

基于 FPGA 的粒子群优化 PI 控制器在有源滤波器中的应用

袁慧梅, 陈文, 陈卫华

(首都师范大学信息工程学院, 北京 100048)

摘要: 针对有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 中, 电流补偿 PI 控制器参数难以整定的问题, 提出了一种基于 FPGA 实现的粒子群优化 PI 控制器设计方案。利用粒子群优化算法对非线性系统的适应性强和易于工程实现等特点, 同时以 FPGA 为硬件核心处理器, 对电流补偿 PI 控制器的比例、积分参数进行优化。仿真和样机实验结果表明, 优化后的 PI 控制器在动态性能以及控制精度等方面有明显提高, 基于该 PI 控制器的有源电力滤波器能迅速有效产生补偿电流, 抑制电网谐波, 证明了该设计的可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 粒子群优化算法; PI 控制器; FPGA

Application of particle swarm optimization PI controller in active power filter based on FPGA

YUAN Hui-mei, CHEN Wen, CHEN Wei-hua

(College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: A particle swarm optimization (PSO) current PI control scheme of active power filter (APF) based on field programmable gate array (FPGA) as the core processor of the hardware circuit is proposed to deal with the difficulty in the parameter regulation of the current PI controller. The PSO algorithms are employed in this method to optimize parameters of current PI controller. This proposed approach has superior features, including good applicability in non-linearity system and easy implementation. Simulation and experiment results achieved from a prototype show that the dynamic property and accuracy of the proposed current PI controller are evidently improved; the APF based on such a PI controller can implement reactive current compensation quickly in harmonic suppression and indicate that the optimal design method is feasible.

Key words: active power filter (APF); particle swarm optimization (PSO); PI controller; FPGA

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0023-05

0 引言

电力系统的安全稳定运行是第一位的, 而其控制是保证安全稳定运行的最直接的手段^[1]。随着电力电子技术的发展及其在工业中的广泛应用, 高能耗企业中的大功率电能负荷由于工况变换频繁且谐波含量较高, 导致电网的污染日趋严重。

为了保证供电质量, 防止谐波的各种危害, 往往在进行大容量无功功率补偿的同时还需采取有效措施抑制各次谐波。有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 在抑制谐波、提高电能质量方面显示了强大的生命力^[2], 其性能的好坏与它所采用的谐波电流补偿方法和直流电压控制策略有很大的关系, 传统 PI 的三角波调制法可以获得固定的开关频率, 但存在系统稳态误差不可消除的缺点^[3]; 无

差拍控制^[4]易于计算机执行, 并可预测谐波电流的变化趋势, 缺点是对预测模型的依赖性较大、因算法复杂导致预测周期增大进而引起较大的预测误差最终影响补偿效果。粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法^[5]作为一种新型的智能并行优化算法, 在求解组合优化^[6]、配电网规划^[7]、电力系统经济负荷分配^[8]等问题时取得了很好的效果。但在具体电力滤波装置中的应用方面研究较少。针对以上问题, 为提高有源电力滤波器的控制性能和实时性, 从控制的实际应用角度出发, 将粒子群优化算法应用于有源电力滤波器的电流补偿 PI 控制器中, 对 PI 控制器的比例、积分参数进行实时调整、寻优, 提高系统动态性能。

有源电力滤波器对 PI 控制的实时性和控制精度要求较高, 一般采用 DSP 技术以软件方式计算^[9,10], 但占用大量 CPU 时间, 性能受限, 可靠性不高。基于 FPGA (Field Programmable Gate Array)

实现有源电力滤波器是一种全新的设计思想理念。依靠 FPGA 的强大并行处理能力^[11]，采用硬件电路实现方式，可以有效提高有源电力滤波器电流补偿控制的实时性和精确度^[12,13]。

