

基于迭代学习控制理论的
励磁控制器设计

徐 敏,林 辉

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072)

摘要：基于迭代学习控制理论提出了一种设计单机无穷大系统励磁控制器的新方法,克服了迭代学习控制在有限时间区间上实现完全跟踪的限制。将迭代学习控制对输出控制量 $u(t)$ 的记忆与修正改成对期望控制 $u_d(t)$ 的记忆与修正,采用最小二乘法拟合控制器参数,使设定的控制与期望控制之差达到最小,求得控制律。用 Matlab 对发电机励磁控制系统进行仿真研究,结果表明所设计的励磁控制器具有较好的动态特性和较强的鲁棒性。

关键词：迭代学习控制；单机无穷大系统；励磁控制；仿真

中图分类号：TP 13 文献标识码：B 文章编号：1006-6047(2006)03-0069-04

0 引言

由于电力系统具有高度非线性,当系统的运行点改变时(如负荷大幅度波动或发生严重故障时),系统的动态特性会显著改变。此时,线性控制器往往不能满足系统稳定性的要求,而必须采取切机、电阻制动、甩负荷等紧急控制措施来保证系统的稳定。因此,有必要基于电力系统的非线性模型设计不依赖系统某一运行点,并同时考虑系统非线性特性的电力系统非线性控制器^[1]。

实际生产过程往往具有非线性、时变不确定性,难以建立精确的数学模型,应用常规控制器的设计方法很难使控制器达到理想控制效果。近年来,出现了许多参数可自动整定的新型控制器,比较适应复杂的工况和高指标的控制要求;但是它们要求掌握较多的对象知识,且本身要整定的参数多,理论较为复杂,因此参数的实际整定很困难^[2-3]。

迭代学习控制仿效人类学习行为提取经验的过程,采用“在重复中学习”的学习策略,它具有记忆系统和经验的修正机制,即以系统实际输出与期望输出的偏差修正不理想的控制信号,产生新的控制信号,提高系统的跟踪性能。它最突出的特点在于,即使对非线性程度较强,甚至系统参数未知的动态系统,都能够应用比较简单的迭代学习算法,使系统输出能以高精度跟踪目标轨迹^[4]。

以往迭代学习控制的应用研究一直集中于具有某种重复运动(运行)性质的工程应用领域,而本文将迭代学习控制对 $u(t)$ 的记忆与修正改成对期望控制 $u_d(t)$ 的记忆与修正,克服了迭代学习控制在有限

时间区间上实现完全跟踪的限制,提出了一种拟合励磁控制器参数的新方法,该方法设计的控制器结构简单,可获得较佳的动态特性,Matlab 下的仿真实例表明,对于非线性控制系统,这种方法能设计出较为理想的励磁控制器。

1 数学模型

图 1 所示单机无穷大系统,设发电机与电力系统处于同步运行状态,对于考虑发电机励磁控制的简单电力系统,可用式(1)所示三阶微分方程表示^[1]。

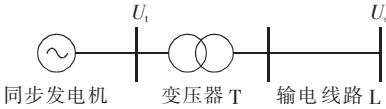


图 1 单机无穷大系统

Fig.1 A single-machine infinite-bus system

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E_q' U_s}{x_{d\Sigma}'} \sin \delta \tag{1}$$

$$E_q' = \frac{-1}{\tau_d'} E_q' + \frac{1}{\tau_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_d'} U_s \cos \delta + \frac{1}{\tau_{d0}} U_f \tag{2}$$

$$y(t) = U_i$$

其中^[5]

$$U_i = \sqrt{U_{id}^2 + U_{iq}^2}, \quad U_{id} = \frac{x_q U_s \sin \delta}{x_{q\Sigma}}$$

$$U_{iq} = \frac{(x_{d\Sigma}' - x_d') E_q' + x_d' U_s \cos \delta}{x_{d\Sigma}'}$$

