

# 遗传算法在 UPFC 的 PID 控制器 参数优化中应用

吴红斌<sup>1</sup>, 杨仪松<sup>2</sup>, 丁 明<sup>1</sup>, 张一山<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 国电自动化研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 阐述了统一潮流控制器(UPFC)的原理及其控制器设计, 采用串联侧输出电压、并联侧输出电流的横向分量和纵向分量为控制量, 建立了比例积分(PI)控制时的系统方程。以含 UPFC 的单机无穷大系统进行仿真, 结果表明 UPFC 可提高系统暂态稳定性。利用遗传算法对 PID 控制器参数进行优化, 采用偏差绝对值对时间的积分性能指标作为最小目标函数, 同时加入控制输入的平方项并引入惩罚功能, 以防止控制能量过大和超调。仿真结果显示, 参数优化后系统暂态过程变短, 相关量的波动降低, 进一步提高了系统的暂态稳定性能。

**关键词:** 统一潮流控制器; PID 控制; 遗传算法; 暂态稳定

**中图分类号:** TM 712

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2007)02-0024-04

## 0 引言

在统一潮流控制器(UPFC)<sup>[1-9]</sup>建模的过程中, 将其串联侧和并联侧分别用受控电压源和受控电流源表示, 相应地, UPFC 的控制器也分为串联侧控制和并联侧控制, 其中, 串联侧电压源输出电压的纵分量和横分量由受控线路的有功、无功功率调节, 并联侧电流源输出电流的横分量、纵分量则分别由直流电容电压和受控母线电压调节<sup>[4-7]</sup>。在进行控制器设计的过程中, 对应 UPFC 的控制器, 一般采用比例积分微分(PID)控制器的设计思路, 利用比例、微分和积分的方式调节上述 4 个量。因此, 在实际应用过程中, PID 控制器中 P、I、D 3 个参数的选取至关重要, 它们直接影响到控制效果的好坏。

目前, PID 控制作为工业过程控制中应用最广的策略之一, 对其参数的优化问题一直为人们关注。计算机技术和智能控制理论的发展为复杂动态不确定系统的控制提供了新的途径, 采用智能控制技术, 可以设计智能 PID 控制和进行 PID 的智能整定。其中, 遗传算法作为一种不需要任何初始信息并可以寻求全局最优解的、高效的优化组合方法, 通过将生物进化原理引入到优化参数的群体中进行 PID 控制器参数的优化。因此, 将遗传算法应用于 PID 控制器的参数优化问题, 得到了广泛的应用<sup>[10-15]</sup>。

本文通过研究 UPFC 的原理及控制器设计后, 应用基于实数编码的遗传算法理论, 优化 PID 控制的参数, 并利用 Matlab 仿真软件, 验证了优化后参数的效果。研究表明, 所设计的基于遗传算法整定

的 PID 控制器参数, 对于电力系统暂态稳定的提高具有很好的控制效果, 因此, 具有一定的理论价值和应用价值。

## 1 UPFC 原理及控制器设计

### 1.1 UPFC 控制器

如图 1 所示, UPFC 装置由 2 个公用直流侧电容器的电压源逆变器组成, 逆变器 1 通过变压器  $T_1$  并联接入系统, 逆变器 2 通过变压器  $T_2$  串联接入系统。逆变器 1 通过直流连接线向逆变器 2 提供有功功率。此外, 逆变器 1 还可以产生或吸收无功功率, 以支持节点电压。直流侧电容器起能量储存和功率传输作用。

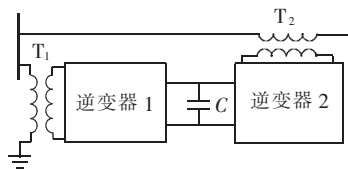


图 1 UPFC 的简化模型

Fig.1 Simplified model of UPFC

在数学模型中, UPFC 的并联侧和串联侧可以分别用受控电流源和受控电压源代替变压器和逆变器的作用, 此时, 直流侧电容器的动态方程可写为<sup>[4-5]</sup>

