采用量子遗传算法以负荷均衡为目标的配电网重构

配电网重构是在保证配电网成辐射状、满足各项约束条件的情况下，确定使某一指标最佳的配电网运行方式，为了克服遗传算法用于配电网负荷均衡化效率较低且容易陷入局部最优的问题，通过将量子比特编码与遗传算法相结合，利用双态量子系统使编码呈现多态，然后将染色体收敛到单一态，能够快速地实现全局最优，弥补了遗传算法的缺点，实现了配电网负荷的最优均衡化，最后通过算例分析，证明了该方法的可行性和有效性。

钟建伟　王　力／湖北民族学院信息工程学院
倪　俊　吕　静／国网湖北省电力公司恩施供电公司



钟建伟／教授

关键词／Keywords
负荷均衡化·
重构·
量子比特·
遗传算法·

0　引言

配电网重构是优化配电系统运行的重要手段，也是配电自动化的高级应用功能，配电网以闭环方式设计，开环方式运行，因此配电网中存在大量的联络开关和分段开关，通过对这两种开关的合理操作来达到配电网某一指标最佳的运行方式，目前，国内外学者所进行的配电网重构研究大都集中于降低网损、负荷均衡化[1-2]、提高供电质量以及最佳恢复受影响的健全区域供电等方面。

有关配电网重构[3]的方法有很多，主要可分为三类：①数学优化算法，如线性规划法；②启发式方法，如最优流模式法；③人工智能算法，如蚁群算法、遗传算法和粒子群算法等[4]，目前使用较多的是人工智能算法，智能算法与其他两种方法相比能够获得更优质的解，最终达到全局最优，但计算效率低是智能算法的通病，在实用性方面还需进一步研究。

国家自然科学基金（61263030/61463014）。

本文将负荷均衡率作为配电网重构的目标函数，提出一种新的基于量子遗传算法均衡负荷的配电网重构方法，通过量子比特编码使染色体可以同时表达多个态的叠加，然后将染色体收敛到单一态，成功地解决了遗传算法[5]计算量大、效率低的问题。通过混合算法将负荷均衡率优化到最小，同时确定需要动作的联络开关和分段开关，达到负荷的均衡分配，最后通过实例分析结果表明，将量子遗传算法运用到以负荷均衡为目标的配电网重构中，有效地避免了局部最优，且搜索能力强。

1　配电网重构数学模型

本文将负荷均衡化作为目标函数，通过对联络开关和分段开关的操作，达到负荷均衡率最小的目的，其目标函数为

$$\min f=\sum_{i=1}^{N_b}\left|\frac{S_i}{S_{i,\max}}\right|^2 \qquad (1)$$

式中，f为负荷均衡率；N_b为网络中的支路总数；S_i和$S_{i,\max}$分别为支路b_i的实际功率和容量。负荷均衡率越小，表示配电网的负荷分配越平衡。

在配电网的重构过程中，还需满足以下约束条件。

1）电网潮流约束为

$$S_{k-1}=S_k+S_l \qquad (2)$$

式中，S_{k-1}为首端母线注入功率；S_k为母线末端注入功率；S_l为末端母线所带负荷。

2）支路电流与节点电压约束为

$$\begin{cases} I_i \leqslant I_{i,\max} \\ U_{i,\min} \leqslant U_i \leqslant U_{i,\max} \end{cases} \quad i=1,2,\cdots,n \qquad (3)$$

式中，$I_{i,\max}$为支路b_i电流的上限；$U_{i,\min}$和$U_{i,\max}$为节点允许的电压下限和电压上限。

3）支路容量和变压器容量约束为

$$\begin{cases} P_i \leqslant P_{i,\max} \\ P_t \leqslant P_{t,\max} \end{cases} \quad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中，$P_{i,\max}$为线路流过的有功功率允许的最大值；$P_{t,\max}$为变压器流过的有功功率最大值。

