

基于微粒群算法优化 PI 参数的单相有源电力滤波器

胡 凯, 申群太

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 有源电力滤波器在单位功率因数控制策略下, PI 调节器的参数选择和优化是个难点, 从能量传递的角度, 推导了单位功率因数控制下系统有功功率闭环控制的模型, 在此基础上分启动和稳态两个阶段设计 PI 调节器, 采用改进微粒群优化算法对调节器参数进行寻优, 与传统的典型 II 型系统设计方法和遗传算法得到的整定结果进行比较, 优化参数后的调节器拥有更好的动态响应和抗扰性能, 仿真结果也验证了优化后的系统具有良好的补偿效果和瞬时特性。

关键词: 单位功率因数; 有功功率控制; 单相有源电力滤波器; PI 参数; 微粒群优化算法; 直流侧电压

Single-phase active power filter based on particle swarm optimized PI regulator

HU Kai, SHEN Qun-tai

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on unity power factor control method, the active power filter usually uses the PI controller, but the selection and optimization for the PI parameters is a problem. From the point of view of the active power delivery, the model of active power close-loop control based on unity power factor control is obtained, two PI controllers are designed for startup and steady stages based on the model. In this paper, the improved PSO algorithm is used to optimize the parameter of PI controllers, compared with the results obtained by typical II system design method and genetic algorithm, the optimized controllers have better dynamic and disturbance rejection performance, the results from simulation verify the good performance of harmonics compensation of the single-phase active power filter.

Key words: unity power factor; active power control; single-phase active power filter; PI parameters; particle swarm optimization(PSO); DC voltage

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0051-06

0 引言

传统有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 建立在谐波及无功电流检测的基础上^[1,2], 不可避免地会受到检测精度和滞后误差的影响。单位功率因数 UPF (Unity Power Factor) 控制方法无需实时检测、计算负载谐波电流, 只需检测电源电流和逆变器直流侧电容电压, 直接控制电源电流为与电网电压同频同相的标准正弦波, 提高了滤波的实时性和准确性^[3,4]。

单位功率因数控制方法多数采用 PI 调节器, 但单一的 PI 调节器难以在启动时限制电压超调、电流冲击和在稳态时对负载变化的抗扰性能上都取得很好的控制效果。为此, 本文采用分段调节, 设计两组 PI 参数, 构成启动 PI 调节器和稳态 PI 调节器, 实现了启动快速, 超调小, 稳态时抗扰性能好的控制目标。

同时文中针对 PI 参数的优化问题做了研究。近几年来, PI 参数的优化有很多方法, 例如基于人工智能技术的神经网络、模糊系统、模糊神经网络等, 一些进化计算技术如遗传算法, 蚁群算法也有广泛应用^[5-7]。本文采用微粒群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 优化 PI 参数, 其具有思想简单、程序易于实现、需要调整的参数较少、收敛速度快、优化精度高、不易陷入局部最优值等优点。

1 单位功率因数控制的单相有源滤波器

1.1 系统组成及原理

采用单位功率因数控制策略的单相有源电力滤波器系统结构如图 1 所示, 主电路采用电压型 H 桥逆变器, 与负载并联以受控电流源方式工作。其控制系统由电压电流双闭环组成, 电压外环的控制目标是使直流侧电容电压保持恒定; 电流内环的控制

制目标是使电源电流为与电源电压同频同相的基波正弦电流。图 1 中 U_d 为单相 APF 直流侧电容电压的测量值, U_d^* 为电容电压的给定值, 两者之差经 PI 调节器后得到基波有功电流幅值, SIN 环节是对电网电压进行锁相处理, 得到与电源电压同相的标准正弦波, 两者相乘后, 得到电源电流的给定信号 i_s^* , 该给定信号与实际电源电流信号 i_s 相比较后, 得到电容电压调节和电源电流调节的综合控制信号, 即逆变器补偿的指令信号。将指令信号及其反向信号分别与单极性的高频三角波调制后得到两路 PWM 信号, 再分别反相, 共得到 4 路 PWM 信号, 经过隔离和放大后驱动相应的开关器件工作, 使逆变器产生与负载电流中的谐波及无功电流大小相同而方向相反的补偿电流, 从而将电源电流补偿为与电网电压同频同相的标准正弦电流^[3]。

