

DOI: 10.7667/PSPC180507

基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究

李 锰¹, 王利利¹, 刘向实², 杨德昌³, 李 鹏¹

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于主动配电网的发展潮流, 提出了一种基于改进遗传算法的主动配电网多目标重构模型。首先, 将功率损耗、电压偏移和系统稳定裕度等指标融合到目标函数中, 并引入判断矩阵法和线性加权法确定各个指标的权重和实现多目标函数的转化。其次, 针对传统遗传算法的弊端, 提出了基于“门当户对”原则的多种染色体交叉策略, 丰富了种群进化方式的多样性, 算法计算效率和寻优能力得到大大加强。最后通过设定临界值, 实现主动配电网的自我感知和主动重构, 提高配电网安全性和稳定性。仿真算例表明, 所提出的模型和算法以及主动重构的理念符合当前主动配电网主动运行和主动控制的思路, 具有较为广泛的应用前景。

关键词: 主动配电网重构; 多目标; 分布式电源; 改进遗传算法

Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the “properly matched marriage” genetic algorithm

LI Meng¹, WANG Lili¹, LIU Xiangshi², YANG Dechang³, LI Peng¹

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the developmental trend of active distribution network, this paper presents a multi-objective reconfiguration model of active distribution network based on the improved genetic algorithm. First of all, the power loss, voltage offset and system stability margin are combined with the objective function, in which the weight of each index can be acquired through the judgment matrix method and the multiple problems will be transformed to single problem by using the linearity weighted method. Secondly, aiming at reducing the drawbacks of traditional genetic algorithm, it puts forward several methods for swapping chromosomes based on the principle of “properly matched marriage”. In this case, the several methods can enrich the evolutionary ways of population, and the computational efficiency and the searching ability of the algorithm are greatly enhanced. Finally, the active distribution network will gain the ability of active reconfiguration and self-perception to improve the security and stability of the distribution network by setting the threshold. The results of simulation show that the model, algorithm and the concepts of active reconfiguration proposed in this paper are in accord with the new ideas of active distribution network, which have wide application prospects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407186).

Key words: active distribution network reconfiguration; multi-objective; distributed generation; improved genetic algorithm

0 引言

配电网是直接面向用户、连接输电系统和负荷的重要环节, 是保障供电质量、提高电网运行效率的关键。配电网的重构可以有效降低系统的网损、

提高系统可靠性和安全运行水平, 对于当前主动配电网建设具有重要意义^[1-2]。

近年来国内外学者对配电网重构展开了大量的分析研究, 取得了一系列的研究成果: (1) 在重构模型构建方面, 大部分研究都以有功网损最小为目标函数, 未兼顾系统的电压水平、负荷平衡以及可靠性等因素^[3-5]。另一方面, 已有的配电网重构研究无

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51407186)

论是正常情况下以网损最小而做出的网络结构优化还是故障情况下的重构往往是被动的, 没有体现预告和主动性, 不符合当今主动配电网的发展趋势。

(2) 在求解算法分析方面, 配电网重构的方法主要有分支定界法^[6]、支路交换法^[7-9]、最优流模式法^[10]、模拟退火法^[11]、遗传算法^[12-15]、粒子群算法^[16-18]、萤火虫算法^[19]等。其中, 分支定界法面对大规模配电网计算量太大而难以奏效, 支路交换法配电网重构的结果与配电网的初始结构有关, 不能保证全局最优, 最优流模式法经两次环网潮流计算才能确定一个开关的断合, 计算量大, 算法编程较复杂。启发式算法存在搜索效率低、难以收敛全局最优解的问题。(3) 在分布式电源的处理方式方面, 大部分研究将其看成是 PQ 型分布式电源来处理^[20-21], 对于分布式电源的不确定性和波动性对配电网重构的影响分析不够全面和深入。

为了满足当前配电网发展趋于主动性的要求, 本文提出了考虑有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度的含不同类型 DG 的多目标主动配电网重构模型。该模型将分布式电源看成 PQ、PV、PQ(V) 三种基本类型接入配电网^[22], 利用“门当户对”遗传算法对配电网重构进行求解。为了避免传统遗传算法的早熟现象和削弱寻优抖振问题, 对传统遗传算法做出改进。给出了多种交叉算子和单点替换的变异算子, 在交叉操作过程中, 不同于传统遗传算法的随机配对方式, 采用“门当户对”的原则进行配对。同时, 将本文开发的主动配电网重构策略应用于配电网在线监控系统。基于管理人员在远程监控配电网运行状态时, 当配电网的目标函数低于临界值, 配电网主动重构寻优以改善当前配电网运行状态。最后在 IEEE33 节点配电系统上对算法进行了验证。

