

应用自适应微分进化算法的配电网综合优化

王建勋¹, 刘会金¹, 陈兴²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 南阳供电公司, 河南省 南阳市 473003)

An Adaptive Differential Evolution Algorithm for Comprehensive Optimization of Distribution Network

WANG Jianxun¹, LIU Huijin¹, CHEN Xing²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473003, Henan Province, China)

ABSTRACT: It is impossible to implement the furthest optimization of distribution by unilateral network reconfiguration or reactive power optimization, so it is necessary to comprehensively consider the two manners. For this reason, a differential evolution algorithm-based comprehensive optimization algorithm for distribution network is proposed. To unify with the integer encode mode for reactive power optimization, the circle branch integer encode mode with the shortest encoding length is applied to network reconfiguration to simultaneously lead network reconfiguration and reactive power optimization into evolutionary process. Meanwhile, the adaptive mutation and the adjusting strategy of parameter evolution are led into evolution process to ensure that the convergence can be accelerated while the optimal solution is obtained. Finally, the measures to reduce calculation burden is analyzed. Results of calculation example show that the proposed algorithm is effective.

KEY WORDS: network reconfiguration; reactive optimization; differential evolution algorithm (DEA); mutation strategy; distributed generation (DG)

摘要: 单方面的网络重构或无功优化均不能实现最大程度的配电网优化, 因此需要将两者综合考虑, 为此提出了基于微分进化算法的配电网综合优化算法。为与无功优化的整数编码方式统一, 网络重构采用编码长度最低的环路支路整数编码方式, 以将网络重构和无功优化同时引入进化过程。同时将自适应变异及进化参数调整策略引入进化过程, 以在确保获得最优解的同时提高收敛速度。最后讨论了减少计算量的措施。算例结果验证了该算法的有效性。

关键词: 网络重构; 无功优化; 微分进化算法; 变异策略; 分布式电源

0 引言

配电网重构和无功优化是配电系统自动化的 2

个重要内容。配电网重构通过改变网络中分段开关和联络开关的状态来优化网络结构, 以降低配电网损耗, 均衡负荷及提高电压质量。无功优化为网络参数的优化, 其通过控制电容器的投切或者调节其他补偿设备以改变网络中的无功潮流, 达到降低网损、提高电压质量的目的。两者均为降低配电网网损、提高配电网运行水平的重要措施, 单一的调整并不能实现最大程度的配电系统优化, 因此需要综合考虑两者^[1-3]。

目前网络重构求解算法主要有传统数学优化算法^[4-6]、启发式算法^[7-10]和人工智能算法^[11-15]。传统数学优化算法同样适用于无功优化计算, 但其变量过多会导致“组合爆炸”问题, 贪婪式的搜索也会造成计算时间过长^[6]。启发式算法(如最优流模式法^[7]和支路交换法^[8-10]等)计算速度快, 但重构结果受初始潮流分布和环网处理顺序的影响, 难以达到全局最优。人工智能算法能在全局范围内寻优, 但收敛速度慢。而将各种智能优化算法相结合, 或在智能优化算法中引入启发式算法^[16-20], 可在局部范围实施有效搜索, 在大大提高收敛速度的同时保证全局寻优能力。对于综合优化问题, 文献[1-2]同时考虑了网络重构和电容器投切, 采用重构与无功优化交替迭代的模式, 采用启发式方法求解重构问题, 容易陷入局部最优。文献[3]将启发式的支路交换法引入并行搜索过程, 提高了搜索效率, 但对单个个体的启发式计算并不能使搜索空间覆盖所有可行解, 而且分布式电源的引入也使潮流方向不确定, 建立在传统意义上的启发式方法不再适用于现有配电网分析, 所以难以保障计算结果的全局最优。对于同是非线性组合优化问题的配电网重构和

