

基于多目标粒子群优化算法的 UPFC 协调控制

颜楠楠, 傅正财

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 针对 UPFC 多个控制器间的负交互影响, 将 UPFC 的多个功能控制器之间的协调问题转化为多目标优化问题, 提出采用一种新颖的多目标粒子群优化算法 (MOPSO) 进行控制器的参数优化。介绍 MOPSO 算法的基本原理和实现过程, 进行算例计算, 并且与多目标进化算法 (MOEA) 进行比较分析。时域仿真验证了采用所提出的协调控制策略可以得到快速收敛并且良好分布的 Pareto 解集, 从而有效消除控制器间的负交互影响, 取得满意的控制性能。

关键词: 统一潮流控制器; 多目标粒子群优化算法; 协调设计; 多目标优化; 交互影响

Coordinated design of UPFC based on multi-objective particle swarm optimization

YAN Nan-nan, FU Zheng-cai

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, the problem of coordinated design for UPFC controllers is formulated as a multi-objective optimization problem. A novelty multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) based approach is developed to solve the coordination design problem of UPFC by optimizing UPFC controller parameters. The paper presents the theory and the implement procedure of MOPSO. Comparison of the optimization effects between the MOPSO and the multi-objective evolutionary algorithm (MOEA) is carried out. Simulation results show that the proposed MOPSO based method is capable of obtaining high quality solution. The stable convergence characteristics and the good computation efficiency of the MOPSO based method are also discovered. The time-domain results show the effectiveness of the proposed coordinated design method of UPFC controllers.

Key words: unified power flow controller (UPFC); MOPSO; coordinated design; multi-objective optimization; interaction

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0043-06

0 引言

统一潮流控制器 (UPFC) 是新一代的灵活交流输电装置, 集多种控制功能于一身。除了基本的潮流控制、电压控制功能外, UPFC 稳定控制器还能够对电力系统暂态稳定起到改善作用^[1-2]。但有研究表明, 将 UPFC 系统当作单输入单输出 (SISO) 系统进行控制器设计时, 即使每个控制器都能成功地单独设计, 也不能保证闭环全系统的稳定性^[3]。因此, 寻找一种合适的控制器设计方法来协调 UPFC 的多个控制功能间的负交互影响是非常必要的。

协调控制的方法有很多, 一般的方法是将协调控制看成是一个有约束的优化问题, 通过遗传算法, 进化算法等方法确定控制器的控制作用^[4-5]。同遗传、进化算法相比, 粒子群优化算法保留了基于种群的全局搜索策略, 而且其采用速度-位移模型操作简单, 避免了复杂的遗传操作^[6]。

粒子群优化 (PSO) 算法是 1995 年由美国的 Kennedy 和 Eberhart 提出的^[7], 它是一种基于启发

式算法的优化技术, 简单且易于实现, 并已成功应用于处理多种优化问题。但实际中很多复杂问题, 往往难以用单一目标进行描述, 因此一种基于 PSO 算法解决多目标问题的多目标粒子群优化算法 (MOPSO)^[8]开始引起研究人员的关注。其基本思想是使用一个外部存储器 (亦称“知识库”) 和一种基于地理的方法, 来保持有效解 (Pareto 最优解) 的多样性, 并通过群体中粒子间的合作与竞争所产生的新群体智能地指导优化搜索, 得到全局 Pareto 解集。越来越多的研究表明 MOPSO 算法非常适合解决多目标问题, 特别是在各个目标相互冲突的情况下, MOPSO 算法可以找到多个目标的最优折衷解。文献[9]将 MOPSO 算法用于优化三相感应电机的驱动效率最大和功率因数最大两个相互矛盾的函数, 并与传统的磁场定向控制法 (FOC) 和恒电压一频率比控制法 (CVFRC) 进行比较, 发现轻载时任何速度下电机效率都显著优于其他控制策略, 在额定负载附近时, 其电机效率也有提高。文献[10]针对能源管理系统 (EMS) 中的多目标优化问题, 提出一种

改进型的 MOPSO 算法用以解决目标函数中设计参数过多的问题。文献[11]采用 MOPSO 算法对电压稳定提高,无功偏差最小,负荷电压偏差最小三个目标函数进行优化,从而有效选择 FACTS 装置的安装位置。