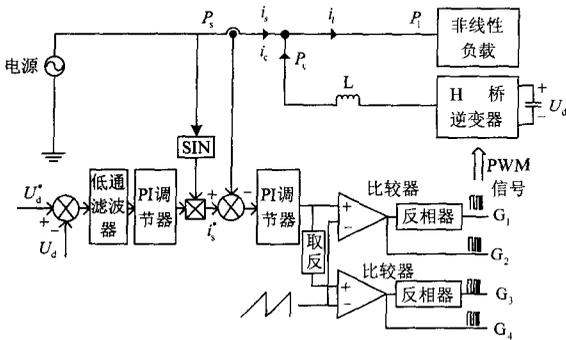


图 1 基于 UPF 控制的单相 APF 拓扑结构

Fig.1 Topology of single-phase active power filter based on UPF control

1.2 系统有功功率控制模型

一个理想的无损耗的有源电力滤波器工作在稳态时, 电源提供的有功功率必然等于负载消耗的有功功率, 而 APF 与电网没有有功功率的交换, 因此, 主电路直流侧电容的平均电压将维持恒定。当有功功率不平衡时, 如负载发生变化, 主电路直流侧电容将提供电源与负载之间的功率差, 使得直流侧电容电压发生变化。由此变化可以获得期望的电源侧有功电流幅值^[8,9]。

如图 1 所示, 电源向电网输入的瞬时有功功率为 p_s , 负载吸收的瞬时有功功率为 p_l , 有源电力滤波器输入的瞬时有功功率为 p_c , 则在电源, 负载和有源电力滤波器三者的交点处, 瞬时有功功率满足式 (1):

$$P_s = P_l - P_c \quad (1)$$

假设在 Δt 时间内, APF 直流侧电容电压变化为 ΔU_d , 那么 APF 向电网输入的有功能量与直流侧电容储能的关系如下:

$$\int_0^{\Delta t} p_c dt = \frac{1}{2} C (U_d^* + \Delta U_d)^2 - \frac{1}{2} C U_d^{*2} \quad (2)$$

其中: C 为直流侧电容值。

电源输出的有功能量为:

$$P = p_s \cdot \Delta t = \frac{1}{2} U_s I_{sp} \cdot \Delta t \quad (3)$$

其中: U_s , I_{sp} 分别为电源电压和有功电流的幅值。

将式 (1)、(3) 代入式 (2), 并经工作点附近线性化处理, 忽略 ΔU_d^2 , 得:

$$(p_l - \frac{1}{2} U_s I_{sp}) \cdot \Delta t = C \cdot U_d^* \cdot \Delta U_d \quad (4)$$

令 $\Delta t \rightarrow 0$, 整理得到:

$$I_{sp} = \frac{2}{U_s} (p_l - C \cdot U_d^* \cdot \frac{dU_d}{dt}) \quad (5)$$

由式 (5) 可知, APF 直流侧电容电压的变化可以得到电网中需要的有功电流的幅值。为了将直流侧电容电压维持在要求的水平, 加入 PI 调节器, 如图 2 所示, 此时 PI 调节器的输出就是电网中期望的电流幅值, 也是负载需要的有功电流的幅值。

传统 APF 直流侧电容电压控制方法是在指令电流中附加基波有功电流, 使得 APF 与电网交换有功功率^[10~12], 从而调节电容电压为恒定值。根据有功功率平衡原理, 得到流入 APF 的有功电流与直流侧电容电压之间的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{U_d}{I_{sp}} = \frac{(\sqrt{2}/2)E}{s \cdot C U_d^*} \quad (6)$$

其中: E 为电源电压有效值。由于电流环采用电流跟踪控制, 响应速度快, 且 APF 的开关频率远高于电网频率, 因此电流环可以简化成一个比例环节, 在电源频率为 50 Hz 时, 闭环传递函数增益几乎为 1。为了滤除电容电压反馈信号 U_d 中的低次谐波成分, 并兼顾闭环系统的稳定性^[13,14], 一般可以选择一阶低通滤波器, 其时间常数 T_s 可取电源周期的一半。

