

文章编号:1007-6735(2013)04-0404-05

分数阶 PID 控制运用于励磁控制系统

于莲芝, 成聆聆

(上海理工大学 光电信息技术与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对传统的 PID(proportion integration differentiation)控制器已难以满足励磁控制系统动态、静态性能以及遏制干扰能力的要求,采用比传统的 PID 控制器多了两个参数的分数阶 PID (FOPID)控制器. 该控制器调节的范围更加广泛,能够很好的适应当前励磁控制系统的需要. 对其控制器与 PID 控制器做了对比仿真,结果表明:分数阶 PID 控制器具有优于传统 PID 控制器的性能.

关键词: 励磁系统; PID 控制; 分数阶 PID 控制

中图分类号: TP 2 **文献标志码:** A

Fractional PID Control Applied to Excitation Control System

YU Lian-zhi, CHENG Ling-ling

(College of Optical-electrical and Computer Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the dynamic and static performances of the excitation control system and enhance the ability of restraining disturbance, it is not advisable to use still the traditional PID controller for meeting the requirement, so new algorithms should be introduced. The fractional order PID controller was proposed, in which two parameters more than the traditional PID controller can be regulated. The scope of controlling can be adjusted more widely and the controller can well meet the needs of the current excitation control system. The performance of the controller proposed was compared with that of the PID controller by simulations. The results show that the fractional order PID controller is superior to the traditional one.

Key words: *excitation system; PID control; fractional PID control*

随着我国大容量发电机组的投入运行以及超高压远距离和直流输电的混合电网建设,全国性的电力系统逐渐形成,全国电网将发生巨大变化. 电力系统的不断扩大,使电力系统的结构和运行方式变得

越来越复杂多变,对电力系统的综合科学技术水平的要求也越来越高,使得电力系统的技术更新速度大大加快,不同技术之间互相渗透,相互融合也越来越普遍.

收稿日期: 2012-08-15

第一作者: 于莲芝(1966-),女,副教授. 研究方向:微小机器人技术及控制. E-mail: yulianzhi001@163.com

同步发电机励磁控制系统在保证电能质量、无功功率合理分配和提高电力系统稳定性等方面都起着十分重要的作用.同步发电机是将旋转形式的机械功率转换成三相交流电功率的设备,为了完成这一转换并满足运行的要求,除了需要原动机——汽轮机或水轮机供给动能外,同步发电机本身还需要有可调节的直流磁场作为机电能量转换的媒介,借以调节同步发电机运行工况以适应电力系统运行要求.为同步发电机提供可调励磁电流的设备总体,称为同步发电机的励磁系统^[1].

分数阶PID控制器由Podlubny^[2]提出,其一般格式简记为 $PI^\lambda D^\mu$.实际系统中有许多是分数阶的而不是整数阶的,之所以将它们作为整数阶系统来考虑是由于其复杂性.由于分数阶控制器的阶次为任意实数,因此分数阶控制器与整数阶控制器有所不同,整数阶PID控制器只是分数阶PID控制器的特例.随着电力系统的发展,对系统运行的可靠性和动态品质要求越来越高,传统的PID励磁控制器已经不能满足这一要求,采用分数阶PID控制策略在同步发电机中的应用以期取得良好的控制效果.

1 分数阶PID控制器

1.1 分数阶微积分^[3]简介

分数阶微积分的基本操作算子定义为

$${}_a D_t^p = \begin{cases} d^p/dt^p & \text{Re } p > 0 \\ 1 & \text{Re } p = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-p} & \text{Re } p < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ${}_a D_t^p$ 为基本操作算子; p 为运算阶数; t, a 为积分的上下限; $\text{Re } p$ 为取 p 的实部.至今为止已发展了好几种分数阶微积分的数学定义,最常用的是RL(riemann-liouville)定义和GL(grunwald-letnikov)定义,分别为

$${}_a D_t^p f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-p)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t (t-\tau)^{n-p-1} f(\tau) d\tau \quad (2)$$

$${}_a D_t^p f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-p} \sum_{j=0}^{\lceil h' \rceil} (-1)^j \binom{p}{j} f(t-jh) \quad (3)$$

其中 $n-1 < p < n$; $h' = \frac{(t-a)}{h}$

式中, h 为计算步长; $\Gamma(\cdot)$ 为欧拉Gamma函数; $\lceil \cdot \rceil$ 取整函数.实际应用中,式(2)和式(3)定义等价,但

RL定义常用于公式运算,而GL定义则用于数值求解.