本文首先将 UPFC 多功能控制器的协调问题转化为多目标优化问题,接着阐述了 MOPSO 的机理及其实现过程,并引入模糊机制从而在 Pareto 解集中选出最佳折衷解决方案。同时将 MOPSO 算法与 MOEA 算法进行比较,结果显示本文提出的算法能够快速收敛,产生良好分布的 Pareto 解集。最后,时域仿真验证采用本文提出的协调控制策略可以有效消除控制器间的负交互影响,表现出良好的动态性能。

1 多目标优化问题描述

1.1 含 UPFC 的电力系统模型

装有统一潮流控制器的电力系统如图 1 所示。其中,UPFC 由 2 个电压源逆变器通过直流电容器连接而成。逆变器 inv-1 通过一个励磁变压器 ET 并联接入电网,逆变器 inv-2 通过升压变压器 BT 串联接入电网。

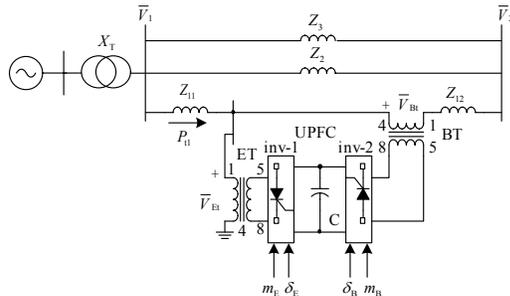


图 1 含 UPFC 的电力系统
Fig.1 Power system including UPFC

同步发电机和励磁机采用如下的五阶模型来表示其动态过程^[12]:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \\ \dot{\omega} = \frac{1}{2H}(P_m - (E'_d I_d + E'_q I_q) - D(\omega - 1)) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd} - (x_d - x'_d)I_d - E'_q) \\ \dot{E}'_d = \frac{1}{T_{q0}}(-E'_d + (x_q - x'_q)I_q) \\ \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A}(E_{fd} + K_A(V_{tref} - V_t)) \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$V_t = \sqrt{v_{dt}^2 + v_{qt}^2} = \sqrt{(E'_d + x'_d I_d)^2 + (E'_q - x'_q I_q)^2}$$

图 1 中, m_E , m_B 和 δ_E , δ_B 分别为各逆变器控

制信号的幅值调制比和相位角。 m_E 用于调节并联侧交流母线电压, δ_E 用于调节直流通路电容器 C 的电压, m_B 和 δ_B 分别用于调节串联侧流向线路受端的有功和无功潮流。如果忽略变压器的电阻和暂态,统一潮流控制器的动态模型为:

$$\dot{V}_{DC} = -\frac{3m_E}{4C_{dc}} \begin{bmatrix} \cos \delta_E & \sin \delta_E \\ i_{Ed} & i_{Eq} \end{bmatrix} - \frac{3m_B}{4C_{dc}} \begin{bmatrix} \cos \delta_B & \sin \delta_B \\ i_{Bd} & i_{Bq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$I_t = I_{tE} + I_L = (I_{tEd} + jI_{tEq}) + (I_{Ld} + jI_{Lq})$$

$$I_{tEd} = I_{Ed} + I_{Bd}, \quad I_{tEq} = I_{Eq} + I_{Bq}$$

$$P_{t1} = V_{dt}(I_{Ed} + I_{Bd}) + V_{qt}(I_{Eq} + I_{Bq})$$

$$V_{Et} = \sqrt{V_{Ed}^2 + V_{Eq}^2}$$

式中: i_{Ed} 和 i_{Eq} 分别为励磁变压器 ET 的直轴和交轴电流; i_{Bd} 和 i_{Bq} 分别为升压变压器 BT 的直轴和交轴电流。

UPFC 可以改变串联电压的大小和相角以及并联无功注入电流等物理量,从而实现控制潮流和电压的目的。这里安排三个 PI 控制器,选 m_B 作为潮流控制器的控制信号, m_E 为交流电压调节器的控制信号, δ_E 为直流电压调节器的控制信号,控制信号 δ_B 保持为常值,UPFC 的控制系统结构如图 2 所示。