基于上述讨论, 得到如图 2 所示的系统有功功率控制模型。

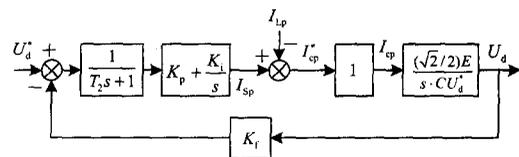


图 2 有功功率控制模型

Fig.2 Model for active power control

图 2 中: K_f 为直流侧电压检测增益, I_{Lp} 为负载需要的有功电流, I_{Sp} 为电源提供的有功电流。若使直流侧电容电压在稳态时恒定, 由于电容 C 的积分作用, 必须使得流入 APF 的有功电流 $I_{\varphi}^* = I_{\varphi} = 0$, 因此 PI 调节器的输出必然跟随负载需要的有功电流 I_{Lp} 。再如图 1 所示, 直接检测电源电流, 将其与 PI 调节器的输出 I_{Sp} 相减后, 就得到了谐波与无功的总电流, 反相后作为逆变器的指令信号, 从而省去了谐波与无功电流的检测环节。

基于上述有功功率控制模型, I_{Lp} 可以看作是对系统的干扰信号, 负载变化也就是 I_{Lp} 变化, 为了维持直流侧电容电压的恒定, 需要系统稳态时有很好的抗扰性能, 所以按典型 II 型系统设计方法设计 PI 调节器, 但整定的参数使系统在启动时直流侧电压超调量和输出冲击电流过大, 控制效果不够满意, 因此, 本文提出分阶段设计 PI 调节器, 即分别设计启动 PI 调节器和稳态 PI 调节器, 同时采用改进微粒群优化算法对 PI 参数进行优化。在系统启动阶段, 参数的优化目标是获得好的跟随性能, 在系统的稳态阶段, 参数的优化目标是获得好的抗扰性能, 进而得到两组 PI 参数。在直流侧电容电压启动达到稳定值时, 切换调节器到稳态 PI 控制器^[15]。

2 微粒群算法优化 PI 参数

2.1 微粒群算法原理

微粒群优化算法是由美国社会心理学家 J. Kennedy 博士和电气工程师 R. Eberhart 等在 1995 年开发的一种演化计算技术, 其源于对鸟群和鱼群群体运动行为的研究^[16,17]。微粒群优化算法的基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻找最优解。

下面用数学语言来描述微粒群算法: 假设在 D 维的寻优空间中, 有 N 个粒子组成的种群, 每个粒子的当前位置由位置矢量 $X_i = (x_{i1} + x_{i2} + \dots + x_{id})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 来表示, 而每个粒子的位置就是所求问题的一个可能解, 每个粒子的移动速度由速度矢量 $V_i = (v_{i1} + v_{i2} + \dots + v_{id})$, $i = 1, 2, \dots, N$ 来表示, 通过优化目标函数可以得到每个粒子经历过的历史最好位置记为 $P_i = (p_{i1} + p_{i2} + \dots + p_{id})$, $i = 1, 2, \dots, N$, 和种群经历过的历史最好位置记为 $P_g = (p_{g1} + p_{g2} + \dots + p_{gd})$, 在粒子运动过程中, 第 i 个粒子从第 k 步到第 $k+1$ 步的移动, 可由下面的速度和位置更新公式得到:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 \text{rand}() (p_{id}^k - x_{id}^k) +$$

$$c_2 \text{rand}() (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (7)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (8)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, N$, $d = 1, 2, \dots, D$, w 是惯性权重函数, c_1 , c_2 是正的加速度常数, $\text{rand}()$ 是 $[0, 1]$ 范围内的随机函数。式 (7) 的第一部分是“记忆”部分, 表示粒子对先前速度的记忆, 第二部分是“认知”部分, 表示粒子对自身的思考, 第三部分是“社会”部分, 表示粒子间的信息共享与相互合作。与标准 PSO 算法不同的是, 惯性权重 w 在寻优过程中, 并非固定不变, 而是随着迭代次数线性减小^[18]。