无功优化, 只有将两者的可行解组合同时引入解空间才能实现全局意义上的并行搜索。

在众多人工智能算法中, 具有良好寻优特性的微分进化算法已在重构问题上得到了有效应用^[18]。该算法具有以下特点: 1) 具有类似遗传算法的基本操作(变异、交叉和选择等), 可令进化向好的趋势发展; 2) 某些变异算子与粒子群算子形式类似, 可实施有效的局部搜索; 3) 隐含有最优保留策略等, 可有效解决各种复杂优化问题。鉴于此, 本文采用微分进化算法进行配电网综合优化, 采用统一的整数编码将网络重构和无功优化问题同时引入进化过程, 并采用多变异算子自适应选择策略和进化参数自适应调整策略, 以获取最优解。

1 配电网综合优化数学模型

本文以网损最小为目标建立目标函数:

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{i \in N_b} \Delta P_i \quad (1)$$

式中: P_{loss} 为总有功网损; N_b 为支路集合; ΔP_i 为支路 i 的有功网损。

考虑兼顾电容器投切的综合优化问题, 应满足的约束条件包括潮流约束、电压约束、支路容量约束, 可投电容器组数约束和辐射状运行约束^[12]:

$$\begin{cases} p(\mathbf{x}) = 0 \\ U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, & i \in N \\ S_i \leq S_{i\max}, & i \in N_b \\ 0 \leq N_{ic} \leq N_{ic\max}, & i \in N_c \\ g \in P, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $p(\mathbf{x})$ 为潮流等式; \mathbf{x} 为节点电压向量; U_i 、 $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 的电压及其上下限; N 为节点集合; S_i 、 $S_{i\max}$ 分别为支路 i 流过的功率及其最大容许值; N_c 为补偿电容器节点集合; N_{ic} 、 $N_{ic\max}$ 分别为节点 i 的电容器投入组数及其上限; g 为当前网络结构; P 为所有可行的连通树集合。

2 微分进化算法

微分进化算法基本操作包括种群初始化、变异、交叉和选择^[21], 具体内容如下。

1) 种群初始化。

在解空间内产生随机分布的初始种群。令 $x_{i,G}^j$ 表示第 G 代中第 i 个个体 x_i 的第 j 个参数, 则初始种群第 i 个个体的第 j 个参数为

$$x_{i,0}^j = x_{\min}^j + r(x_{\max}^j - x_{\min}^j), \quad i = 1, \dots, N_p, j = 1, \dots, D \quad (3)$$

式中: r 为 0~1 之间的随机数; N_p 为种群规模; D

为个体维度; x_{\max}^j 、 x_{\min}^j 分别为控制变量 x^j 的上下边界。

2) 变异操作。

初始化操作结束后, 差异进化算法采用变异操作得到 1 组变异向量。常用的变异算子有:

① 随机算子 1。

$$v_{i,G}^j = x_{r_1,G}^j + F(x_{r_2,G}^j - x_{r_3,G}^j) \quad (4)$$

式中: $v_{i,G}^j$ 为第 G 代中第 i 个个体的第 j 个变异参数; r_1 、 r_2 、 r_3 为介于 1~ N_p 之间的随机整数, 且不为 i ; F 为比例因子, 其为表征差异大小的控制参数。

② 随机算子 2。

$$v_{i,G}^j = x_{r_1,G}^j + F(x_{r_2,G}^j - x_{r_3,G}^j) + F(x_{r_4,G}^j - x_{r_5,G}^j) \quad (5)$$

式中 r_4 、 r_5 为介于 1~ N_p 之间的随机整数。

③ 最优算子 1。

$$v_{i,G}^j = x_{\text{best},G}^j + F(x_{r_1,G}^j - x_{r_2,G}^j) \quad (6)$$

式中 $x_{\text{best},G}^j$ 为第 G 代中的最优个体向量 $\mathbf{x}_{\text{best},G}$ 的第 j 个参数。

④ 最优算子 2。

$$v_{i,G}^j = x_{\text{best},G}^j + F(x_{r_1,G}^j - x_{r_2,G}^j) + F(x_{r_3,G}^j - x_{r_4,G}^j) \quad (7)$$

