

DOI: 10.7667/PSPC150698

基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构

张涛, 史苏怡, 徐雪琴

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 配电网重构是一个复杂的非线性组合优化问题。为了克服基本优化算法易陷入局部最优解的问题, 提出了一种改进的二进制量子粒子群算法(BQPSO), 对含分布式电源(DG)的配电网重构模型进行求解。通过引入遗传算法的交叉操作和变异操作来避免早熟来提高算法的全局搜索能力, 改进了算法的性能。并且选择了适当的不可行解处理方式来提高算法的计算效率。最后通过对 IEEE33 节点配电系统进行仿真, 验证所提算法在求解重构问题时得到的解更好, 收敛速度和全局寻优能力都有提升。

关键词: 配电网重构; 分布式电源; 二进制量子粒子群; 遗传算法

Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization

ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Reconstruction of distribution network is a complex nonlinear combinatorial optimization problem. This paper presents an improved binary quantum particle swarm optimization (BQPSO), in order to overcome the basic optimization algorithm is easy to fall into local optimal solution. The algorithm is used to solve the reconstruction of the distribution network model with distributed generation (DG). By introducing the crossover operation and mutation operation of genetic algorithm to jump out precocity to improve the global search ability of the algorithm, the performance of the algorithm is improved. And the appropriate way of infeasible solution treatment is selected to improve the computational efficiency of the algorithm. Finally, through the IEEE33 node distribution system simulation, it is verified that the algorithm proposed is better in solving the reconstruction problem, and convergence speed and global optimization ability are improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307097).

Key words: distribution network reconfiguration; distributed generation (DG); binary quantum particle swarm optimization (BQPSO); genetic algorithms

0 引言

配电网是系统向用户供电的重要系统, 配电网重构作为配电自动化的重要手段, 是在满足配电网运行要求的前提下, 通过改变配电网中开关的开断状态对配电网结构进行调整, 达到消除过载、降低网损、提高电压质量的目的。配电网重构在理论上是一个复杂的多目标非线性整数组合优化问题, 配电网中作为决策变量的开关数目比较庞大, 其最

优网络结构较难求取, 现阶段常用的算法有启发式算法^[1]例如: 支路交换法、最优流模式法, 以及智能算法例如: 免疫算法^[2]、遗传算法等, 均有较好的计算效率。

随着 DG 在配电网中安装比例的逐年增加, 由于其对配网潮流、节点电压、网损等诸多方面产生了影响, 使得配电网重构的问题变得更加复杂, 目前已有一些学者对相关问题进行了研究, 并取得了一定成果^[3-9]。文献[4]运用遗传算法对配电网重构进行优化过程中采用自适应调整的交叉率和变异率, 较好地提高了算法的性能。文献[5]根据配电网的特

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307097)

性提出了基于联络开关的环网编码方式, 以此来判断网络的辐射性和连通性。文献[6]结合前推回代法的特点, 分析研究了各种类型分布式电源在前推回代潮流计算中的数学模型。文献[7]运用一种改进的粒子群算法求解光伏并入配电网的无功优化问题。文献[8]运用混合粒子群算法来解决含 DG 的配电网重构问题。

当前应用于配电网重构的一些人工智能算法仍然存在着收敛速度慢以及陷入局部劣解的问题, 并且对不可行解的处理方法也没有很好的效率。相较于其他的人工智能算法, 量子粒子群算法(QPSO)的研究起步较晚, 且具有良好的收敛速度和全局搜索能力, 因此本文将应用于重构研究中。由于配电网重构中的开关变量是离散变量, 所以选择了二进制的编码方式, 本文采用的是二进制量子粒子群算法(BQPSO), 结合粒子群算法和量子理论形成的这种全新的算法具有良好的搜索性能, 同时为了克服早熟问题引入了遗传算法的交叉变异操作对算法进行了改进。此外, 由于配电网重构是一个复杂的多维度的非线性组合优化问题, 快速重构的关键问题之一就是避免不可行解的生成, 本文在算法的行为和更新中做了适当的改进, 使之与重构问题更加契合, 避免了不可行解的生成, 提高了算法的效率。算例结果表明本文提出的算法应用于配电网重构中克服了传统粒子群算法容易陷入局部最优的困境, 全局搜索能力强, 得到优化结果更好, 并且很大程度上提高了收敛速度。

