

基于量子进化算法的配电网架规划

王 腾, 王 倩, 张红涛, 张洪源, 郑 凯

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 详细介绍了应用量子进化算法进行配电网架规划的方法, 采用单阶段子系统模型, 以规划年综合费用最低为目标, 以线路传输容量、电压降、配电网辐射状结构等为约束条件。通过对具体实例的仿真实验, 验证了该方法的可行性和优越性。

关键词: 配电网; 网架规划; 量子进化算法

Abstract: The method of distribution network structure planning based on quantum - inspired evolutionary algorithm is introduced in detail. Using one - stage sub - system model, the optimal module takes the minimum annual comprehensive cost as its object, and takes the capacity and voltage drop of feeder and the radiation of distribution network as its restrictions. The feasibility and efficiency of the method are verified by the results of applying it to a sample system.

Key words: distribution network; structure planning; quantum - inspired evolutionary algorithm

中图分类号: TM726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0075-04

配电网网络规划问题是指在满足对用户供电和网络运行约束的前提下, 寻求一组最优的决策变量(变电站位置和容量、馈线的路径和尺寸等), 使投资、运行、检修、网损和可靠性损失费用之和最小^[1]。这里所研究的是配电网网络规划中的馈线路径优化规划问题, 即配电网网架规划。配电网网架规划是一个离散的、非线性的、多约束的问题, 近年来国内外学者做了大量的研究。文献 [2] 采用改进最小生成树算法进行配电网架规划, 具有较高的计算效率, 但是扩展规划仍需要根据人的经验有干预地进行; 文献 [3] 利用辐射型配电网每个负荷节点只有一个前继节点的特点, 选取与负荷点相同数目的变量, 避免了配网辐射状的检验, 运用基因算法完成了网架优化; 文献 [4] 详细探讨了 Tabu 搜索算法在配电网架规划中的应用, 禁忌搜索算法用于大规模配电网架规划时由于编码过长, 通过禁忌表逐一移动线路, 寻优效率不高, 且禁忌表长度是根据经验确定的, 规划结果随经验变动^[5]。

下面提出一种基于量子进化算法的配电网架规划方法。量子进化算法是一种以量子计算理论为基础的的概率搜索算法, 将量子计算与进化算法相结合, 使用量子计算技术中的概念以提高进化算法编码的多样性, 从而加快计算速度, 保证优化的全局收敛性^[6]。给出了配电网架优化规划模型, 详细阐明基于

量子进化算法的配电网架优化规划方法, 最后通过对算例的仿真计算, 验证了所提方法的有效性和优越性。

1 配电网架规划数学模型

根据规划时对负荷和配电系统的处理不同, 将配电网架规划模型分为单阶段子系统、单阶段全系统、多阶段子系统、多阶段全系统四类^[1]。这里采用单阶段子系统模型, 假定规划水平年内负荷需求不变, 在模型中不考虑负荷增长因素。配电网架规划以线路的规划年综合费用最低为目标, 并服从变电站容量、馈线段容量、电压降落、辐射型网络结构等约束, 其数学模型可表示为

$$\min f(x) = \sum_{k=1}^n C_{1k} T_k x_k + \sum_{k=1}^n C_{2k} T_k \tau_{\max} \Delta P_k \quad (1)$$

约束条件为

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (2)$$

$$I_k \leq I_{\max} \quad (3)$$

辐射型约束;

连通性约束。

式 (1) 中 $f(x)$ 为年综合费用; k 为支路的编号; n 为待选线路总数; $C_{1k} = \gamma_k + \alpha_k$, γ_k 是投资回收率, α_k 是设备折旧维修费用率; T_k 是支路 k 的总投资费用; x_k 为优化变量, 当待选线路 k 被选中时取 1, 否则取 0; $\sum_{k=1}^n C_{1k} T_k x_k$ 为全部支路的年投资费用; C_{2k} 为电价;