$$w_k = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, k_{\max}$$

其中: w_k 是第 k 次迭代用的惯性权重值, w_{\max} 和 w_{\min} 分别是惯性权重的最大值和最小值。

惯性权值的线性减小有利于在寻优初期以较大的惯性权重值加快拓展搜索空间, 而在后期以较小的惯性权重值加强局部精细搜索的能力。

2.2 PSO 算法优化 PI 参数

2.2.1 编码与目标函数

微粒群算法采用实数编码, 对于 PI 参数寻优, 可将粒子维数 D 定为 2, 编码为 (K_p, K_i) 。PI 参数优化的目标在于提高系统的响应速度, 减小超调量和稳态误差, 描述控制系统性能的目标函数主要有 ISE, ITSE, IAE, ITAE^[19]等, 这里选用积分型误差指标 ITAE, 它的表达式为:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (10)$$

其中: $e(t)$ 是实际值与期望值之间的误差。在 ITAE 指标的基础上, 目标函数选择如下:

$$J = \int_0^{\infty} (\alpha_1 |e(t)| + \alpha_2 u^2(t) + \alpha_3 t |e(t)|) dt + \alpha_4 t_s \quad (11)$$

其中: $u(t)$ 为控制器的输出, t_s 为上升时间, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 为权值。因为在启动阶段和稳态阶段优化目标不同, 所以目标函数的权值选择也不同, 在启动阶段的 PI 参数寻优中, 目标函数权值选择如下:

$\alpha_1 = 0.999$, $\alpha_2 = 0.001$, $\alpha_4 = 2.0$, 当 $e(t) < 0$ 时, $\alpha_3 = 0$; 当 $e(t) > 0$ 时, $\alpha_3 = 20$ 。

所以, $\alpha_2 u^2(t)$ 项可以防止控制器的输出过大, $\alpha_3 t |e(t)|$ 项是惩罚函数, 可以限制启动超调量, $\alpha_4 t_s$ 项是为了缩短过渡过程时间。

在稳态阶段的 PI 参数寻优过程中, 对于每一个可能解, 在计算其目标函数值时, 都在 t' 时刻改变

负载的大小,即在图 2 的 I_{Lp} 位置处突加扰动,所以
上述目标函数的权值选择如下:

$$\alpha_1=0.999, \alpha_2=0.001, \alpha_3=0,$$

$$\alpha_3 = \begin{cases} 0 & t < t' \\ 100 & t \geq t' \end{cases}$$

2.2.2 参数搜索范围

在本文中,微粒群算法的搜索空间是以典型 II 型系统设计方法得到的参数结果为核心,向左右两边拓展形成的,这样既可以充分利用前者的合理内核,又减小了实际参数的搜索空间。如果参数的优化解十分靠近搜索空间的边界,则可以在该解的基础上进一步拓展搜索空间,进行新一轮搜索^[20]。

$$(1-\alpha)K'_{p,i} \leq K_{p,i} \leq (1+\alpha)K'_{p,i} \quad (12)$$

其中: $K_{p,i}$ 为控制器的 PI 参数范围, $K'_{p,i}$ 为典型 II 型系统设计方法得到的整定值, α 为 $[0, 1]$ 之间的选定值。

2.2.3 算法流程

微粒群算法优化 PI 参数的流程如下:

Step1: 初始化一群粒子,包括随机位置 x_{id} 和速度 v_{id} , $1 \leq i \leq N$, $1 \leq d \leq D$, N 为种群规模即粒子数, D 为搜索空间的维数。

Step2: 将每个粒子的位置矢量作为控制器的参数,然后对系统仿真后评价每个微粒的适应度。

Step3: 对每个粒子,将其适应度值与其经历过的最好位置进行比较,如果较好,则将其作为当前的最好位置。

Step4: 对每个粒子,将其适应度值与种群经历过的最好位置进行比较,如果较好,则重新设置种群最好位置。

Step5: 根据方程更新粒子的速度和位置。

Step6: 迭代次数增加 1,未到最大迭代次数则返回 Step2,否则退出,给出最优解。

3 仿真结果

3.1 参数优化

在上述的有功功率控制模型中,取 $E=220\text{ V}$, $U_d^*=500\text{ V}$, $K_f=0.01$,微粒群优化算法参数设置为: $w_{\max}=0.95$, $w_{\min}=0.1$, $c_1=c_2=2.0$,粒子群规模为 30,最大迭代次数为 50 次。实数编码的遗传算法参数设置为:交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.05$,样本个数为 30。优化后的参数如表 1 所示。启动时积分参数的巨大差别也说明单一参数无法同时满足跟随和抗扰两个方面的性能要求。三组参数下系统启动时的阶跃响应曲线如图 3 所示。可