1 工作原理

1.1 APF 系统构成

图 1 为三相三线有源电力滤波器的结构图。图中，以 A 相为例， $i_{La}(t)$ 、 $i_{sa}(t)$ 、和 $i_{Fa}(t)$ 分别为负载电流、电网电流和滤波补偿电流，由于非线性负载的作用，负载电流 $i_{sa}(t)$ 中包含有功、无功和谐波分量。由图 1 可知

$$i_{La}(t) = i_{sa}(t) + i_{Fa}(t) \tag{1}$$

有源滤波器的作用是产生负载畸变补偿电流 $i_{Lha}(t)$ 和基波无功电流 $i_{Lqa}(t)$ ，即

$$i_{Fa}(t) = i_{Lha}(t) + i_{Lqa}(t) \tag{2}$$

使电源电流中只包含负载电流的基波有功分量，即

$$i_{sa}(t) = i_{Lpa}(t) \tag{3}$$

从而实现系统的无功补偿和谐波抑制，可见，如何快速有效地产生所期望的电流是有源滤波器控制问题的关键。

电网母线的电压和电流以及有源电力滤波器系统输出电流反馈值经过调理电路及高速 A/D 转换模块后，变为数字信号送入 FPGA 中，经过算法优化处理产生所需的控制信号，通过隔离放大电路和光纤隔离装置传输到现场，用以控制晶闸管投切电容器组的通断和晶闸管控制电抗器的导通角大小，从而产生电网所需的补偿电流。

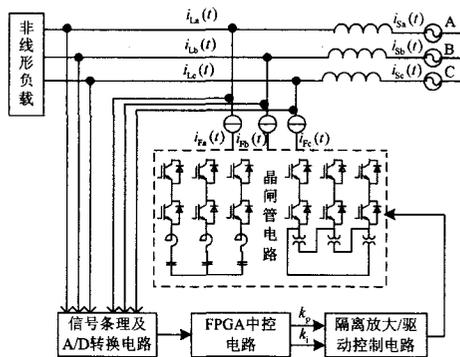


图 1 有源电力滤波器结构图

Fig. 1 Structure of the active power filter

1.2 电流补偿 PI 控制器

电流补偿 PI 控制器的性能决定有源电力滤波器滤波效果的优劣，选择高效的控制算法可以有效提高控制器的动态性能。有源电力滤波器是闭环控

制系统，控制器的输入参数为 $\{i_{La}(t), i_{Lb}(t), i_{Lc}(t), i_{Fa}(t), i_{Fb}(t), i_{Fc}(t)\}$ 由于这 6 个参数互相关联，而且变化迅速，非线性明显，传统 PI 控制器的输出参数 k_p 、 k_i 一经确定，在整个闭环调节过程中保持不变，控制器很难满足对被控量的跟踪和对扰动的抑制，在电网这样的复杂非线性系统中，控制超调及滞后很难避免。针对这一问题，在本设计中引入粒子群优化算法，对传统的 PI 控制器的参数 k_p 、 k_i 进行优化处理，使有源电力滤波器电流补偿效果明显，其结构如图 2 所示。

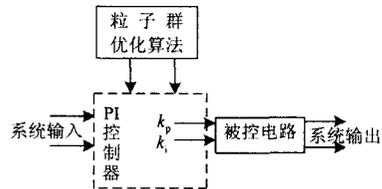


图 2 粒子群优化 PI 控制器结构图

Fig. 2 Structure of the particle swarm optimization PI controller

1.3 采用粒子群算法优化 PI 参数的方法

粒子群优化算法由美国社会心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russell Eberhart 于 1995 年共同提出，属于智能优化算法。该算法从诞生起，就引起了国内外学者的广泛关注，并掀起了该方法的研究热潮。其算法源于对自然界中鸟群的排列的研究：自然界中鸟群的排列是随机的，但其中每只鸟的动作具有极高同步性，这种同步性使鸟群的整体运动很流畅。通过对鸟群运动的计算机仿真，让每个个体按特定规则运动，形成鸟群的复杂行为模型。该模型成功的关键在于对个体间距离的操作，即群体行为的同步性建立在个体维持自身与邻居之间的距离为最优的基础上，因此，每个个体必须知道自身位置和邻居的信息。群体中个体之间信息的社会共享有助于进化，这就是开发粒子群优化算法的核心思想。