1 配电网重构的数学模型

1.1 配电网重构数学模型

简单的配电网重构以降低网损为目标, 考虑到 DG 注入功率对节点电压有较大影响, 本文采用多目标优化加权法, 将降低网损和减小节点电压偏差作为 2 个优化子目标, 对每个子目标函数赋予不同的权重系数并加权求和, 得到总的目标函数为

$$\min f(x) = \min[\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)] \quad (1)$$

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^{n_b} k_i r_i |I_i|^2 \quad (2)$$

$$f_2(x) = \max |V_i - V_m| \quad (3)$$

式中: $f_1(x)$, $f_2(x)$ 为配电网的网损值和节点电压最大偏差值; λ_1 , λ_2 为各自的权重系数, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$; n_b 为配电网中的支路数; k_i 为支路 i 的开断状态, 取值为 1 或者 0, 1 表示开关闭合, 0 表示开关断开; r_i 为支路 i 的电阻; I_i 为流过支路 i 的负荷电流; n_c 为配电网中的节点数; V_i , V_m 为节点 i 的实际电压

和额定电压。

约束条件

(1) 潮流约束: 配电网重构需满足潮流约束方程。

(2) 支路电流约束: $I_b \leq I_{b\max}$, I_b , $I_{b\max}$ 分别为流过支路 b 的电流和最大允许电流。

(3) 节点电压约束: $V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$, V_i , V_{\min} , V_{\max} 分别为节点 i 的电压、电压下限和电压上限。

(4) 网络拓扑约束: $g_k \in G_k$, g_k 为开关状态组合, G_k 为构成辐射状网的开关状态组合的集合。在配电网重构的过程中, 网络拓扑结构约束是非常关键的部分。

1.2 分布式电源的潮流计算模型

不同类型的分布式电源在配电网潮流计算中采用不同的处理方法。异步发电的风力发电机可简化成 PQ 节点, 在潮流计算中, 简化处理方法是将其视为“负的负荷”^[10], 计算时当作潮流方向相反、功率大小相等的负荷。

$$P = -P_s \quad (4)$$

$$Q = -Q_s \quad (5)$$

式中, P_s 、 Q_s 是节点的有功、无功功率。

内燃机和传统燃气轮机这类含有同步发电机和含电压控制逆变器的分布式电源处理为电压与注入功率恒定 PV 节点。而当节点无功越界时, 需将其转化为 PQ 节点; 如果后续过程中又出现节点电压越界, 再将其重新转换成 PV 节点, 如此往复进行。

而光伏电池等通过电流逆变器接入电网的电源, 可以看作电流和注入功率保持恒定的 PI 节点, 相应的无功功率可以根据上一次迭代得到的电压、电流幅值和有功功率计算而得, 通过式(6)转换成 PQ 节点^[1]。

$$Q = \sqrt{|I|^2 |U|^2 - P^2} \quad (6)$$

2 二进制编码的量子粒子群及其改进

2.1 量子粒子群算法

1995年美国社会心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhart 提出了粒子群算法^[11], 其主要思想来源于对鸟类群体行为的研究。在标准 PSO 算法中, 粒子的状态由位置和速度来描述, 两者共同决定了粒子的飞行轨迹。每次迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己, 速度和位置的具体更新公式如下:

$$V = W \times V + c_1 \times \text{rand} \times (pbest - x) + \quad (7)$$

$$c_2 \times \text{rand} \times (gbest - x)$$

$$x = x + V \quad (8)$$

其中: $pbest$ 是个体极值; $gbest$ 是全局极值; V 是

粒子的速度; X 是粒子的当前位置; $rand$ 是 0 至 1 之间的随机数; c_1 和 c_2 被称为学习因子, 通常被设为 2, W 为加权系数, 一般取值在 0.1 至 0.9。

由于粒子的速度总是有限的, 所以在搜索过程中粒子的搜索空间是一个有限的区域, 不能覆盖整个可行空间, 即一般的 PSO 算法不能保证以概率 1 搜索到全局最优解。文献[12]将量子行为的一些特性引入 PSO 的更新策略中, 基于量子势阱模型提出一种具有量子行为特性的粒子群优化(QPSO)算法。与 PSO 相比, QPSO 仅有一个位移更新公式而没有速度更新公式这样就简化算法的复杂度, 提高了算法计算效率和收敛速度。