1 主动配电网重构的数学模型

1.1 目标函数

本文兼顾配电网运行的经济性和安全性指标, 以有功损耗最低、电压偏移最小和电压稳定裕度最小为目标函数建立含分布式电源的主动配电网重构模型。

(1) 从经济层面出发, 以有功损耗最小为目标函数。

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^N k_j R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2} \quad (1)$$

式中: f_1 为配电网有功损耗; N 为配电网支路总数; k_j 表示支路开关状态, k_j 为 0 表示支路断开, k_j 为 1 表示支路闭合; R_j 为支路 j 的电阻; P_j 和 Q_j 分

别为支路 j 末端流过的有功和无功功率; U_j 为支路末端节点电压。

(2) 从电压偏移层面出发, 以电压偏移之和最小为目标函数^[23]。

$$f_2 = \min \sum_{j=1}^M \frac{|U_j - U_N|}{U_N} \quad (2)$$

式中: f_2 为电压偏移之和; M 为节点个数; U_j 为节点 j 的电压值; U_N 为线路额定电压值。

(3) 从电压稳定裕度层面出发。以电压稳定裕度指标最小为目标函数。电压稳定性是衡量电网安全性与可靠性的重要指标。配电网潮流解存在性的电压稳定判据为^[24]

$$L_{ij} = \frac{4[(P_j X_{ij} - Q_j X_{ij}) + (P_j R_{ij} + Q_j X_{ij}) U_i^2]}{U_i^4} < 1 \quad (3)$$

$$f_3 = \min \max(L_1, L_2, \dots, L_N) \quad (4)$$

式中: L_{ij} 为支路 ij 的电压稳定指标; P_j 和 Q_j 为流入支路节点 j 的有功和无功功率; R_{ij} 和 X_{ij} 为支路 ij 的电阻和电抗; f_3 为电压稳定裕度指标, f_3 越小系统越稳定。

1.2 约束条件

配电系统网络重构应该同时满足以下约束条件。

(1) 配电网的潮流约束。

(2) 网络拓扑约束 $g_k \in G$, g_k 为重构后网络拓扑结构, G 为所有可行的辐射状网络结构的集合。

(3) 电压、电流约束

$$\begin{cases} U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max}, j=1, 2, \dots, M \\ I_j \leq I_{j\max}, j=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_{j\min}$ 和 $U_{j\max}$ 分别为节点 j 电压的下限和上限; $I_{j\max}$ 为支路 j 电流的上限。

(4) 分布式电源出力限制

$$P_{DGj} \leq P_{j\max} \sum_{j=1}^{n_{DG}} P_{DGj} \leq 0.25 \sum_{j=1}^n P_{load,j} \quad (6)$$

分布式电源总出力一般不超过总负荷的 25%; 各节点处分布式电源受其出力上、下界的限制。

1.3 分布式电源的处理

分布式电源接入配电网的模型可看成以下三类情况: PQ 型分布式电源、PV 型分布式电源和 PQ(V) 型分布式电源。本文基于三类分布式电源的处理办法对传统前推回代法进行改进。

(1) PQ 型分布式电源

在潮流计算中, 采用功率因数控制的分布式电源可作为 PQ 型分布式电源, 简单地认为是“负的

负荷”来进行处理,例如采用异步电动机的并网型风力发电机在潮流计算中可视为 PQ 节点。

$$\begin{cases} P_j = -P_s \\ Q_j = -Q_s \end{cases} \quad (7)$$

(2) PV 型分布式电源

微型燃气轮机以及燃料电池并网输出恒定的电压,输出可控的有功功率,可以将其视为 PV 型分布式电源。对于 PV 型分布式电源,把有功功率和电压看成是恒定,每次迭代过程中通过电压偏差来修正无功功率^[25]。

$$\begin{cases} P_j = -P_s \\ U = U_s \\ Q_j^{t+1} = Q_j^t + f(\Delta U^t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 为迭代次数; $f(\Delta U^t)$ 为无功修正量。

实际中为了避免无功越限需进行无功修正:

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

式中, Q_j^{\max} 和 Q_j^{\min} 分别为无功上下限。

(3) PQ(V)型分布式电源

定速恒频的异步风力发电机,由于本身没有励磁装置,靠电网的同步发电机为其提供励磁电流。在潮流计算中认为输出恒定的有功功率、吸收的无功功率满足以下关系^[22]:

$$Q = -\frac{U^2}{x_m} + \frac{-U^2 + \sqrt{U^4 - 4P^2x^2}}{2x} \quad (10)$$

式中, x_m 和 x 分别为励磁电抗、发电机定子与转子电抗之和。

1.4 权重的处理

多目标问题可以只保留一个目标函数,将其他子目标函数以约束条件的形式加以体现,但这种做法往往会产生一系列的不可行解。本文采用判断矩阵法^[26]确定权重并通过线性加权法将多目标问题转化为容易求解的单目标问题,表达式如式(11)。

$$F = \min(w_1 f_1' + w_2 f_2' + w_3 f_3') \quad (11)$$

式中: w_1 、 w_2 、 w_3 是权重; f_1' 、 f_2' 、 f_3' 是归一化后的值,目的是为了消除数量级以及量纲不同对结果的影响。针对有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度指标,本文采用的是最小最大的归一化方法。

$$f_i' = \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} \quad (12)$$

式中: f 、 f_i' 分别表示指标 i 归一化前、后的值; f_i^{\max} 、 f_i^{\min} 分别表示指标 i 的最大值和最小值。

判断矩阵法的核心是依据决策者或者专家的经验构建判断矩阵,用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果。判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

表 1 判断矩阵形成准则

Table 1 Rule of constructing judgment matrix

尺度	含义
1	第 i 个因素与第 j 个因素一样重要
3	第 i 个因素与第 j 个因素稍微重要
5	第 i 个因素与第 j 个因素明显重要
7	第 i 个因素与第 j 个因素强烈重要
9	第 i 个因素与第 j 个因素极端重要

注: 2,4,6,8 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的重要性介于两个相邻等级之间。

构造完判断矩阵后,求出判断矩阵 A 的最大特征值,并对最大特征值对应的特征向量进行归一化处理后即得到了有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度指标的权重。

$$\lambda_{\max} = \max(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (13)$$

$$w_i = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

式中: n 表示指标的个数; λ_i 表示判断矩阵的第 i 个特征值; λ_{\max} 表示判断矩阵的最大特征值; w_i 表示第 i 个指标对应的权重; x_i 表示最大特征值对应特征向量的第 i 个元素。

针对到本文的优化问题,对有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度指标构建判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

经过矩阵处理后,得到各目标权重向量为 $W = [0.4934 \ 0.1958 \ 0.3108]$ 。

2 改进的遗传算法

2.1 编码方式的改进

传统智能算法一般采用二进制编码。每个开关都用 1 或者 0 表示,1 代表开关闭合,0 代表开关打

开。但是这种方式编码会产生大量的不可行解, 所谓的不可行解就是产生的解的拓扑结构含有孤岛或者含有环网, 总之不是树。不可行解的存在加大了搜索空间, 降低了搜索效率。为了改善搜索效率, 应该尽量减少不可行解的产生。本文在参考文献[3]编码方法的基础上采用十进制编码, 步骤如下所述。

(1) 将全部开关闭合, 找出网络结构中全部的环网, 假定为 n 个。

(2) 分别从 n 个环网中随机取一个开关并令其断开, 断开的开关不能是同一个。

(3) 用广度优先搜索算法判断当前网络拓扑结构是否符合树。如果满足则进行下一步计算目标函数, 不满足则返回步骤(2)。

2.2 改进交叉算子和变异算子

遗传算法作为现代优化算法之一, 能跳出局部最优寻找全局最优特性的关键都是基于交叉和变异操作^[27]。传统遗传算法大都采用单点交叉, 变异是在交叉的基础上进行的, 强调的是交叉。在变异操作中, 也有学者采用高斯分布、柯西分布和利维分布改进变异算子^[28-29], 但仿真结果显示, 改善变异算子对算法效果的提升不明显。鉴于此, 本节将提出多种交叉算子, 保证交叉更多的基因, 解决基于单点交叉的早熟问题。在交叉过程中, 不同于传统遗传算法的随机配对方式, 而采用“门当户对”的原则进行配对^[27]。所谓的“门当户对”原则就是目标函数值大的跟大的配对, 目标函数值小的跟小的配对。就变异而言, 采用单点变动能保证算法的收敛精度, 削弱交叉强度过大而产生寻优抖振问题。