4）结构约束：配电网要满足开环运行，不能含有孤岛，重构后的结构仍为辐射状。

5）开关操作约束：为了延长开关的使用寿命，在以负荷均衡化为目标的配电网重构过程中，要求动作的联络开关数与分段开关数相等，且次数尽量要少。

2 遗传算法和量子编码

遗传算法是将解空间的解数据表示成遗传空间的基因型串结构数据，通过形成初始种群、适应度评估、选择、交叉和变异来不断地进化，并最终收敛于适应度最大的个体，即为遗传的最优个体。

遗传算法的具体操作过程如下。

1）编码：将求解变量编码为染色体，在配电网中有一定数量的开关，使用二进制对所有开关进行编码，“1”表示开关状态闭合，“0”表示开关状态断开，如“1111111100111110”表示配电网中各开关的开断状态。

2）适应度函数：反映的是个体或者解的优劣性，适应度越大表示解越优良，由于所求目标函数为负荷均衡率的最小值，因此取负荷均衡率的倒数为适应度函数。

3）选择操作：选择的目的是在当前群体中选出最优良的个体成为父代繁殖下一代，每个个体的适应度不同，适应度越大的被选择的概率越大，其表达式为

$$p_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^{N} F_j} \tag{5}$$

式中，F_i为个体i的适应度值；N为种群个体数目；p_i为被选择的概率。

4）交叉操作：交叉是遗传算法中最重要的操作，通过交叉操作可以产生不同的个体，在配电网中，交叉操作可以产生各种不同网架结构，有利于进行计算筛选最优个体。

5）变异操作：变异是在群体中随机选择一个个体，随机地改变其中某个编码的数值，在遗传算法中变异的概率一般较小。

6）算法终止：通过一定的进化代数，算法产生一个适应度值最大的个体，该个体为全局最优解。

量子编码采用量子态作为基本的信息单元，利用量子态的叠加、纠缠和干涉等特性，通过量子并行计算可以解决经典计算中的NP问题。

在量子计算中，量子比特能够同时处在两个量子态的叠加态中，如

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle\beta|1\rangle \tag{6}$$

式中，（α，β）为两个幅常数；$|0\rangle$和$|1\rangle$分别为自旋向上和自旋向下态且满足

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \tag{7}$$

量子遗传算法主要是在遗传算法的基础上融入了量子比特编码，通过使染色体表现出多个态的叠加，再利用量子旋转门对最优个体进行筛选，最终获得全局最优解，其主要操作如下。

1）编码：采用遗传算法中的二进制编码，对存在多态的问题进行量子比特编码，如两态用一个量子进行编码，四态用两个量子进行编码，以此类推，该方法的优点是通用性好，且效率高。采用多量子比特编码m个参数的基因如下

$$n_j^t = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^t & \alpha_{12}^t & \cdots & \alpha_{1k}^t & \alpha_{21}^t & \cdots & \alpha_{m1}^t & \cdots & \alpha_{mk}^t \\ \beta_{11}^t & \beta_{12}^t & \cdots & \beta_{1k}^t & \beta_{21}^t & \cdots & \beta_{m1}^t & \cdots & \beta_{mk}^t \end{pmatrix} \tag{8}$$

式中，n_j^t为第t代第j个个体的染色体；k为编码每一个基因的量子比特数；m为染色体的基因个数。

将量子比特的每一个态（α，β）都初始化为（$1/\sqrt{2}$，$1/\sqrt{2}$），这说明每一个染色体表达的全部可能状态是等概率的。

2）量子门：量子门是最终实现演化操作的执行机构，根据遗传算法的计算特点，旋转量子旋转门较为合适。量子旋转门的调整操作为

$$U(\theta_i) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \tag{9}$$

式中，θ_i为旋转角。

其更新过程如下

$$\begin{pmatrix}\alpha'\\ \beta'\end{pmatrix}=U(\theta_i)\begin{pmatrix}\alpha'\\ \beta'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\alpha'\\ \beta'\end{pmatrix} \quad (10)$$

式中，$(\alpha, \beta)^{\mathrm{T}}$和$(\alpha', \beta')^{\mathrm{T}}$分别为染色体第$i$个量子旋转门更新后的概率幅；$\theta_i$为旋转角，其大小由设置的调整策略确定。

