

量子进化算法在电力系统无功优化中的应用

娄素华, 吴耀武, 彭磊, 熊信银

(华中科技大学电气工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 量子进化算法 QEA (Quantum - inspired evolutionary algorithm) 将量子理论引入进化计算领域, 是一种基于量子计算概念的进化策略算法。它采用量子比特为基本信息位进行个体编码, 使用量子态的么正变换(量子门变换)实现个体的进化, 同时利用量子编码的多态叠加性以及“全干扰交叉”可以有效克服进化过程中的早熟现象, 因此它比传统进化算法具有更快的收敛速度和全局寻优能力。该文将该算法应用于电力系统无功优化问题, 提出基于 QEA 算法的无功优化模型, 并对算法参数进行了研究, 提出了合适的量子变异参数。运用该算法对 IEEE6、30 节点系统进行了仿真计算, 计算结果验证了模型和算法的有效性。

关键词: 无功优化; 量子进化算法; 么正变换; 全干扰交叉; 量子量测塌陷

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)18-0030-06

0 引言

电力系统无功优化是一个复杂约束优化问题, 具有非线性、非连续性、目标函数难以表达成显式函数等特点。当系统规模增大时, 在有限的时间内往往无法完成对解空间的充分搜索, 从而难以求得问题的全局最优解。利用基于微分学的线性规划^[1](LP)或非线性规划^[2](NLP)技术求解, 前者需要将问题逐步线性化并计算灵敏度系数, 后者则需要求解梯度方向, 因此这两种方法的计算繁琐、复杂, 计算量大。

近些年来, 一类模拟生物进化过程与机制来求解问题的进化计算技术在无功优化问题中得到了广泛的应用^[3~6]。进化计算是一种仿生计算, 遵循“适者生存”的仿自然法则, 采用基于种群的设计方案, 通过选择、交叉、变异等机制实现系统的优化。这类算法以遗传算法为代表, 具有鲁棒性、全局性和通用性等特点。但是在传统的进化算法中, 群体的多样性和选择性压力的特性不能同时实现。当选择性增加时, 搜索就会集中于群体的顶层个体, 从而失去群体的多样性, 导致早熟现象的发生, 产生这种情况的根本原因在于进化算法基本信息位的确定性表示方法。

量子进化算法^[7]是一种使用概率表示的新型优化方法, 是量子计算和进化计算理论相结合的产物, 属于概率算法范畴。在概率算法中, 系统不再处于一个固定的状态, 而是对于各个可能状态有一个状态几率矢量, 通过状态几率矢量和状态转移矩阵相乘可以得到任何时刻的系统状态矢量。QEA 算

法以概率表示的量子比特为基本信息位进行编码, 用量子态的么正变换即量子门变异进行种群的进化, 并用最优解的信息引导量子变异过程, 同时采用多个个体间的“全干扰交叉”克服普通交叉操作的局部性和单一性, 避免早熟现象的发生。文献[8~10]将量子进化算法分别应用于背包问题、图像识别和输电网络规划等领域中, 都取得了良好的效果。本文将量子进化算法应用到电力系统无功优化中来, 并对 IEEE 标准测试系统进行了仿真计算, 计算结果证明了该算法的有效性。

1 无功优化数学模型

在电网的有功潮流调度已知的情况下, 无功优化的非线性规划模型可描述为:

$$\begin{aligned} \min & P_{\text{loss}}(X_1, X_2) \\ \text{s.t.} & g(X_1, X_2) = 0 \\ & x_{1\min} \leq x_{1i} \leq x_{1\max} \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & x_{2j\min} \leq x_{2j} \leq x_{2j\max} \quad j = 1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{loss}}(X_1, X_2)$ 为系统有功损耗; $g(X_1, X_2) = 0$ 是功率方程约束; $x_1 = [U_G^T, Q_C^T, T_B^T]^T$ 为控制变量, U_G 为发电机节点电压矢量, Q_C 为无功补偿装置的无功出力向量, T_B 为有载调压变压器的变比构成的矢量, N 为控制变量总数; $x_{1\max}$ 和 $x_{1\min}$ 分别为第 i 个控制变量的上、下限; $x_2 = [U_L^T, Q_G^T, q_l^T]^T$ 为状态变量, U_L 为负荷节点电压矢量, Q_G 为发电机无功出力矢量, q_l 为支路潮流矢量, $M = N_d + N_g + N_1$, N_d 、 N_g 、 N_1 分别为负荷节点总数、发电机节点总数和系统支路数, $x_{2j\max}$ 和 $x_{2j\min}$ 分别为第 j 个状态变量的上、下限值。

2 量子进化策略

2.1 量子计算基本概念

量子计算以量子比特 (qubit)为基本的信息存储单元,它属于二维 Hilbert态空间的量子体系,由两个本征态的任意叠加态所构成。两个本征态称为态空间的基,记为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。一个量子比特的状态可以为任意基态的叠加,叠加态和基态的关系表示为:

$$| \psi \rangle = | 0 \rangle + | 1 \rangle \quad (2)$$

其中: α 和 β 为复数,称为概率幅,满足归一化条件 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$,其平方表示 测量塌陷到某一基态的概率。如果一个量子位串有 m 位,则可同时表示 2^m 个状态,因而在对量子比特计算时,一次运算就对 2^m 个状态同时操作,这就是量子并行性,是量子计算区别于经典计算的根本所在。

量子计算的本质特征就是充分利用量子态的叠加性和相干性,以及量子比特的关联性(又称为纠缠性)。在量子算法中,量子态的演化主要是通过量子门的作用。在指定基态的条件下,量子门可以由作用于 Hilbert空间中向量的矩阵 A 来描述,一次量子门运算将同时作用于组成叠加态的所有基态上,由于量子态的线性约束,各个基态通过量子门相互干涉,它们之间的相对相位发生改变,从而各个基态的概率幅发生变化,由基态所表示的运算结果坍塌的概率发生改变。

2.2 量子进化算法

量子进化算法就是基于量子计算的概念和理论,将量子理论引入进化计算的领域,它以量子比特和量子叠加态为基础,采用量子比特进行个体编码,以量子空间的么正变换和其它进化算子实现系统状态的演化。

1) 基于量子比特的个体编码方式

经典进化算法的常用编码方式有二进制编码、十进制编码和符号编码。在量子进化算法中,采用具有叠加性的量子比特 (Qubit)进行编码,即用一对复数定义一个量子比特位。一个具有 m 位量子比特的系统可描述为:

$$\begin{bmatrix} | \psi_1 \rangle & | \psi_2 \rangle & \dots & | \psi_m \rangle \\ | \psi_1 \rangle & | \psi_2 \rangle & \dots & | \psi_m \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m$,满足归一化条件。

2) 量子变异

量子算法中,信息处理过程通过量子态的么正

变换来实现,将这种变化方式引入到经典进化算法中,通过个体的量子变异实现系统的进化,可以有效地克服标准进化算法中变异操作的盲目性避免进化过程的随机扰动性,从而加快收敛速度。

量子态的么正变换通常采用量子门来实现,量子变异就是以最优个体的信息作为引导,通过量子门的作用对量子个体进行更新,使整个种群向适应度更高的方向进化发展。对于上面描述的具有 m 位量子比特的一个个体,每个量子比特位 (i, i)的更新公式为:

$$\begin{bmatrix} | \psi_i(t+1) \rangle \\ | \psi_i(t+1) \rangle \end{bmatrix} = U(i) \begin{bmatrix} | \psi_i(t) \rangle \\ | \psi_i(t) \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: t 表示进化的代数; $U(i)$ 为量子旋转门。