在 QPSO 算法中, 粒子的速度和位置信息都归结为一个参数, 算法如下^[13]:

$$p_i = \varphi \times pbest_i + (1 - \varphi) \times gbest \quad (9)$$

$$mbest = \frac{\sum_{i=1}^M pbest_i}{M} = \left(\frac{\sum_{i=1}^M pbest_{i1}}{M}, \frac{\sum_{i=1}^M pbest_{i2}}{M}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^M pbest_{ij}}{M} \right) \quad (10)$$

$$x(t+1) = p_i \pm \beta |mbest - x(t)| \times in \left(\frac{1}{u} \right) \quad (11)$$

式中: φ 和 u 是(0,1)之间的随机数; p_i 称为局部吸引子, 由粒子 i 的最好位置 $pbest$ 和种群所有粒子的

最好位置 $gbest$ 共同决定; $mbest$ 称为中值最优位置; β 是收缩扩张因子, 用来控制粒子的收敛速度; $x(t)$ 为粒子的相关位置信息; M 是群体中所含粒子的数目。在迭代过程中, 当产生的随机数大于 0.5 时, 取“-”号, 其他情况取“+”号。

2.2 二进制量子粒子群算法及其改进

常规的 QPSO 都应用在实数解空间的优化问题, 对于离散空间的优化问题, QPSO 并没有一个有效的解决方法。由于配电网重构优化的变量开关状态量是一组离散的量, 对于离散问题的解决, 提出一种基于二进制编码的量子粒子群算法(BQPSO), 用以解决配电网重构的优化问题。采用二进制编码, 用 0 和 1 表示开关状态, 其中 0 表示开关断开, 1 表示开关闭合。所以对于原来的量子粒子群算法中的公式需要进行相应的变化。

(1) 在 BQPSO 中, 粒子的位置由一个二进制串表示, 式(12)中两个粒子位置的差值在二进制中用两个二进制串 X 和 Y 之间的海明距离^[14]来表示。

$$|X - Y| = d_H(X, Y) \quad (12)$$

表示为两个二进制位串中不同位的个数。

(2) 考虑模型的实际情况, 本文在此处对算法中值最优位置 $mbest$ 的计算做了改进。由于配电网每次重构都需要保证网络拓扑约束, 对某一个网络来说网孔数目是固定的, 以 IEEE33 节点系统^[1]为例, 如图 1 所示, 当所有开关闭合时会有 5 个环路, 所以每次重构的过程, 相当于在这 5 个环路中各断开一个开关, 因此 $mbest$ 也要符合这个要求, 并不可以用简单的求 $gbest$ 平均值方法得到。

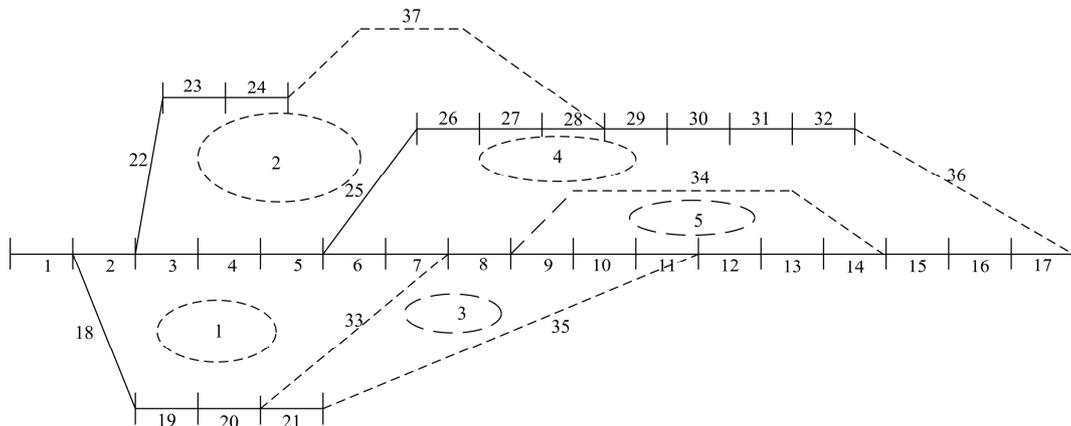


图 1 IEEE33 节点配电系统

Fig. 1 IEEE33 node distribution system

本文用以下方式实现, 由粒子 i 的最好位置 $pbest$ 是一个 0-1 数组, 计算 $pbest$ 的平均值, 将平均值的数组带序号从小到大排序, 将最小的前五个