见微粒群算法优化的参数超调量小,过渡过程时间短,拥有更好的动态响应特性。

表 1 三种方法整定的 PI 参数

Tab.1 PI parameters based on three optimization methods				
方法	K_p (启动)	K_p (稳态)	K_i (启动)	K_i (稳态)
典 II	27.19	27.19	543.85	543.85
GA	23.36	42.33	0.185	960.536
PSO	21.64	44.47	0.171	1 064.14

为了考察系统的抗扰性能,在 $t'=0.3\text{ s}$ 时刻,将负载有功电流突加 20 A,系统的响应曲线如图 4 所示,由此看出,优化后的参数使得系统在突加负载时的抗扰性能提高。同时,与遗传算法相比,简单易于实现的微粒群算法有着更高的优化精度。

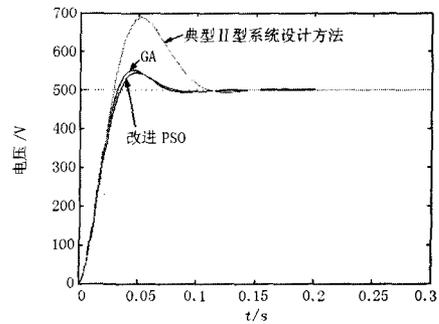


图 3 三种方法整定结果的阶跃响应曲线

Fig.3 Step response of three optimization methods

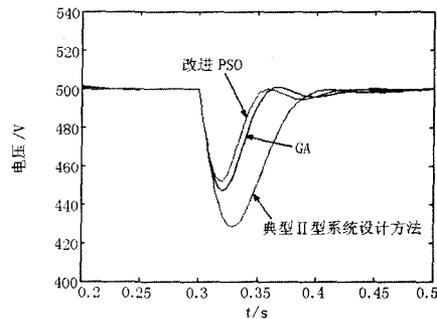


图 4 三种方法整定结果负载突变下的响应曲线

Fig.4 Response of three optimization methods to the increasing of load

3.2 系统仿真

使用 Matlab6.5/Simulink 搭建基于单位功率因数控制的系统仿真模型,参数设置如下:电网电压有效值 220 V,频率 50 Hz,逆变器直流侧电容 1 500 μF ,期望电压为 500 V,三角载波频率 20 kHz,不控整流桥接 $(100-j13.8)\ \Omega$ 阻容性负载。

仿真结果如图 5 所示。其中尖峰波为负载电流,即补偿前的电源电流,其电流谐波总畸变率 (THD)

为 66.7%，功率因数为 0.946，补偿后的电源电流波形如图 5 所示，其电流谐波总畸变率 (THD) 降为 1.77%，功率因数为 0.996，由频谱分析可知，补偿前电源电流中 3, 5, 7, 9, 11 等奇次谐波含量较高，其谐波电流含有率 HRI_n 分别为 65.96%，25.08%，8.43%，6.84%，3.52%；补偿后各奇次谐波含有率不多于 1.6%。可见，基于单位功率因数控制的单相 APF 能有效补偿系统中的谐波与无功电流。

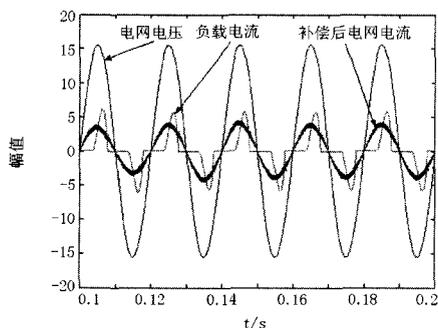


图 5 单相不控整流桥接阻容性负载下的仿真波形

Fig.5 Simulation waveform of the single-phase rectifier with resistance and capacitance load