(1) 单点交叉

假定闭合全部开关后有 n 个环网, 随机从染色体库中收取两个父代的染色体 $father = w_1 w_2 \dots w_n$ 、 $mother = e_1 e_2 \dots e_n$ 随机地选取交叉位置 t , 将两个父代的染色体位置 t 之后的部分基因进行交换:

$$\begin{cases} son = w_1 w_2 \dots w_t e_{t+1} e_{t+2} \dots e_n \\ daughter = e_1 e_2 \dots e_t w_{t+1} w_{t+2} \dots w_n \end{cases} \quad (16)$$

(2) 多点交叉

假定闭合全部开关后有 n 个环网, 在交叉过程中以“门当户对”的原则从染色体库中收取两个目标函数值相近的染色体 $father = w_1 w_2 \dots w_n$ 、 $mother = e_1 e_2 \dots e_n$ 。随机地选取交叉位置 t_1 和 t_2 , 将两个父代染色体中 t_1 和 t_2 之间的部分染色体交换:

$$\begin{cases} son = w_1 w_2 \dots w_{t_1-1} e_{t_1} \dots e_{t_2} w_{t_2+1} \dots w_n \\ daughter = e_1 e_2 \dots e_{t_1-1} w_{t_1} \dots w_{t_2} e_{t_2+1} \dots e_n \end{cases} \quad (17)$$

(3) 单点变异

随机选一个染色体变异的位置 t_1 , 从对应环网中随机抽取一个支路替代原来 t_1 位置的基因。

$$\begin{cases} father = w_1 w_2 \dots w_{t_1-1} w_{t_1} w_{t_1+1} \dots w_n \\ son = w_1 w_2 \dots w_{t_1-1} w'_{t_1} w_{t_1+1} \dots w_n \end{cases} \quad (18)$$

2.3 算法流程图

基于改进的遗传算法, 本文提出的配电网主动重构算法步骤如下:

(1) 首先利用蒙特卡洛法初始化种群, 并计算初始种群的适应度函数。

(2) 设定一个随机数, 以一定概率选择单点交叉或者多点交叉, 在交叉操作过程中以“门当户对”原则选择交叉个体。

(3) 设定一个随机数, 按照设定的概率进行单点变异。

(4) 检验新产生的染色体是否满足拓扑结构约束, 不满足的话进行校正。

(5) 计算个体的适应度并判断是否达到最大进化次数, 是则输出结果, 否则返回步骤(2)。

本文提出的改进遗传算法的流程如图 1 所示。

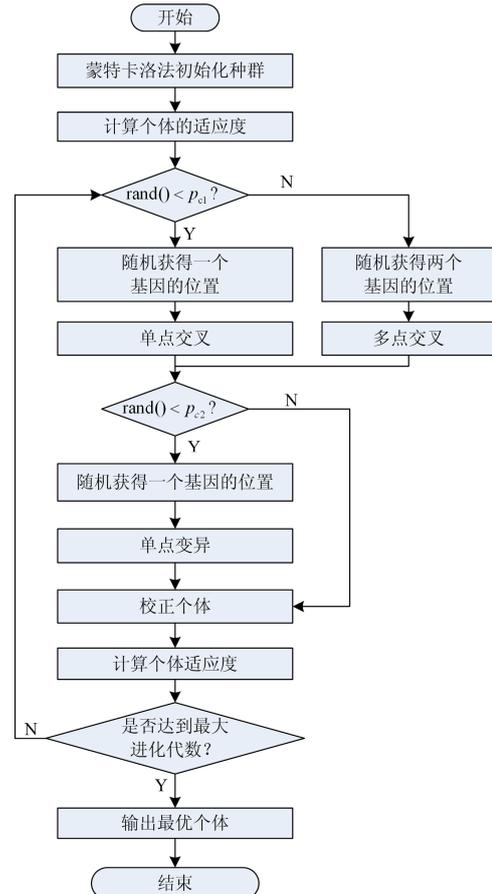


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the improved genetic algorithm

3 主动配电网重构的在线监控

随着配电自动化系统和智能配电网建设的不断深入，配电网的自动化、信息化和智能化水平得到了较大的提升，部分区域已经初步实现了“四遥”的功能^[30]。在主动配电网的架构下，如何基于配电网的态势感知能力和信息通信水平，构建自我优化和主动控制的实时监控平台，一直是当前研究的热点。本文以配电网的主动重构为研究对象，构建的配电网信息实时交互平台示意图如图 2 所示^[31]。