当 $n-1 < p < n$ 时,对RL定义求拉普拉斯变换,有

$$L\{{}_a D_t^p f(t)\} = s^p F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k [{}_0 D_t^{p-k-1} f(t)]_{t=0} \quad (4)$$

式中, $L\{\cdot\}$ 为拉普拉斯运算; $F(s)$ 为 $f(s)$ 的拉普拉斯变换.为了数值计算微分方程,GL定义可采用

$$({}_{t-L}) D_t^p f(t) \approx h^{-p} \sum_{j=0}^{N(t)} b_j (t-jh) \quad (5)$$

其中 $N(t) = \min\{\lceil t/h \rceil, \lceil L/h \rceil\}$

式中, L 为“记忆长度”; b_j 为二项式系数,且有

$$b_0 = 1, b_j = \left(1 - \frac{1+p}{j}\right) b_{j-1}$$

1.2 分数阶微积分的滤波算法

在实际运用中,这两种分数阶微分运算方法运算的前提是 $f(t)$ 为已知函数,但在实际运用该函数有可能未知,所以需要用其它方法来求取分数阶微分,例如通过构造滤波器的方式对信号进行数值微分处理.

信号的滤波可以有连续和离散两种形式,分别用来拟合Laplace变换算子 S^λ 和Fourier变换算子 $(j\omega)^\gamma$.从效果上看,函数的分数阶数值相当于原来信号需要通过这样的滤波器得出输出信号.

文献[4]介绍了Oustaloup算法.假设选定的拟合频率段为 (ω_b, ω_h) ,则可以构造出的连续滤波器的传递函数模型为

$$G_f(s) = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (6)$$

其中,滤波器的零极点和增益计算式为

$$\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{k+N+\frac{1}{2}(1-\gamma)/2N+1} \quad (7)$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{k+N+\frac{1}{2}(1+\gamma)/2N+1} \quad (8)$$

$$K = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{-\frac{\gamma}{2}} \prod_{k=-N}^N \frac{\omega'_k}{\omega_k} \quad (9)$$

根据以上算法可以直接编写出 S^λ ,由这种形式可以得到分数阶PID控制器的传递函数为

$$G(s) \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S^\lambda} + T_d S^\mu\right) \quad (10)$$

式中, $U(s)$ 为输出; $E(s)$ 为偏差; K_p 为比例系数; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间.

1.3 分数阶PID控制器

与整数阶PID控制器相似,分数阶PID控制器

的微分方程为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D_t^{-\lambda} e(t) + K_d D_t^{\mu} e(t) \quad (11)$$

式中, $D_t^{\alpha} \equiv {}_0^c D_t^{\alpha}$ 为 Caputo 定义; $K_i = K_p / T_i$, $K_d = K_p / T_d$, $\lambda > 0$, $\mu > 0$ 为任意实数, 是分数阶控制器的阶次.

对 Caputo 定义的分数阶微分求 Laplace 变换, 有

$$L\{{}_0^c D_t^{\alpha} f(t)\} = s^{\alpha} F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{\alpha-k-1} f^{(k)}(0) \quad (12)$$

由此可得分数阶 PID 控制器的传递函数为

$$G_{fc}(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\mu} \quad (13)$$

由式(11)和式(13)可知, 当 $\lambda = 0$, $\mu = 0$ 时, $G_{fc}(s) = K_p$, 即为常规的比例控制器; 当 $\lambda = 1$, $\mu = 0$ 时, $G_{fc}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$, 即为常规的 PI 控制器; 当 $\lambda = 0$, $\mu = 1$ 时, $G_{fc}(s) = K_p + K_d s$, 即为常规 PD 控制器; 当 $\lambda = 1$, $\mu = 1$ 时, $G_{fc}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$, 即为常规的 PID 控制器.