τ_{\max} 是最大损耗时间; $\Delta P_k = (P^2 + Q^2) Z_k / U^2$ 为支路 k 的有功损耗, Z_k 为支路阻抗, P, Q 为支路传输功率, U 为支路电压, P, Q, U 取支路同一侧的数值; $\sum_{k=1}^n C_{2k} \tau_{\max}$ ΔP_k 为全部支路的年运行费用; 式 (2) 为节点电压约束, U_{\min} 为节点电压下限; U_{\max} 为节点电压上限; 式 (3) 为支路电流约束, I_{\max} 为支路 k 的最大允许电流。配电网必须遵守分层分区供电原则, 不应造成不同线路供电范围交叉和重叠, 并要求对所有的负荷点供电, 还应满足辐射状约束和连通性约束。在进行目标函数的计算过程中, 如果有违反约束条件的方案, 则为失败的规划方案。

2 基于量子进化算法的配电网架规划方法

量子进化算法是以量子计算理论为基础的概率搜索算法, 以量子比特 (Q-bit) 和量子叠加态 (superposition of states) 为基础, 将量子态的矢量表述引入染色体编码中, 以当前最优解的信息为引导, 用量子门 (Q-gate) 变换、量子交叉等算子优化种群, 使种群向着适应度高的方向进化。与传统进化算法相比, 量子进化算法能够在探索与开发之间取得平衡, 具有种群规模小、收敛速度较快、全局寻优能力强的特点^[7]。以年综合费用最低为目标函数, 基于量子进化算法的配电网架规划流程: ①输入线路阻抗、节电负荷等原始数据; ②初始化种群 $Q(t)$, 进化代数 $t=0$; ③对 $Q(t)$ 进行观测, 得到一组观测态 $P(t)$; ④将 $P(t)$ 代入辐射网判断子程序, 若非辐射网非连通则修复, 得到新的 $Q(t), P(t)$; ⑤将 $P(t)$ 代入潮流计算子程序, 计算潮流, 判断是否符合电压、电流约束, 对不符合约束个体赋予较大适应度; ⑥根据潮流计算结果, 对 $P(t)$ 中符合约束个体进行适应度评价, 选出最优解并保存; ⑦计算量子旋转角、量子门, 更新 $Q(t)$; ⑧执行量子交叉; ⑨判断迭代结束条件, 若满足则停止迭代输出结果, 否则令 $t=t+1$, 转至步骤 (3)。

以上流程中, 步骤 (2) 需对种群中每个个体进行染色体编码, 每一条待选线路对应染色体中的一位, 每个个体都包含全部待选线路的信息, 用量子位表示, 一个量子位的状态可由两个量子态的叠加表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (4)$$

式中, $|\psi\rangle, |0\rangle, |1\rangle$ 为量子位的状态; α, β 为复常数, 表示相应状态出现的概率, 它们满足 $|\alpha|^2 +$

$|\beta|^2 = 1$; $|\alpha|^2, |\beta|^2$ 分别为量子位处于状态 0 和 1 的概率。每条待选线路由一个量子位表示, 若有 n 条待选线路, 则染色体编码为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k \dots \alpha_n \\ \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k \dots \beta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $|\alpha_k|^2 + |\beta_k|^2 = 1 (k=1, 2, \dots, n)$ 。在初始化时将所有 α_k, β_k 都设定为 $1/\sqrt{2}$ 。

步骤 (3) 中对 $Q(t)$ 进行观测的方法是: 对每一个量子位, 随机产生一个 $[0, 1]$ 随机数, 若该随机数小于 $|\alpha|^2$, 则 $P(t)$ 中的相应位取 0, 表示相应线路不被选中, 否则取 1, 表示相应线路被选中。这样, 就可得到一组二进制编码的观测态 $P(t)$ 。

步骤 (4) 对观测态 $P(t)$ 所表示网络结构的辐射状和连通性进行判断, 若不满足进行修复, 方法为将 $P(t)$ 中相应线路的二进制位取反, $Q(t)$ 中相应量子位 α_k 和 β_k 值互换。

步骤 (7) 中量子变换门采用量子旋转门, 每一位量子位 $[\alpha_k^{(t)}, \beta_k^{(t)}]^T$ 的更新公式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_k^{(t+1)} \\ \beta_k^{(t+1)} \end{bmatrix} = G(\theta) \begin{bmatrix} \alpha_k^{(t)} \\ \beta_k^{(t)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $G(\theta)$ 为量子旋转门。