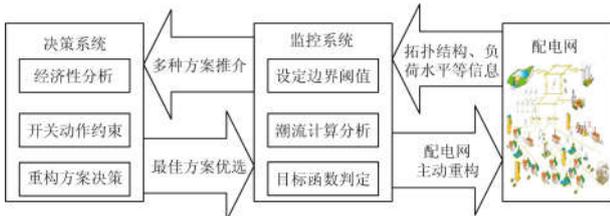


图 2 主动重构策略分析

Fig. 2 Active reconfiguration strategy analysis

在图 2 中，监控系统全天在线监控配电网运行状态，能实时获取当前配电网的拓扑结构以及负荷水平等信息。基于获取的这些信息经过潮流计算以及多目标的配电网重构进而求得目标函数。若当前目标函数小于整定的临界值时将主动发出警告，并综合考虑开关极限操作次数和开关操作费用能够为决策者提供多种有效的重构方案。将这些重构方法传到远方的决策系统，并有决策系统中的运行维护人员进行决策，确定最优的重构方案，最后由监控系统控制配电网进行主动重构。

4 算例分析

本文将 3 种类型的分布式电源共 3 个分别接入到 IEEE33 节点配电系统中，其拓扑结构如图 3 所示。支路、负荷参数取自文献[32]，1 为平衡节点，基准功率为 10 MVA，平衡节点电压为 10.5 kV，基准电压为 10 kV。DG 参数如表 2 所示。

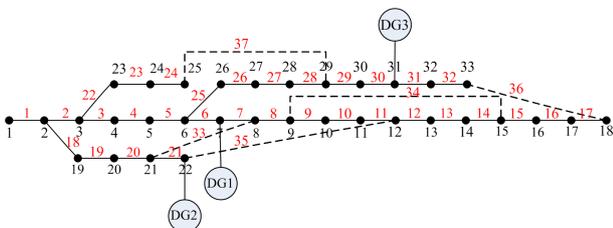


图 3 含 DG 的 33 节点配电系统

Fig. 3 The 33 nodes distribution system with DG

表 2 接入的 DG 参数表

Table 2 Parameters of the integrated DGs

编号	类型	容量/kV·A	电压/kV	接入位置
DG1	PQ	500+500j	—	7
DG2	PV	500	10	22
DG3	PQ(V)	500	—	31

4.1 基于多目标的主动配电网重构算例

针对某个时刻的负荷水平，评估 DG 接入对配电网的影响，并考虑有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度等因素，对含不同类型的 DG 配电网主动重构。重构前，DG 接入前后的网络状态如表 3 所示。

表 3 重构前网络状态

Table 3 State of network before reconfiguration

拓扑结构	网损/kW	电压偏移	电压稳定裕度指标	断开支路
未接 DG	317.95	1.680 1	0.020 4	33,34,35,36,37
接入 DG1	220.75	1.243 6	0.020 2	33,34,35,36,37
接入 DG2	315.28	1.705 5	0.020 4	33,34,35,36,37
接入 DG3	237.36	1.331 6	0.020 3	33,34,35,36,37
接入 DG1、DG2、DG3	155.83	0.943 4	0.020 1	33,34,35,36,37

从表 3 看出，分别单独接入一定容量的 PQ 型和 PQ(V)型分布式电源使得网损下降、电压偏移减小、电压稳定裕度指标下降，验证了文献[24]的仿真结果。PV 型分布式电源单独接入虽能减少一定的网损，却使得网络的电压偏移和电压稳定裕度指标上升，不利于配电网的安全性。综合接入一定容量的 3 种分布式电源使得网损下降、电压偏移和电压稳定裕度指标减小。

设置初始种群数为 200，基因长度等于环网数为 5 位，单点交叉的概率 $p_{c1} = 0.5$ ，多点交叉的概率 $p_{c2} = 0.5$ ，变异概率 $p_b = 0.1$ ，最大进化代数为 200 次。重构前后网络状态如表 4 和图 4 所示。

表 4 重构后网络状态

Table 4 State of network after reconfiguration

	网损/kW	电压偏移	电压稳定裕度指标	断开支路
含 DG 重构前	155.83	0.943 4	0.020 1	33,34,35,36,37
含 DG 重构后	93.15	0.571 8	0.019 9	9,14,20,30,37

从表 4 可以看出，重构之后网损大大减小，同时，仿真模型的电压偏移和电压稳定裕度指标得到了明显的下降，这表明本文提出的配电网重构模型能够显著提升系统的经济性和可靠性。另外，从图 4 也可以看出，重构后系统的节点最低电压上升，电压分布较为均匀，改善了全网电压分布。