在有源电力滤波器电流补偿过程中，每一个相电流的稳定度以及三相之间的相位差是否平衡都是衡量补偿效果的关键。由于补偿电流是快速变化的三相三线正弦量，而且受到非线性负载的影响，因此在时间和空间上都有一定的离散量的干扰，因而要求其控制算法的复杂度小、实时性强和容易工程实现。粒子群优化算法收敛速度快，个体和群体之间的同步性以及协调性对三相电的适应性很强，待调整参数少，且运算简单，易于实现，没有遗传算法的编解码和杂交、变异等运算^[14]，因而在解决非线性变化的控制参数整定问题上，具有明显的优势。

粒子群优化算法中的每个粒子都代表一个可能

的解,所有的粒子组成群,粒子在解空间中根据自身的历史信息 and 群体信息共同决定其飞行的速度和方向,以此来寻找最优解。处理对象首先初始为一群随机粒子,然后通过迭代找到最优解。每次迭代,粒子通过跟踪2个“极值”:粒子本身所找到的最优解 p_{Best} (记为 P_i) 和群体找到的最优解 g_{Best} (记为 P_g) 来更新自己。

每个粒子都具有位置和速度两个特征,设搜索空间维数的大小为 M , 在其中的粒子总数为 N , 每一个粒子的位置向量设定为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im})$, 其速度向量设定为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{im})$, 单个粒子的历史最优位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{im})$, 全局最优位置参数 P_g 为所有 P_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 中综合最优向量。粒子的更新公式为

$$v_{id}(t+1) = v_{id}(t) + c_1 \cdot rand() [P_{id}(t) - x_{id}(t)] + c_2 \cdot rand() [P_{gd}(t) - x_{gd}(t)] \quad (4)$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为粒子的个数, 根据问题的复杂程度以及对精度的要求进行选取, 通常取20~40, 这样规模的粒子量对于三相电的非线性问题已经足够, 同时可以降低计算的复杂性。

c_1 和 c_2 为正实数, 称为学习因子, 表示将每个微粒推向 P_i 和 P_g 的统计加速度的权值, 通常取值为2, $rand()$ 为分布在 $[0, 1]$ 区间的随机值。

为防止粒子远离解空间, 粒子群优化算法一般限制粒子速度小于 V_{max} (V_{max} 为粒子最大速度, 取值为搜索空间 M 的大小)。从整体上看, 式(4)的第1部分称为记忆项, 表示速度大小和方向的影响; 第2部分称为自身认知项, 表示粒子的动作来源于自己的经验; 第3部分称为群体认知项, 反映粒子间的协同合作和知识的共享。

为使系统获得满意的控制性能, 在此综合考虑了系统的快速性、稳定性、准确性, 及控制能量 k_p 、 k_i 的要求, 将系统超调量 H 、系统误差 E 、误差变化率 E_c 以不同形式综合到性能指标中。在确定好系统的约束条件后, 便可以对控制器的参数进行优化设计, 具体步骤为:

步骤1: 初始化相关参数。设置粒子位置向量 X_i 、速度向量 V_i 、搜索空间维数 M 、学习因子 c_1 和 c_2 以及个体极值 P_i 和全局极值 P_g 。具体设置如下: 由于被控制对象为三相三线电流, 在理想状态下, 三相发电机产生幅值相等、频率相等、相位互差 120° 的三相电势。电流为标准正弦波形, 故在本设计中个体极值 P_i 设定为每一相的理想幅值及频

率; 全局极值 P_g 设定为三相理想相位差。电流 A/D 采样值作为粒子空间向量 X_i , 控制器反馈量 $i_r(t)$ 与理想输出的差值 E 作为粒子的速度向量 V_i , A/D 转换器的位数以及转换时间、转换精度作为搜索空间维数 M 的设定参考。

步骤2: 将每个粒子的位置向量依次作为有源电力滤波器中 PI 控制器的控制参数, 根据实际补偿效果要求设定最大门限值, 对过载及超调因子进行幅值削减或去除坏值处理, 以提高控制器对冲击脉冲的适应能力。