⑤ 随机最优算子 1。

$$v_{i,G}^j = x_{i,G}^j + F(x_{\text{best},G}^j - x_{i,G}^j) + F(x_{r_1,G}^j - x_{r_2,G}^j) \quad (8)$$

⑥ 随机最优算子 2。

$$v_{i,G}^j = x_{i,G}^j + F(x_{\text{best},G}^j - x_{i,G}^j) + F(x_{r_1,G}^j - x_{r_2,G}^j) + F(x_{r_3,G}^j - x_{r_4,G}^j) \quad (9)$$

3) 交叉操作。

变异操作结束后, 对当前向量 $\mathbf{X}_{i,G} = [x_{i,G}^1, x_{i,G}^2, \dots, x_{i,G}^D]$ 和其相应的变异向量 $\mathbf{V}_{i,G} = [v_{i,G}^1, v_{i,G}^2, \dots, v_{i,G}^D]$ 进行交叉操作, 可得到试验向量 $\mathbf{U}_{i,G} = [u_{i,G}^1, u_{i,G}^2, \dots, u_{i,G}^D]$ 。交叉方式为二项交叉, 即

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & r \leq C_r \text{ 或者 } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,G}^j, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_r 为表征进化参数的交叉概率, 其在 0~1 之间取值; j_{rand} 为从 1~ N_p 之间的随机整数。交叉操作根据随机变量 r 和交叉概率 C_r 决定是从当前个体还是变异个体中选取向量来形成试验向量, j_{rand} 的引入是为了保证试验向量不会与当前个体完全相同。

4) 选择操作。

如果试验向量某些位置的参数值超过了其相应的上下限, 可将该部分参数在限定范围内重新随机产生, 从而提高算法的全局搜索能力。然后计算所有试验向量的适应度 $f(\mathbf{U}_{i,G})$, 并与其相应的当前

个体适应度 $f(\mathbf{X}_{i,G})$ 作比较。如果试验向量的适应度更优，则试验个体将取代当前个体进入下一代。选择操作表达式为

$$\mathbf{X}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{U}_{i,G}, & f(\mathbf{U}_{i,G}) \leq f(\mathbf{X}_{i,G}) \\ \mathbf{X}_{i,G}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

3 基于微分进化算法的综合优化原理

3.1 编码方式

人工智能算法可采用多种编码方式，包括二进制编码^[11]、整数编码^[12-14]和序列编码^[15]等。二进制编码用 1 和 0 来表示支路的开断，而序列编码用支路序号序列表示开关的开断，两者的编码长度相同，均为参与重构的支路总数。二进制编码会产生不可行解，需要进行可行解判断和修复^[11]，因而降低了搜索效率。整数编码主要有环路支路编码^[13-14]和同胚图简化下的支路编码^[12]2 种形式。后者的编码长度由简化图下的支路数决定，较前者长，可行解也存在大量冗余的情况。环路支路编码是长度最低的编码方式，在相邻环网较少的情况下，该编码方式的可行解比例最大，并且不会存在冗余情况，因此搜索效率较高。序列编码的每个染色体均代表一个可行解^[15]，但巨大的冗余降低了收敛速度。文献[13-14]给出了两相邻回路和三相邻回路情况下利用各种不可行的开关组合来引导进化操作的方法，但显然还存在多相邻回路的情况，因此基于此来判断不可行解是不全面的。

网络重构中，本文采用环路支路整数编码方式，该编码为断开支路在各自环路中所处位置序列的集合，可与无功优化中电容器投切组数的整数编码统一。对于 N 节点网络，其有向图节点关联矩阵的秩应为 $N-1$ ^[22]。断开相应数目支路后，通过求取修改后关联矩阵的秩可判断当前解是否可行，若为不可行解，可仿照不等式约束条件的处理方式，直接添加一个大的惩罚量至目标函数，以在选择操作时将不可行解快速淘汰，从而避免了修复过程，提高了计算效率。图 1 为 IEEE 33 节点系统^[23]环网示意图，其环路构成如表 1 所示。

