

# 基于迭代学习控制理论的励磁控制研究

徐敏, 林辉

(西北工业大学自动控制学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 将迭代学习控制推广应用到具有强非线性的电力系统中, 针对单机 - 无穷大系统的三阶微分动态方程, 对混合型迭代学习控制律的收敛性进行了分析, 并首次将其用于同步发电机的励磁控制, 通过迭代学习改善励磁控制器的性能, 具有结构简单, 收敛速度快, 鲁棒性强的特点, 改善了机端电压的品质。采用 Matlab/Simulink 仿真软件在单机 - 无穷大系统中进行了暂态稳定的仿真研究, 结果表明该励磁控制方式鲁棒性强, 收敛速度快, 有利于提高电力系统的暂态稳定性。

**关键词:** 迭代学习控制; 同步发电机; 励磁控制; 暂态稳定; Matlab/Simulink

**中图分类号:** TP13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)14-0039-04

## 0 引言

同步发电机的暂态稳定控制是提高电力系统稳定性的一种经济有效的方法。PD 控制由于其结构简单、参数易调和良好的适应能力, 多年来被广泛采用, 目前经典 PD 控制方式在控制领域仍然占着举足轻重的作用。尽管现代控制理论已有了相当的发展, 各种控制结构也应运而生, 由于系统的精确数学模型难以获得而使其应用受到了较大的限制。电力系统是一个结构多变的大规模强非线性系统, 采用局部线性化方法而设计的常规经典 PD 控制器在系统遭受大扰动或系统变换运行方式时无法取得理想的控制效果, 必须寻找新的控制方法。而电力电子技术中的广泛应用进一步增加了系统的复杂程度, 这使得输配电网络的安全性、性能、传输控制的研究必须在非线性的基础上展开, 非线性励磁控制方式是励磁控制方式发展的必然趋势。

迭代学习控制方法是一种比较新的控制方法, 与现有的控制方式相比, 迭代学习控制的特点在于它可以充分利用前几次的控制信息例如跟踪误差和控制输入等构成当前的控制输入信号, 而且不依赖于被控系统的详细模型。迭代学习控制对很广的一大类非线性系统在不依赖于被控对象的数学模型下, 在给定的区间内通过学习能精确地跟踪给定的轨迹。它具有方法简单、控制器能在线学习、使得控制性能越来越好的特点。

本文在参考文献 [1] 的基础上对混合型迭代学习控制律的收敛性进行了分析, 推导出收敛的充分条件, 并首次将它应用于同步发电机的励磁控制, 通

过迭代学习改善控制性能, 具有结构简单, 收敛速度快, 鲁棒性强的特点, 改善了机端电压的品质, 有利于提高系统的暂态稳定性。

## 1 数学模型

如图 1 所示单机 - 无穷大系统, 假定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) 所示的三阶微分方程表示, 方程中各符号的含义见参考文献 [3]。

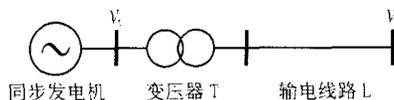


图 1 单机无穷大系统

Fig 1 Single machine infinite system

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{1}{H} P_m - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{1}{H} \frac{E_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta \\ E_q = -\frac{1}{T_d} E_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_{d\Sigma}} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} V_f \end{cases} \quad (1)$$
$$y(t) = V_t = \sqrt{V_{td}^2 + V_{tq}^2} = h(t, x(t))$$

其中:

$$V_{td} = \frac{x_q V_s \sin \delta}{x_{q\Sigma}} \quad V_{tq} = \frac{(x_{d\Sigma} - x_d) E_q + x_d V_s \cos \delta}{x_{d\Sigma}}$$

写成标准形式如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(t, x(t)) + g(t) u(t), x(0) = x_0 \\ y(t) = h(t, x(t)) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$x(t) = [\delta, \omega, E_q]^T \quad x_0 = [0, 0, E_{q0}]^T$$

$$f(t, x(t)) = \begin{bmatrix} -\frac{D}{H} P_{m0} - \frac{D}{H} ( \quad ) - \frac{E_q V_s}{H x_{d\Sigma}} \sin \\ \frac{-1}{T_d} E_q + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x_{d\Sigma}}{x_{d\Sigma}} V_s \cos \end{bmatrix}$$

$$g(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$u = V_f$$

## 2 迭代学习控制原理及设计过程

采用混合型学习控制律实现同步发电机的励磁控制,控制律的构成如下:第  $k+1$  次的控制等于第  $k$  次控制再加上第  $k$  次输出误差的各项校正项,如式 (3)所示。