$$C U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_1 - P_2 \quad (1)$$

式中  $P_1$ 、 $P_2$  分别为逆变器两侧的有功功率;  $U_{dc}$  为直流侧的电容电压。

UPFC 接入系统的等效电路如图 2 所示。

设 UPFC 安装在发电机出口升压变压器的高压母线侧, 与另一条线路  $L_2$  并联运行。本文不考虑换流器的调制过程, 采用串联侧电压源输出电压的纵分

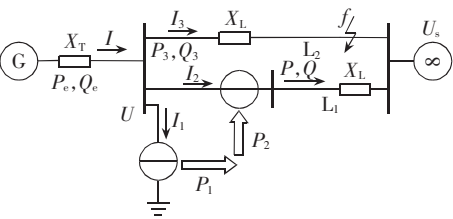


图 2 含 UPFC 的单机无穷大系统  
Fig.2 A one-machine to infinite  
-bus system with UPFC

量  $U_{2P}$  和横分量  $U_{2Q}$  由受控线路的有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  调节,并联侧电流源输出电流的横分量  $I_{1P}$  和纵分量  $I_{1Q}$  由直流电容电压  $U_{dc}$  和受控母线电压  $U$  幅值调节的控制方法。其向量图如图 3 所示。

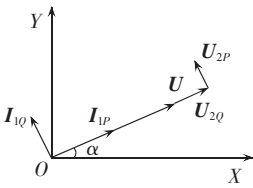


图 3 解耦时的向量图  
Fig.3 Vector diagram  
of decoupling

控制器采用 PI 控制时,控制系统方程可写为

$$U_{2P}=K_{1P}(P-P_{set})+K_{2P}\int(P-P_{set})dt \tag{2}$$

$$U_{2Q}=K_{1Q}(Q-Q_{set})+K_{2Q}\int(Q-Q_{set})dt \tag{3}$$

$$I_{1P}=K_{1Udc}(U_{dc}-U_{dcset})+K_{2Udc}\int(U_{dc}-U_{dcset})dt \tag{4}$$

$$I_{1Q}=K_{1U}(U-U_{set})+K_{2U}\int(U-U_{set})dt \tag{5}$$

式中  $P_{set}$ 、 $Q_{set}$ 、 $U_{dcset}$ 、 $U_{set}$  分别为线路有功、无功功率及直流侧电压和安装处电压的给定值; $P$ 、 $Q$ 、 $U_{dc}$ 、 $U$  为系统实际计算值;PI 控制器参数初始值为  $K_{1P}=0.048$ ,  $K_{2P}=8$ ,  $K_{1Q}=0.01$ ,  $K_{2Q}=50$ ,  $K_{1Udc}=0.1$ ,  $K_{2Udc}=8$ ,  $K_{1U}=0.24$ ,  $K_{2U}=20$ 。

1.2 UPFC 暂态稳定仿真

对于图 2 所示的系统,直接用电流源和电压源修改系统中原有方程进行暂态稳定计算。假设,在 0.2 s 时,线路 2 末端  $f$  处发生三相短路,故障持续时间 0.1 s。图 4 分别给出未安装 UPFC 时和安装 UPFC 后相关计算量的结果。

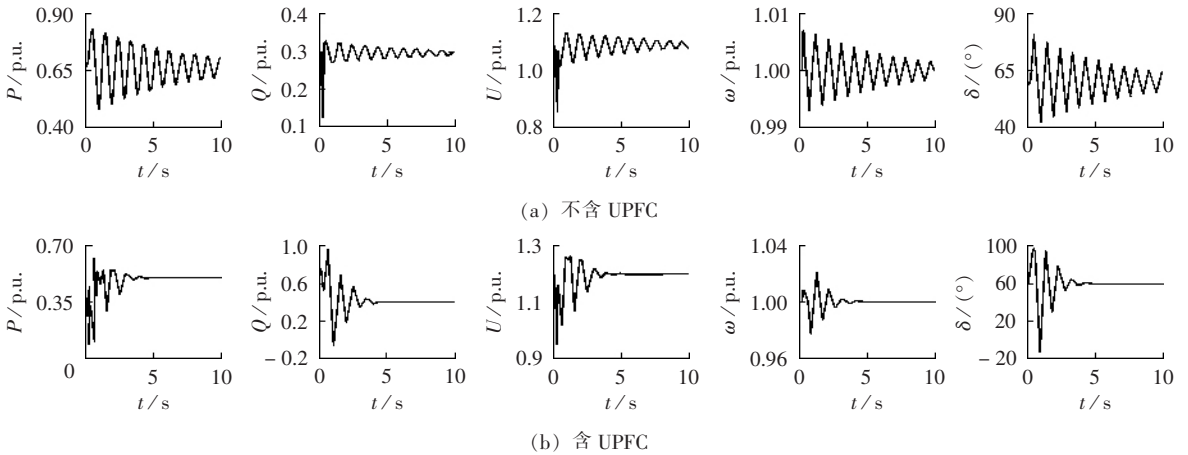


图 4 暂态仿真结果

Fig.4 Simulation results of transient

对比图 4(a)(b)可见,安装 UPFC 后,系统的暂态稳定性明显提高。因此,UPFC 具有提高系统暂态稳定的能力。

2 遗传算法基本原理

遗传算法(GA)的基本操作分为 3 个阶段:复制(reproduction operator)、交叉(crossover operator)、变异(mutation operator)。基于遗传算法的 PID 参数整定分为 4 个步骤。