环路支路编码表示某支路在其所处环路支路序列中的位置，以支路 33~37 断开(即联络开关全断)情况为例，此时所有断开支路处于相应环路(1、5、2、4、3)支路序列的末端位置，即断开支路 33~37 在环路 1、5、2、4、3 中所处位置序号分别为 10、7、11、16、7，则该情况编码可用[10, 7,11,16,7]表

示。根据待补偿点定位法^[24]可求得相应的补偿点和电容器补偿容量，具体补偿结果如表 2 所示，其中补偿容量为单组容量与可投切组数的乘积。

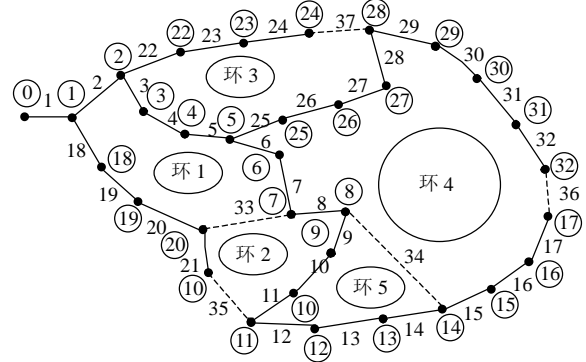


图 1 IEEE 33 节点系统环网
Fig. 1 Ring network of IEEE 33 system

表 1 环路构成

环路	环路支路序列	支路总数
1	2,3,4,5,6,7,18,19,20,33	10
2	8,9,10,11,21,33,35	7
3	3,4,5,22,23,24,25,26,27,28,37	11
4	6,7,8,15,16,17,25,26,27,28,29,30,31,32,34,36	16
5	9,10,11,12,13,14,34	7

表 2 补偿结果

补偿节点号	单组容量/kvar	可投切组数
7	100	8
13	100	8
29	100	3

在该补偿配置下，电容器全部投入时，系统网损由 0.020 2 pu 降至 0.015 0 pu。若联络开关全断，而电容器投入组数分别为 8、8、3 时，综合优化编码可表示为[10,7,11,16,7,8, 8,3]。

3.2 变异算子选择

微分进化算法性能与变异策略和进化参数密切相关。变异算子中，随机最优算子和最优算子在求解单峰问题具有较好的性能并且收敛速度快，但在求解多峰值问题时容易早熟，从而易陷入局部最优。而随机算子收敛速度虽慢但具有着良好的全局搜索能力，所以已在求解多峰值问题上得到了广泛应用^[21]。在求解复杂的多峰值问题时，可综合考虑多种变异算子，将多种变异算子以自适应方式引入进化过程，以综合多种算子的优点改进全局收敛性能及提高收敛速度^[25]。对于变异参数，本文根据经验设置为： $F=0.1\sim 0.9$ ， $N_p=(5\sim 10)D$ 。 C_r 越大，收敛速度越快，但存在局部收敛的可能性。 F 和 N_p 越大对搜索全局最优解越有利，但过小则会导致早熟。

综合考虑多种算子的优势后，本文考虑采用随

机算子 1、最优算子 1 和随机最优算子 1 进行算子自适应选择，具体可根据轮盘赌方式进行选择。随机算子 1 为目前广泛使用的算子，全局搜索能力强，而最优算子 1 和随机最优算子 1 能实现快速寻优，其中随机最优算子 1 具有类似于基本粒子群算子的形式，局部搜索能力强。变异策略根据历史经验进行选择， $p_{k,G}$ 为第 k 种变异策略在第 G 代操作中被选择的概率， $S_{k,G}$ 为第 k 种变异策略在第 G 代操作中的成功比例^[25]，则

$$p_{k,G} = \frac{S_{k,G}}{\sum_{k=1}^3 S_{k,G}} \quad (12)$$

$$S_{k,G} = \frac{\sum_{g=G-L_p}^{G-1} n_{sk,g}}{\sum_{g=G-L_p}^{G-1} n_{sk,g} + \sum_{g=G-L_p}^{G-1} n_{fk,g}} + \varepsilon \quad (13)$$