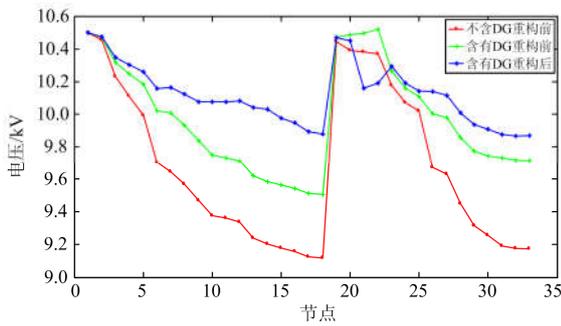


图 4 重构前后节点电压对比示意图

Fig. 4 Comparison of the node voltages before and after the network reconfiguration

为验证提出的改进遗传算法的性能, 本文对遗传算法改进前后依次测试 50 次, 得到的结果如表 5 所示。

表 5 传统遗传算法和改进遗传算法的比较

Table 5 Comparison of traditional and proposed genetic algorithms (PGA)

算法	平均迭代次数	最优函数值	均值	方差	时间/s
GA	13	0.408 5	0.427 9	0.022 4	4.55
PGA	7	0.408 5	0.211 8	0.011 6	1.67

从表 5 中可以看出, 提出的门当户对遗传算法和传统遗传算法都能得到准确的结果, 但本文提出的算法无论是寻优的精度还是收敛速度都优于传统遗传算法, 且算法的稳定性也比传统遗传算法得到了加强, 这是因为引入了多种交叉策略, 丰富了生物进化的多样性, 使得遗传算法的搜索能力和稳定性得到了提升。

4.2 基于在线监控的主动配电网重构算例

仍以 IEEE33 节点配电系统作为算例, 典型日负荷曲线取自文献[23]。将一天分为 24 个时刻, 全程监控网络拓扑结构及负荷水平的变化并计算目标函数值。基于本文构建的重构目标函数和门当户对遗传算法, 将主动重构的目标函数临界值设定为 2(根据不同的拓扑结构和配电网运行特征进行设定)。显然, 当计算得到的目标函数值大于设定临界值的时候, 配电网主动进行重构寻优以改善当前配电网运行状态。一般而言, 在主动重构的策略中, 如果不设定开关的关断次数, 配电网将会主动重构到目标函数最优的运行状态, 为了更好地切合配电网运行的实际情况, 以开关的关断次数为依据, 本文设定了 6 种不同的重构方案。在此条件下, 得出在 24 h 的时间内, 6 种重构方案的对比情况如图 5 所示。

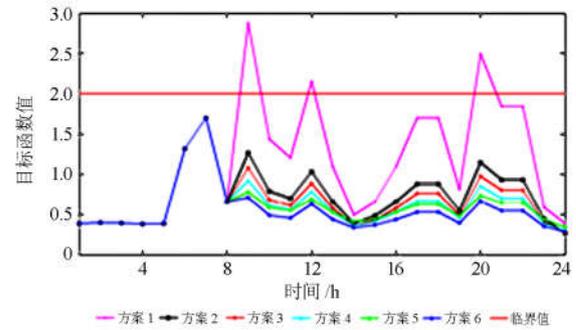


图 5 在线计算变化的目标函数值

Fig. 5 Online computation of the objective function

从图 5 可以看出, 如果配电网没有主动重构能力(也就是方案 1 的情况), 系统在 9 h、12 h 和 20 h 这 3 个时刻的目标函数值都大于临界值 2, 不利于配电网的安全经济可靠运行。如果配电网具备主动重构能力, 在 9 h 时刻监控系统反馈网络运行状态, 并计算出目标函数值已经超过临界值, 配电网会在该时刻主动进行重构寻优。在经过一次重构后, 后续的运行时间内目标函数值均低于设定的阈值, 这说明系统运行在安全经济的区间内, 随着设定开关次数的增加, 系统会不停地进行重构优化, 直到满足最优的运行状态。6 种不同重构方案的目标函数值对比情况如表 6 所示。

表 6 不同主动重构方案的比较

Table 6 Comparisons of different reconfiguration schemes

方案	1	2	3	4	5	6
开关至多操作次数	0	2	4	6	8	无限制
网损/kW	4 989	3 711	3 585	3 516	3 617	3 417
电压偏移	32.78	28.50	23.71	24.02	23.84	22.61
电压稳定裕度	0.54	0.49	0.53	0.54	0.48	0.49
目标函数 (24 h 之和)	27.98	22.63	21.76	21.65	21.48	21.06
断开支路	33-343	8-33	7-8	7-10	6-11	9-14
	5-36	34-36	34-36	14-36	14-36	20-30
	37	37	37	37	37	37