3.3 负载变化时的 APF 动态性能仿真

在单相不控整流桥接 (100-j13.8) Ω 阻容性负载情况下，启动有源电力滤波器，0.2 s 时刻在阻容负载上再并联 100 Ω 电阻，仿真结果如图 6 所示。在 $t=0.2$ s 时负载电流突然增大，逆变器输出电流同时随之增大，电源电流也随之增大，但始终保持为与电网电压同频同相的标准正弦波。可见，逆变器输出的补偿电流可实时跟随负载电流的变化而变化，表明 APF 有着很好的实时性和动态性能。

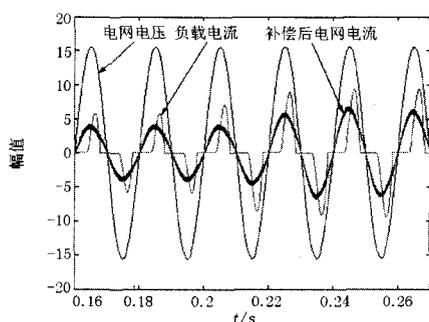


图 6 $t=0.2$ s 负载增加时的仿真波形

Fig.6 Simulation waveform when load increases at $t=0.2$ s

3.4 直流侧电容电压波形

针对启动和稳态两个阶段要求的不同控制目标，采用两组优化后的 PI 控制器，即启动 PI 控制器和稳态 PI 控制器。在 0~0.02 s 关断所有的开关器件，利用反并联二极管对直流侧电容进行充电，

0.02 s 接入启动 PI 控制器，当电容电压到达稳态时，切换控制器到稳态 PI 控制器，进入稳态控制阶段，并在 0.2 s 时突加负载，其电压仿真波形如图 7 所示。可以看出采用两组 PI 控制器获得了很好的启动和稳态控制效果，启动时直流侧电压超调量小，稳态时抗扰性能好，电压维持在要求的恒定值。

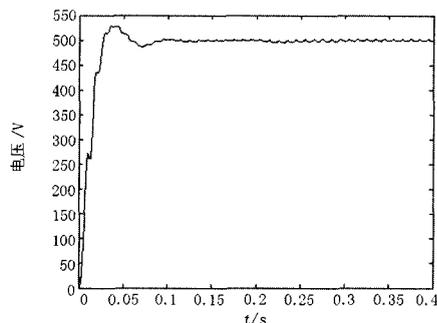


图 7 直流侧电容电压仿真波形

Fig.7 DC voltage simulation waveform

4 结论

从能量传递的角度，建立了单位功率因数控制策略下的单相有源电力滤波器有功功率控制模型，传统的典型 II 型系统设计方法得到的 PI 控制器虽有不错的抗扰性能，但在启动阶段直流侧电压超调量过大，且稳态时抗扰性能难以达到最优，采用微粒群优化算法针对两个阶段不同的控制目标对 PI 参数进行优化，得到两组 PI 参数，在启动和稳态阶段分别投入相应的 PI 控制器，使得启动和稳态时系统都有很好的控制效果，仿真验证了方法的有效性。

参考文献

- [1] 顾建军, 徐殿国, 刘汉奎, 等. 有源滤波技术现状及其发展[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(2): 126-132.
GU Jian-jun, XU Dian-guo, LIU Han-kui, et al. Active Power Filter Technology and Its Development[J]. Electric Machines and Control, 2003, 7(2): 126-132.
- [2] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun, et al. Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation (Second Edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [3] 王建元, 张国富, 徐超, 等. 一种基于单位功率因数控制的有源电力滤波器[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 138-142.
WANG Jian-yuan, ZHANG Guo-fu, XU Chao, et al. Active Power Filter by Unity Power Factor Control[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9):