由于 λ 和 μ 为任意实数, 所以常规 PID 控制为分数阶 PID 控制的特例. 根据被控对象的阶次不同, 可以选择不同的 λ 和 μ 值, 以得到最佳控制效果. 由于 λ 和 μ 可以连续的变化, 因此, 分数阶 PID 控制器较整数阶 PID 控制器更具有灵活性. 如图 1 所示, 整数阶 PID 控制只能在 OABC 4 个点之间 P-PI-PD-PID, 而分数阶 PID 可以取平面上的任何点.

设 $0 < \lambda \leq 1$, 以 $0 < \mu \leq 1$, 则控制器的阶次 λ 和 μ 可以在图 1 中的阴影区域内任意取值. 这就使得分数阶 PID 控制器的结构更加灵活、更适合于分数阶系统的动态特性^[5].

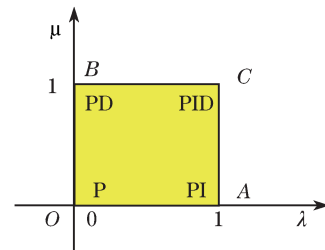


图 1 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器示意图

Fig.1 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller diagram

2 分数阶 PID 控制与 PID 控制励磁仿真研究

在 MATLAB 的 Simulink 下构建分数阶 PID 控制与 PID 控制励磁的模型, 得到其对比图, 这里用滤波法实现分数阶 PID.

图 2 为简单励磁系统下的分数阶 PID 与 PID 控制模型. 在这个简化的系统里, 输出为电机输出的电压, 示波器显示的是测量的标么值电压. 在这个系统里加入了干扰环节 Interference, 将用于比较 PID 与分数阶 PID 在遏制干扰时的效果. 在本文中使用的干扰为短路干扰, 持续 0.1 s.

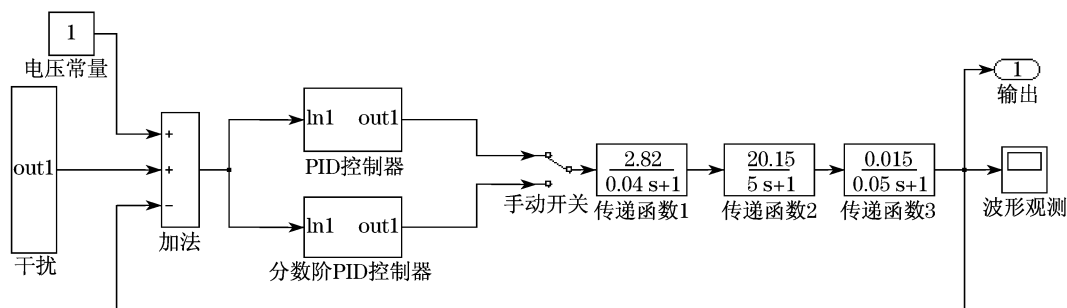


图 2 简单励磁系统仿真图

Fig.2 Simulation diagram of simple excitation system

图 3 为 PID 控制器和分数阶 PID 控制器的内部结构. 图 4 为分数阶微积分的封装模块和干扰模块. 仿真中, PID 控制器的参数为 $K_p = 85$, $K_i = 0.25$, $K_d = 4.5$; 分数阶 PID 控制器参数为 $K_p = 85$, $K_i = 0.25$, $K_d = 4.5$, $\lambda = 1.1$, $\mu = 1.6$.

图 5 为同步电机在 PID 控制器和分数阶 PID 控制器控制下的启动对比图. 从图中可以明显看出

分数阶 PID 控制器的控制动态性能要好于 PID 控制器, 虽然分数阶 PID 控制器调节时间稍长于 PID 控制器, 但超调量等其它动态性能分数阶 PID 控制器都有优势.