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, θ 为旋转角度, 其取值可查询表 1。

表 1 旋转角 θ 的查询表

x_k	$best_k$	$f(x_k) > f(best_k)$	θ			
			$\alpha_k \beta_k > 0$	$\alpha_k \beta_k < 0$	$\alpha_k = 0$	$\beta_k = 0$
0	0	True	0	0	0	0
0	0	False	0	0	0	0
0	1	True	$+\delta$	$-\delta$	0	$\pm\delta$
0	1	False	0	0	0	0
1	0	True	$-\delta$	$+\delta$	$\pm\delta$	0
1	0	False	0	0	0	0
1	1	True	$+\delta$	$-\delta$	$\pm\delta$	0
1	1	False	0	0	0	0

表 1 中 $x_k, best_k$ 分别为当前染色体和到目前为止搜索到的最优解的第 k 位, 均为观测态; $f(x)$ 为适应度函数; θ 为旋转角度; α_k, β_k 为当前染色体第 k 位量子位的概率幅; δ 为 θ 的大小, 其取值采用动态调整策略 $\delta = 0.5\pi \exp(-t/t_{\max})$ ^[8], $\pm\delta$ 指以相等的概率取 $+\delta$ 或 $-\delta$ 。

该量子门调整策略是将当前染色体观测值适应度 $f(x_k)$ 与当前最优解适应度 $f(best_k)$ 相比较, 如

果 $f(x_k) > f(best_k)$, 则调整相应位 $[\alpha_k^{(i)}, \beta_k^{(i)}]$, 使之向有利于 x_k 出现的方向进化; 否则, 使之向有利于 $best_k$ 出现的方向进化。

步骤 (8) 中量子交叉采用全干扰交叉, 使种群中的所有染色体均参与交叉, 信息充分组合交换, 提高搜索效率, 防止陷入局部最优, 具体方法是: 将种群中的所有个体随机排序; 取第一个个体的第一个基因作为新个体的第一个基因, 取第二个个体的第二个基因作为新个体的第二个基因, 循环往复, 直到新个体具有相同的基因数; 以此类推, 直到新的种群具有相同的规模。例如, 一个种群 $Q(t)$ 交叉前各个体为

- $Q_1(t): A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7;$
- $Q_2(t): B_1 B_2 B_3 B_4 B_5 B_6 B_7;$
- $Q_3(t): C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7;$
- $Q_4(t): D_1 D_2 D_3 D_4 D_5 D_6 D_7;$
- $Q_5(t): E_1 E_2 E_3 E_4 E_5 E_6 E_7.$

交叉后为

- $Q_1(t+1): A_1 B_2 C_3 D_4 E_5 A_6 B_7;$
- $Q_2(t+1): B_1 C_2 D_3 E_4 A_5 B_6 C_7;$
- $Q_3(t+1): C_1 D_2 E_3 A_4 B_5 C_6 D_7;$
- $Q_4(t+1): D_1 E_2 A_3 B_4 C_5 D_6 E_7;$
- $Q_5(t+1): E_1 A_2 B_3 C_4 D_5 E_6 A_7.$

3 算例分析

按照前面的模型, 分别用遗传算法和量子进化算法, 采用 Matlab 仿真, 对文献 [9] 中的配电网架规划算例进行测试。该配电网初始网为有 3 个节点、2 条支路的 10 kV 电网, 要扩展为 10 个节点 9 条支路的辐射型网络。网络结构如图 1 所示。

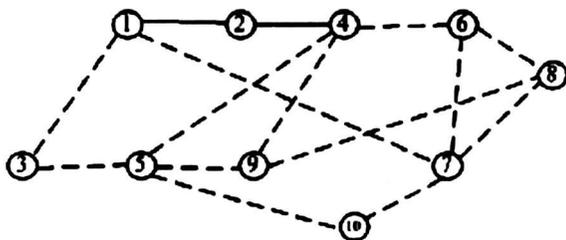


图 1 初始网架图

图 1 中节点 1 为变电站节点, 电压为 10.5 kV, 2 条实线表示已有线路, 14 条虚线表示待扩建线路, 用虚线表示。

取 $C_1 = 0.155$ 元 / kWh, $C_2 = 0.5$ 元 / kWh, $\tau_{max} = 3000$ h, 电压允许变化范围为 $\pm 7\%$, 系统基准容