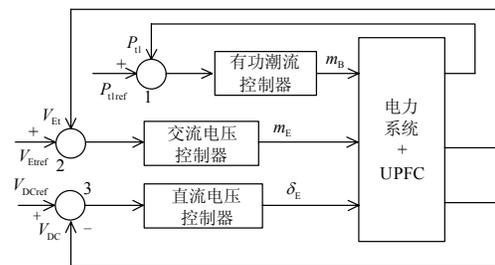


图 2 UPFC 控制系统配置
Fig.2 Arrangement of the UPFC

则 UPFC 的控制模型为:

$$\text{PI 潮流控制器} \quad m_B = (K_{PP} + \frac{K_{PI}}{s})(P_{tref} - P_{t1});$$

$$\text{PI 交流电压调节器} \quad m_E = (K_{ACP} + \frac{K_{ACL}}{s})(V_{Eref} - V_{Et});$$

$$\text{PI 直流电压调节器} \quad \delta_E = (K_{DCP} + \frac{K_{DCL}}{s})(V_{DCref} - V_{DC}).$$

其中: P_{tref} , V_{Eref} , V_{DCref} 分别为相应控制的参考信号。在图 1 所示的含有 UPFC 的单机无穷大系统中,

由式 (1) 和式 (2) 可推导出系统的状态方程^[13]

$$\dot{X} = AX + BU$$

$$Y = CX + DU$$

其中:

$$X = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_d \quad \Delta E'_{fd} \quad \Delta V_{DC}]^T, A \in R^{6 \times 6};$$

$$U = [\Delta m_B \quad \Delta m_E \quad \Delta \delta_E]^T, B \in R^{6 \times 3};$$

$$Y = [\Delta P_{ti} \quad \Delta V_{Ei} \quad \Delta V_{DC}]^T, C \in R^{3 \times 6}, D \in R^{3 \times 3}$$

1.2 UPFC 控制器多目标优化设计

多目标优化问题的定义为: 在可行域中确定设计变量组成的向量, 使一组 m 个相互冲突的目标函数组成的向量极小化, 数学表达式为:

$$\begin{cases} \text{Minimize/Maximize } f_m(X), & m=1,2,\dots,M \\ \text{subject to } g_j(X) \geq 0, & j=1,2,\dots,J \\ h_k(X) = 0, & k=1,2,\dots,K \end{cases}$$

式中: X 为待设计或优化的变量; $f_m(X)$ 为第 m 个目标函数; $g_j(X)$ 和 $h_k(X)$ 分别为不等式及等式约束条件。

适应度函数决定了群体的进化方向。对于非线性控制器设计问题, 选取一系列系统响应的性能指标构成适应度函数。选取 UPFC 的控制目标, 即线路传输有功、UPFC 接入处节点交流电压信号和直流连接电容电压, 与其相应的控制器设定参考值的方差积分作为性能指标, 仿真持续时间为 t_{sim} 。综上所述, 本文所研究的 UPFC 控制器协调设计问题可转化为如下多目标优化问题:

$$\text{Min} \begin{cases} F_{Pti}(K_{pp}, K_{pi}, K_{ACP}, K_{ACI}, K_{DCP}, K_{DCI}) = \int_0^{t_{sim}} |\Delta P_{ti}| dt \\ F_{VEi}(K_{pp}, K_{pi}, K_{ACP}, K_{ACI}, K_{DCP}, K_{DCI}) = \int_0^{t_{sim}} |\Delta V_{Ei}| dt \\ F_{VDC}(K_{pp}, K_{pi}, K_{ACP}, K_{ACI}, K_{DCP}, K_{DCI}) = \int_0^{t_{sim}} |\Delta V_{DC}| dt \end{cases}$$

优化参数约束条件为:

$$\begin{aligned} 0 \leq K_{pp} \leq 10 & \quad 0 \leq K_{ACP} \leq 10 & \quad 0 \leq K_{DCP} \leq 10 \\ 0 \leq K_{pi} \leq 25 & \quad 0 \leq K_{ACI} \leq 45 & \quad 0 \leq K_{DCI} \leq 25 \end{aligned}$$

2 基于 MOPSO 的 UPFC 协调控制器设计

2.1 粒子群优化算法简介

PSO 算法是 1995 年 Kennedy 和 Eberhart 受到真实世界中鸟群搜索食物行为的启示而提出的一种优化算法。在 PSO 中, 每个优化问题的潜在解都是搜索空间中的一个“粒子”。所有的粒子都有一个由被优化函数决定的适应值和一个决定他们飞翔方向