其调整策略是将个体n_j^t当前测量值的适应度$F(x)$与该种群当前最优个体适应度值$F(\mathrm{best}_i)$比较，如果$F(x)>F(\mathrm{best})$，则调整n_j^t中相对应位量子比特，使几率幅对（α_i，β_i）向着有利于x_i出现的方向演化，反之则向着有利于best出现的方向演化。

3 基于量子遗传算法用于配电网重构的负荷均衡化

配电网负荷均衡化的目的是通过操作配电网中的联络开关和分段开关，在满足辐射状结构的条件下，实现馈线之间负荷的转移，从而提高了供电的可靠性，改善了整个系统的运行状况。

本文通过量子遗传算法对配电网进行重构，以便实现负荷的均匀分配，并提高电能质量。

将电源、变压器和负荷均视为节点，节点之间的路径表示其电气连接，量子遗传算法实现以负荷均衡为主的配电网重构，具体步骤如下。

1）首先对配电网的所有开关实行二进制编码，“1”表示闭合，“0”表示断开，将联络开关状态相同的个体视为多态，一般呈现二态或四态，如二态的量子比特编码为

$$n_j^t=\begin{pmatrix}1111011111111100\\ 1111111101111100\end{pmatrix} \quad (11)$$

2）配电系统的初始架构为单态的量子编码，现随机产生$N-1$个个体，然后N个个体构成一个种群，作为初始种群。

3）对初始种群中个体进行适应度评估，即与负荷均衡率的倒数比较，利用量子旋转门的特性，先选择出单态中适应度值最优的个体，然后与多态中适应度值最优的个体进行比较，得出初始种群中最优个体及其适应度值。

4）最优个体作为父代繁殖下一代，然后通过交叉操作形成新的个体，即不同开关组合，新的开关组合编码是通过变异得来的，变异是遗传中最重要的部分。

5）随机选择一个个体，对选中的个体以一定概率随机改变其某一位的编码数值，但是变异操作发生的概率很低。

6）通过适应度值计算得出第二代个体是位于单态还是多态，若位于多态中，则可通过量子比特编码将染色体收敛到单一态，从而得到第二代中的最优个体。

7）依照同样的操作进行下一代的进化，直到满足设置的迭代次数，最后经过量子比特收敛到最优个体，该个体适应度值的倒数即为最优的负荷均衡率，其编码数值对应相应的开关动作情况。

采用量子遗传算法实现以负荷均衡率为目标函数的配电网重构流程如图1所示。

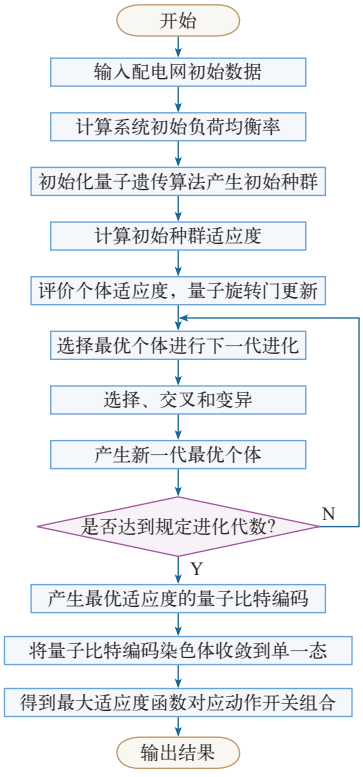


图1 量子遗传算法重构流程

4 算例分析

本文对IEEE 14节点三馈线的配电网系统进行仿真分析，验证了量子遗传算法对配电网中负荷

均衡的可靠性和高效性。图2为一个单电源系统，包括3条馈线、16条支路、13个分段开关及3个联络开关，系统基准容量为100 MV·A，基准电压为23 kV，总负荷为(28.7＋j7.75) MV·A。