$x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_{TL}, \quad x_{d\Sigma}' = x_d' + x_T + x_{TL}, \quad x_{q\Sigma} = x_q + x_T + x_{TL}$
式中 U_i 为同步发电机端电压幅值; U_s 为无穷大系统电压; U_f 为同步发电机的励磁电压; x_T 为变压器电抗; x_{TL} 为输电线路电抗; E_q' 为暂态电抗 x_d' 后的电势; δ 为发电机 E_q' 与无穷大系统母线电

压 U_s 间夹角; ω 为转子的机械角速度, 同步转速 ω_0 的标么值为 1.0; H 为转动惯量, 单位为 s; D 为机组的阻尼系数, 单位为弧度的标么值; P_m 为机械功率, 此处只考虑励磁控制, 故假定 $P_m = P_{m0}$ 为初始稳态时的机械功率; $\tau_d' = \tau_{d0} x_{d\Sigma}' / x_{d\Sigma}$ 为定子闭路时励磁绕组的时间常数。

被研究的单机无穷大系统采用式(1)所示的三阶模型, 为标准形式的仿射非线性系统, 完全满足定理中所说的 Lipschitz 条件, 可以表示为式(3)所示的标准形式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(t)u(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{h}(t, \mathbf{x}(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [\delta, \omega, E_q']^T, \quad \mathbf{x}_0 = [\delta_0, \omega_0, E_{q0}']^T \\ \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) &= \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} P_{m0} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} \frac{E_q' U_s}{x_{d\Sigma}'} \sin \delta \\ -\frac{1}{\tau_d'} E_q' + \frac{1}{\tau_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_{d\Sigma}'} U_s \cos \delta \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}(t) &= \left[\frac{1}{\tau_{d0}}, 0, 0 \right]^T, \quad u = U_f \end{aligned}$$

2 控制器设计方法

2.1 迭代学习过程

采用式(4) PID 型迭代学习控制律^[6], 经过反复的迭代学习, 逐步达到最优的控制输出 $u_d(t)$ 。

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Gamma_p e_k(t) + \Gamma_d \dot{e}_k(t) + \Gamma_i \int_0^t e_k(s) ds \quad (4)$$

式中 $e_k(t) = y_d(t) - y_k(t)$; $u(t)$ 为同步发电机的励磁电压 U_f ; $y(t)$ 为同步发电机的机端电压 U_i ; $y_d(t)$ 为期望轨迹上的输出; y_k 为第 k 次迭代的输出; $e_k(t)$ 为第 k 次输出误差; $\Gamma_p, \Gamma_d, \Gamma_i$ 为学习增益; 下标 k 表示 k 次迭代。

收敛的充分条件为

$$\max_{t \in [0, T]} \|\mathbf{I} - \Gamma_d \dot{\mathbf{h}}_x(t, \mathbf{x}(t))\| \mathbf{g}(t) < 1 \quad (5)$$

迭代至期望轨迹时的控制为

$$u_d(t) = \Gamma_p e(t) + \Gamma_d \dot{e}(t) + \Gamma_i \int_0^t e(s) ds$$

2.2 最小二乘法拟合控制器参数

迭代学习达到最优控制输出时, 相应的各状态变量值 $E_q', \dot{E}_q', \cos \delta, e, \dot{e}, \int e$ 为已知, 且都为时间的函数, 由式(1)所示的动态方程可知, 该被控系统的控制律应由各状态变量 $E_q', \dot{E}_q', \delta$ 等组合而成, 并且加入误差的比例项 e , 微分项 $\dot{e}$ 和积分项 $\int e$ 才能达到最优的控制效果, 可以假设控制律具有如下形式:

$$u = K_1 E_q' + K_2 \dot{E}_q' + K_3 \cos \delta + K_4 \int_0^t e dt E_q \quad (6)$$