和距离的速度, 然后粒子们追随当前的最优粒子在解空间中搜索。PSO 初始化为一群随机粒子, 设有 m 个, 然后通过迭代找到最优解。在每次迭代中, 每个粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。两个“极值”分别为粒子本身所找到的最优解 (个体极值 $pBest$) 和整个种群目前找到的最优解 (全局极值 $gBest$)。每个粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置^[14]:

$$v_{d+1} = w \cdot v_d + \varphi_1 \cdot rand() \cdot (pBest - x_d) + \varphi_2 \cdot rand() \cdot (gBest - x_d) \quad (3)$$

$$x_{d+1} = x_d + v_{d+1} \quad (4)$$

式中: 下标 d 表示迭代次数; x_d 表示 d 次迭代时的粒子空间位置; v_d 表示 d 次迭代时的粒子速度; w 为惯性常数; φ_1 、 φ_2 为学习因子; $rand()$ 是介于 (0,1) 之间的随机数。

2.2 多目标粒子群优化算法 (MOPSO)

本文提出的 MOPSO 是在 PSO 的基础上进行的改进, 其核心是如何在 Pareto 解集中选择具有全局极值的粒子。在标准 PSO 中, 可以非常简单地找到具有全局极值的粒子。而在 MOPSO 中, 由于其解为一个 Pareto 最优解集, 每一个粒子均须从 Pareto 解集中选择一个 Pareto 最优解作为该粒子的全局最优。

在此提出的 MOPSO 算法用两个知识库储存粒子的搜寻结果, 其中一个储存迄今为止搜索到的全局最优粒子, 另一个存储每个粒子自身经历的历史最优位置 (同标准 PSO 算法的个体极值 $pBest$)。在储存全局最优粒子时, 应用一个可删减的档案文件, 该档案文件采用文献 [15] 中的方法, 将目标函数空间划分为一组超立方体, 当粒子数较稠密的超立方体超过其存储界限时对其档案文件进行删减。这种存档方法为选择全局最优粒子提供了方便。应用 MOPSO 算法的一般流程如图 3 所示。

具体步骤如下:

Step1: 初始化一个种群, 随机赋予种群中每个粒子的初始位置和速度。将每个粒子代入目标函数的值, 求出初始适应度值。取 $t=1$ 。

Step2: 将代表非占优解的粒子存储到知识库 NOD 中。由当前的搜索空间生成超立方体, 在超立方体中, 每个粒子根据其目标函数值进行坐标定位。初始化每个粒子的记忆, 其中包括一个局部最优解 (此记忆将指导每个粒子在搜索空间中的飞行, 并存储在另一个知识库 $pBest$ 中)。

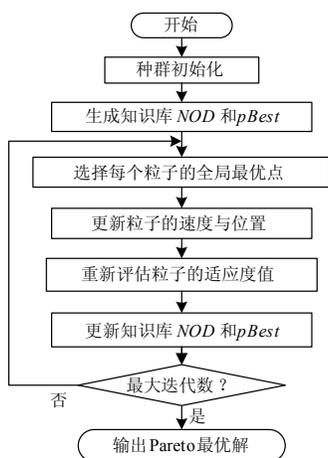


图 3 MOPSO 基本流程图

Fig.3 General principle of MOPSO

Step3: 取 $t=t+1$ 。在知识库 NOD 中选择每个粒子 i 的全局最优点。首先, 由任意的 $x > 1$ 除以某超立方体中所含的粒子, 得出该超立方体的适宜值。然后, 在用转轮盘的方法从这些适宜值选择出的超立方体中, 选取其中某一相应的粒子, 作为粒子 i 的全局最优点。

Step4: 由式 (3) 计算每个粒子的速度, 式 (4) 计算每个粒子的位置。

Step5: 维持每个粒子在问题的搜索空间中, 若超出该空间, 则限制该粒子在搜索空间的边界。重新评估群中的每个粒子的适应度值。

Step6: 更新知识库 NOD 中的内容, 包括在知识库中插入所有当前的非占优解和剔除所有占优解的位置。限于知识库的大小, 当 NOD 存满了以后, 采取保留方案的二级标准: 定位在目标空间中较少粒子存在地方的粒子优先于定位在目标空间中较多粒子存在地方的粒子, 从而可以得到分布优良的 Pareto 最优解。更新知识库 $pBest$ 中的内容。如果粒子当前位置比知识库 $pBest$ 中的记忆位置占优, 那么记忆位置被更新; 反之, 当前的位置会被保留。