量取为 $S_b = 10$ MVA, $U_b = 10$ kV, 最大进化代数为 100, 种群数为 10。经过仿真计算, 2 种算法得到满足约束条件的最优系统投建方案相同, 年综合费用均为 28.28 万元, 最优投建方案如图 2 所示, 虚线为需投建线路。

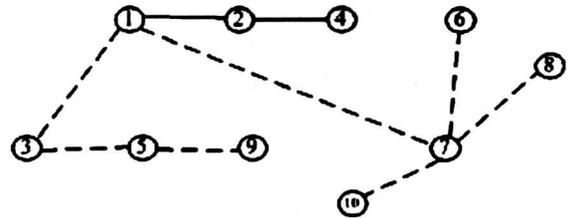


图 2 优化网架图

用 2 种算法分别计算 20 次, 将各代最佳个体适应度取平均值, 得到其最佳适应度平均收敛曲线图, 如图 3 所示。

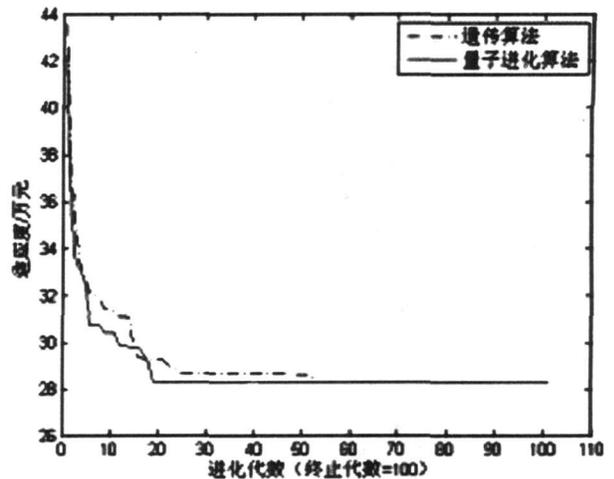


图 3 平均收敛曲线图

平均收敛代数, 遗传算法为 53 代, 量子进化算法为 19 代, 可见所用量子进化算法明显优于遗传算法, 计算速度大大提高。

4 结 语

前面详细介绍了应用量子进化算法进行配电网架规划的方法, 采用单阶段子系统模型, 以规划年综合费用最低为目标, 以线路容量、电压范围、辐射状结构等为约束条件。经过仿真验证, 所用方法在计算速度方面明显优于遗传算法, 该方法是有用的、可行的, 具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 方兴, 郭志忠. 配电网规划研究述评 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 71-74.

- [2] 刘健, 杨文字, 余健明, 等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 103-108.
- [3] 李靖霞, 鞠平. 配电网优化规划的基因算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 12-14.
- [4] 陈根军, 李继洗, 王磊, 等. 基于 Tabu 搜索的配电网规划 [J]. 电力系统自动化, 2001, 4(10): 40-44.
- [5] 王成山, 王赛一. 基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划 [J]. 电网技术, 2004, 28(14): 68-73.
- [6] Han K H, Kim J H. Quantum - inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(6): 580-593.
- [7] 张葛祥, 李娜, 金炜东, 等. 一种新量子遗传算法及其应

- 用 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 476-479.
- [8] 赵英杰, 王正志. 基于量子进化算法的 RNA 序列 - 结构比对 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2009, 36(9): 1222-1228.
- [9] 陈章潮, 唐德光. 城市电网规划与改造 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 200-202.
- [10] 王凌. 量子进化算法研究进展 [J]. 控制与决策, 2008, 23(12): 1321-1326.