图 6 为在短路和断路小干扰下 PID 控制器与分数阶 PID 控制器的比对. 可以明显看出分数阶 PID 控制器的动态性能要优于 PID 控制器.

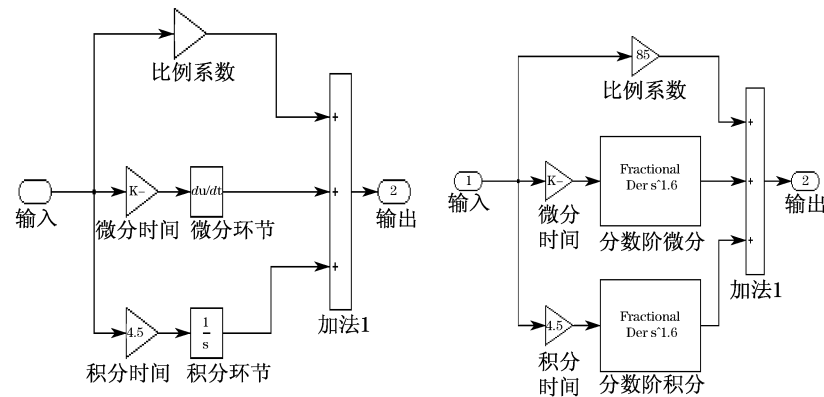


图3 PID控制器与分数阶PID控制器

Fig.3 PID controller and fractional PID controller

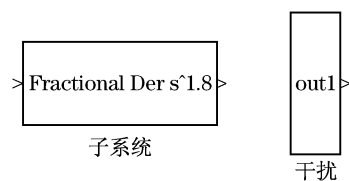


图4 分数阶微积分和干扰模块

Fig.4 Fractional order calculus and the interfere module

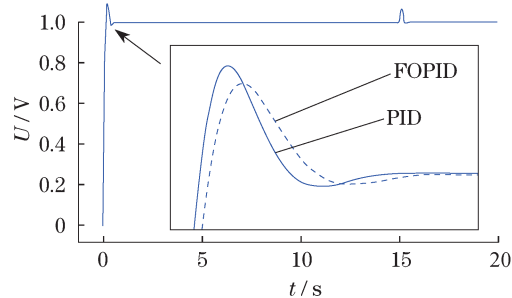


图5 同步电机启动

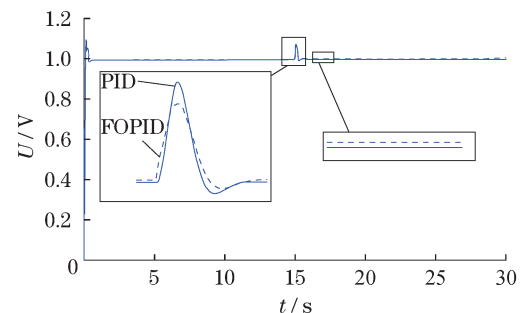
Fig.5 Synchronous motor starting

3 基于PSB(电力系统模块)的新型控制器控制效果

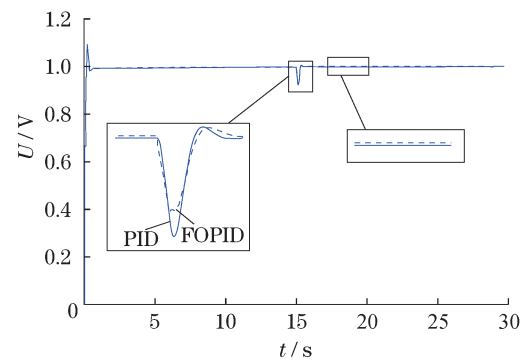
研究分数阶PID、PID建立的单机无穷大系统中的控制效果,主要以电机的机端电压为研究对象,因为在电厂中,往往要求电机在恒压下工作,所以主要分析机端电压,给出了同步发电机母线端口相电压的仿真分析。