式中： k 为变异算子序号， $k=1\sim 3$ 分别代表随机算子 1、最优算子 1 和随机最优算子 1； g 为迭代中间代数； $n_{sk,g}$ 、 $n_{fk,g}$ 分别为第 k 种变异策略在第 G 代操作中成功和失败的次数； L_p 为学习代数； $\varepsilon=0.01$ ，用来避免策略成功比例值为 0。

控制参数(F 、 C_r)随进化过程一同进化^[26]，以提高收敛速度。

$$F_{i,G+1} = \begin{cases} 0.1 + r_{\text{and}1} 0.9, & r_{\text{and}2} < 0.1 \\ F_{i,G}, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$C_{ri,G+1} = \begin{cases} r_{\text{and}3}, & r_{\text{and}4} < 0.1 \\ C_{ri,G}, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $F_{i,G}$ 、 $C_{ri,G}$ 分别为第 G 代中第 i 个个体采用的比例因子与交叉概率； $r_{\text{and}i}(i=1,\dots,4)$ 为 0~1 之间的随机数。

3.3 减少计算量的措施

针对优化模型和优化算法的特性，本文提出了以下措施来减少计算量：

1) 初始化的同时进行可行解判断，使所有初始个体为可行解，并使用支路交换算法得到少量接近于局部最优解的个体，将该类个体引入初始群体中，以便能从较优个体开始搜索。

2) 迭代初期，群体中个体间差异较大，因而选用较低的潮流计算精度进行适应度计算，以区分个体优劣。而在迭代后期，则选用更高的精度进行潮流计算，以保证得到更优解。

3) 微分进化的交叉过程是单对单实现的，很多情况下原始向量与变异向量间的差异并不大，所以在选择操作时用已求过的原始向量的电压结果

作初值来计算变异向量的潮流，尽可能地减少潮流迭代次数。

3.4 算法流程

本文算法流程如图 2 所示。

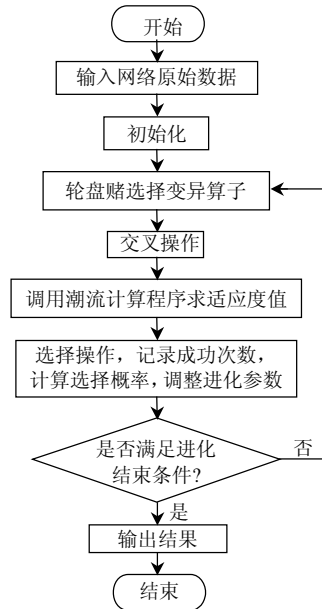


图 2 算法流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed algorithm

4 算例分析

本节以 IEEE 33 节点系统为例验证本文方法的有效性，首先采用 Matlab 软件编制了 4 种重构优化算法程序，算法 1 采用随机算子 1 的单变异策略；算法 2 在算法 1 基础上采用进化参数自适应调整策略；算法 3 采用多变异算子(随机算子 1、最优算子 1 和随机最优算子 1)；算法 4 采用多变异算子(随机算子 1、最优算子 1 和随机最优算子 1)，且采用进化参数自适应调整策略。相应参数设置为： $N_p=25$ ， $F=0.5$ ， $C_r=0.5$ ， $L_p=5$ ，总迭代次数为 50，算法 4 的初始算子选择概率分别为 1/3、1/3、1/3。此处先不考虑加入电容器及减少计算量的措施。图 3 为 4 种算法的收敛曲线。

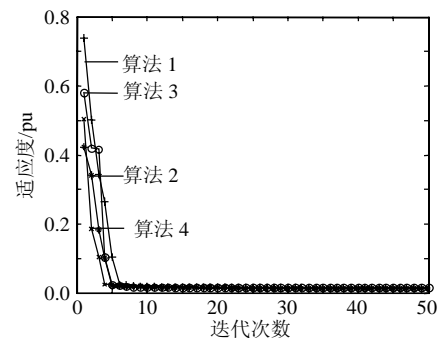


图 3 不同算法的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curves of different algorithms