步骤3: 将每个粒子的现有位置与 P_i 进行比较。由于采用硬件电路, 可以将标准正弦电流波形数据以网表文件的形式存于硬件存储器中, 大大加快处理速度。在此步骤中, 每完成一次比较, 便将 P_i 和 P_g 更新, 用以下次比较使用。

步骤4: 按式(4)对每个粒子的速度进行更新:

若 $v_{id}(t+1) \geq v_{max}$, 则 $v_{id}(t+1) = v_{max}$;

若 $v_{id}(t+1) \leq v_{min}$, 则 $v_{id}(t+1) = v_{min}$ 。

步骤5: 按式(5)对每个粒子的位置进行更新:

若 $x_{id}(t+1) \geq x_{max}$, 则 $x_{id}(t+1) = x_{max}$;

若 $x_{id}(t+1) \leq x_{min}$, 则 $x_{id}(t+1) = x_{min}$ 。

步骤6: 判断算法是否结束, 即迭代次数是否达到最大设定值, 若未达到, 则返回步骤2进行确定最优个体处理; 若达到, 输出最终的 k_p , k_i , 即控制器的优化参数, 优化过程结束。

1.4 PID 控制器模块

常规 PI 控制器(即 Ziegler-Nichols 法整定获得 PI 参数)的传递函数可表示为

$$u(s) = (k_p + \frac{k_i}{t_i s})e(s) \quad (6)$$

式中: k_p 为比例增益, t_i 为积分时间常数, $e(s)$ 为系统理想输出量和实际输出量之间的误差。 $u(s)$ 为系统输出量。以一系列的采样时刻点 KT 代表连续时间 t , 以矩阵法数值运算近似代替积分运算可得 PI 控制的离散表达式为

$$U(k) = K_p [E(k) + K_i \sum_{j=0}^k E(j)] \quad (7)$$

为了体现粒子群优化 PI 控制器相对于传统 PI 控制器的优势, 对一个具体的传递函数进行仿真验证。因为工业控制过程中大部分对象都可以用一个2阶系统等效。在有源电力滤波器中, 假设被控对象传递函数为

$$G(s) = \frac{7}{s^2 + 6s + 8} \quad (8)$$

应用 Matlab 软件对该系统进行计算机仿真, 建

立有源电力滤波器系统仿真模型，粒子群优化 PI 控制器通过一个 S 函数实现。

在仿真实验中，取系统输入量为单位阶跃信号，取粒子种群数为 25，迭代次数为 40， c_1 和 c_2 取值为 2。系统单位阶跃响应如图 3 所示。利用常规 PI 控制器获得控制器参数 $k_p = 7.239 4$ ， $k_i = 6.396 2$ ，系统最大超调量为 1.306，系统达到稳定点所需时间为 0.966 s；而利用粒子群优化 PI 控制器获得控制器参数 $k_p = 3.935 2$ ， $k_i = 3.291 6$ ，系统最大超调量为 1.021，系统达到稳定点所需时间为 0.757 s。由此可知，粒子群优化算法 PI 控制器在系统超调量相比常规 PI 控制器有大幅度减少，同时系统的响应时间也有所减少，因此对快速变化的补偿电流的适应能力强，由于采用粒子群优化算法作为控制器的智能化指导，提高了控制器在一定范围内的灵活性，因此可以全面改善电流补偿控制系统的动态性能，获得较好的控制效果。

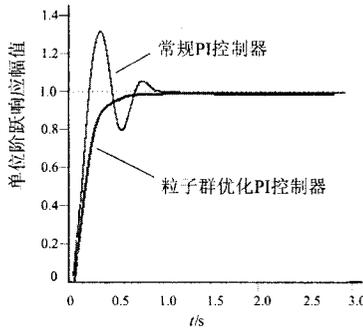


图 3 常规 PI 控制器与粒子群优化 PI 控制器仿真比较
Fig. 3 Simulation comparison of the conventional PI controller and the proposed PSO PI controller