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \int_0^t p(s) \cdot e_k(s) ds + \int_0^t i(s) \cdot e_k(s) ds + d(t) \cdot \dot{e}_k(t) \quad (3)$$

以下简称为  $p$  为学习增益,基本结构如图 2 所示。

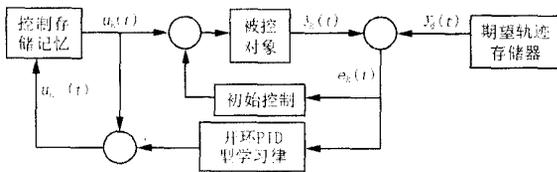


图 2 混合型迭代学习控制的基本结构

Fig 2 Basic configuration of hybrid iterative learning control

### 2.1 算法收敛性分析

学习控制收敛性问题在于研究学习律满足什么条件下当学习次数  $k$  时,  $y_k(t), x_k(t), u_k(t)$  是否趋于  $y_d(t), x_d(t), u_d(t)$ , 该问题等价于当  $k$  时  $y_k(t), x_k(t), u_k(t)$  是否趋于零。

设被控系统为如式 (2) 所示的非线性过程,其输出方程中不含直接传输项,如果  $p(t), d(t)$  和  $i(t)$  为有界的,且满足

$$A1 \quad |f(t, x_1) - f(t, x_2)| \leq M \|x_1 - x_2\|, \forall x_1, x_2 \in R^n$$

$$h(t, x_1) - h(t, x_2) \leq M \|x_1 - x_2\|, \forall x_1, x_2 \in R^n$$

A2 每次运行时的初始状态误差  $\{x_k(0)\}_{k=0}$  为一收敛到零的序列;

A3 存在唯一的理想控制  $u_d(t)$ , 使得系统的状态和输出为期望值;

A4 在  $t \in [0, T]$  中  $\dot{h}(t, x(t))$  存在,且

$h(t, x(t)), \dot{h}(t, x(t))$  有界。

定义:

$$\begin{cases} e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \\ x_k(t) = x_d(t) - x_k(t) \\ y_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \\ u_k(t) = u_d(t) - u_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $y_d(t), x_d(t), u_d(t)$  为期望轨迹上的输出,状态和控制;  $y_k(t), x_k(t), u_k(t)$  为第  $k$  次迭代的输出,状态和控制,下标  $k$  表示  $k$  次迭代;  $u(t)$  为同步发电机的励磁电压  $V_f$ ;  $y(t)$  为同步发电机的机端电压  $V_t$ ;  $e_k(t)$  为第  $k$  次输出误差。

$$y_k(t) = \dot{y}_d(t) - \dot{y}_k(t) = \dot{h}(t, x_d(t)) - \dot{h}(t, x_k(t)) = \dot{h}_t(t, x_d(t)) + \dot{h}_x(t, x_d(t)) \cdot \dot{x}_d(t) - [\dot{h}_t(t, x_k(t)) + \dot{h}_x(t, x_k(t)) \cdot \dot{x}_k(t)]$$

由式 (3), 式 (4) 可得

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) - \int_0^t p(s) y_k(s) ds - \int_0^t i(s) y_k(s) ds - d(t) \dot{y}_k(t)$$