以上算法均能收敛到最优解为[6,2,11,14,6](环路编码方式下最优解对应的编码),对应的断开支路为 7,9,37,32,14,最小网损为 0.013 952 pu,与文献[23]解一致。表 3 给出了运行 100 次后 4 种算法的计算结果比较情况。

表 3 不同算法仿真结果

算法	最优迭代次数	最终收敛次数	成功率/%
1	28	49	100
2	21	40	100
3	22	43	100
4	16	35	100

由图 3 和表 3 可知,算法 1 收敛速度较慢,引入自适应参数调整和多变异策略后能加快收敛速度,如算法 2~4;算法 4 结合了算法 2 和算法 3 的优势,在保证全局收敛的同时又能更大程度地提高收敛速度,因此算法 4 收敛性能最好。本文在配电网综合优化计算时选用算法 4,即多变异策略结合参数自适应调整的综合自适应算法,表 4 为算法 4 的综合优化结果,同时给出了采用文献[2]重构-无功优化交替迭代算法和文献[3]算法的计算结果。

表 4 综合优化算法计算结果

算法	断开支路集合	电容器投切组数集合	网损/pu
重构-无功优化法	7,9,14,32,37	4,2,3	0.011 30
文献[3]算法	9,32,33,34,37	8,4,3	0.011 05
本文算法	9,32,33,34,37	8,4,3	0.011 05

在原有最优重构结果基础上进行无功优化,得到的次优解已不能再进行重构,所以重构-无功优化法只能得到局部最优解(其网损为 0.011 30 pu),而本文算法和文献[3]算法由于将重构也引入了进化搜索过程,均能得到更优解。

为验证本文算法不受分布式电源接入的影响,在节点 32 处引入有功功率为 200 kW、电压为 12.66 kV 的 PV 型分布式电源。假设该电源有足够的无功支撑能力,通过灵敏度补偿法进行潮流计算可得初始有功网损为 0.019 72,综合优化结果如表 5 所示。

由表 5 可知,重构-无功优化算法和文献[3]算法均难以保证全局最优,这是由于该 2 种算法采用

表 5 加入分布式电源后综合优化算法计算结果

对比结果	断开支路集合	电容器投切组数集合	网损/pu
重构-无功优化算法	7,9,14,32,37	3,2,3	0.010 79
文献[3]算法	7,9,14,32,37	3,2,3	0.010 79
本文算法	10,32,33,34,37	8,4,3	0.010 42

启发式方法进行重构(前者为虚拟流法,后者为支路交换法),在处理含分布式电源的环路时,并不能保证按简化公式进行开关交换后的网损一定降低,尤其是 PV 型分布式电源,其具有一定的电压支撑能力,交换前后潮流情况会有较大改变,而启发式方法只能处理潮流变化不大的情况。而本文算法将重构和无功配置进行并行优化,能在整个解空间中进行搜索,因此可得到更优解。

上述算例中均未采用减少计算量的措施,考虑减少计算量措施并引入分布式电源后,本文算法约在第 10 代就能找到最优解,并且最终迭代次数由 35 次减小到 23 次,计算时间由 11s 降至约 6s,计算效率得到明显提高。由以上分析可知,在网络重构和无功优化的配合下,分布式电源的合理配置可减小网损和提高电压质量及电网运行经济效益。

5 结论

配电网重构和无功优化为降低网损、提高运行水平的优化措施,简单地将 2 种措施进行叠加难以正确反映二者之间的相互影响,不能达到整体优化的目的。本文算法将二者编码形式进行了统一,并将两者同时引入进化过程。同时算例结果表明本文算法在处理配电网综合优化问题时不会受到分布式电源的影响,能够保证获取全局最优解,可为配电网综合优化提供参考。