作者简介:

王 腾 (1987), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划。

王 倩 (1962), 女, 教授, 主要研究方向为电力调度综合自动化、分布式开放式 SCADA 系统、嵌入式工业测控系统。

(收稿日期: 2010-04-12)

(上接第 59 页)

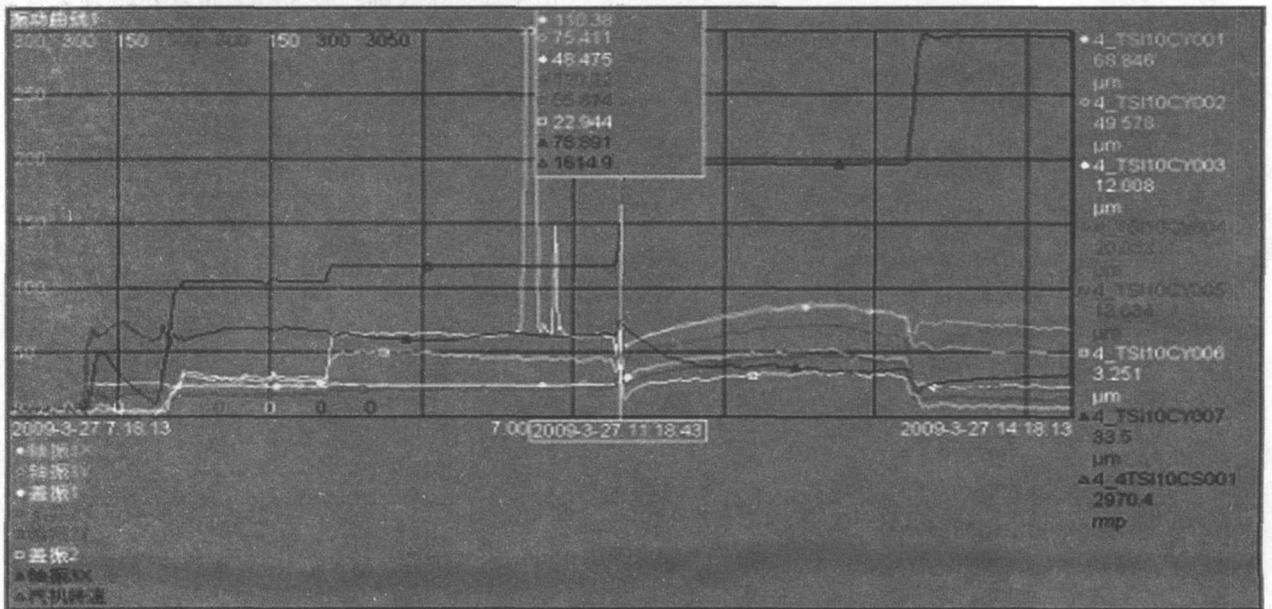


图 5 4号机组 A 修后冷态启动 1、2、3号瓦振动曲线图

4 建议

1) 目前高压缸倒暖用汽从高排管道抽取, 只有在高压旁路开启后才能投入。高压缸预暖用蒸汽参数为 0.4~0.8 MPa, 200~250℃, 辅汽完全可以满足要求且可以利用邻机辅汽作为高压缸预暖汽源, 这样在锅炉点火前就可以进行高压缸预暖。建议将高压缸预暖用汽取自辅汽, 可缩短启动时间约 2 h 降低启动费用, 机组提前约 2 h 发电。

2) 暖机或升速过程中, 如果发生较大的振动, 应该立即打闸停机进行盘车直轴, 而不应降速暖机。因为振动大最易导致动静部分摩擦、汽封磨损、转子弯曲, 转子一旦弯曲, 振动越来越大, 摩擦就越厉害。这样恶性循环易使转子产生永久性变形弯曲, 使设备严

重损坏。

3) 目前 CRT 缸温画面并没有各种温差值的显示, 各部温差需人工计算, 建议在画面中生成各部温差值便于监视和及时发现超限值。

参考文献

- [1] 彰金宝, 李振宁, 等. 300MW 机组集控运行规程 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [2] 杨树旺, 张新元, 等. 汽机设备说明书 [Z]. 三河发电有限责任公司, 2007.
- [3] 孙曰泰, 李贵春, 等. 三河电厂二期工程调试报告 [R]. 华北电力科学研究院, 2007.
- [4] 华东电业管理局. 汽轮机运行技术问答 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

作者简介:

荆永昌 (1984), 男, 河南焦作人, 助理工程师, 从事发电厂集控运行工作。

(收稿日期: 2010-06-13)