令

$$y_k(t) = y_d(t) - y_k(t) = h(t, x_d(t)) - h(t, x_k(t))$$

根据条件 A4 可知,存在  $M_1 > 0$ , 使

$$y_k(t) < M_1 \cdot x_k(t)$$

所以有

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) - \int_0^t p(s) h_1(t, x_k(s)) ds - \int_0^t d(s) [\dot{h}_t(t, x_d(s)) + \dot{h}_x(t, x_d(s)) \cdot \dot{x}_d(s) - \dot{h}_t(t, x_k(s)) - \dot{h}_x(t, x_k(s)) \cdot \dot{x}_k(s)] ds - \int_0^t i(s) h_1(s, x_k(s)) ds = u_k(t) - \int_0^t p(s) h_1(t, x_k(s)) ds - \int_0^t d(s) [\dot{h}_t(t, x_d(s)) - \dot{h}_t(t, x_k(s)) + \dot{x}_d(s) \cdot (\dot{h}_x(t, x_d(s)) - \dot{h}_x(t, x_k(s))) + \dot{h}_x(t, x_k(s)) \cdot \dot{x}_k(s)] ds - \int_0^t i(s) h_1(s, x_k(s)) ds = u_k(t) - \int_0^t p(s) h_1(t, x_k(s)) ds - \int_0^t d(s) [\dot{h}_t(t, x_d(s)) - \dot{h}_t(t, x_k(s)) + \dot{x}_d(s) \cdot (\dot{h}_x(t, x_d(s)) - \dot{h}_x(t, x_k(s))) + \dot{h}_x(t, x_k(s)) \cdot \dot{x}_k(s)] ds - \int_0^t i(s) h_1(s, x_k(s)) ds = u_k(t) - \int_0^t p(s) h_1(t, x_k(s)) ds - \int_0^t d(s) [\dot{h}_t(t, x_d(s)) - \dot{h}_t(t, x_k(s)) + \dot{x}_d(s) \cdot (\dot{h}_x(t, x_d(s)) - \dot{h}_x(t, x_k(s))) + \dot{h}_x(t, x_k(s)) \cdot \dot{x}_k(s)] ds - \int_0^t i(s) h_1(s, x_k(s)) ds \quad (5)$$

整理得到:

$$u_{k+1}(t) = [1 - d(t) \cdot \dot{h}_x(t, x_k(t)) \cdot g(t)] \cdot u_k(t) - \int_0^t p(s) h_1(t, x_k(s)) ds - \int_0^t d(s) \cdot [\dot{h}_t(t, x_d(s)) -$$

$$\begin{aligned} & \dot{h}_r(t, x_k(t)) + (f(t, x_d(t)) + g(t) \cdot \dot{h}_x(t, x_d(t)) - \\ & \dot{h}_x(t, x_k(t)) + \dot{h}_x(t, x_k(t)) \cdot f(t, x_k(t))] - \\ & \int_0^t h_1(s, x_k(s)) ds \end{aligned}$$

定义算子  $P: C_r[0, T] \rightarrow C_r[0, T]$  为

$$P u(t) = [I - \int_0^t \dot{h}_x(t, x_k(t)) \cdot g(t)] \cdot u(t) \quad (6)$$

定义算子  $Q_k: C_r[0, T] \rightarrow C_r[0, T]$  为

$$\begin{aligned} Q_k(u)(t) = & - \int_0^t h_1(t, x_k(t)) - \int_0^t [\dot{h}_r(t, x_d(t)) - \dot{h}_r(t, x_k(t)) + (f(t, x_d(t)) + g(t) \cdot \\ & (\dot{h}_x(t, x_d(t)) - \dot{h}_x(t, x_k(t))) + \dot{h}_x(t, x_k(t)) \cdot \\ & f(t, x(t))] \end{aligned} \quad (7)$$

由式 (5)、(6)、(7) 可得

$$\begin{aligned} u_{k+1}(t) = & P u_k(t) + Q_k(u_k)(t) = (P + Q_k) \cdot \\ (u_k)(t) = & (P + Q_k) \cdot (P + Q_{k-1})(u_{k-1})(t) = (P + \\ Q_k) \cdot & (P + Q_{k-1}) \dots (P + Q_0) \cdot (u_0)(t) \end{aligned} \quad (8)$$

以下对  $Q_k$  作出估计:

根据条件 A1, A4 可以得到

$$\begin{aligned} Q_k(u)(t) = & \int_0^t M_1 \cdot x(t) + \int_0^t M_2 \cdot x \\ (t) + & \int_0^t M_3 \cdot \sup_{t \in [0, T]} f(t, x_d(t)) + g(t) \cdot \\ x(t) + & \int_0^t M_4 \cdot x(t) + \int_0^t M_5 \cdot \\ x(t) \end{aligned} \quad (9)$$