设 $E_q' = x, \dot{E}_q' = y, \cos \delta = z, \int_0^t e dt = u$, 如式(6)所

示控制律, 式中的 u 即为最优控制, $E_q', \dot{E}_q', \delta, e, \dot{e}, \int e$ 为相应的已知量, 需要求解的是 K_1, K_2, K_3, K_4 。采用最小二乘法拟合, 构造如下函数:

$$S(K_1, K_2, K_3, K_4) = \sum_{i=0}^{51} [u_{di} - (K_1 E_q' + K_2 \dot{E}_q' + K_3 \cos \delta + K_4 \int_0^t e dt E_q)]^2$$

其物理意义为: 式(6)所设定的控制 u 与期望控制 u_d 之间的最小平方差。当 $\frac{\partial S}{\partial K_1}, \frac{\partial S}{\partial K_2}, \frac{\partial S}{\partial K_3}, \frac{\partial S}{\partial K_4}$ 各项为零时, $S(K_1, K_2, K_3, K_4)$ 达到最小, 即式(6)所设定的控制 u 与期望控制 u_d 之差达最小。则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial K_1} &= -2 \sum_{i=0}^n [u_{di} - (K_1 x_i + K_2 y_i + K_3 z_i + K_4 u_i)] x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial K_2} &= -2 \sum_{i=0}^n [u_{di} - (K_1 x_i + K_2 y_i + K_3 z_i + K_4 u_i)] y_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial K_3} &= -2 \sum_{i=0}^n [u_{di} - (K_1 x_i + K_2 y_i + K_3 z_i + K_4 u_i)] z_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial K_4} &= -2 \sum_{i=0}^n [u_{di} - (K_1 x_i + K_2 y_i + K_3 z_i + K_4 u_i)] u_i = 0 \end{aligned}$$

根据以上方程整理可得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n u_{di} x_i &= K_1 \sum_{i=0}^n x_i^2 + K_2 \sum_{i=0}^n x_i y_i + K_3 \sum_{i=0}^n x_i z_i + K_4 \sum_{i=0}^n x_i u_i \\ \sum_{i=0}^n u_{di} y_i &= K_1 \sum_{i=0}^n x_i y_i + K_2 \sum_{i=0}^n y_i^2 + K_3 \sum_{i=0}^n y_i z_i + K_4 \sum_{i=0}^n y_i u_i \\ \sum_{i=0}^n u_{di} z_i &= K_1 \sum_{i=0}^n x_i z_i + K_2 \sum_{i=0}^n y_i z_i + K_3 \sum_{i=0}^n z_i^2 + K_4 \sum_{i=0}^n z_i u_i \\ \sum_{i=0}^n u_{di} u_i &= K_1 \sum_{i=0}^n x_i u_i + K_2 \sum_{i=0}^n y_i u_i + K_3 \sum_{i=0}^n z_i u_i + K_4 \sum_{i=0}^n u_i^2 \end{aligned}$$

写成矩阵形式为 $\mathbf{E}\mathbf{K} = \mathbf{U}$, 则 $\mathbf{K} = \mathbf{E} / \mathbf{U}$, 其中

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n x_i^2 & \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n x_i z_i & \sum_{i=0}^n x_i u_i \\ \sum_{i=0}^n x_i y_i & \sum_{i=0}^n y_i^2 & \sum_{i=0}^n y_i z_i & \sum_{i=0}^n y_i u_i \\ \sum_{i=0}^n x_i z_i & \sum_{i=0}^n y_i z_i & \sum_{i=0}^n z_i^2 & \sum_{i=0}^n z_i u_i \\ \sum_{i=0}^n x_i u_i & \sum_{i=0}^n y_i u_i & \sum_{i=0}^n z_i u_i & \sum_{i=0}^n u_i^2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{U} &= \left[\sum_{i=0}^n u_{di} x_i, \sum_{i=0}^n u_{di} y_i, \sum_{i=0}^n u_{di} z_i, \sum_{i=0}^n u_{di} u_i \right]^T \\ \mathbf{K} &= [K_1, K_2, K_3, K_4]^T \end{aligned}$$