a. 参数的确定及表示。首先,确定参数范围,然后,根据精度的要求,对其进行编码。选取二进制字符串表示每一个参数,并建立与参数间的关系。再把二进制串连起来组成一个长的二进制字符串,该字符串为遗传算法可以操作的对象。

b. 选取初始种群。采用计算机随机产生初始种群,同时,根据计算的复杂程度,规定种群的大小。

c. 适配函数的确定。衡量一个控制系统的指标有 3 个方面,即稳定性、准确性和快速性。而上升时间越短,控制进行得就越快,系统品质也就越好。如果单纯追求系统的动态特性,得到的参数很可能使控制信号过大,从而导致系统不稳定,因此将控制量、误差和上升时间作为约束条件。适应函数同目标函数相关,目标函数确定后,直接将其作为适配函数进行参数寻优。最优的控制参数也就是在满足约束条件下使  $f(x)$  最大时,  $x$  所对应的控制器参数。

d. 遗传算法的操作。首先,利用适应度比例法进行复制。复制概率大的在下一代中将有较多的子孙,相反则会被淘汰。其次,进行单点交叉,交叉概率为  $P_c$ 。从复制后的成员里以  $P_c$  的概率选取字符串组成匹配池,而后对匹配池的成员随机匹配,交叉的位置也是随机确定的。最后,以概率  $P_m$  进行变异。

初始种群通过复制、交叉及变异得到了新一代种群,该代种群经解码后代入适配函数,验证是否满足结束条件,若不满足,则重复以上操作直到满足为止。

### 3 参数优化

对于遗传算法,具有 2 种编码方式:二进制编码和实数编码。主要研究基于实数编码的遗传算法的 PID 整定计算。

#### 3.1 PID 控制器参数优化中适配函数

对于图 2 所示含 UPFC 的单机无穷大系统,结合控制方程,即式(2)~(5),建立系统控制原理图如图 5 所示。

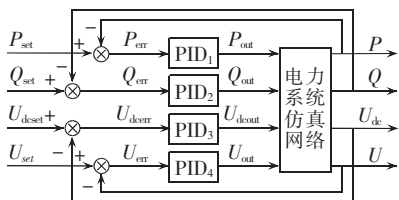


图 5 系统控制原理图

Fig.5 Control principle of system

由图 5 可以看出,基于 UPFC 的控制系统中含有 4 个控制变量。其中, $P_{set}$ 、 $Q_{set}$ 、 $U_{dcset}$ 、 $U_{set}$  分别为设定的 UPFC 的控制目标; $P_{err}$ 、 $Q_{err}$ 、 $U_{dcerr}$ 、 $U_{err}$  是设定值与通过仿真得出的计算值之间的偏差; $P_{out}$ 、 $Q_{out}$ 、 $U_{dcout}$ 、 $U_{out}$  分别为通过各自 PID 控制器后的输出,这 4 个量也是电力系统仿真网络的输入。

为了获取满意的过渡过程动态特性,采用偏差绝对值对时间的积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。同时,为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项。选用下式作为参数选取的最优指标,也就是相应的适配函数<sup>[15]</sup>:

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)] dt + w_3 t_u \quad (6)$$

式中  $e(t)$  为设定值与计算值之间的偏差,即  $P_{err}$ 、 $Q_{err}$ 、 $U_{dcerr}$ 、 $U_{err}$ ;  $u(t)$  为经过 PID 控制器后的输出,即  $P_{out}$ 、 $Q_{out}$ 、 $U_{dcout}$ 、 $U_{out}$ ;  $t_u$  为上升时间; $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  为权值。