如果  $x(t)$  是动态方程 (2) 的解, 则

$$x(t) = x(0) + \int_0^t g(s) u(s) ds$$

$$x(0) + \int_0^t M_0 x(s) ds + \int_0^t g(s) u(s) ds$$

由 Bellman - Gronwall 引理知, 存在  $M_6 > 0$  使得

$$x(t) \leq M_6 (x(0) + \int_0^t u(s) ds) \quad (10)$$

由式 (9)、(10) 知, 存在  $M > 0$  使得

$$Q_k(u)(t) \leq M (x(0) + \int_0^t u(s) ds)$$

同理有

$$Q_k(u)(t) \leq M (x_k(0) + \int_0^t u(s) ds) \quad (11)$$

根据式 (8)、(11) 及条件 A2 和参考文献 [1] 中的定理 3.2 得到算法收敛的充分条件是:

$$\max_{t \in [0, T]} [I - \int_0^t \dot{h}_x(t, x(t)) \cdot g(t)] < 1 \quad (12)$$

## 2.2 设计思想

1) 当存在干扰时, 励磁调节必须能维持机端电压不变, 作为调节控制的目标, 在迭代学习过程中跟踪的期望轨迹  $u_d$  应该是  $V_t = 1$  的直线。

2) 初始控制的作用是为了不至于使控制过程有大幅度的偏差, 另外也可以充分利用已知的系统信息, 使学习过程收敛加速。

3) 实施控制时, 先设定初始值  $u(0) = 0$ , 通过迭代学习, 通过控制量  $V_f$  控制机端电压维持在  $V_t = 1$ , 功角、角速度和励磁电压  $V_f$  在发生三相接地故障切除后, 经过 1 s 左右收敛至稳态值。

## 3 仿真研究

本文采用 MATLAB 环境下 SIMULINK 中的仿真软件包—电力系统模块 (PSB), 对发电机励磁控制系统进行仿真研究, 并按其性能要求进行分析, 从而设计出满足系统性能要求的励磁控制系统。被研究的单机-无穷大系统采用式 (1) 所示的三阶模型, 可以化为式 (2) 所示的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。

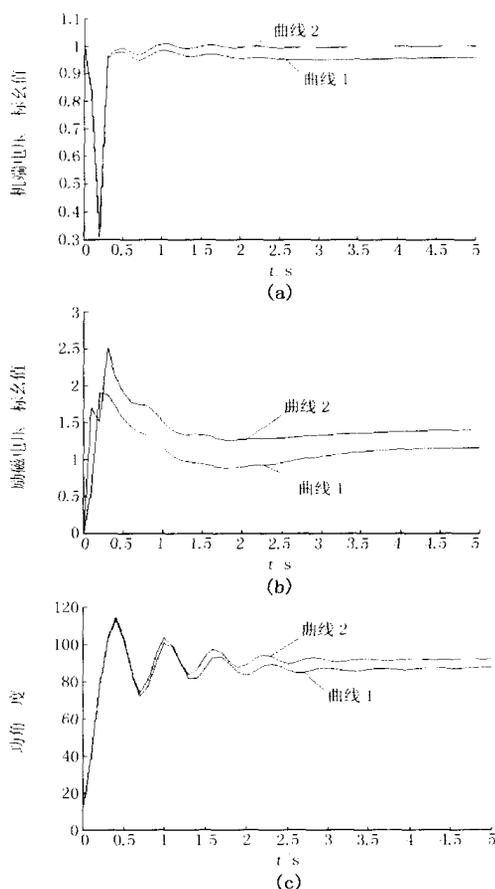


图 3 开环 PD 型迭代学习控制仿真波形

Fig 3 Simulation waves of open-loop PD-type iterative learning control

单机无穷大系统见图 1 所示, 额定容量为 200 MVA, 额定电压 13.8 kV 的三相发电机通过 - Y

连接的 210 MVA 的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:

$$\begin{aligned} & \omega_0 = 1 \text{ p.u.}; \quad D = 5.0 \text{ p.u.}; \quad H = 4.0 \text{ s}; \quad T_{d0} \\ & = 6.9 \text{ s}; \quad x_d = 1.863 \text{ p.u.}; \quad x_d' = 1 \text{ p.u.}; \quad x_q = 1 \\ & \text{p.u.}; \quad \delta_0 = 50^\circ; \quad P_{m0} = 0.8 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