数对应序号即对应开关状态置 0, 其他开关状态置 1, 得到一个数组。这个数组中对应的断开的开关序号要满足网络拓扑的约束条件, 如果不满足约束条

件, 数组继续更新直至满足约束条件, 生成的新数组就表示平均位置 $mbest$ 。

(3) BQPSO 的位置更新过程如下:

$$b_i = \beta \cdot d_H(p_i, mbest) \times \text{in}\left(\frac{1}{u}\right) \quad (13)$$

$$q_{mi} = b_i / d_H - 1 \quad (14)$$

其中: q_{mi} 为相对随机位置的变异概率。粒子位置更新时, 其值大于 0 则该位置开关状态置 1, 反之置 0。

2.3 引入遗传算法行为的算法改进

对于运用各种智能算法的寻优问题最大的难题是早熟问题, 早熟会导致算法次优解的产生同时也使算法的收敛性能下降。BQPSO 算法的迭代后期也存在这个问题, 因此为了提高算法的全局搜索能力, 引入了遗传算法的行为对算法做了改进。

(1) 首先在局部吸引子 p_i 的计算是根据式(8)进行计算, 所得值也是位于 $pbest$ 和 $gbest$ 之间。为了使算法跳出局部最优解, 引入了遗传算法的交叉算子来进行算子的变异, 仿照遗传算法的单点交叉或者多点交叉来进行变异, 完成交叉后的随机选择一个值赋值给新的局部吸引子 p_i 。

(2) 为了能有效地避免早熟现象, 提高 BQPSO 算法的性能, 此处引入变异操作更新了 $gbest$ 。具体操作如下: 产生一个随机数小于一个设定值, 则全局最优位置 $gbest$ 的二进制数组加入多点变异操作更新后为 $gbest'$, 比较 $gbest'$ 与 $gbest$ 的目标函数值, 如果优于, 就替换, 否则不变。

2.4 不可行解的处理

从以上算法改进过程中可以发现, 配电网的网络结构约束贯穿了二进制量子粒子群算法改进的始终。因为配电网快速重构的关键之一是避免不可行解的产生, 在 BQPSO 种群中的每一个粒子都对应了一种开关开断状态, 由于传统算法粒子更新具有随机性, 会产生大量的不可行解, 所以在算法中对这些不可行解的处理尤为重要, 可以更好地提高计算效率。

本文对不可行解的处理方式以 IEEE33 标准测试系统为例, 可将整个系统的分段开关分为五个环网对应的五个组。具体操作为: 对五个环网按顺序进行选择 and 更新, 首选选取第一组的开关序号; 在第二组开关的选取中第一组选择出的结果(开关序号)也是约束条件; 按照此方法依次类推的进行选择更新就可以很好地避免不可行解。

2.4 算法在含 DG 的配电网重构中的应用

将二进制编码的量子粒子群算法应用在含 DG 的配电网重构优化中的具体流程如图 2 所示。

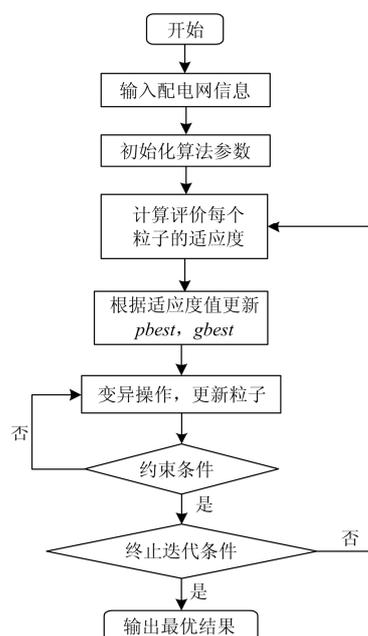


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

3 算例仿真与分析

3.1 仿真系统和参数

本文以 IEEE33 配电网系统为例, 采用基于节点分层关联矩阵的分层前推回代算法潮流计算方法^[10], 应用本文改进后的配网重构算法, 在 Matlab 中编程分别分析了配电网不接 DG 和接入 DG 的情况下的算法性能, 并与其他重构算法进行了比较。IEEE33 配电系统网络参数和节点负荷参考文献 [1], 33 母线系统有 33 个分段开关、37 条线路、系统总有功负荷为 3 715.0 kW, 总无功负荷为 2 300.0 kvar, 平衡节点电压的标幺值为 1.0 p.u。