Step7: 重复 step3 至指定的最大迭代数。

2.3 最佳折衷解决方案

MOPSO 算法最后将得到一个 Pareto 解集, 通常需要从这个解集中选择一个自己最为满意的解作为最后的结果。因此, 在实际应用中必须有一个决策选择机制。在此提出应用模糊集理论的最佳折衷解决方案, 决策者用隶属度函数代表每个目标函数的重要性。通常, 每个目标函数的隶属度函数是凭着决策者的经验决定的。为了简化分析, 在此用一个简单的线性函数作为目标函数的隶属度函数, 定义如式 (5) 所示:

$$u_i = \begin{cases} 1 & F_i \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & F_i^{\min} < F_i < F_i^{\max} \\ 0 & F_i \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: F_i^{\min} 表示只对目标 i 考虑, 求得的值最为满意; F_i^{\max} 表示对目标 i 没有考虑, 考虑其他目标求得的值。这样, 代表目标满意程度的隶属度函数 u_i 将被赋予一个介于 0 到 1 之间的值, $u_i = 1$ 表示决策者对目标完全满意, 而 $u_i = 0$ 表示决策者对目标完全不满意。

$$u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} u_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{obj}} u_i^k} \quad (6)$$

对于每个非占优解 k , 标准化的隶属度函数 u^k 如式 (6) 所示。式中 M 表示非占优解的个数, N_{obj} 表示目标函数的个数。隶属度函数 u^k 表示一个模糊的非占优解重要性优先权排序。通常选择有最大隶属度函数 u^k 值的非占优解作为决策者应选择的最佳解决方案。

3 算例结果与分析

对图 1 所示的装有 UPFC 的电力系统, 其仿真参数为: $H = 4$, $D = 10$, $T_{do}' = 5.044$, $T_{qo}' = 4$, $x_d = 1.0$, $x_q = 0.7$, $x_d' = 0.3$; $K_A = 2.0$, $T_A = 0.02$, $V_{Rmax} = 10$, $V_{Rmin} = -10$; $x_E = 0.3$, $x_B = 0.03$, $C_{dc} = 1.0$; $z_1 = j0.4$, $z_2 = 0.01 + j0.4$, $z_3 = 0.01 + j0.4$ 。采用 MOPSO 算法优化 UPFC 的 6 个控制参数, 取种群规模为 200、最大优化代数 50、学习因子 2.0、惯性常数 0.8。

为验证 MOPSO 算法的有效性, 选用多目标进化算法 (MOEA) 进行对比分析。MOEA 的交叉率和变异率分别选择 0.7 和 0.01。在同一目标函数和网格系统中, 两种算法均设置求解 200 个 Pareto 解集, 迭代 50 次。图 4 为 MOPSO 和 MOEA 的收敛性能曲线。比较两图可以看出, MOPSO 算法收敛速度快, 在代数优化后进度比率更接近 0, 说明种群可以更优地收敛到全局最优 Pareto 解集边界。用 MOPSO 和 MOEA 得到的可行解目标域和 Pareto 解集分布分别如图 5、图 6 所示, 图中的 Pareto 解用圆圈标示。从图中可以看到三个目标的可行域构成一个曲面, 并且其 Pareto 解集均具有多样性和优良的分布。然而比

较两图,可以看出 MOPSO 算法产生的 Pareto 解集均匀地分布在全局最优解集的边界上, 不仅具有更多的解的多样性, 而且能产生更好的非占优解。而 MOEA 算法产生的 Pareto 解集集中分布在曲面的底部, 还有两点不在曲面上, 说明其分散性和多样性较差。