2.3 参数拟合

通过在 Matlab 环境下的编程计算得到 K_1, K_2, K_3, K_4 , 将其代入式(6)即得所求控制律。为了实现式(6)所示的控制律, 需要测得发电机 E_q', δ 。目前, 已经发展了多种测量发电机参数的技术, 可以准确地测量出系统内的发电机功角、转速和空载电势, 完全满足励磁控制的要求, 具体方法见参考文献[7-9]。

3 仿真研究

本文采用 Matlab / Simulink 仿真软件包的电力

系统模块 (PSB)^[10],对发电机励磁控制系统进行仿真研究,从而设计出满足系统性能要求的励磁控制器。被研究的单机无穷大系统属于仿射非线性系统^[1],采用式(1)所示的三阶模型,完全满足参考文献[4]中定理 4.10 中 Lipschitz 条件。

单机无穷大系统同图 1,额定容量为 200 MV·A、额定电压 13.8 kV 的三相发电机通过 Δ-Y 连接的 210 MV·A 变压器与母线电压为 230 kV 的无穷大系统相连,系统参数如下(未标单位的都为标值):

$\omega_0=1;D=5.0;H=3.195\text{ s};\tau_{d0}=4.49\text{ s}$
 $x'_{d\Sigma}=1.606;x_{d\Sigma}=2.615;x_d=1.305$
 $x'_d=0.296;U_s=1;x_{d\Sigma}=1.784;x_q=0.474$

用式(4)所示控制律,其中, $\Gamma_p=10;\Gamma_d=1.6;\Gamma_i=1.3$ 。仿真波形见图 2。迭代学习结束时同步发电机的机端电压如图 2(a)所示,也即通过迭代跟踪上了期望轨迹,而理想的机端电压是在正常运行和故障情况下都能维持额定值,选取期望轨迹时考虑了实际的可达性,即机端电压可以在性能允许的范围

内有一些波动。此时,被控制系统输入的控制达到最优控制 u_d ,通过 Matlab 编程计算得到:

$K_1=0.408\ 5\qquad K_2=4.135\ 9$
 $K_3=-0.001\ 8\qquad K_4=1.028\ 9$

代入式(6)得到控制律:

$$u=0.408\ 5\ E'_q+4.135\ 9\ \dot{E}'_q-0.001\ 8\ \cos\delta-1.028\ 9\int_0^t e\ dt\ E_q\qquad (7)$$

最优控制 u_d 和式(7)拟合控制的仿真波形 u 如图 2(b)所示,它们之间的误差即拟合误差曲线如图 2(c)所示。

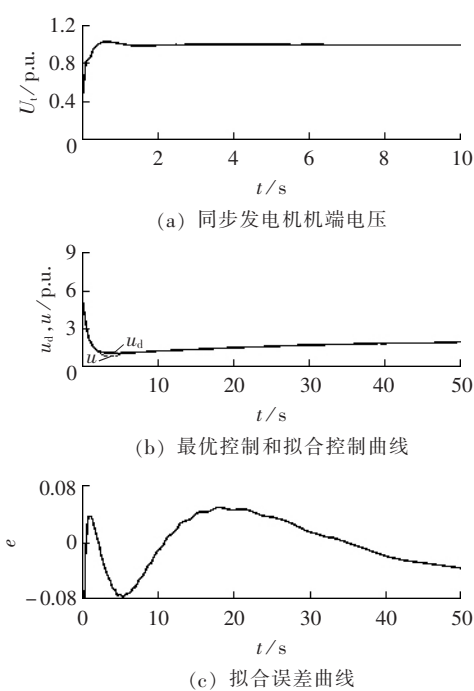


图 2 仿真波形

Fig.2 Simulation waves

考虑以下 2 种运行方式,采用式(6)控制律的控制效果如图 3 所示(1 为方式 1,2 为方式 2)。

a. 方式 1 为原动机功率 P_{m0} 保持 0.75 p.u. 恒定不变;