改进粒子群算法参数设置种群数目取 50, 最大迭代次数 $\max gen=100$, 对二进制粒子群(BPSO)、BQPSO 和改进的 BQPSO 仿真并对运行结果进行比较。BQPSO 的控制参数 β ^[15] 满足如下公式。

$$\beta(t) = 1 - (1 - 0.5) \times \frac{gen}{\max gen} \quad (15)$$

3.2 目标函数权重对优化结果的影响

由于本文目标函数为多目标优化模型, 采用归一化的方法处理, 将其转化为单目标优化问题, 获得单一权重组合下的最优方案。为了研究不同权重系数对优化结果的影响, 本文选择了多组不同的权重系数分别进行了仿真。

由于电压偏差与网损相比, 数量级相差较大, 因此在采用权重系数将多目标的函数归一时, 需将

两个目标函数取值保证在一个数量级上。为了更加全面地分析权重系数对优化结果的影响,本文试验了多组权重组合的优化方案,并选择了几组代表性的方案罗列出优化结果,具体仿真结果如表 1 所示。

表 1 不同权重下的优化结果

Table 1 Optimal results under different weights

权重	网损/kW	节点最低电压/p.u.	断开的开关
$\lambda_1=0.8 \lambda_2=0.2$	139.551	0.937 8	7-8、9-10、14-15、 32-33、25-29
$\lambda_1=0.6 \lambda_2=0.4$			
$\lambda_1=0.5 \lambda_2=0.5$	139.977	0.941 3	7-8、9-10、14-15、 28-29、32-33
$\lambda_1=0.4 \lambda_2=0.6$			
$\lambda_1=0.2 \lambda_2=0.8$			

由表 1 可见,当网损的权重系数 $\geq 50\%$ 时得到的一组优化结果,其网损值相对更小;当电压偏差值的权重系数大于 50%时得到的一组优化结果,其节点最低电压更大,电压偏差值更小。考虑到配电网重构后是配电网处于正常运行状态,而不是故障或检修的状态,而且配电网重构单目标优化中唯一的优化目标函数为有功网损,因此综合考虑上述因素,配电网重构的优化目标在兼顾技术运行性能的情况下更侧重于经济指标,所以后文对两个子目标函数的权重系数选取为 $\lambda_1=0.8, \lambda_2=0.2$ 。

3.3 不接 DG 时改进重构算法的性能分析

当配电系统中未接 DG 时,应用本文重构算法获得的结果如表 2 所示。

表 2 未接入 DG 的重构优化结果

Table 2 Results of reconfiguration and optimization without DG

算法	网损/kW	节点最低电压/p.u.	断开的开关
初始	202.677	0.913 1	7-20、8-14、11-21、 17-32、24-28
文献[16]	140.48	0.910 8	6-7、13-14、8-9、 31-32、24-28
BQPSO	139.551	0.937 8	7-8、9-10、14-15、 32-33、25-29

由表 2 可见,采用本文提出的方法得到重构方案的最小网损值相比于初始值减小超过 30%,相比于文献[16]中的结果也更小,电压最低节点的偏差值从 0.089 2 减小到 0.062 2,都表明算法有良好的寻优能力。表明该算法在降低网损和减小电压偏差方面有一定的优越性。算法的收敛曲线如图 3 所示。

由图 3 可见, BPSO 算法在第 20 次迭代达到极值,本文提出的改进的 BQPSO 算法在第 11 次迭代时达到最优值,迭代速度明显提高。表明该算法确实具有良好的搜索能力、收敛速度较快。

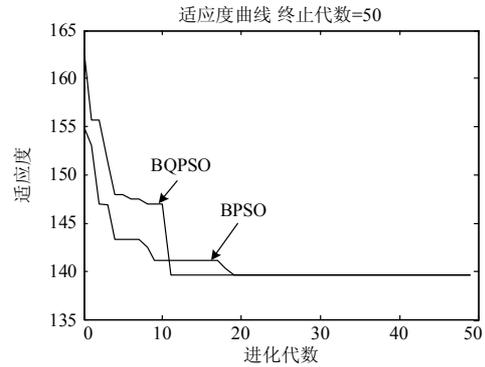


图 3 未接入 DG 的 BQPSO 的适应度曲线

Fig. 3 No DG connected BQPSO's fitness curve

3.4 DG 接入对配网重构的影响

本文采用文献[17]中 DG 安装位置在 18、31、32 节点接入 DG, DG 功率因数 $\cos\varphi=0.8$, 有功出力为 200 kW, 无功出力为 150 kvar, 进一步分析 DG 接入配电网对电网重构的影响和本文提出的改进算法的性能。基于本文算法的重构后网络拓扑如图 4 所示。