参考文献

- [1] Jiang D, Baldick R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control[J]. IEEE Trans on Power System, 1996, 11(2): 890-897.
- [2] 邓佑满,张伯明,王洪璞. 配电网重构和电容器投切的综合优化算法[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(5): 5-9.
Deng Youman, Zhang Boming, Wang Hongpu. A comprehensive optimization algorithm for distribution network reconfiguration and capacitor switching[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(5): 5-9(in Chinese).
- [3] Zhang D, Fu Z C, Zhang L C. Joint optimization for power loss reduction in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(1): 161-169.
- [4] Sarma N D R, Prakasa Rao K S. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J]. Electric Power System Research, 1995(33): 125-131.
- [5] Wanger T P, Chikani A Y, Hackam R. Feeder reconfiguration for loss reduction: an application of distribution of distribution automation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.
- [6] 毕鹏翔,刘健,张文元. 配电网重构的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 54-60.
Bi Pengxiang, Liu Jian, Zhang Wenyuan. Study on algorithms of distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2001, 25(14): 54-60(in Chinese).
- [7] Shirmohammadi D, Wayne H. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [8] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [9] 张栋, 张刘春, 傅正财. 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. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85(in Chinese).
- [10] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 60-63.
Han Xuejun, Chen Peng, Guo Xinfeng, et al. A power flow based reconfiguration method of distribution networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 60-63(in Chinese).
- [11] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根. 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): 50-54.
Li Xiaoming, Huang Yanhao, Yin Xianggen. A genetic algorithm vased on improvement strategy for power distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 50-54(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 65-69.
Ma Xiufan, Zhang Lizi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 65-69(in Chinese).
- [14] Qin Y, Wang J, Gui W, et al. Particle clonal genetic algorithm using sequence coding for solving distribution network reconfiguration [C]//The 9th International Conference for Young Computer Scientists. Zhang Jiajie, China: China Computer Federation, 2008: 1807-1812.
- [15] Wu Q, Cheng H, Zhang X, et al. Random spanning tree based improved GA for distribution network reconfiguration [C]//Asia-Pacific Power and energy engineering conference. Wuhan, China: Wuhan University, IEEE Power and Energy Society, Chinese Society for Electrical Engineering, Scientific Research Publishing, 2009: 1-4.
- [16] 余贻鑫, 段刚. 基于最短路算法和遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.
Yu Yixin, Duan Gang. Shortest path algorithm and genetic algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 44-49(in Chinese).
- [17] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
Liu Zifa, Ge Shaoyun, Yu Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78(in Chinese).
- [18] Su C, Lee C. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-Integer hybrid differential evolution[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 1022-1027.
- [19] 余贻鑫, 邱炜, 刘若沁. 基于启发式算法与遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 19-22.
Yu Yixin, Qiu Wei, Liu Ruoqin. Distribution system reconfiguration based on heuristic algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 19-22(in Chinese).
- [20] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.
Liu Wei, Han Zhenxiang. Distribution system reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33(in Chinese).
- [21] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [22] 卢开澄. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1981: 33-40.
- [23] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 196-199.
- [24] 余健明, 张栋, 姚李孝. 基于一种新待补偿点定位法的配电网无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 67-70.
Yu Jianming, Zhang Dong, Yao Lixiao. Reactive power optimization of distribution network base on a new location algorithm for nodes to be compensated[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 67-70(in Chinese).
- [25] Qin A K, Huang V L, Suganthan P N. Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 398-417.
- [26] Brest J, Greiner S, Bo skovic B, et al. Self-Adapting control parameters in differential evolution: a comparative study on numerical benchmark problems[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2006, 10(6): 646-657.



王建勋

收稿日期: 2010-11-12。

作者简介:

王建勋(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为配电系统优化和电能质量分析与控制, E-mail: wangcoven7@163.com;

刘会金(1952), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量分析与控制、电力电子及灵活交流输电系统;

陈兴(1964), 男, 高级工程师, 长期从事电力生产技术监督和管理工作。

(编辑 徐梅)