按算法的收敛条件可设置控制器的参数,设置参数的过程同参考文献 [2]。

$$k_p = 3; \quad k_i = 0.3; \quad k_d = 1.1$$

初始控制为一 P 型控制器,设置的比例增益系数  $K_p = 1.5$ , 仅仅是为了保证迭代开始时系统为收敛的。 $t = 0.1 \text{ s}$  时,在变压器的 230 kV 侧母线上发生三相对地短路, $t = 0.2 \text{ s}$  时故障切除。开环 PD 型迭代学习控制仿真波形如图 3 所示,曲线 1 为采用 PD 型控制算法的波形,曲线 2 为采用开环 PD 型的迭代学习控制方式(迭代 8 次)。由图 3(a)的输出仿真波形可以看到,采用开环 PD 型迭代学习控制方法在 1 s 左右就把机端电压恢复到允许范围内,与常规的控制方式相比,其维持机端电压的能力很强,励磁电压波动也很少。

#### 4 结束语

迭代学习控制方法在同步发电机励磁控制领域的应用还处于起步阶段,采用混合型迭代学习控制方法实现同步发电机的励磁控制,调压效果理想,实现方法简单,具有一定的实用价值。与常规的 PD 控制方式相比较,本文采用的迭代学习控制算法具有更好的收敛性和稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 林辉,王林.迭代学习控制理论[M].北京:西北工业大学出版社,1998.  
L N Hui, WANG L in. Theories of Iterative Learning Control[M]. Beijing: Northwest Polytechnic University Press, 1998.

- [2] 孙明轩,黄宝健.迭代学习控制[M].长沙:国防工业出版社,1999.  
SUN Ming-xuan, HUANG Bao-jian. Iterative Learning Control[M]. Changsha: National Defense Industry Press, 1999.
- [3] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制[M].北京:科学出版社,1993.  
LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Nonlinear Control in Power System[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [4] Zhu C, et al. A New Nonlinear Voltage Controller for Power Systems[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, (1).
- [5] Abido M A, et al. Coordinated Design of a PSS and a SVC-based Controller to Enhance Power System Stability[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25: 695-704.
- [6] Galaza M, et al. An Energy-shaping Approach to the Design of Excitation-control of Synchronous Generators[J]. 2003, 39: 111-119.
- [7] de Leonmoralesa J, et al. Nonlinear Control for Small Synchronous Generator[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23: 1-11.
- [8] 孙元章,赵枚,黎雄,等.考虑发电机励磁控制的电力系统暂态稳定分析[J].电力系统自动化,2001,25(18):1-6.  
SUN Yuan-zhang, ZHAO Mei, LI Xiong, et al. Direct Method of Transient Stability Analysis for Power System with Excitation Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(18): 1-6.

收稿日期: 2004-10-25; 修回日期: 2004-12-23

作者简介:

徐敏(1963-),女,在读博士,副教授,从事迭代学习控制等方面的研究; E-mail: xumin-8660@163.com

林辉(1957-),男,教授,博士生导师,从事迭代学习控制,运动控制,故障诊断等方面的研究。

### Research on excitation controller based on theories of iterative learning control

XU Min, L N Hui

(School of Automatic Control, Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Iterative learning control is generalized to power system with strong nonlinear. The convergence of iterative learning control is analyzed in three-order differential dynamic equation of single-machine infinite system. It is the first time that the control law is applied in the excitation control of synchronous machine. The controller performance is improved by iterative learning, with the characteristic of simple makeup, fast convergence and strong robustness. Transient stability in single-machine infinite system is simulated with Matlab/Simulink. Strong robustness, good controllability and transient stability enhancement are achieved.

**Key words:** iterative learning control; synchronous machine; excitation control; transient stability; Matlab/Simulink