实验主要有三相断线、三相短路和原动机干扰实验.所有的实验的仿真时间均为30s,且故障时间为15~15.1s.在下文的仿真图中,默认实线为分数

阶PID控制器,点划线为PID控制器。



(a) 短路小干扰



(b) 断路小干扰

图6 短路小干扰与断路小干扰对系统的影响

Fig.6 Small short circuit interference and circuit interference effect on the system

同步电机的参数分别为额定容量200MVA、定子额定电压13.8kV、定子额定频率50Hz、直轴同步电抗1.305Ω、暂态直轴同步电抗0.296Ω、次暂态直轴同步电抗2.525Ω、纵轴同步电抗0.474Ω、次暂态纵轴同步电抗0.243Ω、漏抗0.18Ω、直轴开路时间常数1.01、暂态直轴短路时间常数0.053、暂态交轴短路时间常数0.1。

分数阶PID的参数为

$K_P = 85, K_I = 0.25, K_D = 4.5, \lambda = 1.1, \mu = 1.6$

PID 的参数^[6]为

$K_P = 85, K_I = 0.25, K_D = 4.5$

4 启动、短路、断路实验结果

在 8~8.1 s 时加上一个断路小干扰;在 12~12.1 s 时加上一个短路小干扰.实验结果如图 7 所示.

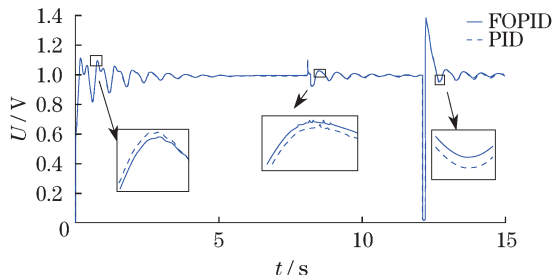


图 7 启动、短路、断路机端电压

Fig. 7 Start, short, circuit and open circuit voltage of the machine

从启动、短路、断路机端电压可以看出,分数阶 PID 超调量小于 PID,调节时间都比较好,所以在不影响速度的情况下,分数阶 PID 控制是优于 PID 控制的.

5 小 结

现代工业的发展和人们生活水平的日益提高,对电力系统稳定性的要求越来越高.从上世纪 60 年代以来,励磁控制对提高电力系统的稳定性起了很重要的作用,目前励磁控制在电力系统中的作用越

来越大.而在目前,大多数的励磁控制器还是传统的 PID,但其对于日益要求严格的电网来说,显然已经很难达到人们的要求.所以研究了一种新型励磁控制器.

研究均表明分数阶 PID 控制器能取得比传统 PID 更好的效果.但同时,在研究的过程中发现,分数阶 PID 与 PID 控制器都存在一些缺点.在分数阶 PID 中,由于其控制量与过去的每一个控制量都有关,所以其消耗大量的内存和计算机时间,这在实际控制中显然是不可行的.但同时也发现其控制量与靠近它的过去时刻关系最大,如果能找出这个范围,那么其在实际中会取得良好的效果.

本文仅仅对分数阶 PID 与 PID 控制器进行了部分的研究,对于其进一步的改进将在以后的工作中进一步的研究.

参考文献:

- [1] 杨德先,陆继明.电力系统综合实验原理与指导[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [2] Podlubny I. Fractional-order systems and PI, D^l-controllers[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999,44(1):208-214.
- [3] 秦君琴.分数阶微积分的性质[J].江苏师范大学学报,2012,30(2):13-14.
- [4] 薛定宇,陈阳泉.高等应用数学问题 MATLAB 求解[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 曾庆山,曹广益,王振滨.分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器的仿真研究[J].系统仿真学报,2004,16(3):465-469.
- [6] 王亚刚,许晓鸣.基于灵敏度的不稳定对象 PID 控制器[J].上海理工大学学报,2009,31(2):125-128.

(编辑:金 虹)