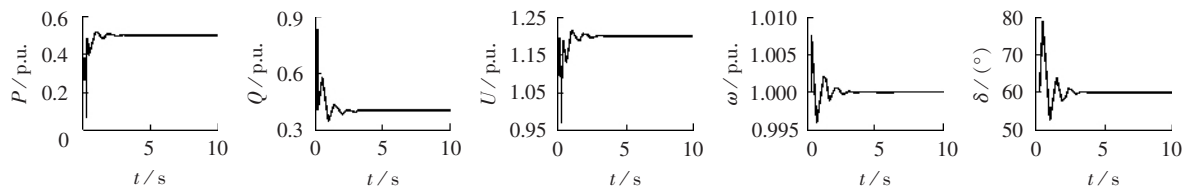


图 6 含 UPFC 参数优化后的暂态仿真结果

Fig.6 Simulation results of transient after parameter optimization

### 4 结论

通过单机无穷大系统组成最小的 UPFC 仿真系统,利用 Matlab 仿真工具,详细地对 UPFC 的动态特性进行了分析,结果表明 UPFC 可以显著提高系统的暂态稳定性。

此外,在基于实数编码遗传算法的基础上,对 UPFC 进行了 PID 控制参数的整定计算,通过单机无穷大系统验证了经过参数优化后,系统暂态过程变短,相关量波动降低,有利于提高系统暂态稳定性能。

此外,为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项,此时的最优指标为

if  $e(t) < 0$

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_4 |e(t)|] dt + w_3 t_u \quad (7)$$

式中  $w_4$  为权值,且  $w_4 \gg w_1$ 。

#### 3.2 UPFC 的控制器参数优化设计

在本例中,遗传算法中使用的样本个数为 30,交叉概率  $P_c = 0.9$ ,变异概率  $P_m = 0.033$ , $w_1 = 0.999$ , $w_2 = 0.001$ , $w_3 = 2.0$ , $w_4 = 100$ 。

由于在 UPFC 的控制器设计中,存在 4 个控制变量,本文在基于遗传算法的 PID 参数整定时,只取其中的 2 个控制器进行整定计算,即有功  $P$  的 PID<sub>1</sub> 和电压  $U$  的 PID<sub>4</sub>,此外,本文使用的控制器中,只用到了 PI 控制,因此认为 D 为 0。其他 4 个参数的设置如下: PID<sub>1</sub> 中  $K_{1P}$  的范围为  $[0, 0.05]$ ,  $K_{2P}$  的范围为  $[0, 10]$ ; PID<sub>4</sub> 中  $K_{1U}$  的范围为  $[0, 0.5]$ ,  $K_{2U}$  的范围为  $[0, 20]$ 。

采用实数编码的方式,经过 200 代进化后,得到的优化参数如下:

$$K_{1P} = 0.048, K_{2P} = 8.11, K_{1Q} = 0.01, K_{2Q} = 50$$

$$K_{1Udc} = 0.1, K_{2Udc} = 8, K_{1U} = 0.346, K_{2U} = 20$$

此时,仍然假设在 0.2 s 时,线路 2 末端 f 处发生三相短路,故障持续时间 0.1 s。图 6 给出了利用优化后参数得到的相关计算量结果。

结合图 4 中含与不含 UPFC 时相关计算量结果,可以看出,经过参数优化后(图 6),系统的暂态过程变短,相关量的波动降低,进一步提高了系统的暂态稳定性能。

此外,需要注意的是:在应用遗传算法时,为了避免参数选取范围过大,可以先按照经验选取一组参数,然后再在这组参数的周围利用遗传算法进行设计,从而大幅降低初始优化寻优的盲目性,减小计算量。

### 参考文献:

- [1] GYUGYI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1093.
- [2] NOROOZIAN M, ANGQUIST L, GHANDHARI M, et al. Use of UPFC for optimal power flow control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(4): 1629-1634.
- [3] MIHALIC R, ZUNKO P, POVH D. Improvement of transient stability using unified power flow controller[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(1): 485-491.