2 控制器的 FPGA 设计

PI 控制器的硬件核心采用 Altera 公司的 Cyclone II 系列 FPGA，所选芯片型号为 EP2C50F48418N，底层模块采用逻辑锁定技术。硬件语言编程环境为 Altera 公司的主流设计软件 Quartus II，为了使控制器的各个模块之间的衔接更加顺畅，故采用自顶向下的设计方法，在顶层进行系统的功能模块的划分，各功能模块的行为规则采用 VHDL 语言进行描述，并逐个进行仿真和纠错，然后进行系统级的功能验证。最后，将生成的门级逻辑电路的网表文件下载到所选的 FPGA 芯片上，从而完成 PI 控制器的中控电路。控制器的顶层结构如图 4 所示。

从图 4 中可以看到，控制器的 VHDL 设计可以分为 5 个功能模块：离散变换为系统的前端输入级，在该模块内部设定粒子群数量以及计算的迭代

次数，主要逻辑功能是将粒子的现有位置关系离散变换到解空间的相应位置上；数值比较模块内部含

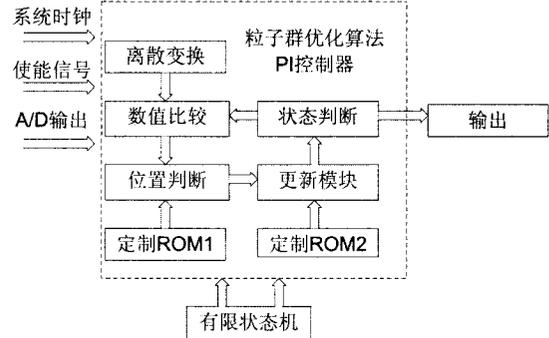


图 4 控制器的顶层结构如图

Fig. 4 Top-level block diagram of the PI controller

有减法器 and 数值比较器，通过计算得到粒子位置误差 E 及误差的变化率 E_c ；位置判断模块完成第一次查找表运算：根据式 (4) 和 (5) 的运算法则，在 Matlab/Simulink 的 DSPBuilder 下，将解空间中的粒子位置以数据文件形式存储在 ROM1 中，通过粒子位置误差 E 及误差的变化率 E_c ，查表得到当前粒子本身最优位置 P_i 及全局最优位置 P_g ；更新模块完成第二次查找表运算：针对电网负荷是随时间动态变化的特点，为了能够实时获取基波有功电流，以电网最小能量损失作为指导函数，在 Simulink 中建立负载变化模型，仿真得到电流衰变因子 ΔP_i 的变化参量。将标准三相电信号的一个周期波形及电流衰变因子 ΔP_i 以数据文件形式存储在 ROM2 中，更新模块完成对其相乘运算，并查表并对每个粒子的速度和位置进行更新，同时对下一个粒子的解空间中的 P_i 和 P_g 进行更新；若迭代次数达到预定最大值，状态判断模块输出最终的 k_p ， k_i ，若未达到，则继续进行个体最优处理，直至完成优化算法。

整个系统的核心时序采用有限状态机模块进行控制，每个状态的输出都只和状态本身有关，状态转换的同时产生状态控制信号指挥各个模块进行工作，从而使整个系统具有很好的时序性和稳定性。

3 实验结果

为验证粒子群优化算法 PI 控制器在有源电力滤波器中的使用效果，研制了一台实验样机。数模转换部分采用 ADI 公司的 6 通道，16 bit，sigma-dealta 型串行输出的 ADC 转换器 AD73360L，单片 AD73360L 具有六个同时采样的模拟量输入通道，所以特别适合于在本设计中三相三线参数 $\{i_{La}(t), i_{Lb}(t), i_{Lc}(t), i_{ra}(t), i_{rb}(t), i_{rc}(t)\}$ 的 A/D 转换。电网供电电压和频率分别为 220 V 和 50 Hz，直流