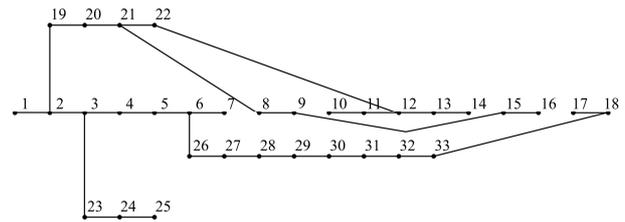


图 4 接入 DG 重构后拓扑图

Fig. 4 Topology after DG connected reconfiguration

由图 4 可见,重构后的结果满足配电网拓扑约束条件。

本文算法的性能在接入 DG 后也得到了验证,图 5 分别给出了 BPSO、未加入变异算子的 BQPSO 以及改进后的 BQPSO 三种不同情况的适应度曲线。

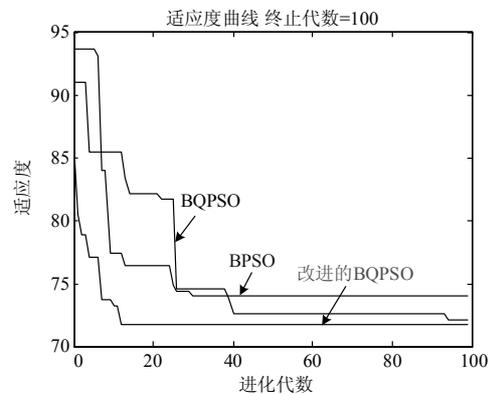


图 5 接入 DG 后算法收敛性比较图

Fig. 5 DG connected algorithm convergence comparison chart

由图 5 可见, BPSO 算法达到最优解的迭代次数在 40 次, 最优解为 73.923 kW; 未加变异算子的 BQPSO 在第 30 次迭代左右得到最优解且最优解为 74 kW, 本文算法达到最优解的迭代次数在 12 次, 最优解为 73.412 kW, 所以本文提出的改进后的 BQPSO 算法相较于 BPSO 算法和未加入变异算子的 BQPSO 算法有更好的寻优结果, 收敛速度更快。说明加入变异算子之后的算法具有更好的全局搜索能力, 算法性能得到了进一步的提升。

图 6 给出了应用本文改进后的 BQPSO 算法对配网重构后各节点的电压曲线。

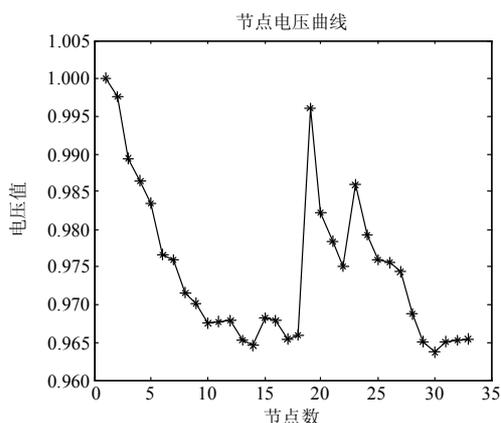


图 6 节点电压曲线

Fig. 6 Node voltage curve

由图 6 可见, 本文的算法优化结果中, 节点电压最低值为 0.964 8 p.u., 且各个节点电压值不存在越限的情况。说明选择合理的 DG 接入容量可以优化系统的运行, 在实际接入 DG 时, 为了弥补无功的缺失而引起的电压不稳定的情况可以引入适当的无功补偿装置。

此外, 本文还对 DG 作为可调设备接入配电网出力情况不同时, 应用改进 BQPSO 算法的进行了重构分析。表 3 给出了几种不同出力情况下的重构优化结果。

表 3 接入 DG 的重构优化结果

Table 3 Results of reconfiguration and optimization with DG

DG 可调 出力百分比	网损/kW	节点最低 电压/p.u.	断开的开关
100%	73.412	0.964 8	7-8、9-10、14-15、 16-17、25-29
75%	91.136	0.957 4	7-8、9-10、14-15、 17-18、25-29
50%	108.309	0.949 5	7-8、9-10、14-15、 32-33、25-29