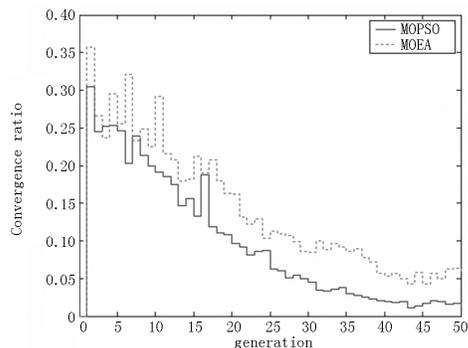


图 4 MOPSO 和 MOEA 的收敛性能曲线
Fig.4 Convergence of MOPSO and MOEA

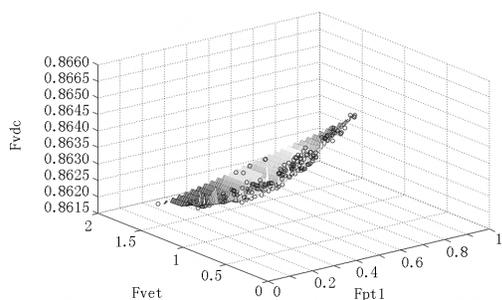


图 5 应用 MOPSO 算法得到的可行解目标域及 Pareto 解集
Fig.5 Objective space and Pareto set by MOPSO

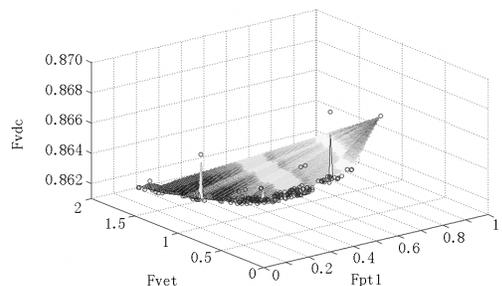


图 6 应用 MOEA 算法得到的可行解目标域及 Pareto 解集
Fig.6 Objective space and Pareto set by MOEA

为根据决策者的偏好从 Pareto 解集中选取一组解作为最终解决方案, 在此采用最佳折衷解决方案。首先按照定义计算各目标函数的 F_i^{\min} 和 F_i^{\max} , 结果见表 1, 再通过式 (5)、(6) 给出的隶属度函数便可评价各组 Pareto 解, 从而选出具有最大隶属

度函数值的非占优解作为最佳折衷解决方案。由 MOPSO 算法得到的最佳折衷方案见表 2。

表 1 各个目标函数的最大值与最小值

Tab.1 The maximum and minimum fitness of the objects

目标函数	F_i^{\max}	F_i^{\min}
F_{Pt1}	0.435 3	0.135 0
F_{Vet}	1.627 7	0.116 0
F_{VDC}	0.865 7	0.861 9

表 2 MOPSO 算法的最佳折衷解决方案

Tab.2 The best tradeoff solution by MOPSO

控制参数	MOPSO
K_{pp}	1.940 4
K_{pi}	24.875 9
K_{ACP}	0.399 8
K_{ACI}	40.618 8
K_{DCP}	8.006 8
K_{DCI}	15.082 4

在 Matlab 环境下, 对基于 MOPSO 算法设计的控制器进行时域仿真, 图 7 至图 9 给出了在小扰动情况下各控制器的响应曲线。其中小扰动情况设定为: 在仿真 1 s 时, V_{Dcref} 从 1.0 变化为 1.1 (标么值); V_{Etref} 从 1.062 4 变化为 1.072 4 (标么值); P_{tlref} 从 0.072 2 变化为 0.272 2 (标么值)。从图中可以看出在所有控制器皆为闭环的条件下, 所设计的控制器在小扰动下呈现出良好的响应性能, 各控制器间的交互影响大为减小, 系统可以在较短的时间内平息震荡, 较快地恢复系统稳定性, 具有较好的动态性能。