- 138-142.
- [4] Wu J C, Jou H L. Simplified Control Method for the Single-phase Active Power Filter[J]. IEE Proc Elect Power Appl, 1996, 143(3): 219-224.
- [5] Krohling R A, Rey J P. Design of Optimal Disturbance Rejection PID Controllers Using Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans Evol Comput, 2001, 5: 78-82.
- [6] 周凯汀, 郑力新. 基于遗传算法的PID参数优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2000, 21(2): 200-204. ZHOU Kai-ting, ZHENG Li-xin. Optimization Design Based on Genetic Algorithm for Designing Parameters of PID Controller[J]. Journal of Huaqiao University, Natural Science, 2000, 21(2): 200-204.
- [7] 何芝强. PID控制器参数整定方法及其应用研究[M]. 浙江: 浙江大学, 2005. HE Zhi-qiang. Parameters Tuning of PID Controller and Its Application[M]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005.
- [8] 梅红伟, 钟奇, 张金波. 有源电力滤波器直流侧电容电压的稳定控制[J]. 河海大学常州分校学报, 2005, 19(4): 26-29. MEI Hong-wei, ZHONG Qi, ZHANG Jin-bo. A Control Method for the Stability of the DC Bus Capacitor Voltage of an Active Power Filter[J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2005, 19(4): 26-29.
- [9] 王冬平, 陈树君, 黄继强, 等. 基于有功能量平衡原理的并联型有源滤波器的控制方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 89-92. WANG Dong-ping, CHEN Shu-jun, HUANG Ji-qiang, et al. A Control Method of Shunt Active Power Filter Based on the Active Power Balance Theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 89-92.
- [10] 张东, 吕征宇, 陈国柱. 并联有源电力滤波器直流侧电容电压控制[J]. 电力电子技术, 2007, 41(10): 77-79. ZHANG Dong, Lü Zheng-yu, CHEN Guo-zhu. Capacitor Voltage Control of Shunt Active Power Filter[J]. Power Electronics, 2007, 41(10): 77-79.
- [11] 罗世国, 侯振程. 有源滤波器直流侧电压闭环控制的稳定性研究[J]. 重庆大学学报, 1994, 17(3): 61-68. LUO Shi-guo, HOU Zhen-cheng. Stability Research on DC Voltage Close Loop Control for an Active Power Filter[J]. Journal of Chongqing University, 1994, 17(3): 61: 68.
- [12] 陈仲. 并联有源电力滤波器实用关键技术的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005. CHEN Zhong. Research on the Key Techniques of Shunt Active Power Filter[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005.
- [13] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的必要性(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 137-141. WANG Guang-zhu. The Unnecessaries of Harmonic and Reactive Current Detection for Active Power Filters (Part I) [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 137-141.
- [14] 王广柱. 有源电力滤波器谐波及无功电流检测的必要性(二)——仿真及实验[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 133-136. WANG Guang-zhu. The Unnecessaries of Harmonic and Reactive Current Detection for Active Power Filters (Part II) ——Simulation and Experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 133-136.
- [15] 何娜, 武健, 徐殿国. 有源电力滤波器直流电压的模糊控制[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 46-48. HE Na, WU Jian, XU Dian-guo. Fuzzy Control of DC Voltage in Active Power Filter[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 46-48.
- [16] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of International Conference on Neural Networks[C]. Australia: 1995. 1942-1948.
- [17] Eberhart R C, Kennedy J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory[A]. in: Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Nagoya: 1995. 39-43.
- [18] 湛锋, 魏星, 郭建全, 等. 基于改进粒子群优化算法的PID参数整定[J]. 继电器, 2005, 33(19): 23-27. ZHAN Feng, WEI Xing, GUO Jian-quan, et al. PID Parameters Tuning Based on Improved PSO Algorithm[J]. Relay, 2005, 33(19): 23-27.
- [19] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于ITAE指标的PID参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 206-210. XU Feng, LI Dong-hai, XUE Ya-li. Comparing and Optimum Seeking of PID Tuning Methods Base on ITAE Index[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 206-210.
- [20] 王介生, 王金城, 王伟. 基于粒子群算法的PID参数自整定[J]. 控制与决策, 2005, 20(1): 73-76. WANG Jie-sheng, WANG Jin-cheng, WANG Wei. PID Parameters Tuning Based on PSO Algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(1): 73-76.

收稿日期: 2008-10-14; 修回日期: 2008-12-22

作者简介:

胡凯(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向是电力系统的谐波抑制与无功补偿以及人工智能在电力系统中的应用; E-mail: hukai2004csu@yahoo.com.cn

申群太(1944-), 男, 教授, 博导, 从事电力电子技术及其在电力系统中的应用、人工智能技术等方面的研究。