从表 6 中可以得出以下的结论: (1) 随着开关动作次数的增多, 配电网将会主动重构到最优的运行状态, 这体现在 24 h 内目标函数的总和值越来越小; (2) 三个子目标函数的最优结果是互相矛盾的, 这与文献[33]研究的结果一致, 因此在进行多目标重构时, 应结合配电网当前的运行状态和重构目的进行开关的动作; (3) 当配电网的运行状态超过设定的阈值时, 将会有多种可行的重构方案, 为确定最优的重构方案, 需要对计及开关动作次数的重构方案进

行比较, 得出的多种重构方案的对比示意图如图 6 所示。

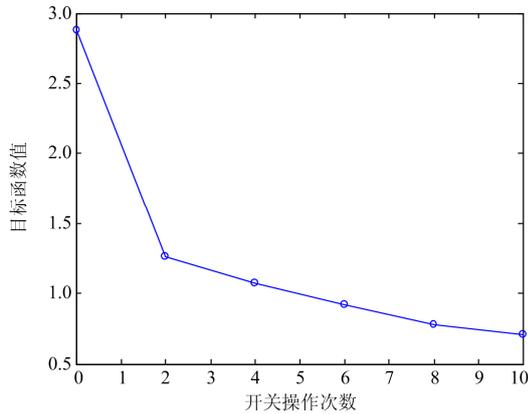


图 6 目标函数随开关操作次数的变化趋势
Fig. 6 Objective function variations with the switching operation times

从图 6 可以看出, 随着开关操作次数的增加, 重构后目标函数下降, 对应的目标函数的灵敏度也在发生变化, 从经济的角度考虑应该找到斜率变化最大又能满足系统安全性的点。在本文所用的仿真模型中, 方案 2 最佳, 即只通过不同开关的一次关断和闭合就可以达到配电网最优的重构方案。

5 结论

(1) 本文在考虑有功损耗、电压偏移和电压稳定裕度等多个因素的基础上提出一种含多种分布式电源的主动配电网重构模型, 并将改进的遗传算法引入主动配电网重构问题中, 满足了含不同类型分布式电源配电网优化问题的重构需求。

(2) 针对遗传算法在配电网重构求解方面存在的典型问题, 引入门当户对的原则对交叉策略和配对方案进行了改进, 并通过仿真算例验证了改进的遗传算法在收敛速度和收敛精度方面的优势。

(3) 基于改进遗传算法和当前配电网的智能化水平, 提出含分布式电源的多目标配电网主动重构策略, 通过设定目标函数的阈值, 让配电网主动进行重构, 以满足主动配电网灵活性、自适应性的发展要求。

参考文献

[1] 张大海, 江世芳, 赵建国, 等. 配电网重构研究的现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(2): 75-76.
ZHANG Dahai, JIANG Shifang, ZHAO Jianguo, et al. The achievements and prospect of distribution network reconfiguration research[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 75-76.

[2] CHEN Qixin, ZHAO Xiangyu, GAN Dahua. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.

[3] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.

[4] 吴登国, 李晓明. 基于极限学习机的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 47-51.
WU Dengguo, LI Xiaoming. Distribution grid reconfiguration based on extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 47-51.

[5] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.

[6] 平原, 郭艳东, 周波, 等. 基于最优潮流的配电网重构[J]. 甘肃科技纵横, 2014, 43(12): 24-28.
PING Yuan, GUO Yandong, ZHOU Bo, et al. Distribution network reconfiguration based on optimal power flow[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2014, 43(12): 24-28.

[7] 张栋, 张刘春, 傅正财, 等. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.
ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai, et al. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.

[8] 李启旺, 袁荣湘, 丁伟, 等. 灵敏度分析与支路交换法相结合的配电网重构算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 62-65.
LI Qiwang, YUAN Rongxiang, DING Wei, et al. A comprehensive method for distribution network reconfiguration based on sensitivity analysis and branch-exchange algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 62-65.