量子变换门都是根据问题的实际情况设置,本文采用了下面相位旋转操作算子:

$$U(i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $U(i)$ 为么正矩阵; θ 为变异旋转角度, $\theta = s(i, i) \cdot \theta_0$,可以查表 1得到。

表 1 量子旋转门的旋转角

Tab 1 Rotation angle of quantum rotation-gate

x_i	b_i	$f(x)$	$f(b)$	i	$s(i, i)$			
					$i > 0$	$i < 0$	$i = 0$	$i = 0$
0	0	假	0	0	0	0	0	0
0	0	真	0	0	0	0	0	0
0	1	假			+1	-1	0	± 1
0	1	真			-1	+1	± 1	0
1	0	假			-1	+1	± 1	0
1	0	真			+1	-1	0	± 1
1	1	假	0	0	0	0	0	0
1	1	真	0	0	0	0	0	0

在表 1中, x_i 和 b_i 为当前个体和历史最优个体的第 i 位的二进制值; $f(x)$ 为适应度函数; $s(i, i)$ 为旋转角的方向,决定了向全局最优解搜索的方向; θ_0 为旋转的角度值,控制算法收敛的速度, $\theta_0 \in (0, 0.025)$ 。

3) 量子交叉

在量子进化算法中,利用量子叠加态的相干性可以构造一种全新的交叉操作,称之为“全干扰交叉”。在这种交叉操作中,可以随意选择参与交叉的个体数,而参与交叉个体的每一个个体均进行交叉操作,新形成的子代个体携带多个父代个体的信息,实现了种群信息的充分融合,可以有效地避免种群趋同现象的过早发生。

进行量子全干扰交叉时,首先按照交叉率 P_c 从种群中选出一定数目的个体放入交叉池,形成一个

交叉阵列,然后按对角线重新排列,产生新个体。若交叉种群规模为 4,个体长为 5,全干扰交叉的具体操作如图 1。按照对角线重新排列图 1 的交叉阵列,新形成的四个个体分别为 $A_1B_2C_3D_4E_1$, $A_2B_3C_4D_1E_2$, $A_3B_4C_1D_2E_3$ 和 $A_4B_1C_2D_3E_4$ 。

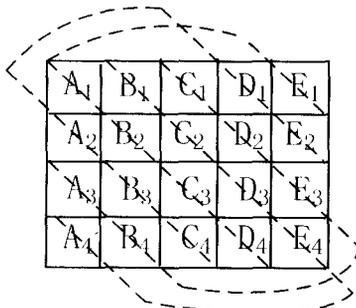


图 1 全干扰交叉示意图

Fig 1 Schematic diagram of whole interference crossover

除了上面的交叉模式,还可以采用其它不同的方法产生交叉基因位,例如一点交叉、多点交叉或算术交叉等。

4) 量子量测塌陷

在量子空间中,一个量子位的状态可以表示为 $|0\rangle + |1\rangle$,这是一个本征态的叠加态。在没有对它进行测量之前,以不同的概率处于这些基本态中。一旦对其进行测量,就以 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 的概率塌陷到 0 或 1。

在量子进化算法中,利用量子量测塌陷原理可以实现量子叠加态到传统进化算法二进制确定态的转换,如式(3)所描述的 m 位量子个体,对应的二进制编码也是 m 位,每一位以概率 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 取 0 或者 1。具体转换方法如下:产生一个 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数 $Randi$ 若 $Randi < |0\rangle^2$, 则取 0, 否则取 1。对于第 k 代量子种群 $Q(k) = \{q_1^k, q_2^k, \dots, q_n^k\}$, 经过量测塌陷,产生一个二进制解群 $p(k) = \{p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)\}$, 其中二进制解 $p_j(k)$ ($j=1, 2, \dots, n$) 的每一位是通过使用量子比特的概率,即 $q_j(k)$ 中的 $|0\rangle^2$ 或 $|1\rangle^2$ ($i=1, 2, \dots, m$) 得到的。

2.3 QEA 算法流程

基于前面的编码方式和演化算子, QEA 算法流程如下:

- 1) 初始化进化代数 $k=0$, 初始化量子种群 $Q(k) = \{q_1^k, q_2^k, \dots, q_n^k\}$, n 为种群规模。
- 2) 通过观测量子态种群 $Q(k)$, 得到确定态的种群 $P(k)$, 计算群体 $P(k)$ 的适应度, 得到当前最好解。
- 3) 迭代结束条件判断: 满足, 输出最优解, 否则

继续。

4) $k=k+1$, 执行量子变异, 生成 $Q(k+1)$ 。

5) 以轮盘赌的方式抽取参与量子交叉的个体, 执行量子交叉。

6) 转步骤 2)。

3 基于 QEA 算法的无功优化

应用 QEA 算法求解电力系统无功优化问题, 在进行针对问题的算法研究时, 主要考虑下面的几个方面。

1) 优化变量的选取。以有功网损最小为目标函数, 考虑功率平衡约束和变量约束的无功优化问题, 控制变量包括发电机端电压 V_G 、无功补偿节点补偿容量 Q_C 、变压器分接头 T_i , 状态变量包括发电机无功出力 Q_G 、负荷节点电压 U_D 和支路无功功率 q_b 。在算法中, 以控制变量作为优化变量进行优化, 种群中的每个个体代表一个优化方案。

2) 约束条件的处理。无功优化的控制变量就是算法中的优化变量, 所以控制变量的不等式约束通过编码设计自动得到满足。对于状态变量的不等式约束, 采用不可微罚函数的形式进行处理, 加入罚函数的目标函数如式(6)~(9)。功率平衡的等式约束 $g(X_1, X_2) = 0$, 通过潮流计算来满足。潮流计算的结果又是与当前优化变量对应的系统状态变量, 可用于求解式(6)的目标函数。

$$\min f(X) = P_{\text{loss}}(X_1, X_2) + \sum_{j=1}^{N_d} [\exp(V_j) - 1] + \sum_{k=1}^{N_g} [\exp(Q_k) - 1] + \sum_{l=1}^{N_1} [\exp(q_l) - 1] \quad (6)$$

$$V_j = \begin{cases} (V_j - V_{\max}) / (V_{\max} - V_{\min}) & V_j > V_{\max} \\ 0 & V_{\min} < V_j < V_{\max} \\ (V_{\min} - V_j) / (V_{\max} - V_{\min}) & V_j < V_{\min} \end{cases} \quad j=1, 2, \dots, N_d \quad (7)$$

$$Q_k = \begin{cases} (Q_k - Q_{\max}) / (Q_{\max} - Q_{\min}) & Q_k > Q_{\max} \\ 0 & Q_{\min} < Q_k < Q_{\max} \\ (Q_{\min} - Q_k) / (Q_{\max} - Q_{\min}) & Q_k < Q_{\min} \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N_g \quad (8)$$

$$q_l = \begin{cases} (q_l - q_{\max}) / (q_{\max} - q_{\min}) & q_l > q_{\max} \\ 0 & q_{\min} < q_l < q_{\max} \\ (q_{\min} - q_l) / (q_{\max} - q_{\min}) & q_l < q_{\min} \end{cases} \quad l=1, 2, \dots, N_1 \quad (9)$$

式中: α_1 为负荷节点电压越界惩罚系数; α_2 为发电机无功出力越界惩罚系数; α_3 为支路潮流越限惩罚系数。在式(6)中, 第一项为有功网损费用; 第二项

为对电压越界的罚函数;第三项为对发电机无功出力越界的罚函数,第四项为对支路潮流越界的罚函数。

3) 适应度函数设计。在 QEA 算法,设计合理的适应度函数对于整个搜索过程非常重要。本文借鉴选择性遗传算法中选择压力的概念,设计一种基于种群的适应度函数。对于式(6)描述的无功优化问题,在某一代种群中,首先给出选择压力 P_{re} ,则适应度函数与目标函数的映射关系为:

$$Y_i = \frac{f_{min} + f_{max}}{P_{re}} [1 + (P_{re} - 1) \cdot \frac{f_{max} - f_i}{f_{max} - f_{min}}] \quad (10)$$