由表 3 可见, 将 DG 作为可调度设备用于配电系统时, 不同的 DG 出力, 可得到不同的优化重构方案, 由于 DG 对配电网提供功率支持, 可以进一步降低网络损耗, 优化系统的运行。在实际应用中可以根据实际需要选择适当的 DG 出力和安装位置以满足系统的不同运行要求。

4 结论

本文首次运用的一种改进的二进制量子粒子群算法, 对以网络损耗和电压偏差值最小为目标函数的, 含有 DG 的配电网重构模型进行寻优。通过 IEEE33 算例基于不接 DG 和接入 DG 两种方案的仿真。仿真结果表明:

(1) 结合遗传算法交叉变异操作能够提高了 BQPSO 的全局搜索能力, 很好地避免了早熟现象。与其他算法的结果比较, 也证明了该算法具有更快的收敛速度和更优的目标函数值, 证明了该算法可以作为解决配电网重构优化问题的一个新的智能算法。

(2) 本文采用的不可行解处理方式很好避免了不可行解, 提高了算法的计算速度和效率。

(3) 对于无 DG 和含 DG 的算例结果的比较, 也证明了分布式电源的接入对网络有支撑作用, 可以减小网络损耗, 提高电压指标, 优化整个配电系统的运行。

参考文献

- [1] 王守相, 王成山. 现代配电网系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] 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 generators based on immune genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(4): 15-19.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [6] 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]. Power System Protection and Control, 2010, 25(8): 123-130.
- [7] 陈丽, 张晋国, 苏海锋. 考虑并网光伏电源出力时序特性的配电网无功规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 120-127.
CHEN Li, ZHANG Jinguo, SU Haifeng. Reactive power planning for distribution system with grid-connected photovoltaic system considering time-sequence characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2014, 29(12): 120-127.
- [8] 赵晶晶, 李新, 彭怡, 等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 162-166.
ZHAO Jingjing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization algorithm for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.
- [9] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 106-111.
- [10] 王佳佳, 吕林, 刘俊勇, 等. 基于改进分层前推回代法的含分布发电单元的配电网重构[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 60-64.
WANG Jiajia, LÜ Lin, LIU Junyong, et al. Reconfiguration of distribution network containing distribution generation units based on improved layered forward-backward sweep method[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 60-64.
- [11] KENNEDY J, EBERHART R. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C] // Proceeding of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetice, Orlando, USA, 1997.
- [12] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
SUN Jun. Particle swarm optimization with particles having quantum[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [13] 赵晶, 孙俊, 须文波. 改进二进制量子粒子群算法在蛋白质折叠中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3381-3383.
ZHAO Jing, SUN Jun, XU Wenbo. Improved binary quantum-behaved particle swarm optimization to protein folding[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(9): 3381-3383.
- [14] 张凯, 肖建华, 耿修堂, 等. 基于汉明距离的 DNA 编码约束研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(14): 24-26.
ZHANG Kai, XIAO Jianhua, GENG Xiutang, et al. Research on DNA encoding constraints based on Hamming distance[J]. Computer Engineering and Application, 2008, 44(14): 24-26.
- [15] 郑凯. 改进量子粒子群算法在电力系统无功优化中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
ZHENG Kai. Studies on modified quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization in power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [16] 胡卫, 黄纯, 孙彦广, 等. 基于人工培植杂交的配电网重构方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 106-111.
HU Wei, HUANG Chun, SUN Yanguang, et al. Distribution network reconfiguration based on artificially propagated hybrids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 106-111.
- [17] ESMAELIAN H R, FADAEINEDJAD R. Energy loss minimization in distribution systems utilizing an enhanced reconfiguration method integrating distributed generation[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1430-1439.

收稿日期: 2015-04-24; 修回日期: 2015-11-22

作者简介:

张涛(1981-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化运行、高电压绝缘及测试技术、电力系统过电压与接地技术; E-mail: unifzhang@hotmail.com

史苏怡(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行; E-mail: 610241053@qq.com

徐雪琴(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。E-mail: 809445844@qq.com

(编辑 姜新丽)