侧电容为 $470 \mu\text{F}$, 直流侧参考电压为 200V , 开关频率为 10kHz 。

电流波形的测量和谐波量分析采用 Fluke 43B 功率及谐波分析仪。以 A 相电流为例, 进行了波形记录与分析。图 5 给出了滤波前电网电流的波形和频谱, 从图中可以看出, 滤波前电网电流各次谐波的含量比较大, 波形畸变严重, 总畸变率(THD)为 82.9% , 功率因数只有 0.67 ; 图 6 给出了滤波后电网电流的波形和频谱, 从图中可以看出, 电网电流的总畸变率降低到 8.7% , 满足 IEEE-519 标准对电流谐波的限制值, 功率因数提高到 0.93 , 电网电流接近正弦波形, 各次谐波得到了有效滤除, 高次谐波基本被滤除, 电流补偿效果明显, 因此证明采用粒子群优化 PI 参数的电流补偿控制策略是有效、可行的。

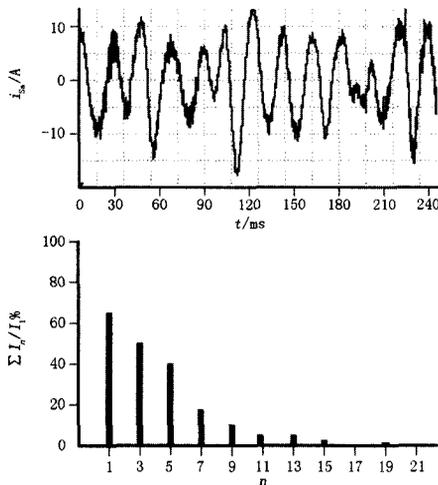


图 5 滤波前电网电流的波形、频谱、总畸变率
Fig. 5 Waveform and spectrum of supply current without active power filter

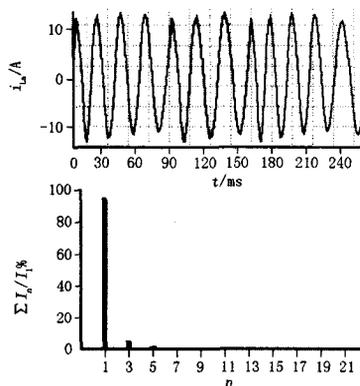


图 6 滤波后电网电流的波形、频谱、总畸变率
Fig. 6 Waveform and spectrum of supply current with active power filter

4 结论

本文提出了将粒子群优化算法用于 APF 电流补偿 PI 控制器参数整定问题的优化方案, 并以 FPGA 为中控核心, 设计并构建了该方案的硬件电路。理论分析及仿真和实验结果表明, 本文所提出的方法在电流谐波补偿控制时是有效的, 不但能快速优化 PI 控制器的控制参数, 而且基于该方法以 FPGA 为硬件核心的设计在实时性和控制精度上保证了有源电力滤波器对指令电流计算的实时性和补偿电流跟踪的快速性要求, 系统的动静态性能良好。

参考文献

- [1] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, WAN Li, et al. The Method to Improve Power Quality of Distribution System by Distribution Static Compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84.
- [2] Singh B, Al-Haddad K, Chandra A. A Review of Active Power Filters for Power Quality Improvement[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 1999, 46 (5): 960-971.
- [3] YUAN Xiao-ming, Merk W, Stemmler H, et al. Stationary-frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters with Zero Steady-state Error for Current Harmonics of Concern Under Unbalanced and Distorted Operating Conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [4] 李玉梅, 马伟明. 无差拍控制在串联电力有源滤波器中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 28-30.
LI Yu-mei, MA Wei-ming. Application of Deadbeat Control in Series Active Power Filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 28-30.
- [5] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proc of IEEE Int Conf on Neural Network[C]. Piscataway: IEEE Press, 1995: 1942-1948.
- [6] 李宁, 刘飞, 孙德宝. 基于带变异算子粒子群优化算法的约束布局优化研究[J]. 计算机学报, 2004, 27(7): 897-903.
LI Ning, LIU Fei, SUN De-bao. A Study on the Particle Swarm Optimization with Mutation Operator Constrained Layout Optimization[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(7): 897-903.
- [7] 黄海涛, 郑华, 张粒子. 基于改进粒子群算法的可用输电能力研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 45-49.