- [4] 黄振宇,倪以信,陈寿孙,等. UPFC 动态模型在电力系统动态分析中的实现[J]. 电力系统自动化,1999,23(6):26-30.  
HUANG Zhen-yu, NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, et al. Realization of UPFC dynamic model in dynamic analysis of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 26-30.
- [5] 黄振宇,刁勤华,倪以信,等. 统一潮流控制器的控制系统分析及控制策略设计[J]. 电网技术,1999,23(7):3-9.  
HUANG Zhen-yu, DIAO Qin-hua, NI Yi-xin, et al. UPFC control system analysis and control strategy design[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 3-9.
- [6] 颜伟,朱继忠,孙洪波,等. 统一潮流控制器的控制器设计与暂态仿真研究[J]. 电网技术,1999,23(7):15-19.  
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, SUN Hong-bo, et al. Controller design and transient simulation study of UPFC[J]. Power System Technology, 1999, 23(7): 15-19.
- [7] 颜伟,朱继忠,孙洪波,等. 含 UPFC 的电力系统暂态稳定数字仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(5/6):1-7.  
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, SUN Hong-bo, et al. Transient stability digital simulation for power system with UPFC[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(5/6): 1-7.
- [8] 章良栋,岑文辉,刘为. UPFC 的模型及控制器研究[J]. 电力系统自动化,1998,22(1):36-39.  
ZHANG Liang-dong, CEN Wen-hui, LIU Wei. Model and control of UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(1): 36-39.
- [9] 葛敏辉,石松奇,周贵兴. UPFC 控制器设计原理及方案[J]. 电网技术,2000,24(6):31-33.  
GE Min-hui, SHI Song-qi, ZHOU Gui-xing. Control method of UPFC equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 31-33.
- [10] 苏小林,阎晓霞. 基于遗传算法的 PID 参数优化技术[J]. 电力系统及其自动化学报,1997,9(2):21-26.  
SU Xiao-lin, YAN Xiao-xia. A search algorithm based on genetic algorithm for PID parameter optimization[J]. Proceedings of the EPSA, 1997, 9(2): 21-26.
- [11] 刘国贤,林宪枢,杨奇逊. 基于遗传算法的控制器参数寻优[J]. 现代电力,1997,14(3):18-22.  
LIU Guo-xian, LIN Xian-shu, YANG Qi-xun. Controller parameters optimization by genetic algorithm[J]. Modern Electric Power, 1997, 14(3): 18-22.
- [12] 刘乐星,毛宗源. 水轮机的 GA-PID 控制器研究[J]. 电力系统

自动化,1997,21(12):41-43.

- LIU Le-xing, MAO Zong-yuan. Water turbines PID controller based on genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 41-43.
- [13] 周忠福,张建华,陈永祥. 应用遗传算法优化发电机励磁控制器[J]. 中国电力,1998,31(7):41-44.  
ZHOU Zhong-fu, ZHANG Jian-hua, CHEN Yong-xiang. Application of genetic algorithm to optimized generator excitation controller[J]. Electric Power, 1998, 31(7): 41-44.
- [14] 孟安波,叶鲁卿,殷豪,等. 遗传算法在水电机组调速器 PID 参数优化中的应用[J]. 控制理论与应用,2004,21(3):398-404.  
MENG An-bo, YE Lu-qing, YIN Hao, et al. Application of genetic algorithm in adaptive governor with variable PID parameters[J]. Control Theory & Application, 2004, 21(3): 398-404.
- [15] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [16] 颜伟,朱继忠,孙洪波,等. UPFC 的潮流控制与暂态稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(12):57-61.  
YAN Wei, ZHU Ji-zhong, SUN Hong-bo, et al. Study of power flow control and transient stability with UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 57-61.
- [17] 郑三保,程时杰. UPFC 动态特性仿真研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(7):26-29.  
ZHENG San-bao, CHENG Shi-jie. Dynamic simulation study of the UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 26-29.

(责任编辑:李育燕)

#### 作者简介:

吴红斌(1972-),男,湖北鄂州人,副教授,博士,从事柔性输电系统仿真与控制的研究和教学工作;

杨仪松(1963-),男,安徽芜湖人,高级工程师,硕士,从事电力系统自动化的保护与控制方面的研究(E-mail:yangyisong@nari-nsps.com);

丁明(1956-),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统可靠性规划、电力市场、可再生能源技术等领域的研究和教学工作;

张一山(1980-),男,安徽黄山人,硕士研究生,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用研究。

## Application of GA in PID parameter optimization in UPFC

WU Hong-bin<sup>1</sup>, YANG Yi-song<sup>2</sup>, DING Ming<sup>1</sup>, ZHANG Yi-shan<sup>1</sup>

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The principle and control design of UPFC (United Power Flow Controller) are expounded. The system equation of PI (Proportional Integral) controller is set up by using the horizontal and vertical components of series output voltage and shunt output current as control inputs. The simulation on a one-machine to infinite-bus system with UPFC shows that UPFC can improve system transient stability. The genetic algorithm is used to optimize PID controller parameters, in which the minimal objective function adopts the integral characteristic value of absolute error to time. Punishment functions are introduced to avoid over control energy and overshoot by adding the square of control input. Simulation results show that the controller parameter optimization makes the transient process shorter, the variable fluctuation smaller and the transient stability better.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50607002).

**Key words:** UPFC; PID controller; genetic algorithm; transient stability