[9] 李辰雷, 卫志农, 韩连山, 等. 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, et al. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [10] 赵静翔, 牛焕娜, 王钰竹. 基于信息熵时段划分的主动配电网动态重构[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 402-408.
ZHAO Jingxiang, NIU Huanna, WANG Yuzhu. Dynamic reconfiguration of active distribution network based on information entropy of time intervals[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 402-408.
- [11] 张珂, 吕林, 孙宇乐. 基于隶属度时段划分的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 51-57.
ZHANG Ke, LÜ Lin, SUN Yule. Dynamic reconfiguration of distribution network based on membership partition of time intervals[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 51-57.
- [12] 邹必昌, 龚庆武, 李勋, 等. 基于负荷平衡的配电网重构遗传算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 80-83.
ZOU Bichang, GONG Qingwu, LI Xun, et al. Research on network reconfiguration GA in distribution system based on load balancing[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 80-83.
- [13] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根, 等. 基于改良策略的配电网重构遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 49-54.
LI Xiaoming, HUANG Yanhao, YIN Xianggen, et al. A genetic algorithm based on improvement strategy for power distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 49-54.
- [14] 张逸. 主动配电网多目标网络重构研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 29-35.
ZHANG Yi. Active distribution network multi-objective reconfiguration research[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 29-35.
- [15] 江卓翰, 何禹清, 曹丽璐, 等. 基于改进遗传算法的含分布式电源和储能装置配电系统网络重构[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 68-72.
JIANG Zhuohan, HE Yuqing, CAO Lili, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations and energy storing devices based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 68-72.
- [16] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
- [17] 陈晓祺, 靳小龙, 贾宏杰, 等. 考虑电动汽车时空负荷的主动配电网重构策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1049-1056.
CHEN Xiaoqi, JIN Xiaolong, JIA Hongjie, et al. Reconfiguration strategy for active distribution network considering spatial-temporal electrical vehicle load model[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1049-1056.
- [18] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴, 等. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin, et al. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [19] 许喆, 潘金生, 樊淑娴, 等. 基于改进萤火虫算法的含DG配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 26-32.
XU Zhe, PAN Jinsheng, FAN Shuxian, et al. A distribution network reconfiguration method with distributed generation based on improved firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 26-32.
- [20] 雷振, 韦钢, 言大伟, 等. 基于多Agent联盟算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 95-100.
LEI Zhen, WEI Gang, YAN Dawei, et al. Study of reconfiguration for the distribution network with distributed generations based on multi-Agent alliance algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 95-100.
- [21] 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-EPSCA, 2014, 26(4): 15-19.
- [22] 姜凤利, 朴在林, 曹彤, 等. 含多种分布式电源的配电网潮流计算[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(2): 245-248.

- JIANG Fengli, PIAO Zailin, CAO Tong, et al. Power flow calculation of distribution networks with multi-distributed generation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(2): 245-248.
- [23] 卢扬. 含分布式电源的主动配电网重构研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [24] 丁晓群, 周春泉, 杨保, 等. 基于多种群免疫算法的分布式电源选址与定容[J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 29-34.
- DING Xiaoqun, ZHOU Chunquan, YANG Bao, et al. Siting and sizing of distribution generation based on multi-population immune algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(4): 29-34.
- [25] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
- ZHANG Limei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [26] 吕涛, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 分布式电源与配电网架多目标协调规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 139-145.
- LÜ Tao, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 139-145.
- [27] 司守奎. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [28] 赵志鹏, 董红斌. 一种新的基于遗传操作的改进型遗传算法[J]. 计算机应用与软件, 2008, 25(1): 235-237.
- ZHAO Zhipeng, DONG Hongbin. A new improved genetic algorithm based on genetic operation[J]. Computer Applications and Software, 2008, 25(1): 235-237.
- [29] 于晓冬, 孙宇. 混合策略遗传算法的公交线路优化模型研究[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(1): 14-15.
- YU Xiaodong, SUN Yu. Optimization model of feeder bus routes with mixed strategy genetic algorithm[J]. Computer and Digital Engineering, 2012, 40(1): 14-15.
- [30] 刘新辉, 林东敏, 岐艳芳, 等. 高集成度配电网远程智能监控系统的设计[J]. 低压电器, 2013(8): 39-43.
- LIU Xinhui, LIN Dongmin, QI Yanfang, et al. Design of high integration power distribution network remote intelligent monitoring system[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(8): 39-43.
- [31] 杨德昌, 廖文龙, 孙雪, 等. 基于满意度阈值判定的主动配电网无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3003-3010.
- YANG Dechang, LIAO Wenlong, SUN Xue, et al. Reactive power optimization of active distribution network based on judgment of the satisfaction threshold[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3003-3010.
- [32] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [33] 程杉. 含分布式电源的配电网多目标优化问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-08-01

作者简介:

李 锰(1986—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电网规划技术; E-mail: hnlimn@163.com

王利利(1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划技术; E-mail: wanglili0371@sina.com

刘向实(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划技术。E-mail: liuxiangshi@163.com

(编辑 魏小丽)