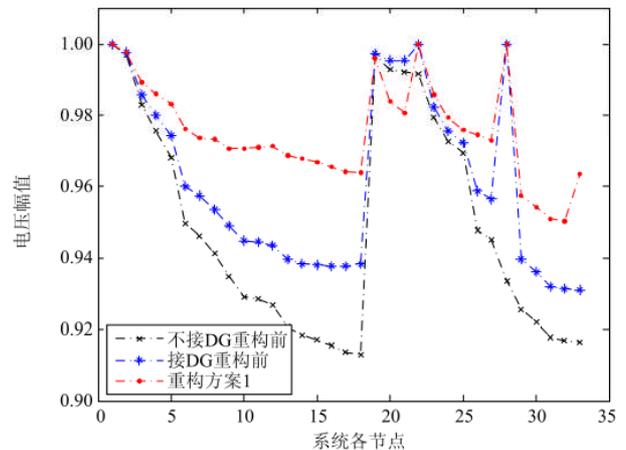


图 4 33 节点配电系统重构前后各节点电压

Fig. 4 Voltages of nodes before and after 33 nodes distribution system reconfiguration

6 结论

本文提出了一种同时考虑含多类分布式电源的多目标配电网重构模型, 满足了含不同类 DG 配电网的优化需求; 与单目标重构相比, 可为决策者提供更多的重构选择, 更有实际意义。

在编码方式、算法参数因子以及群体最优粒子更新策略三个方面对 MOBPSO 算法进行了改进, 算例结果表明了本文改进的有效性。

本文将所提模型、改进算法与带有决策偏好的评价机制配合使用, 体现了“先优化、后评价”的重构思想, 可为决策者提供一组带有优先级别的重构方案, 用于指导其确定最终的满意解。

参考文献

- [1] KASHEM M A, JASMON G B, GANAPATHY V. A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization[J]. Electric Power & Energy System, 2000, 22: 269-276.
- [2] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14. TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [3] 刘健, 毕海翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 184.
- [4] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 192-193.
- [5] AOKI K, KUWABARA H, SATOH T, et al. An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 3(4): 865-872.
- [6] RAJU G K, BIJWE P R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1401-1407.
- [7] 尹洪, 刘天琪, 李樊, 等. 基于免疫遗传算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(4): 15-19. YIN Hong, LIU Tianqi, LI Fan, et al. Distribution network reconfiguration with different distributed generation based on immune genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 15-19.
- [8] 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): 71-75. LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75.
- [9] 黄弦超, 杨雨. 基于电流分点编码的遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 74-79. HUANG Xuanchao, YANG Yu. Network reconfiguration in distribution systems based on genetic algorithm with current point coding technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 74-79.
- [10] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 41-48. LI Chenlei, WEI Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [11] 黄焯. 一种基于 MOGA 的含 DG 配电网多目标重构方案[J]. 自动化与信息工程, 2012, 33(2): 8-12. HUANG Ye. A multi-objective reconfiguration formula for DG distribution network based on MOGA[J]. Automation & Information Engineering, 2012, 33(2): 8-12.
- [12] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 57-62. LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 57-62.
- [13] THOMSON M, INFELD D G. Network power-flow analysis for a high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1157-1162.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C] // Proceedings of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Orlando, USA: IEEE, 1997: 4104-4108.
- [16] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer[C] // Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, USA: IEEE, 1998: 69-73.
- [17] RATNAWEERA A, HALGMUGE S, WATSON H C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 240-255.
- [18] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 103-135.
- [19] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 291-293.
- [20] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2015-09-07

作者简介:

卢扬(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: luyangmobpso@sina.com

吴俊勇(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 继电保护, 轨道电气化, 电力信息化, 电力市场;

郝亮亮(1985-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统主设备继电保护, 新能源与电力电子技术, 电力系统分析与控制。

(编辑 葛艳娜)