b. 方式 2 为 P_{m0} 由 0.95 p.u. 降至 0.5 p.u.。

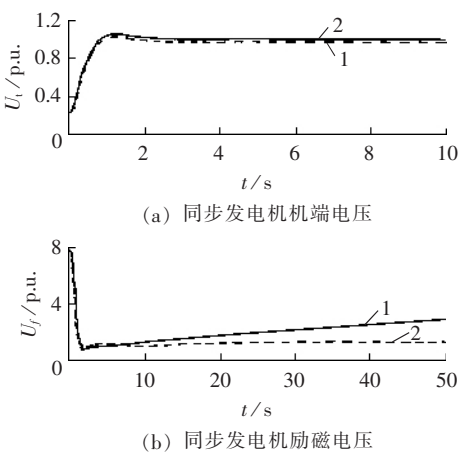


图 3 验证控制效果的仿真波形

Fig.3 Simulation waves for validation

从波形可知,2 种运行状态下,采用拟合的最优控制,当输入机端电压参考值为 1 p.u. 时,输出波形在 2 s 左右就能恢复到要求维持的电压值,并且其超调量不超过 10 %,在控制性能允许的范围内。

4 结语

本文基于迭代学习控制,提出了单机无穷大系统的励磁控制器参数拟合的方法,实现了在整个时间轴上的完全跟踪,而不受某一时间区间的限制,并且在输入信号改变时,也能实现最优控制。设计出的励磁控制器具有较佳的动态特性和较强的鲁棒性。但要使这些方法在实际控制中得到推广与应用,还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993.
[2] 李崇坚,郭国晓,高龙,等. 电力系统非线性 PID 励磁控制器[J]. 清华大学学报:自然科学版,2000,40(3):48-50.
LI Chong-jian, GUO Guo-xiao, GAO Long, et al. Nonlinear PID exciting controller for power systems[J]. **Journal of Tsinghua University: Sci. & Tech.**, 2000, 40(3): 48-50.
[3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
[4] 林辉,王林. 迭代学习控制理论[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.
[5] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 北京:中国电力出版社,1996.
[6] 孙明轩,黄宝健. 迭代学习控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
[7] 闫苏莉. 电力系统功角测量方案的研究[J]. 西安石油学院学报,1999,14(3):30-41.

- YAN Su-li. A study on the measuring method of power angle in an electric power system[J]. **Journal of Xi'an Petr. Inst.**, 1999, 14(3): 30-41.
- [8] 金基圣, 南德哲, 姜佰峰. 电网动态稳定实时监测系统[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(10): 17-19.
- JIN Ji-sheng, NAN De-zhe, JIANG Bai-feng. Real-time dynamic stability supervision system for electric power network[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(10): 17-19.
- [9] 苗世洪, 王少荣, 刘沛, 等. 基于 GPS 的电网状态监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 52-54.
- MIAO Shi-hong, WANG Shao-rong, LIU Pei, et al. The Design and Implementation of the GPS based real time monitoring system for the states of power network[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2000, 24(12): 52-54.
- [10] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- (责任编辑: 李育燕)
-
- 作者简介:
- 徐 敏(1963-), 女, 浙江绍兴人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制、迭代学习控制等(E-mail: xumin-8660@163.com);
- 林 辉(1957-), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为迭代学习控制、运动控制、故障诊断等。

Excitation controller design based on iterative learning control

XU Min, LIN Hui

(Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A method to design the excitation controller of single-machine infinite-bus system is proposed based on iterative learning control theory, which removes the restriction of perfect tracking in limited time span. It takes the memory and modification of expected control $u_d(t)$ instead of output control $u(t)$, and fits the controller parameters by using the least square method. The control law can be obtained by making minimal the difference between set control and expected control. An excitation control system for generator is simulated with Matlab. Results show its good dynamic performance and strong robusticity.

This project is supported by Aviation Science Fund(04F53036).

Key words: iterative learning control; single-machine infinite-bus system; excitation control; simulation