(下转第 57 页 continued on page 57)

较高, 谐波抑制能力强。即使存在谐波和频率动态变化, 仍能达到很高的计算精度, 原理简单, 易于软硬件实现, 具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] Phadk A G, Thorp J S, Adamiak M G. A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phase, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & System, 1983, 102(3).
- [2] 吴镇扬. 数字信号处理的原理与实现[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
WU Zhen-yang. Principle and Realize of Digital Signal Processing[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002.
- [3] Terzija V, Djuric M, Kovcevic B, et al. A New Self-tuning Algorithm for the Frequency Estimation of Distorted Signals[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1779-1785.
- [4] Sidhu T S, Sachdev M S. An Iterative Technique for Fast Frequency[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1): 109-115.
- [5] Begovic M M, Djuric P M, Dunlap S, et al. Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 6(2): 480-486.
- [6] 郭彦东, 张占江. 一种新的电力系统频率实时测量方法[J]. 仪器仪表与检测技术, 2006, 25(16): 62-64.
GUO Yan-dong, ZHANG Zhan-jiang. An Real-time Measurement of the Power System Frequency[J]. Instrumentation and Measurement, 2006, 25(16): 62-64.
- [7] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅里叶测频算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 48-54.
MO Shao-qing, LI Xiao-cong. An Improved High-accuracy Algorithm for Frequency Measurement Based on Fourier Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 48-54.
- [8] 周卫平, 吴正国, 夏立. 基波相位和频率的高精度检测及在有源电力滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 91-96.
ZHOU Wei-ping, WU Zheng-guo, XIA Li. Harmonic and Reactive Current Detection in APF Based on High-accuracy Phase and Frequency Detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 91-96.
-
- 收稿日期: 2008-12-08; 修回日期: 2009-03-31
作者简介:
王拔群(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制、智能检测与信息处理。E-Mail: wbq526@163.com
-
- (上接第 27 页 continued from page 27)
- HUANG Hai-tao, ZHENG Hua, ZHANG Li-zi. Study of Available Transfer Capability Based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical, 2006, 26(20): 45-49.
- [8] 赵波, 曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1-7.
ZHAO Bo, CAO Yi-jia. A Multi-agent Particle Swarm Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical, 2005, 25(5): 1-7.
- [9] Jacobs J, Detjen D, Karipidis C U, et al. Rapid Prototyping Tools for Power Electronic Systems, Demonstration with Shunt Active Power Filters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(2): 500-507.
- [10] Yang J, Wang Y, Wang Z. A DSP Controlled Hybrid Power Filter Used to Compensate the Harmonics and Reactive Power Caused by Electrical Traction Loads[A]. in: Proceedings of Power Engineering Society General Meeting[C]. Toronto, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003. 1615-1620.
- [11] Snider G, Shackleford B, Carter R J. Attacking the Semantic Gap Between Application Programming Languages and Configurable Hardware[A]. in: Submitted to 2001 ACM/SIGDA Eighth International Symposium on Field Programmable Gate Arrays[C]. 2001.
- [12] 舒泽亮, 郭育华. 连级三基于 FPGA 的 APF 控制器的硬件结构优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 55-59.
SHU Ze-liang, GUO Yu-hua, LIAN Ji-san. Hardware Architecture Optimization for FPGA Based Active Power Filter Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 55-59.
- [13] 郑翔, 周志杰, 张文强. 电力线载波线路调制 FPGA 实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(9): 93-96.
ZHENG Xiang, ZHOU Zhi-jie, ZHANG Wen-qiang. Implementation of Line Modulation of PLC Using FPGA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 55-59.
- [14] Gaing Z L. A Partial Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Control in AVR System [J]. IEEE Trans on Energy Conversion (S0885-8969), 2004, 19(2): 384-391.
-
- 收稿日期: 2008-12-04; 修回日期: 2008-12-20
作者简介:
袁慧梅(1971-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化;
陈文(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统智能控制及其自动化; E-mail: chenwencnu@yahoo.com.cn
陈卫华(1972-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统。