式中: P_{re} 为选择压力; Y_i , f_i 分别为种群中第 i 个个体的适应度值和目标函数值; f_{min} 和 f_{max} 为种群中个体的最大、最小目标函数值。

上述的适应度函数值适用于同代个体间的比较,不同代个体的比较需采用目标函数值。采用基于种群的适应度函数,可以在算法搜索过程中,自动调节种群的多样性和选择性之间的关系。

4) 收敛判据。文中使用了双重收敛判据:全局最优值连续 n 代保持不变或迭代次数超过上限。满

足一个条件即停止迭代。

算法具体的求解流程应先读入原始数据,获得节点和支路信息及变量的取值范围,然后执行 1.3 节 QEA 算法的计算流程。

4 算例及结果分析

为了验证基于 QEA 算法无功优化模型的有效性,本文分别对两个标准系统进行了无功优化计算。

4.1 算例 1

本算例用 QEA 算法研究 IEEE6 节点系统,系统具体数据见文献 [6]。系统的控制变量包括 2 台发电机(节点 1,2,选取节点 1 为平衡节点)、2 台可调变压器和 2 个无功补偿设备。计算时,算法参数中的种群规模 $POPSIZE = 25$,量子变异率 $P_m = 0.8$,量子交叉率 $P_c = 0.4$,变异旋转角 $\theta = 0.1 \text{ rad}$ 。为具有可比性,以线路有功网损最小为目标,进行无功优化计算,该系统初始潮流及优化结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出, QEA 算法的计算结果与文献 [1,6]是一致的,说明本文方法是正确有效的。

表 2 IEEE6 节点系统变量上下限和优化计算结果

Tab 2 Limits of variables and optimization result of IEEE6 bus system

变量名称	运行下限	运行上限	初始潮流	MTSA 优化 ^[6]	LP 优化 ^[11]	QEA 优化	
发电机电压	V_{G1}	0.90	1.10	1.05	1.100 0	1.100 0	1.10
	V_{G2}	0.90	1.15	1.10	1.141 3	1.134 2	1.14
变压器变比	T_{56}	0.9	1.0	1.025	0.953 0	0.942 7	0.951 1
	T_{34}	0.9	1.1	1.100	0.986 5	0.980 9	0.985 5
无功补偿容量	Q_{C4}	0.0	0.05	0.00	0.050	0.050	0.050 0
	Q_{C6}	0.0	0.055	0.00	0.055	0.055	0.055
发电机无功出力	Q_{G1}	-0.2	1.0	0.370 7	0.388	0.412 8	0.392
	Q_{G2}	-0.2	1.0	0.342 8	0.169	0.148 2	0.165
负荷节点电压	V_{D3}	0.9	1.0	0.858 0	1.000	1.0	1.000
	V_{D4}	0.9	1.0	0.955 0	1.004	1.0	1.004
	V_{D5}	0.9	1.0	0.902 0	1.000	1.0	1.000
	V_{D6}	0.9	1.0	0.935 0	0.986	0.98	0.985
无功网损				0.353 5	0.302	0.306	0.302
有功网损				0.114 5	0.088 6	0.088 8	0.088 7

在 QEA 算法中,决定算法收敛速度的主要因素是变异旋转角 θ 。对于本算例,图 2 给出了从 0 到 0.3 以步长 0.01 变化的曲线,图中的收敛次数为独立计算 30 次的平均值。从图 2 中可以看出,随着 θ 值逐渐增大,收敛次数减小,当 $\theta \in [0.08, 0.15]$ 时,算法收敛速度很快,收敛比较稳定;继续增大,平均收敛次数又有所增加,收敛变慢;当增大到 0.25 时,收敛次数又迅速降低,但由于变异旋转角超过了 45°,进化速度过快,则很容易陷入