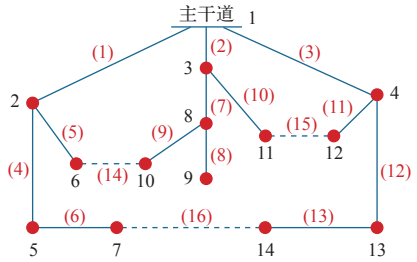


图2　IEEE 14节点配电网

设置量子遗传算法的进化代数为200，种群大小为40，量子比特编码长度为16，交叉的概率为0.6，变异的概率为0.01，量子旋转角的初值为0，运用量子遗传算法对配电系统进行重构，得到重构后配电网结构如图3所示。

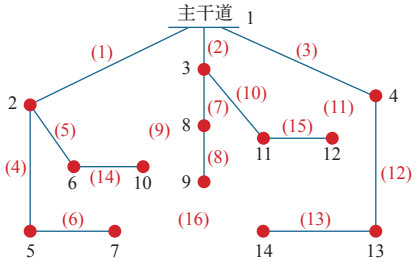


图3　重构后的配电网结构

量子遗传算法进化的仿真结果如图4所示。

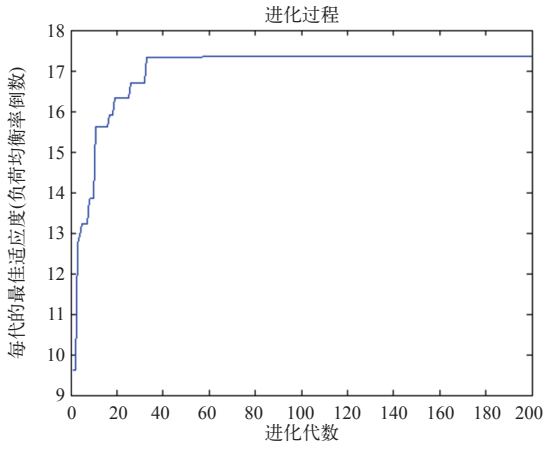


图4　量子遗传算法仿真结果

根据最终结果可以看出，在进行配电网重构以后，负荷均衡率有了明显的降低，通过最优解将量子比特编码染色体由多态收敛到单一态，根据量子编码数值对应的开关状态得出相应的开关动作，同时在计算过程中得出最低节点电压。

基于量子遗传算法，配电网负荷均衡化结果如下表所示。

表　配电网负荷均衡化结果

选项	断开开关	负荷均衡率	最低节点电压
重构前	14 15 16	0.071	0.945 6
重构后	9 11 16	0.057 6	0.958 3

经过200次的进化后，可见在进化到60代左右时已产生最优个体，最优个体对应的编码为“1111111101011110”，开关的操作次数为4次，量子遗传算法在均匀负荷的同时还提高了电能质量。

5　结束语

本文就基于负荷均衡率为目标函数的配电网重构问题进行了阐述，并提出了一种混合算法，即量子遗传算法，完成了对配电网负荷的最优分配，同时还提高了供电质量，且该算法能够对存在多态的问题实行量子比特编码，能够很好地提高计算效率，获得全局最优解，经过算例分析验证了该算法的高效性。

参考文献

[1] 王琼，王久博，任伟健．基于混合算法的油田配电网负荷均衡化 [J]．电力系统自动化，2012，34 (18)：36-38．

[2] He S，Wu Q H，Saunders J R．Group search optimizer：an optimization algorithm inspired by animal searching behavior [J]．IEEE Transactions on Evolution Computation，2009，13 (5)：973-990．

[3] 刘健，程红丽，董海鹏．配电网故障判断与负荷均衡化 [J]．电力系统自动化，2002，26 (22)：34-38．

[4] Lin W M，Cheng F S，Tsay M T．Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm [J]．IEE Proceedings－Generation，transmission and Distribution，2000，147 (6)：349-354．

[5] 张栋张，刘春，傅正财．基于改进禁忌算法的配电网络重构 [J]．电工技术学报，2005，20 (11)：60-64．

（收稿日期：2016－11－23）EA