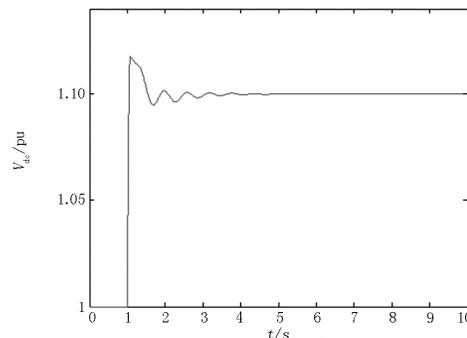


图 7 直流电压调节控制器阶跃响应曲线
Fig.7 DC voltage control performance

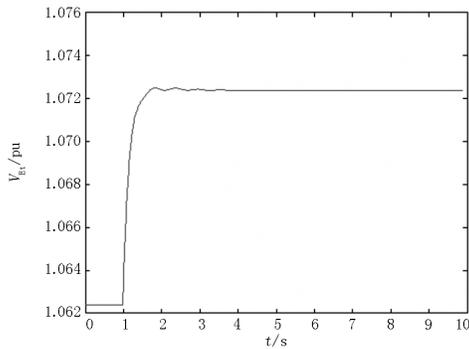


图8 交流电压调节控制器阶跃响应
Fig.8 AC voltage control performance

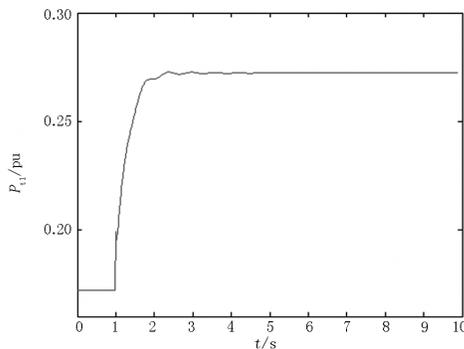


图9 潮流控制器阶跃响应曲线
Fig.9 Power flow control performance

4 结论

本文提出采用一种新颖的多目标粒子群优化算法对 UPFC 控制器进行协调设计。通过与 MOEA 算法进行比较测试,证明本文所提出的 MOPSO 算法在解决多目标问题方面具有高效和稳定的特点。通过单次仿真运算便可找到多个 Pareto 解集,而且解集的良好分布和多样性也令人满意。同时,引入了模糊机制从 Pareto 解集中选择最佳折衷解。时域仿真结果表明基于 MOPSO 算法设计的控制器可以有效抑制 UPFC 多个控制器间的交互影响,提高系统暂态稳定性。

参考文献

[1] Papic I, Zunko P, Povh D, et al. Basic Control of Unified Power Flow Controller[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1734-1739.
 [2] Gholipour E, Saadate S. Improving of Transient Stability of Power Systems Using UPFC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1677-1682.
 [3] Wang H F. Interactions and Multivariable Design of Multiple Control Functions of a Unified Power Flow Controller[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(7): 591-600.
 [4] LEI Xian-zhang, Lerch E N, Povh D. Optimization and

Coordination of Damping Controls for Improving System Dynamic Performance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 473-480.
 [5] Abdel-Magid Y L, Abido M A. Robust Coordinated Design of Excitation and TCSC-based Stabilizers Using Genetic Algorithms[J]. Electric Power System Research, 2004, 69(2-3): 129-141.
 [6] Eberhart R C, Shi Y. Comparison between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of LNCS International Conference on Evolutionary Programming VII[C]. California(USA): 1998.611-616.
 [7] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia): 1995.1942-1948.
 [8] Coello C A C, Lechuga M S. MOPSO: a Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization[A]. in: Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence[C]. 2003.1051-1056.
 [9] Hamid R H A, Amin A M A, Ahmed R S, et al. Optimal Operation of Induction Motors Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization(MOPSO)[A]. in: The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)[C]. Taiwan: 2007.1079-1084.
 [10] Kitamura S, Mori K, Shindo S, et al. Multi-objective Energy Management System Using Modified MOPSO[A]. in: IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics[C]. 2005. 3497-3503.
 [11] Abdelaziz Laifa, Boudour Mohamed. FACTS Allocation for Power Systems Voltage Stability Enhancement Using MOPSO[A]. in: 5th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices[C]. 2008.1-6.
 [12] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
 [13] Wang H F. Damping Function of the Unified Power Flow Controller[J]. IEE Proc Gener, Transm, and Distrib, 1999, 146(1): 81-87.
 [14] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling Multiple Objective with Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004,8(3): 256-279.
 [15] Knowles D J, David W C. Approximating the Non-dominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy[J]. Evolutionary Computation, 2000, 8: 149-172.

收稿日期: 2009-05-19; 修回日期: 2009-07-17

作者简介:

颜楠楠(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向为电能质量、电力系统过电压与绝缘配合; E-mail: nnyan@sjtu.edu.cn

傅正财(1965-), 男, 教授, 研究方向为电能质量与电磁环境, 高电压试验设备与试验技术, 电力系统过电压与绝缘配合。