局部最优。因此 θ 值的合理取值应在 0.1 附近。在本算例中,取 $\theta = 0.1$,计算 30 次得到的平均收敛次数为 45.7,收敛次数方差为 14.0。采用改进的遗传算法计算本算例,得到的迭代收敛次数为 50~70 次,可见 QEA 算法计算速度是比较快的。

4.2 算例 2

本算例研究 IEEE30 节点系统,系统具体数据见文献 [11]。计算时,算法参数中的种群规模 $POPSIZE = 50$,其它参数同算例 1。在不利用任何

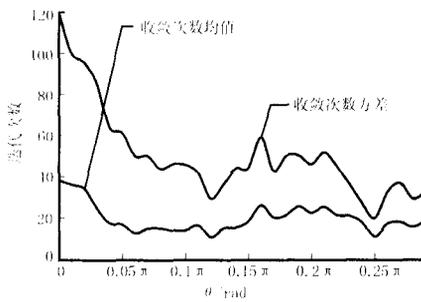


图 2 变异旋转角 值对收敛速度的影响

Fig 2 Influences of different θ on convergence speed

先验知识的情况下,随机生成初始种群,优化后负荷节点电压、发电机无功出力均在运行范围内,系统的有功网损为 5.10 MW,结果与文献 [2]一致。

运用本文参数,独立计算 30 次得到平均迭代收敛次数为 113.6,迭代收敛次数方差为 27.5。采用改进的遗传算法进行计算,得到的迭代收敛次数为 180 左右,由此可见 QEA 算法的计算速度优于遗传算法。

对于本算例,本文分别单独采用交叉算子、变异算子和同时采用两个算子进行优化,图 3 给出 3 种情况下目标函数值(含罚函数)的变化情况。从图 3 中可以看出,变异操作是种群进化的主要动力,交叉操作可以提高算法的收敛速度和收敛精度。

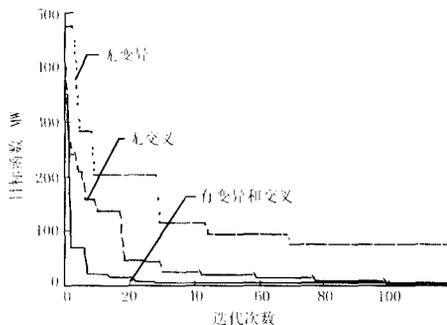


图 3 交叉变异算子对算法性能的影响

Fig 3 Influence of special operator on algorithm performance

5 结论

电力系统无功优化问题是电力规划和系统运行所面临的重要研究课题,由于问题本身的复杂性,其求解方法至今仍是研究的热点。量子进化算法作为一种新的概率进化方法,采用了基于量子比特的编码方法,具有内在的多态叠加性和并行性。这种算法通过量子变异、量子交叉等寻优机制,利用历史最优解的信息引导系统的进化过程,有效地提高了传

统进化算法的收敛速度和收敛精度,避免了未成熟收敛现象的发生。对 IEEE 标准测试系统的计算研究表明,该算法有很好的计算效率和收敛稳定性。由于 QEA 算法的优化机制具有普遍性,所以它的应用给求解其它领域的复杂优化问题也带来一种新的思路。

参考文献:

- [1] Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100 (7): 3185-3194.
- [2] 李亚南,张粒子,杨以涵.考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法 [J].中国电机工程学报,2001,21 (9): 1-4.
LI Ya-nan, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. Reactive Power Optimization under Voltage Constraints Margin [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (9): 1-4.
- [3] 张粒子,舒隽,林宪枢,等.基于遗传算法的无功规划优化 [J].中国电机工程学报,2000,20 (6): 5-8.
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al. Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (6): 5-8.
- [4] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (4): 1232-1239.
- [5] 颜伟,孙渝江,罗春雷,等.基于专家经验的进化规划方法及其在无功优化中的应用 [J].中国电机工程学报,2003,23 (7): 76-80.
YAN Wei, SUN Yu-jiang, LUO Chun-lei, et al. EP Based on Specialist Experiences and Its Application to VAR Optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7): 76-80.
- [6] 王洪章,熊信良,吴耀武.基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统无功优化 [J].电网技术,2002,26 (1): 15-18.
WANG Hong-zhang, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Power System Reactive Optimization Based on Modified Tabu Search Algorithm [J]. Power System Technology, 2002, 26 (1): 15-18.
- [7] 杨淑媛,刘芳,焦季成.量子进化策略 [J].电子学报,2001,29 (12A): 1873-1877.
YANG Shu-yuan, LIU Fang, JIAO Li-cheng. The Quantum Evolutionary Strategies [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29 (12A): 1873-1877.
- [8] Han Kuk-Hyun, Kim Jong-Hwan. Quantum-inspired Evo-

lutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6 (6): 580-593.

[9] 李映,焦李成. 一种有效的基于并行量子进化算法的图像边缘检测方法 [J]. 信号处理, 2003, 19 (1): 69-73.

LI Ying, JIAO Li-cheng An Effective Method of Image Edge Detection Based on Parallel Quantum Evolutionary Algorithm[J]. Signal Processing, 2003, 19 (1): 69-73.

[10] 侯云鹤,鲁立娟,熊信银,等. 量子进化算法在输电网扩展规划中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28 (17): 19-23.

HOU Yun-he, LU Li-juan, X DNG Xin-yin, et al Application of Quantum-inspired Evolutionary Algorithm in Transmission Network Expansion Planning [J]. Power

System Technology, 2004, 28 (17): 19-23.

[11] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104 (5): 1147-1153.

收稿日期: 2005-02-22; 修回日期: 2005-04-05

作者简介:

娄素华 (1974 -),女,博士研究生,讲师,研究方向为电力系统运行分析与规划,电力系统可靠性; E-mail: yusaier02@163.com

吴耀武 (1963 -),男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

Application of quantum-inspired evolutionary algorithm in reactive power optimization

LOU Su-hua, WU Yao-wu, PENG Lei, X DNG Xin-yin

(College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Quantum-inspired evolutionary algorithm (QEA) is a kind of evolutionary strategy algorithms inspired by quantum computing. It uses quantum bit as the smallest unit of information-chromosome and quantum-gate as a primary variation operator to drive the individuals toward the better. QEA makes full use of superposition of states and whole interference to avoid premature, so it has rapid convergence and global search capacity. This paper presents a model of reactive power optimization based on QEA and studies its parameters. To demonstrate its effectiveness and applicability, the simulations are carried out on IEEE6 and IEEE30 bus system. The results show the validity of the proposed model and algorithm.

Key words: reactive power optimization; quantum-inspired evolutionary algorithm; unitary transformation; whole interference crossover; quantum measurement sink

(上接第 26 页 continued from page 26)

收稿日期: 2004-12-23; 修回日期: 2005-02-03

作者简介:

陈鹏 (1975 -),男,博士研究生,主要从事智能电器

与机电一体化研究; E-mail: chen peng@126.com

陆俭国 (1936 -),男,博士生导师,教授,长期从事电器可靠性检测及智能电器与机电一体化研究。

AC current measurement based on Rogowski coil and digital signal processing

CHEN Peng, LU Jian-guo, YANG Yan-jie, LIX in

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Usually, in relay protection system, measurement of large range AC current is inevitable. This paper analyzes the measuring principle of AC current based on Rogowski coil and digital signal processing. Rogowski coil is suitable for measuring large range AC current. With digital signal processing technology, this measurement principle can eliminate zero drift, nonlinear error and capacity leakage. This principle can measure large range AC current precisely.

Key words: relay protection; Rogowski coil; zero drift; digital integrator